



Politechnika Wroclawska

DZIEDZINA: Nauki inżynieryjno-techniczne

DYSCYPLINA: Inżynieria mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

Metoda syntezy mobilnego robota do zadań inspekcyjnych z uwzględnieniem systemów wizyjnych

Mgr inż. Mateusz Fiedeń

Promotor:

dr hab. inż. Krzysztof Jacek Bałchanowski, prof. uczelni

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Jarosław Szrek, prof. uczelni

Słowa kluczowe: omnigąsienica, omnipojazd, gąsienica wielokierunkowa

WROCŁAW 2024

Streszczenie

W niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono metodę syntezy i analizy wielokierunkowego robota omni-gąsienicowego, o gąsienicach całkowicie zachodzących. Roboty omni-gąsienicowe to pojazdy wyposażone w specjalnie zmodyfikowane gąsienicowe układy bieżne. Na poszczególnych ogniwach gąsienic znajdują się dodatkowe rolki toczne (napędzane bądź pasywne), które umożliwiają uzyskanie ruchu w kierunku innym niż oś główna pojazdu.

We wstępie niniejszej pracy scharakteryzowano podział robotów mobilnych pod względem ich zastosowań, sposobów realizacji ruchu, a także typów podwozi. Wyodrębniono istniejące warianty podwozi omni-gąsienicowych. Przeanalizowano aktualny stan wiedzy dotyczący pojazdów omni-gąsienicowych i zidentyfikowano luki badawcze. Na tej podstawie określono cel główny pracy, którego osiągnięcie umożliwi uzyskanie nowej wiedzy w zakresie podjętej tematyki.

Początkowa część pracy zawiera opis rozważań nad modelem kinematycznym modułu gąsienic pojazdu omni-gąsienicowego, w skład którego wchodzi dwa niezależnie napędzane układy bieżne. Przedstawiono w niej równania ruchu dla pojedynczego modułu, wyprowadzono zależności umożliwiające wyznaczenie kierunku i prędkości ruchu korpusu względem podłoża przy zadanych prędkościach liniowych poszczególnych gąsienic. Następnie opisano budowę modelu numerycznego, na podstawie którego przeprowadzono szereg symulacji dynamicznych. Wyniki symulacji porównano z danymi uzyskanymi na podstawie modelu kinematycznego.

W kolejnej części pracy opisano projekt i wykonanie prototypu robota omni-gąsienicowego OMP2024_1. Opisano badania eksperymentalne parametrów jazdy OMP2024_1, potwierdzające występowanie zjawiska zakrzywienia trajektorii ruchu, obecnego w literaturze dotyczącej pojazdów omni-gąsienicowych. Zjawisko to polega na stopniowej, niezamierzonej zmianie orientacji kątowej pojazdu omni-gąsienicowego podczas ruchu pojazdu. Na podstawie wyników badań zaproponowano algorytm statycznej korekcji kierunku jazdy, który umożliwia przeciwdziałanie temu zjawisku. Następnie opisano badania weryfikujące pozytywny wpływ zastosowania algorytmu statycznej korekcji kierunku na dokładność odwzorowywania założonej trajektorii ruchu.

Kolejna część pracy zawiera opis badań dotyczących oporów ruchu przetaczania swobodnej rolki tocznej. Badania obejmowały sprawdzenie kształtu rolki, typu podłoża, obciążenia zewnętrznego, kąta orientacji oraz prędkości ruchu na rozkład sił tarcia pomiędzy podłożem a swobodną rolką toczną. Na podstawie tej wiedzy zaprojektowano pełnowymiarowego robota omni-gąsienicowego OMP2024_2. Opisano metodykę projektowania, założenia konstrukcyjne oraz proces budowy. Pojazd ten posłużył do przeprowadzenia empirycznych badań jazdy robota omni-gąsienicowego. Przedstawiono badania algorytmu dynamicznej korekcji kierunku jazdy, który na podstawie odczytów z sensorów przeciwdziała niepożądanemu utracie założonej orientacji kątowej korpusu pojazdu w trakcie ruchu. Następnie przedstawiono moduły umożliwiające detekcję przeszkód, wykrywanie ludzi, a także reagowanie na przeszkody napotkane podczas ruchu po zadanej trajektorii w oparciu o dane dostarczane przez system wizyjny.

W końcowej części zamieszczono podsumowanie zawierające wnioski, a także opis aktualnie prowadzonych oraz planowanych badań.

Abstract

In this doctoral thesis, a method for the synthesis and analysis of a multi-directional omnitrack robot, featuring fully overlapping tracks, is presented. Omnitrack robots are vehicles equipped with specially modified tracked drive systems. Additional rolling elements (either driven or passive) are mounted on individual track links, enabling movement in directions other than the vehicle's primary axis.

The introduction of this thesis characterizes the classification of mobile robots based on their applications, modes of locomotion, and types of chassis. Existing variants of omnitrack chassis are identified. The current state of knowledge regarding omnitrack vehicles is analyzed, and research gaps are identified. Based on this, the primary objective of the study is determined, with additional aim to acquire new knowledge.

The initial part of the thesis contains a description of considerations regarding the kinematic model of the omnitrack vehicle module, which comprises two independently driven tracked systems. Equations of motion for a single module are presented, and relationships are derived to determine the direction and speed of the body movement relative to the ground given the linear speeds of individual tracks. The construction of a numerical model is then described, which was used to conduct a series of dynamic simulations. The simulation results are compared with data obtained from the kinematic model.

The next part of the thesis describes the design and construction of the OMP2024_1 omnitrack robot prototype. Its focus is on experimental studies of the OMP2024_1 driving parameters, confirming the occurrence of the curvature of the trajectory phenomenon, as described in the literature on omnitrack vehicles. This phenomenon involves the gradual, unintended change in the angular orientation of the omnitrack vehicle that occurs during its movement. Based on the research results, an algorithm for static direction correction was proposed, which counteracts this phenomenon. Further studies describe verifying the positive impact of the static direction correction algorithm on the accuracy of reproducing the intended movement trajectory.

The subsequent section presents studies conducted on the rolling resistance of a free-rolling element. These studies included examining the shape of the roller, type of substrate, external load, orientation angle, and movement speed on the distribution of friction forces between the ground and the free-rolling element. Based on this knowledge, the full-scale OMP2024_2 omnitrack robot was designed. The design methodology, construction assumptions, and building process are described. This vehicle was used to conduct empirical driving tests of the omnitrack robot. The study presents dynamic direction correction algorithm, which counteracts the undesired change of assumed angular orientation of the vehicle body. Additionally, modules enabling obstacle detection, human detection, and response to obstacles on the predetermined movement trajectory, based on data provided by the vision system, which is part of the OMP2024_2 vehicle, are presented.

The final section includes a summary with conclusions, as well as a description of currently ongoing and planned research.

Spis treści

SPIS TREŚCI	- 4 -
1. WSTĘP	- 7 -
1.1	OBSZARY ZASTOSOWAŃ ROBOTÓW MOBILNYCH - 7 -
1.2	PODZIAŁ NAZIEMNYCH ROBOTÓW MOBILNYCH ZE WZGLĘDU NA RODZAJU NAPĘDU - 18 -
1.3	KOŁOWE POJAZDY OMNIKIERUNKOWE I PODZIAŁ ICH NAPĘDÓW - 20 -
1.4	RODZAJE PODWOZI KOŁOWYCH POJAZDÓW OMNIKIERUNKOWYCH - 24 -
1.5	PODZIAŁ GAŚNIENICOWYCH POJAZDÓW OMNIKIERUNKOWYCH ZE WZGLĘDU NA RODZAJ NAPĘDU - 27 -
1.6	CEL BADAŃ I ZAKRES PRACY - 32 -
2. BUDOWA POJAZDÓW OMNIGAŚNIENICOWYCH	- 34 -
3. METODA ANALIZY KINEMATYCZNEJ UKŁADU JAZDY POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO	- 39 -
3.1	ANALIZA KINEMATYCZNA POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO - 39 -
3.2	BADANIA SYMULACYJNE POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO - 51 -
4. BUDOWA ROBOTA OMP2024_1	- 60 -
4.1	ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE - 60 -
4.2	KONSTRUKCJA MECHANICZNA - 61 -
4.3	UKŁAD NAPĘDOWY I STEROWANIE - 66 -
5. BADANIA ROBOTA OMP2024_1	- 69 -
5.1	ZJAWISKO ZAKRZYWIENIA TRAJEKTORII RUCHU - 69 -
5.2	STANOWISKO POMIAROWE - 70 -
5.3	BADANIA RUCHU POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO - 75 -
5.4	BADANIA KOREKTY KIERUNKU RUCHU POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO - 80 -
5.5	WNIOSKI - 85 -
6. BADANIE OPORÓW RUCHU ROLKI TOCZNEJ	- 86 -
6.1	STANOWISKO POMIAROWE - 86 -
6.2	BADANIA KSZTAŁTU I KĄTA ORIENTACJI ROLKI TOCZNEJ - 89 -
6.3	BADANIA PARAMETRÓW JEZDNYCH ROLKI TOCZNEJ - 93 -
6.4	WNIOSKI - 95 -
7. BUDOWA ROBOTA OMP2024_2	- 96 -
7.1	METODA PROJEKTOWANIA POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO O GAŚNIENIACH CAŁKOWICIE ZACHODZĄCYCH - 96 -
7.2	ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE - 98 -
7.3	KONSTRUKCJA MECHANICZNA ROBOTA - 99 -
7.4	UKŁAD NAPĘDOWY ROBOTA - 103 -
7.5	UKŁAD STEROWANIA ROBOTA - 105 -
7.6	AKTYWNA KOMPENSACJA KIERUNKU JAZDY - 108 -
8. BADANIA ROBOTA OMP2024_2	- 111 -
8.1	STANOWISKO POMIAROWE DO BADAŃ W WARUNKACH LABORATORYJNYCH - 111 -
8.2	BADANIA I WERYFIKACJA DOKŁADNOŚCI UKŁADU POMIAROWEGO - 113 -
8.3	BADANIA RUCHU POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO W WARUNKACH LABORATORYJNYCH - 117 -
8.4	STANOWISKO POMIAROWE DO BADAŃ W WARUNKACH RZECZYWISTYCH - 123 -
8.5	BADANIA POJAZDU OMNIGAŚNIENICOWEGO W WARUNKACH RZECZYWISTYCH - 125 -
8.6	WNIOSKI - 130 -
9. SYSTEM WIZYJNY ROBOTA OMP2024_2	- 131 -

9.1	WYKRYWANIE PRZESZKÓD I LUDZI	- 131 -
9.2	OMIJANIE PRZESZKÓD	- 136 -
9.3	KONCEPCJA IMPLEMENTACJI MODUŁÓW ROZPOZNAWANIA OTOCZENIA	- 142 -
10.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	- 143 -
11.	BIBLIOGRAFIA	- 146 -

Spis oznaczeń

n – numer układu bieżnego $n = (1, \dots 4)$,

b_n – układ bieżny n ,

g_n – gąsienica układu bieżnego n ,

m_n – napęd układu bieżnego n ,

\dot{q}_n, v_n – prędkość liniowa gąsienicy n ,

r_n^B – promień koła biernego przekładni współpracującej z gąsienicą n ,

r_n^M – promień koła czynnego przekładni współpracującej z gąsienicą n ,

ω_n^M – prędkość kątowa koła czynnego przekładni współpracującej z gąsienicą n ,

ω_n^B – prędkość kątowa koła biernego przekładni współpracującej z gąsienicą n ,

k – korpus robota omnigąsienicowego,

R – punkt na korpusie, geometryczny środek korpusu k ,

L_{12} – moduł złożony z układów bieżnych b_1 i b_2 ,

L – punkt na korpusie, geometryczny środek modułu L_{12} ,

P_{34} – moduł złożony z układów bieżnych b_3 i b_4 ,

P – punkt na korpusie, geometryczny środek modułu P_{34} ,

α – kąt orientacji rolki tocznej,

γ – orientacja kątowa wektora kierunku ruchu korpusu k pojazdu,

φ – orientacja kątowa korpusu k ,

μ – trajektoria ruchu punktu R ,

x, y – osie globalnego układu współrzędnych, powiązanego z podstawą,

x^l, y^l – osie lokalnego układu współrzędnych, powiązanego z korpusem k , zaczepionego w punkcie R ,

$x_R(t), y_R(t)$ – współrzędne punktu R w globalnym układzie współrzędnych w chwili t ,

[]^T – indeks górny, opisana zmienna jest wartością zadaną bądź teoretyczną,

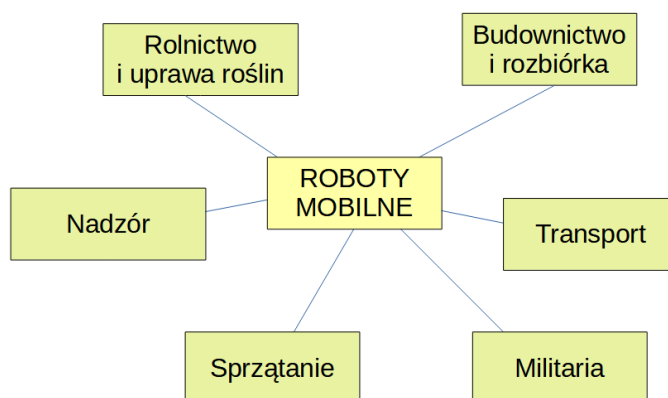
[]^Z – indeks górny, opisana zmienna jest wartością zmierzoną,

1. Wstęp

Roboty mobilne z zamkniętych placówek badawczych i targów innowacji przeniosły się do rzeczywistości życia codziennego. Światowy rynek robotów mobilnych w roku 2023 miał wartość około 20,3 miliardów dolarów [1]. Szacuje się, na podstawie najnowszych prognoz, że do roku 2028 jego wartość wzrośnie niemal dwukrotnie. Autonomiczne wózki transportowe przewożące towary w magazynach, autonomiczne kosiarki w przydomowych ogródkach, inteligentne odkurzacze w domach, roboty sterowane w trybie teleoperacji czy roboty saperskie stają się nie tylko typowym wyposażeniem firm, ale również towarem, który może zostać nabyty przez przeciętnego konsumenta [2, 3].

1.1 Obszary zastosowań robotów mobilnych

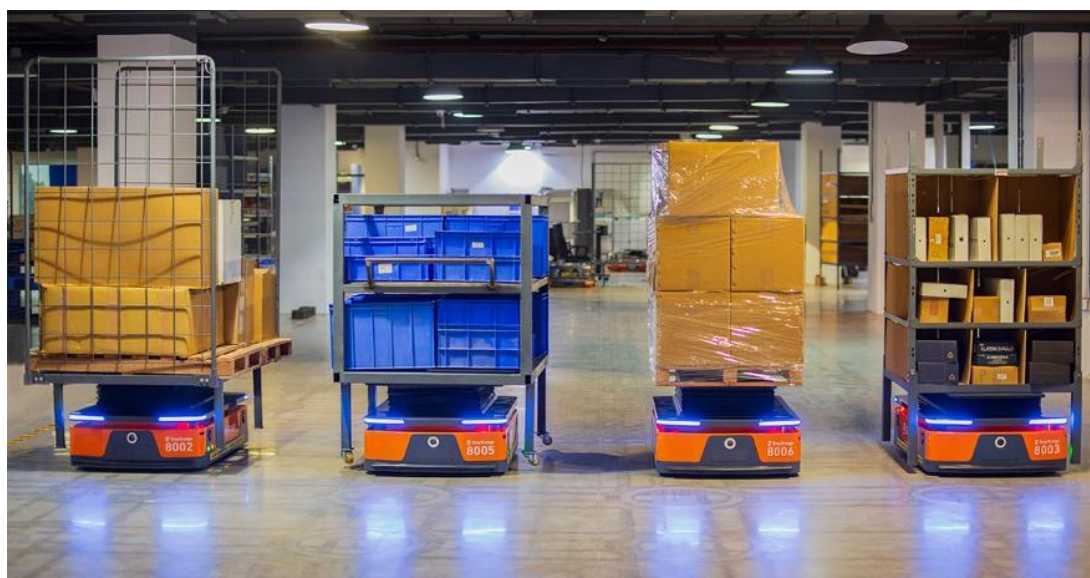
Roboty mobilne to urządzenia zdolne do zmiany swojego położenia w przestrzeni. Niniejsza praca koncentruje się na syntezie naziemnego robota mobilnego, dlatego całe gałęzie robotyki mobilnej, takie jak UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), czyli bezałogowe statki powietrzne, lub roboty nawodne USV (*Unmanned Surface Vehicle*) oraz podwodne UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*) nie będą tutaj omawiane. Ze względu na dużą elastyczność, wynikającą z możliwości zastosowania różnych rozmiarów, typów napędów czy rozwiązań konstrukcyjnych roboty mobilne znalazły zastosowanie w wielu branżach i dziedzinach życia. Roboty mobilne stały się nieodłączoną częścią wielu branż. Od uniwersalnych, kołowych konstrukcji, powszechnie znajdujących zastosowanie na przykład w transporcie, po wyrafinowane rozwiązania dedykowane wykorzystaniu w bardzo specyficznych sytuacjach, takich jak zastosowania wojskowe. Przykłady zastosowań robotów mobilnych, podzielone na główne kategorie przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Przykłady zastosowań robotów mobilnych

1.1.1 Transport

Transport jest jednym z najczęściej wykonywanych zadań, jakie roboty mobilne mogą realizować. Idea tego zadania ogranicza się do pokonania trasy z parkingu do punktu pobrania ładunku, następnie na pokonaniu drogi do punktu odbioru ładunku i końcowym powrocie na parking [4]. Dodatkowo, w przypadku wykorzystania większej ilości robotów mobilnych konieczne może być rozszerzenie zadania o unikanie kolizji z innymi robotami [5]. Ze względu na powtarzalność oraz niski stopień skomplikowania jest to jeden z pierwszych obszarów w którym zaczęto wykorzystywać roboty mobilne zdolne do autonomicznego wykonywania zadań [6]. Przykłady takich robotów przedstawiono na rys. 1.2 [i1]. W przypadku pracy w znanym otoczeniu, takim jak hale fabryczne czy magazyny, mapa obszaru, na którym będzie operował robot mobilny jest zdefiniowana i niezmienna [7]. W takim środowisku zadanie może zostać dodatkowo uproszczone poprzez wprowadzenie wydzielonych traktów i oznaczeń dla robotów transportowych [8]. W efekcie, robotyzacja przestrzeni magazynowej w wielu przypadkach jest stosunkowo prosta, nie wymaga znaczącej ingerencji w istniejącą infrastrukturę hal ani poważnych zmian organizacyjnych. Jej wdrożenie jest w wielu przypadkach racjonalne z biznesowego punktu widzenia. Z tego względu branża autonomicznych robotów transportowych stale się rozwija, oferując coraz bardziej dopracowane rozwiązania, o coraz wyższym stopniu autonomii. Poszerza się również wachlarz zadań, które takie roboty mogą wykonywać [9].



Rys. 1.2. Autonomiczne roboty magazynowe przeznaczone do transportu ładunków [i1]

Wraz z rozwojem technologii rozpoczęto prace nad wprowadzeniem autonomicznych robotów transportowych do przestrzeni, w której obecni są ludzie. Zastosowanie systemów dynamicznego rozpoznawania przeszkód, coraz sprawniejsza nawigacja lub coraz bardziej niezawodne systemy antykolizyjne pozwoliły na wykorzystanie autonomicznych robotów transportowych jako urządzeń bezpośrednio współpracujących z ludźmi [10]. Przykładami takich robotów mogą być urządzenia wykorzystywane w sektorze usług, pracujące w charakterze kelnerów czy hostess [11, 12]. Oprócz czysto użytkowego charakteru, czyli wykonywania zadań transportowych, które do tej pory realizowane były przez ludzi, zastosowanie robotów mobilnych, z którymi klienci mają bezpośredni kontakt ma również aspekt marketingowy. Możliwość odebrania zamówionego posiłku bezpośrednio od robota stanowi ciekawostkę i może przełożyć się na większe zainteresowanie klientów. Przykładem takie zjawiska może być seria robotów BellaBot przedstawionych na rys. 1.3 [i2, i3].



Rys. 1.3. Autonomiczny robot BellaBot jako hostessa oraz kelner [i2, i3]

Roboty te wdrożono w kilku supermarketach Carrefour na terenie Polski na przełomie 2022 i 2023 roku [13], co doprowadziło do znacznego wzrostu zainteresowania tą siecią sklepów [i4]. Powyższe zastosowania robotów transportowych można określić jako tak zwane zadania z zakresu *indoor*, czyli zadanie wykonywane wewnątrz znanych pomieszczeń. Aktualnie wdrażane są również autonomiczne roboty mobilne do realizacji zadań typu *outdoor*, to znaczy w terenie otwartym [14]. Przykład takiego robota przedstawiono na rys. 1.4 [i5]. Otwarta przestrzeń, w której operuje robot i wysoka zmienność oraz nieprzewidywalność otoczenia wymaga od konstruktorów przygotowania robota na obsługę bardzo różnych scenariuszy i sytuacji [15, 16, 17]. Robot musi być w stanie działać w sytuacji, gdy na wytyczonej ścieżce ruchu pojawiają się nieprzewidziane przeszkody.



Rys. 1.4. Autonomiczny robot transportowy firmy Starship Technologies [i5]

Oddzielnym problemem związanym z wdrażaniem robotów mobilnych są kwestie legislacyjne. Przepisy prawne, w zależności od kraju, całkowicie pomijają albo w bardzo niewielkim stopniu regulują zasady użytkowania autonomicznych robotów mobilnych w przestrzeni publicznej. Wiele aspektów dotyczących na przykład odpowiedzialności za wypadki spowodowane przez takie urządzenia wymaga modyfikacji istniejących kodeksów bądź wdrożenia zupełnie nowych ram prawnych [18]. Z tego powodu urządzenia typu autonomiczny kurier doręczający zakupy czy autonomiczny baner reklamowy nie są powszechnie spotykane. Możliwość ich wdrożenia i komercjalizacji jest w niektórych miejscach świata ograniczona, co automatycznie prowadzi do zmniejszenia nakładów finansowych na rozwijanie takich robotów i ich wolniejszego rozwoju.

1.1.2 Rolnictwo i uprawa roślin

Produkcja żywności to kolejny obszar, w którym wykorzystywane są roboty mobilne [19, 20]. Wiele aspektów prac polowych, pomimo większej skali tych przedsięwzięć, może zostać łatwo zrobotyzowanych. Jednym z przykładów takich prac jest kultywacja ziemi. Proces ten polega na spulchnieniu ziemi, aby przywrócić jej właściwą strukturę. Oznacza to, że ziemia w każdym miejscu

pola uprawnego musi zostać przekopana za pomocą glebogryzarki, bądź podobnego urządzenia. W przypadku dużych pól uprawnych ten nieskomplikowany proces, polegający na przeprowadzeniu urządzenia spulchniającego glebę przez zdefiniowaną z góry trasę jest bardzo czasochłonny. Zadanie to, wykonywane na rozległym, płaskim obszarze bez przeszkód terenowych, ruchomych obiektów czy obecności ludzi może zostać dość łatwo poddane automatyzacji [21, 22]. Przykład autonomicznego traktora Sesam 2 przedstawiono na rys. 1.5 [i6].



Rys. 1.5. Autonomiczny traktor John Deere Sesam 2 [i6]

Innym przykładem autonomicznych urządzeń rolniczych, które znajdują szerokie zastosowanie w produkcji żywności są roboty odchwaszczające. Proces mechanicznego usuwania chwastów jest bezpieczny zarówno dla gleby jak i dla upraw, ponieważ nie powoduje zanieczyszczenia środowiska pestycydami. Niestety, jest również bardzo czasochłonny. Konieczność ręcznego usuwania chwastów z rzędów roślin uprawnych wymaga znaczących nakładów pracy ręcznej. Ta zaś, staje się coraz bardziej kosztowna i coraz trudniej dostępna. Wraz z rozwojem technologii sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego możliwe było zaprojektowanie i wdrożenie robotów, umożliwiających automatyzację tych czynności [23]. Przykładem robota dedykowanego do wykonywania takich prac jest Dino, przedstawiony na rys. 1.6 [i7].



Rys. 1.6. Robot odchwaszczający Dino firmy Naio Technologies [i7]

Dzięki zastosowaniu kamer oraz algorytmów sztucznej inteligencji roboty tego typu potrafią poruszać się pomiędzy rzędami roślin i mechanicznie [i7] usuwać chwasty. Robot może być prowadzony dzięki użyciu nawigacji satelitarnej. Precyzyjnie sterowanie zapewnia system wizyjny, który wykrywa rzędy roślin i na bieżąco koryguje kierunek jazdy [24, 25]. Jeśli do usunięcia chwastów konieczne jest zastosowanie pestycydów, systemu wizyjny zapewnia możliwość punktowego stosowania środków chemicznych. Dzięki temu środki ochrony roślin rozpylane są bezpośrednio na chwasty, co przekłada się na zmniejszenie zanieczyszczenia gleby.

Inną kategorię robotów rolniczych stanowią maszyny przeznaczone do zbioru owoców. Proces polegający na zrywaniu z drzew i krzewów owoców, takich jak jabłka, pomidory czy truskawki, był do tej pory wykonywany głównie ręcznie. Ze względu na czasochłonność i powtarzalność tego

procesu podjęte zostały próby jego automatyzacji. W efekcie powstało kilka rodzajów robotów mobilnych, o różnym stopniu autonomii, zdolnych do zrywania owoców z drzew. Proces ten jest zdecydowanie bardziej złożony niż usuwanie chwastów, ponieważ oprócz prowadzenia robota przez zadaną drogę system sterujący musi rozpoznać w których miejscach znajdują się owoce, wybrać te dojrzałe i nieuszkodzone, a następnie zerwać je i umieścić w przeznaczony do tego ładowni. Ze względu na wrażliwość oraz rozmiary zbieranych owoców urządzenia realizujące proces ich zrywania muszą robić to wystarczająco delikatnie, aby ich nie uszkodzić oraz wystarczająco dokładnie, aby właściwie uchwycić niewielki owoc [26]. Przykłady robotów mobilnych Tevel i EVE zdolnych do wykonywania tego zadania przedstawiono na rys. 1.7 [i8, i9].



Rys. 1.7. Roboty zbierające owoce [i8, i9]

Roboty tego typu wykorzystują systemy wizyjne do zlokalizowania i sklasyfikowania obiektów, które zbierają. Następnie manipulator sięga do obiektu i delikatnie przenosi go do ładowni [27]. Robot EVE wykorzystuje do tego celu pojedynczy manipulator [i9]. Robot Tevel sprzężony jest z kilkoma dronami wyposażonymi w przyssawki ciśnieniowe, którymi chwytają owoce [i8]. Tym samym pełni on jednocześnie funkcję mobilnej ładowni, aby zminimalizować czas, w którym dron przenosi owoc, jak również ruchomego akumulatora, z którego drony za pomocą przewodów pobierają energię, co pozwala na zmniejszenie masy drona.

Wdrażanie autonomicznych urządzeń rolniczych jest zdecydowanie prostsze niż wdrażanie autonomicznych pojazdów transportowych, ponieważ tych pierwszych nie dotyczy wiele problemów natury prawnej. Pomimo konieczności spełnienia szeregu dyrektyw dotyczących maszyn operujących bez nadzoru [28], odpowiedzialność za wypadki z udziałem przechodniów czy szkody spowodowane w przestrzeni publicznej nie musi być brana pod uwagę, ponieważ ich środowiskiem pracy są tereny prywatne, na których osoby postronne nie mają wstępu.

1.1.3 Inspekcja i dozór

Zadania dozoru i patrolowania terenu, jak również doglądania osób bądź zwierząt, również należą do powtarzalnych, monottonnych czynności, które na pewnym etapie rozwoju technologicznego można zautomatyzować. Stacjonarne systemy inspekcyjne, obejmujące detektory ciepła, mikrofony, czujniki ruchu czy kamery są wykorzystywane komercyjnie od dziesiątek lat [29]. Wraz z rozwojem sztucznej inteligencji możliwe jest ulepszenie tych systemów. Jednym z wprowadzonych ulepszeń było wyposażenie ich w algorytmy automatycznego wykrywania ludzi [30], brył pojazdów bądź unikalnych oznaczeń, takich jak tablice rejestracyjne [31] na obrazach z kamer. W ten sposób część odpowiedzialności, która spoczywała na nadzorującym system operatorze przenoszona jest na maszynę. Pomimo tego, że ze względu na szczególne aspekty niektórych zadań, na przykład nadzór nad obszarami przemysłowymi, takimi jak rozległe place budowy czy powierzchnie magazynowe, pokrycie całego nadzorowanego obszaru monitoringiem może być trudne. Koszt montażu systemu pozbawionego martwych punktów, jak również problemy wynikające z obecności stacjonarnych urządzeń nadzorujących może negować opłacalność wdrażania takiego systemu zabezpieczającego.

Rozwiązaniem mogą być tutaj całkowicie lub częściowo autonomiczne roboty mobilne, wyposażone w systemy kamer i czujników, zdolne do patrolowania wyznaczonego obszaru i wykrywania intruzów bądź anomalii [32, 33, 34]. Przykładem takiego robota może być autonomiczna platforma wdrożona w jednej ze szkół w Santa Fe (rys. 1.8) [i10]. Urządzenie to przystosowane jest do w pełni autonomicznego przemieszczania się po kampusie uczelni. Zadaniem tego robota jest wyszukiwanie potencjalnych intruzów i identyfikacja niebezpiecznych bądź podejrzanych zachowań. Urządzenie, za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji, analizuje dane z systemów wizyjnych i na tej podstawie podejmuje decyzję, czy odnotowane zachowanie sklasyfikować jako niebezpieczne. W ten sposób, w razie zagrożenia, możliwe jest skierowanie funkcjonariuszy sił porządkowych kampusu w miejsce, w którym są potrzebni [i10].



Rys. 1.8. Platforma mobilna firmy Team 1st Technologies [i10]

W podobny sposób działają roboty z serii Security Robot S5 (rys. 9) [i11]. Te autonomiczne urządzenia poruszają się po zaprogramowanych trasach patrolowych, poszukując intruzów. Gdy czujniki wykryją obecność człowieka urządzenia aktywują alarm, po czym zaczynają podążać za wykrytym człowiekiem. Roboty korzystają z dostępnej mapy terenu i komunikują się ze sobą, dzięki czemu są w stanie do pewnego stopnia przewidzieć kierunek ruchu intruza, utrudniając mu ukrycie się przed pracownikami ochrony obiektu, na który wtargnął i zmusić do opuszczenia terenu [i11].



Rys. 1.9. Roboty Security Robot S5 [i11]

1.1.4 Sprzątanie

Proces usuwania odpadów z przestrzeni życiowej człowieka jest czynnością powtarzaną regularnie. Podnoszenie pojedynczych śmieci z przestrzeni publicznej, transport worków z odpadami pomiędzy śmietnikami a zbiorczym kontenerem lub mycie podłóg to powtarzalne, monotonne procesy. Stopień ich automatyzacji może zostać dobrany do indywidualnych potrzeb użytkowników [35]. W przypadku użycia pojedynczych zautomatyzowanych urządzeń, na przykład automatyczny odkurzacz czy

automatyczny mop, umożliwi zaoszczędzenie czasu użytkownikowi, zdejmując z niego część obowiązków. W przypadku kompleksowej automatyzacji na skalę przemysłową umożliwi zredukowanie ilość personelu, niezbędnego do utrzymania wyznaczonej przestrzeni w czystości. Zadania stawiane przed robotami sprzątającymi w pewnym stopniu przypominają typowe zadania transportowe. Przykładem może być robot przedstawiony na rys. 1.10 [i12]. Jest to prototyp autonomicznego robota kołowego, którego zadaniem jest przeciąganie domowych pojemników na odpady z garażu na skraj posesji, skąd są odbierane. Robot sterowany jest na podstawie obrazu z kamery. Pojemniki są wykrywane dzięki monochromatycznym markerom. Próbne wdrożenie niewielkiej partii robotów tego typu miało miejsce w Baboock Ranch w 2021 roku [i12].



Rys. 1.10. Prototyp robota do wywozu przydomowych odpadów SmartCan firmy Rezzi [i12]

Innym typem robotów sprzątających są domowe urządzenia przeznaczone do dbania o podłogi. Są to zazwyczaj urządzenia zamknięte w obudowie o niskiej wysokości. Zazwyczaj wyposażone są w napęd różnicowy, czyli dwa niezależnie napędzane koła [36]. Przykład takiego robota przedstawiono na rys. 1.11 [i13]. Urządzenia tego typu są już bardzo mocno rozpowszechnione, można je spotkać w typowych domach. Popyt na takie urządzenia, a zatem możliwość ich komercjalizacji, zachęcił wiele firm i ośrodków badawczych do prowadzenia badań rozwijających i udoskonalających istniejące systemy i rozwiązania. W zależności od półki cenowej autonomiczne odkurzacze i mopy mogą być wyposażone w systemy umożliwiające przygotowanie mapy pomieszczeń, rozróżnianie typów powierzchni czy stosowanie różnych strategii sprzątania [37] dostosowanych do różnych obszarów. Urządzenia te mogą być programowane do sprzątania zgodnie z wyznaczonym harmonogramem. Zazwyczaj wyposażone są w stacje dokujące, pełniące funkcje ładowarek. Dzięki temu często pracują bez nadzoru właściciela.



Rys. 1.11. Autonomiczny odkurzacz marki Roomba [i13]

Istnieją również prototypy znacznie bardziej zaawansowanych robotów sprzątających, zdolnych do wykonywania szerszego spektrum czynności. Jednak ze względu na stopień skomplikowania, a także nakład pracy niezbędny do przygotowania produktu możliwego do komercjalizacji tego typu urządzenia nie są popularnym przedmiotem badań. Przykładem takiego robota może być przedstawiony na rys. 1.12 robot Stretch RE1 [i14].



Rys. 1.12. Autonomiczny robot domowy Stretch RE1 [i14]

Robot ten składa się z teleskopowego manipulatora osadzonego na platformie mobilnej, wyposażonej w systemem wizyjny. Ideą tego robota jest utrzymywanie porządku w domu za pomocą narzędzi i urządzeń przeznaczonych do użycia przez ludzi. Pojedynczy manipulator wyposażony w chwytak ma w założeniu pełnić rolę analogiczną do ręki człowieka – otworzyć szafkę, pozbierać rozrzucone przedmioty czy zetrzeć kurz za pomocą miotłki bądź szmatki. System wizyjny robota wyposażony jest w kamerę głębi, co umożliwia uzyskanie informacji o orientacji oraz położeniu robota [i14, 38]. Robot ten jest jednak na wczesnym etapie rozwoju i nie jest dostępny komercyjnie.

1.1.5 Zastosowania militarne

Kolejnym bardzo istotnym obszarem, w którym zastosowanie mają zarówno zdalnie sterowane, jak i autonomiczne bądź półautonomiczne platformy mobilne są zadania na polu walki. Możliwość prowadzenia działań w niebezpiecznym terenie bez konieczności narażania życia żołnierzy stała się dla wojskowych atrakcyjna od chwili, gdy umożliwiła to technologia [39]. Jednym z pierwszych przykładów militarne wykorzystania robota mobilnego była przedstawiona na rys. 1.13 [i15] niemiecka samobieżna mina Goliath. Mina, która w dzisiejszej nomenklaturze zostałaby nazwana robotem mobilnym sterowanym przez teleoperatora, przystosowana była do punktowego niszczenia fortyfikacji. Goliath był połączony ze stanowiskiem operatora kablem telefonicznym, za pomocą którego można było nim sterować. Po dotarciu do celu minę detonowano zdalnie [40].



Rys. 1.13. Samobieżna mina Goliath [i15]

Inną kategorię stanowią współczesne roboty saperskie. Wykorzystywane zarówno przez policję jak i patrole saperskie, sterowane przez teleoperatora roboty, wyposażone w manipulatory i systemy kamer, zdolne do wchodzenia w interakcje z przedmiotami i otoczeniem. Ich zadaniem jest zastąpienie

człowieka w miejscach, gdzie może zostać narażony na niebezpieczeństwo utraty życia, na przykład podczas rozbrajania ładunków-pułapek, bądź podczas pracy z niewybuchami. Ze względu na stopień skomplikowania zadania, wymagający podejmowania decyzji mogących doprowadzić do znacznych zniszczeń, roboty tego typu nie są autonomiczne. Za wszelkie ruchy, które wykonuje robot saperski na (rys.1.14) [i16] odpowiada operator, który na podstawie swojej wiedzy dąży do minimalizacji ryzyka eksplozji rozbrajanego ładunku [41].



Rys. 1.14. Robot saperski IBIS [i16]

Bezzałogowe pojazdy bojowe stanowią kolejną grupę robotów mobilnych, które są intensywnie rozwijane. Jednymi z pierwszych seryjnych bezzałogowych robotów mobilnych były teletanki, produkowane w latach dwudziestych i trzydziestych XX wieku w ZSRR. Były to sterowane zdalnie pojazdy, oparte o istniejące ówczesne modele załogowych czołgów. Dzięki zastosowaniu komunikacji radiowej zespół operatorów sterował czołgiem bezprzewodowo, co utrudniało przerwanie komunikacji z robotem [42]. Pojazdy tego typu były zazwyczaj wyposażone w broń do walki na krótkim dystansie, aby zmaksymalizować korzyści wynikające z możliwości doprowadzenia teletanka blisko przeciwnika, bez narażania życia załogi. Przykład takiego pojazdu T-26 przedstawiono na rys. 1.15 [i17].



Rys. 1.15. Pojazd TT-26, czyli zdalnie sterowana wersja czołgu T-26 [i17]

W kolejnych latach nie produkowano na skalę masową bezzałogowych platform bojowych, prowadzono jedynie badania nad tego typu sprzętem. Wraz z rozwojem technologii oraz zmianami geopolitycznymi roboty tego typu w ciągu ostatnich kilkunastu lat bardzo zyskały na znaczeniu. Oprócz badań nakierowanych na rozwiązanie problemów i aspektów technicznych [43, 44, 45], część prac skupia się na moralnych aspektach użytkowania tego typu urządzeń [46, 47]. Aktualnie wiele firm z różnych krajów dostarcza tego typu rozwiązania. Przykładem może być modułowy system RCL (Robotic Combat Vehicle) przedstawiony na rys. 1.16 [i18]. Roboty systemu RCL mają w założeniu pełnić funkcję jednostek wspierających pojazdy załogowe oraz piechotę. W pojazdach tych przewiduje się implementację pewnego stopnia autonomii, jednak nie będą to maszyny całkowicie autonomiczne. Urządzenia te będą współdziałać z operatorami sterującymi nimi zdalnie [i18, 48].



Rys. 1.16. Robot autonomiczny Robotic Combat Vehicle – Light [i18]

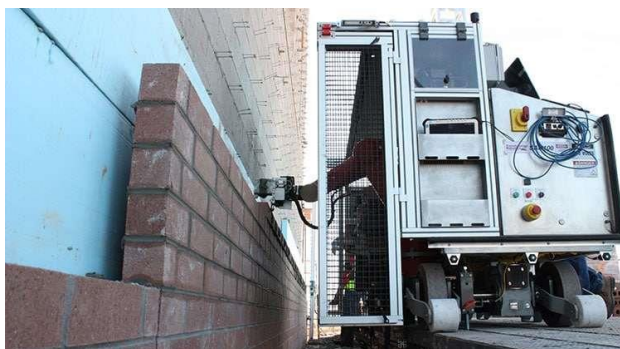
1.1.6 Budownictwo i rozbiórka

Branża budowlana to kolejny obszar, który ulega stopniowej robotyzacji [49, 50]. Wiele czynności związanych ze wznoszeniem konstrukcji jest bardzo powtarzalnych. Zadania takie jak gruntowanie, malowanie bądź nanoszenie tynku wymagają rozprowadzenia na określoną powierzchnię pewnej ilości substancji. Proces ten można więc przyrównać do stosowanego w przemyśle wytwórczym zautomatyzowanego malowania i lakierowania obiektów. Jedyną różnicę stanowi tutaj konieczności przemieszczania stanowiska, czyli na przykład ramienia manipulatora wyposażonego w rozpylacz farby, po wyznaczonej trasie [51]. Przykład robota MYRO przedstawiono na rys. 1.17 [i19]. Roboty te są w stanie z dużą dokładnością i powtarzalnością pokrywać farbą duże powierzchnie. Dzięki czujnikom odległości można uzyskać wysoką powtarzalność procesu malowania. Farba będzie наносzona za każdym razem z tej samej odległości.



Rys. 1.17. Autonomiczny robot malujący MYRO [i19]

Układanie cegieł podczas murowania ścian to również bardzo powtarzalny proces, który wymaga pewnej precyzji. Zadanie polega na pokryciu cegły spoiwem, a następnie umieszczenie jej na już ułożonych wcześniej cegłach, zachowując współpłaszczyznowość. Do tej pory proces ten był wykonywany ręcznie. Ze względu na konieczność nadzoru nad niewykwalifikowanymi pracownikami, a także czasochłonność procesu, co bezpośrednio przekłada się na jego koszt dostrzeżono tutaj potencjał automatyzacji. Roboty dedykowane do wykonywania tego zadania muszą być więc wyposażone w manipulator o wystarczającym udźwigu, aby unieść cegłę, posiadać dostęp do dozownika zaprawy, a także mieć zapewnioną możliwość ruchu [52]. Przykład takiego robota przedstawiono na rys. 1.18 [i20].



Rys. 1.18. Robot murujący Semi-Automated Mason SAM100 [i20]

Istnieją również roboty, których przeznaczeniem jest wyburzanie budynków. Proces ten, choć również w wielu aspektach powtarzalny, to ze względu na złożony charakter całego procesu rozbiórki wymaga ścisłej koordynacji wykonywania zadań. W wielu przypadkach, planowanie procesu wyburzania wymaga wykonania ekspertyz, aby na ich podstawie wybrać najlepszą metodę usunięcia części bądź całości budynku. Ponadto, potencjalna skala szkód, które mogą zostać wyrządzone podczas niewłaściwie przeprowadzanego procesu wyburzania jest zbyt duża. Z tego powodu powierzenie całego procesu rozbiórki autonomicznym systemom decyzyjnym, przy obecnym poziomie rozwoju techniki, nie jest możliwe. Dlatego roboty wyburzeniowe są sterowane zdalnie przez operatora [53]. W większości przypadków przyjmują one formę ciężkich, zwartych pojazdów o napędzie gąsienicowym, wyposażonych w odporny manipulator, którego efektem zazwyczaj jest młot wyburzeniowy, lub rzadziej – szczypce. Umożliwiają precyzyjne wprowadzenie do rozbieranej konstrukcji narzędzi cięższych niż jest w stanie przenieść pracownik. Ponadto użycie robota eliminuje ryzyko wypadku z udziałem robotników przebywających bądź pracujących w strefie uznanej za niebezpieczną [54]. Przykład robota wyburzeniowego przedstawiono na rys. 1.19 [i21].



Rys. 1.19. Robot wyburzeniowy ARE 1.0 [i21]

1.2 Podział naziemnych robotów mobilnych ze względu na rodzaju napędu

Naziemne roboty mobilne można skategoryzować pod względem różnych kryteriów. Jednym z nich jest wyróżnienie sposobu lokomocji [55]: roboty kołowe, kroczące, gąsienicowe i hybrydowe.

1.2.1 Roboty kołowe

Roboty kołowe są najlepiej poznana, zbadana i najczęściej stosowaną grupą robotów mobilnych. Osiągają największe prędkości przemieszczania po płaskich powierzchniach. Ich wadą jest ograniczona zdolność do poruszania się w terenie z przeszkodami. Ponadto, część z nich obciążona jest dużym promieniem skrętu [56]. Przykładem takiego robota jest przedstawiony na rys. 1.20 [i22] robot MARBLE, czyli autonomiczna śmieciarka.



Rys. 1.20. MARBLE – autonomiczny robot mobilny przeznaczony do opróżniania śmietników [i22]

1.2.2 Roboty kroczące

Roboty kroczące, w porównaniu z robotami kołowymi, posiadają inne cechy. Są to urządzenia o największych możliwościach pokonywania przeszkód terenowych. Wadą typowych robotów kroczących jest niewielka prędkość przemieszczania się oraz złożone problemy związane z metodyką sterowania kroczeniem (np. problemy zachowywania równowagi podczas dynamicznego chodu w nieznanym terenie) [57]. W ostatnich latach prowadzone były badania, których celem było poprawienie prędkości chodu robotów kroczących [58, 59], a także ich miniaturyzacja [60]. Przykładem takiego robota może być SpotMini, przedstawiony na rys. 1.21 [i23].



Rys. 1.21. Robot kroczący SpotMini [i23]

1.2.3 Roboty gaśnicowe

Roboty o napędzie gaśnicowym to kompromis pomiędzy robotami kołowymi a kroczącymi. Gaśnice zapewniają mobilność w trudnym terenie, przy jednoczesnym zachowaniu dostatecznej prędkości poruszania. Przykładem może być przedstawiony na rys. 1.22 [i24] prototyp gaśnicowego robota przeciwlotniczego. Ten rodzaj lokomocji jest poznany, zbadany i stosowany w zdecydowanie większym stopniu, niż układy kroczące [61]. Podwozia takie mają znacznie prostszą konstrukcję niż podwozia kroczące, co przekłada się na niższe koszty budowy oraz eksploatacji urządzeń w nie wyposażonych. Z drugiej strony, stopień skomplikowania budowy gaśnicowych układów bieżnych w dalszym ciągu znacząco przewyższa typowe podwozia kołowe. Większe masa, większa ilość potencjalnie zawodnych elementów oraz szkody, jakie wyrządza podwozie gaśnicowe podczas poruszania się po nieprzystosowanym do tego podłożu sprawia, że tam gdzie jest to możliwe wykorzystuje się podwozia kołowe.



Rys. 1.22. Prototyp robota do zastosowań militarnych skonstruowany w oparciu o platformę gaśnicową RIwP [i24]

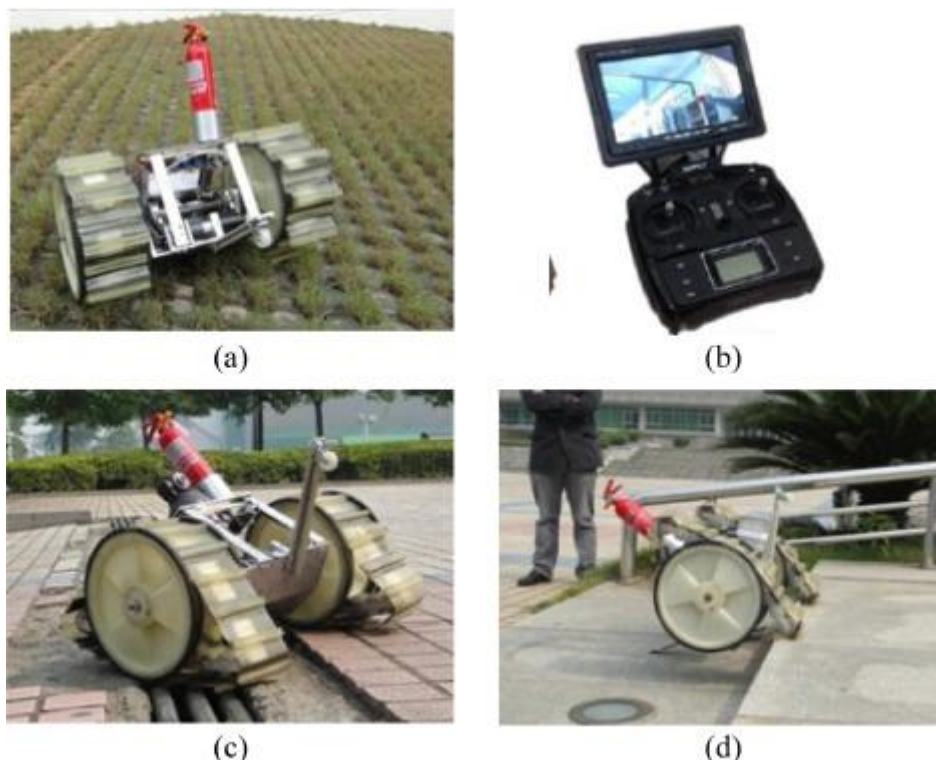
1.2.4 Roboty hybrydowe

Istnieją również rozwiązania łączące różne sposoby lokomocji. Przytoczyć tutaj można podwozia określane mianem hybrydowych, czyli oryginalne konstrukcje których sposób lokomocji wymyka się typowym podziałom [62, 63, 64]. Roboty hybrydowe wyposażone są w podwozia, w których można wyróżnić cechy dwóch bądź więcej typowych podwozi. Przykładem może być kołowo-kroczący robot HyLoS2 przedstawiona na rys. 1.23 [65]. Robot ten typowo porusza się jako pojazd kołowy. Zaliczany jest do kategorii robotów hybrydowych, ponieważ każde z jego czterech kół zamocowane jest jako efektor jednego z czterech manipulatorów. W efekcie, robot ten może unosić ‘nogi’, na których zamocowane są jego koła i pokonywać przeszkody za pomocą kombinacji kroczenia oraz ruchu kołowego.



Rys. 1.23. Kołowo-kroczący robot HyLoS2 [65]

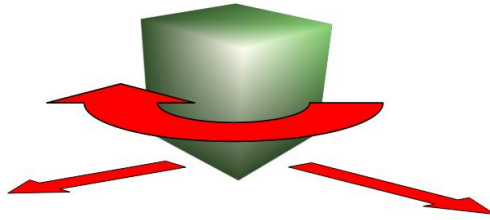
Innym przykładem robota hybrydowego jest RHMBot. Robot ten porusza się na dwóch dużych, specjalnie zmodyfikowanych kołach. Środek ciężkości całego robota jest położony nisko, dlatego nie potrzebuje żadnych aktywnych systemów balansujących, które w czasie rzeczywistym korygowałyby jego wychylenie i umożliwiały zachowanie stateczności. Podwozie kołowe tego robota wykonano w taki sposób, aby można było transformować je w podwozie gąsienicowe. Podczas jazdy w trybie gąsienicowym koła przestają się obracać. Ruchome elementy zamocowane wewnątrz kół rozciągają opony w taki sposób, aby zaczęły pełnić funkcję gąsienic. Widoki omawianego robota w trybie jazdy kołowej oraz gąsienicowej przedstawiono na rys. 1.24 [66].



Rys. 1.24. Rekonfigurowalny pojazd kołowo-gąsienicowy RHMBot w trybie (a) kołowym oraz (c) gąsienicowym [66]

1.3 Kołowe pojazdy omnikierunkowe i podział ich napędów

W poszczególnych grupach robotów mobilnych można dodatkowo wyodrębnić grupy robotów mobilnych określanymi mianem omnikierunkowych (*omnidirectional*). Roboty i pojazdy, omnikierunkowe to grupa specjalnie zaprojektowanych maszyn, zdolnych do wykonywania ruchu w dowolnym kierunku bez konieczności zmiany orientacji kątowej swojego korpusu [67]. Osiągnięcie tego efektu, zarówno w przypadku pojazdów holonomicznych, jak i nieholonomicznych możliwe jest dzięki wykorzystaniu specyficznych typów kół lub gąsienic [68], bądź też typowych kół, ale współpracujących z dodatkowymi systemami. Holonomiczność to związek pomiędzy dostępnymi dla danego pojazdu stopniami swobody a możliwością kontrolowania ich. W przypadku ruchu na płaszczyźnie robot holonomiczny ma dostępne 3 stopnie swobody (translacja w osi X, translacja w osi Y, rotacja wokół osi pionowej), które może w każdym momencie kontrolować [69] (rys. 25).



Rys. 1.25. Holonomiczność bryły na płaszczyźnie

Przedstawione poniżej rodzaje napędów, ze względu na realizowaną przez nie funkcje zostaną zbiorczo określone kołami.

1.3.1 Omnikoło

Znaczna część badań z dziedziny robotów omnikierunkowych skupia się obecnie na różnych odmianach pojazdów kołowych [70, 71]. Najstarszym przykładem koła zaprojektowanego specjalnie do uzyskania ruchu wielokierunkowego jest koło omnikoło (*omniwheel*) (rys. 1.26) [i25], opatentowane w 1919 [72].



Rys. 1.26. Widok omnikoła [i25]

Koło to bywa błędnie nazywane w literaturze „kołem szwedzkim”. Jest to odmiana koła, które na swoim obwodzie ma zamocowane swobodne rolki toczne. Rolki toczne (ang. rollers) to nienapędzane, swobodne walce. Powierzchnia boczna rolek tocznych najczęściej przyjmuje kształt baryłkowaty, aby zminimalizować drgania pojazdu podczas przetaczania koła [73]. Kształty rolek tocznych przedstawiono na rys. 1.27 [i26, i27]. Rolki w kole omnikierunkowym zamocowane są prostopadłe do osi koła.



Rys. 1.27. Przykłady rolek tocznych w kole omnikierunkowym [i26, i27]

1.3.2 Koło szwedzkie

Innym typem koła umożliwiającym ruch omnikierunkowy jest przedstawione na rys. 1.28 [i27] koło Mecanum, nazywane również „kołem szwedzkim” lub „kołem Ilona”. Koło to ma na swoim obwodzie zamontowane swobodne rolki toczne, jednak w przeciwieństwie do omnikoła kąt mocowania poszczególnych rolek to zazwyczaj 45° w stosunku do osi koła oraz 45° w stosunku do płaszczyzny bocznej koła. Podobnie jak omnikoło, w połączeniu z właściwym sterowaniem oraz odpowiednią konstrukcją pojazdu, umożliwiają uzyskanie ruchu w dowolnym kierunku, pod dowolnym kątem [74].



Rys. 1.28. Koło szwedzkie [i28]

1.3.3 Koło Liddarda

Kolejnym typem kół wielokierunkowych są opatentowane w 2016 roku przez William Liddiarda koła określane jako Liddiard Wheels (rys. 1.29) [i29]. Koła te składają się z torusowych opon nasadzonych na felgi, na których opierają się o rzędy poprzecznie zamocowanych rolek – zarówno swobodnych, jak i napędzanych. Ruch wzdłuż osi koła uzyskuje się poprzez obroty całego koła. Ruch poprzeczny uzyskuje się dzięki przetaczaniu się torusowej opony po rolkach [75, 76].



Rys. 1.29. Koło Liddarda [i29]

1.3.4 Kula

Innym przykładem koła omnikierunkowego zastosowanie kuli. Przykład robota wyposażonego w takie rodzaj podwozia przedstawiono na rys. 1.30 [i30]. W tym rozwiązaniu elementem pośredniczącym pomiędzy korpusem robota a podłożem jest kula [77]. W zależności od wybranego zastosowania roboty wyposażone w ten typ napędu omnikierunkowego posiadają od jednej do kilku napędzanych kul. Kula, dzięki swojemu kształtowi może bez oporów przetaczać się w dowolnym kierunku, co wykorzystywane jest do uzyskania ruchu omnikierunkowego.



Rys. 1.30. Pojazd mobilny wykorzystujący kule do uzyskania ruchu omnikierunkowego [i30]

1.3.5 Koło walcowe

Typowe walcowe koła również mogą posłużyć do uzyskania ruchu omnikierunkowego. Każde z kół ma dwa napędy – napęd przetaczania oraz w napęd obracania w osi prostopadłej do płaszczyzny podłoża. Przykład robota wyposażonego w takie koła przedstawiono na rys. 1.31 [i31]. Ze względu na dużą liczbę napędów, jaka wymagana jest do sterowania podwoziem wyposażonym w takie koła, w wielu przypadkach wybór tego rozwiązania okazuje się nieekonomiczny [78]. Ogranicza się go do zastosowań, gdzie wymagane są pewne unikalne dla tych kół aspekty [79], takich jak zapewnienie możliwości ruchu w dowolnym kierunku, bez konieczności zmiany orientacji korpusu pod dużym obciążeniem. Ze względu na swoją budowę, koła te mogą przenosić duże obciążenia, ponieważ nie posiadają w sobie dodatkowych elementów ruchomych. Z tego względu bywają wykorzystywane jako elementy maszyn przenoszących ładunki o znacznej masie w miejscach, w których konieczna jest możliwość swobodnego manewrowania tym ładunkami.



Rys. 1.31. Robot omnikierunkowy wyposażony w indywidualnie skręcane koła walcowe [i31]

1.4 Rodzaje podwozi kołowych pojazdów omnikierunkowych

Aby umożliwić wykonywanie ruchów omnikierunkowych, koła odpowiedniego typu muszą zostać połączone ze sobą w odpowiedni sposób. Dopiero dobór właściwej liczby kół, połączenie ich w odpowiedniej konfiguracji oraz użycie właściwego algorytmu sterowania umożliwi uzyskanie ruchu omnikierunkowego. Roboty omnikierunkowe są rozpowszechnione na małą skalę. Ich wykorzystanie jako produktów komercyjnych bądź narzędzi przemysłowych jest na razie bardzo niewielkie. Z tego względu w kolejnych podrozdziałach oprócz omnikierunkowych robotów mobilnych przytoczone zostaną również przykłady pojazdów omnikierunkowych prowadzonych przez kierowcę, znajdującego się wewnątrz maszyny. Typy podwozi i rodzaje napędów pojazdów omnikierunkowych sterowanych przez kierowcę oraz robotów omnikierunkowych są takie same. Oznacza to, że w oparciu o dowolne z omawianych typów podwozi można zbudować robota mobilnego.

1.4.1 Podwozie Kiwi Drive

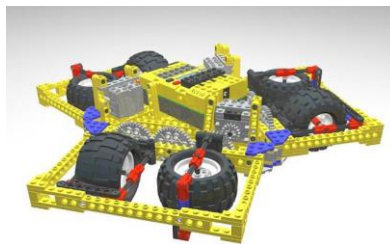
Jednym z najbardziej rozpoznawalnych typów podwozia omnikierunkowego jest system określany jako Kiwi Drive, przedstawiony na rys. 1.32 [i32]. Podwozie to wykorzystuje koła typu omniwheel. Zastosowanie takich kół, w połączeniu z odpowiednim sterowaniem oraz właściwą konstrukcją pojazdu umożliwia jazdę w dowolnym kierunku [80]. Korpus pojazdu ma kształt wpisany w trójkąt równoboczny. Na wierzchołkach tego trójkąta, pod kątem 120° względem siebie umieszczone są pojedyncze napędzane omnikoła. Pojazd taki jest pojazdem holonomicznym, zatem może poruszać się w dowolnym kierunku, dowolnie zmieniając przy tym swoją orientację kątową.



Rys. 1.32. Podwozie typu Kiwi Drive [i32]

1.4.2 Platforma Killougha

Rozwiązaniem podobnym wizualnie, choć odmiennym w swoich założeniach jest system Killough platform przedstawiony na rys. 1.33 [i34]. Autorem tej podwozia jest Stephen Killough, zaś podstawowym założeniem konstrukcyjnym było uzyskanie holonomiczności bez używania kół omnikierunkowych czy Mecanum [i33].



Rys. 1.33. Model platformy Killougha [i34]

Platforma posiada sześć kół z balonowymi oponami. Korpus platformy wpisany jest w trójkąt równoboczny. Na wierzchołkach tego trójkąta parami zamocowane są obrotowe ramki. Wewnątrz każdej ramki zamocowane jest pojedyncze koło, które posiada możliwość swobodnego obrotu. Platforma wyposażona jest w trzy niezależne napędy, z których każdy porusza parą ramek. Osie obrotu ramek w każdej parze są do siebie równoległe. Ramki są obrócone względem siebie o 90°. Sterowanie uzyskuje się dzięki zmianie prędkości względnej poszczególnych napędów. Robot tego typu jest robotem holonomicznym [81].

1.4.3 Podwozie Mecanum

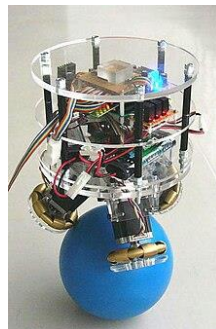
Innym, typowym przykładem podwozia pojazdu omnikierunkowego jest rozwiązanie, w którym zastosowane są cztery koła Mecanum. Rozwiązanie to przedstawiono na rys. 1.34 [i35]. Koła umiejscowione są parami – dwa koła z przodu i dwa koła z tyłu. Osie wszystkich kół są równoległe. Koła nie są skrętne, ale każde z nich ma indywidualny napęd. Dzięki odpowiedniemu sterowaniu, takie podwozie zapewnia holonomiczność, umożliwiając dowolne złożenie translacji oraz rotacji podczas ruchu na płaszczyźnie [82]. Minusem zarówno tego podwozia, jak również platformy Killougha czy Kiwi Drive, jest wrażliwość na nierówności. Jeśli pojazd nie zostanie wyposażony w odpowiednie zawieszenie, nawet niewielkie nierówności podłoża mogą bardzo mocno wpłynąć na jego zdolności do ruchu omnikierunkowego.



Rys. 1.34. Robot mobilny z kołami Mecanum [i35]

1.4.4 Robot balansujący

Przykładem podwozia wykorzystującego pojedynczą kulę do uzyskania ruchu omnikierunkowego jest tak zwany „ballbot”. Przykład robota poruszającego się na takim podwoziu przedstawiono na rys. 35 [i36]. Ten typ podwozia wykorzystywany jest najczęściej przy projektowaniu niewielkich, zwrotnych robotów zdolnych do poruszania się przede wszystkim po zurbanizowanych obszarach. W przypadku takiego podwozia napęd stanowi pojedyncza kula.



Rys. 1.35. Przykład robota balansującego typu „ballbot” [i36]

Korpus pojazdu, nasadzony na kulę balansuje na niej, tworząc formę odwróconego wahadła. Ruch wywoływany jest poprzez obracanie i wychylanie korpusu. Pojazdy o takim typie podwozia charakteryzują się jedynie możliwością utrzymania równowagi dynamicznej [83]. Jeśli sensory bądź umożliwiające utrzymanie równowagi zostaną wyłączone, pojazd wyposażony w podwozie tego typu przewróci się.

1.4.5 Robot sferyczny

Pojazdy określane mianem pojazdów sferycznych to roboty których korpus ma kształt sfery. Ruch takich robotów możliwy jest poprzez zmianę wewnętrznego rozkładu masy. Pojazdy z tej grupy mają potencjał do działania w trudnym terenie – ich kulisty korpus, jeśli zostanie zaprojektowany jako szczelny, może zapewnić zdolność do pokonywania przeszkód wodnych. Pojazdy o takim kształcie mają również możliwość osiągania znacznych prędkości. Niestety, ze względu na skomplikowaną budowę układów wewnętrznych podwozie tego typu nie jest wykorzystywane powszechnie [84]. Przykład robota sferycznego GuardBot przedstawiono na rys. 1.36 [i37].



Rys. 1.36. Robot sferyczny firmy GuardBot [i37]

1.4.6 Pojazdy i roboty z kołami sferycznymi

Pozostałe podwozia wykorzystujące kule jako elementy pośredniczące pomiędzy korpusem pojazdu a podłożem są w literaturze zazwyczaj zbiorczo określane jako „pojazdy z kołami sferycznymi”. Do kategorii tej zalicza się zarówno pojazdy wyposażone 3 lub więcej napędzanych kul, które charakteryzują się równowagą statyczną, jak również pojazdy opierające swój korpus na dwóch kulach, a więc takich, które mogą wymagać aktywnych systemów utrzymujących równowagę dynamiczną w jednej z osi [85]. Przykład motocykla z kołami sferycznymi przedstawiono na rys. 1.37 [i38].



Rys. 1.37. Przykład prototypu motocykla z kołami sferycznymi [i38]

1.4.7 Podwozia z kołami o zmiennej orientacji

Podwozie tego typu wykorzystuje koła o dwóch napędach. Ilość kół w tego typu podwoziach nie jest ściśle zdeterminowana. Istotne jest jedynie, aby robot zachowywał równowagę statyczną. Oznacza to, że przy odpowiedniej konstrukcji pojazdu wystarczą trzy koła. Ich maksymalna ilość nie jest ograniczona. Aspekt ten jest szczególnie przydatny w niektórych gałęziach przemysłu, gdzie spotyka się ciężkie pojazdy specjalnego przeznaczenia, wykorzystujące takie podwozie [79]. Przykład robota mobilnego wykorzystującego klasyczne koła walcowe, z których każde ma dwa niezależne napędy [86] przedstawiono na rys. 1.38 [i39].



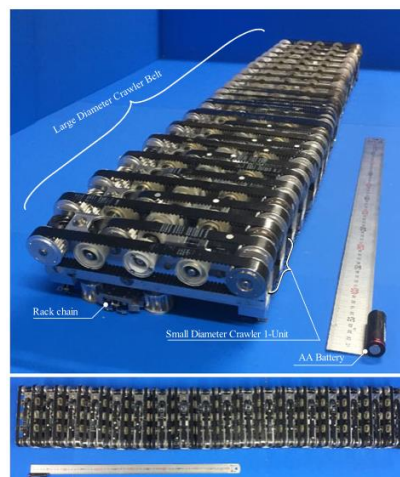
Rys. 1.38. Pojazd NASA MRV [i39]

1.5 Podział gąsienicowych pojazdów omnikierunkowych ze względu na rodzaj napędu

Efekt ruchu omnikierunkowego można uzyskać również przy użyciu innych elementów pośredniczących pomiędzy korpusem robota mobilnego a podłożem. W tym celu wykorzystuje się specjalnie zaprojektowane odmiany napędu gąsienicowego. Podwozia wykorzystujące specjalnie zaprojektowane gąsienice do uzyskania ruchu omnikierunkowego można podzielić na dwa rodzaje: aktywne i pasywne.

1.5.1 Omnigąsienice z elementami aktywnymi

Do tej kategorii można zaliczyć pojazdy osadzone na podwoziach, w których oprócz napędzanych gąsienic można wyróżnić dodatkowe napędzane elementy umiejscowione na poszczególnych ogniwach gąsienicy. Przykładowy gąsienicowy układ jezdny opartego o elementy aktywne przedstawiono na rys. 1.39 [87]

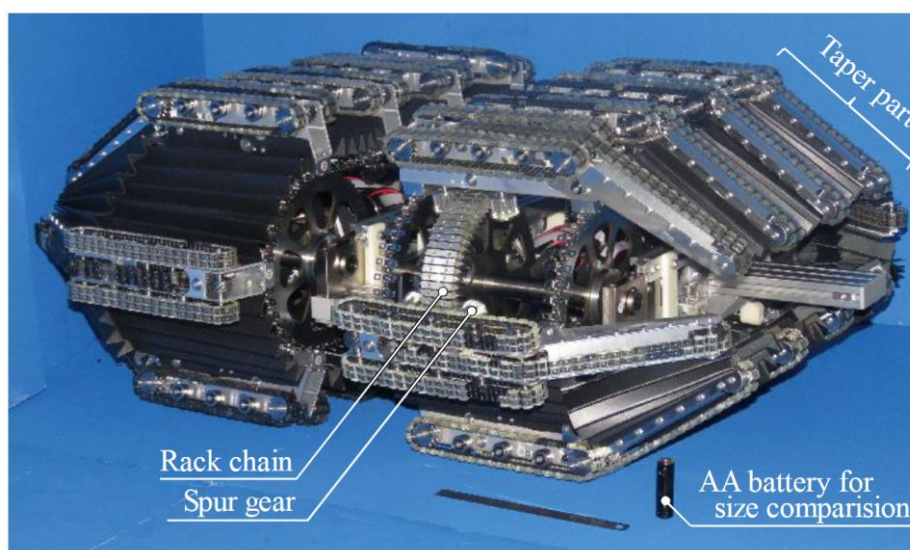


Rys. 1.39. Rozwinięta gąsienica omnikierunkowa z poprzecznym napędem aktywnym [87]

Ruch w kierunku poprzecznym uzyskuje się poprzez uruchomienie napędu elementów aktywnych, które zazwyczaj mają formę rolek bądź gąsienic usytuowanych pod kątem prostym do osi głównej robota. Ruch omnikierunkowy uzyskuje się poprzez złożenie ruchu w kierunku osi głównej, wynikającego z przetaczania gąsienicy oraz poprzecznego, wynikającego z ruchu dodatkowych elementów aktywnych.

Koncepcję takiego napędu przedstawiono w pracy [87]. Artykuł ten porusza problematykę ruchu pojazdu gąsienicowego na sypkim podłożu, z uwzględnieniem znacznej ilości przeszkód terenowych. Autorzy proponują rozwinięcie koncepcji zwyczajnej gąsienicy segmentowej, która w omawianych przypadkach wykazuje szereg negatywnych cech. Pojazd oparty o typowe podwozie gąsienicowe potrzebuje miejsca, aby zmienić swoją orientację. Poruszając się w bezpośrednim sąsiedztwie znacznej ilości przeszkód tworzących korytarze może nie być w stanie poprawnie wykonać obrotu i ze względu na ograniczoną przestrzeń zablokować się. Autorzy zwracają również uwagę na problem grzęźnięcia gąsienicy w miękkim podłożu podczas wykonywania rotacji z niewielkim udziałem bądź bez udziału translacji. Zaproponowane rozwiązanie opiera się o wzbogacenie każdego z ogniw standardowej gąsienicy segmentowej o dodatkową, aktywnie napędzaną, minigąsienicę umieszczoną pod kątem 90° do osi głównej robota. Proponowana gąsienica pozbawiona jest dodatkowych kół jezdnych, aby zmaksymalizować zdolność dopasowywania się do kształtu podłoża. Koło napędowe oraz koło napinające pełnią równocześnie rolę jedynych kół jezdnych. Dwa osobne napędy umożliwiają niezależne sterowanie minigąsienicami umiejscowionymi na lewej oraz na prawej gąsienicy głównej. Napęd przenoszony jest za pomocą łańcucha zębatego. Praca [87] zawiera wyniki badań stanowiskowych wykonanych na prototypie pojedynczej gąsienicy zaproponowanej przez autorów. Przedstawiono zdolność proponowanego rozwiązania do pokonywania przeszkód terenowych oraz rozkład obciążeń podczas ruchu.

Koncepcja napędu gąsienicowego z elementami aktywnymi rozwijana jest w pracy [88], w której autorzy omawiają zagadnienia związane z badaniami eksperymentalnymi jazdy robota mobilnego wyposażonego w dwie równoległe gąsienice płytkowe z aktywnym napędem poprzecznym (rys. 1.40 [88]). Autorzy opisują problem budowy pojazdu omnigąsienicowego jako całości, bez zagłębiania się w aspekty działania prezentowanej gąsienicy. Praca zawiera opis oraz parametry konstrukcyjne robota mobilnego. Przedstawia interakcję proponowanego robota z podłożem, skupiając się na aspektach minimalizacji negatywnego wpływu gąsienicy na grunt, po którym porusza się robot.



Rys. 1.40. Pojazd omnigąsienicowy z gąsienicami o aktywnym napędzie poprzecznym [88]

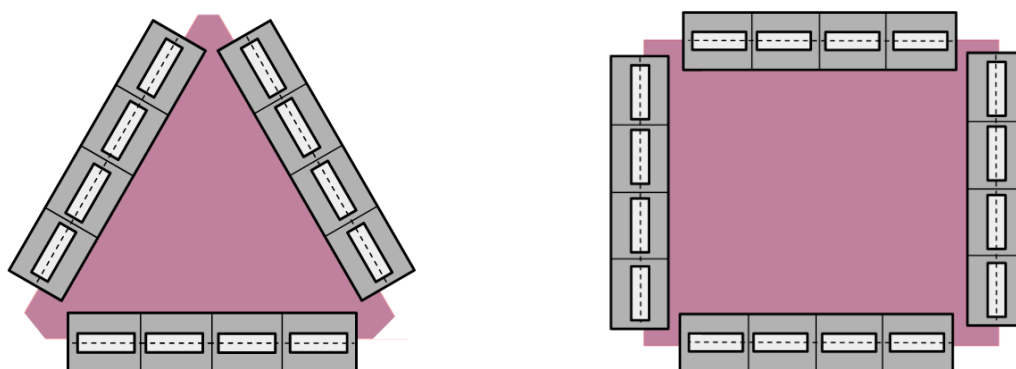
1.5.2 Omnigąsienice z elementami pasywnymi

Drugą grupą omnikierunkowych pojazdów gąsienicowych są platformy wyposażone w minimum trzy niezależnie napędzane gąsienice, na ogniwach których znajdują się dodatkowe elementy, zazwyczaj w postaci swobodnych rolek tocznych. Przykład pojedynczego segmentu gąsienicy z nienapędzaną rolką przedstawiono na rys. 1.41.

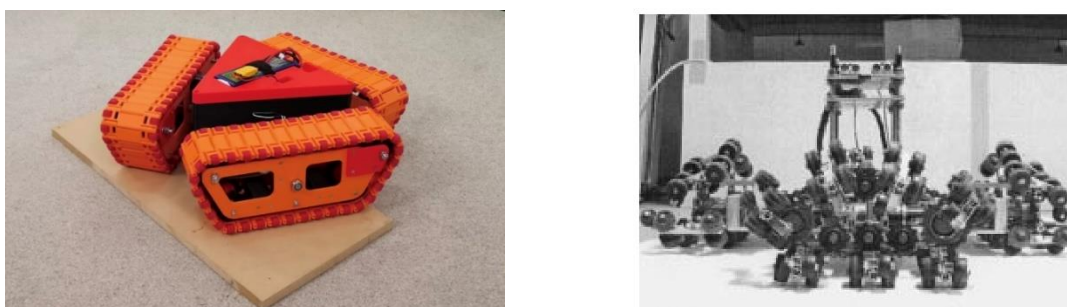


Rys. 1.41. Schemat oraz widok swobodnej rolki tocznej na pojedynczym ogniwie gąsienicy

Istnieją rozwiązania obejmujące podwozia wyposażone zarówno w trzy, jak i cztery niezależnie napędzane gąsienice, usytuowane względem siebie pod kątem 120° bądź 90° [89, i40], (rys. 1.42). Na rys. 1.43 [i40, 90] przedstawiono zdjęcia rzeczywistych platform w tym układzie. Pojazdy te działają w podobny sposób co platformy oparte o podwozia typu Kiwi Drive. Podobne są również ich ograniczenia – promień rolki tocznej wystającej ponad płaszczyznę gąsienicy ma znaczący wpływ na zdolność do pokonywania przeszkód terenowych pojazdów tego typu.

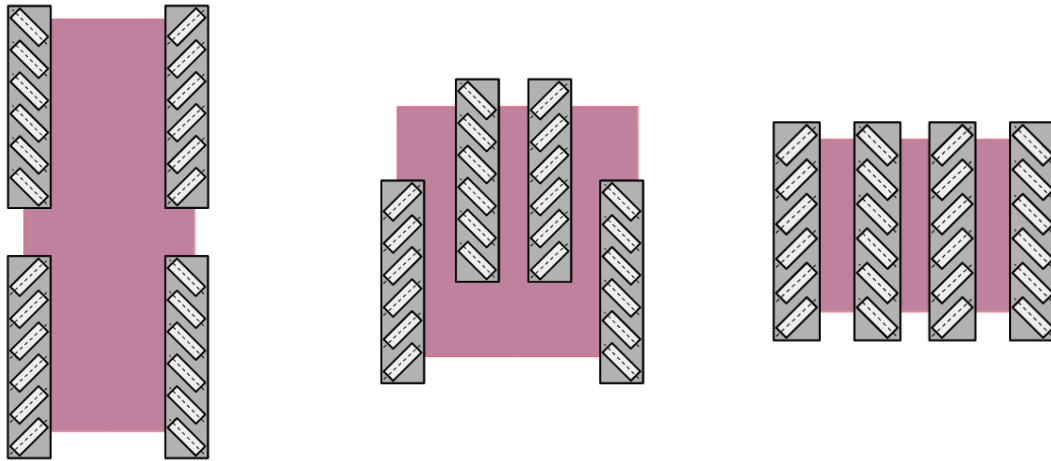


Rys. 1.42. Schematy pojazdów omnigąsienicowych ze swobodnymi rolkami tocznymi o nierównoległym układzie gąsienic

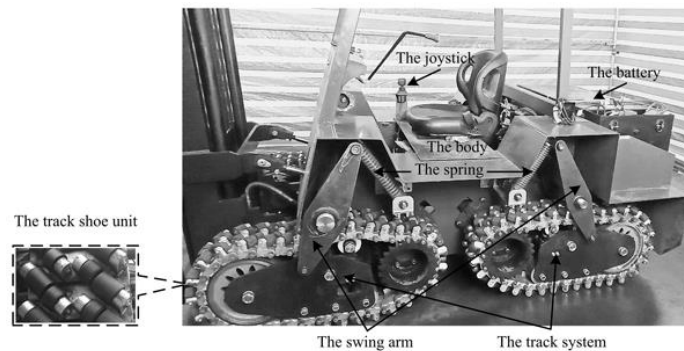


Rys. 1.43. Widoki pojazdów omnigąsienicowych ze swobodnymi rolkami tocznymi o nierównoległym układzie gąsienic [i40, 90]

Najczęściej występującymi w literaturze pojazdami wyposażonymi w podwozia omnigąsienicowe z elementami pasywnymi są jednak platformy o czterech równoległych, niezależnie napędzanych łąkach. Podział pojazdów tego typu wynika z wzajemnego usytuowania względem siebie par łąkach oraz względnej orientacji swobodnych rolek tocznych umieszczonych na poszczególnych łąkach. Wyróżniono tutaj grupy pojazdów z rolkami tocznymi rozmieszczonymi symetrycznie bądź niesymetrycznie. Podział ze względu na układ łąkach wyróżnia pojazdy o łąkach niezachodzących, częściowo zachodzących bądź całkowicie zachodzących (rys. 1.44). Przykład pojazdu omnigąsienicowego wyposażonego w łąkach równoległe, całkowicie niezachodzące przedstawiono na rys. 1.45 [i91].



Rys. 1.44. Schematy pojazdów omnigąsienicowych ze swobodnymi rolkami tocznymi o równoległym układzie łąkach. Od lewej: całkowicie niezachodzące, częściowo zachodzące, całkowicie zachodzące

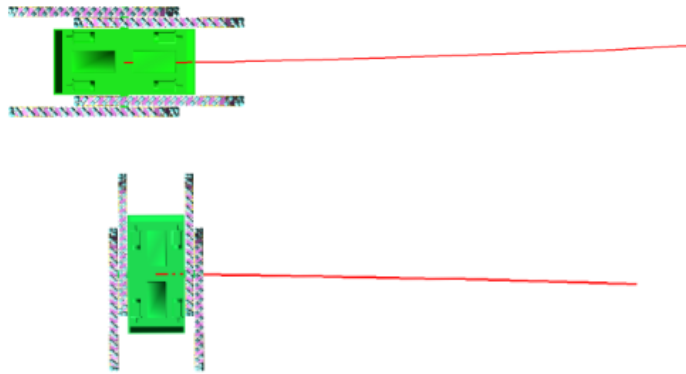


Rys. 1.45. Podnośnik widłowy o łąkach omnikierunkowych w układzie równoległym, całkowicie niezachodzącym [91]

Ruch w kierunku innym niż w osi głównej uzyskuje się dzięki odpowiedniemu sterowaniu napędami poszczególnych łąkach. W kierunku równoległym do kierunku osi rolki swobodnej będącej w kontakcie z podłożem występuje znacznie większe opory ruchu niż w kierunku prostopadłym. Dzięki temu, w połączeniu z ruchem względnym poszczególnych łąkach możliwe jest uzyskanie efektu przetaczania się pojazdu w kierunku innym niż jego oś główna.

Jedną z pierwszych prac, opisujących badania nad pojazdami o opisywanych podwoziach jest wydany w 2014 artykuł konferencyjny [92]. Artykuł opisuje kinematykę robota w układzie łąkach symetrycznych, całkowicie zachodzących. Przedstawia wyniki uproszczonej symulacji ruchu robota o łąkach symetrycznych, częściowo zachodzących. Wyniki wskazują na obecność zjawiska zakrzywienia trajektorii ruchu względem ruchu planowanego, zarówno podczas ruchu wzdłużnego,

jak i poprzecznego. Rysunki ilustrujące zjawisko zakrzywienia trajektorii ruchu zaczerpnięte z tej pracy przedstawiono na rys. 1.46 [92].



Rys. 1.46. Trajektoria ruchu pojazdu omnigąsienicowego z widocznym zakrzywieniem kierunku ruchu uzyskana na podstawie symulacji numerycznej [92]

Wydana w 2015 roku publikacja [93] rozwija zagadnienia poruszone w [92]. W pracy omawiane są podwozia złożone z trzech gąsienic usytuowanych pod kątem 120° , z czterech gąsienic usytuowanych pod kątem 90° oraz podwozie symetryczne, całkowicie niezachodzące w dwóch wariantach usytuowania rolek tocznych. W pracy przedstawiono analizę wpływu kąta usytuowania rolki tocznej na osiąganą prędkość ruchu, a także opisano badania terenowe prototypu robota o podwoziu w układzie symetrycznym, całkowicie niezachodzącym. Badania obejmowały pomiar poboru prądu podczas wykonywania konkretnych typów ruchu, a także wpływ orientacji katowej robota efektywność ruchu pokonywania wzniesień.

W 2018 roku wydana została publikacja [94], w której opisano budowę dwóch demonstratorów pojazdów w układzie gąsienic symetrycznym, całkowicie niezachodzącym. Pierwszy pojazd o wymiarach $0,8 \times 1,2$ m (szerokość i długość) wyposażono w dodatkowe napędy, umożliwiające unoszenie gąsienic. Drugi z demonstratorów to pełnowymiarowy pojazd o wymiarach $2,5 \times 3,5$ m, takim samym układzie gąsienic. W pracy opisano szereg testów, którym poddano omawiany pojazd oraz przedstawia możliwe koncepcje przemysłowego wykorzystania proponowanego podwozia.

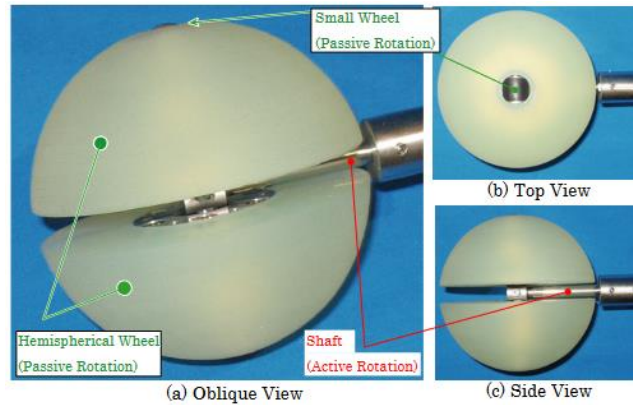
W 2020 roku opublikowano najbardziej kompleksową pracę dotyczącą badań numerycznych oraz eksperymentalnych pełnowymiarowego pojazdu o napędzie omnigąsienicowym [91]. Pojazdem tym jest wózek widłowy o masie całkowitej 5 t, wyposażony w podwozie omnigąsienicowe w układzie symetrycznym, całkowicie niezachodzącym. W pracy przedstawiono matematyczny opis kinematyki dla wybranego typu podwozia oraz analizę związku pomiędzy kątem usytuowania swobodnej rolki tocznej a prędkością ruchu. Następnie zaprezentowano model numeryczny omawianego pojazdu oraz przedstawiono wyniki symulacji różnych wariantów ruchu. W części dotyczącej badań stanowiskowych przedstawiono analizę poboru prądu podczas różnych rodzajów ruchu, a także wyniki pomiaru prędkości obrotowej napędów.

1.5.3 Łaziki wielokierunkowe

Pozostałe pojazdy wykorzystujące różne modyfikacje napędu gąsienicowego celem uzyskania ruchu omniskierunkowego w literaturze są określane mianem łazików wielokierunkowych oraz „omnicrawlerów”. Przykładem pojazdów z tej grupy jest podwozie oparte na rozwinięciu koncepcji koła półsferycznego (*hemispherical wheel*), czyli koncepcji koła złożonego z dwóch niezależnie obracających się półsfer, opisany w pracach [95, 96, 97], które przedstawiono na rys. 1.47 [97].

Konstrukcja ta umożliwi pasywny obrót sfery w dowolnym kierunku. Gąsienice cylindryczne, podobnie jak koła sferyczne, składają się z dwóch oddzielnych części. Obydwie połowy bryły gąsienicy posiadają wspólny napęd, umożliwiając przetaczanie wzdłużne przetaczanie kolejnych ogniw. Przykład takiej gąsienicy przedstawiono na rys. 1.48 [i41].

Omawiany pojazd, przedstawiony na rys. 1.49 [i42] wykorzystuje dwie gąsienice cylindryczne do przemieszczania się.



Rys. 1.47. Widoki koła półsferycznego [97]



Rys. 1.48. Gąsienica oparta o koncepcję koła półsferycznego [i41]



Rys. 1.49. Przykład łazika wykorzystujący gąsienice oparte o koncepcję koła sferycznego [i42]

1.6 Cel badań i zakres pracy

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego można stwierdzić, że aktualny stan wiedzy dotyczący pojazdów omnigąsienicowych zawiera wiele luk badawczych. Prace poruszające temat takich pojazdów są nieliczne i swoim zakresem nie obejmują całości zagadnień związanych z procesem syntezy takich pojazdów. Wykazano brak ogólnych metod projektowania. W literaturze opisywane są albo pełnowymiarowe urządzenia, o gabarytach maszyny roboczej, takiej jak koparka

czy wózek widłowy, bądź o średnich gabarytach, takich jak robot mobilny transportujący palety. Brakuje opisu urządzeń o niewielkich gabarytach. Dostępne artykuły i opracowania przedstawiają jedynie wycinek wiedzy konstruktorskiej, przydatnej podczas projektowania pojazdów omnigąsienicowych. Aspekty dotyczące wpływu kształtu lub liczby rolek tocznych na parametry ruchu są całkowicie pominięte. Nie poruszono również zagadnień doboru napędów do tego typu pojazdów, jak również wpływu całkowitej masy układu na parametry jazdy.

Prace dotyczące sterowania pojazdami omnigąsienicowymi istnieją, jednak ich ilość, w stosunku do pokrewnej dziedziny, jaką jest sterowanie pojazdami wyposażonymi w koła omnikierunkowe, również jest niewielka. Zagadnienia związane z odtwarzaniem zaplanowanej trajektorii ruchu są omawiane w bardzo wąskim zakresie, głównie na podstawie symulacji. Obecność zjawiska odchylenia rzeczywistej trajektorii ruchu od trajektorii zadanej jest jedynie sygnalizowana. Autorzy dostępnych prac nie podjęli próby wyjaśnienia tego problemu, jego natury czy opisu matematycznego. Metody dotyczące kompensacji odchylenia trajektorii ruchu pojazdu omnigąsienicowego zauważane przez autorów prac istniejących przed rozpoczęciem badań do niniejszej rozprawy doktorskiej były poruszane w bardzo niewielkim stopniu lub całkowicie pomijane. W żadnej z prac nie przedstawiono proponowanych rozwiązań zauważonego problemu. W pracach istniejących przed rozpoczęciem badań do niniejszej rozprawy nie przedstawiono zarejestrowanych trajektorii ruchu, ukazujących faktyczną ścieżkę ruchu pojazdu, względem nieruchomego układu współrzędnych. Brakuje danych dotyczących drgań, jakie pojawiają się podczas ruchu pojazdu omnigąsienicowego.

W niniejszej pracy doktorskiej, biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy, a także znalezione luki badawcze sformułowano następujący cel pracy:

opracowanie metod syntezy i analizy robota mobilnego wyposażonego w gąsienice omnikierunkowe oraz metody aktywnej kompensacji kierunku ruchu.

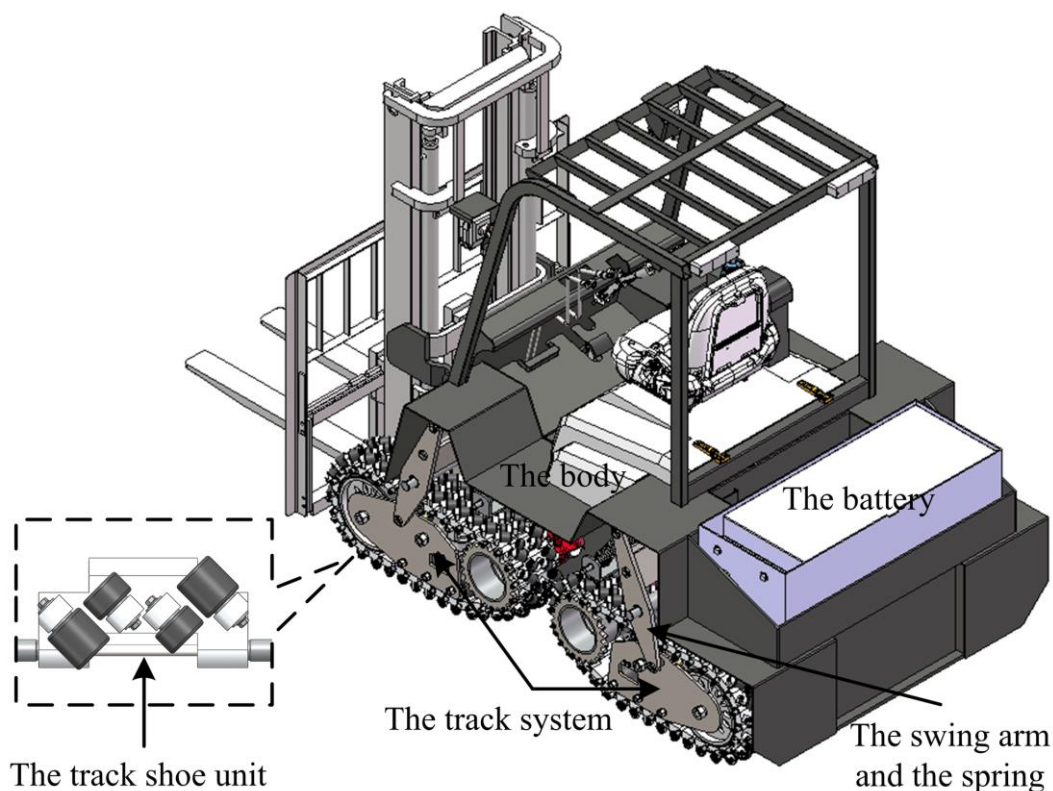
W pracy doktorskiej badania dotyczyć będą pojazdów o podwoziu z gąsienicami całkowicie zachodzącymi, o symetrycznym układzie rolek tocznych.

Osiągnięcie celów pracy wymaga zrealizowania celów pośrednich:

- opracowanie metody analizy kinematycznej układów jazdy pojazdów omnigąsienicowych o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących,
- opracowanie metod projektowania pojazdów omnigąsienicowych o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących,
- zrealizowaniu badania stanowiskowego pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących,
- opracowanie metody budowy modelu obliczeniowego i badań symulacyjnych dynamiki pojazdów omnigąsienicowych
- opracowanie metody kompensacji zakrzywienia trajektorii ruchu pojazdów omnigąsienicowych o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących.
- opracowanie algorytmów wykrywania i omijania przeszkód przez pojazdy o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących, na podstawie danych uzyskanych z systemu wizyjnego

2. Budowa pojazdów omnigąsienicowych

Pojazdy omnigąsienicowe w równoległym układzie łożysk, o rolkach swobodnych mają wiele cech wspólnych z typowymi pojazdami gąsienicowymi. Kształt bryły korpusu, w przeciwieństwie do ballbotów czy robotów balansujących, nie ma istotnego wpływu na parametry jezdne. Jego kształt determinuje więc albo aspekt ekonomiczny, albo specyfika zadań, jakie będzie wykonywać pojazd. Rozkład łożysk w obu tych przypadkach również jest podobny. Obydwa typy pojazdów mają łożyska równoległe. To oznacza, że wizualnie oba typy tych konstrukcji mogą być do siebie bardzo podobne, co przedstawiono na rys. 2.1 [91] oraz 2.2 [i41]. Różnicę stanowi jednak to, że klasyczne pojazdy gąsienicowe mają typowo dwa układy bieżne, natomiast pojazdy omnigąsienicowe – cztery.

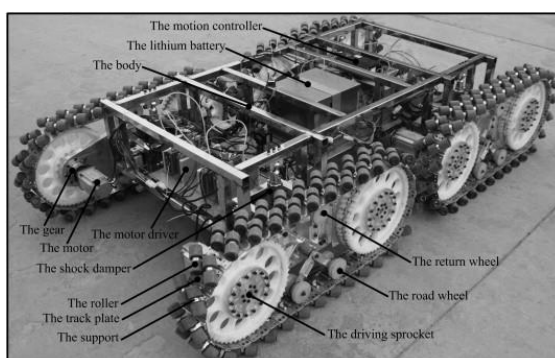


Rys. 2.1. Widok wózka widłowego wyposażonego w łożyska omniskierunkowe [91]

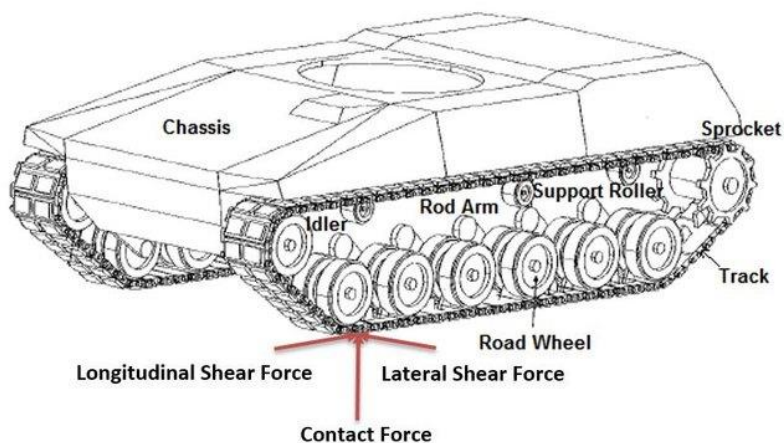


Rys. 2.2. Podnośnik widłowy MOROOKA MFD-20 wyposażonego w klasyczny napęd gąsienicowy [i43]

Konstrukcja pojedynczego gąsienicowego układu bieżnego w przypadku obu tych pojazdów również jest analogiczna. Obydwa typy pojazdów w jednym układzie bieżnym mają pojedynczą gąsienicę, koło napinające, koło napędowe oraz koła jezdne. Możliwa jest również obecność wałków powrotnych, które uniemożliwiają uginanie się gąsienicy podczas jej ruchu powrotnego. Na rys. 2.3 [93] przedstawiono widok układu bieżnego pojazdu omnigąsienicowego, natomiast na rys. 2.4 [98] widok układu bieżnego typowego pojazdu gąsienicowego.



Rys. 2.3. Widok czterech układów bieżnych pojazdu omnigąsienicowego w układzie gąsienic równoległym, całkowicie niezachodzącym [93]



Rys. 2.4. Widok układu bieżnego typowego pojazdu gąsienicowego [98]

Pomimo podobieństw w budowie układów bieżnych, różnicę stanowi konstrukcja samej taśmy gąsienicy. Gąsienica klasycznych pojazdów gąsienicowych jest zwykle typową gąsienicą segmentową, złożoną ze sztywnych ogniów (rys. 2.5 [i44]). Poszczególne ogniwa połączone są ze sobą parami obrotowymi, co umożliwia zginanie całej taśmy gąsienicy.



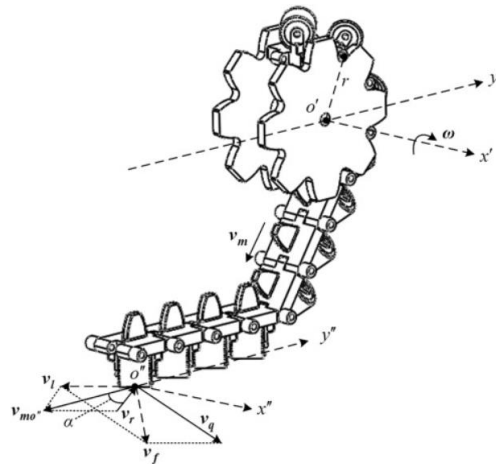
Rys. 2.5. Widok fragmentu gąsienicy segmentowej [i44]

Drugim typem gąsienic wykorzystywanym w klasycznych pojazdach gąsienicowych są gąsienice elastomerowe, przedstawione na rys. 2.6 [99]. Gąsienice te składają się z elastomerowego pasa z profilowanymi elementami, umożliwiającymi prowadzenie kół jezdnych oraz współpracę z kołem napędowym. Gąsienice tego typu zazwyczaj wzmacniane są opłotem ze stalowych linek, które przeciwdziałają rozciągnięciu pasa gąsienic oraz opcjonalnie w żebra usztywniające [99].



Rys. 2.6. Elastomerowa gąsienica w ładowarce firmy ASV Posi-Track [99]

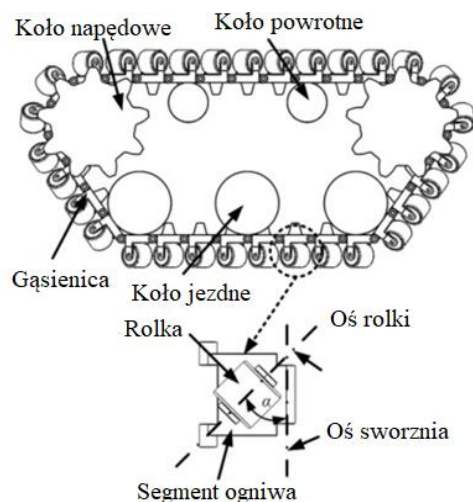
Konstrukcja gąsienic w pojazdach omnigąsienicowych jest podobna do klasycznej gąsienicy segmentowej. Na ogniwach gąsienicy pojazdu omnigąsienicowego muszą zostać zamocowane swobodne rolki toczne, które umożliwią przetaczanie korpusu w kierunku innym niż oś główna pojazdu (rys. 2.7 [93]).



Rys. 2.7. Schemat ogniwa gašienicy omnikierunkowej [93]

Z tego względu najbardziej oczywistym wyborem w pojazdach omnięašienicowych jest typowa gašienica segmentowa, do ogniw której przytwierdzone są rolki toczne. Dotychczas opublikowane prace naukowe dotyczące zagadnień związanych z pojazdami omnięašienicowymi poruszały zagadnienia związane wyłącznie z pojazdami o omnięašienicach opartych o gašienice złożone z ogniw. Istnieje jednak możliwość wykorzystania w pojeździe omnięašienicowym gašienicy elastomerowej. Do żeber usztywniających taką gašienicę, podobnie jak do pojedynczych ogniw, również można przytwierdzić swobodne rolki toczne. Działanie to eliminuje jednak jedną z podstawowych zalet gašienic elastomerowej, jaką jest zdecydowanie mniej niszczący wpływ wywierany na podłoże w porównaniu z metalową gašienicą segmentową. Po montażu rolek tocznych elastomer nie będzie miał kontaktu z podłożem. Należy jednak zaznaczyć, że przegląd literaturowy nie wykazał, aby do tej pory prowadzono badania związane z zastosowaniem elastomerowych gašienic omnikierunkowych. Oznacza to że brakuje danych, aby jednoznacznie ocenić wady i zalety zastosowania takiego rozwiązania konstrukcyjnego.

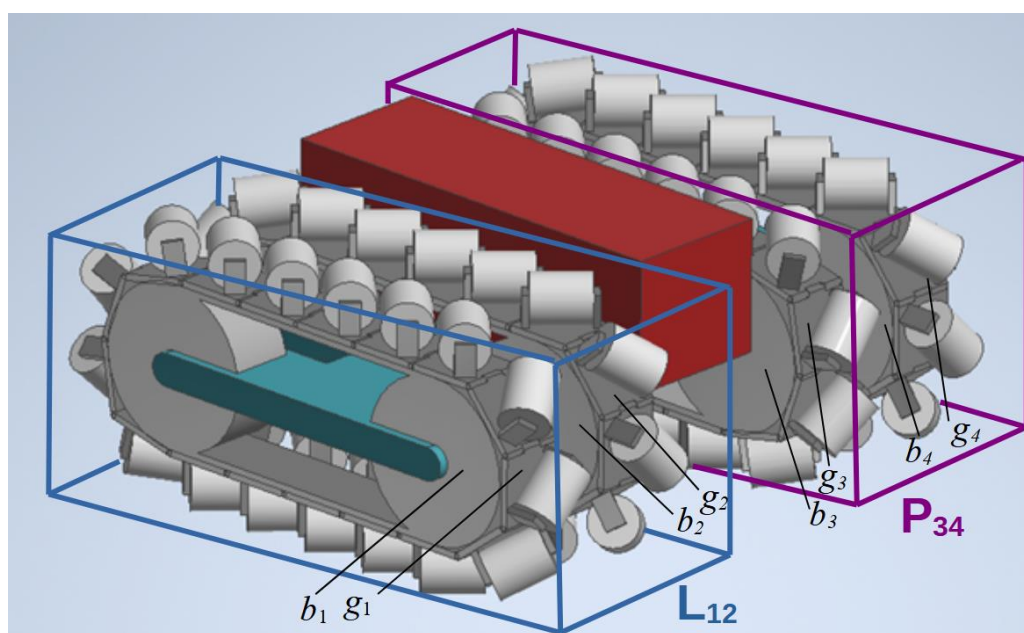
Pojedyncze ogniwo gašienicy omnikierunkowej posiada od jednej do kilku swobodnych, nienapędzanych rolek tocznych. Rolka, bądź rolki, zamocowane są pod kątem α w stosunku do osi poprzecznej gašienicy, co schematycznie przedstawiono na rys. 2.8 [93]. Najczęściej wykorzystywana wartość kąta α wynosi 45° .



Rys. 2.8. Schemat pojedynczej rolki tocznej ogniwa omnięašienicy, α określa orientację swobodnej rolki tocznej [93]

Każdy układ bieżny gąsienicy, oznaczany dalej jako b_n , posiada indywidualny napęd i układ sterowania. Oznacza to, że każda gąsienica może obracać się w dowolnym kierunku i z dowolną prędkością. Gąsienice, oznaczane jako g_n , zamontowane są parami po dwóch stronach korpusu. Na rys. 2.9 przedstawiono koncepcyjny model bryłowy pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach całkowicie zachodzących, z rolkami w ułożeniu symetrycznym. Można zatem uznać, że pojazd omnigąsienicowy o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących składa się z dwóch identycznych modułów, z których każdy wyposażony jest w dwa niezależne układy bieżne. Konstrukcja omawianego pojazdu musi wyglądać w taki sposób, ze względu na występowanie zjawisk dynamicznych. Rzeczywisty pojazd złożony z jednego modułu o dwóch układach bieżnych zachowywałby się po części jak pojazd omnikierunkowy, a po części jak typowy pojazd gąsienicowy. Sterowanie taką maszyną byłoby zależne od bardzo wielu zmiennych i czynników zewnętrznych, takich jak całkowite obciążenie, jego rozkład, współczynniki tarcia pomiędzy rolkami a podłożem lub prędkość ruchu gąsienic względem korpusu.

W przypadku sterowania pojazdem złożonym z pojedynczego modułu układów bieżnych, w idealnych warunkach całkowitej przyczepności pojazdu do podłoża efektem będzie założony ruch w zadanym kierunku. Jednak zakładając jakiegokolwiek poślizgi pomiędzy rolką toczną a podłożem, pojazd omnigąsienicowy zacznie dodatkowo przyjmować cechy typowego pojazdu gąsienicowego. Jeśli kierunki bądź wartości prędkości zadanych będą się od siebie różnić, pojazd zacznie się obracać bądź skręcać. Efektem będzie złożenie tych dwóch ruchów, na które można wpłynąć jedynie pośrednio, poprzez zmianę parametrów zewnętrznego środowiska, w którym porusza się pojazd.



Rys. 2.9. Model koncepcyjny wstępnego demonstratora projektowanego pojazdu OMP2024_1. Zaznaczone moduły L_{12} i P_{34} , układy bieżne b_n oraz gąsienice g_n

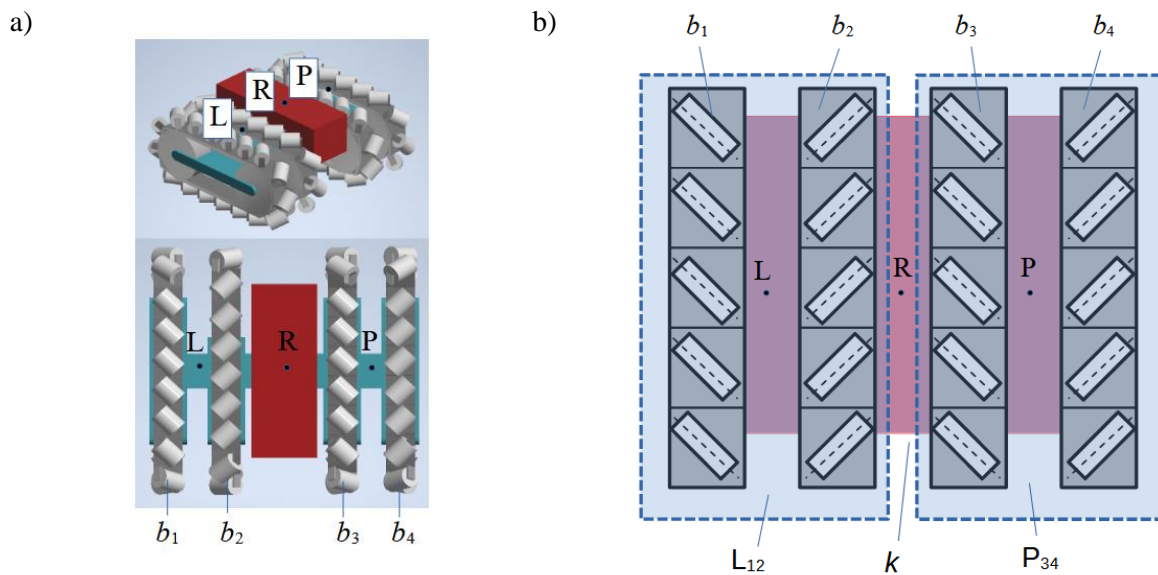
Ze względu na brak literatury dotyczącej aspektów konstrukcyjnych pojazdów omnigąsienicowych w układzie gąsienic równoległym, całkowicie zachodzącym istotne było empiryczne zweryfikowanie działania takiego pojazdu oraz zasadność prowadzenia badań w tym kierunku. W niniejszej pracy doktorskiej obiektami badawczymi będą demonstratory pojazdu omnigąsienicowego wyposażone w gąsienice w układzie równoległym, całkowicie zachodzącym, o nazwie własnej OMP2024_1 oraz OMP2024_2.

3. Metoda analizy kinematycznej układu jazdy pojazdu omnigąsienicowego

Analiza kinematyczna porusza zagadnienia dotyczące wzajemnego ruchu członów. Zakłada się, że człony mają ustaloną długość, są sztywne i nie podlegają odkształceniom. W analizie kinematycznej całkowicie zaniedbuje się siły zewnętrzne, masy i bezwładność członów. Ruch członów wynika wyłącznie z wymuszeń kinematycznych, czyli określonych charakterystyk zmiany położenia poszczególnych członów w czasie [100, 101]. Aby umożliwić sterowanie pojazdem omnigąsienicowym konieczne było opracowanie odpowiednich równań kinematyki, opisujących związek pomiędzy prędkością liniową poszczególnych gąsienic, a prędkością oraz wynikowym kierunkiem ruchu korpusu platformy. Równania te umożliwią wyliczenie wartości sterujących, które zostaną wykorzystane podczas badań eksperymentalnych robotów mobilnych OMP2024_1 i OMP2024_2.

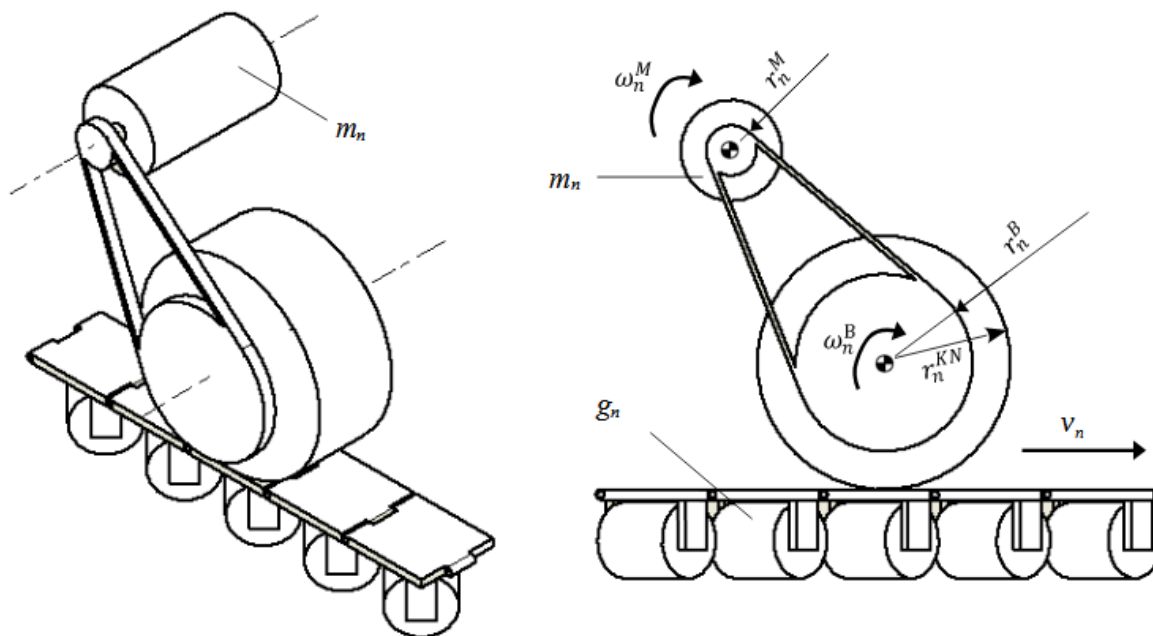
3.1 Analiza kinematyczna pojazdu omnigąsienicowego

Pojazd omnigąsienicowy z gąsienicami całkowicie zachodzącymi posiada cztery układy bieżne b_n oznaczone jako $n = 1, \dots, 4$ oraz korpus k . Sąsiadujące ze sobą układy bieżne można podzielić na pary, nazywane dalej modułami. W skład pierwszego modułu, określanego dalej jako L_{12} , wchodzi układy b_1 oraz b_2 . W skład drugiego modułu, określanego jako P_{34} wchodzi układy b_3 oraz b_4 . Typowy pojazd omnigąsienicowy składa się z dwóch identycznych, równoległych modułów. W geometrycznym środku korpusu k , będącym jednocześnie środkiem robota wyznaczono punkt R , będący tożsamy ze środkiem robota. W geometrycznym środku modułu L_{12} wyznaczono punkt L , natomiast w geometrycznym środku modułu P_{34} wyznaczono punkt P . Schemat pojazdu wraz z modelem bryłowym przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Pojazdu omnigąsienicowy o gąsienicach całkowicie zachodzących: a) widok modelu bryłowego i b) schemat pojazdu

Pojedynczy układ bieżny b_n składa się z gąsienicy g_n , napędu obrotowego m_n , przekładni pasowej oraz koła napędowego. Koło połączone z napędem, którego prędkość oznaczona jest jako ω_n^M , jest kołem czynnym przekładni. Przekładnia wprawia w ruch koło bierne, którego prędkość oznaczona jest jako ω_n^B . Koło bierne połączone jest z kołem napędowym gąsienicy. Koło napędowe wymusza ruch gąsienicy g_n z prędkością v_n , co przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Budowa omnigąsienicowego układu bieżnego b_n

Przełożenie przekładni pomiędzy napędem a kołem biernym i_{MBn} można opisać wzorem:

$$i_{MBn} = \frac{\omega_n^M}{\omega_n^B} = \frac{r_n^B}{r_n^M}, \quad (3.1)$$

gdzie:

n – numer układu bieżnego $n = 1, \dots, 4$,

r_n^B – promień koła biernego układu bieżnego n ,

r_n^M – promień koła czynnego układu bieżnego n ,

ω_n^B – prędkość kąтова koła biernego układu bieżnego n ,

ω_n^M – prędkość kąтова koła czynnego układu bieżnego n .

Prędkość liniową v_n gąsienicy g_n można opisać zależnością:

$$v_n = \omega_n^M i_{MBn} r_n^{KN}, \quad (3.2)$$

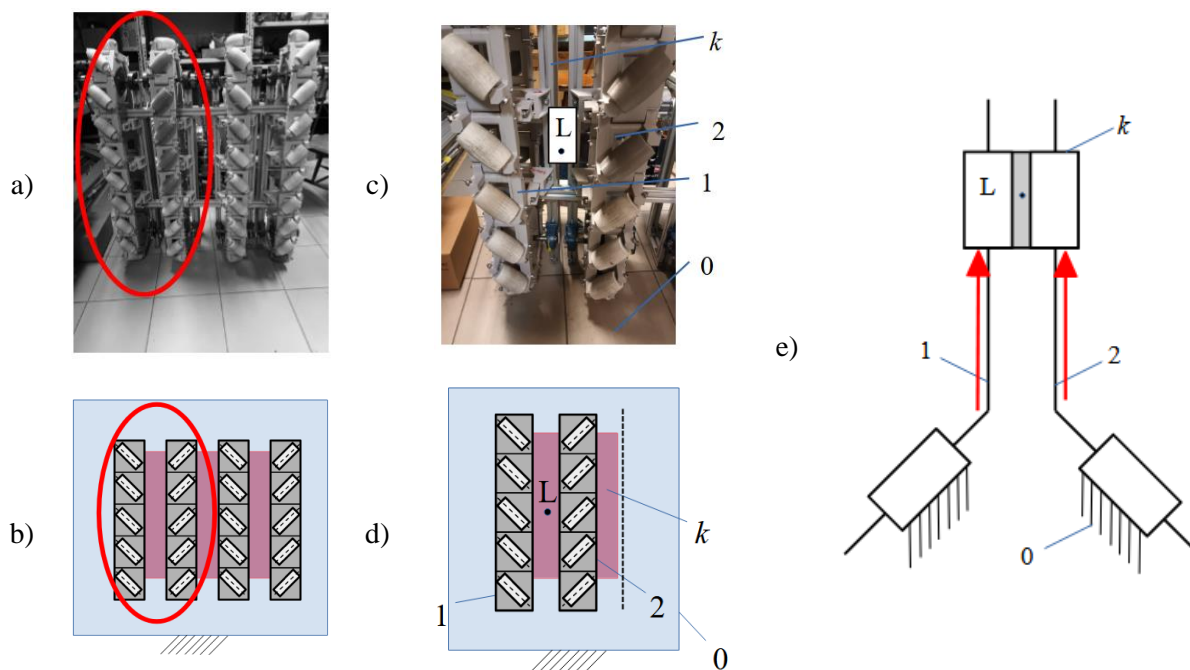
gdzie:

r_n^{KN} – promień koła napędowego układu bieżnego n .

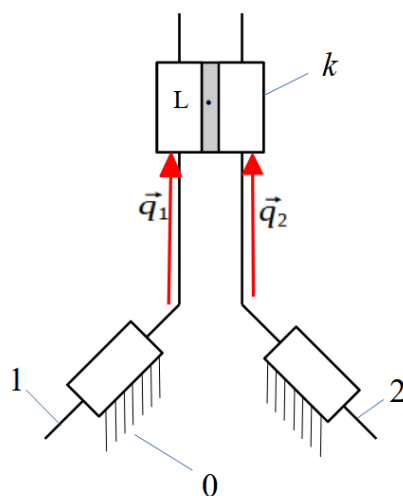
Zależność (3.2) opisuje prędkość v_n ruchu gąsienicy g_n względem korpusu k pojazdu. Na podstawie obliczonych prędkości poszczególnych gąsienic możliwe jest ustalenie kierunku i prędkości ruchu punktu R, znajdującego się na korpusie k robota. Korpus porusza się ruchem postępowym, zatem wektory prędkości wszystkich punktów należących do danego ciała będą sobie równe. Można więc przyjąć, że aby wyznaczyć kierunek i wartość wektora prędkości punktu R, wystarczy wyznaczyć orientację i wartość wektora prędkości pojedynczego modułu, czyli punktu L w przypadku modułu L₁₂ lub punktu P w przypadku modułu P₃₄.

Zaproponowano model kinematyczny pojedynczego modułu, złożonego z dwóch układów bieżnych. Pominięto wszelkie opory ruchu. Założono brak poślizgów podczas interakcji rolki tocznej z płaskim podłożem. Oznacza to, że połączenie pomiędzy podłożem a rolką toczną można traktować jako parę postępową I klasy. Orientacja rolki tocznej względem gąsienicy nie ulega zmianie w trakcie ruchu, dlatego oba te elementy mogą zostać zastąpione jednym członem, składającym się z dwóch elementów belkowych unieruchomionych względem siebie pod kątem, który odpowiada kątowi orientacji rolki tocznej. Ruch gąsienicy względem korpusu pojazdu jest zawsze prostoliniowy, dlatego połączenie gąsienicy z korpusem można przedstawić jako parę postępową I klasy. Aby umożliwić ruch gąsienicy względem korpusu, gąsienica ta musi być wyposażona w jeden napęd.

Zaproponowany model pojedynczego modułu pojazdu omniskierunkowego składa się z podstawy 0, dwóch prowadnic 1 i 2, z których każda składa się z dwóch elementów belkowych zorientowanych i unieruchomionych względem siebie oraz korpusu k z dwoma równoległymi zamocowanymi suwakami. Schemat zaproponowanego uproszczenia mechanizmu pojazdu omnigąsienicowego przedstawiono na rys. 3.3, natomiast schemat kinematyczny na rys. 3.4. Na potrzeby prezentowanego przykładu przyjęto, że jest to model modułu L₁₂, ze środkiem geometrycznym w punkcie L, w skład którego wchodzi układy bieżne 1 i 2, modelowane członami 1 i 2.



Rys. 3.3. Pojazd omnigąsienicowy: a) widok podwozia pojazdu omnigąsienicowego, b) widok schematu podwozia pojazdu omnigąsienicowego, c) widok pojedynczego modułu pojazdu omnigąsienicowego, d) schemat pojedynczego modułu pojazdu omnigąsienicowego, e) model kinematyczny pojedynczego modułu pojazdu omnigąsienicowego



Rys. 3.4. Schemat kinematyczny pojedynczego modułu pojazdu omnigąsienicowego

Ruchliwość omawianego mechanizmu obliczono ze wzoru na ruchliwość mechanizmu klinowego:

$$W = 2(k - 1) - p_1, \quad (3.3)$$

gdzie:

W – ruchliwość,

k - ilość członów,

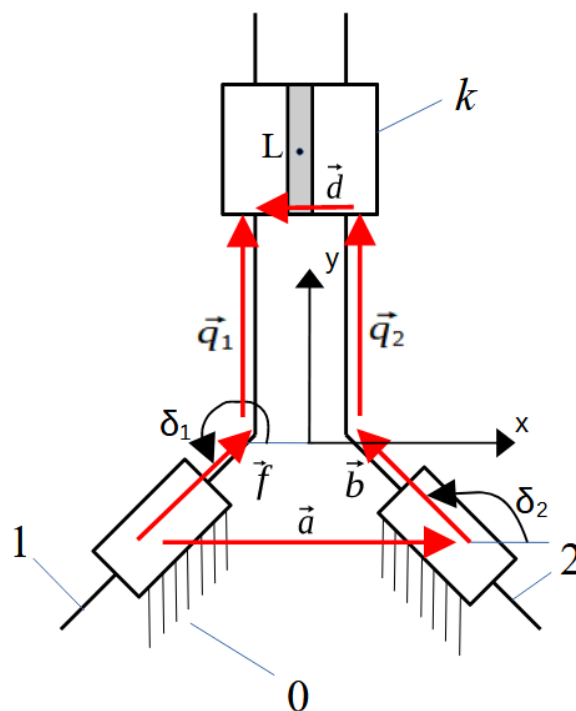
p_1 – ilość par I klasy.

Dla $k = 4$ i $p_1 = 4$ ruchliwość W wynosi:

$$W = 2.$$

Omawiany mechanizm (rys. 3.4) ma dwa stopnie swobody. Oznacza to, że do sterowania konieczne są dwa wymuszenia kinematyczne (napędy). Pierwsze z nich, nazwane q_1 , opisuje przemieszczenie członu 1 względem korpusu k . Drugi napęd, określony jako q_2 wymusza przemieszczenie pomiędzy członem 2 a korpusem k . Człon k reprezentuje w tym modelu korpus pojazdu omnigąsienicowego. Człony 1 i 2 to odpowiednio lewa i prawa gąsienica (g_1 oraz g_2). Oznacza to, że prędkości napędów \dot{q}_1 i \dot{q}_2 są równe prędkościom ruchu liniowego gąsienic względem korpusu k pojazdu.

Analizy omawianego mechanizmu dokonano za pomocą równań wektorowych. W zaproponowanym mechanizmie położenie członów można opisać jednym wektorowym równaniem więzów (rys. 3.5).



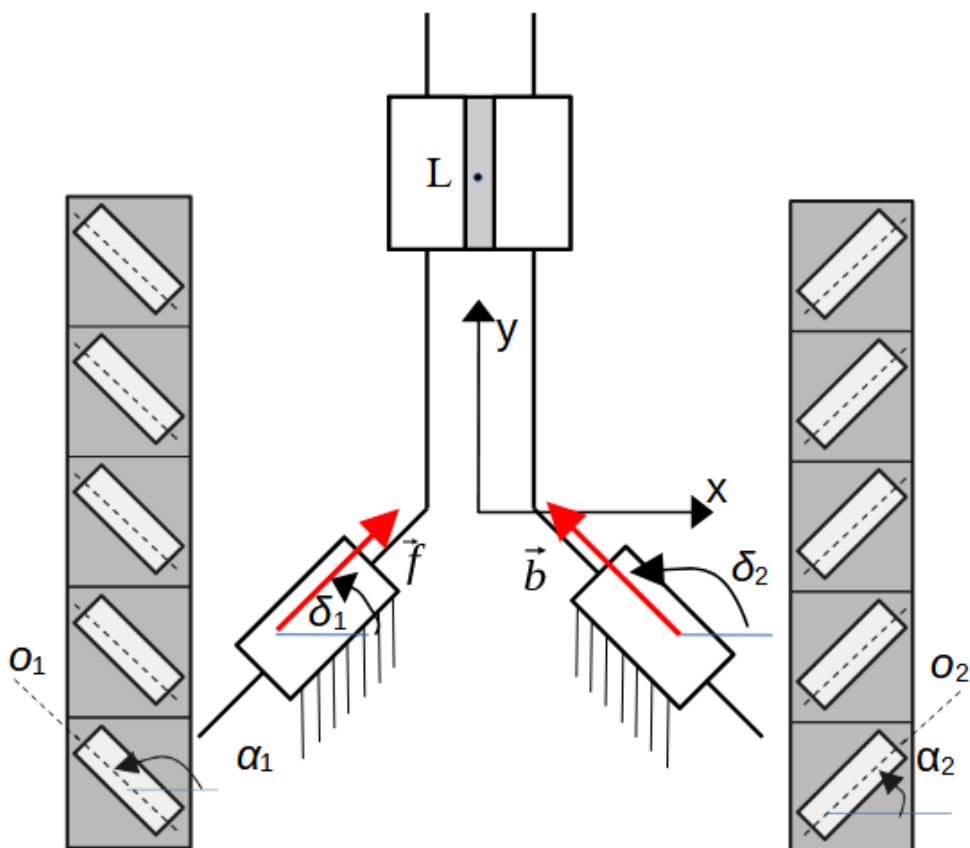
Rys. 3.5. Schemat mechanizmu i łańcuch wektorowy wykorzystany do analitycznego obliczenia przemieszczeń i prędkości mechanizmu

Równania więzów tego mechanizmu można zapisać jako:

$$\vec{a} + \vec{b} - \vec{q}_1 + \vec{d} + \vec{q}_2 - \vec{f} = 0.$$

Znane są długości wektorów \vec{a} , \vec{q}_1 , \vec{d} , \vec{q}_2 oraz kąty δ_1 i δ_2 (rys. 3.5). Wektory \vec{q}_1 oraz \vec{q}_2 opisują zadane wymuszenia kinematyczne, czyli przemieszczenie gąsienic względem korpusu k . Wektory \vec{a} i \vec{d} definiują geometrię układu. Szukanymi są długości wektorów \vec{b} oraz \vec{f} , na podstawie których można określić przemieszczenie korpusu k pojazdu względem podstawy 0. Wektor \vec{a} jest równoległy do osi x globalnego układu współrzędnych i znajduje się na podstawie. Jego długość równa jest odległości pomiędzy umownymi miejscami zamocowania suwaków. W analizie kinematycznej prostoliniowa prowadnica może wykonywać w suwaku wyłącznie posuwisty ruch w kierunku równoległym do suwaka. Oznacza to, że dla niniejszej analizy nie ma znaczenia w jakiej odległości a od siebie przy-

jęte zostaną punkty, w których umiejscowione będą suwaki. Orientacja kątowa δ_1, δ_2 tych suwaków tożsama jest z kątem α orientacji swobodnych rolek tocnych. Wektor \vec{b} jest długością wysunięcia prowadnicy 2 względem przyjętego wcześniej punktu, w którym na podstawie umiejscowiono suwak. Należy podkreślić, że suwak ten jest tylko konstruktem teoretycznym – jego obecność jest konieczna, aby wprowadzić do modelu interakcję pomiędzy gaśienicą a podłożem. Orientacja wektora \vec{b} opisana jako δ_2 wymuszona jest przez kierunek prowadnicy 2, natomiast jego długość jest zmienną. Kąt δ_2 uzależniony jest od parametrów konstrukcyjnych omnigaśienicy. Jego wartość jest o 90° większa od kąta α_2 , określającego orientację kątową osi swobodnej rolki toczonej o_2 względem osi poprzecznej gaśienicy (rys. 3.6). W rezultacie, wektor \vec{b} oraz oś swobodnej rolki toczonej o_2 są względem siebie prostopadłe.



Rys. 3.6. Schemat zależności pomiędzy kątami δ_1 i δ_2 a kątami orientacji swobodnej rolki toczonej α_1 i α_2

Wektor \vec{q}_2 jest równoległy do osi y globalnego układu współrzędnych. Jego długość tożsama jest z przemieszczeniem liniowym gaśienicy g_2 względem korpusu. Oznacza to, że jest to wartość znana, wynikająca z zadanego sterowania. Wektor \vec{d} jest równoległy do osi x globalnego układu współrzędnych. Jest to odległość pomiędzy elementami modelu reprezentującymi gaśienicę. Wektor ten reprezentuje rozstaw gaśienic w pojedynczym module napędowym pojazdu omnigaśienicowego. Wektor \vec{q}_1 tożsamy jest z przemieszczeniem liniowym gaśienicy g_1 względem korpusu. Jest równoległy do osi y, a jego długość wynika z przyjętego sterowania. Wektor \vec{f} , podobnie jak wektor \vec{b} , przedstawia długość wysunięcia prowadnicy 1 względem teoretycznie przyjętego suwaka, umiejscowionego na podstawie. Zorientowany jest pod kątem δ_1 , który zależy od kąta orientacji swobodnej rolki toczonej na rozpatrywanej gaśienicy. Wartość δ_1 jest o 90° mniejsza od kąta α_2 . Ponadto, wektor \vec{f} domyka łańcuch.

Rzutuując wektory na poszczególne osie można uzyskać następujący układ równań, opisujący położenie poszczególnych elementów mechanizmu:

$$\begin{cases} 0 = a + b \cos \delta_2 - d - f \cos \delta_1 \\ 0 = b \sin \delta_2 - q_1 + q_2 - f \sin \delta_1 \end{cases} \quad (3.4)$$

Dane są wartości q_1 oraz q_2 , szukane to b oraz f . Rozwiązanie powyższego układu równań przyjmuje formę:

$$b = \frac{d - a + \frac{a \tan \delta_2 - d \tan \delta_2 + q_1 - q_2}{\cos \delta_1 \tan \delta_2 - \sin \delta_1 \cos \delta_2} \cos \delta_1}{\cos \delta_2}, \quad (3.5)$$

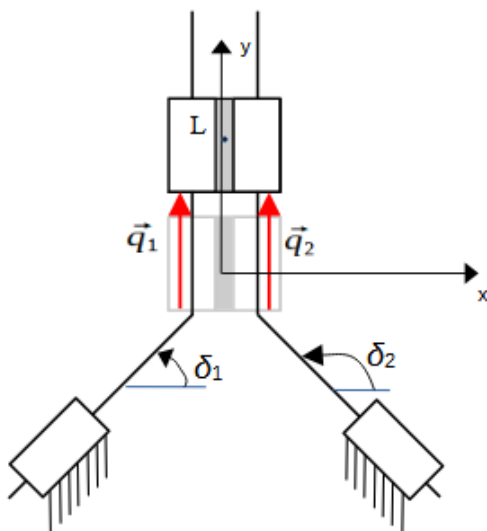
$$f = \frac{a \tan \delta_2 - d \tan \delta_2 + q_1 - q_2}{\cos \delta_1 \tan \delta_2 - \sin \delta_1 \cos \delta_2}. \quad (3.6)$$

Na rys. 3.7 przedstawiono kilka przykładowych konfiguracji omawianego mechanizmu dla wartości zebranych w tab. 3.1. Jako położenie początkowe mechanizmu przyjęto początek układu współrzędnych.

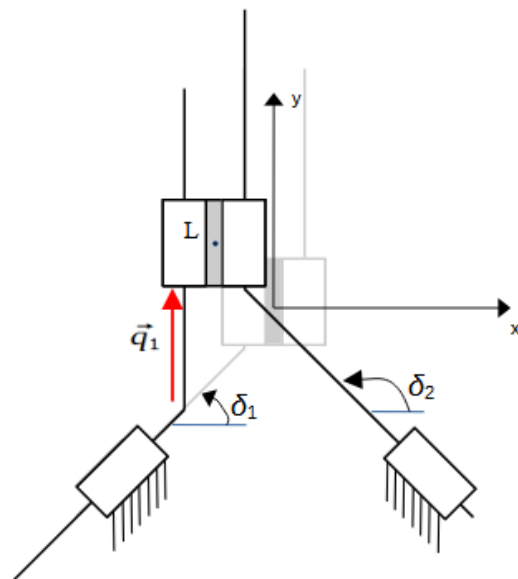
Tab. 3.1. Zadane przemieszczenia oraz parametry konstrukcyjne dla różnych konfiguracji modelu

Oznaczenie na rys. 3.7	$\delta_1 [^\circ]$	$\delta_2 [^\circ]$	$q_1 [m]$	$q_2 [m]$
a)	45	135	0,1	0,1
b)	45	135	0,1	0
c)	45	135	-0,1	0,1
d)	30	150	0,1	0,05

a)



b)

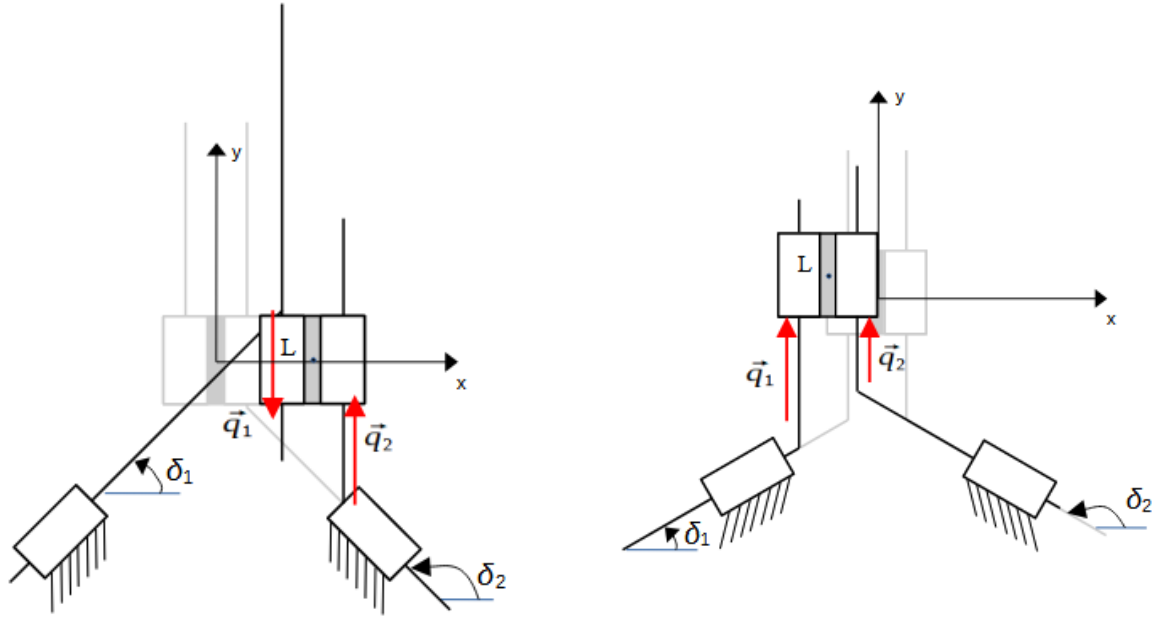


c)



d)





Rys. 3.7. Nowe położenia mechanizmu dla różnych parametrów konstrukcyjnych i wartości zadanych (kolor szary - położenie początkowe, kolor czarny - położenie końcowe)

Po jednokrotnym różniczkowaniu równań opisujących położenie względem czasu t powstanie układ równań opisujący zależności pomiędzy prędkościami w omawianym mechanizmie:

$$\begin{cases} 0 = \dot{b} \cos \delta_2 - \dot{f} \cos \delta_1 \\ 0 = \dot{b} \sin \delta_2 - \dot{q}_1 + \dot{q}_2 - \dot{f} \sin \delta_1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Równanie (3.7) można przedstawić w formie macierzowej:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & -\cos \delta_1 \\ \sin \delta_2 & -\sin \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{b} \\ \dot{f} \end{bmatrix} = 0. \quad (3.8)$$

Rozwiązanie przyjmuje postać:

$$\dot{b} = \frac{\dot{q}_1 - \dot{q}_2}{\cos \delta_2 (\cos \delta_1 \tan \delta_2 - \sin \delta_1 \cos \delta_2)} \cos \delta_1, \quad (3.9)$$

$$\dot{f} = \frac{\dot{q}_1 - \dot{q}_2}{\cos \delta_1 \tan \delta_2 - \sin \delta_1 \cos \delta_2}. \quad (3.10)$$

Na podstawie wyznaczonych wartości wektorów prędkości \vec{b} i \vec{f} możliwe jest wyznaczenie prędkości \vec{v}_L punktu L omawianego modułu na podstawie równania:

$$\vec{v}_L = \vec{b} + \vec{q}_2 = \vec{f} + \vec{q}_1, \quad (3.11)$$

$$\vec{v}_L = \begin{bmatrix} v_L^x \\ v_L^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{b} \cos \delta_2 \\ \dot{b} \sin \delta_2 + \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{f} \cos \delta_1 \\ \dot{b} \sin \delta_1 + \dot{q}_1 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Jako γ oznaczono orientację wektora \vec{v}_L . Kąt może zostać obliczony za pomocą funkcji $atan2$ na podstawie wzoru:

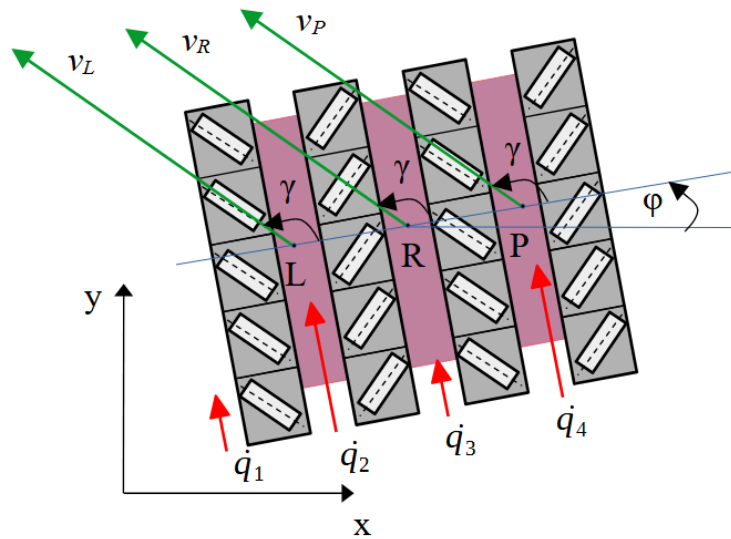
$$\gamma = atan2(v_L^y, v_L^x). \quad (3.13)$$

Funkcja $atan2$ zwraca kąt nachylenia prostej poprowadzonej przez środek układu współrzędnych i zadany punkt a osią x.

Wektor \vec{v}_L określa prędkość punktu L, która jest równa prędkości punktów R i P na korpusie k :

$$\vec{v}_L = \vec{v}_R = \vec{v}_P. \quad (3.14)$$

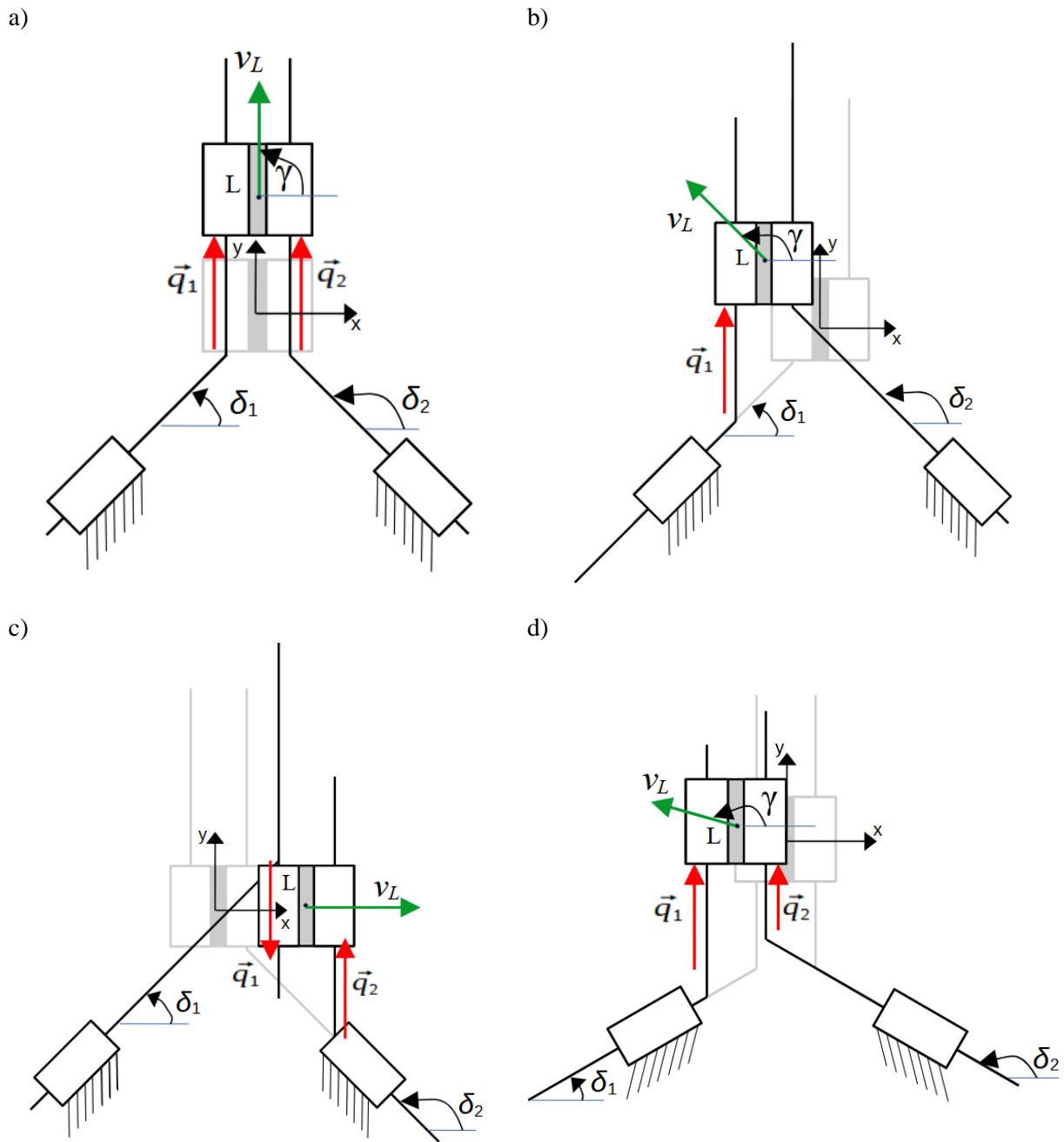
Jak wynika z równań (3.12) i (3.13) wartość wektora prędkości \vec{v}_L oraz jego kierunek γ zależą tylko od prędkości gąsienic \vec{q}_1 i \vec{q}_2 . To oznacza, że możliwe jest sterowanie prędkością punktu R znajdującego się na korpusie k w taki sposób, aby uzyskać ruch punktu R w dowolnym kierunku, bez zmiany orientacji katowej φ korpusu k , co przedstawiono na rys. 3.8. Na rys. 3.9 przedstawiono prędkości uzyskiwane przez punkt L mechanizmu o parametrach zestawionych w tab. 3.2. Jako położenie początkowe mechanizmu przyjęto początek układu współrzędnych.



Rys. 3.8. Graficzne przedstawienie parametrów jazdy pojazdu omnigąsienicowego

Tab. 3.2. Zadane prędkości oraz parametry konstrukcyjne dla różnych konfiguracji modelu

Oznaczenie na rys. 3.9	$\delta_1 [^\circ]$	$\delta_2 [^\circ]$	$\dot{q}_1 [m/s]$	$\dot{q}_2 [m/s]$	$v_L [m/s]$	$\gamma [^\circ]$
a)	45	135	0,1	0,1	10	90
b)	45	135	0,1	0	14,1	135
c)	45	135	-0,1	0,1	10	0
d)	30	150	0,1	0,05	15,2	170,5

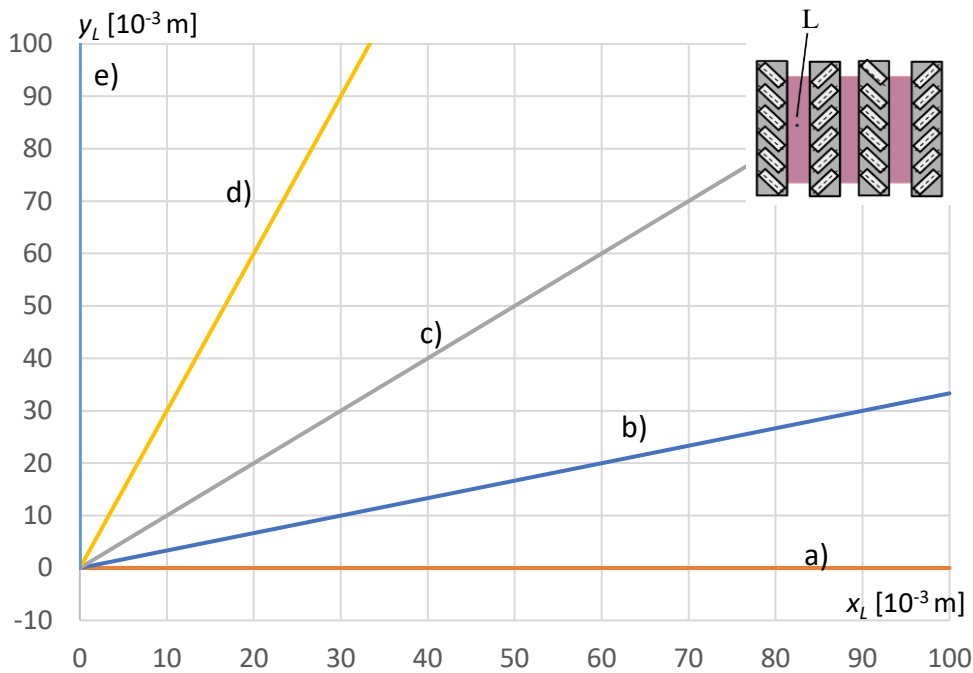


Rys. 3.9. Prędkości punktu L dla różnych parametrów konstrukcyjnych i prędkości zadanych napędów δ_1 i δ_2 (kolor szary - położenie początkowe, kolor czarny - położenie końcowe)

Na rys. 3.10 przedstawiono trajektorię ruchu punktu L uzyskaną metodą analityczną na podstawie równań (3.11) oraz (3.12) dla wartości zadanych, zebranych w tab. 3.3, przy założeniu kąta δ_1 równego 45° oraz δ_2 równego 135° .

Tab. 3.3. Zestawienie prędkości zadanych napędów \dot{q}_1, \dot{q}_2 oraz uzyskanych kątów orientacji γ wektora ruchu \vec{v}_L punktu L

Oznaczenie na rys. 3.10	\dot{q}_1 [m/s]	\dot{q}_2 [m/s]	γ [°]	v_L [m/s]
a)	0,1	-0,1	0,0	0,10
b)	0,1	-0,05	18,4	0,07
c)	0,1	0	45,0	0,07
d)	0,1	0,05	71,6	0,07
e)	0,1	0,1	90,0	0,10



Rys. 3.10. Kierunki trajektorii ruchu punktu L na korpusie k platformy wyznaczone za pomocą zaproponowanego modelu kinematycznego dla przykładów ruchu z tab. 3.3

Układ równań opisujący zależności względem czasu pomiędzy przyspieszeniami w opisywanym mechanizmie można uzyskać poprzez różniczkowanie równań opisujących prędkości:

$$\begin{cases} 0 = \ddot{b} \cos \delta_2 - \ddot{f} \cos \delta_2 \\ 0 = \ddot{b} \sin \delta_2 - \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 - \ddot{f} \sin \delta_1 \end{cases} \quad (3.15)$$

Układ ten w formie macierzowej przyjmie postać:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & -\cos \delta_1 \\ \sin \delta_2 & -\sin \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{b} \\ \ddot{f} \end{bmatrix} = 0. \quad (3.16)$$

Rozwiązanie przyjmuje formę:

$$\ddot{b} = \frac{\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2}{\cos \delta_2 (\cos \delta_1 \tan \delta_2 - \sin \delta_1 \cos \delta_2)} \cos \delta_1, \quad (3.17)$$

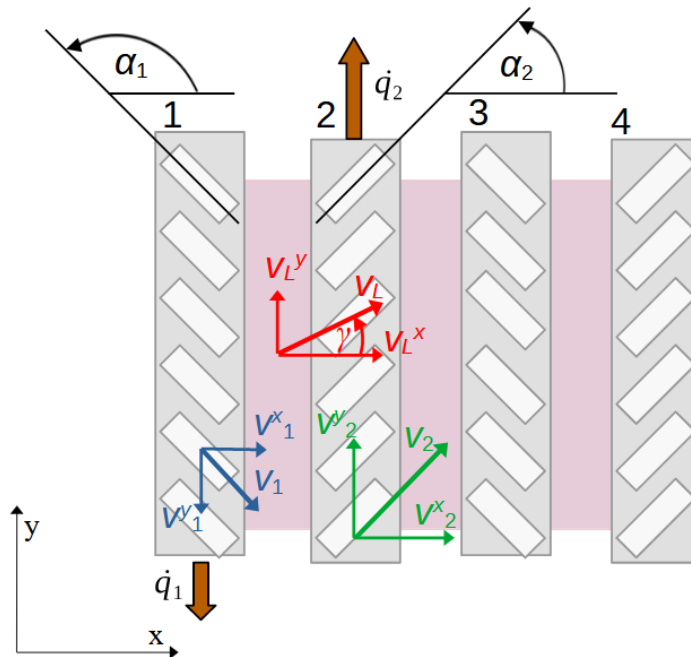
$$\ddot{f} = \frac{\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2}{\cos \delta_1 \tan \delta_2 - \sin \delta_1 \cos \delta_2}. \quad (3.18)$$

Równania (3.4), (3.7) oraz (3.15) umożliwiają wyliczenie orientacji γ i wartości wektorów przemieszczenia, prędkości oraz przyspieszenia punktu L znajdującego się na module złożonym z dwóch układów bieżnych wyposażonych w gąsienice równoległe, całkowicie zachodzące niezależnie od orientacji swobodnych rolek tocznych. Wartości te, tożsame są z wartościami przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia punktu R znajdującego się na korpusie k .

W praktyce pojazdy omnigąsienicowe o rolkach tocznych zorientowanych pod różnymi kątami α stanowią tylko formę teoretycznej ciekawostki. Budowa pojazdu w takim układzie rolek jest możliwa, jednak studia literaturowe nie wykazały, aby obecnie prowadzono badania dotyczące tego zagadnienia.

Zdecydowana większość pojazdów omnigąsienicowych posiada rolki toczne zorientowane symetrycznie. W obrębie jednego modułu suma kątów orientacji rolek tocznych α_n oraz α_{n+1} wynosi 180° . W takim przypadku równania umożliwiające wyznaczenie prędkości liniowej korpusu można znacznie uprościć. Poniżej przedstawiono zależności, umożliwiające wyznaczenie wektora prędkości \vec{v}_L punktu L powiązanego z modułem L_{12} na podstawie prędkości liniowych \dot{q}_n .

Prędkość gąsienicy, określaną jako \vec{v}_n , rozłożyć można na dwie składowe: \vec{v}_n^x oraz \vec{v}_n^y , co przedstawiono na rys. 3.11.



Rys. 3.11. Rozkład wektorów prędkości wraz z oznaczeniami

Składowa v_n^y tożsama jest z prędkością liniową gąsienicy \dot{q}_n , jej kierunek jest równoległy do gąsienicy, a wartość można wyliczyć z zależności:

$$v_n^y = \dot{q}_n. \quad (3.19)$$

Składowa v_n^x zależy od orientacji kątowej α_n swobodnej rolki tocznej oznaczonej jako α_n , jej kierunek jest prostopadły do gąsienicy, a wartość może zostać wyliczona z zależności:

$$v_n^x = \operatorname{ctg}(\alpha_n) \dot{q}_n. \quad (3.20)$$

Orientację kątową wektora prędkości \vec{v}_L punktu L oznaczono jako γ . Do obliczenia jego wartości konieczne są wartości prędkości składowych, oznaczonych jako v_L^x oraz v_L^y . Ich wartości obliczyć można dzięki znajomości prędkości poszczególnych gąsienic na podstawie wzorów:

$$v_L^x = \frac{(v_1^x + v_2^x)}{2}, \quad (3.21)$$

$$v_L^y = \frac{(v_1^y + v_2^y)}{2}. \quad (3.22)$$

Wartość wektora prędkości punktu L wynosi:

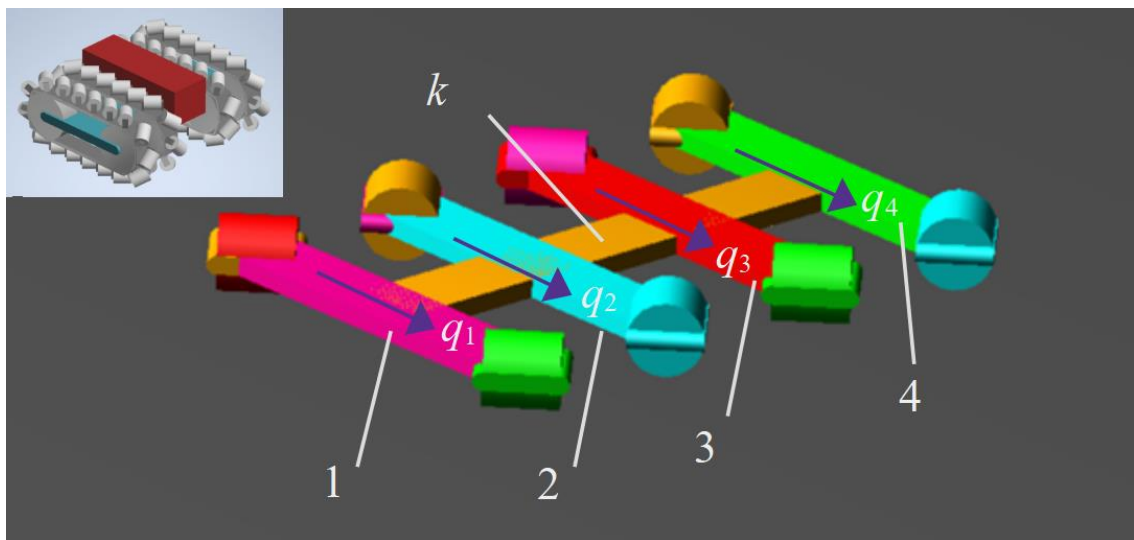
$$v_L = \sqrt{(v_L^x)^2 + (v_L^y)^2}. \quad (3.23)$$

Orientacja kątowa γ wyrażana jest wzorem (3.13).

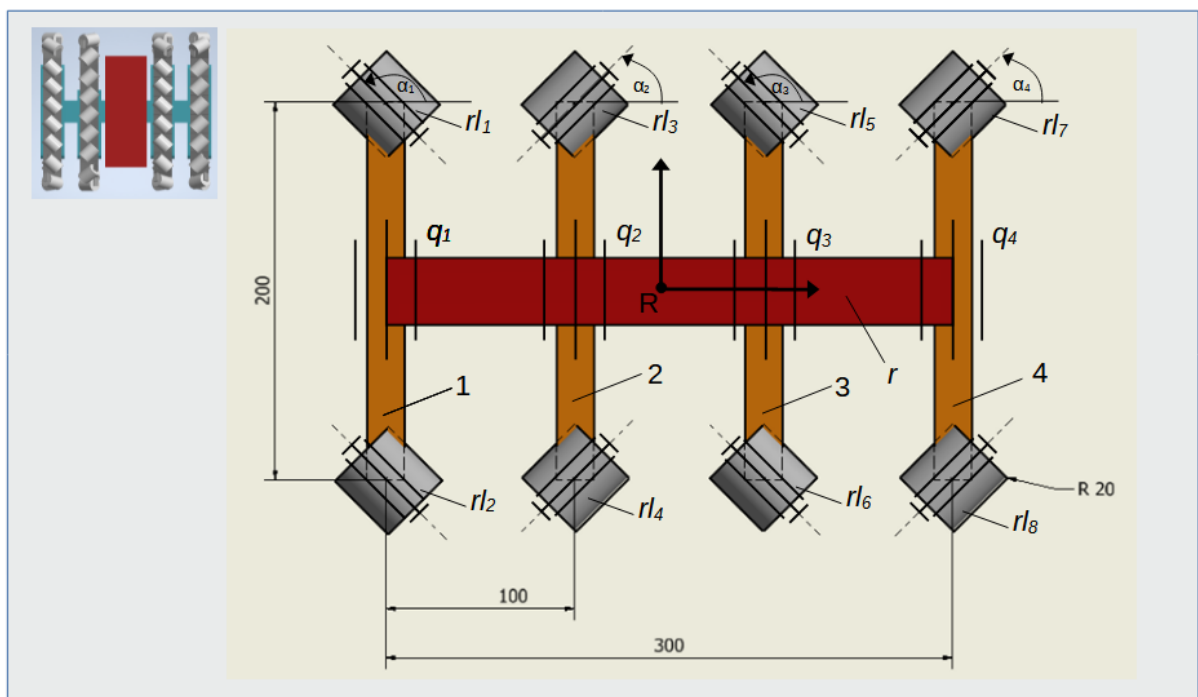
3.2 Badania symulacyjne pojazdu omnigąsienicowego

Rozważania zawarte w podrozdziale 3.1 dotyczą modelu kinematycznego. Wszelkie aspekty wynikające z poślizgów pomiędzy rolkami a podłożem czy nierównomierną pracą napędów są tutaj pomijane. Efekty te będą jednak oddziaływały na rzeczywistą platformę. Z tego powodu przeprowadzono badania symulacyjne dynamiki jazdy, które wykażą zasadność wykorzystania opracowanego modelu kinematycznego do sterowania opracowywaną platformą. Symulacja numeryczna pozwoli sprawdzić, czy zaproponowany model kinematyczny z wystarczającą dokładnością oddaje zachowanie modelu dynamicznego.

Badania numeryczne przeprowadzono w systemie analizy dynamicznej układów wielocłonowych HEXAGON ADAMS 2022. Opracowano w nim model bryłowy pojazdu omnigąsienicowego, złożony z czterech sztywnych członów belkowych o numerach 1, ... 4, podstawy 0 oraz korpusu k . Belki 1, ... 4, modelujące gąsienice g_1, \dots, g_4 połączone są z korpusem k za pomocą par translacyjnych typu *translational joint*. Pomiędzy poszczególnymi belkami a korpusem umieszczono wymuszenia kinematyczne *translational motion* q_1, \dots, q_4 . Swobodne rolki toczne oznaczone są jako rl_1, \dots, rl_8 . Każda belka połączona jest z dwiema rolkami za pomocą obrotowych par typu *revolute joint*. Rolki rl_1, \dots, rl_8 zamocowano w stosunku do osi głównej pojazdu pod kątem α . Rolki połączone z belkami numer 1 i 3, zorientowano pod kątami α_1 i α_3 , które wynoszą $+135^\circ$, natomiast rolki połączone z belkami numer 2 i 4 zorientowano pod kątem α_2 i α_4 wynoszącymi $+45^\circ$. Pomiędzy podłożem a rolkami tocznymi za pomocą *contact force* zdefiniowano siły stykowe. Parametry tych sił, dobrane na podstawie literatury [102, 103, i45], przedstawiono w tab. 3.4. Współczynnik tarcia pomiędzy rolkami a podłożem odpowiada tarcia pomiędzy gumą a betonem. Model ma ruchliwość wynoszącą 14, z czego 4 przemieszczenia q_1, \dots, q_4 są sterowane. Widok modelu wraz z oznaczeniami przedstawiono na rys. 3.12. Na rys. 3.13. przedstawiono wymiary geometryczne modelu. Masa całkowita modelu wynosiła 20 kg.



Rys. 3.12. Widok modelu bryłowego pojazdu omnigąsienicowego o łąsienicach symetrycznych, caÅłkowicie zachodzących



Rys. 3.13. Wymiary modelu bryłowego pojazdu omnigąsienicowego o łąsienicach symetrycznych, caÅłkowicie zachodzących

Tab. 3.4. Parametry symulacji dynamicznej

Stiffness	20 N/mm	Static coefficient	1
Force exponent	2.2	Dynamic coefficient	0,85
Damping	0.001 Ns/mm	Stiction Transition Velocity	10 mm/s
Penetration Depth	1 mm	Friction Transition Velocity	2000 mm/s

Na podstawie równań (3.19) – (3.24) obliczono wartości zadane q_1, \dots, q_4 dla poszczególnych napędów, aby uzyskać ruch korpusu w wybranym kierunku. Zmiana wartości wymuszeń kinematycznych q_1, \dots, q_4 w czasie została opisana za pomocą funkcji STEP5 z biblioteki Adams. Funkcja ta jest wielomianową funkcją ciągłą, która zapewnia gładki start i zakończenie przemieszczenia (prędkości q_n mają wartość 0 w chwilach t_0 oraz t_1). Parametr funkcji STEP5 to:

$$f = \text{STEP5}(t, t_0, f_0, t_1, f_1),$$

gdzie:

t – zmienna niezależna, czas [s],

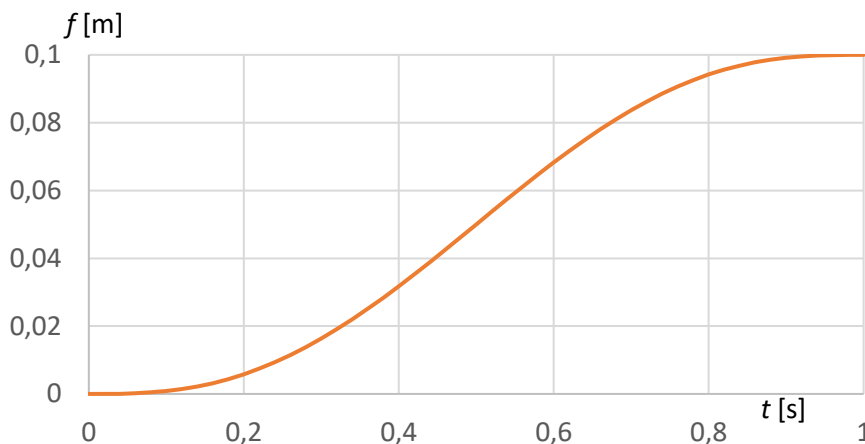
t_0 – czas startu funkcji,

t_1 – czas zakończenia funkcji,

f_0 – wartość początkowa funkcji,

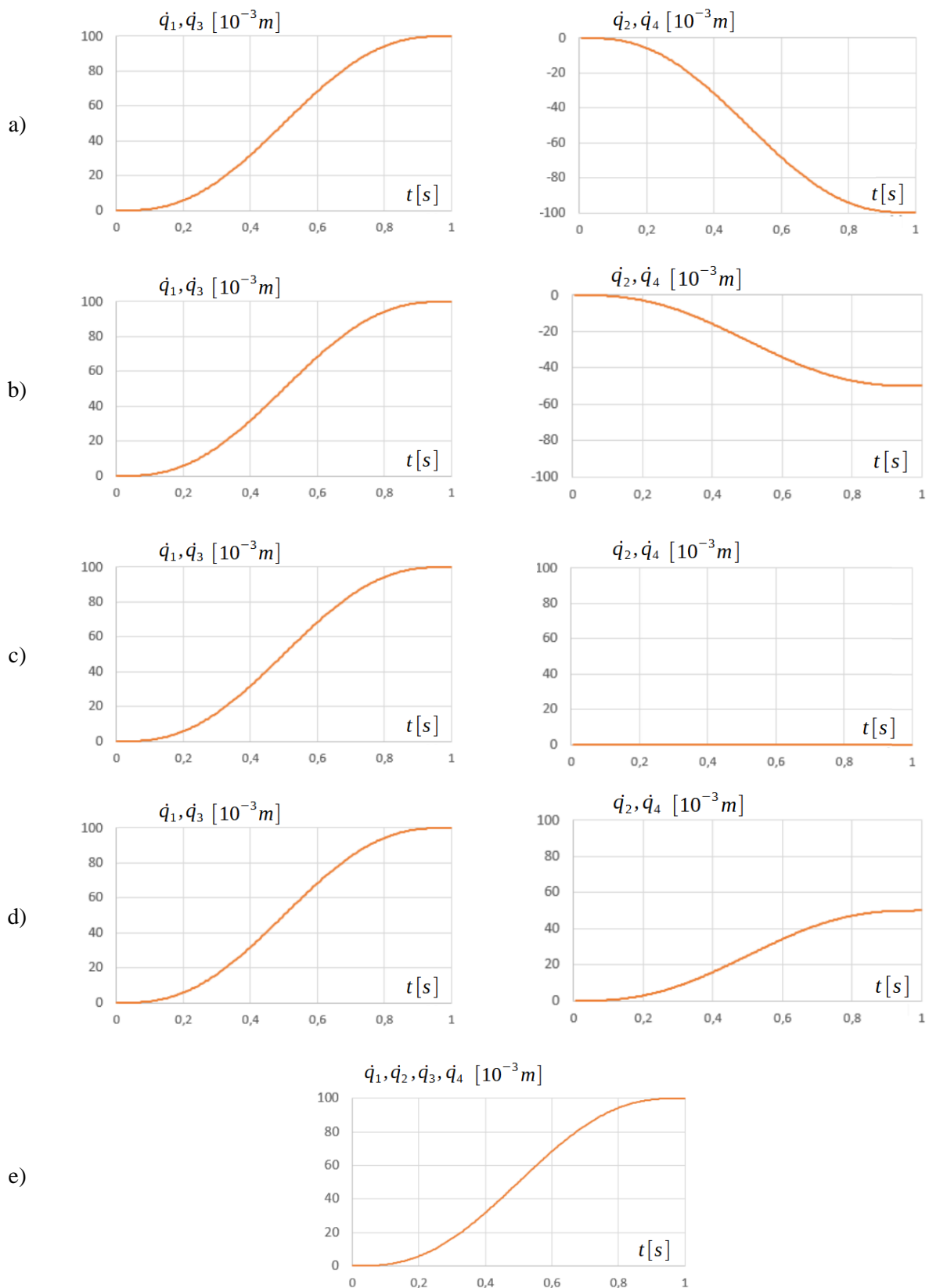
f_1 – wartość końcowa funkcji.

Wykres funkcji, dla przykładowych argumentów wejściowych ($t_0 = 0, t_1 = 1, f_0 = 0, f_1 = 0,1$) przedstawiono na rys. 3.14.



Rys. 3.14. Wykres funkcji (STEP5, Hexagon ADAMS) którą zadano prędkość w napędach

Symulację jazdy przeprowadzono dla pięciu różnych trajektorii zadanych (a, ... e). Pojazd rozpoczynał ruch w równowadze dynamicznej, w punkcie (0,0) i miał wykonać ruch po prostoliniowej trajektorii zorientowanej pod różnymi kątami γ . Czas trwania każdej symulacji wynosił 1 s. Przyjęte wartości zadane dla poszczególnych napędów przedstawiono na rys. 3.15. Opis poszczególnych trajektorii zebrano w tab. 3.5. W chwili startu symulacji ($t = 0$) pojazd był w równowadze i środek korpusu R pokrywał się z początkiem głównego układu współrzędnych.



Rys. 3.15. Przebiegi wymuszeń kinematycznych przejazdów po trajektoriach a, b, c, d, e

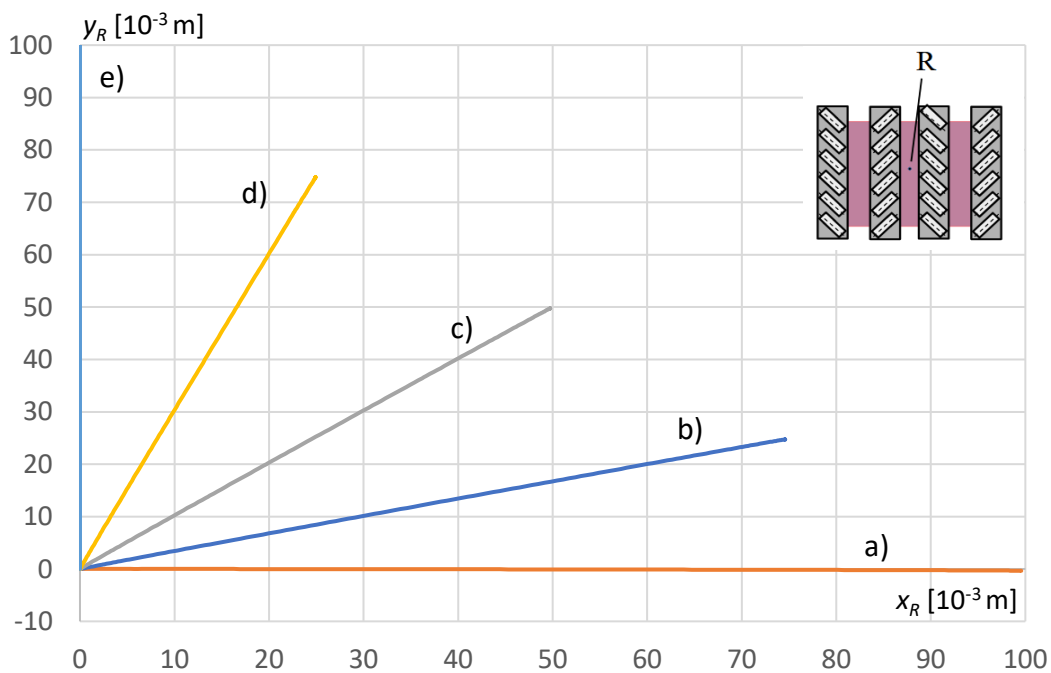
Tab. 3.5. Parametry trajektorii a, b, c, d, e

Trajektoria	Długość l [m]	Oczekiwany kąt orientacji trajektorii γ^T [°]
a)	0,10	0,0
b)	0,09	18,4
c)	0,07	45,0
d)	0,09	71,6
e)	0,10	90,0

W tab. 3.6 przedstawiono dane wejściowe oraz wyniki symulacji. Wartości oczekiwane kąta γ^T orientacji trajektorii wyznaczono na podstawie równań (3.19) – (3.24). Wartości γ^Z uzyskano metodą symulacji numerycznej. Na rys. 3.16 przedstawiono trajektorie ruchu (a, b, c, d, e) punktu R uzyskane podczas przejazdów.

Tab. 3.6. Zestawienie prędkości zadanych napędów oraz oczekiwanych i uzyskanych kątów orientacji wektora ruchu korpusu pojazdu

Trajektoria	$\dot{q}_1 = \dot{q}_3$ [m/s]	$\dot{q}_2 = \dot{q}_4$ [m/s]	Oczekiwany kąt orientacji trajektorii γ^T [°]	Uzyskany kąt orientacji trajektorii γ^Z [°]
a)	0,1	-0,1	0,0	-0,2
b)	0,1	-0,05	18,4	18,3
c)	0,1	0	45,0	45,0
d)	0,1	0,05	71,6	71,6
e)	0,1	0,1	90,0	90,0



Rys. 3.16. Uzyskane symulacyjnie trajektorie ruchu punktu R na korpusie k platformy podczas poszczególnych przejazdów

Wyniki symulacji numerycznych ruchu punktu R po prostoliniowych trajektoriach porównano z wyznaczonymi analitycznie trajektoriami ruchu, które przedstawiono na rys. 3.10. Wykresy błędów Δe_x , Δe_y dla poszczególnych przejazdów przedstawiono na rys. 3.17 – 3.21.

Wartość Δe wyznaczono na podstawie wzorów:

$$\Delta e_x = x_R^T - x_R^Z, \quad (3.25)$$

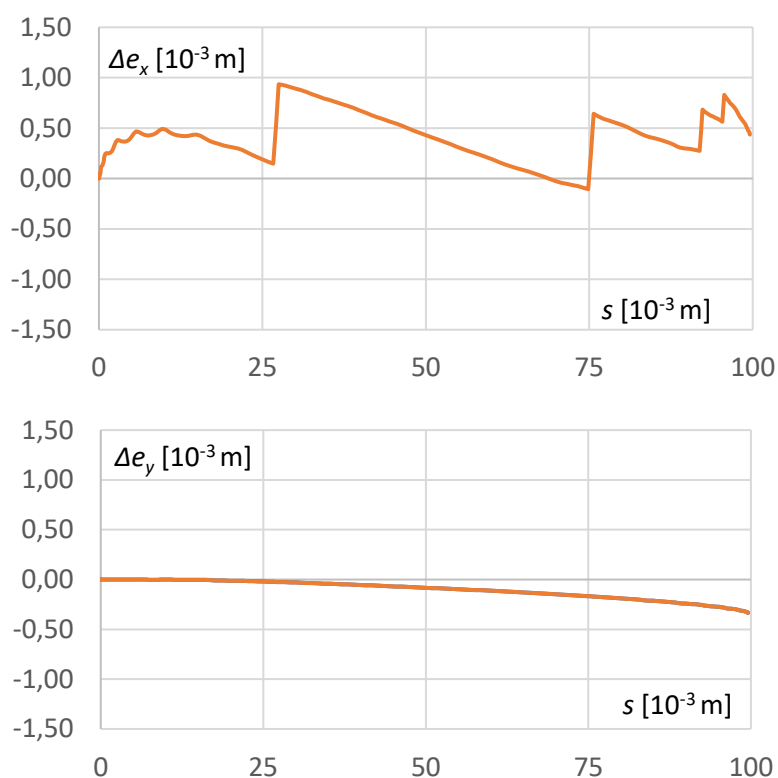
$$\Delta e_y = y_R^T - y_R^Z, \quad (3.26)$$

gdzie:

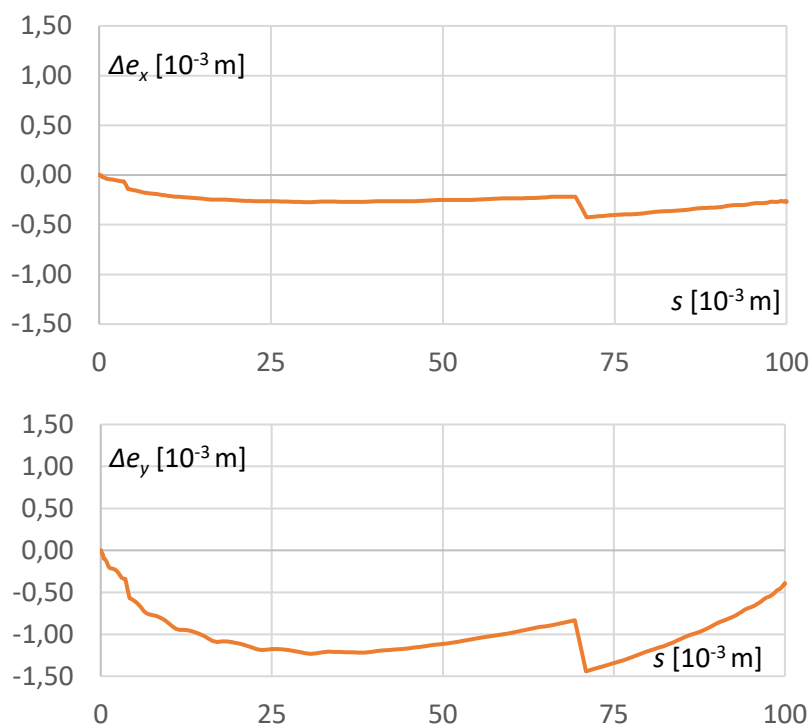
Δe_x , Δe_y – wartości błędów orientacji w poszczególnych osiach, wyrażone w 10^{-3} m,

x_R^Z , y_R^Z – wartości rzeczywiste położenia punktu R w poszczególnych osiach,

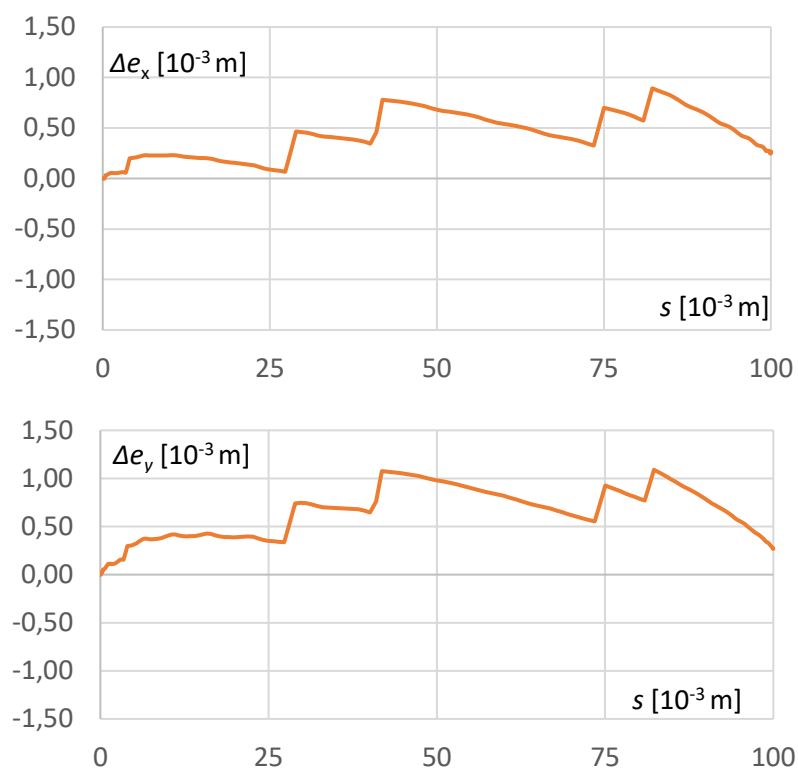
x_R^T , y_R^T – zadane położenia punktu R w poszczególnych osiach.



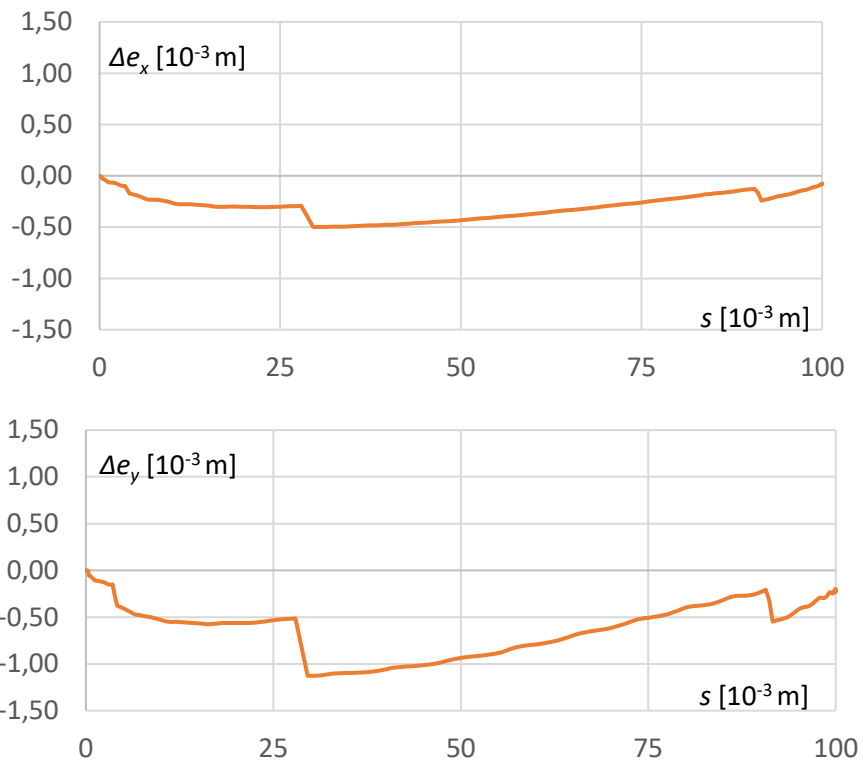
Rys. 3.17. Przebiegi błędów Δe_x , Δe_y pomiędzy teoretyczną trajektorią ruchu punktu R a wynikiem symulacji w relacji do pokonanego dystansu na poszczególnych osiach podczas ruchu po trajektorii a)



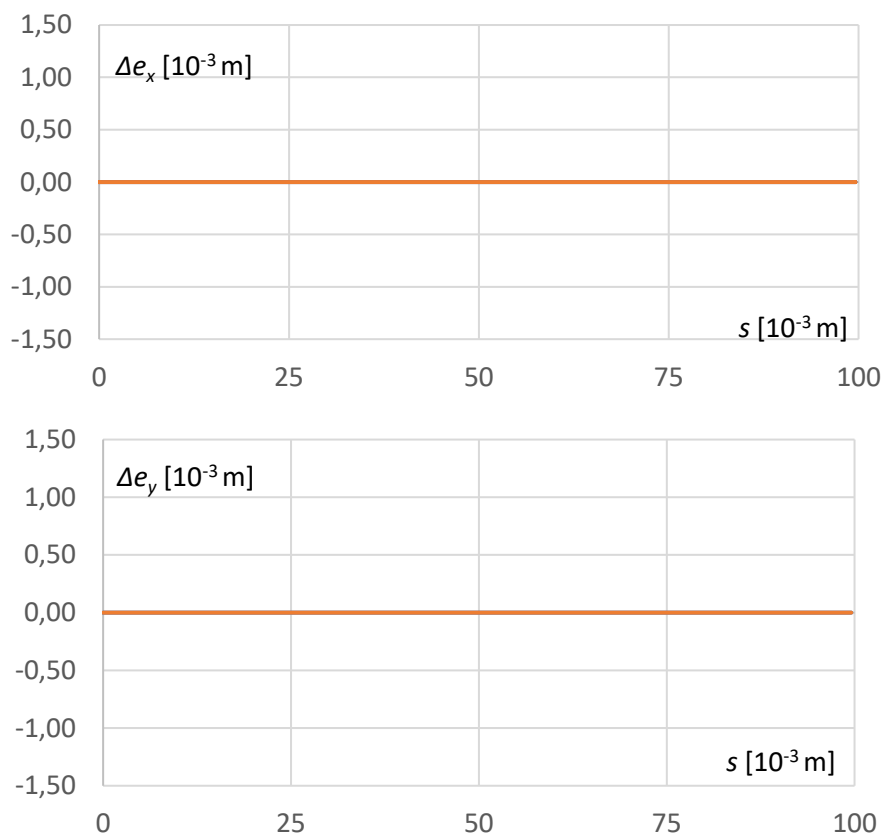
Rys. 3.18. Przebiegi błędów $\Delta e_x, \Delta e_y$ pomiędzy teoretyczną trajektorią ruchu punktu R a wynikiem symulacji w relacji do pokonanego dystansu na poszczególnych osiach podczas ruchu po trajektorii b)



Rys. 3.19. Przebiegi błędów $\Delta e_x, \Delta e_y$ pomiędzy teoretyczną trajektorią ruchu punktu R a wynikiem symulacji w relacji do pokonanego dystansu na poszczególnych osiach podczas ruchu po trajektorii c)



Rys. 3.20. Przebiegi błędów Δe_x , Δe_y pomiędzy teoretyczną trajektorią ruchu punktu R a wynikiem symulacji w relacji do pokonanego dystansu na poszczególnych osiach podczas ruchu po trajektorii d)



Rys. 3.21. Przebiegi błędów Δe_x , Δe_y pomiędzy teoretyczną trajektorią ruchu punktu R a wynikiem symulacji w relacji do pokonanego dystansu na poszczególnych osiach podczas ruchu po trajektorii e)

Przeprowadzone symulacje wykazały, że zaproponowany model kinematyczny poprawnie odwzorowuje zależności pomiędzy prędkością poszczególnych napędów a wynikowym kierunkiem ruchu korpusu pojazdu omnigąsienicowego w układzie gąsienic całkowicie zachodzącym. Odchyłka $\Delta e_x, \Delta e_y$, pomiędzy zakładaną a rzeczywistą orientacją trajektorii ruchu w żadnym z symulowanych przypadków nie przekroczyła $0,2^\circ$, co przedstawiono na rys. 3.16 i w tab. 3.6. Odchylenie rzeczywistej trajektorii ruchu od trajektorii zadanej osiągnęło maksymalną wartość $\Delta e_y = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (rys. 3.18) dla trajektorii b). Wartości te uznano za zadowalające, co uzasadnia wykonanie demonstratora i przeprowadzenie badań empirycznych.

4. Budowa robota OMP2024_1

Celem budowy pojazdu OMP2024_1 było określenie podstawowych parametrów jezdnych układu omnigąsienicowego o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących [105]. Demonstrator miał umożliwić wstępne eksperymentalne zbadanie jakości ruchu w kierunku innym niż oś główna pojazdu oraz zjawisko zakrzywienia trajektorii ruchu platformy. Ze względu na istniejącą w literaturze brak wytycznych dotyczących zagadnienia budowy pojazdów omnigąsienicowych wiele z założeń projektowych, a także przyjętych parametrów nie zostało poparte odpowiednimi badaniami wstępnymi. Przyjęte założenia zweryfikowano eksperymentalnie w toku prowadzonych prac.

4.1 Założenia projektowe

Przed rozpoczęciem procesu projektowania pojazdu konieczne było przyjęcie założeń wstępnych. Wymiary budowanego demonstratora odpowiadały ustandaryzowanej półpalcie EUR6. Rozmiar ten pozwolił na uniknięcie miniaturyzacji elementów, przy jednoczesnym zachowaniu na tyle małej skali, aby czas konieczny na budowę demonstratora był możliwie krótki. Przyjęte wymiary robota wynosiły 0,8 m x 0,6 m. Ustalono, że masa pojazdu nie przekroczy 10 kg. Dzięki temu możliwe było zastosowanie układu gąsienicowego o minimalnej liczbie kół jezdnych oraz podtrzymujących. Każda gąsienica miała współpracować tylko z dwoma kołami, pełniącymi jednocześnie rolę kół napinających i napędowych oraz kół jezdnych. Przyjęte założenia konstrukcyjne zebrano tab. 4.1.

Tab. 4.1. Podstawowe założenia konstrukcyjne OMP2024_1

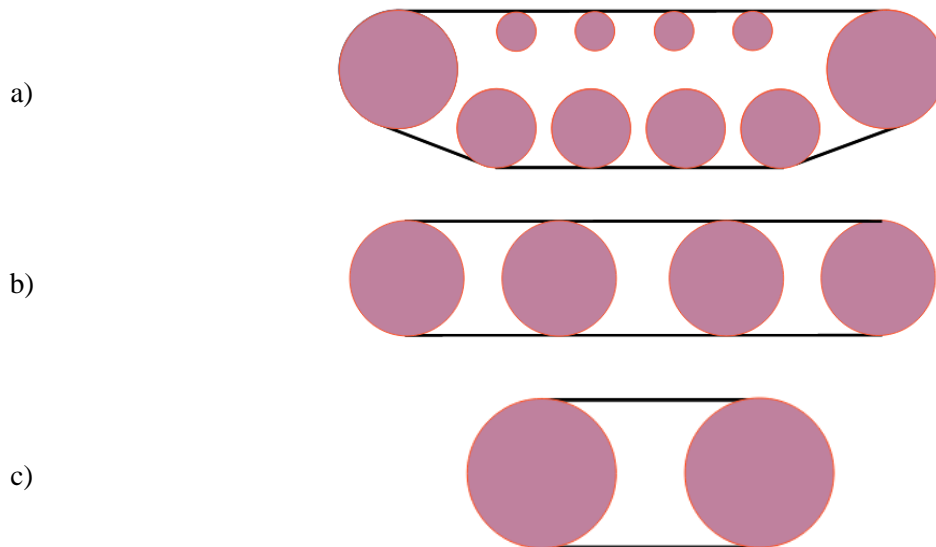
Masa maksymalna	10 kg
Podstawowa metoda wykonania	FDM
Wymiar maksymalny (długość x szerokość)	0,8 m x 0,6 m
Układ gąsienic	Całkowicie zachodzące
Sterowanie	Bezprzewodowe
Kąt orientacji rolki gąsienicy α	45°
Minimalna prędkość liniowa korpusu v_R	0,2 m/s

Przy takich założeniach projektowych możliwe było wykonanie większości elementów korpusu pojazdu na typowej drukarce 3D. Pojazd wykonano w technologii przyrostowej fused deposition modeling (FDM). Metoda ta polega na nakładaniu kolejnych warstw stopionego tworzywa, aby w ten sposób uzyskać model. Zastosowanie technologii FDM umożliwiło znaczącą redukcję czasu niezbędnego na przygotowanie działającego pojazdu.

Aby zachować dynamikę ruchu przyjęto, że robot musi być w stanie osiągnąć prędkość ruchu równą minimum $v_R = 0,2$ m/s. Prędkość ta jest uznawana za bezpieczną dla platform autonomicznych operujących w otoczeniu ludzi [104].

4.2 Konstrukcja mechaniczna

Układy bieżne pojazdów gąsienicowych składają się z trzech podstawowych elementów: koła napędowego, koła napinającego oraz gąsienicy. Ponadto, układ bieżny może być wyposażony w dodatkowe koła jezdne bądź rolki powrotne. Ilość dodatkowych kół w podwoziu gąsienicowym jest dobierana indywidualnie, w zależności od założeń projektowych. Na potrzeby budowy OMP2024_1 rozważano trzy typowe, wykorzystywane w komercyjnych pojazdach układy kół. Przedstawiono je na rys. 4.1.

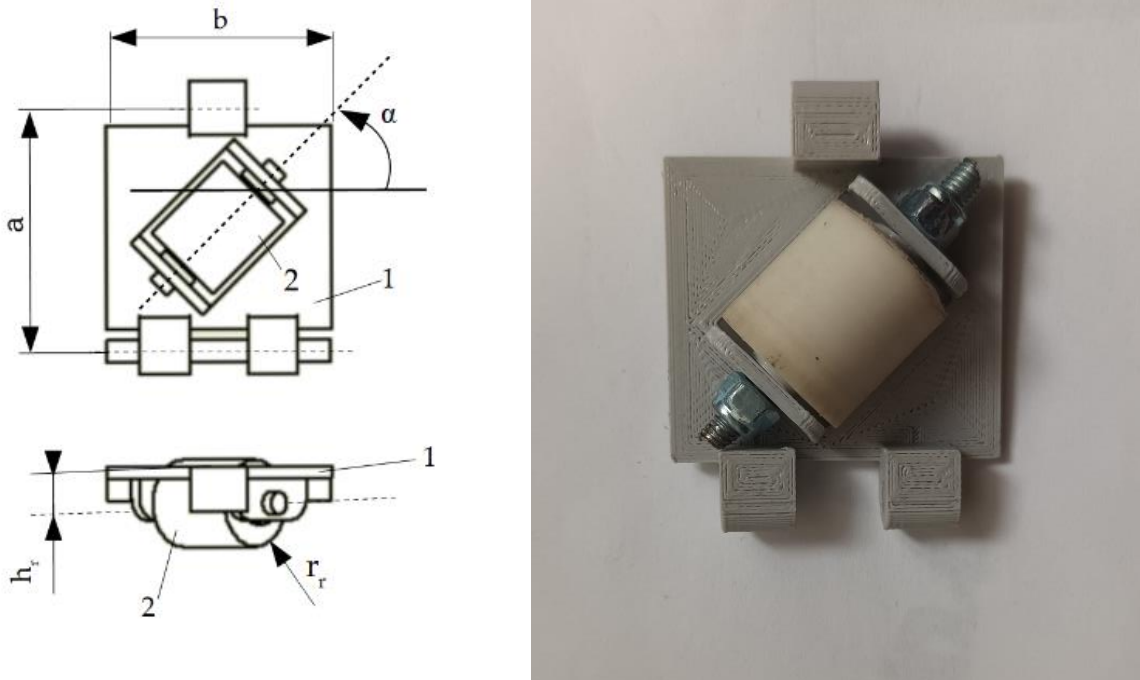


Rys. 4.1. Typowe rozkłady kół w układzie bieżnym pojazdu gąsienicowego: a) oddzielne koło napędowe, koło napinające, koła jezdne i rolki powrotne, b) oddzielne koło napędowe i koło napinające, koła jezdne pełnią również funkcję kół powrotnych, koło jezdne oraz c) koło napinające i napędowe pełnią również funkcję kół jezdnych

Układ bieżny typu a) często wykorzystywany jest w ciężkich maszynach gąsienicowych, które muszą poruszać się z możliwie dużymi prędkościami, np. pojazdy wojskowe, takie jak czołgi czy transportery opancerzone. Ten układ kół umożliwia łatwiejsze pokonywanie przeszkód terenowych przy większej prędkości. Niezależne zawieszenie każdego koła (bądź zestawu kół) umożliwia uzyskanie równomiernego docisku podczas ruchu po nierównym terenie. Układy bieżne typu b) najczęściej spotykane są w maszynach budowlanych (koparki, spychacze, ciągniki). Pojazdy na podwoziu tego typu nie muszą pokonywać przeszkód terenowych przy znacznych prędkościach. Ten układ bieżny zapewnia równomierny rozkład obciążenia na maksymalnej dostępnej powierzchni. Zmniejszenie ilości ruchomych elementów ma tutaj również uzasadnienie ekonomiczne. Układy bieżne typu c) stosowane są zazwyczaj w niewielkich, lekkich konstrukcjach, np. zabawki, czy niewielkie przyczepy na gąsienicach, w których rozkład ciężaru nie jest istotny. Zaletą jest

zmniejszenie ilości dodatkowych elementów. Umożliwia to wykorzystanie go w małych konstrukcjach. Przyjęto, że budowany demonstrator wyposażony zostanie podwozie w wariacie c).

Wykorzystane w pojeździe omniągąsienice będą zbudowane z ogniwo wyposażonych w rolki toczne usytuowane pod kątem $\alpha = 45^\circ$. Przyjęto walcowy kształt rolki z gumową oponą, wykonaną z TPU o twardości 40 D. Rzuty ogniwa wraz z zaznaczonymi wymiarami oraz widok rzeczywistej rolki przedstawiono na rys. 4.2. Wymiary pojedynczego ogniwa zebrano w tab. 4.2.

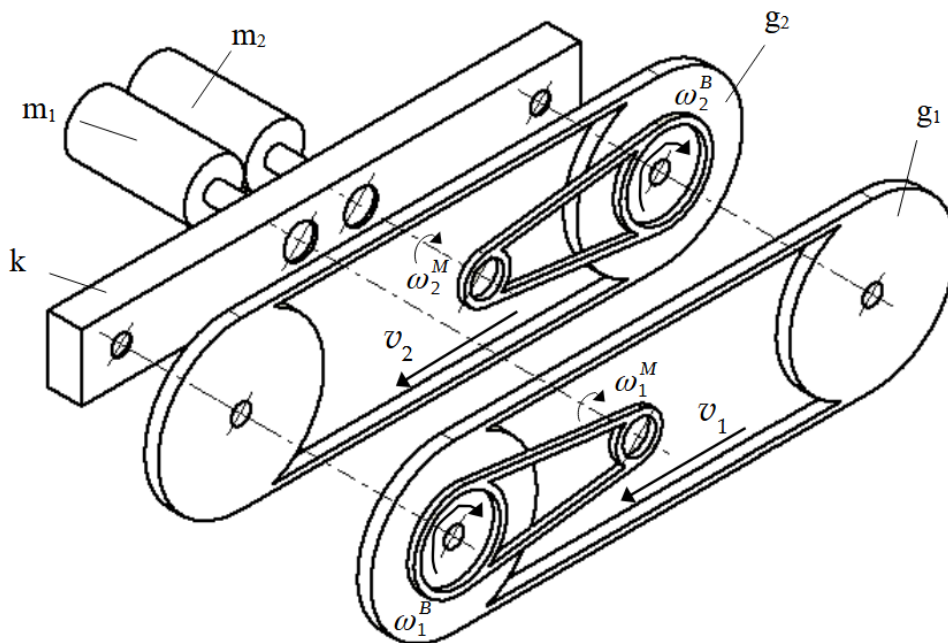


Rys. 4.2. Rzuty pojedynczego ogniwa gaśienicy omnikierunkowej z rolką walcową oraz widok wykonanego ogniwa gaśienicy omnikierunkowej

Tab. 4.2. Wymiary zastosowanego ogniwa

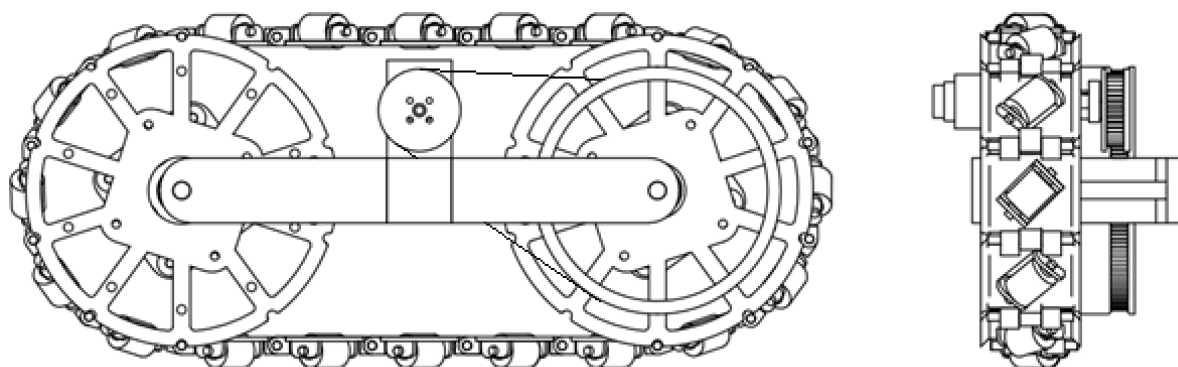
Długość ogniwa a	45 mm
Szerokość ogniwa b	40 mm
Kąt orientacji rolki α	45°
Odległość pomiędzy płaszczyzną ogniwa a osią rolki h_r	5 mm
Promień rolki r_r	10 mm

Robot OMP2024_1 składa się z korpusu k oraz czterech układów bieżnych b_n w skład których wchodzi gaśienice g_n i napędy m_n . Schemat kinematyczny jednego modułu układów bieżnych, czyli połowy omawianego robota, przedstawiający jego ogólną koncepcję przedstawiony jest na rys. 4.3.



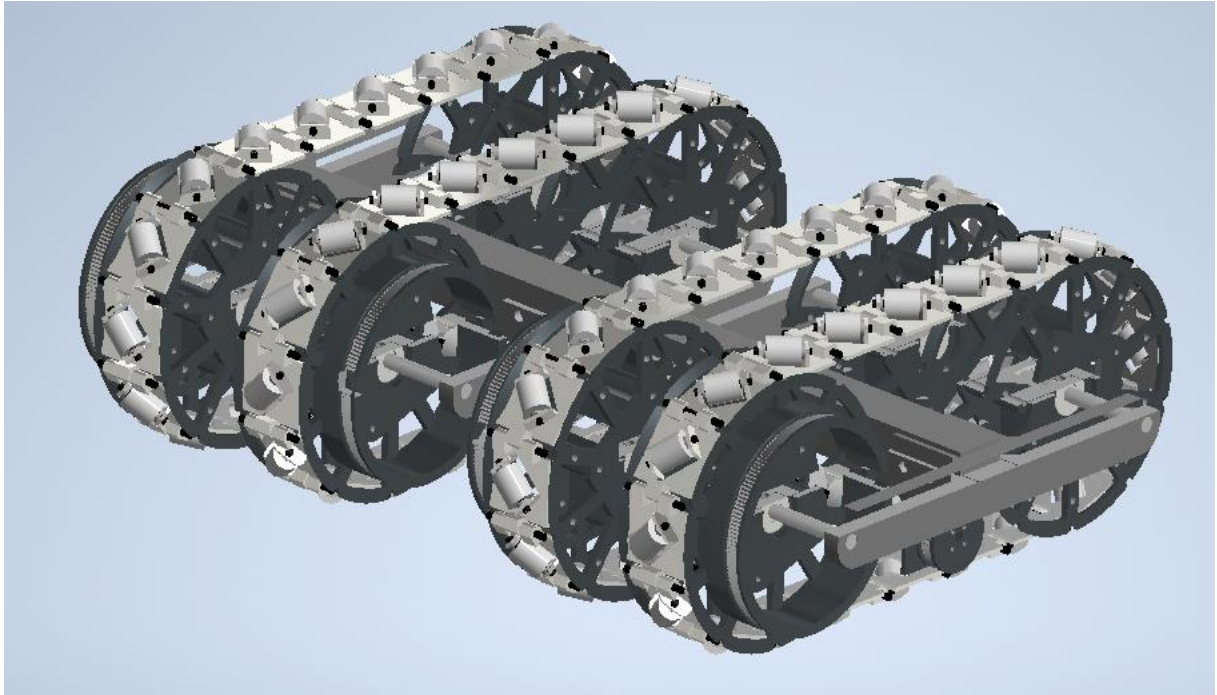
Rys. 4.3. Schemat kinematyczny pojedynczego modułu układów bieżnych, czyli połowy projektowanego robota omnigąsienicowego

Napędy umiejscowione są w centralnej części robota. Każde koło napędowe połączone jest z silnikiem indywidualną przekładnią pasową redukującą o przełożeniu $i_{MBn} = \frac{1}{3}$. Zakłada się, że przekładnie w każdym z układów bieżnych robota OMP2024_1 są takie same. Widok pojedynczego zestawu łąsienicy wraz z napędem przedstawiono na rys. 4.4.

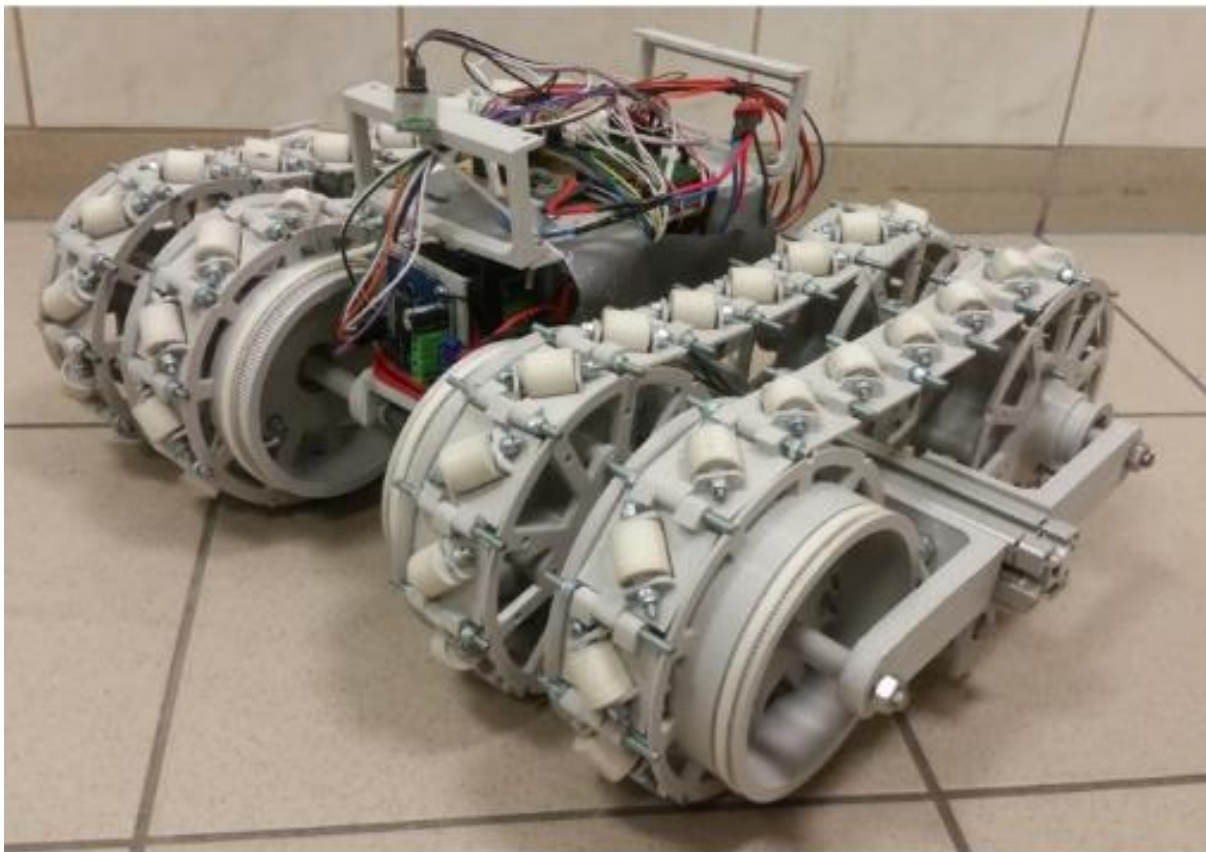


Rys. 4.4. Widok pojedynczego zestawu bieżnego pojazdu OMP2024_1

Model bryłowy projektowanego demonstratora przedstawiono na rys. 4.5. Pojazd, zgodnie z ideą przedstawioną na schemacie kinematycznym składa się korpusu oraz czterech układów bieżnych. Rolki w łąsienicach g_1 oraz g_3 zamocowane są pod kątem $\alpha = 45^\circ$, natomiast w łąsienicach g_2 oraz g_4 pod kątem $\alpha = 135^\circ$. Na rys. 4.6 przedstawiono widok ukończonego pojazdu.



Rys. 4.5. Widok modelu bryłowego projektowanego demonstratora OMP2024_1



Rys. 4.6. Widok ukończonego pojazdu omnigąsienicowego OMP2024_1

Zakładając oczekiwaną prędkość korpusu robota równą prędkości gąsienicy liniowej oraz zakładając obecność przekładni redukcyjnej 1:3, wymagana prędkość napędów może zostać obliczona ze wzoru:

$$\omega_n^M = \frac{v_n}{r_n^{KN} \cdot i_{MBn}}, \quad (4.1)$$

gdzie:

ω_n^M – prędkość kątowna napędu m_n układu bieżnego n ,

v_n – prędkość liniowa gąsienicy g_n układu bieżnego n ,

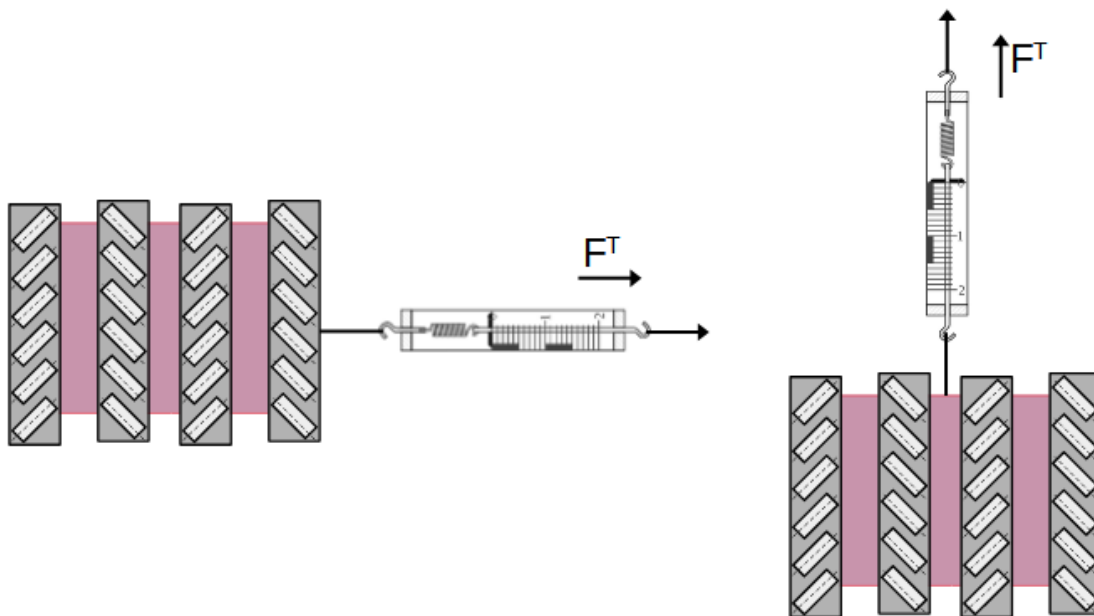
r_n^{KN} – promień koła napędowego układu bieżnego n ,

i_{MBn} – przełożenie pomiędzy napędem a kołem biernym przekładni układu bieżnego n .

Dla przyjętych wartości $v_n = 0,2$ m/s, $r_n^{KN} = 0,072$ m oraz $i_{MBn} = 1:3$ oczekiwana prędkość kątowna ω_n^M napędu n powinna być większa niż:

$$\omega_n^M \geq 8,3 \text{ rad/s.}$$

Ze względu na brak opracowań umożliwiających oszacowanie spodziewanych oporów toczenia konieczne było przeprowadzenie badań empirycznych (rys. 4.7). Badania polegały na przeciągnięciu gotowego demonstratora po płaskiej powierzchni, mierząc siłę dynamometrem zarówno wzdłuż osi głównej robota, jak i poprzecznie do niej.



Rys. 4.7. Schemat empirycznego badania oporów ruchu pojazdu OMP2024_1

Wykazano, że maksymalne opory wewnętrzne generowane podczas ruchu poprzecznego do osi głównej robota, wynosiły $F^T = 13$ N.

Oznacza to, że użyte napędy będą musiały zapewnić moment minimalny napędowy M^M większy bądź równy wartości obliczonej ze wzoru:

$$M^M = \frac{r_n^{KN} \cdot i_{MB} \cdot F^T}{4}, \quad (4.2)$$

gdzie:

M^M – minimalny moment napędowy pojedynczego napędu m_n konieczny do pokonania wewnętrznych oporów ruchu,

F^T – zmierzony doświadczalnie maksymalny opór ruchu pojazdu,

r_n^{KN} – promień koła napędowego gąsienicy,

i_{MBn} – przełożenie pomiędzy napędem a kołem napędowym.

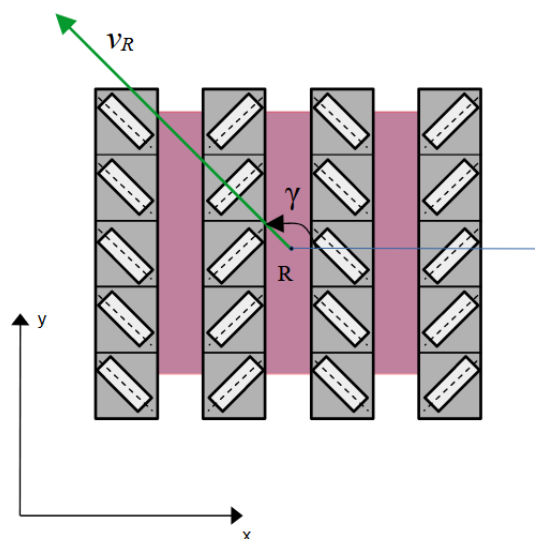
Wyliczenia te pozwoliły uzyskać minimalny moment napędowy, jakim powinny charakteryzować się napędy wykorzystane w projektowanym pojeździe. Dla wartości $F^T = 13$ N, $r_n^{KN} = 0,072$ m oraz $i_{MBn} = 1:3$ wartość momentu M^M wynosi:

$$M^M \geq 0,08 \text{ Nm.}$$

4.3 Układ napędowy i sterowanie

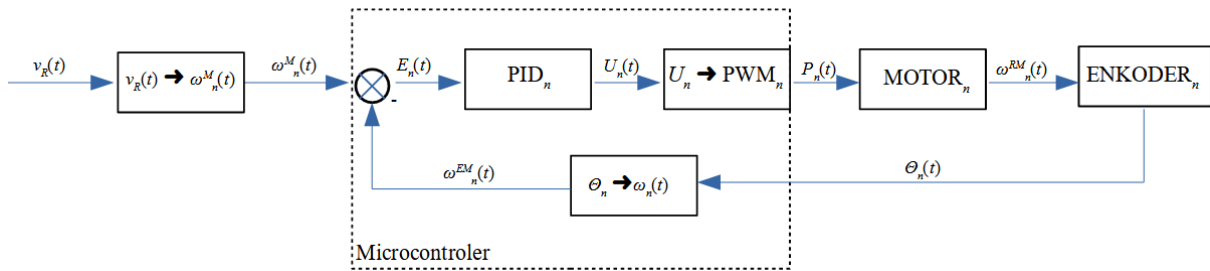
Gąsienice w budowanym robocie napędzane są niezależnie. Wymaga to dobrania silnika o momencie nominalnym większym niż obliczony moment M^M oraz o prędkości obrotowej większej niż obliczona ω_n^M . Wybrane napędy, spełniające założenia to silniki DC POLOLU-2274, o prędkości nominalnej $n_s = 21,99$ rad/s, zapewniające moment $M_s = 0,57$ Nm.

Robot OMP2024_1 ma mieć możliwość jazdy w dowolnym kierunku, określonym jako γ , bez konieczności zmiany orientacji korpusu, z dowolną prędkością v_R (rys. 4.8). Jak wykazano w rozdz. 3 wymaga to niezależnego sterowania prędkościami czterech gąsienic.



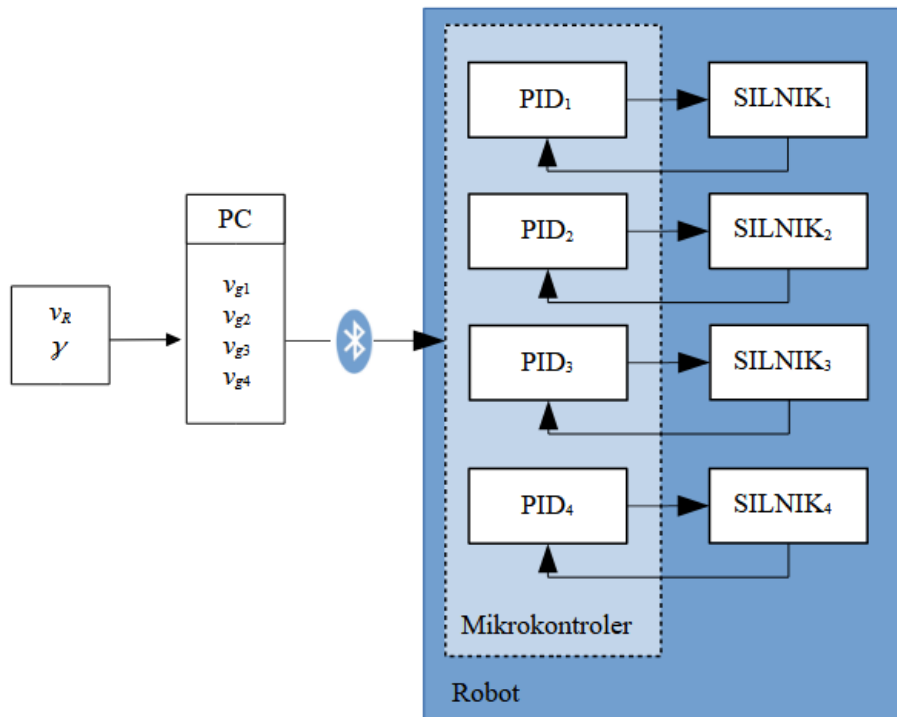
Rys. 4.8. Schemat możliwych kierunków ruchu pojazdu OMP2024_1

Dlatego konieczne było opracowanie układu sterowania, umożliwiającego zadawanie prędkości dla czterech układów bieżnych. Silnik m_n , który wymusza ruch gaśienicy g_n z prędkością v_n , sterowany jest za pomocą regulatora PID_n pracującego w pętli sprzężenia zwrotnego z częstotliwością 50 Hz. Napędy sterowane są za pomocą sygnału PWM. Wartość $v_R(t)$ to zadana prędkość punktu R, znajdującego się na korpusie k robota. Wartość $\omega_n^M(t)$ to prędkość zadana dla napędu m_n , $E_n(t)$ to uchyb sterowania, $U_n(t)$ to sygnał sterujący, natomiast $P_n(t)$ to wartość PWM odpowiedzialna za sterowanie silnikiem DC. Zmienna $\omega_n^{RM}(t)$ to aktualna (rzeczywista) prędkość obrotowa napędu m_n , $\Theta_n(t)$ to kąt obrotu silnika mierzony enkoderem, natomiast $\omega_n^{EM}(t)$ jest prędkością kątową napędu m_n wyliczana na podstawie danych z enkodera. Schemat regulatora prędkości pojedynczego zestawu bieżnego przedstawiono na rys. 4.9.



Rys. 4.9. Schemat regulatora prędkości pojedynczego układu bieżnego

Funkcje jednostki obliczeniowej pełni mikrokontroler ATmega2560, który odpowiada za obsługę komunikacji oraz sterowanie napędami. Dzięki enkoderom może również nadzorować rzeczywiste położenie poszczególnych układów bieżnych. Każdy układ bieżny posiada indywidualny enkoder i sterowany jest przez indywidualny regulator PID, co przedstawiono na rys. 4.10. Rozdzielczość enkoderów to 48 impulsów na obrót, co uwzględniając przełożenie przekładni ($i = 46,85 : 1$) zapewnia teoretyczną rozdzielczość pozycjonowania koła wynoszącą $0,0007$ rad ($0,04^\circ$).



Rys. 4.10. Ogólny schemat blokowy układu sterowania robota

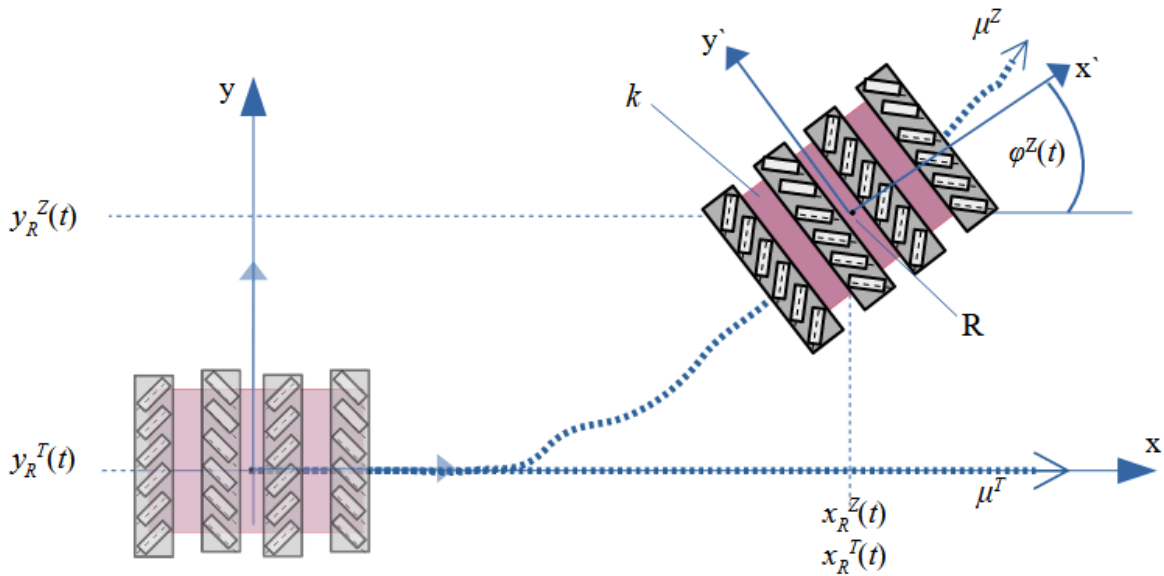
Zdecydowano, że platforma powinna być wolna od jakichkolwiek połączeń kablowych z elementami znajdującymi się poza korpusem pojazdu. Podejście to zostało wymuszone przez masę platformy, w której nawet niewielki opór, wynikający ze sztywności kabla zasilającego bądź komunikacyjnego mógłby w znaczący sposób zakłócić pomiar. Wszelka komunikacja pomiędzy terminalem roboczym a platformą realizowana jest za pomocą modułów Bluetooth.

5. Badania robota OMP2024_1

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną badania dotyczące jazdy robota omnigąsienicowego ze stałym kątem orientacji korpusu φ [105]. Badania koncentrują się na pomiarze odchylenia rzeczywistego toru jazdy od toru zadanego. W toku badań mierzono przemieszczenie robota, zmiany orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$, a także prędkości liniowej poszczególnych gąsienic podczas ruchu po zadanej, prostoliniowej trajektorii. Opisano stanowisko pomiarowe, które umożliwiło przeprowadzenie badań. Ich wyniki badań posłużyły do opracowania metody kompensacji odchylenia toru jazdy, której celem jest przeciwdziałanie zjawisku zakrzywiania trajektorii ruchu. Ponadto przedstawiono wyniki doświadczalnej weryfikacji opracowanej metody.

5.1 Zjawisko zakrzywienia trajektorii ruchu

Zjawisko zakrzywienia trajektorii ruchu polega na stopniowej, niezamierzonej zmianie orientacji kątowej pojazdu oraz kierunku trajektorii podczas wykonywania planowanego ruchu po zadanej trajektorii. Wpływ na jego występowanie mają bardzo różne czynniki, w wielu przypadkach zależne od typu rozpatrywanego pojazdu. W przypadku pojazdów posiadających niezależne napędy dla poszczególnych elementów układu jeźdnego występowanie tego zjawiska może być powiązane z nierówną pracą tych napędów, bądź ich błędnym wysterowaniem. Błędy konstrukcyjne albo niedoskonałości mechaniczne także mogą powodować zakrzywianie trajektorii ruchu. Właściwości podłoża oraz stan techniczny poszczególnych elementów układu jeźdnego również mogą powodować opisywane zjawisko (rys. 5.1). Planowana jest trajektoria μ^T ruchu punktu R, znajdującego się na środku korpusu k robota, ze stałą orientacją kątową platformy φ^T , względem globalnego układu współrzędnych x, y . Po czasie t korpus robota powinien znaleźć się w miejscu $x_R^T(t), y_R^T(t)$. W trakcie ruchu, pod wpływem zjawiska zakrzywienia trajektorii, rzeczywista orientację kątową korpusu pojazdu oznaczona jako φ^Z zaczyna się zmieniać. Zmiana orientacji kątowej korpusu pojazdu prowadzi do zakrzywienia trajektorii ruchu. W efekcie tego zjawiska, zamiast poruszać się po linii prostej, pojazd zaczyna kreślić krzywą rzeczywistą μ^Z . Położenie punktu R w różnych chwilach czasu t można zdefiniować jako $x_R^Z(t), y_R^Z(t)$.



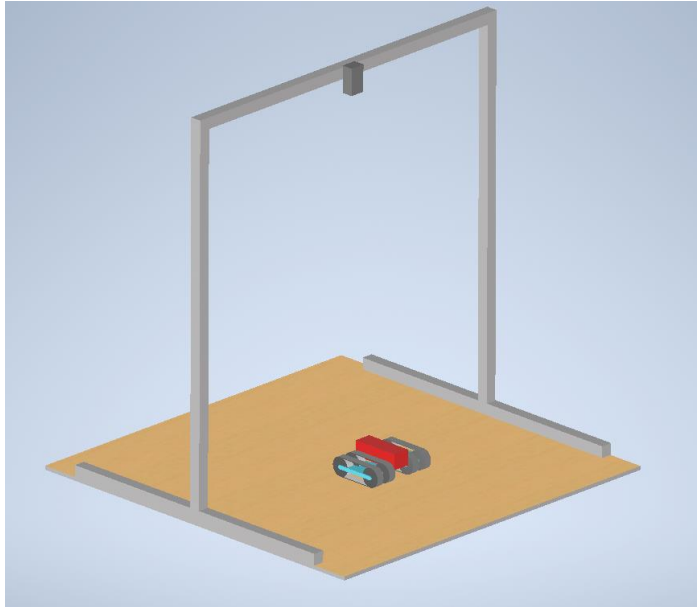
Rys. 5.1. Schemat jazdy robota po zadanej trajektorii ruchu μ^T w kierunku poprzecznym do osi głównej pojazdu

Badania tego zjawiska wymagają przygotowania stanowiska pomiarowego parametrów jazdy robota po jednolitym podłożu, po którym będzie poruszać się badany obiekt. Rzeczywiste położenie oraz orientację kątową robota będzie monitorowana względem zewnętrznego układu referencyjnego.

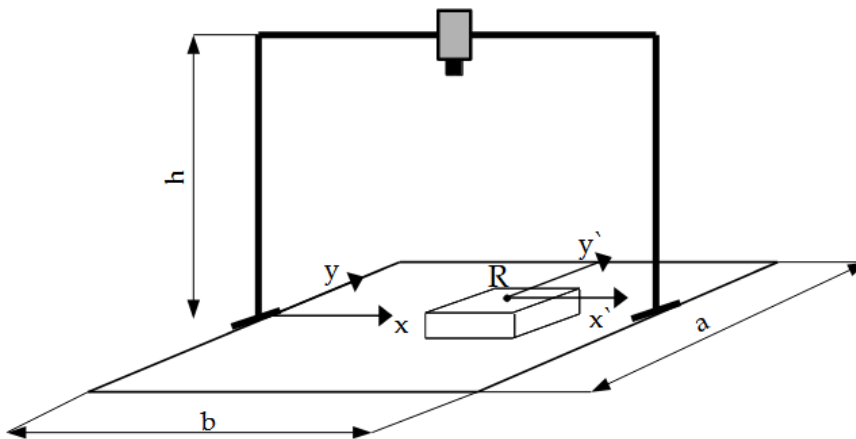
5.2 Stanowisko pomiarowe

Do przeprowadzenia pomiarów zmiany orientacji kątowej robota oraz trajektorii jego ruchu podczas przejazdów konieczne było opracowanie stanowiska pomiarowego. Przyjęto, że pomiary parametrów jazdy będzie dokonywany za pomocą systemu wizyjnego. Stanowisko składa się z kamery RGB umieszczonej na sztywnej ramie nad obszarem pomiarowym, po którym porusza się badany pojazd. Płaszczyzna obiektywu kamery jest równoległa do płaszczyzny podłoża. Na badanym robocie umieszczony jest znacznik. Znacznik nadrukowany jest na płaskiej powierzchni i jest wzorem złożonym z czarnych i białych kwadratów. Środek znacznika pokrywa się z punktem R na korpusie k robota. Kamera rejestruje obraz, na którym wykrywany jest znacznik, a dedykowany program wyznacza jego rzeczywiste położenie x_R^T , y_R^T . Dzięki temu możliwy jest pomiar współrzędnych $x_R^T(t)$, $y_R^T(t)$ punktu R, będącego środkiem robota, w funkcji czasu t , a także orientacji kątowej korpusu $\varphi(t)$. Ponadto, enkodery sprzężone z napędami układów bieżnych umożliwiają pomiar kąta obrotu poszczególnych napędów, co pozwala na wyliczenie rzeczywistej prędkości liniowej \dot{q}_n poszczególnych gąsienic. Na rys. 5.2 przedstawiono wizualizację stanowiska pomiarowego w formie modelu bryłowego.

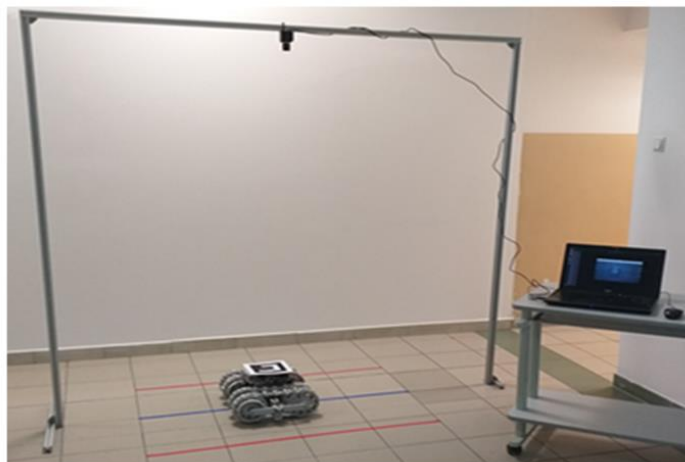
Wymiary stanowiska pomiarowego oznaczono na rys. 5.3. Do ramy, na wysokości $h = 1,95$ m nad środkiem pola pomiarowego przymocowana jest kamera. Przyjęto, że wymiar pola roboczego wynosi $a = 0,75$ m, $b = 1,30$ m. Za akwizycję obrazu odpowiada kamera ELP-USBFHD04H-MFV, rejestrująca obraz z rozdzielczością 1920×1080 px i częstotliwością 25 klatek na sekundę. Na rys. 5.4 przedstawiony jest widok rzeczywistego stanowiska wraz z OMP2024_1.



Rys. 5.2. Model bryłowy stanowiska pomiarowego wraz z pojazdem omnigąsienicowym

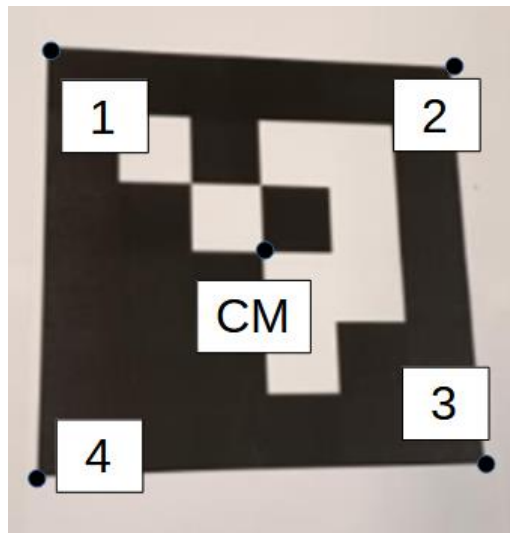


Rys. 5.3. Schemat stanowiska pomiarowego wraz z zaznaczonymi wymiarami pola roboczego

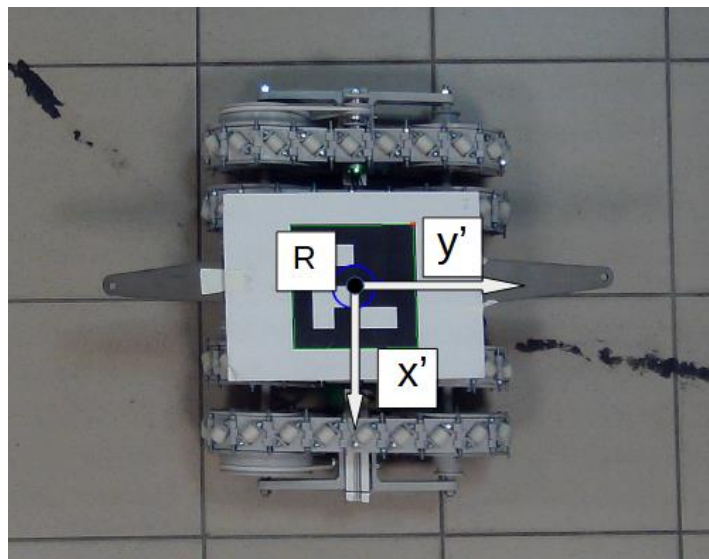


Rys. 5.4. Widok stanowiska pomiarowego pojazdu omnigąsienicowego z OMP2024_1

System wizyjny przygotowano w taki sposób, aby wyszukiwał na obrazie znaczniki. Zastosowano znaczniki ArUco [i46] (rys. 5.5), czyli monochromatyczne znaczniki złożone z białych i czarnych kwadratów, o ściśle zdefiniowanych proporcjach oraz wzorach nadrukowane na płaską powierzchnię. Znaczniki te dedykowane są systemom rozszerzonej rzeczywistości. Ze względu na niewielką ilość kodowanych informacji (wyłącznie numer markera) mogą być wykrywane z dużej odległości. Na rys. 5.6 przedstawiono widok badanego pojazdu OMP2024_1 z zamocowanym markerem ArUco. Marker zamocowano w taki sposób, aby jego geometryczny środek (punkt CM) pokrywał się z geometrycznym środkiem robota, (punktem R). W trakcie prowadzenia pomiarów położenie środka markera traktowano jako położenie (x_R, y_R) punktu R, natomiast orientację kątową markera traktowano jako orientację φ korpusu k .



Rys. 5.5. Widok przykładowego znacznik ArUco, wraz z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi: 1, ... 4 – narożniki markera, CM – punkt środkowy markera



Rys. 5.6. Badany pojazd omnigąsienicowy OMP2024_1 z zamocowanym markerem ArUco

Opracowano algorytm pomiarowy umożliwiający estymację pozycji środka markera na polu pomiarowym, określany jest dalej jako „metoda znanej wysokości”. Dzięki znajomości rzeczywistych wymiarów rejestrowanej sceny, a także wysokości kamery nad polem pomiarowym możliwe jest wyznaczenie rzeczywistego kąta widzenia obiektywu. Zakładając brak aberracji chromatycznych

obiektywu, przyjęto że pojedynczy piksel na rejestrowanym obrazie odpowiada stałej wartości kąta widzenia obiektywu, co umożliwiło wyznaczenie przelicznika w_{px} za pomocą wzoru:

$$w_i^{px} = \frac{\beta_i^{kam}}{px_i^{max}}, \quad (5.1)$$

gdzie:

i – oś układu współrzędnych, $i = x, y$,

w_i^{px} – współczynnik kamery, opisuje kąt widzenia dla pojedynczego piksela w wybranej osi wyrażony w stopniach [°],

β_i^{kam} – kąt widzenia kamery w wybranej osi, wyrażony w stopniach [°],

px_i^{max} – ilość pikseli w wybranej osi.

Dla wartości $\beta_x^{kam} = 47,04^\circ$, $\beta_y^{kam} = 27,65^\circ$, $px_x^{max} = 1920$ oraz $px_y^{max} = 1080$ wartości w_x^{px} oraz w_y^{px} wynosiły:

$$w_x^{px} = 0,0245^\circ,$$

$$w_y^{px} = 0,0256^\circ.$$

Następnie uwzględniając wysokość h_Δ kamery nad markerem, odległość px_i markera od środka obrazu wyrażoną w pikselach wyznaczano jego rzeczywistą pozycję w osiach $i = x, y$ zgodnie ze wzorem:

$$s_{Ri} = \text{tg}(px_i \cdot w_i^{px}) \cdot h_\Delta, \quad (5.2)$$

gdzie:

s_{Ri} - odległość pomiędzy środkiem obszaru pomiarowego a punktem R robota w osi i w [m],

w_i^{px} - współczynnik kamery, określający kąt widzenia dla pojedynczego piksela w osi i wyrażony w stopniach [°],

px_i - odległość pomiędzy środkiem obrazu a środkiem markera wyrażona w pikselach w osi i ,

h_Δ - różnica wysokości pomiędzy obiektywem kamery a płaszczyzną, w której porusza się marker umieszczony na robocie wyrażona w [m].

Na podstawie znanych wymiarów pola pomiarowego oraz wartości s_{Ri} dla poszczególnych osi wyznaczane jest aktualne położenie punktu R oznaczone jako x_R, y_R . Wartości te wyznaczane są na podstawie równań:

$$\begin{aligned} x_R &= s_{Rx} + l_x, \\ y_R &= s_{Ry} + l_y, \end{aligned} \quad (5.3)$$

gdzie:

x_R, y_R - aktualne położenie punktu R robota,

s_{Rx}, s_{Ry} - odległość pomiędzy środkiem obszaru pomiarowego a punktem R robota,

l_x, l_y - odległość pomiędzy środkiem obszaru pomiarowego a punktem zaczepienia globalnego układu współrzędnych stanowiska w osiach x oraz y.

Orientacja kątowa uzyskiwana jest na podstawie następującego wzoru:

$$\varphi = \text{atan2}((y_1 + y_2 + y_3 + y_4) / 4, (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / 4). \quad (5.4)$$

Gdzie:

φ - kąt orientacji markera, tożsamy z kątem orientacji korpusu k ,

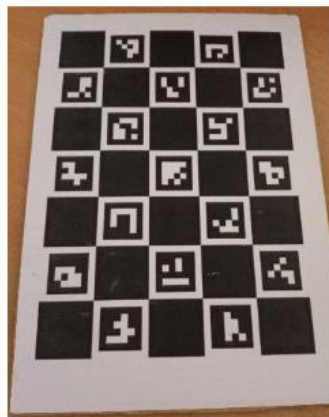
y_i, x_i - współrzędne kolejnych narożników wykrytego znacznika, $i = (1, \dots, 4)$.

Teoretyczna rozdzielczość układu pomiarowego wynosiła poniżej 0,0013 m. Wartość ta została wyznaczona na podstawie wzoru (5.2) jako największa odległość, która może być reprezentowana jest przez pojedynczy piksel przy zadanych wymiarach stanowiska pomiarowego.

Ze względu na zastosowanie szerokokątnego obiektywu konieczna była kalibracja kamery i korekcja typowych aberracji optycznych. Najbardziej typowa dla obiektywów podobnych do zastosowanego w wykorzystanej kamerze jest dystorsja – tym wyraźniejsza, im krótsza jest ogniskowa obiektywu. Dystorsja jest aberracją która ma stały charakter. To znaczy, że generowane przez nią zniekształcenia mają źródło w geometrii układu optycznego. Dzięki temu wyeliminowanie dystorsji jest proste – należy przeprowadzić jednokrotną kalibrację kamery, a następnie każdą zarejestrowaną klatkę obrazu korygować o przeliczone wcześniej wartości.

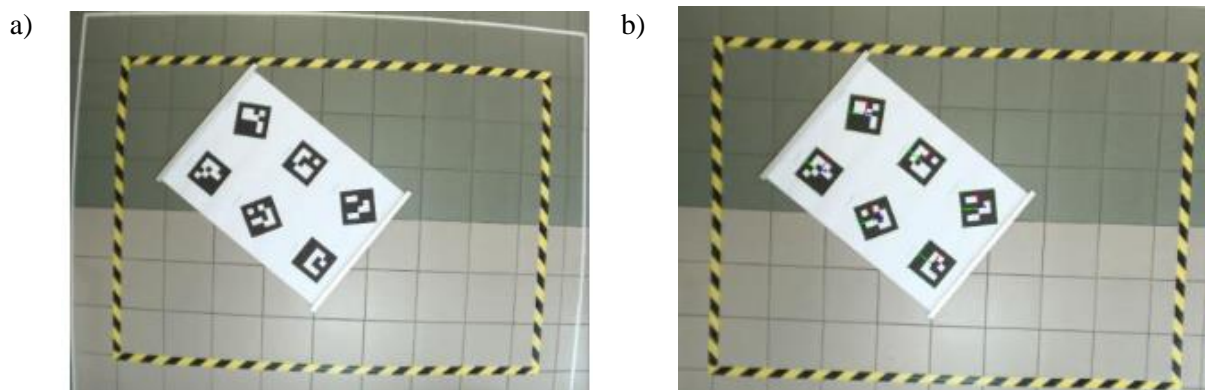
Kalibracja polega na wykonaniu szeregu zdjęć karty kalibracyjnej. Karta powinna być rejestrowana pod różnymi kątami i w różnej orientacji. Wzór naniesiony na kartę kalibracyjną składa się z umieszczonych w regularnych odstępach w poziomych i pionowych rzędach punktów charakterystycznych, takich jak na przykład znaczniki, bądź barwne kwadraty. Nieskalibrowana kamera zarejestruje zniekształcony obraz karty kalibracyjnej, a punkty charakterystyczne nie będą układały się w linie proste. Zadaniem programu przeprowadzającego kalibrację na podstawie tych obrazów jest odkształcenie ich w taki sposób, aby punkty charakterystyczne układały się w linie proste.

Do kalibracji wykorzystano stronę kalibracyjną ChArUco (rys 5.7) pochodzącą z biblioteki ArUco, będącej częścią otwartoźródłowej biblioteki do analizy obrazu OpenCV [i46].



Rys. 5.7. Karta kalibracyjna ChArUco wykorzystana do kalibracji systemu wizyjnego na stanowisku pomiarowym

Dzięki znajomości faktycznych proporcji pomiędzy poszczególnymi punktami charakterystycznymi strony kalibracyjnej algorytm jest w stanie wyliczyć poprawkę umożliwiającą eliminację dystorsji. Przykład klatki obrazu z widoczną dystorsją beczkową przed i po zastosowaniu algorytmu usuwającego dystorsję przedstawiono na rys. 5.8.

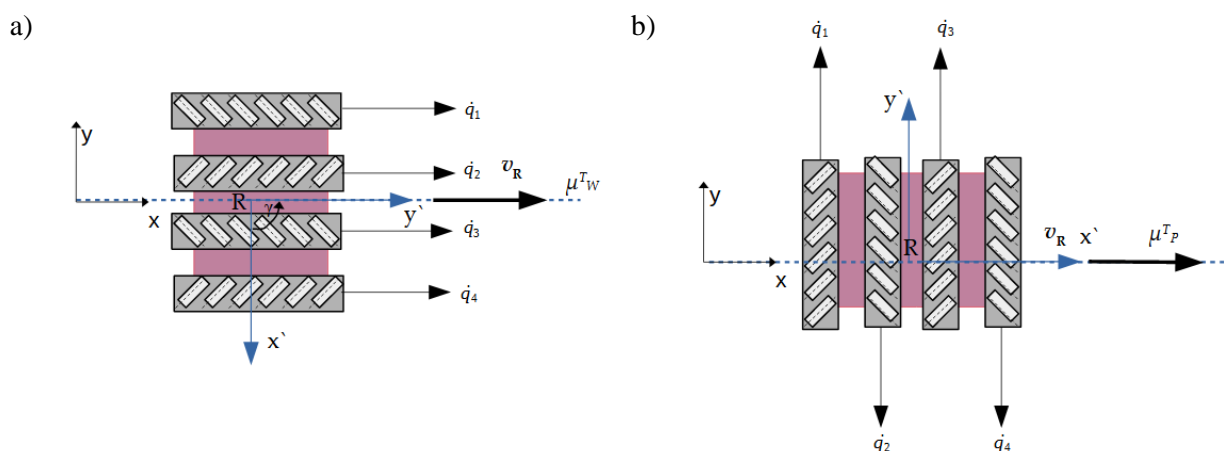


Rys. 5.8. Widok przykładowej klatki obrazu: a) z widoczną dystorsją, b) po zastosowaniu algorytmu usuwającego dystorsję

5.3 Badania ruchu pojazdu omnigąsienicowego

Pierwszy etap badań polegał na wykonaniu szeregu przejazdów ze stałą orientacją korpusu φ^T po zadanych trajektoriach μ_W^T oraz μ_P^T . Ruch wykonywano dla różnych orientacji wektora prędkości γ punktu R. Trajektorie wyznaczane są przez punkt R, znajdujący się na korpusie k.

Przyjęto, że przejazdy będą wykonywane po dwóch trajektoriach. Pierwsza z nich μ_W^T jest linią prostą o długości 1,2 m, równoległą do osi x układu współrzędnych stanowiska pomiarowego. OMP2024_1 poruszał się po tej trajektorii pod kątem $\gamma = 90^\circ$. Druga trajektoria μ_P^T również jest linią prostą o długości 1,2 m równoległą do osi x układu współrzędnych stanowiska pomiarowego. Orientacja kątowa wektora prędkości punktu R wynosiła $\gamma = 0^\circ$ podczas ruchu po tej trajektorii. Schemat przyjętych prędkości zadanych przedstawiono na rys. 5.9. Podczas badań założono lokalny układ współrzędnych $x'y'$, którego początek znajduje się w punkcie R, natomiast oś y' układu zgodna jest z osią główną robota.



Rys. 5.9. Schemat wartości zadanych oraz trajektorii ruchu pojazdu podczas badań zjawiska zakrzywienia trajektorii ruchu dla: a) μ_W^T ($\gamma = 90^\circ$), b) μ_P^T ($\gamma = 0^\circ$)

Podczas eksperymentów robot poruszał się z prędkością wynoszącą $v_R = 0,12$ m/s. Na podstawie równań (3.23) oraz (3.24), ruch wzdłuż osi y' dla kąta $\gamma = 90^\circ$, po trajektorii μ_w osiągnięto ustalając takie same wartości prędkości zadanych dla wszystkich gaśnienic:

$$v_R = \dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 = \dot{q}_4.$$

Ruch wzdłuż osi x' dla kąta $\gamma = 0^\circ$ osiągnięto różnicując kierunki prędkości w poszczególnych parach gaśnienic:

$$v_R = \dot{q}_1 = -\dot{q}_2 = \dot{q}_3 = -\dot{q}_4.$$

Dla każdej trajektorii wykonano 10 przejazdów. W trakcie badań rejestrowano położenie punktu R, a także orientację kątową korpusu φ^Z . Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej. Na rys. 5.10 – 5.13 przedstawiono zarejestrowaną trajektorię μ_w^Z typowego przejazdu w postaci współrzędnych $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$, przebieg zmiany orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$, odchylenie pomiędzy wartościami zadanymi a wartościami rzeczywistymi Δx_R , Δy_R oraz przebiegi prędkości poszczególnych gaśnienic q_n podczas przejazdu w kierunku osi głównej robota dla $\gamma = 90^\circ$, $\varphi^Z = 0^\circ$. Na rys. 5.14 – 5.17 przedstawiono $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$, zmianę orientacji kątowej $\Delta\varphi$ korpusu, odchylenie pomiędzy wartościami zadanymi a wartościami rzeczywistymi Δx_R , Δy_R oraz przebiegi prędkości poszczególnych gaśnienic q_n zarejestrowane podczas przejazdów wzdłuż trajektorii μ_p^Z , dla wartości zadanych $\gamma = 0^\circ$, $\varphi^Z = 0^\circ$. Wartość $\Delta\varphi$ zdefiniowano jako:

$$\Delta\varphi = \varphi^T - \varphi^Z, \quad (5.5)$$

gdzie:

$\Delta\varphi$ – zmiana kąta orientacji korpusu k ,

φ^T – zadana wartość kąta orientacji korpusu k ,

φ^Z – rzeczywista wartość kąta orientacji korpusu k .

Wartości Δx_R , Δy_R zdefiniowano jako:

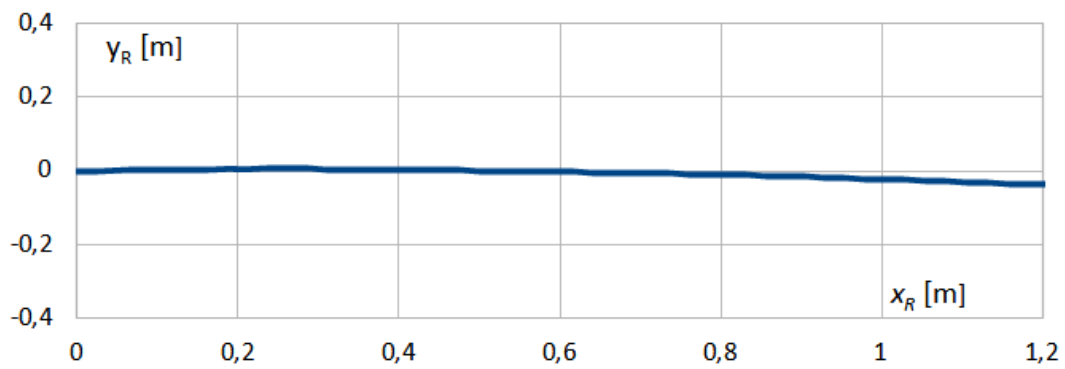
$$\begin{aligned} \Delta x_R &= x_R^T - x_R^Z, \\ \Delta y_R &= y_R^T - y_R^Z, \end{aligned} \quad (5.6)$$

gdzie:

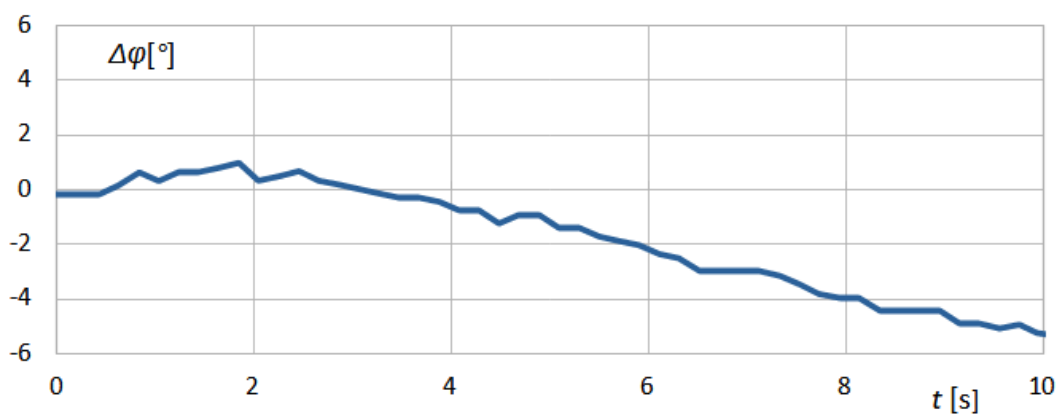
Δx_R , Δy_R – odchyłka położenia punktu R,

x_R^Z , y_R^Z – rzeczywiste położenie punktu R,

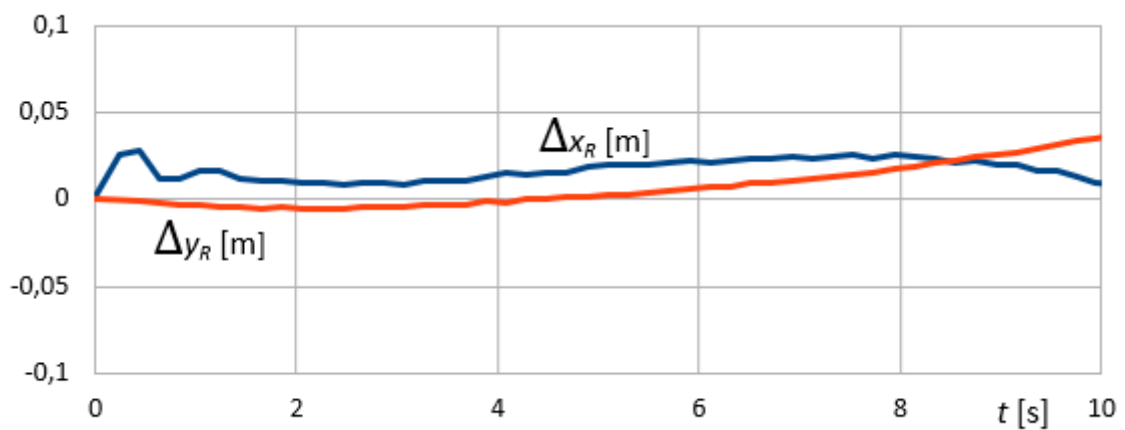
x_R^T , y_R^T – zadane położenie punktu R.



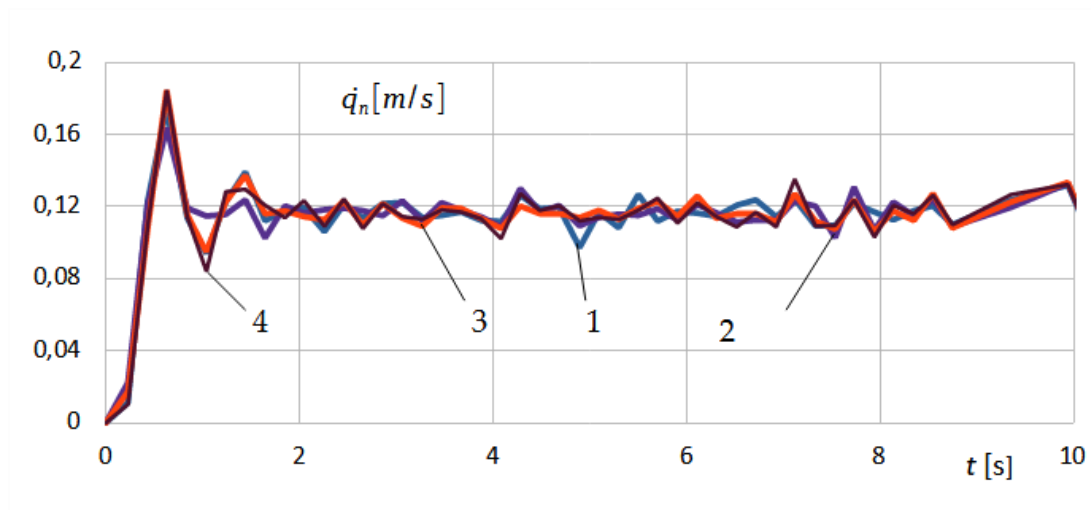
Rys. 5.10. Przebieg współrzędnych $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$ podczas ruchu po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$)



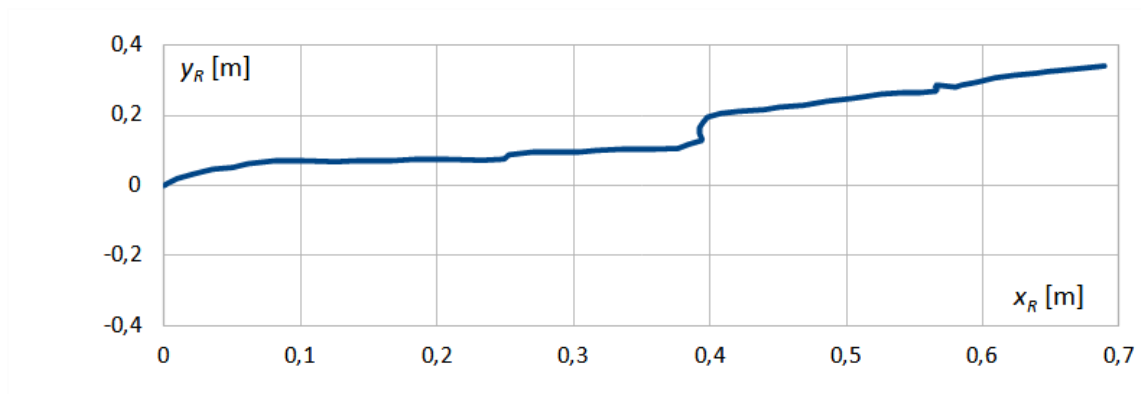
Rys. 5.11. Przebieg zmiany orientacji kątowej $\Delta\varphi$ pojazdu omnigąsienicowego podczas ruchu po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$)



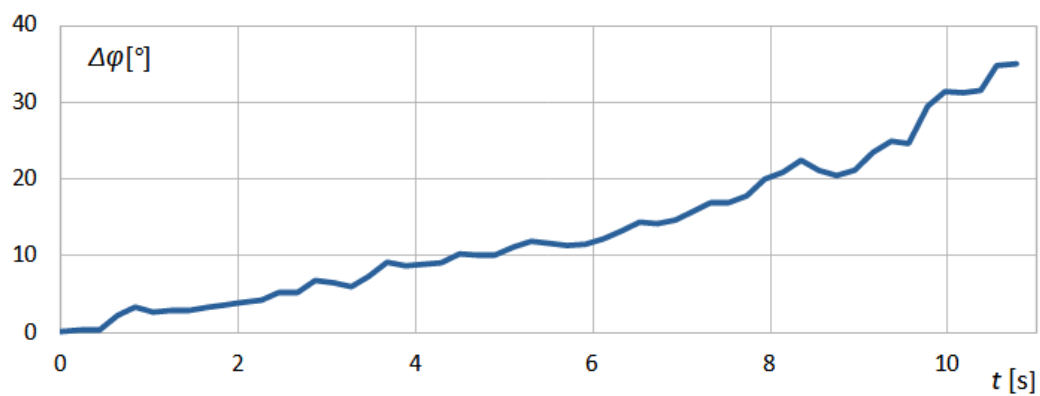
Rys. 5.12. Przebiegi błędu położenia punktu R Δx_R , Δy_R znajdującego się na korpusie pojazdu omnigąsienicowego podczas ruchu po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$)



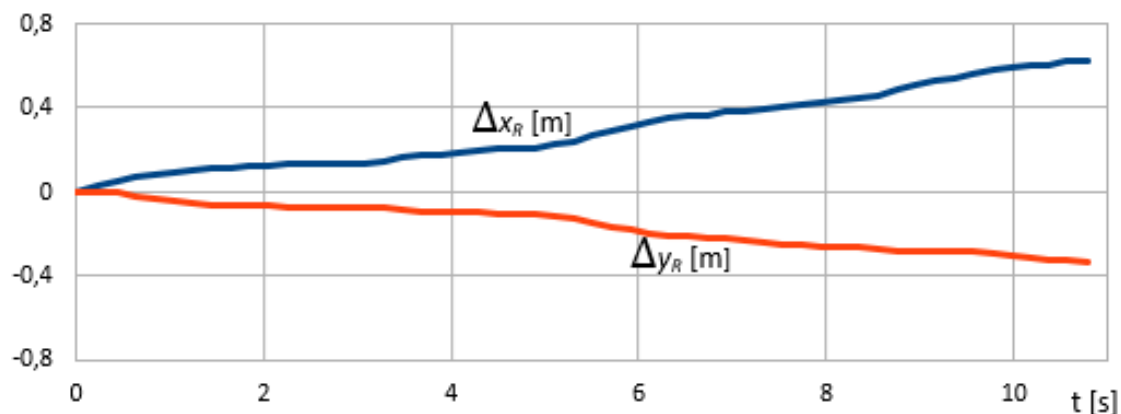
Rys. 5.13. Przebieg wartości prędkości \dot{q}_n poszczególnych gaśnic podczas ruchu po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$), $n = 1, \dots, 4$



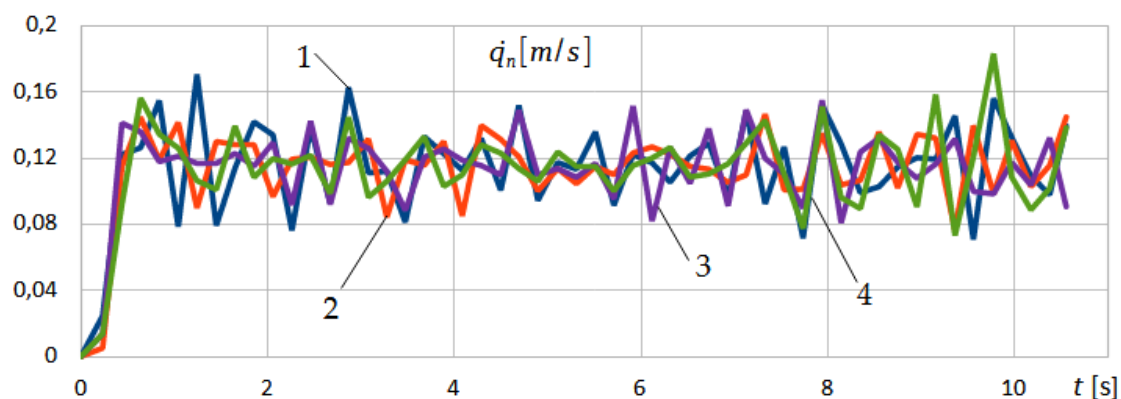
Rys. 5.14. Przebieg współrzędnych $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$, podczas ruchu po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 90^\circ$)



Rys. 5.15. Przebieg zmiany orientacji kątowej $\Delta\varphi$ pojazdu omnigąsienicowego podczas ruchu po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 90^\circ$)



Rys. 5.16. Przebiegi błędu położenia punktu R Δx_R , Δy_R znajdującego się na korpusie pojazdu omniśląsienicowego podczas ruchu po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 90^\circ$)



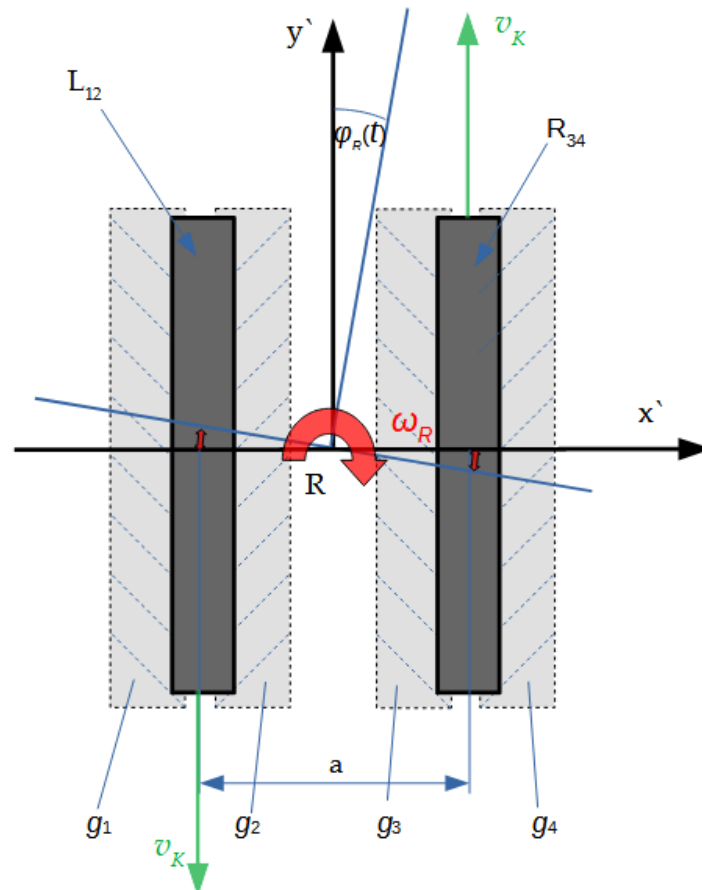
Rys. 5.17. Przebieg wartości prędkości \dot{q}_n poszczególnych gąsienic podczas ruchu po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 90^\circ$), $n = 1, \dots, 4$

Badania wykazały, że odchylenie rzeczywistego toru jazdy względem planowanego występuje zarówno podczas ruchu wzdłuż osi głównej pojazdu, po trajektorii μ_W^Z , jak i wzdłuż osi poprzecznej pojazdu, po trajektorii μ_P^Z . W przypadku ruchu dla kąta $\gamma = 90^\circ$ pojazd zmieniał swoją orientację kątową $\Delta\varphi$ w czasie ze średnią prędkością 0,009 rad/s ($0,5^\circ/s$) (rys. 5.11). W przypadku ruchu po trajektorii μ_W^Z zjawisko to było znacznie wyraźniejsze. Odchylenie trajektorii ruchu było na tyle wyraźne, że odległość którą pojazd powinien pokonać podczas testu musiała zostać skrócona z zakładanych 1,2 m do 0,7 m (rys. 5.14). Przerwanie pomiaru wymuszone zostało przez aspekty techniczne stanowiska pomiarowego, ponieważ po pokonaniu dystans około 0,75 – 0,8 m trajektoria była odchylona tak bardzo, że pojazd wyjeżdżał poza obszar rejestrowany przez system wizyjny. Podczas ruchu po trajektorii μ_P^Z korpus pojazdu zmieniał swoją orientację kątową $\Delta\varphi$ w czasie ze średnią prędkością 0,052 rad/s ($3^\circ/s$) (rys. 5.15). Wahania rzeczywistych wartości prędkości podczas przejazdów testowych nie przekraczały 0,02 m/s podczas ruchu wzdłużnego oraz 0,03 m/s podczas ruchu poprzecznego co przedstawiono na rys. 5.13 oraz 5.17.

Po eksperymentach przeprowadzono analizę statystyczną wyników pomiarów orientacji kątowej φ . Współczynnik korelacji liniowej Pearsona wskazywał istnienie bardzo silnej korelacji liniowej. Zarówno dla ruchu wzdłuż osi głównej, jak i wzdłuż osi poprzecznej wynosił powyżej 0,97. Oznacza to, że zjawisko zakrzywania trajektorii ruchu jest silnie liniowe.

5.4 Badania korekty kierunku ruchu pojazdu omnigąsienicowego

Przeprowadzone badania jazdy OMP2024_1 wykazały, że pojazd omnigąsienicowy o gąsienicach całkowicie zachodzących mocno zakrzywia swoją trajektorię ruchu podczas jazdy w kierunku poprzecznym. Z tego powodu opracowano algorytm umożliwiający korekcję kierunku jazdy w taki sposób, aby utrzymać zadaną trajektorię ruchu. Ze względu na liniowy charakter zjawiska zakrzywiania trajektorii możliwe jest dobranie takich współczynników kompensujących prędkości poszczególnych napędów, aby zniwelować efekt nieporządnej zmiany orientacji kątowej φ korpusu k . Na podstawie zebranych danych zaproponowano algorytm statycznej korekcji kierunku ruchu. Proponowana metoda opiera się na zróżnicowaniu prędkości w poszczególnych parach układów bieżnych (modułach), oznaczonych jako L_{12} oraz P_{34} o prędkość v_K . W skład pary L_{12} wchodzi gąsienice g_1 i g_2 , natomiast w skład pary P_{34} gąsienice g_3 i g_4 . Zastosowanie algorytmu korekcji wymaga wcześniejszego zidentyfikowania obiektu. Identyfikacja polega na wykonaniu szeregu przejazdów testowych, zgodnie z opisem z podrozdziału 5.3. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe jest wyznaczenie wartości korygujących. Prędkości zadane modułom różnicuje się o wartości korygujące w taki sposób, aby przeciwstawiły się zaobserwowanej rotacji korpusu φ . Schemat działania statycznej korekcji ruchu przedstawiono na rys. 5.18.



Rys. 5.18. Schemat działania zaproponowanego sposobu statycznej korekcji kierunku ruchu

Wartość prędkości v_K wyliczana jest na podstawie zebranych wcześniej informacji o zakrzywieniu trajektorii ruchu i można ją obliczyć ze wzorów:

$$\omega_R = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (5.7)$$

$$v_K = -\omega_R c_f \frac{1}{2} a, \quad (5.8)$$

gdzie:

ω_R - prędkość kątowna korpusu uzyskana w wyniku zakrzywienia trajektorii ruchu,

Δt - czas, w którym nastąpiła zmiana orientacji kątowej korpusu,

$\Delta\varphi$ - kąt, o jaki nastąpiła zmiana orientacji kątowej korpusu,

v_K - prędkość korekcji,

c_f - wyznaczony doświadczalnie współczynnik korekcji zależny od tarcia,

a - odległość pomiędzy parami układów bieżnych.

W efekcie, aby uzyskać prędkość ruchu punktu R równą v_R podczas ruchu po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$) zadane wartości prędkości \dot{q}_n gaśnienic będą wynosiły:

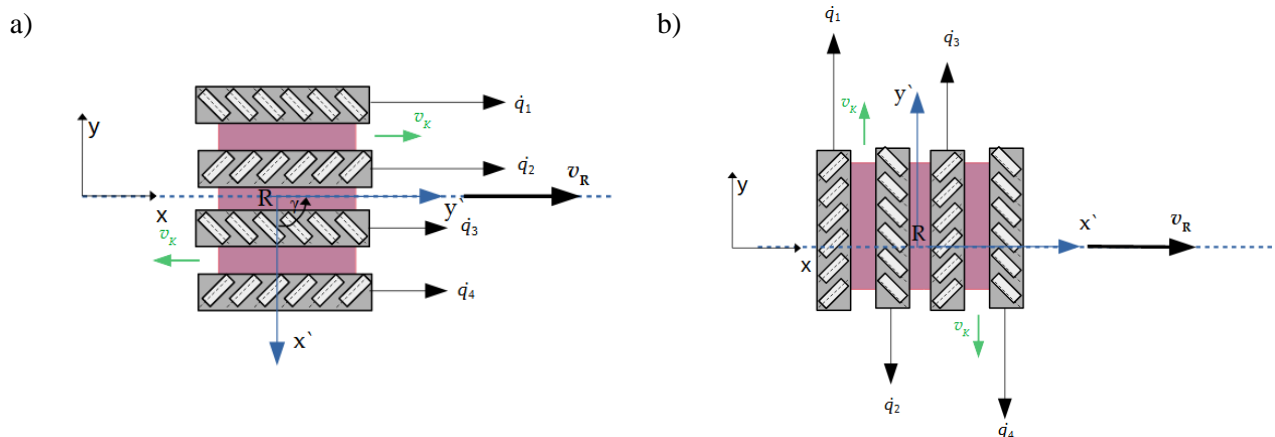
$$\dot{q}_1 + v_K = \dot{q}_2 + v_K, \quad (5.9)$$

$$\dot{q}_3 - v_K = \dot{q}_4 - v_K. \quad (5.10)$$

W przypadku ruchu poprzecznego po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 0^\circ$), aby uzyskać prędkość punktu R znajdującego się na korpusie k równą v_R prędkości \dot{q}_n gaśnienic muszą wynosić:

$$\dot{q}_1 + v_K = -(\dot{q}_4 + v_K), \quad (5.11)$$

$$\dot{q}_2 - v_K = -(\dot{q}_3 - v_K). \quad (5.12)$$



Rys. 5.19. Graficzne przedstawienie zadanych prędkości \dot{q}_n gaśnienic i kierunku ruchu pojazdu omnigąsienicowego po uwzględnieniu prędkości korekty v_K dla ruchu: a) wzdłuż osi głównej robota po trajektorii μ_W^T ($\gamma = 90^\circ$), b) wzdłuż osi poprzecznej robota po trajektorii μ_P^T ($\gamma = 0^\circ$)

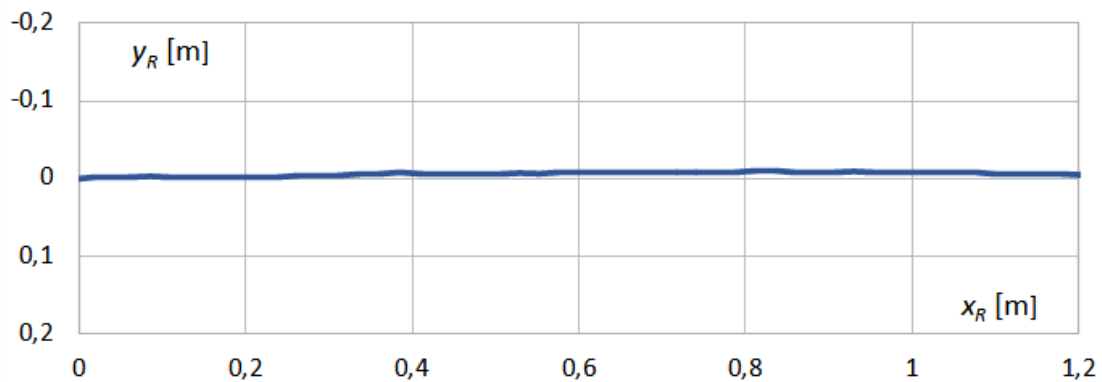
Wartość v_K obliczona na podstawie (5.7) i (5.8) dla po trajektorii μ_W^T dla $\omega_R = 0,44^\circ/\text{s}$, $c_f = 0,5$, $a = 0,27$ m wynosiła:

$$v_K = 0,06 \text{ m/s.}$$

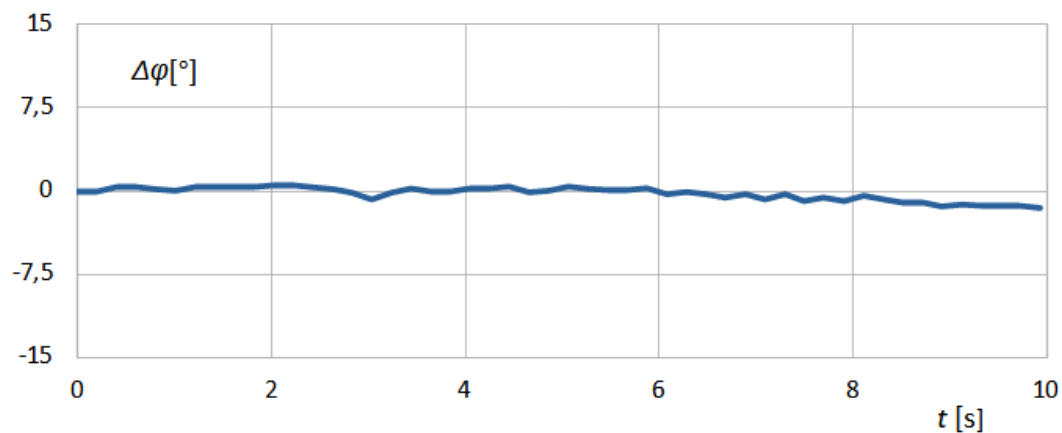
Natomiast dla ruchu po trajektorii μ_P^T dla parametrów $\omega_R = 2,6^\circ/\text{s}$, $c_f = 0,5$, $a = 0,27$ m wynosiła:

$$v_K = 0,035 \text{ m/s.}$$

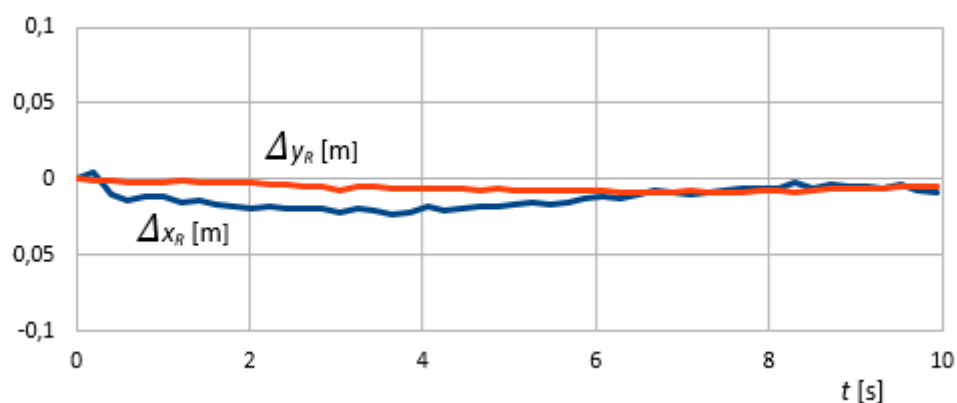
Kolejnym etapem badań było sprawdzenie wpływu zastosowania korekcji na zjawisko zakrzywiania trajektorii. Ze względu na ograniczenia demonstratora konieczne było ograniczenie prędkości korekcji do wartości wynoszącej maksymalnie $v_K = 0,02$ m/s. Na rys. 5.20 – 5.23 przedstawiono współrzędne $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$, zmianę orientacji kątowej $\Delta\varphi$ korpusu, odchylenie pomiędzy wartościami zadanymi a wartościami rzeczywistymi Δx_R , Δy_R oraz przebiegi prędkości poszczególnych gąsienic q_n podczas jazdy po trajektorii μ_W^Z . Na rys. 5.24 – 5.27 przedstawiono współrzędne $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$, zmianę orientacji kątowej $\Delta\varphi$ korpusu, odchylenie pomiędzy wartościami zadanymi a wartościami rzeczywistymi Δx_R , Δy_R oraz przebiegi prędkości poszczególnych gąsienic q_n zarejestrowane podczas przejazdów wzdłuż trajektorii μ_P^Z .



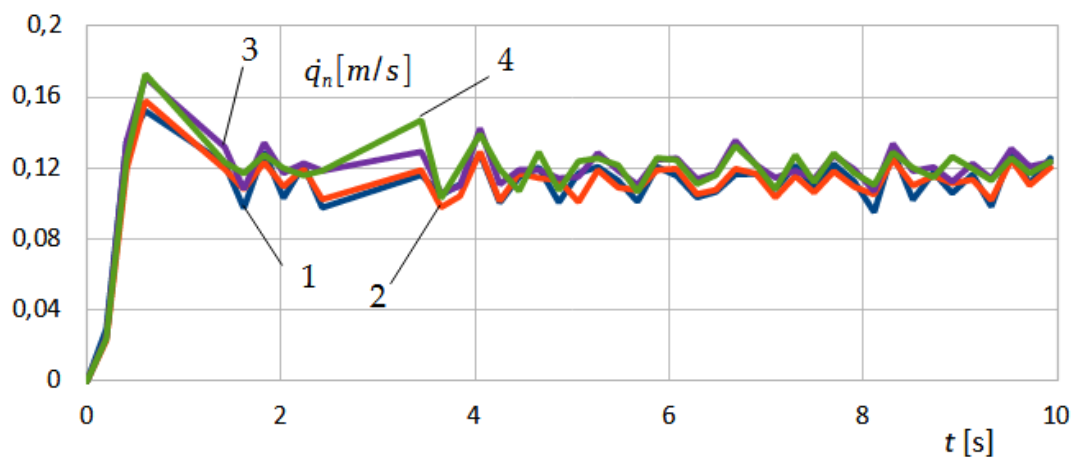
Rys. 5.20. Przebieg współrzędnych $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$, podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$)



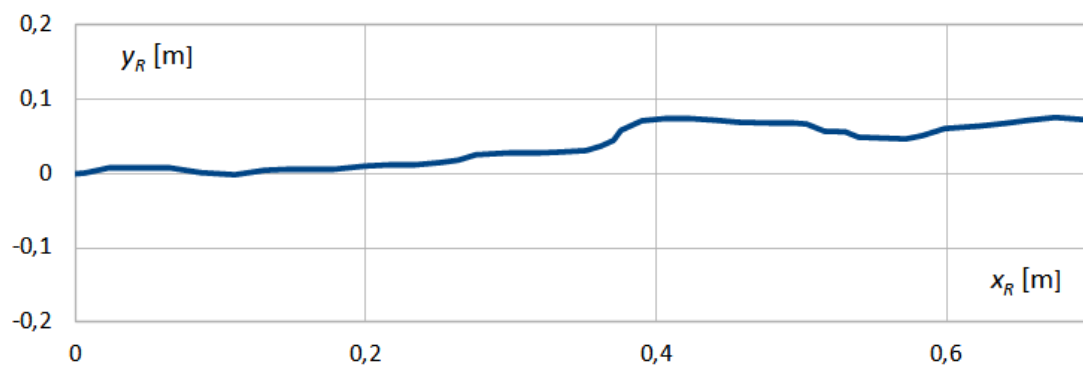
Rys. 5.21. Przebieg zmiany orientacji kątowej $\Delta\varphi$ pojazdu omnigąsienicowego podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$)



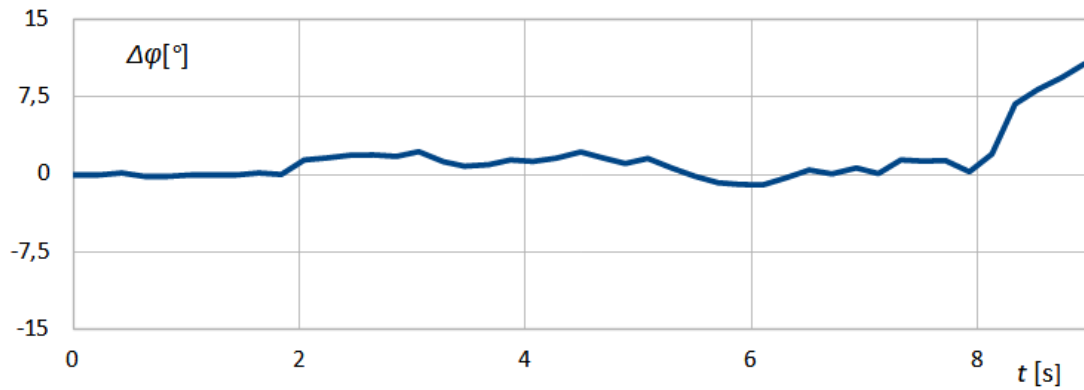
Rys. 5.22. Przebiegi błędów położenia Δx_R , Δy_R punktu R na korpusie pojazdu omniśląsienicowego podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$)



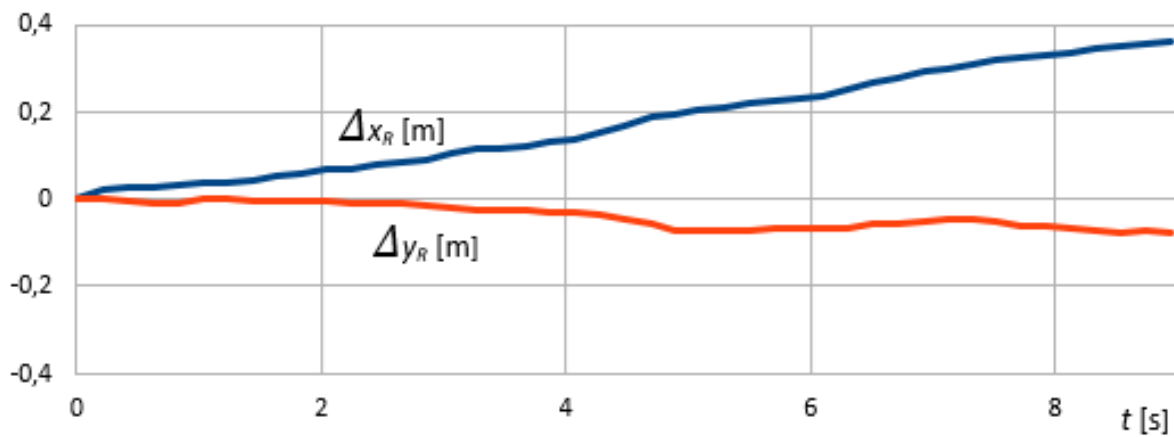
Rys. 5.23. Przebieg wartości prędkości \dot{q}_n poszczególnych ślądnic podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_W^Z ($\gamma = 90^\circ$), $n = 1, \dots, 4$



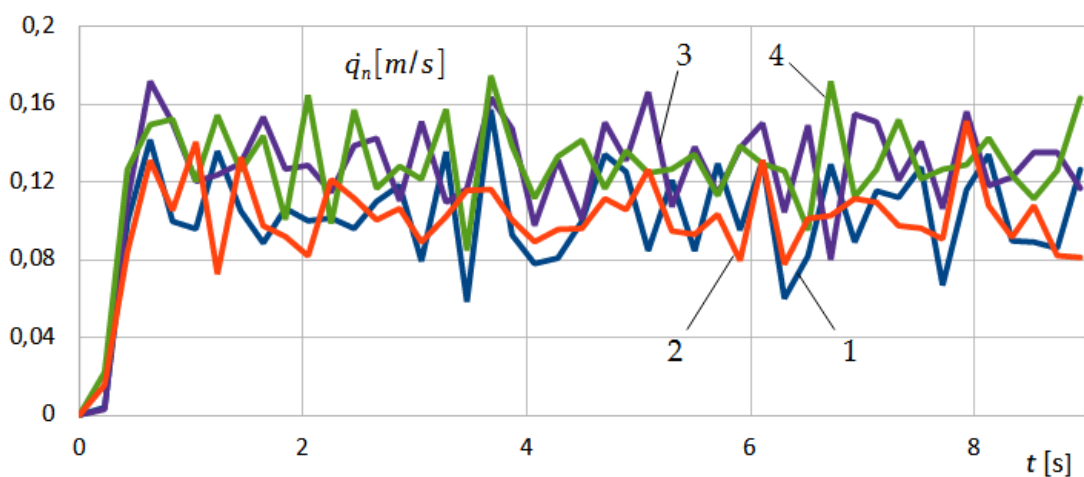
Rys. 5.24. Przebieg współrzędnych $x_R^Z(t)$, $y_R^Z(t)$, podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 0^\circ$)



Rys. 5.25. Przebieg zmiany orientacji kątowej $\Delta\varphi$ pojazdu omnigąsienicowego podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 0^\circ$)



Rys. 5.26. Przebiegi zmian położenia punktu R Δx_R , Δy_R znajdującego się na korpusie pojazdu omnigąsienicowego podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 0^\circ$)



Rys. 5.27. Przebieg wartości prędkości \dot{q}_n poszczególnych łąsienic podczas ruchu z aktywną korektą kierunku jazdy po trajektorii μ_P^Z ($\gamma = 0^\circ$), $n = 1, \dots, 4$

Analiza wyników wykazała znaczącą poprawę parametrów jazdy. Zestawienie wyników jazdy ze statyczną korektą kierunku, jak i bez niej przedstawiono w tab. 5.1.

Tab. 5.1. Średnie odchylenie kątowe w odniesieniu do odległości podczas różnych przejazdów

Ruch po trajektorii μ_W^T		Ruch po trajektorii μ_P^T	
Bez korekty kierunku	Z korektą kierunku	Bez korekty kierunku	Z korektą kierunku
$\Delta\varphi = 0.085$ rad	$\Delta\varphi = 0.025$ rad	$\Delta\varphi = 0.549$ rad	$\Delta\varphi = 0.207$ rad
$\Delta\dot{q}_n < 0.02$ m/s	$\Delta\dot{q}_n < 0.02$ m/s	$\Delta\dot{q}_n < 0.03$ m/s	$\Delta\dot{q}_n < 0.04$ m/s
$\omega_R = 0.009$ rad/s	$\omega_R = 0.003$ rad/s	$\omega_R = 0.052$ rad/s	$\omega_R = 0.024$ rad/s

Dane zebrane w tab. 5.1 wskazują na znaczącą poprawę parametrów jazdy po zastosowaniu algorytmu korekcji statycznej, zarówno podczas ruchu wzdłużnego po trajektorii μ_W^T , jak i podczas ruchu poprzecznego wzdłuż trajektorii μ_P^T . Prędkość ω_R odchylenia orientacji kątowej pojazdu podczas ruchu po trajektorii μ_W^Z zredukowano do 0,003 rad/s, czyli 0,18°/s (rys. 5.21). Prędkość odchylenia kierunku jazdy podczas ruchu poprzecznego po trajektorii μ_P^Z zmniejszono do 0,024 rad/s, czyli 1,38°/s (rys. 5.25). Oznacza to, że zastosowana korekta korzystnie wpłynęła na właściwości ruchu badanego pojazdu. Wartości błędów położenia Δx_R , Δy_R podczas jazdy po trajektorii μ_W^T zarówno z korektą, jak i bez niej (rys. 5.12 i 5.22) są niewielkie, co oznacza że trajektoria jest odwzorowywana poprawnie. W przypadku jazdy po trajektorii μ_P^T bez korekcji istnieją bardzo duże rozbieżności pomiędzy zadaną a rzeczywistą trajektorią jazdy (rys. 5.16). Zastosowanie algorytmu korekcji znacząco zmniejsza błędy Δx_R , Δy_R (rys. 5.26).

Pomimo tego, że zastosowane wartości korekty v_K z przyczyn technicznych musiały być mniejsze od zamierzonych, to jej wykorzystanie zmniejszyło przynajmniej dwukrotnie prędkość odchylenia się korpusu robota omniąsienicowego od założonej trajektorii (tab. 5.1). Wahania rzeczywistych wartości prędkości nie przekraczały 0,04 m/s podczas ruchu poprzecznego (rys. 5.27) oraz 0,02 m/s podczas ruchu wzdłużnego (rys. 5.23).

5.5 Wnioski

Przeprowadzone badania jednoznacznie potwierdziły występowanie obserwowanego w symulacjach przedstawionych w rozdz. 3 efektu zakrzywienia trajektorii ruchu pojazdu omniąsienicowego. W przypadku badanego robota efekt ten był bardzo dobrze widoczny podczas eksperymentów. Z powodu braku źródeł zawierających wytyczne dotyczące projektowania i konstruowania pojazdów omniąsienicowych napędy użyte do budowy demonstratora okazały się niewystarczające. Z tego powodu algorytm korekcji statycznej został zweryfikowany w ograniczonym zakresie. Pomimo tego, badania wykazały, że zaproponowana koncepcja statycznej korekty kierunku jest racjonalna, a jej zastosowanie przynosi wyraźną poprawę parametrów jezdnych. Zasadne jest więc przeprowadzenie badań, które umożliwią wypełnienie luki w wiedzy dotyczącej projektowania pojazdów omniąsienicowych, a następnie zaprojektowanie kolejnego pojazdu, wolnego od wad występujących w jego pierwotnej wersji. Sam algorytm korekty statycznej jest powiązany z parametrem zależnym od stanu i materiału, z którego wykonano podłoże oraz rolki toczne. W przypadku ruchu w trudnym terenie, bądź po nawierzchniach różnego rodzaju, zastosowanie tego algorytmu prawdopodobnie nie przyniesie porządnego rezultatu. Konieczna jest zatem jego modyfikacja i rozszerzenie o sprzężenie zwrotne aktualnej orientacji kątowej robota, co pozwoli na utrzymywanie zadanej orientacji kątowej φ przy zmiennych parametrach podłoża oraz pomimo działania sił zewnętrznych.

6. Badanie oporów ruchu rolki tocznej

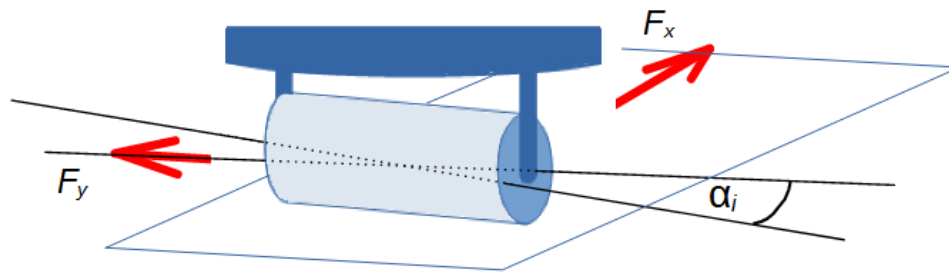
Badania przeprowadzone na OMP2024_1 wykazały konieczność poszerzenia stanu wiedzy z zakresu konstrukcji pojazdów omnigąsienicowych. Szczególnie istotny był tutaj dobór właściwych napędów. Dostępne publikacje nie poruszały zagadnień dotyczących wpływu obciążenia, kształtu oraz kąta zamocowania rolki tocznej na opory ruchu pojazdu omnigąsienicowego. Badanie eksperymentalne przedstawione w rozdz. 4, polegające na pomiarze siły wymaganej do przeciągnięcia korpusu istniejącego pojazdu daje pewne informacje na temat spodziewanych oporów, jednak w bardzo wąskim zakresie. Wyznaczenie oporów, które musi pokonać napęd po zastosowaniu algorytmu korekcji kierunku jazdy (rozdz. 5) wymaga innego podejścia. Jeśli na skutek zmiany warunków otoczenia, na przykład poślizgu bądź działania siły zewnętrznej, pojazd utraci swoją pierwotną orientację kątową konieczne jest wprowadzenie poprawek do prędkości poszczególnych napędów, aby zniwelować powstały uchyb $\Delta\varphi$. W takim przypadku niektóre gąsienice będą kręciły się wolniej, a inne szybciej. Na skutek tej różnicy prędkości napędy będą musiały pokonać dodatkową siłę, powiązaną z oporami ruchu. Opory, występujące pomiędzy kierunkiem wyznaczonym przez oś rolki tocznej a podłożem są niezbędne, aby pojazd mógł poruszać się ruchem omnikierunkowym. Można zatem uznać, że im większe są to opory, tym lepszy jest układ jezdny pojazdu omnigąsienicowego. Jednocześnie, te same opory będą musiały pokonać napędy podczas korygowania kierunku jazdy pojazdu omnigąsienicowego.

Dotychczasowy stan wiedzy o oporach ruchu występujących podczas ruchu poprzecznego pojazdu omnigąsienicowego jest niewystarczający, aby prawidłowo określić siły występujące pomiędzy rolką toczną a różnymi typami podłoża. W niniejszym rozdziale poruszono zagadnienie wpływu kształtu, kąta orientacji oraz obciążenia swobodnej rolki tocznej na rozkład siły tarcia występującej pomiędzy podłożem a rolką. Przedstawione są również typowe wyniki pomiarów wraz z opracowaniem. Poruszono problem określenia oporów ruchu (sił wzdłużnych i poprzecznych) pojedynczego ogniwa gąsienicy wyposażonego w rolkę toczną podczas ruchu gąsienicy. Podczas eksperymentów zbadano wpływ kształtu rolki, obciążenia i kąta α orientacji rolki względem ogniwa na wartości sił oporu. Przeprowadzono badania wpływu prędkości ruchu rolki tocznej oraz różnych typów podłoża na uzyskiwane siły oporu.

6.1 Stanowisko pomiarowe

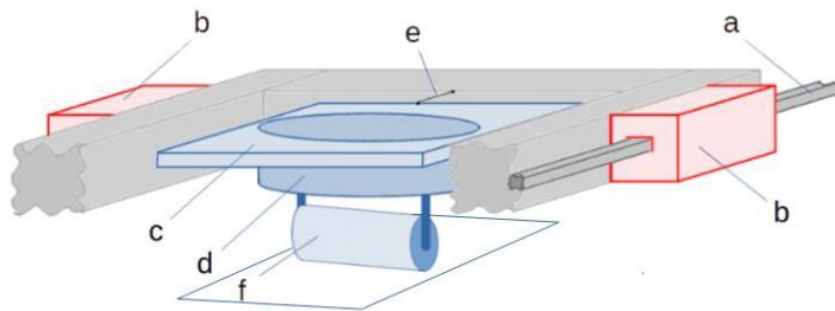
Badania przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku pomiarowym, którego schemat działania przedstawiono na rys. 6.1. Stanowisko to pozwala na pomiar wartości siły wzdłużnej F_x oraz siły poprzecznej F_y , do kierunku ruchu, powstających podczas przeciągania pasywnej rolki tocznej po

podłożu przy różnych prędkościach ruchu. Wartości sił w poszczególnych osiach mierzone są dzięki belkom tensometrycznym [106].

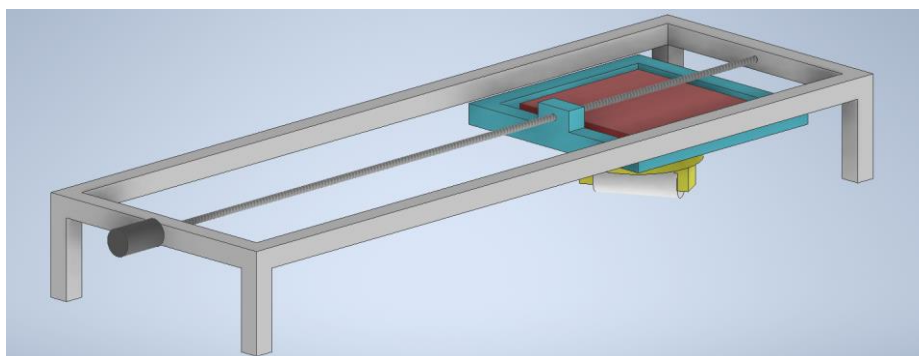


Rys. 6.1. Schemat działania stanowiska pomiarowego do pomiaru oporów ruchu rolki tocznej

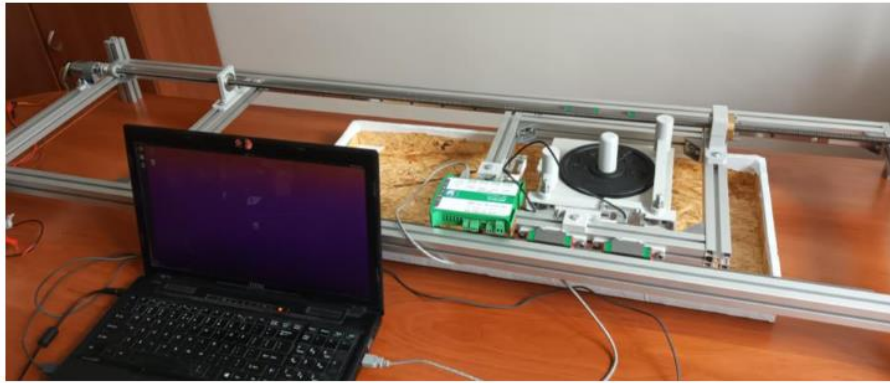
Stanowisko przystosowane jest do badania wpływu podłoża, obciążenia, kształtu (geometrii) rolki tocznej, materiału z której została wykonana oraz jej orientacji względem osi ogniwa gąsienicy na siły powstające w wyniku interakcji pojedynczego segmentu gąsienicy z podłożem. Na rys. 6.2 przedstawiony jest schemat stanowiska wraz z opisem poszczególnych elementów, na rys. 6.3 jest wizualizacja stanowiska pomiarowego, natomiast na rys. 6.4 przedstawiono zdjęcie rzeczywistego stanowiska. Pomiar F_x , F_y polega na wymuszeniu ruchu wózka pomiarowego i zbadaniu wartości sił, z jaką wózek z zamocowaną rolką toczną oddziałuje na ramę stanowiska, z którą jest połączony.



Rys. 6.2. Schemat stanowiska do pomiaru oporu swobodnych rolek tocznych pojazdów omnigąsienicowych: a) prowadnica liniowa, b) wózki liniowe, c) wózek pomiarowy, d) modyfikowalny segment gąsienicy, e) nierozciągliwa linka, f) badana rolka toczna

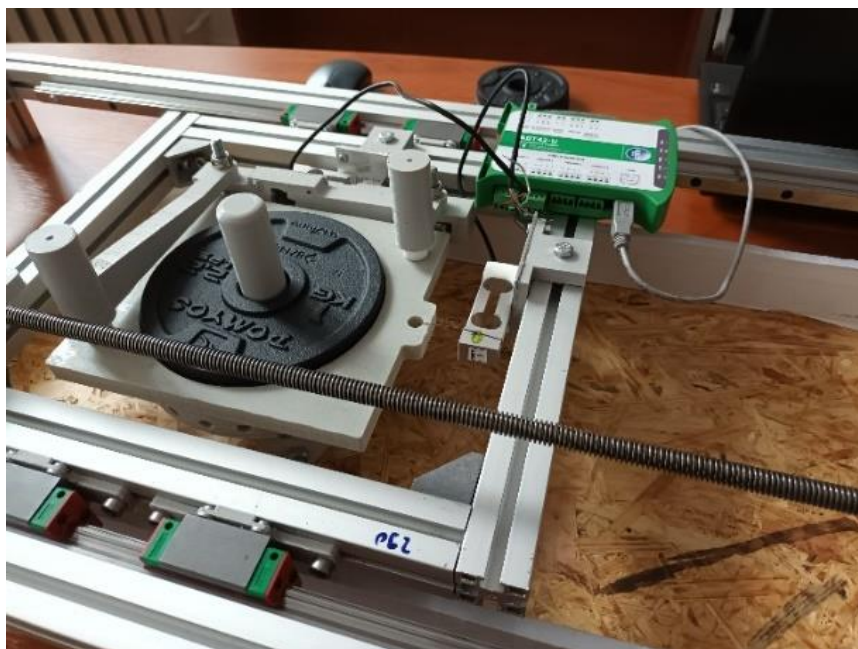


Rys. 6.3. Widok modelu bryłowego stanowiska do pomiaru rolek tocznych

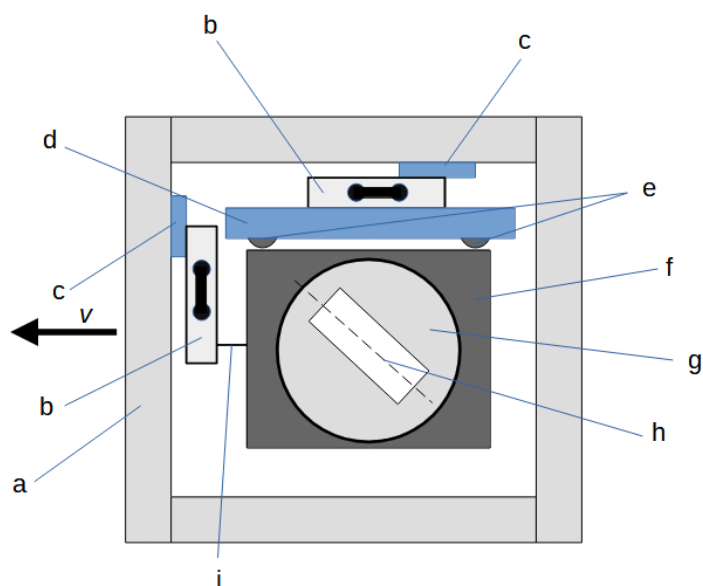


Rys. 6.4. Stanowiska do pomiaru oporu swobodnych rolek tocznych pojazdów omnigąsienicznych

Stanowisko składa się z aluminiowej ramy, po której na prowadnicach liniowych a) porusza się wózek pomiarowy c) (rys. 6.2.). Wózek pomiarowy poruszany jest za pomocą śruby pociągowej, którą napędza zamocowany na ramie silnik. Do wózka pomiarowego przymocowane są dwie belki Wózek przystosowany jest do użycia dwóch rodzajów belek tensometrycznych. Do pomiaru sił F_x , F_y wykorzystane mogą zostać zarówno belki MAVIN NS6 o zakresie pomiarowym 0 – 6 N i deklarowanej powtarzalności 0,02%, jak i MAVIN NA27 o zakresie pomiarowym 0 – 20 N o deklarowanej powtarzalności 0,03%. Wyniki przetwarzane są przez jednostkę pomiarową ADT42-U, który rejestruje pomiary z częstotliwością 80 Hz. Do belki tensometrycznej działającej w osi wzdłużnej stanowiska za pomocą nierozciągliwej linki zamocowana jest platforma pomiarowa. Druga belka tensometryczna działa w osi poprzecznej stanowiska. Ruch wózka pomiarowego wymusza ruch poprzeczny platformy pomiarowej, która naciska na belkę tensometryczną. Wózek pomiarowy wykonano w taki sposób, aby możliwa była zarówno wymiana rolki tocznej na inną, zmiana ustawienia kąta α orientacji rolki tocznej jak i zmiana obciążenia m platformy. Widok rzeczywistego wózka pomiarowego przedstawiono na rys. 6.5, natomiast jego schemat na rys. 6.6.



Rys. 6.5. Widok układu wózka pomiarowego z dodanym obciążeniem

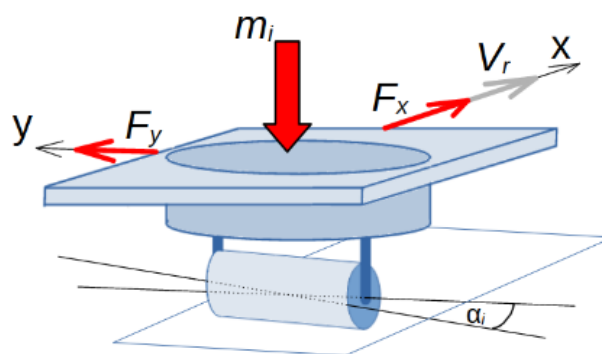


Rys. 6.6. Schemat układu wózka pomiarowego: a) aluminiowa rama, b) belki tensometryczne, c) mocowania belek tensometrycznych, d) ramię pomiarowe, e) łożyska, f) wózek pomiarowy, g) obrotnica umożliwiająca ustawienie rolki pod wybranym kątem, h) badana rolka toczna, i) nierozciągliwa linka

Konstrukcja wózka pomiarowego umożliwia ustawienie kątów orientacji rolki $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ i 90° . Maksymalne przewidywane obciążenie wózka pomiarowego to $m = 1$ kg.

6.2 Badania kształtu i kąta orientacji rolki tocznej

Badania polegały na wykonaniu szeregu przejazdów wózka pomiarowego z czterema różnymi rolkami, usytuowanymi pod różnymi kątami α_i , ze zmiennym obciążeniem m_i przy różnych prędkościach v_i [106]. Schemat przeprowadzonych badań przedstawiono na rys. 6.7.



Rys. 6.7. Ogólny schemat badanego układu podczas przejazdów testowych

Przebadane zostały cztery typy rolek tocznych: A, B, C, D (rys. 6.8). Rolki wykonano w technologii addytywnej z termoplastycznego elastomeru FLEX 40ShD. Wszystkie rolki łożyskowane były za pomocą pary tych samych łożysk, dla zapewnienia takich samych oporów ruchów. Aby osiągnąć maksymalną powtarzalność badań rolki wykonano z tej samej szpuli materiału, na jednej maszynie, bezpośrednio jedna po drugiej. Zastosowano wypełnienie typu gyroid o gęstości 25 %.



Rolka Walec typu A
tworząca – 0,068 m, wysokość – 0,068 m



Rolka Walec typu B
tworząca – 0,061 m, wysokość – 0,068 m



Rolka Walec typu C
tworząca – 0,054 m, wysokość – 0,068 m

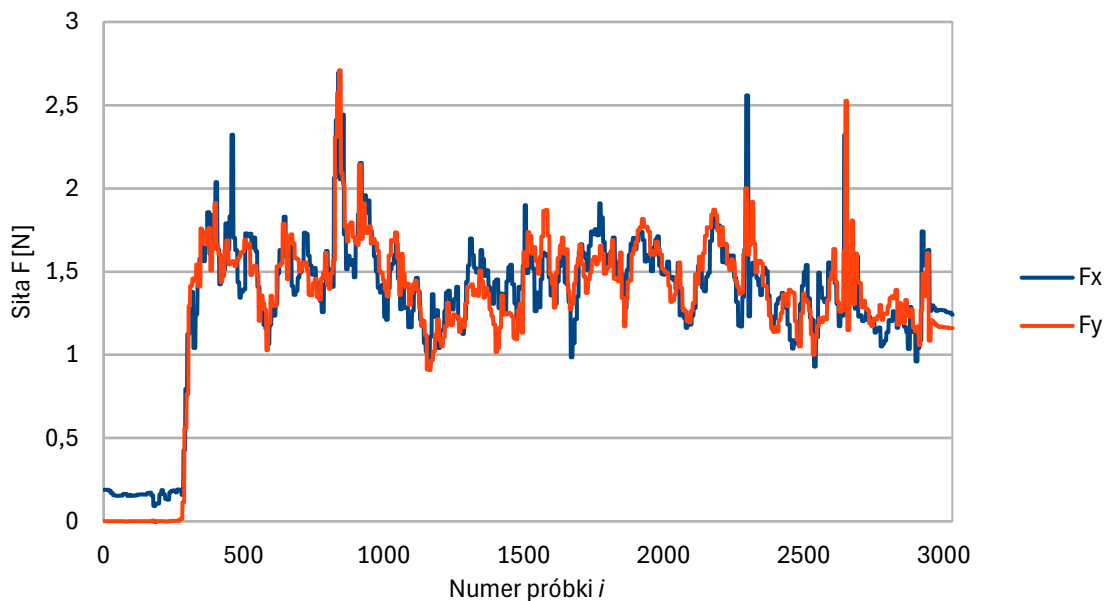


Rolka Mecanum typu D
tworząca – wycinek koła o promieniu 1 m,
wysokość – 0,068 m

Rys. 6.8. Widoki poszczególnych badanych rolek wraz z parametrami konstrukcyjnymi

Każdy przeprowadzony pomiar składał się z 10 przejazdów. Przejazdy pomiarowe wykonywano na dystansie 0,4 m. Wyniki poszczególnych przejazdów to uśrednione wartości sił zarejestrowanych podczas ruchu, z wyłączeniem 0,1 m początkowego oraz 0,1 m końcowego okresu ruchu, kiedy wózek pomiarowy przyspiesza aby osiągnąć stabilną prędkość oraz gdy hamuje.

Badania podzielono na cztery etapy w których analizowano kolejno: wpływ obciążenia m oraz kąta orientacji rolki α na rozkład sił tarcia, wpływ kształtu rolki na siły tarcia, wpływ prędkości v na rozkład oporów ruchu oraz wpływ podłoża na opory ruchu. Na rys. 6.9 przedstawiono przebiegi sił składowych F_x oraz F_y zarejestrowanych podczas przykładowego przejazdu.



Rys. 6.9. Składowe F_x oraz F_y zarejestrowane podczas przykładowego przejazdu rolki walcowej typu A usytuowanej pod kątem $\alpha_i = 45^\circ$, obciążonej masą $m_l = 385$ g

Średnie wartości sił F_x oraz F_y wyliczono na podstawie wzorów:

$$F_x = \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} \frac{Fx_i}{i_{max} - i_{min}},$$

$$F_y = \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} \frac{Fy_i}{i_{max} - i_{min}},$$
(6.1)

gdzie:

F_x, F_y – średnie wartości sił w osiach x oraz y,

i – zmienna, numer aktualnie przeliczanej próbki,

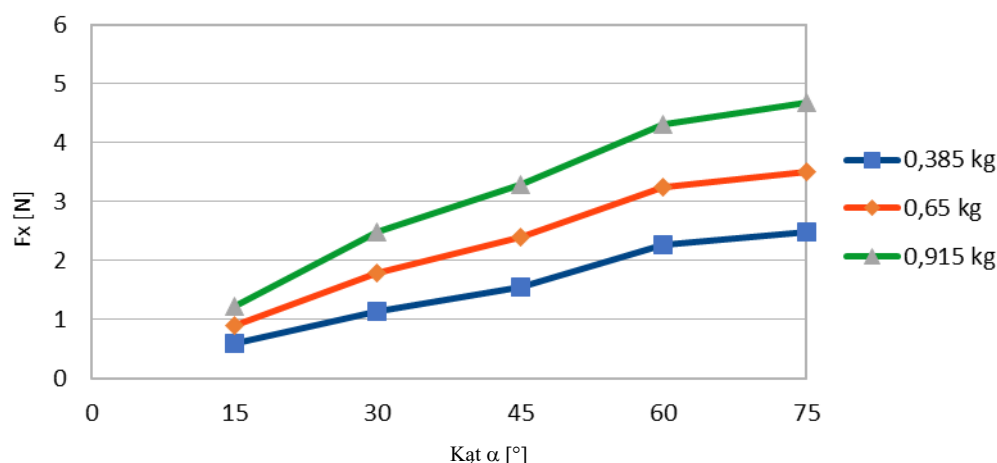
i_{min} – numer próbki będącej początkiem zakresu pomiarowego,

i_{max} – numer próbki będącej końcem zakresu pomiarowego.

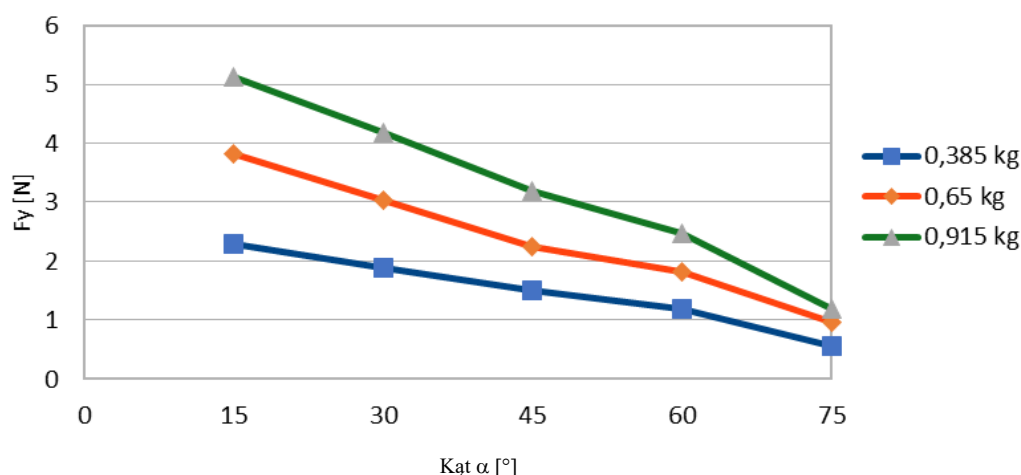
Pierwszy etap zakładał przebadanie rolki typu A, o walcowym kształcie podczas przejazdów pod kątem α_i wynoszącym kolejno 15° , 30° , 45° , 60° oraz 75° . Kąty 0° oraz 90° pominięto w badaniach, ponieważ rolki usytuowane pod takimi kątami nie wywołują efektu przetaczania korpusu w kierunku innym niż oś główna podczas ruchu gąsienic w przeciwnych kierunkach. Kąt α_i mierzony jest pomiędzy kierunkiem prostopadłym do kierunku ruchu ogniwa, a osią rolki tocznej. Przetestowano obciążenia wynoszące $m_1 = 0,385$ kg, $m_2 = 0,650$ kg oraz $m_3 = 0,915$ kg. Przejazdy wykonano prędkości $v = 0,01$ m/s, na podłożu typu płyta OSB. Badania przeprowadzono w oparciu o czujniki tensometryczne (belki) o zakresie pomiarowym 0 – 6 N. Wyniki poddano analizie statystycznej i przedstawiono zbiorczo w tab. 6.1 oraz na wykresach rys 6.10 i 6.11.

Tab. 6.1. Wartości sił oddziaływania F_x i F_y rolki A na ogniwo dla obciążeń ogniwa masą m_i i kątów usytuowania α_i (σ_{F_x} , σ_{F_y} - odchylenia standardowe)

α	$m_1 = 0,385$ kg		$m_2 = 0,650$ kg		$m_3 = 0,985$ kg	
	σ_{F_x} [N] F_x [N]	σ_{F_y} [N] F_y [N]	σ_{F_x} [N] F_x [N]	σ_{F_y} [N] F_y [N]	σ_{F_x} [N] F_x [N]	σ_{F_y} [N] F_y [N]
15°	$\sigma_{F_x} = 0,02$ 0,60	$\sigma_{F_y} = 0,02$ 2,30	$\sigma_{F_x} = 0,03$ 0,89	$\sigma_{F_y} = 0,08$ 3,82	$\sigma_{F_x} = 0,03$ 1,22	$\sigma_{F_y} = 0,03$ 5,12
30°	$\sigma_{F_x} = 0,06$ 1,14	$\sigma_{F_y} = 0,07$ 1,89	$\sigma_{F_x} = 0,03$ 1,78	$\sigma_{F_y} = 0,09$ 3,04	$\sigma_{F_x} = 0,04$ 2,48	$\sigma_{F_y} = 0,03$ 4,19
45°	$\sigma_{F_x} = 0,07$ 1,54	$\sigma_{F_y} = 0,05$ 1,50	$\sigma_{F_x} = 0,03$ 2,40	$\sigma_{F_y} = 0,03$ 2,25	$\sigma_{F_x} = 0,14$ 3,29	$\sigma_{F_y} = 0,13$ 3,20
60°	$\sigma_{F_x} = 0,11$ 2,26	$\sigma_{F_y} = 0,13$ 1,19	$\sigma_{F_x} = 0,03$ 3,25	$\sigma_{F_y} = 0,10$ 1,82	$\sigma_{F_x} = 0,05$ 4,31	$\sigma_{F_y} = 0,05$ 2,47
75°	$\sigma_{F_x} = 0,04$ 2,49	$\sigma_{F_y} = 0,05$ 0,55	$\sigma_{F_x} = 0,11$ 3,50	$\sigma_{F_y} = 0,12$ 0,96	$\sigma_{F_x} = 0,08$ 4,68	$\sigma_{F_y} = 0,12$ 1,20



Rys. 6.10. Przebiegi wartości sił poprzecznych F_x dla różnych kątów α orientacji rolki α i obciążeń ogniwa masą m_i



Rys. 6.11. Przebiegi wartości sił wzdłużnych F_y dla różnych kątów α orientacji rolki i obciążeń ogniwa masą m_i

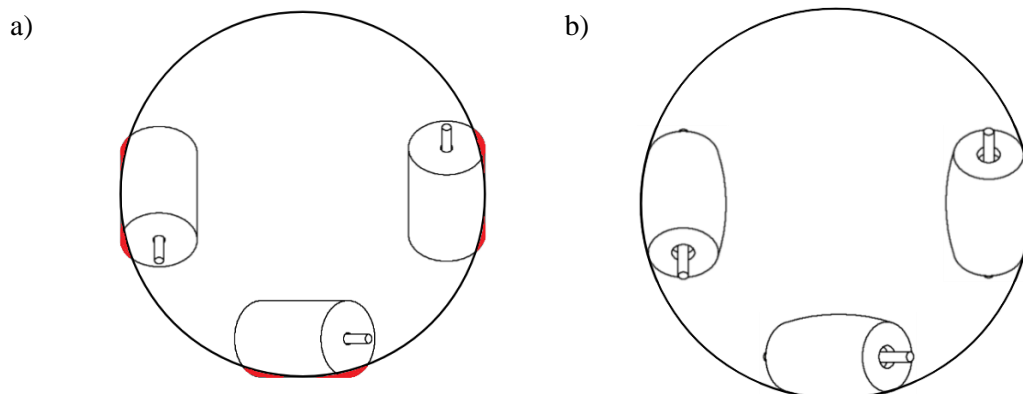
W przebadanym zakresie siły oporu rosną proporcjonalnie do zwiększania obciążenia rolki. Badania potwierdziły oczekiwania i wykazały, że dla kąta $\alpha = 45^\circ$ rozkład sił w obu osiach jest równomierny, to znaczy że wartości składowych x oraz y są bardzo zbliżone. Dzięki temu pojazd omnigąsienicowy, wyposażony w gąsienice z rolkami zorientowanymi pod takim kątem, poruszający się ruchem omniskierunkowym będzie miał zbliżoną przyczepność do podłoża niezależnie od obranego kierunku ruchu. Z tego względu kolejne badania przeprowadzano tylko dla kąta $\alpha = 45^\circ$.

Drugim etapem badań było przebadanie wpływu kształtu rolki tocznej na uzyskiwane wartości składowych sił. Przebadano rolki A, B, C oraz D. Każdą rolką wykonano 10 przejazdów z prędkością zadaną $v = 0,01$ m/s. Przyłożono obciążenie wynoszące $m = 0.915$ kg. Badania przeprowadzono w oparciu o belki pomiarowe o zakresie pomiarowym 0 – 6 N. Wyniki poddane analizie statystycznej przedstawiono w tab. 6.2.

Tab. 6.2. Wartości sił oddziaływania F_x i F_y dla rolek A, B, C i D dla ogniwa obciążonego masą m_i usytuowanego pod kątem $\alpha = 45^\circ$ (σ_{F_x} , σ_{F_y} - odchylenia standardowe)

Typ rolki	σ_{F_x} [N] F_x [N]	σ_{F_y} [N] F_y [N]
Rolka A	$\sigma_{F_x} = 0,07$ 3,83	$\sigma_{F_y} = 0,06$ 3,75
Rolka B	$\sigma_{F_x} = 0,27$ 4,41	$\sigma_{F_y} = 0,30$ 4,22
Rolka C	$\sigma_{F_x} = 0,03$ 4,75	$\sigma_{F_y} = 0,05$ 4,35
Rolka D	$\sigma_{F_x} = 0,06$ 5,76	$\sigma_{F_y} = 0,15$ 5,32

Badania wykazały, że największe wartości oporów ruchu występują podczas przemieszczania rolki o kształcie typu D (tab. 6.2). Ponieważ minimalizacja poślizgów pomiędzy rolką toczną a podłożem jest zjawiskiem korzystnym z punktu widzenia projektowania pojazdu omniąsienicowego zdecydowano, aby do konstrukcji finalnego demonstratora pojazdu omniąsienicowego wykorzystać ten kształt rolki. Jest on korzystny również z innych powodów. Profil linii koła, w przypadku zastosowania gąsienicy z rolkami mecanum można opisać okręgiem, natomiast w przypadku innych kształtów rolek – okrąg będzie tylko przybliżeniem, co przedstawiono na rys. 6.12. Dzięki temu, podczas jazdy wzdłuż osi głównej pojazd nie będzie podlegał tak silnym drganiom, jak w przypadku zastosowania rolki walcowej [106].



Rys. 6.12. Schemat rozmieszczenia swobodnych rolek tocznych na obwodzie koła : a) rolki walcowe typu A, b) rolki mecanum typu D. (Osie rolek usytuowane są pod kątem 45° do płaszczyzny, w której znajduje się okrąg)

6.3 Badania parametrów jezdnych rolki tocznej

Trzecim etapem badań było sprawdzenie wpływu prędkości na uzyskiwane opory ruchu. Badania przeprowadzono na rolce typu D (Mecanum), usytuowanej pod kątem $\alpha = 45^\circ$, przy obciążeniu $m = 0,915$ kg. Eksperymenty wykonano dla prędkości $v_1 = 0,01$ m/s, $v_2 = 0,015$ m/s, $v_3 = 0,02$ m/s. Do przeprowadzenia tych badań wykorzystano belki tensometryczne o zakresie pomiarowym 0 – 20 N. Badania przeprowadzono na podłożu z płyty OSB w warunkach typowych dla hal produkcyjnych. Płyta została zanieczyszczona niewielkiej ilości drobnymi zanieczyszczeniami w postaci piasku. Porównanie wyników badań przedstawiono w tab. 6.3.

Tab. 6.3. Wartości sił oddziaływania F_x i F_y oraz ich odchylenia standardowe σ_{F_x} , σ_{F_y} dla ogniwa obciążonego masą $m = 0,915$ kg usytuowanego pod kątem $\alpha = 45^\circ$ z rolką Mecanum przy różnych prędkościach

Prędkość rolki	σ_{F_x} [N] F_x [N]	σ_{F_y} [N] F_y [N]
$v_1 = [0,01$ m/s]	$\sigma_{F_x} = 0,21$ 5,15	$\sigma_{F_y} = 0,14$ 4,86
$v_2 = [0,015$ m/s]	$\sigma_{F_x} = 0,06$ 5,2	$\sigma_{F_y} = 0,07$ 4,89
$v_3 = [0,02$ m/s]	$\sigma_{F_x} = 0,06$ 5,14	$\sigma_{F_y} = 0,05$ 4,93

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że w badanym zakresie prędkość ruchu nie wpływa w znaczący sposób na siły oddziaływania pomiędzy rolką toczną a podłożem. Dwukrotne zwiększenie prędkości liniowej ogniwa spowodowało zmianę wartości sił oddziaływania o mniej niż 2%. Oznacza to, że zmiana prędkości liniowej gaśienicy w rzeczywistym pojeździe nie wpłynie w znaczący sposób na wartości sił oddziaływania pomiędzy podłożem a gaśienicą.

Ostatnim etapem badań było sprawdzenie wpływu typu podłoża na uzyskiwany rozkład sił. Badania przeprowadzono na następujących typach podłoży: płyta OSB, papier ścierny o gradacji 80 imitujący wykładzinę antypoślizgową oraz płytki podłogowe (rys. 6.13). Przejazdy wykonano przy prędkości $v = 0,15$ m/s, dla rolki tocznej mecanum typu D usytuowanej pod kątem $\alpha = 45^\circ$, przy obciążeniu wózka pomiarowego wynoszącym $m = 0,385$ kg. Wyniki zebrano w tab. 6.4.



Rys. 6.13. Podłoża, na których wykonano przejazdy testowe: płyta OSB, papier ścierny oraz płytki

Tab. 6.4. Wartości sił oddziaływania F_x i F_y oraz ich odchylenia standardowe σ_{F_x} , σ_{F_y} dla ogniwa obciążonego masą $m = 0,385$ kg usytuowanego pod kątem $\alpha = 45^\circ$ z rolką typu D podczas przetaczania po różnych typach podłoży

Typ podłoża	F_x [N]	F_y [N]
OSB	$\sigma_{F_x} = 0,04$ 2,23	$\sigma_{F_y} = 0,03$ 1,78
Wykładzina antypoślizgowa	$\sigma_{F_x} = 0,43$ 6,05	$\sigma_{F_y} = 0,3$ 4,96
Płytki	$\sigma_{F_x} = 0,04$ 1,79	$\sigma_{F_y} = 0,06$ 1,43

Przeprowadzane badania zgodnie z oczekiwaniami wykazały, że na wykładzinie antypoślizgowej opory ruchu są największe. W trakcie ruchu rolka toczna była skrawana przez wykładzinę – na jej powierzchni pojawiły się wyraźne ślady ubytku materiału. Ruch po płytkach generował najmniejsze

opory. Dzieje się tak, ponieważ płytki są równe i gładkie, przez co tarcie pomiędzy rolką a podłożem jest minimalne.

6.4 Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły uzyskać podstawową wiedzę dotyczącą spodziewanych oporów toczenia rolki ogniwa gaśienicy oraz uzyskiwanych rozkładów sił oddziaływań F_x , F_y pomiędzy rolką toczną a podłożem. Uzyskana wiedza może zostać wykorzystana podczas projektowania pojazdów omniągąsienicowych o dowolnym układzie gaśienic. Badania wykazały, że optymalnym kątem orientacji rolki tocznej jest kąt $\alpha = 45^\circ$. Tarcie pomiędzy podłożem a rolką toczną zorientowaną pod takim kątem wykazuje bardzo zbliżone wartości zarówno dla osi wzdłużnej x oraz poprzecznej y . Projektując pojazd omniągąsienicowy, użycie rolek tocznych zorientowanych pod kątem $\alpha = 45^\circ$ zapewni taką samą przyczepność pojazdu do podłoża niezależnie od kierunku.

Badania kształtów rolek wykazały, że przy stałych parametrach dotyczących prędkości ruchu rolki v , stałym kącie orientacji α oraz przy stałej masie m obciążenia rolka o kształcie typu D generuje większe opory ruchu podczas przeciągania jej po podłożu niż pozostałe przebadane rolki (tab. 6.2). Oznacza to, że taki kształt rolki będzie miał mniejszą tendencję do ślizgania się, co w efekcie wpłynie pozytywnie na parametry ruchu pojazdu. Opory ruchu na przebadanym zakresie wzrastają wprost proporcjonalnie w stosunku do zwiększanej masy m (tab. 6.1).

Kolejne eksperymenty pozwolił na sprawdzenie wpływu prędkości v ruchu liniowego ogniwa z rolką toczną na opory toczenia rolki. Eksperyment wykazał, że w przebadanym zakresie nawet dwukrotne zwiększenie prędkości ruchu nie wpłynęło w znaczący sposób na uzyskane siły oddziaływania F_x , F_y (tab. 6.3). Oznacza to, że zmiana zadanej prędkości ruchu pojazdu omniągąsienicowego nie powinna negatywnie wpływać na skuteczność działania mechanizmu korekcji kierunku jazdy.

Ostatni etap badań wykazał, że rodzaj podłoża, po którym porusza się pojazd omniągąsienicowy ma bardzo duży wpływ na opory ruchu (tab. 6.4). Empirycznie wykazano, że podczas poruszania się po wykładzinie antypoślizgowej wartości sił pomiędzy rolką a podłożem wzrastają kilkukrotnie. Informacja ta jest kluczowa, jeśli do poprawy własności jezdnych pojazdu omniągąsienicowego rozważa się wykorzystanie modułu statycznej korekcji kierunku jazdy, opisanego w rozdz. 5. Moduł ten umożliwia wyznaczenie poprawki opisanej przez wzór (5.7), która uwzględniona przez układ sterowania przeciwdziała niezamierzonej zmianie orientacji kątowej φ korpusu pojazdu omniągąsienicowego. Do poprawnego działania modułu konieczna jest identyfikacja podłoża i wyznaczenie sił oddziaływań pomiędzy podłożem a rolkami tocznymi. Przeprowadzone badania wykazały jak duży wpływ na siły występujące pomiędzy rolką toczną a podłożem ma rodzaj tego podłoża. W efekcie, jeśli pojazd omniągąsienicowy będzie poruszał się po więcej niż jednym rodzaju podłoża (np. ruch rozpocznie się na płytkach, a zakończy na wykładzinie antypoślizgowej) algorytm statycznej korekcji kierunku ruchu nie będzie działał poprawnie.

7. Budowa robota OMP2024_2

Na podstawie danych, opisanych w rozdz. 5, uzyskanych dzięki badaniom robota OMP2024_1 oraz dzięki wynikom badań zebranych na stanowisko do pomiaru rolek tocznych, opisanych w rozdz. 6, rozpoczęto prace nad projektem oraz budową docelowego demonstratora robota omnigąsienicowego OMP2024_2. Pojazd ten zaprojektowano w taki sposób, aby wyeliminować błędy wykryte w jego pierwszej wersji. OMP2024_2 to pojazd o znacznie większej masie i wymiarach, wykorzystujący inny typ układów bieżnych.

7.1 Metoda projektowania pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach całkowicie zachodzących

Projektowanie pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach całkowicie zachodzących należy rozpocząć od przyjęcia założeń dotyczących gabarytów oraz masy. Informacje te są niezbędne, aby wybrać rodzaj układu bieżnego, jaki należy zastosować w projektowanym pojeździe. Niewielki robot o małej masie (do kilku kg) może zostać wykonany w oparciu o uproszczone układy bieżne, złożone wyłącznie z kół napędowych i kół napinających (rozd. 4, rys. 4.1a). Takie rozwiązanie zminimalizuje ilość komponentów potrzebnych do wykonania układu bieżnego. Pozwoli to zaoszczędzić miejsce w korpusie robota, a także nie będzie stanowiło dodatkowego obciążenia. Wadą tego rozwiązania jest bardzo mała sztywność gąsienic, co przekłada się na niekorzystny rozkład nacisku pojazdu na podłoże. Roboty o większych gabarytach i większej masie powinny być wykonywane w oparciu o układy bieżne z dodatkowymi kołami jezdnyymi. Dzięki temu ciężar robota będzie równomiernie przenoszony na podłoże, co korzystnie wpłynie na zdolność do pokonywania przeszkód terenowych. Wybór podwozia, w którym koło napinające i napędowe pełnią rolę dodatkowych kół jezdnych (rozd. 4, rys. 4.1b) może być podyktowany koniecznością minimalizacji obciążenia, bądź przeciwdziałania dodatkowego skomplikowania układu bieżnego. Rozwiązanie to umożliwia zmaksymalizowanie ilości punktów styku podwozia z gąsienicą, bez konieczności nadmiernego zwiększania masy pojazdu. Wadą tego rozwiązania jest niewielka zdolność pojazdu do pokonywania przeszkód terenowych. Kąt, pod jakim gąsienica będzie stykała się z przeszkodami terenowymi wynika wprost z promienia koła, które gąsienica opasa, czego skutkiem jest niska zdolność do pokonywania przeszkód terenowych podczas ruchu z większą prędkością. Oznacza to, że pojazdy wyposażone w takie układy bieżne powinny być stosowane raczej do mechanizmów wolnobieżnych, stosowanych w zadaniach nie wymagających wykonywania gwałtownych manewrów z dużymi, zmiennymi prędkościami. Jeśli jednak projektowany pojazd musi być zdolny do wykonywania takich ruchów, konieczne będzie zastosowanie typowego podwozia opartego o koła jezdne, oraz koła napędowe i napinające nie stykające się z podłożem (rozd. 4, rys. 4.1c). Takie rozwiązanie zapewnia najlepsze właściwości

jezdne, jednak za cenę największego skomplikowania mechanizmu i największej masy całego układu bieżnego.

Kolejnym krokiem jest wybór kształtu i gabarytów rolek tocznych. Badania opisane w rozdz. 6 wykazały, że rozkład sił pomiędzy podłożem a rolką toczną zorientowaną pod kątem $\alpha = 45^\circ$ jest równomierny względem osi wzdłużnej i poprzecznej. Oznacza to, że taki kąt orientacji rolki zapewni najlepszą równomierną przyczepność podczas wszystkich rodzajów ruchu. Kształt rolki tocznej również wpływa na własności jezdne pojazdu. Najlepszą przyczepnością charakteryzują się baryłkowate rolki określone w rozdz. 6 jako rolka mecanum typu D. Rolki te mają kształt baryłek. Ich powierzchnia boczna może być opisana jako wycinek okręgu. Ich kształt wpłynie również na minimalizację drgań korpusu pojazdu podczas ruchu (rozd. 6, rys. 6.12). Wadą tego wyboru jest zwiększenie wymaganego momentu napędowego jaki należy zapewnić, aby pojazd omnigąsienicowy mógł zastosować korektę kierunku ruchu, bądź też wykonać obrót w miejscu. Alternatywą dla rolki baryłkowej typu D jest wykorzystanie prostych rolek walcowych, opisany w rozdz. 6 jako rolka typu A, które zapewniają najslabszą przyczepność pomiędzy rolą a podłożem, co również wykazano w rozdz. 6. Zastosowanie ich wpłynie negatywnie na własności jezdne całego pojazdu, może doprowadzić do poślizgów gąsienicy oraz problemów z utrzymaniem kierunku ruchu podczas ruchów omnikierunkowych. Pomimo tego, w pewnych specyficznych zastosowaniach, ich użycie może być uzasadnione. Przykładem może być tutaj konstrukcja pojazdu dysponującego bardzo ograniczonym zapasem momentu napędowego, bądź użycie pojazdu w warunkach umożliwiających wykorzystanie dodatkowego, zewnętrznego systemu pozycjonowania, który umożliwi bieżącą kompensację poślizgów, powstałych na skutek niewielkiej przyczepności pojazdu.

Liczba rolek tocznych oraz ogni w gąsienicy jest ściśle związana z zakładaną masą pojazdu oraz przyjętymi wymiarami. Pojazd omnigąsienicowy składa się z czterech układów bieżnych. Należy zatem brać pod uwagę, że pojedynczy układ bieżny musi być w stanie przenieść minimum $\frac{1}{4}$ zakładanej masy maksymalnej robota. W zależności od konstrukcji i geometrii wybranego układu bieżnego, z podłożem w danej chwili ma kontakt od około $\frac{1}{5}$ do około $\frac{1}{3}$ wszystkich ogni wchodzących w skład pojedynczej gąsienicy. Pojedyncze ogniwo gąsienicy może zostać wyposażone w jedną bądź kilka rolek tocznych. Im więcej ogni wchodzi w skład gąsienicy, tym mniejszym drganiom pionowym będzie poddawany pojazd podczas ruchu. Pojedyncze ogniwo gąsienicy może zostać wyposażone w jedną bądź kilka rolek tocznych. W efekcie, ilość rolek tocznych związana jest ilością ogni w gąsienicy i musi zostać dobrana w taki sposób, aby stykające się z podłożem ogniwa były w stanie przenieść obciążenie całego pojazdu.

Ilość dodatkowych kół jezdnych wynika z długości zastosowanych ogni. Jeśli pomiędzy dwoma punktami styku pomiędzy kołami a gąsienicą znajdzie się więcej niż jedno nieobciążone ogniwo układ bieżny będzie gorzej przenosił obciążenie pojazdu na podłoże. Dzieje się tak dlatego, że gąsienica segmentowa, w przeciwieństwie do gąsienicy elastomerowej nie jest przez cały czas naprężona w jednakowy sposób. Długość ogni ma bezpośredni wpływ na chwilowe naprężenie gąsienicy, które zmienia się w trakcie obrotu koła napędowego i napinającego. Gdyby gąsienica była naprężona w maksymalny możliwy sposób, w trakcie obrotu koła napędowego doszłoby do jej rozerwania. Efekt ten może zostać częściowo wyeliminowany przez zastosowanie koła napinającego o zmiennym położeniu, na przykład opartego o naciąg sprężynowy, jednak wtedy należałoby dobrać sprężyny odpowiedniej sztywności w odniesieniu do masy całego pojazdu.

Dobór układu napędowego najprościej wykonać metodą empiryczną. Aby poznać wewnętrzne opory ruchu należy zmierzyć siłę potrzebną do przeciągnięcia pojazdu omnigąsienicowego wzdłuż jego osi głównej oraz osi poprzecznej. Na tej podstawie, po uwzględnieniu promienia koła napędowego oraz ewentualnych przekładni można obliczyć minimalny moment napędowy jakim musi charakteryzować się napęd, aby umożliwić ruch pojazdu.

Pojazdy omnigąsienicowe obarczone są wadą w postaci zakrzywiania kierunku toru jazdy podczas ruchu omnikierunkowego. Opisany w rozdz. 5 algorytm korygujący zakrzywienie trajektorii ruchu wymaga zróżnicowania prędkości liniowych poszczególnych gąsienic, co w efekcie prowadzi do konieczności pokonania dodatkowych sił oporu pomiędzy podłożem a rolkami. Uwzględniając kształt rolek tocznych, ich ilość oraz masę pojazdu na podstawie danych zawartych w rozdz. 6 można wyliczyć moment napędowy niezbędny do pokonania oporów ruchu występujących podczas wymuszonego ruchu korpusu pod różnymi kątami do osi swobodnej rolki tocznej. Będą to wartości maksymalne, zakładające unieruchomienie korpusu i próbę wymuszenia ruchu. W rzeczywistych warunkach tak duży zapas momentu nie jest niezbędny. Przyjęto, że w typowych zastosowaniach pojazdu zapewnienie 50 % tej wartości wystarczy, aby poprawnie korygować kierunek jazdy.

Układ sterowania stanowi ostatni element metody projektowania pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach całkowicie zachodzących. Wyznaczenie parametrów sterowania z opracowanych równań kinematyki dla omawianego typu podwozia na podstawie równań (3.9) i (3.10), jak również nadzór nad czterema niezależnymi napędami nie wymagają dużej mocy obliczeniowej. Jako podstawowa jednostka sterująca sprawdzi się większość dostępnych na rynku mikrokontrolerów. Do prawidłowego działania układu sterowania niezbędne są sensory, które umożliwią odczyt kąta obrotu w czasie poszczególnych kół napędowych, co pozwoli na wyliczenie prędkości liniowej gąsienicy. Jeśli pojazd będzie sterowany przez operatora, lub jeśli pojazd będzie poruszał się tylko po jednym, z góry zdefiniowanym typie podłoża dodatkowe sensory nie są konieczne. W takim przypadku zjawisko zakrzywienia trajektorii ruchu, opisane w rozdz. 6, może być na bieżąco kompensowane przez operatora za pomocą zmiany sposobu sterowania, bądź korygowane za pomocą modułu statycznej korekcji kierunku na podstawie wartości wyliczonych z równań (5.7) i (5.8). Jeśli jednak pojazd ma być wykorzystywany jako robot autonomiczny, poruszający się po więcej niż jednym typie podłoża konieczne może być użycie dodatkowych sensorów. Aby zachować zadany kierunek trajektorii ruchu należy wyposażony projektowany pojazd w dostęp do informacji o jego rzeczywistej orientacji kątowej. W zależności do zastosowania, można do tego celu użyć urządzeń zamocowanych na pojeździe, takich jak czujnik orientacji typu IMU bądź system wizyjny wyznaczający rzeczywistą pozycję na podstawie nieruchomych punktów referencyjnych znajdujących się w środowisku, w którym operuje robot. Możliwe jest również wykorzystanie zewnętrznych systemów pomiarowych, znajdujących się poza korpusem robota, na przykład dodatkowego, nieruchomego systemu wizyjnego, który na podstawie obrazu z kamery estymuje pozycję i kąt φ orientacji robota.

7.2 Założenia konstrukcyjne

Przyjęto, że maksymalne wymiary projektowanego robota wynosiły 1,2 m x 1,2 m. Wymiar ten odpowiada minimalnej szerokości ciągów komunikacyjnych w budynkach [i47]. Przyjęto maksymalny dopuszczalny nacisk na pojedynczą rolkę toczną mniejszy niż 3 kg. Przy takim obciążeniu przebadane rolki toczne nie ulegały znaczącym odkształceniom, zachowując swój baryłkowaty kształt. Aby możliwe było zastosowanie rolek o gabarytach zbliżonych do tych, które przebadano w rozdz. 6, pojedyncze ogniwo gąsienicy powinno mieć długość minimum 0,11 m. Uwzględniając przestrzeń konieczną do montażu układu napinania gąsienicy, a także kształt kół napędzających oraz napinających wyznaczono, że w trakcie ruchu pojazd będzie miał kontakt z podłożem za pośrednictwem minimum 6 ogniw. Oznacza to, że przy założeniu równomiernego obciążenia pojazdu, pojedynczy układ bieżny nie powinien przenosić obciążenia większego niż 18 kg. Masa całkowita m_R robota złożonego z czterech układów bieżnych nie może przekraczać 72 kg. Ze względu na masę i gabaryty pojazdu zastosowano układ gąsienicowy z dodatkowymi kołami jezdny. Ze względów konstrukcyjnych zastosowano układ trzech amortyzowanych kół jezdnych. Przyjęte założenia konstrukcyjne zebrano tab. 7.1. Minimalna prędkość liniowa punktu R na korpusie k pojazdu to $v_R = 0,2$ m/s, co uznawane jest za prędkość bezpieczną dla platform autonomicznych operujących w bezpośrednim otoczeniu ludzi [104]. Zastosowano czujnik położenia IMU, którego sprzężenie

z układem sterowania zapewniło kontrolę nad rzeczywistym kierunkiem ruchu pojazdu. Aby OMP2024_2 mógł pełnić funkcje robota inspekcyjnego, dodatkowo wyposażono go w lidar oraz kamerę.

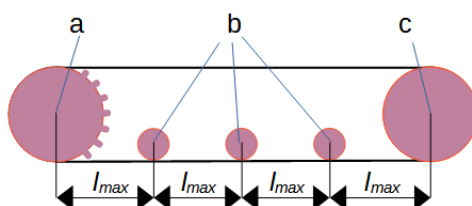
Tab. 7.1. Podstawowe założenia konstrukcyjne pojazdu OMP2024_2

Masa maksymalna m_R	72 kg
Podstawowa metoda wykonania	FDM / profile aluminiowe szybkiego montażu
Wymiar maksymalny (długość x szerokość)	1,2 m x 1,2 m
Układ gąsienic	Całkowicie zachodzące
Sterowanie	Przewodowe
Kąt orientacji rolki α	45°
Prędkość liniowa korpusu v_R	0,2 m/s
Minimalna długość ogniwa	0,11 m

Układy bieżne pojazdu wykonano głównie w technologii przyrostowej fused deposition modeling (FDM). Koła napędowe i napinające, segmenty gąsienic, rolki toczne, a także wózki jezdne wykonano z tworzywa sztucznego. Do konstrukcji ramy pojazdu wykorzystano aluminiowe profile szybkiego montażu.

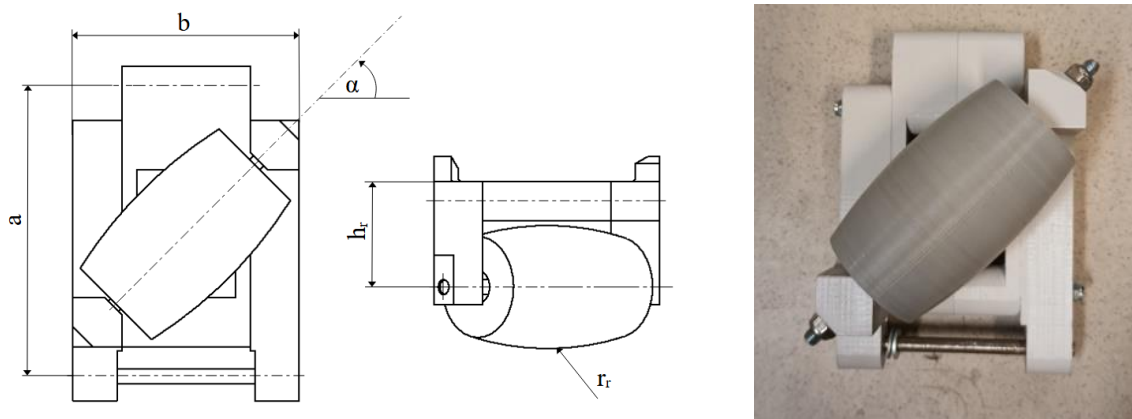
7.3 Konstrukcja mechaniczna robota

Układy bieżne oparte wyłącznie o koło napędowe i napinające, wykorzystane przy budowie demonstratora OMP2024_1 były najmniej skomplikowane pod względem konstrukcyjnym i akceptowalne w przypadku małych i lekkich robotów. W przypadku robota OMP2024_2, zastosowano układy bieżne wyposażone w dodatkowe rolki jezdne. Rozwiązanie to było konieczne, ponieważ wykonana w technologii FDM gąsienica nie może być napięta tak mocno, jak typowa, stalowa gąsienica segmentowa. Oznacza to, że aby gąsienica poprawnie przenosiła obciążenie pojazdu na podłoże niezbędne jest zastosowanie dodatkowych kół jezdnych. Schemat jednego układu bieżnego omawianego typu podwozia przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Schemat pojedynczego układu bieżnego wykorzystany przy projektowaniu demonstratora: a) koło napędowe, b) koła jezdne, c) koło napinające

Następnie zaprojektowano gaśnicę segmentową wyposażoną w swobodne rolki toczne. Gaśnica składa się z 19 ogni. Na każdym ogniu przewidziano pojedynczą rolkę toczną usytuowaną pod kątem $\alpha = 45^\circ$. Dla przyjętych wymiarów, podczas ruchu po płaskiej powierzchni w dowolnej chwili minimum 6 rolek jednej gaśnicy ma kontakt z podłożem. Wymiary zaprojektowanego ogniwa przedstawiono w tab. 7.2, natomiast na rys. 7.2 przedstawiono rysunek techniczny oraz widok rzeczywistego ogniwa wraz z rolką toczną. Na podstawie badań opisanych w rozdz. 6 wybrano baryłkowaty kształt swobodnych rolek tocznych. Ze względu na specyficzny kształt wykonano je metodą FDM z TPU o twardości 40D. Widok pojedynczej rolki tocznej zamocowanej na fragmencie gaśnicy przedstawiono na rys. 7.3.



Rys. 7.2. Rysunek ogniwa gaśnicy z baryłkowatą rolką toczną oraz widok rzeczywistego ogniwa

Tab. 7.2. Wymiary zaprojektowanego ogniwa

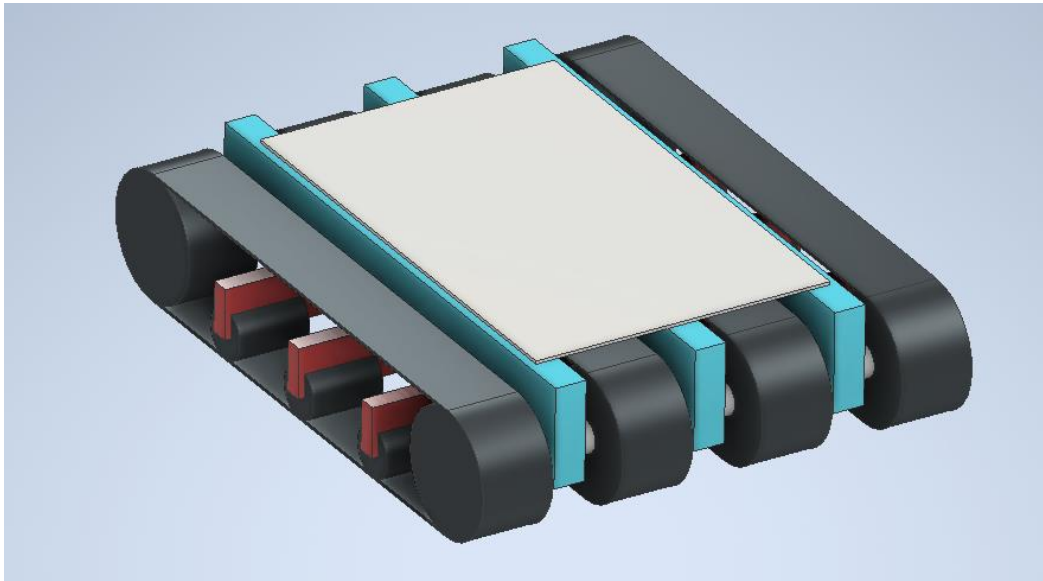
Długość ogniwa a	118 mm
Szerokość ogniwa b	92 mm
Kąt orientacji rolki α	45°
Odległość pomiędzy płaszczyzną ogniwa a osią rolki h_r	35 mm
Promień rolki r_r	41-50 mm



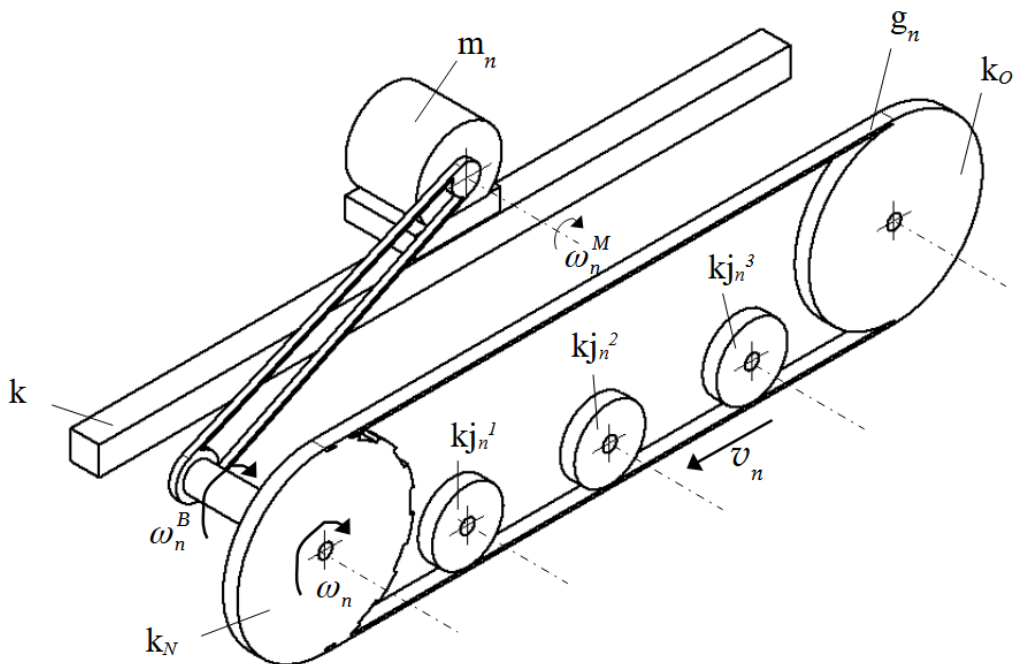
Rys. 7.3. Widok pojedynczej baryłkowatej swobodnej rolki tocznej

Robot OMP2024_2 składa się z korpusu k oraz czterech układów bieżnych b_n , w skład których wchodzi gaśnica g_n oraz napędy m_n , $n = 1, \dots, 4$. Poszczególne układy bieżne są takie same.

Na rys. 7.4 przedstawiono bryłowy model koncepcyjny pojazdu OMP2024_2. Na rys. 7.5 przedstawiono schemat kinematyczny pojedynczego układu bieżnego.

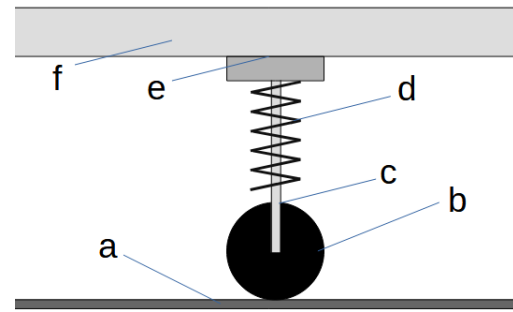
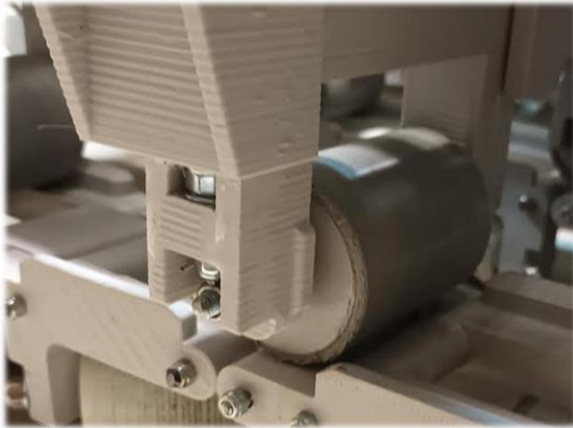


Rys 7.4. Widok bryłowego modelu koncepcyjnego robota OMP2024_2



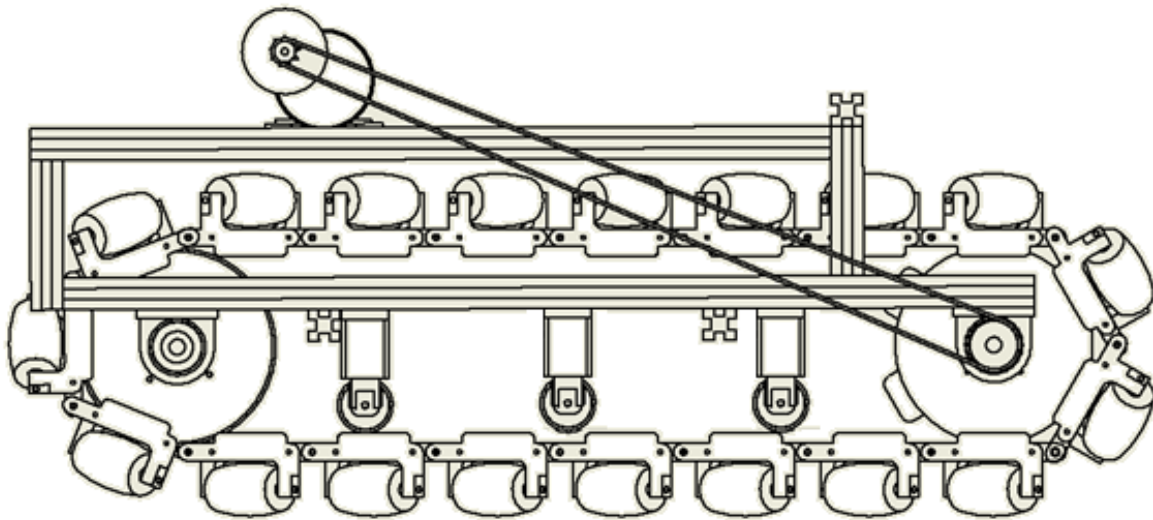
Rys. 7.5. Schemat kinematyczny pojedynczego układu bieżnego pojazdu omnigąsienicowego OMP2024_2

Pojedynczy układ bieżny składa się z korpusu k , napędu m_n , koła napędowego k_N , koła napinającego k_o , i trzech kół jezdnych k_{jn}^1 , k_{jn}^2 , k_{jn}^3 . Każde z kół jezdnych posiada niezależne zawieszenie, co umożliwia skuteczny docisk gąsienicy do podłoża. Docisk realizowany jest za pomocą sprężyn i prowadnic liniowych. Widok pojedynczego koła jezdnego z układem zawieszenia przedstawiono na rys 7.6.



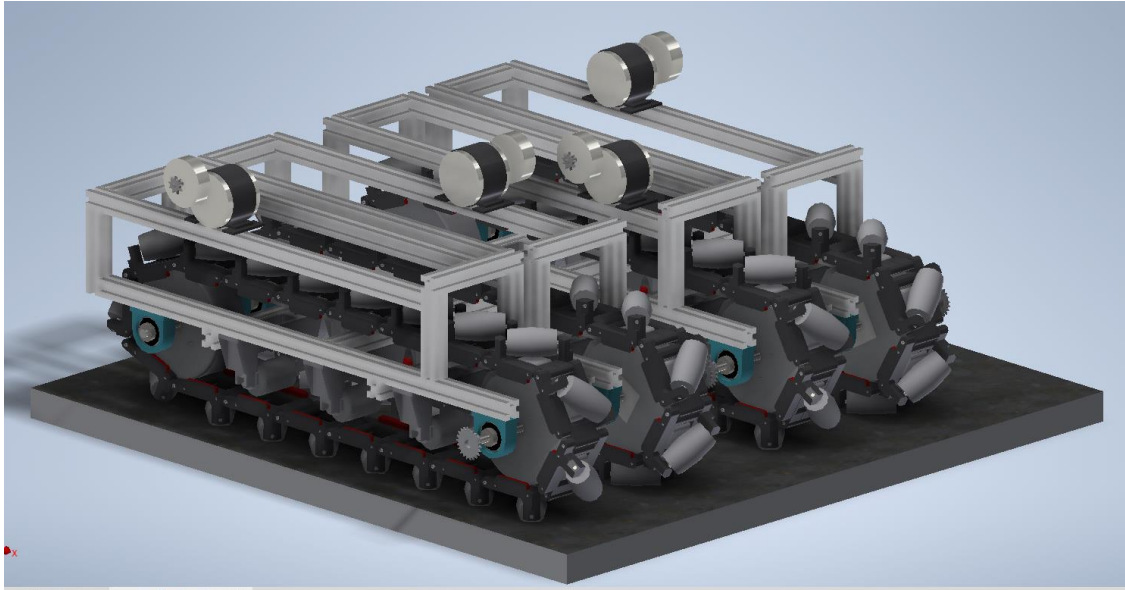
Rys. 7.6. Widok pojedynczego koła jezdnego k_j wraz z układem zawieszenia: a) gąsienica, b) koło jezdne, c) prowadzenie sprężyny, d) docisk sprężynowy, e) mocowanie koła jezdnego, f) rama OMP2024_2

Koło napędowe połączone jest z napędem za pomocą przekładni łańcuchowej. Aby umożliwić sterowanie pojazdem przy niewielkich prędkościach zastosowano przekładnię redukującą o przełożeniu $i_{MBn} = 9:16$. Napędy umieszczono na korpusie robota. Ze względów konstrukcyjnych w różnych układach bieżnych napędy umieszczone są w różnych miejscach w taki sposób, aby równomiernie obciążać pojazd. Widok pojedynczego układu bieżnego b_n przedstawiono na rys. 7.7.

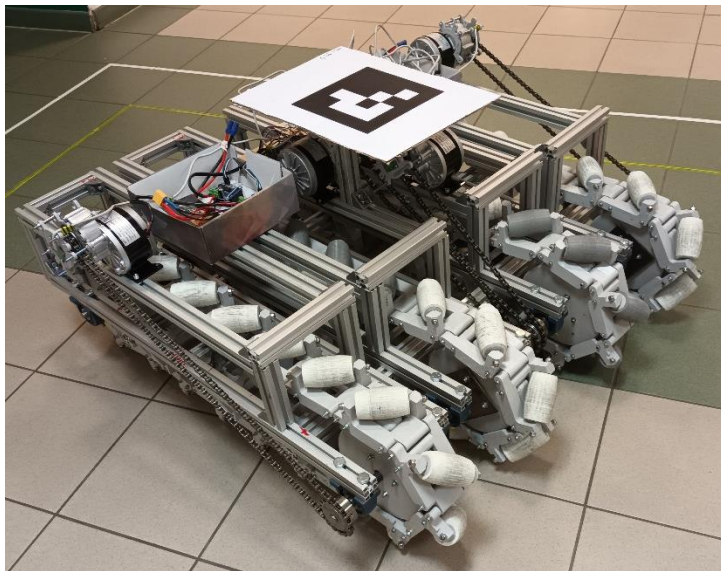


Rys. 7.7. Widok pojedynczego układu bieżnego pojazdu OMP2024_2

Model bryłowy zaprojektowanego pojazdu przedstawiono na rys. 7.8. Pojazd składa się z czterech układów bieżnych b_n , $n = 1, \dots, 4$ oraz korpusu k . Rolki w poszczególnych gąsienicach g_n , wchodzących w skład układów bieżnych b_n ułożone są naprzemiennie. W gąsienicach g_1 oraz g_3 zamocowane są pod kątem $\alpha = 45^\circ$, natomiast w gąsienicach g_2 oraz g_4 pod kątem $\alpha = 135^\circ$. Na rys. 7.9 przedstawiono widok ukończonego robota. Na montaż układów elektronicznych, zasilania, napędów oraz czujników przeznaczona jest przestrzeń znajdująca się nad układami bieżnymi.



Rys. 7.8. Widok modelu bryłowego projektowanego robota OMP2024_2



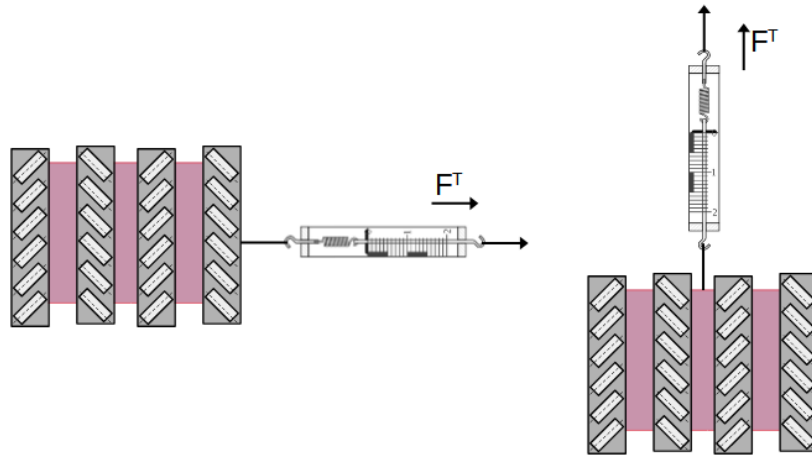
Rys. 7.9. Widok ukończonego pojazdu OMP2024_2 z zamocowanym układem sterowania oraz znacznikiem ArUco

7.4 Układ napędowy robota

Na podstawie wzoru (4.1) i przyjętych wartości $v_n = 0,2$ m/s, $r_n^{KN} = 0,22$ m oraz $i_{MBn} = 9:16$ prędkość kątowna ω_n^M napędu n wynosi:

$$\omega_n^M \geq 1,6 \text{ rad/s.}$$

Następnie za pomocą badań empirycznych wyznaczono rzeczywiste opory ruchu pojazdu omnigąsienicowego. Podobnie jak w przypadku badań robota OMP2024_1 opisanych w rozdz. 4, badania polegały na przeciągnięciu gotowego demonstratora po płaskiej powierzchni, mierząc siłę dynamometrem zarówno wzdłuż osi głównej robota, jak i poprzecznie do niej (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Schemat empirycznego badania oporów ruchu pojazdu OMP2024_2

Wykazano, że maksymalne opory wewnętrzne, generowane podczas ruchu poprzecznego do osi głównej robota, wynosiły $F^T = 158$ N. Zakłada się, że przekładnie w każdym z układów bieżnych robota OMP2024_2 są takie same. Oznacza to, że użyte napędy będą musiały zapewnić moment obrotowy M^M większy bądź równy wartości obliczonej ze wzoru (4.2). Wyliczenia te pozwoliły uzyskać minimalny moment napędowy, jakim powinny charakteryzować się napędy wykorzystane w projektowanym pojeździe. Dla wartości $F^T = 158$ N, $r^{KN} = 0,22$ m oraz $i_{MBn} = 9:16$ wartość momentu M^M powinna być większa od wartości:

$$M^M \geq 4,9 \text{ Nm.}$$

Oznacza to, że pojazd OMP2024_2 do przemieszczania się typowym ruchem omnikierunkowym, w którym prędkości gąsienic w obydwu modułach są takie same wymaga minimum 1,05 Nm. Należy jednak pamiętać, że aby wprowadzić korektę dynamiczną kierunku jazdy potrzebny jest dodatkowy zapas momentu, który umożliwi różnicowanie prędkości poszczególnych gąsienic.

Na podstawie badań zawartych w rozdz. 6 przeprowadzono dodatkowe rozważania dotyczące wartości momentu korekcji M^K , który napędy muszą zapewnić, aby umożliwić wykonanie najbardziej niekorzystnego ruchu gąsienic. Sytuacja ta ma miejsce gdy gąsienice poruszają się, ale korpus robota jest zewnętrznie unieruchomiony. Na podstawie wartości momentu korekcji M^K oraz momentu minimalnego M^M zdefiniowano moment całkowity M^C :

$$M^M + M^K = M^C \quad (7.1)$$

Gdzie:

M^M – minimalny moment obrotowy pojedynczego napędu m_n konieczny do pokonania wewnętrznych oporów ruchu,

M^K – moment obrotowy pojedynczego napędu m_n konieczny wykonania ruchu korygującego kierunek jazdy w najgorszym rozpatrywanym przypadku,

M^C – całkowity moment obrotowy jakim powinien charakteryzować się pojedynczy napęd m_n , aby umożliwić wykonanie dowolnego zadanego ruchu z uwzględnieniem oporów wewnętrznych mechanizmu.

Niniejsze rozważania mają na celu ustalenie wartości M^K dla pojazdu OMP2024_2. Maksymalna zakładana masa m_r OMP2024_2 to 72 kg, zatem pojedyncza gąsienica przenosi 18 kg obciążenia.

Przy założonej długości ogniwa równej $a = 118$ mm, uwzględniając maksymalne wymiary OMP2024_2 można stwierdzić, że pojedyncza gąsienica może stykać się z podłożem 6 (przypadek a)) bądź 7 (przypadek b)) rolkami. Oznacza to, że w danym momencie z podłożem styczność może mieć: a) 6 rolek, z których każda przenosi 3 kg, lub b) 7 rolek, z których każda przenosi 2,6 kg.

Jak wykazały badania, wzrost oporów ruchu jest wprost proporcjonalny do obciążania przenoszonego przez rolkę. Ekstrapolując dane uzyskane podczas pomiaru oporów ruchu pomiędzy podłożem a rolką obciążoną różnymi masami m_i (tab. 6.1, rys. 6.7 i 6.8.) ogniwo gąsienicy z pojedynczą rolką walcową, zorientowaną pod kątem $\alpha = 45^\circ$ poruszające się po płycie OSB wzdłuż swojej osi wzdłużnej, przy całkowitym braku ruchu w osi poprzecznej, będzie generowało opór ruchu wynoszący około a) 10 N oraz b) 8,7 N.

Jak wykazały badania dotyczące wpływu kształtu rolki na opory ruchu podczas interakcji rolki tocznej z podłożem (tab. 6.2) rolka typu D (Mecanum) ma o około 1,6 razy większe opory ruchu od rolki walcowej. Oznacza to, że w rozpatrywanym przypadku do poruszenia pojedynczą gąsienicą, złożoną z a) 6 lub b) 7 segmentów konieczne będzie przyłożenie siły równej a) 96 N lub b) 98 N.

Uwzględniając przekładnię o przełożeniu 16:9, która jest elementem układu napędowego OMP2024_2, napęd powinien zapewniać moment obrotowy wynoszący minimum:

$$M^K \geq 12 \text{ Nm.}$$

Uwzględniając minimalny moment napędowy M^M , konieczny do pokonania wewnętrznych oporów ruchu, oraz moment korekcji M^K , OMP2024_2 będzie mógłby poruszać wszystkimi gąsienicami w dowolny sposób mając unieruchomiony korpus dopiero przy zapewnieniu momentu całkowitego M^C wynoszącego:

$$M^C \geq 16,9 \text{ Nm.}$$

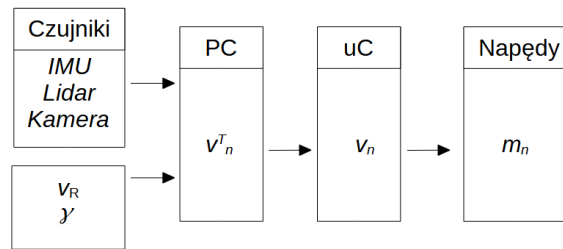
W rzeczywistych warunkach nie będzie dochodzić do takich sytuacji. Korekta kierunku zakłada dostosowywanie rzeczywistej trajektorii do zadanej, a nie poruszanie gąsienicami w miejscu, dlatego też rzeczywiste wymagane wartości momentu obrotowego napędów będą znacznie mniejsze. Do napędu robota wybrano silniki marki Magma o mocy znamionowej 200W. o maksymalnej prędkości kątowej $\omega_n = 38$ rad/s i momencie napędowym $M_n = 7$ Nm.

Na każdym z napędów zamontowano enkoder AS5040 o rozdzielczości 512 impulsów na obrót, który przy zastosowanej przekładni redukującej o przełożeniu $i_{MBn} = 16:9$ pozwalał na uzyskanie teoretycznej rozdzielczości pomiaru ruchu liniowego gąsienicy wynoszącej poniżej 1 mm.

7.5 Układ sterowania robota

W robocie zastosowano układ sterowania, umożliwiający kontrolę nad kierunkiem i prędkością ruchu OMP2024_2. Schemat blokowy układu sterowania przedstawiono na rys. 7.11. Jako dane wejściowe do układu sterowania wysyłany jest zadany kąt orientacji korpusu γ oraz zadana wartość wektora prędkości korpusu v_R . Układ po stronie komputera PC przelicza te wartości na zadane prędkości liniowe gąsienic \dot{q}_n^T zgodnie ze wzorami (3.9) i (3.10), przy ewentualnym uwzględnieniu aktualnego kąta orientacji korpusu γ z dodatkowych czujników. Następnie układ regulatorów PID, poprzez

regulację prędkości \dot{q}_n poszczególnych napędów gąsienic g_n za pomocą sygnału PWM ma za zadanie utrzymanie zadanych prędkości liniowych gąsienic \dot{q}_n równych \dot{q}_n^T poprzez sterowanie napędami m_n .

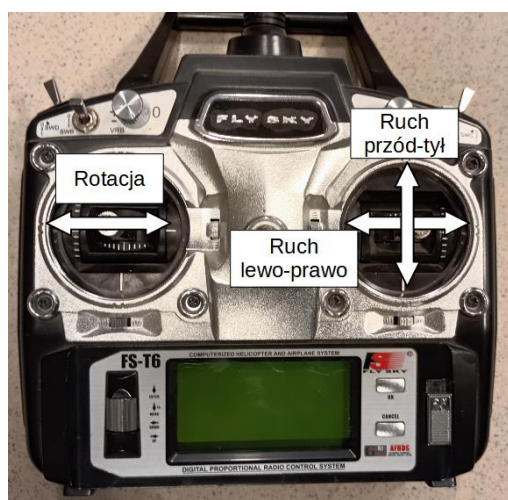


Rys. 7.11. Ogólny schemat blokowy programu sterującego robota OMP2024_2

Ze względu na konieczność przetworzenia dużej liczby danych, sterowanie oparto o dwie jednostki obliczeniowe. Pierwsza z nich to komputer PC, który odpowiada za przetwarzanie danych z sensorów oraz wyliczanie wartości sterujących. Druga to mikrokontroler ATmega2560 odpowiedzialny za sterowanie silnikami zgodnie z otrzymanymi wartościami. Układ sterowania przystosowany jest do pobierania dodatkowych danych dotyczących orientacji kątowej φ pojazdu. Dane te mogą pochodzić z zamocowanych na pojeździe dodatkowych czujników: NGIMU, kamery RGB bądź czujnika RPLidar. Każdy z tych sensorów jest w stanie dostarczać informacje o zmianie aktualnej orientacji kątowej $\Delta\varphi$ pojazdu w trakcie ruchu. Dane te mogą zostać wykorzystane przez algorytm aktywnej korekcji kierunku jazdy.

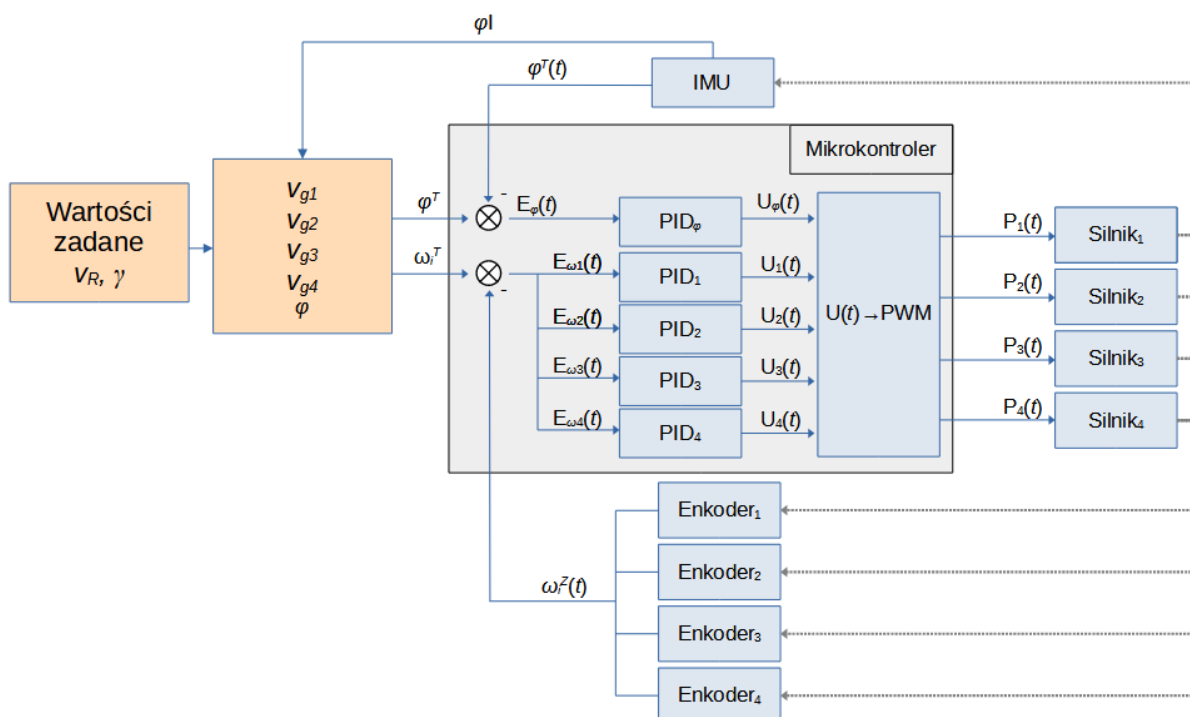
Robot może być sterowany zarówno przez operatora, za przy użyciu zadajnika prędkości (aparatury RC, rys. 7.12), jak również za pomocą komend sterujących, wprowadzanych bezpośrednio do komputera sterującego robota.

W przypadku sterowania za pomocą aparatury RC ruch w kierunkach innych niż wzdłużny i poprzeczny uzyskuje się poprzez proporcjonalne wychylenie drążka w kierunkach pośrednich. Dodatkowo, z poziomu aparatury możliwe jest obracanie korpusu OMP2024_2, poprzez zróżnicowanie prędkości całych modułów gąsienic. OMP2024_2 obraca się wtedy w miejscu jak typowy pojazd gąsienicowy. Sterowanie za pomocą takiego zadajnika prędkości służy jedynie do zgrubnego ustawienia pozycji robota. Dokładne wartości sterujące mogą być zadawane za pośrednictwem komputera PC. Umożliwia on dokładną kontrolę nad wartością zadawanego kąta γ i prędkości jazdy v_R .



Rys. 7.12. Widok zadajnika prędkości (aparatury RC) pojazdu OMP2024_2

Szczegółowy schemat działania układu sterowania przedstawiono na rys. 7.13. Prędkość v_R to zadana prędkość punktu R znajdującego się na korpusie robota. Kąt γ to zadana orientacja kierunku wektora prędkości punktu R. Parametr φI to informacja o orientacji kątowej pojazdu w chwili startu, czyli kąt φ w chwili startu. Zmienna ta zostaje przekazana jednokrotnie, przed rozpoczęciem ruchu. Parametr φ^T to zapamiętana początkowa orientacja kątowa. Prędkości ω_i^T to zadane wartości prędkości kątowej poszczególnych napędów, E_φ oraz $E\omega_i$ to różnica pomiędzy rzeczywistymi i oczekiwanymi wartościami orientacji kątowej pojazdu oraz prędkości kątowej poszczególnych napędów. Sygnały sterujące oznaczono jako $U(t)$. Zmienna U_φ jest sygnałem sterującym wynikającym z utrzymywania orientacji kątowej, natomiast $U\omega_i$ to sygnał sterujący odpowiadający za utrzymanie prędkości liniowej poszczególnych napędów. Zmienna P_i to wartość sygnału PWM, który trafia na poszczególne napędy. Zmienna $\varphi^Z(t)$ to rzeczywista wartość aktualnej orientacji kątowej zmierzona za pomocą czujnika IMU, a $\omega^Z(t)$ to zmieniająca się w czasie wartość prędkości kątowej napędów wyznaczona na podstawie wskazań enkoderów. Linie przerywane na schemacie oznaczają powiązanie mechaniczne pomiędzy elementami, natomiast linie ciągłe – sygnały elektryczne.



Rys. 7.13. Schemat przepływu danych w układzie sterowania OMP2024_2

Zastosowanie dodatkowych czujników: NGIMU, kamery RGB oraz RPLidar (rys. 7.14) umożliwia znacznie dokładniejsze sterowanie pojazdem. Dzięki dodatkowej informacji o rzeczywistej orientacji kątowej pojazdu możliwe jest wprowadzanie poprawek prędkości poszczególnych gąsienic, które mają na celu kompensację błędu orientacji kątowej korpusu. Dodatkowo, czujniki te zapewniają informację o otoczeniu, co pozwala dostosować sterowanie, bądź podejmować decyzję o kierunku i prędkości jazdy w dynamicznie zmieniającym się środowisku.



Rys. 7.14. Czujniki pojazdu OMP2024_2: a) NGIMU, b) RPLidar, c) kamera RGB

Czujnik NGIMU zawiera akcelerometr, żyroskop i kompas w jednym urządzeniu. Dostarcza szereg informacji, między innymi o przyspieszeniu kątowym oraz aktualnej orientacji kątowej. Według noty katalogowej zapewnia dokładność pomiaru orientacji kątowej na poziomie poniżej 2° . Dane dostarczane przez ten czujnik posłużą do korygowania kierunku jazdy OMP2024_2.

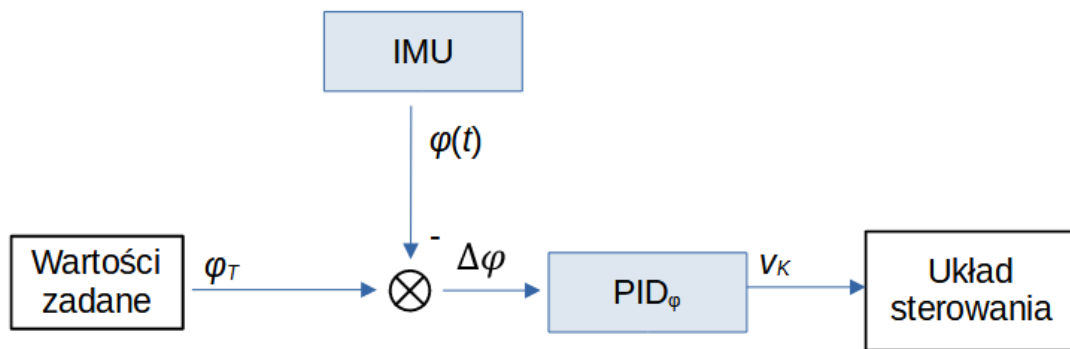
RPLidar jest czujnikiem odległości pracującym w zakresie światła podczerwonego. Jego głowica obraca się, dostarczając informację o przeszkodach znajdujących się w promieniu około 12 m od OMP2024_2, z dokładnością do 2,5 % uzyskanego wyniku. Na podstawie danych z tego czujnika pojazd będzie wykrywał przeszkody i wyznaczał preferowaną drogę ich ominięcia.

Kamera RGB dostarcza obraz, który następnie może zostać przeanalizowany pod kątem zmian położenia poszczególnych punktów charakterystycznych, bądź występowania konkretnych obiektów. W OMP2024_2 obraz z kamery posłuży do rozpoznawania sylwetek ludzkich podczas jazdy.

7.6 Aktywna kompensacja kierunku jazdy

Dzięki wyposażeniu OMP2024_2 w dodatkowe czujniki możliwe było zaimplementowanie modułu aktywnej kompensacji kierunku jazdy, który jest rozwinięciem modułu statycznej kompensacji kierunku jazdy, zaprezentowanego w rozdz. 5. Opisanie tam badania wykazały istnienie bardzo silnej tendencji pojazdów omnigąsienicowych o gąsienicach całkowicie zachodzących do zakrzywiania kierunku trajektorii ruchu względem toru zadanego, nawet podczas jazdy po równym i twardym podłożu. Podczas ruchu ze stałą orientacją korpusu kąt φ nie powinien ulegać zmianom. W rzeczywistości podczas ruchu kierunkowego wartość kąta φ ulega zmianie od momentu rozpoczęcia ruchu. Zaproponowany w rozdz. 5 algorytm korekcji statycznej umożliwia przeciwdziałanie niekorzystnemu zjawisku zakrzywiania trajektorii ruchu, w znaczący sposób poprawiając własności jezdne pojazdu w którym został zaimplementowany. Należy jednak nadmienić, że do poprawnego działania tego modułu wymagana jest wcześniejsza identyfikacja podłoża, po którym będzie poruszał się pojazd, aby wprowadzić do układu sterowania informacje o wartości współczynnika korekcji. Różne podłoża mają różne współczynniki korekcji. Jeśli trajektoria ruchu pojazdu będzie wyznaczona po kilku różnych rodzajach podłoża, algorytm nie będzie w stanie sam dopasować się do zmieniających się warunków. Gdy robot będzie wjeżdżał na inny rodzaj podłoża, za każdym razem konieczna będzie modyfikacja parametrów korekcji. Dodatkowo, algorytm ten zakłada idealne działanie układów bieżnych oraz całkowitą jednorodność w obrębie danego podłoża. Jeśli któryś z układów bieżnych straci chwilowo kontakt z podłożem, najedzie na nierówność bądź dojdzie do poślizgu pomiędzy podłożem a gąsienicą zaproponowany układ korekcji kierunku jazdy nie wychwyci tego zdarzenia. W efekcie układ nie zadziała prawidłowo, a pojazd nadal będzie poruszał się niezgodnie z zaplanowaną trajektoria.

Aby rozwiązać ten problem opracowano moduł dynamicznej korekcji kierunku jazdy. W tym celu pojazd OMP2024_2 został wyposażony w czujniki umożliwiające uzyskanie aktualnej orientacji kątowej φ korpusu. Dzięki tym danym w układzie sterowania wyliczana jest poprawka do wartości zadanych dla poszczególnych napędów, która wprowadzana jest przez układ sterowania. Schemat blokowy modułu korekcji dynamicznej przedstawiono na rys. 7.15.

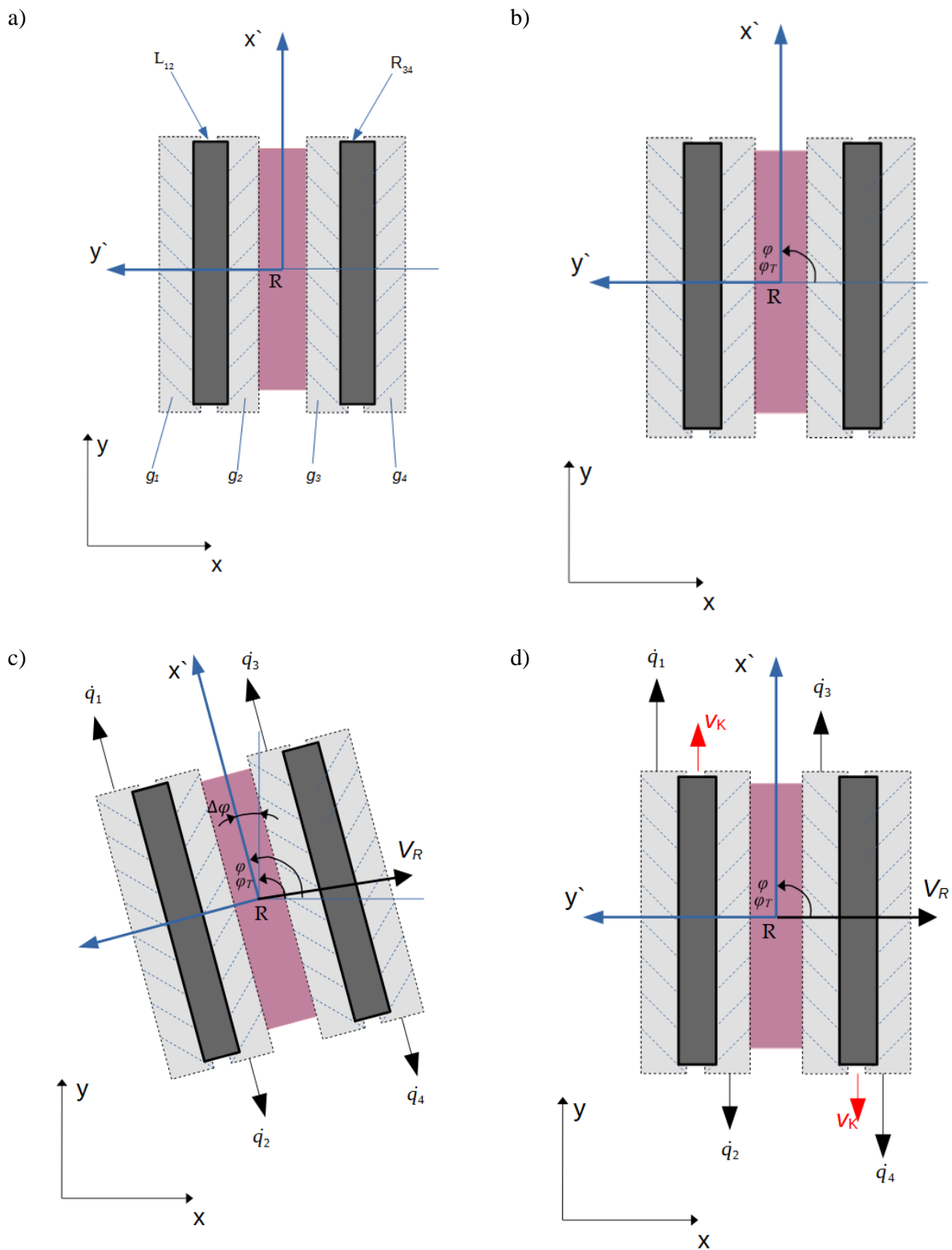


Rys. 7.15. Schemat blokowy działania modułu korekcji dynamicznej

Mechanizm działania modułu korekcji dynamicznej przedstawiono na rys. 7.16. W geometrycznym środku pojazdu omni-gąsienicowego znajduje się punkt R. Z punktem tym związany jest układ współrzędnych x^{\prime}, y^{\prime} którego oś x pokrywa się z osią główną pojazdu a). Korpus k pojazdu w chwili rozpoczęcia ruchu ma orientację kątową φ równą zadanej orientacji kątowej φ^T . Kąt $\Delta\varphi$ obliczony na podstawie wzoru (5.5) wynosi 0° b). Gdy w trakcie ruchu dojdzie do zmiany orientacji kątowej korpusu (na skutek poślizgu, działania sił zewnętrznych bądź wad konstrukcyjnych) wartość kąta φ ulegnie zmianie. To doprowadzi do zmiany wartości kąta $\Delta\varphi$ c). Informacja ta trafi do regulatora PID, który wyznaczy sygnał sterujący dla układu sterowania napędami. Wyznaczony sygnał sterujący określony jest tutaj jako v_K , czyli prędkość korekcji d). Na tej podstawie układ sterowania zmieni wartości prędkości liniowych poszczególnych gąsienic \dot{q}_n^T o prędkość korekcji v_K , aby zminimalizować wartość $\Delta\varphi$, która jest uchybem regulacji, co przedstawiono w zależnościach (7.2):

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_1 &= \dot{q}_1^T + v_K, \\
 \dot{q}_2 &= \dot{q}_2^T + v_K, \\
 \dot{q}_3 &= \dot{q}_3^T - v_K, \\
 \dot{q}_4 &= \dot{q}_4^T - v_K.
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

Dzięki temu, oprócz ruchu omnikierunkowego dodatkowo wymuszony zostanie ruch obrotowy korpusu. W efekcie orientacja kątowa korpusu φ będzie dążyć do wartości zadanej, równej φ^T . Nastawy współczynników regulacji regulatora PID zostały dobrane empirycznie. Ich wartości wynosiły: $K_p = 0.15$, $K_i = 0.15$, $K_d = 0.3$.



Rys. 7.16. Koncepcja działania korekty dynamicznej kierunku ruchu: a) przed rozpoczęciem ruchu, b) w chwili rozpoczęcia ruchu, c) po utracie orientacji kątowej φ , d) po odzyskaniu właściwego kąta φ

8. Badania robota OMP2024_2

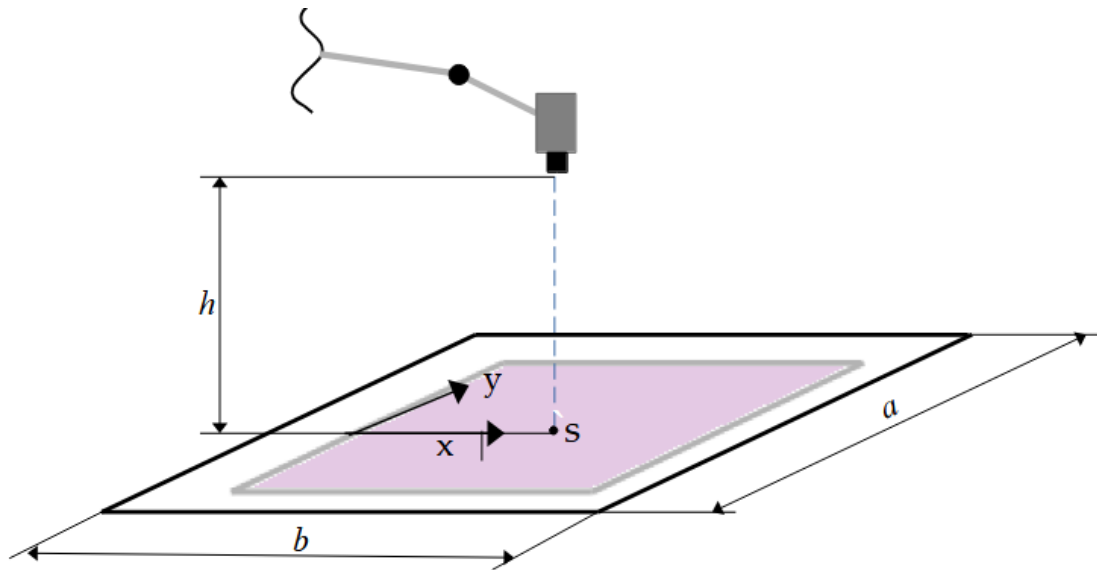
Pojazd OMP2024_2 opracowano, aby przeprowadzić badania nad dokładnością odtwarzania zadanej trajektorii μ^T przez pojazd omnigąsienicowy z gąsienicami całkowicie zachodzącymi. W niniejszym rozdziale opisane zostanie stanowisko pomiarowe oparte o system wizyjny na którym przeprowadzono badania, przedstawione zostaną wyniki badań jazdy OMP2024_2 po prostoliniowej trajektorii ze stałą orientacją kątową φ korpusu, dla różnych kierunków wektora prędkości γ po różnych nawierzchniach.

Badania podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap badań polegał na wykonaniu szeregu przejazdów testowych na stanowisku pomiarowym w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko wyposażone było w system wizyjny, umożliwiający rejestrację położenia i orientacji kątowej φ OMP2024_2 w czasie. Akwizycja obrazu możliwa była na całym obszarze roboczym stanowiska. Dane uzyskane podczas pierwszego etapu badań posłużyły do weryfikacji poprawności działania modułu korekcji dynamicznej przedstawionego w rozdz. 7.

Drugi etap badań zakładał testy w warunkach rzeczywistych. Badania wykonano na podłożu z kostki brukowej oraz na podłożu piaszczystym. Przejazdy te realizowane były na znacznie dłuższych dystansach, dlatego rejestrowano jedynie położenie początkowe oraz końcowe robota.

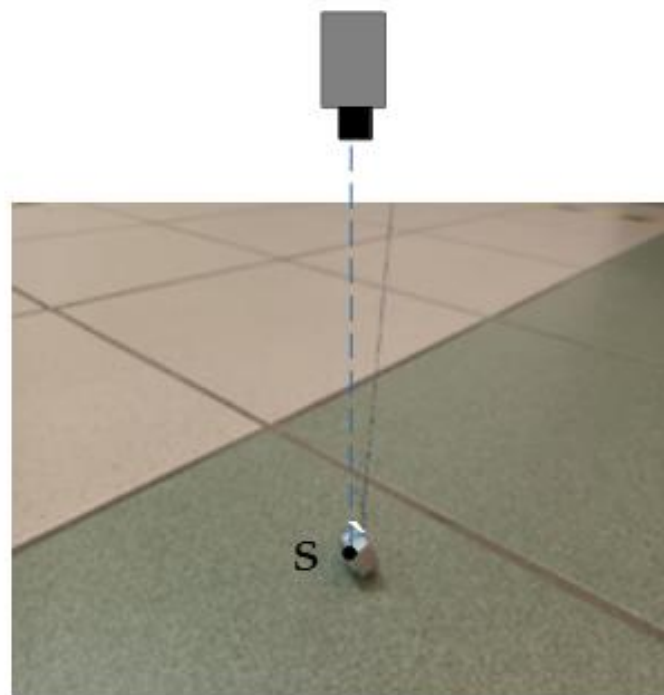
8.1 Stanowisko pomiarowe do badań w warunkach laboratoryjnych

Stanowisko do pomiarów jazdy robota omnigąsienicowego w warunkach laboratoryjnych składało się z kamery umiejscowionej na wysokości $h = 4,05$ m nad rejestrowaną sceną oraz płaskiego obszaru pomiarowego, na którym dokonywano pomiaru. Wymiar pola pomiarowego to $a = 3,2$ m na $b = 2,8$ m. Na rys. 8.1 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego wraz z naniesionymi oznaczeniami wymiarów. Warunki w jakich wykonywano pomiary opisane w niniejszym rozdziale odpowiadają warunkom pomiarów opisanych w rozdz. 5. Zarówno OMP2021_2 jak i OMP2024_2 badane były na twardej powierzchni złożonej z gresu technicznego.



Rys. 8.1. Schemat stanowiska pomiarowego z zaznaczonym polem pomiarowym $a \times b$

Kamera została umiejscowiona nad obszarem pomiarowym. Środek rejestrowanego obrazu pokrywał się z niewielkim ciężarkiem (rys. 8.2), zaczeponym na nierozciągliwej nici bezpośrednio przy obiektywie kamery. Dzięki temu możliwe było wyeliminowanie paralaksy i umiejscowienie kamery pod kątem możliwie zbliżonym do 90° w stosunku do podłoża, co przedstawiono na rys. 8.3.



Rys. 8.2. Widok kamery i wyznaczonego geometrycznego środka stanowiska pomiarowego



Rys. 8.3. Widok pojazdu omnigąsienicowego OMP2024_2 na stanowisku pomiarowym

Konstrukcja drugiego stanowiska pomiarowego uwzględniała większą powierzchnię pomiarową, konieczną do przeprowadzenia badań nad pojazdem o większych gabarytach. Akwizycję obrazu o rozdzielczości 2592 x 1944 px z prędkością 30 klatek na sekundę umożliwiła kamera ELP-USB4KHDR01. Wartości charakterystyczne w_x^{px} oraz w_y^{px} wyznaczone na podstawie wzoru (5.1) dla parametrów $\beta_x^{kam} = 42^\circ$, $\beta_y^{kam} = 30,8^\circ$, $px_x^{max} = 2592$ oraz $px_y^{max} = 1944$ wyniosły:

$$w_x^{px} = 0,0162^\circ,$$

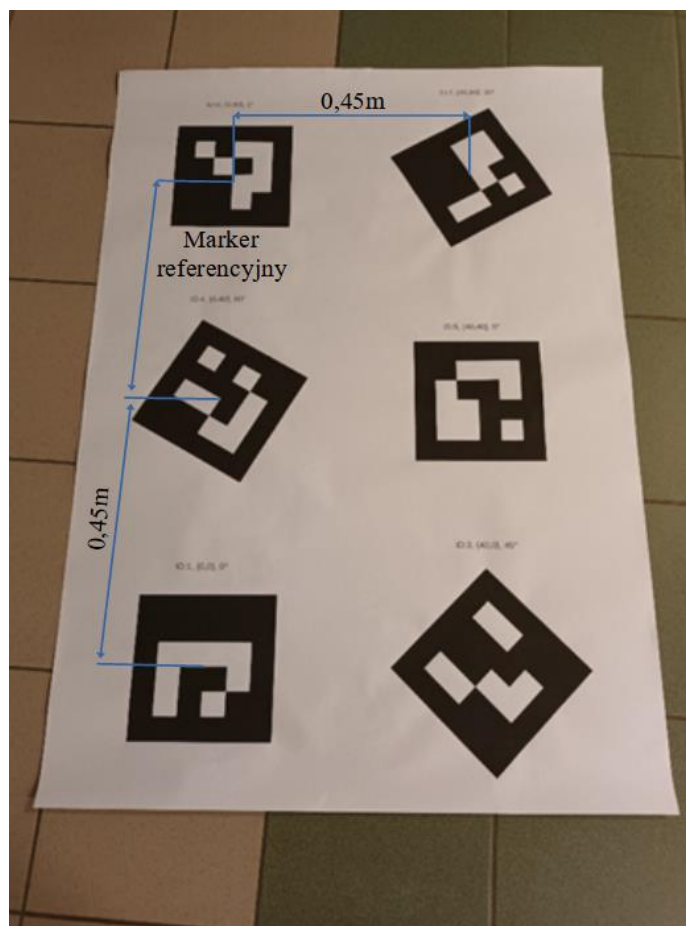
$$w_y^{px} = 0,0158^\circ.$$

Teoretyczna rozdzielczość układu pomiarowego, wyznaczona na podstawie wzoru (5.2) wynosiła poniżej 0,0011 m. Wartość ta została wyznaczona jako największa odległość, która może być reprezentowana jest przez pojedynczy piksel przy zadanych wymiarach stanowiska pomiarowego.

Kamera została skalibrowana za pomocą strony kalibracyjnej chArUco, w taki sam sposób jak w stanowisku pomiarowym opisanym w rozdz. 5. Dzięki temu usunięto aberracje układu optycznego. Stanowisko pomiarowe, podobnie jak w przypadku OMP2024_1 miało za zadanie rejestrować scenę bezpośrednio z góry. Obecność markera ArUco na korpusie pojazdu umożliwił detekcję położenia pojazdu na obrazie.

8.2 Badania i weryfikacja dokładności układu pomiarowego

Przed badaniami przeprowadzono testy umożliwiające określenie dokładności, z jaką stanowisko pomiarowe wykrywa położenie markerów. W tym celu przygotowano arkusz testowy, przedstawiony na rys. 8.4. Na arkuszu naniesiono 6 markerów ArUco, o znanych położeniach i orientacjach kątowych.

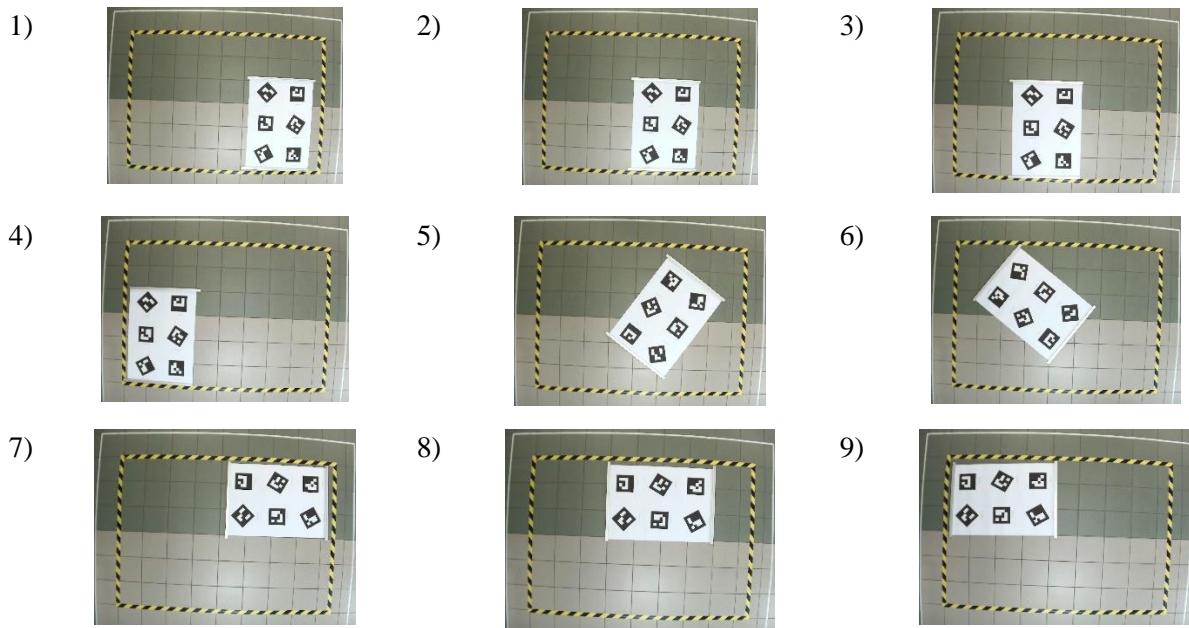


Rys. 8.4. Widok arkusza testowego wykorzystanego do badania dokładności stanowiska pomiarowego

Marker w lewym górnym rogu uznano za marker referencyjny. Odległości pomiędzy markerami sąsiadującymi wynosiły 0,45 m. Markery umieszczone były pod kątem 0° , 15° , 30° i 45° w odniesieniu do markera referencyjnego.

W trakcie badań użyto dwóch algorytmów wykrywania rzeczywistego położenia markera. Pierwszy z nich, metodę znanej wysokości, opisano w rozdz. 5. Zakłada on znaną, stałą odległość pomiędzy płaszczyzną markera a kamerą. Oznacza to, że jego działanie obejmuje określenie współrzędnych markera o trzech stopniach swobody, czyli o przesunięciu w dwóch osiach, a także rotacji w jednej osi. Drugi algorytm to funkcja *estimatePoseSingleMarker*, wbudowana w bibliotekę OpenCV. Algorytm ten na podstawie proporcji długości boków wykrywanego markera, a także różnicy pomiędzy znanym rozmiarem rzeczywistym markera, a jego wykrytymi wymiarami i kątami pomiędzy poszczególnymi bokami wyznacza położenie i orientację środka markera. Narzędzie to przeznaczone jest do określania położenia i orientacji markera w trójwymiarowym otoczeniu. Oznacza to, że funkcja ta zwraca informację o przemieszczeniu we wszystkich trzech osiach trójwymiarowego otoczenia, jak również zapewnia informację o obrocie wokół tych trzech osi.

Przeprowadzone testy polegały na wykrywaniu wzajemnego położenia markerów na arkuszu testowym umieszczanym w różnych miejscach obszaru roboczego stanowiska pomiarowego. Ponieważ wzajemna orientacja kątowa oraz odległości pomiędzy nadrukowanymi markerami są stałe, wyeliminowano konieczność dokładnego rejestrowania rzeczywistego położenia arkusza względem stanowiska pomiarowego. Obrazy zarejestrowane podczas badania przedstawiono na rys. 8.5.



Rys. 8.5. Klatki obrazu zarejestrowane podczas pomiaru dokładności określania pozycji markera

Podczas testów wykonano 9 pomiarów. Interpretacja każdego pomiaru polegała na usunięciu aberracji optycznych z klatki, wykryciu markerów oraz uśrednieniu błędu położenia Δs w odniesieniu do markera referencyjnego, umieszczonego w lewym górnym rogu arkusza pomiarowego. Wartość Δs jest średnim błędem, z jakim określano różnice w odległości poszczególnych markerów. Wartość ta odnosi się do odległości pomiędzy markerami, nie jest przypisana do osi.

Wartość błędu zdefiniowano jako:

$$\Delta s = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x^W - x_i^T)^2 + (y_i - y^W - y_i^T)^2}}{i}, \quad (8.1)$$

gdzie:

Δs - średni błąd wyznaczania pozycji markera,

i - numer rozpatrywanego markera, $i = 1, \dots, 5$,

x_i, y_i - wyznaczona lokalizacja markera i ,

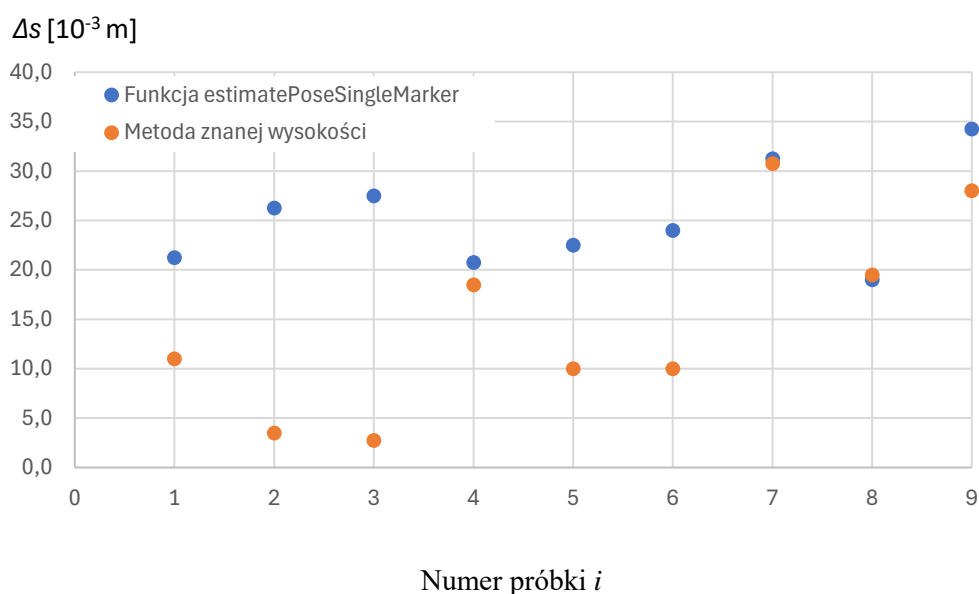
x^W, y^W - wyznaczona lokalizacja markera referencyjnego,

x_i^T, y_i^T - rzeczywista różnica pomiędzy położeniem markera wzorcowego a markera i .

Wyniki uzyskane na podstawie działania obu testowanych algorytmów pozwoliły na porównanie oraz ocenę dokładności określania rzeczywistej pozycji markerów. Zebrane wyniki przedstawiono w tab. 8.1. Wyniki w formie wykresu przedstawiono na rys. 8.6.

Tab. 8.1. Wyniki pomiaru pozycji markera. Numer próbki i odpowiada położeniu arkusza pomiarowego na rys. 8.5

Numer próbki i	Metoda znanej wysokości	Funkcja <i>estimatePoseSingleMarker</i>
	Δs [10^{-3} m]	Δs [10^{-3} m]
1	21	11
2	26	04
3	28	03
4	21	19
5	23	10
6	24	10
7	31	31
8	19	20
9	34	28
Średnia	25	15



Rys. 8.6. Wyniki uzyskane podczas badania dokładności wyznaczania położenia

Badania wykazały, że zaproponowany algorytm *metoda znanej wysokości* charakteryzuje się dokładnością wykrywania pozycji poniżej 0,0034 m. Algorytm wbudowany w bibliotekę OpenCV pozwala na wyznaczanie pozycji z dokładnością poniżej 0,0031 m (tab. 8.1). Choć wartości maksymalne wyznaczania położenia dla obu przedstawionych metod są do siebie bardzo zbliżone, to średnia wartość błędów wygenerowanych przez omawiane metody wskazują na większą dokładność funkcji *estimatePoseSingleMarker*.

8.3 Badania ruchu pojazdu omnigąsienicowego w warunkach laboratoryjnych

Badania polegały na przeprowadzeniu szeregu przejazdów testowych po pięciu prostoliniowych trajektoriach μ_i^T z różną orientacją kątową kierunku ruchu γ_i^T , przy stałej orientacji korpusu φ (rys. 8.7). Długość trajektorii μ_i^T wynosiła minimum 1,6 m. Przejazdy wykonano w warunkach laboratoryjnych po twardym, jednolitym podłożu dla kąta orientacji wektora prędkości γ_i^T wynoszącego kolejno: 0° , $18,4^\circ$, 45° , $71,6^\circ$ oraz 90° . Wartości prędkości zadanych poszczególnych gąsienic \dot{q}_n , przedstawione w tab. 8.2, obliczono na podstawie wzorów z rozdz. 3.

Oznaczenie trajektorii	Orientacja wektora prędkości v_R	Schemat trajektorii
μ_1^T	$\gamma_1^T = 0^\circ$	
μ_2^T	$\gamma_2^T = 18,4^\circ$	

Rys. 8.7. Schematy badanych trajektorii μ_i^T robota OMP2024_2: a) trajektoria μ_1^T , kąt $\gamma_1^T = 0^\circ$, b) trajektoria μ_2^T , kąt $\gamma_2^T = 18,44^\circ$, c) trajektoria μ_3^T , kąt $\gamma_3^T = 45^\circ$, d) trajektoria μ_4^T , kąt $\gamma_4^T = 71,56^\circ$, e) trajektoria μ_5^T , kąt $\gamma_5^T = 90^\circ$

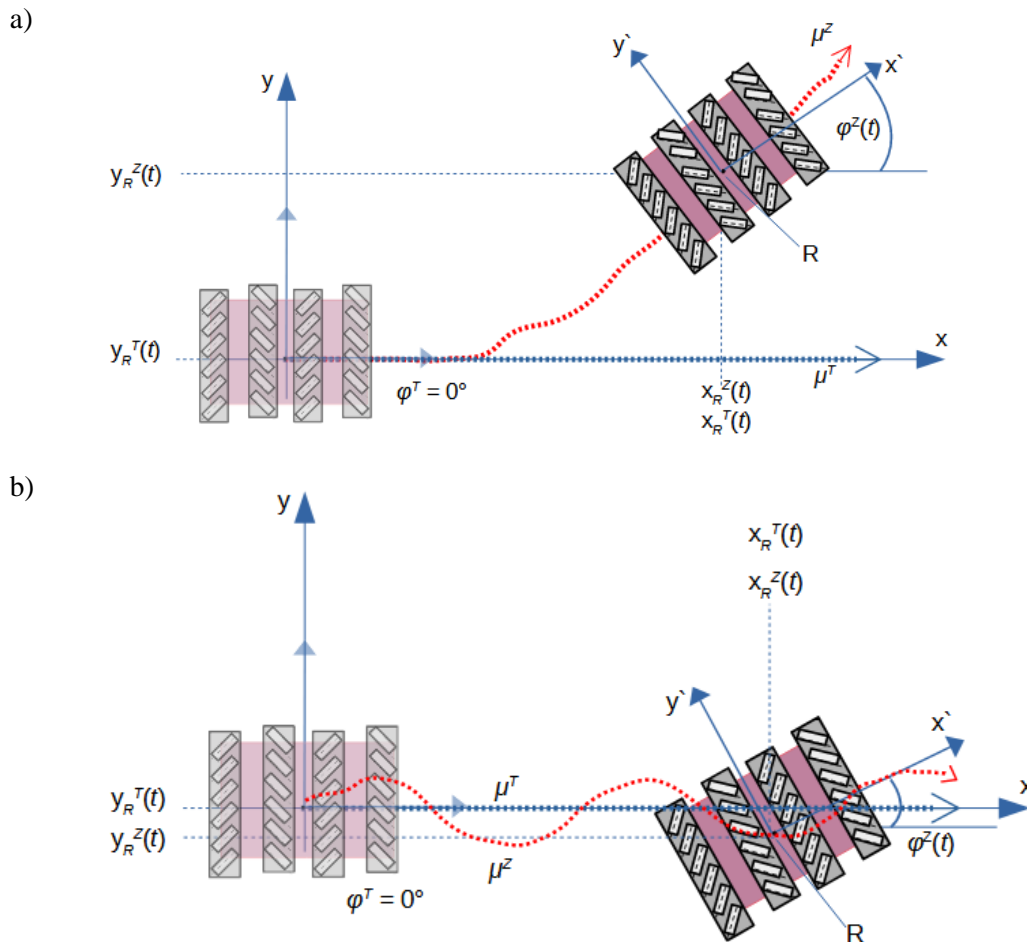
Oznaczenie trajektorii	Orientacja wektora prędkości v_R	Schemat trajektorii
γ_3^T	$\gamma_3^T = 45^\circ$	
γ_4^T	$\gamma_4^T = 71,6^\circ$	
γ_5^T	$\gamma_5^T = 90^\circ$	

Rys. 8.7. Ciąg dalszy. Schematy badanych trajektorii μ_i^T robota OMP2024_2: a) trajektoria μ_1^T , kąt $\gamma_1^T = 0^\circ$, b) trajektoria μ_2^T , kąt $\gamma_2^T = 18,44^\circ$, c) trajektoria μ_3^T , kąt $\gamma_3^T = 45^\circ$, d) trajektoria μ_4^T , kąt $\gamma_4^T = 71,56^\circ$, e) trajektoria μ_5^T , kąt $\gamma_5^T = 90^\circ$

Tab. 8.2. Wartości prędkości \dot{q}_n zadanych gąsienic i odpowiadające im zaplanowane kąty orientacji trajektorii ruchu korpusu pojazdu omnigąsienicowego

Zadany kąt orientacji trajektorii γ_i^T [°]	$\dot{q}_1 = \dot{q}_3$ [m/s]	$\dot{q}_2 = \dot{q}_4$ [m/s]
0,0	0,2	-0,2
18,4	0,2	-0,1
45,0	0,2	0
71,6	0,2	0,1
90,0	0,2	0,2

Podczas eksperymentu dla każdego kąta γ_i^T wykonano dwie serie pomiarów. Każda seria składała się z 10 przejazdów. W trakcie przejazdu czujnik IMU rejestrował orientację kątową platformy, natomiast jej trajektoria została zarejestrowana za pomocą kamery RGB. Pierwszą serię pomiarów wykonano bez aktywnego mechanizmu korekcji kierunku jazdy. Drugą serię wykonano z uruchomionym modułem aktywnej korekcji kierunku jazdy (rys. 8.8). Algorytm działania aktywnej korekcji kierunku jazdy opisano w podrozdziale 7.5.



Rys. 8.8. Badania jazdy robota OMP2024_2: a) bez moduł aktywnej korekcji, b) z aktywnym modułem dynamicznej korekcji kierunku jazdy

Dane niezbędne od wyznaczenia przebiegu zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ dla tego przejazdu, zebrane przy pomocy IMU przedstawiono na rys 8.8. Wartość $\Delta\varphi$ zdefiniowano jako:

$$\Delta\varphi = \varphi^T - \varphi^Z, \quad (8.2)$$

gdzie:

$\Delta\varphi$ – zmiana kąta orientacji korpusu k ,

φ^T – zadana wartość kąta orientacji korpusu k ,

φ^Z – rzeczywista wartość kąta orientacji korpusu k zmierzona za pomocą czujnika IMU.

Aby ułatwić interpretację uzyskanych wyników wprowadzono współczynnik φ_s określający utratę kąta orientacji korpusu $\Delta\varphi$ w odniesieniu do pokonanego dystansu. Aby uniknąć błędów wynikających z analizy danych z dwóch niesynchronizowanych ze sobą sensorów (IMU na OMP2024_2 oraz zewnętrzny system wizyjny) jako wartości graniczne uznano położenie początkowe i końcowe pojazdu, nawet jeśli długość jego ruchu nie była równa długości trajektorii μ^T . Wartość φ_s zdefiniowano jako:

$$\varphi_s = \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Delta\varphi_i}{i_{max} \cdot s}, \quad (8.3)$$

gdzie:

φ_s – współczynnik zmiany orientacji kątowej korpusu k w odniesieniu do pokonanego dystansu,

$\Delta\varphi_i$ – zmiana kąta orientacji korpusu k zmierzona za pomocą czujnika IMU,

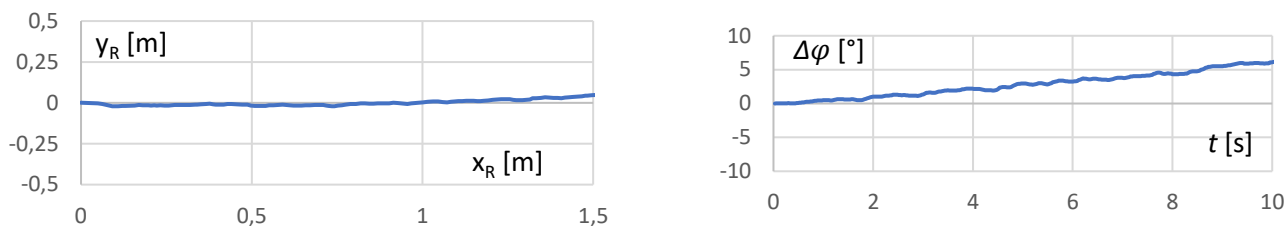
i – zmienna, numer rozpatrywanej próbki zmiany orientacji kątowej $\Delta\varphi_i$,

i_{max} – ilość zebranych próbek zmiany orientacji kątowej $\Delta\varphi_i$,

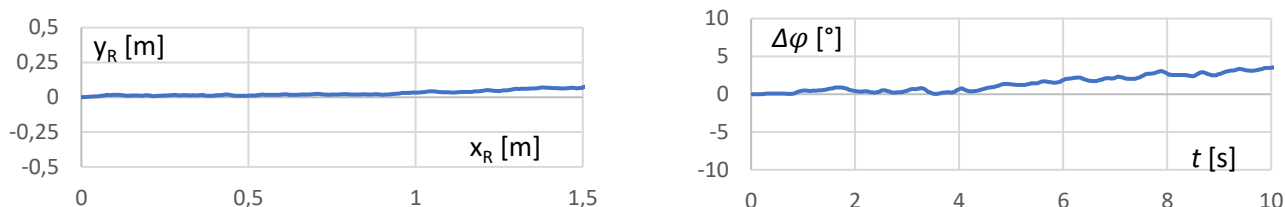
s – długość przebytej drogi.

Na rys. 8.9 – 8.13 przedstawiono położenia OMP2024_2 podczas ruchu po trajektoriach μ_i^T zarejestrowane za pomocą systemu wizyjnego oraz przebieg zmian kąta orientacji korpusu $\Delta\varphi(t)$ zmierzone za pomocą IMU podczas badania bez modułu aktywnej korekcji kierunku.

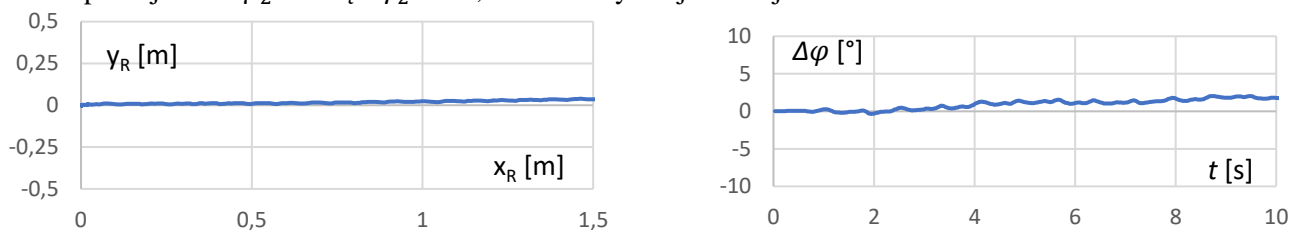
Na rys. 8.14 – 8.18 przedstawiono położenia zarejestrowane podczas ruchu OMP2024_2 po trajektoriach μ_i^T oraz przebieg zmian kąta orientacji korpusu $\Delta\varphi(t)$ zarejestrowane podczas badania jazdy z aktywnym modułem korekcji kierunku. W tab. 8.3 przedstawiono uśrednione wyniki pomiarów.



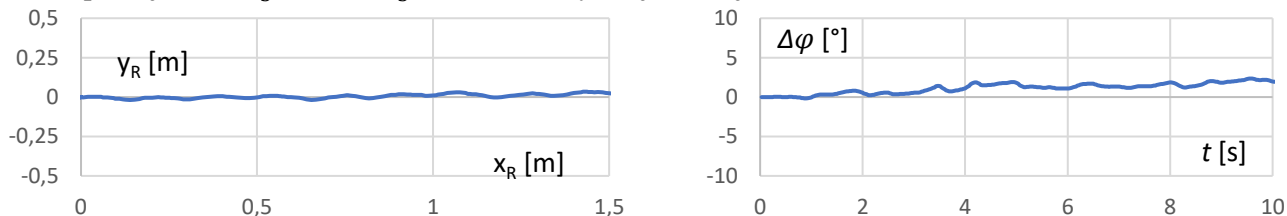
Rys. 8.9. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_1^Z dla kąta $\gamma_1^T = 0^\circ$ bez aktywnej korekcji kierunku



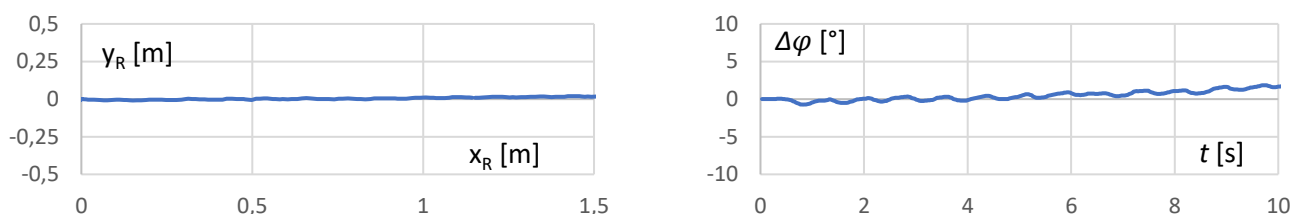
Rys. 8.10. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_2^Z dla kąta $\gamma_2^T = 18,44^\circ$ bez aktywnej korekcji kierunku



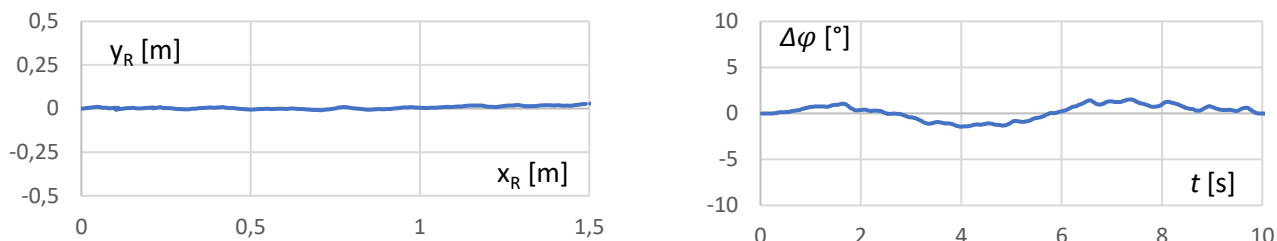
Rys. 8.11. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_3^Z dla kąta $\gamma_3^T = 45^\circ$ bez aktywnej korekcji kierunku



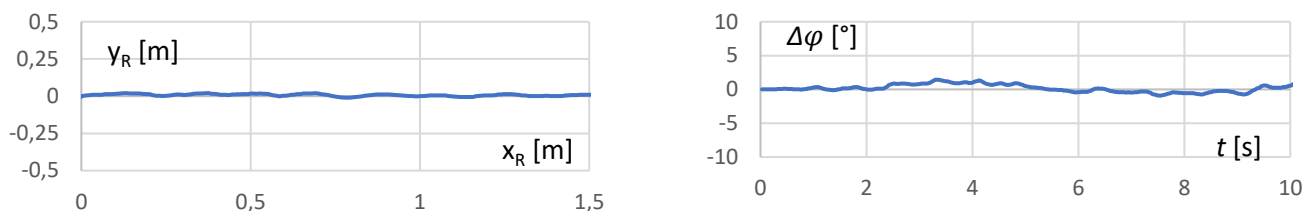
Rys. 8.12. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_4^Z dla kąta $\gamma_4^T = 71,56^\circ$ bez aktywnej korekcji kierunku



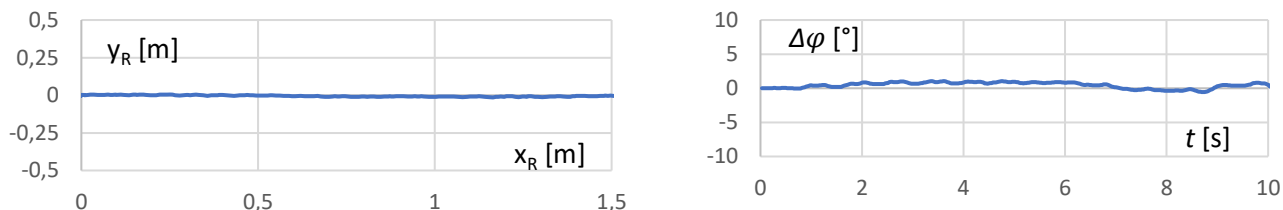
Rys. 8.13. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_5^Z dla kąta $\gamma_5^T = 90^\circ$ bez aktywnej korekcji kierunku



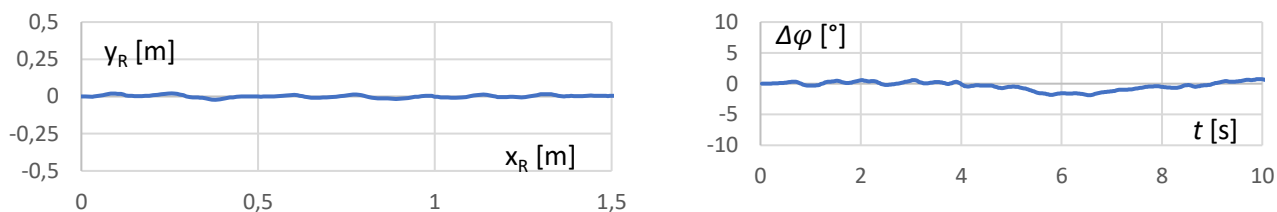
Rys. 8.14. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_1^Z dla kąta $\gamma_1^T = 0^\circ$ z aktywną korekcją kierunku



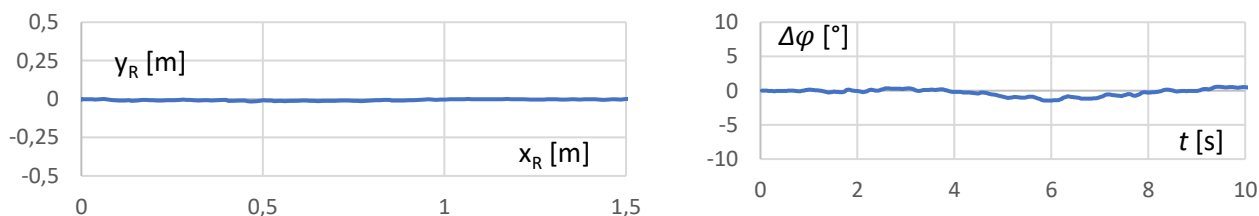
Rys. 8.15. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_2^Z dla kąta $\gamma_2^T = 18,44^\circ$ z aktywną korekcją kierunku



Rys. 8.16. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_3^Z dla kąta $\gamma_3^T = 45^\circ$ z aktywną korekcją kierunku



Rys. 8.17. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_4^Z dla kąta $\gamma_4^T = 71,56^\circ$ z aktywną korekcją kierunku



Rys. 8.18. Przebieg współrzędnych X_R, Y_R punktu R oraz przebieg zmian orientacji kątowej korpusu $\Delta\varphi$ podczas ruchu po trajektorii μ_5^Z dla kąta $\gamma_5^T = 90^\circ$ z aktywną korekcją kierunku

Tab. 8.3. Średnie wartości odchylenia kąowego φs korpusu robota k w odniesieniu do pokonanego dystansu uzyskane podczas przejazdów testowych po zadanych trajektoriach μ_i^T

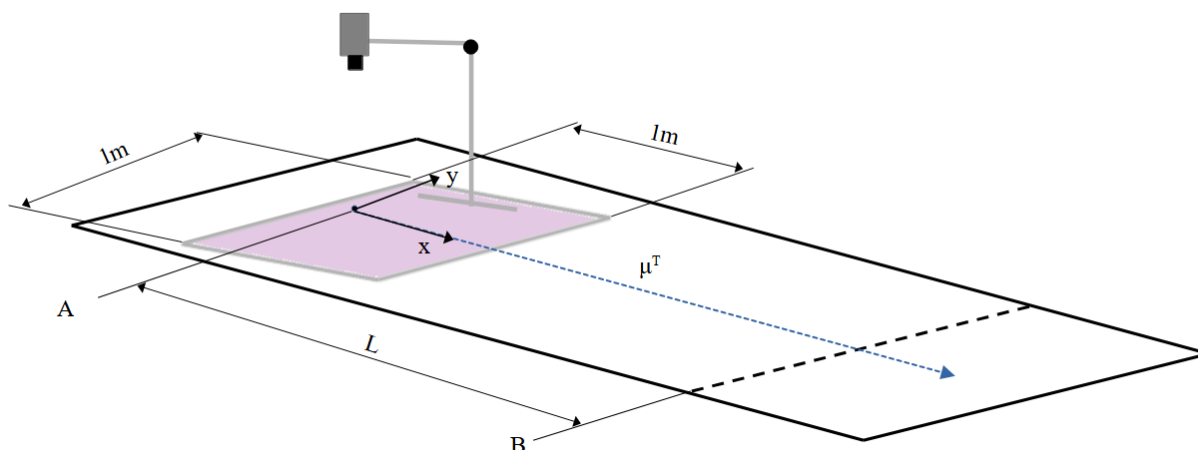
γ_i^T [°]	Bez korekty dynamicznej	Z korektą dynamiczną
	φs [°/m]	φs [°/m]
0,0	1,626	0,010
18,4	-0,502	-0,051
45,0	0,255	0,012
71,6	1,385	0,102
90,0	-0,195	0,057

Badania wykazały, że moduł aktywnej korekty w wyraźny sposób poprawia parametry jezdne pojazdu omnigąsienicowego (tab. 8.3). Wykresy trajektorii ruchu (rys. 8.9 – 8.12) ukazują, że bez aktywnego modułu korekcji kierunku pojazd ma tendencję do odchylenia swojej trajektorii. Wykazano, że w zależności od kierunku ruchu prędkość zakrzywiania jego trajektorii wynosi od -0,5 do 1,63 °/m (tab. 8.3). Uruchomienie modułu aktywnej korekcji kierunku wyraźnie poprawiło parametry jezdne pojazdu. Wykresy trajektorii ruchu oraz orientacji kąowej (rys. 8.13 – 8.18) wskazują, że podczas ruchu pojazd oscyluje wokół zadanej trajektorii. Oznacza to że zaproponowany algorytm, testowany w warunkach laboratoryjnych, spełnia swoje zadanie i poprawnie koryguje kierunek jazdy pojazdu omnigąsienicowego.

8.4 Stanowisko pomiarowe do badań w warunkach rzeczywistych

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie pomiarów parametrów ruchu podczas jazdy w warunkach rzeczywistych. Celem tych badań było przeprowadzenie szeregu przejazdów testowych pojazdu po trajektorii μ^T na typowych nawierzchniach, po których mogłyby poruszać się pojazd omnigąsienicowy operujący poza budynkami. Przejazdy wykonano na podłożu z kostki brukowej oraz na podłożu piaszczystym. W celu przeprowadzenia pomiarów zbudowano stanowisko pomiarowe, złożone z systemu wizyjnego oraz wyznaczonego pola roboczego (rys. 8.19). System wizyjny obejmował jedynie niewielki, początkowy fragment pola roboczego, zaznaczony na fioletowo, o wymiarach około 1 m x 1 m.

Kamera nie rejestrowała trajektorii punktu R podczas przejazdów testowych. Jej zadaniem było umożliwienie uzyskania powtarzalności kolejnych przejazdów. Dzięki możliwości ponownego ustawiania OMP2024_2 w tym samym punkcie startowym, pod takim samym kątem γ^T możliwe było porównanie ze sobą wyników kolejnych przejazdów.

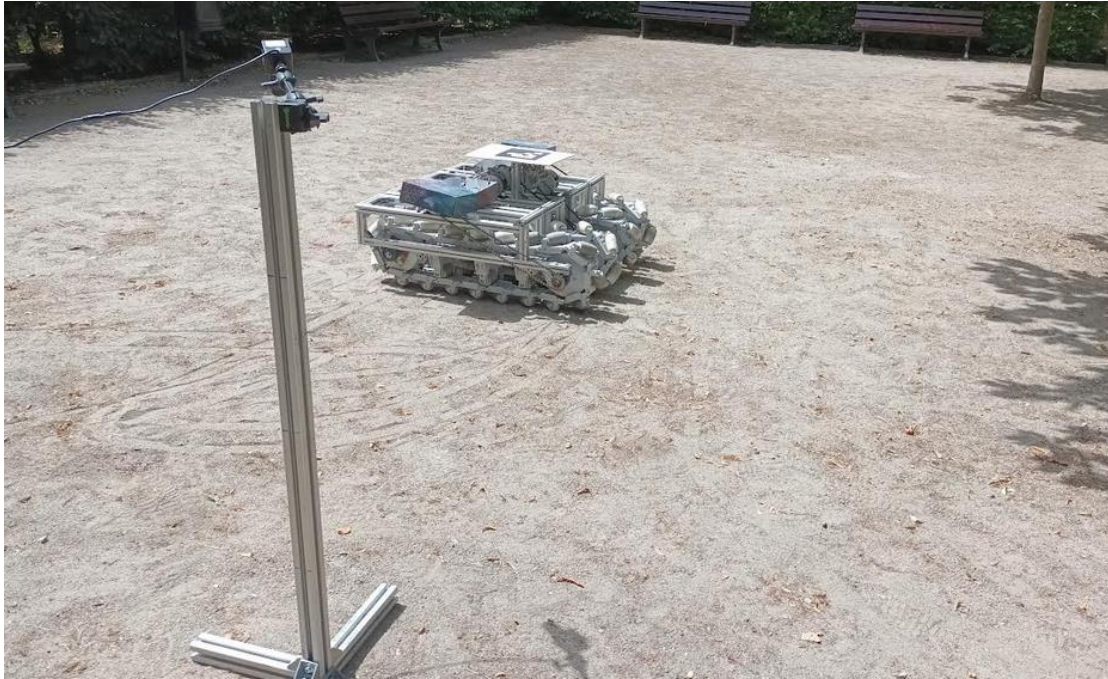


Rys. 8.19. Widok schematu stanowiska pomiarowego wykorzystanego podczas pomiarów w warunkach rzeczywistych

Widok rzeczywistego stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 8.20 i 8.21. System wizyjny zamocowany w miejscu startu umożliwił uzyskanie powtarzalności pozycjonowania. Dzięki temu przy kolejnych przejazdach możliwe było precyzyjne ustawienie pojazdu dokładnie w tym samym miejscu, pod takim samym kątem. W odległości $L = 15$ m od punktu startu A wyznaczono linię B, po przekroczeniu której wykonywany będzie pomiar przesunięcia w osi y.



Rys. 8.20. Widok stanowiska do pomiaru parametrów jazdy pojazdu omnigąsienicowego w warunkach rzeczywistych na podłożu z kostki brukowej wraz z robotem OMP2024_2



Rys. 8.21. Widok stanowiska do pomiaru parametrów jazdy pojazdu omni-gąsienicowego w warunkach rzeczywistych na podłożu piaszczystym wraz z robotem OMP2024_2

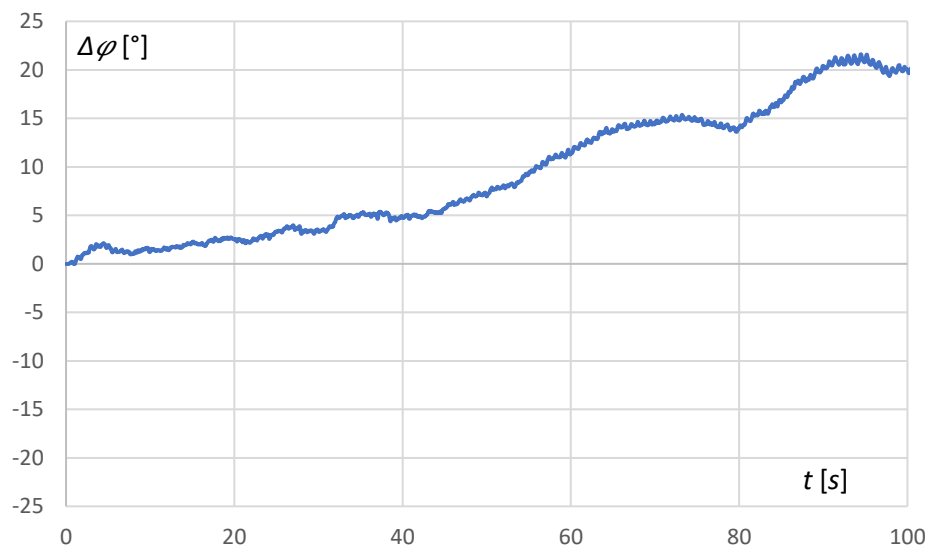
8.5 Badania pojazdu omni-gąsienicowego w warunkach rzeczywistych

Badania jazdy pojazdu OMP2024_2 w warunkach rzeczywistych miały na celu sprawdzenie wpływu zmiany podłoża, po którym porusza się robot na jego parametry jazdy.

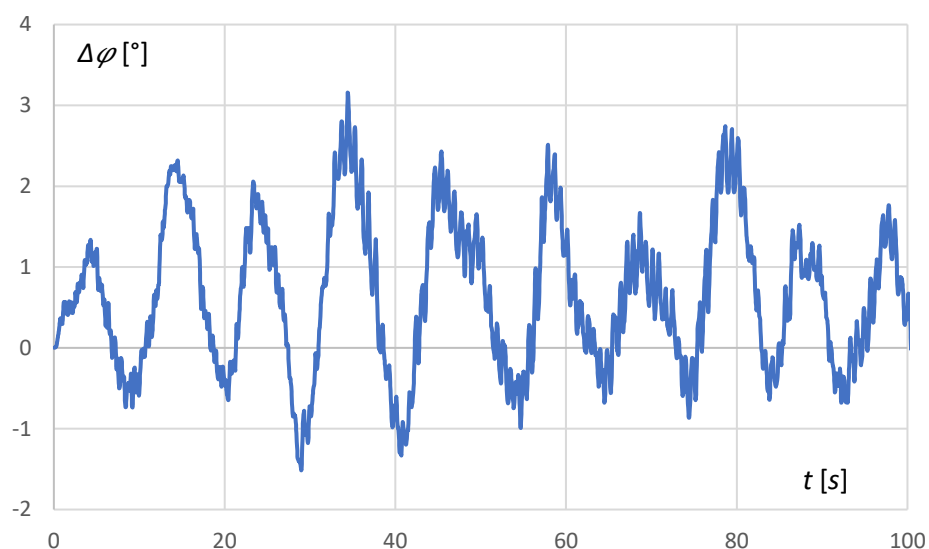
Pierwszy etap badań obejmował wykonanie przejazdu po podłożu z kostki brukowej. Zaplanowany eksperyment obejmował wykonanie przejazdu po prostoliniowej trajektorii μ^T o długości 15 m. Pojazd poruszał się wyłącznie wzdłuż osi poprzecznej, $\gamma^T = 0^\circ$. W trakcie pomiaru rejestrowano wskazania enkoderów oraz bieżącą orientację kątową korpusu $\varphi(t)$. Zadana prędkość liniowa v_R pojazdu wynosiła 0,18 m/s. Zadano stały kąt orientacji $\varphi^T = 0^\circ$. Wyznaczone wartości zadane prędkości gąsienic wynosiły $\dot{q}_1, \dot{q}_3 = 0,18$ m/s, $\dot{q}_2, \dot{q}_4 = -0,18$ m/s.

Po przekroczeniu linii wyznaczającej koniec pomiaru dodatkowo zmierzono odległość pomiędzy linią docelową trajektorii μ^T , a rzeczywistym położeniem korpusu robota. Odległość tą oznaczono jako b_0 .

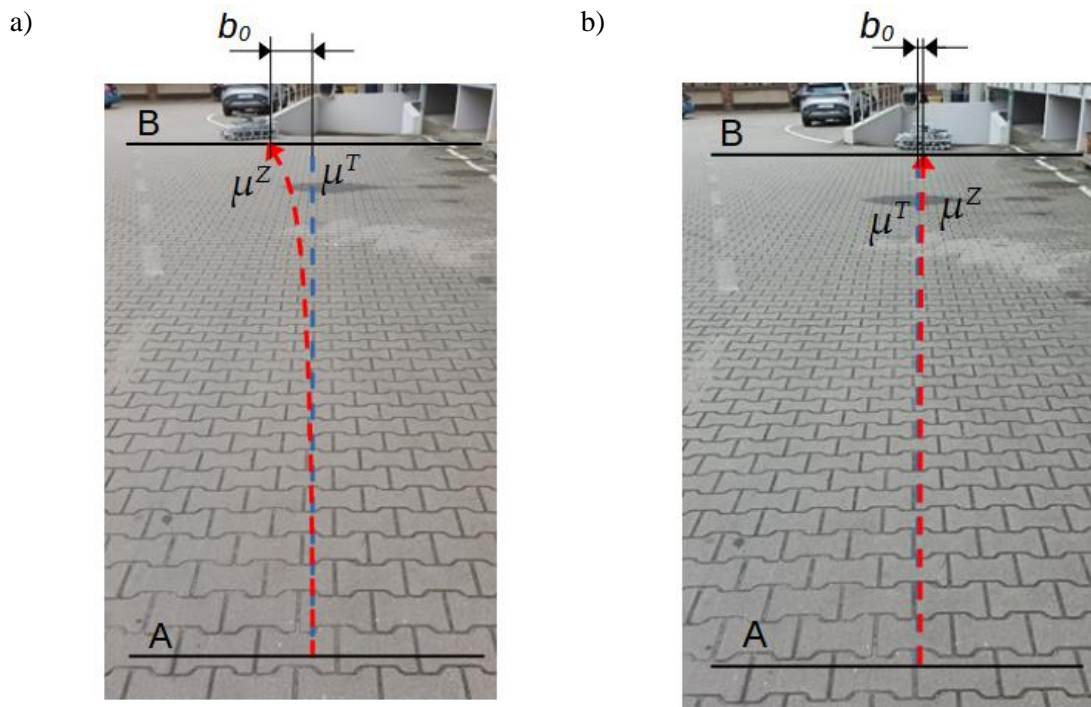
Przeprowadzono dwa przejazdy. Pierwszy przejazd jazdę bez korekcji, drugi z aktywnym modulem korygującym kierunek. Na rys. 8.22 i 8.23 przedstawiono przebieg zmian orientacji kątowej korpusu podczas obu typów jazd. Pozycję końcową pojazdu po obu typach przejazdów przedstawiono na rys. 8.24. Na rys. 8.25 przedstawiono widok pojazdu podczas wykonywania przejazdu testowego. W tab. 8.4 zebrano wartości φ_s , a także końcowe położenia pojazdu OMP2024_2 po wykonaniu przejazdów.



Rys. 8.22. Przebieg zmian orientacji kątowej $\Delta\varphi$ korpusu k pojazdu OMP2024_2 podczas jazdy po trajektorii μ^Z po podłożu z kostki brukowej bez modułu aktywnej korekcji kierunku jazdy



Rys. 8.23. Przebieg zmian orientacji kątowej $\Delta\varphi$ korpusu k pojazdu OMP2024_2 podczas jazdy po trajektorii μ^Z po podłożu z kostki brukowej z aktywnym modulem korekcji kierunku jazdy



Rys. 8.24. Widok pozycji końcowej pojazdu omnigąsienicowego po wykonaniu przejazdu testowego po kostce brukowej a) bez aktywnej korekty, b) z aktywnym modulem korekty



Rys. 8.25. Widok pojazdu OMP2024_2 podczas wykonywania przejazdu testowego po trajektorii μ^Z po podłożu z kostki brukowej

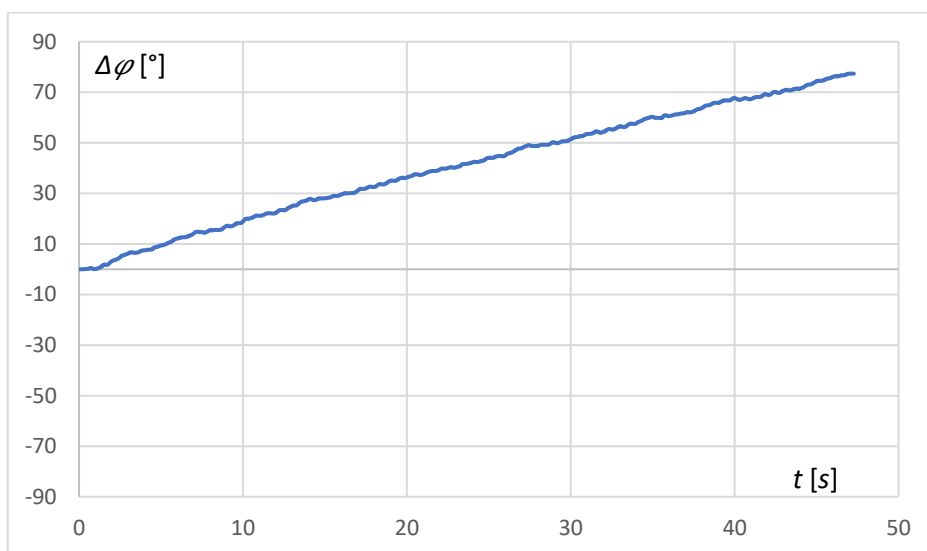
Tab. 8.4. Odległość b_0 od trajektorii μ^T pojazdu OMP2024_2 po przekroczeniu linii pomiarowej B podczas jazdy po podłożu z kostki brukowej

Bez korekty		Z korektą	
b_0 na linii B [m]	φ_s [°/m]	b_0 na linii B [m]	φ_s [°/m]
1,94	0,634	0,14	0,042

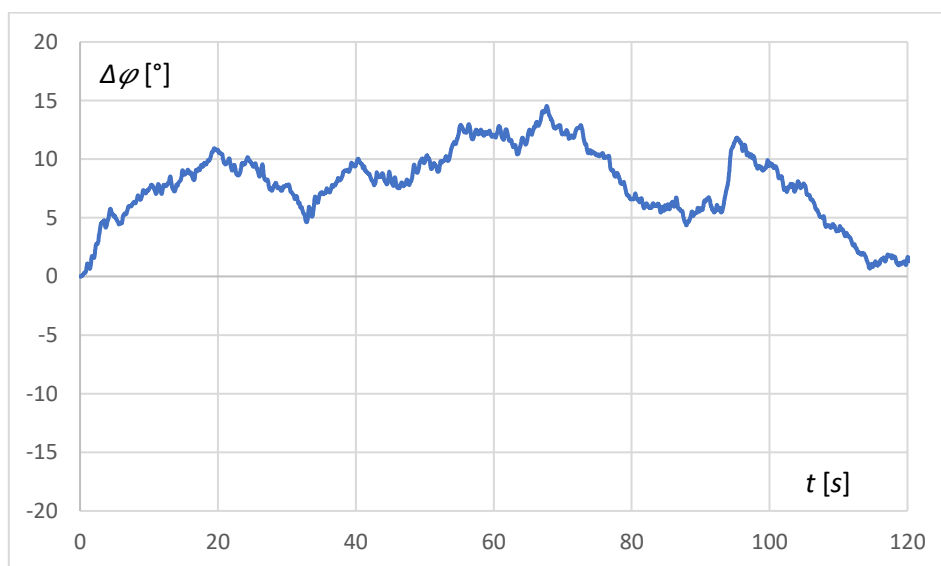
Kolejnym etapem badań było określenie wpływu piaszczystego podłoża na parametry jazdy OMP2024_2. W tym przypadku pojazd również wykonał przejazdy po trajektorii $\mu^T = 15$ m.

Wykonano zarówno przejazdy z korektą kierunku, jak i bez niej. W trakcie pomiaru rejestrowano wskazania enkoderów oraz bieżącą orientację kątową korpusu. Zadana prędkość liniowa pojazdu v_R , podobnie jak w poprzednim badaniu wynosiła 0,18 m/s. Zadano stały kąt orientacji $\varphi^T = 0^\circ$. Wyznaczone wartości zadane prędkości gąsienic wynosiły $\dot{q}_1, \dot{q}_3 = 0,18$ m/s, $\dot{q}_2, \dot{q}_4 = -0,18$ m/s.

Po przekroczeniu linii B wyznaczającej koniec pomiaru dodatkowo zmierzono odległość pomiędzy docelową trajektorią μ^T , a rzeczywistym położeniem korpusu robota na trajektorii μ^Z . Przeprowadzono dwa przejazdy, z aktywnym modułem korygującym kierunek oraz bez niego. Na rys. 8.26 przedstawiono przebieg zmian orientacji kątowej korpusu, natomiast na rys. 8.27 podczas jazdy z aktywnym modułem korekcji kierunku jazdy. Pozycję końcową pojazdu po obu typach przejazdów przedstawiono na rys. 8.28. Na rys. 8.29 przedstawiono widoki pojazdu podczas wykonywania przejazdu testowego.

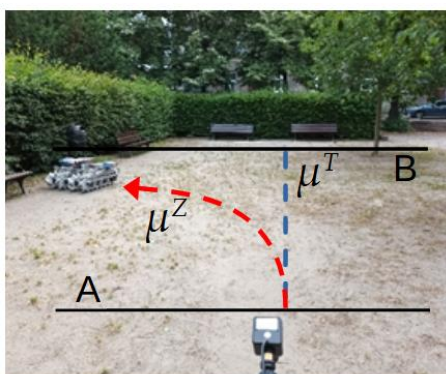


Rys. 8.26. Przebieg zmian orientacji kątowej $\Delta\varphi$ korpusu k podczas jazdy po trajektorii μ^Z po podłożu piaszczystym bez modułu aktywnej korekcji kierunku jazdy

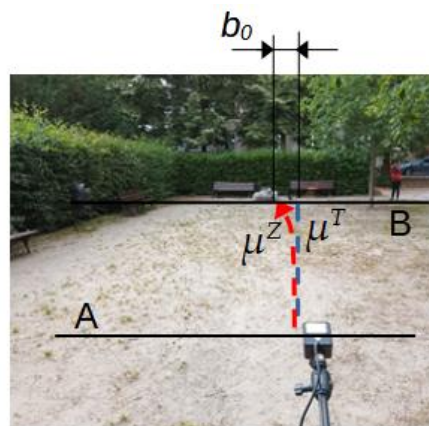


Rys. 8.27. Przebieg zmian orientacji kątowej $\Delta\varphi$ korpusu k podczas jazdy po trajektorii μ^Z po podłożu piaszczystym z aktywnym modułem korekcji kierunku jazdy

a)



b)



Rys. 8.28. Widok pozycji końcowej pojazdu omniąsienicowego po wykonaniu przejazdu testowego po podłożu piaszczystym a) bez aktywnej korekty, b) z aktywnym modulem korekty



Rys. 8.29. Widok pojazdu OMP2024_2 podczas wykonywania przejazdu testowego po trajektorii μ^T po podłożu piaszczystym

Tab. 8.5. Współczynniki φ_s oraz odległość b_0 od trajektorii μ^T pojazdu OMP2024_2 po przekroczeniu linii pomiarowej B podczas jazdy po podłożu piaszczystym

Bez korekty		Z korektą	
b_0 na linii B [m]	φ_s [°/m]	b_0 na linii B [m]	φ_s [°/m]
-	-	2,32m	0,526

W trakcie wykonywania przejazdu bez aktywnej korekcji kierunku pojazd zmienił swoją orientację kątową φ o około 80° , przez co wyjechał z dostępnego obszaru pomiarowego stanowiska pomiarowego. Z tego względu przejazd przerwano po pokonaniu dystansu około 5 m wzdłuż osi x stanowiska. Podczas jazdy z aktywną korekcją kierunku jazdy odwzorowywana trajektoria była znacznie bliższa trajektorii zadanej. Odchylenie na dystansie 15 m wyniosło 2,32 m.

8.6 Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że pojazd OMP2024_2 nadaje się do jazdy w warunkach tzw. *outdoor*. Do uzyskania zadowalających parametrów jazdy konieczne jest jednak zastosowanie systemu aktywnej kompensacji kierunku ruchu.

Badania wykazały znaczącą poprawę odwzorowywania prostoliniowej trajektorii podczas ruchu prostopadłego. Podczas przejazdu bez aktywnej korekty po podłożu z kostek brukowych korpus pojazdu znalazł się w odległości 1,94 m (tab. 8.4) od zaplanowanej trajektorii, obrócony o kąt 20° (rys. 8.22) w stosunku do położenia startowego (rys. 8.24). W przypadku jazdy z aktywnym modulem korekcji odległość pomiędzy korpusem a zaplanowaną trajektorią wynosi około 0,14 m (tab. 8.4), natomiast orientacja kątowna korpusu pojazdu w trakcie wykonywania przejazdu waha się od -2° do 3° (rys. 8.23). To znaczy, że trakcie ruchu cyklicznie ulega niewielkim przeregulowaniom, oddalając się od zadanej trajektorii o kilka centymetrów, po czym osiąga ją ponownie. Oznacza to, że podczas jazdy po kostce brukowej zaproponowany algorytm korekcji dynamicznej poprawnie koryguje tor jazdy robota. W przypadku ruchu bez aktywnej korekcji dynamicznej robot w dalszym ciągu porusza się w zadanym kierunku, jednak stopniowo traci zadaną orientację kątową φ .

Jazda w trudnym terenie również potwierdziła poprawę odwzorowywania trajektorii ruchu. Bez modułu aktywnej korekty OMP2024_2 nie był w stanie pokonać prostoliniowego dystansu o długości 15 m (rys. 8.28). Użycie modułu aktywnej korekcji kierunku jazdy w znaczący sposób poprawiło własności jezdne. Po pokonaniu 15 m po trudnej nawierzchni przemieszczenie liniowe korpusu w osi y stanowiska nie przekraczało 3 m (tab. 8.5). Chwilowa orientacją kątowna korpusu (rys. 8.27) nie odbiegała od wartości zadanej o więcej niż 15° . Oznacza to, że zaproponowany algorytm dynamicznej korekcji kierunku sprawdza się również w warunkach jazdy po podłożu piaszczystym. Ze względu na ograniczenia nałożone na układ sterowania w trakcie przejazdu z aktywną korektą po podłożu piaszczystym OMP2024_2 potrzebował więcej czasu na odzyskanie zadanego kąta orientacji korpusu φ . Aby poprawić jakość odwzorowywanej trajektorii μ^T konieczne byłoby zastosowanie innych nastaw regulatora PID bądź rezygnację z nakładania na człon całkujący regulatora ograniczenia maksymalnego nasycenia.

Sprężenie zwrotne zapewniane przez pokładowy układ IMU wystarcza do śledzenia i korygowania trajektorii z dużą dokładnością. Pojazd pozbawiony tego układu bardzo szybko traci swoją pierwotną orientację i zaczyna skręcać.

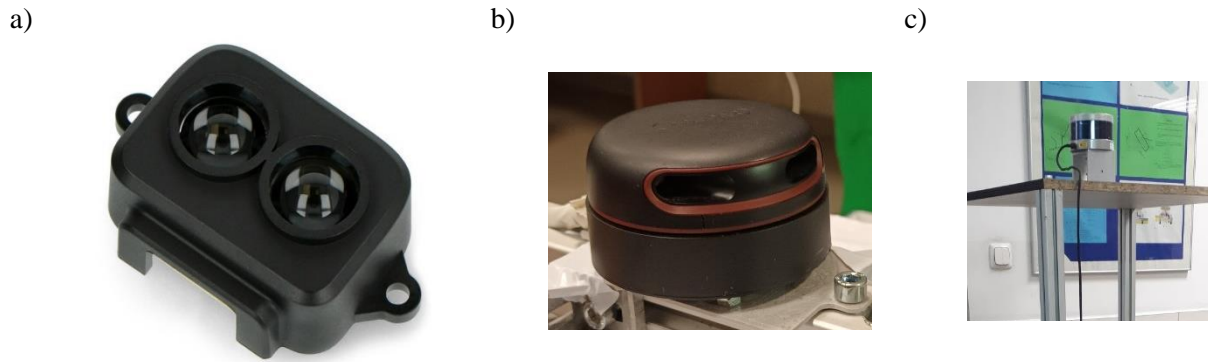
9. System wizyjny robota OMP2024_2

Roboty omnigąsienicowe stanowią grupę unikalnych pojazdów o bardzo specyficznych właściwościach jezdnych. Gąsienicowe układy bieżne zapewniają im swobodę poruszania oraz zdolność do pokonywania przeszkód terenowych, natomiast rolki toczne znacząco podnoszą mobilność pojazdu podczas ruchu po płaskich podłożach. Układ gąsienic całkowicie zachodzących pozwala na bardzo równomierne rozłożenie nacisku pojazdu na podłoże. Dzięki temu podwozie pojazdu omnigąsienicowego w tym układzie gąsienic może stanowić bazę na przykład dla pojazdu przeznaczonego do przeładunku ciężkich obiektów, który musi być w stanie operować również w terenie niezurbanizowanym, bez utwardzonych powierzchni. Innym zastosowaniem dla omawianego podwozia może być wykorzystanie go w charakterze robota inspekcyjnego. Wysoka mobilność ułatwi poruszanie się pojazdu w wąskich korytarzach technicznych, natomiast podwozie gąsienicowe umożliwi pokonywanie przeszkód terenowych w wypadku konieczności dotarcia do obszaru pracy, który nie jest połączony utwardzonymi ciągami komunikacyjnymi bądź do miejsca awarii. W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostaną przykładowe rozwiązania oraz koncepcje rozwiązań oparte o systemy wizyjne i czujniki optyczne, które mogą zostać wykorzystane w zaproponowanych zastosowaniach platformy omnigąsienicowej do wykrywania ludzi i przeszkód.

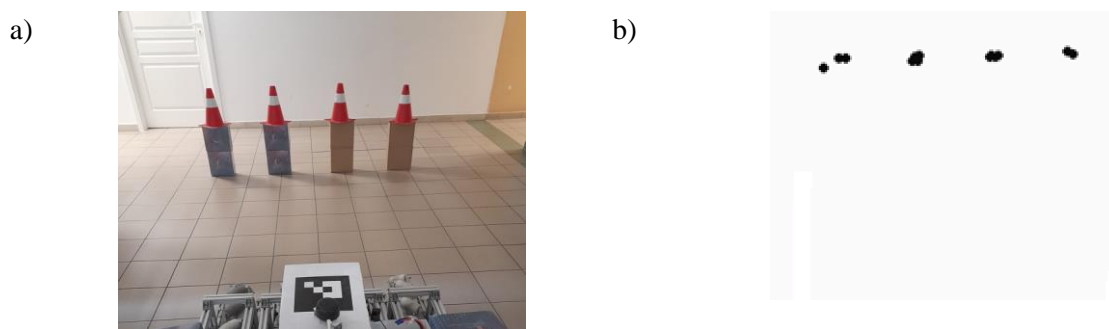
9.1 Wykrywanie przeszkód i ludzi

Jedną z podstawowych funkcjonalności, które mogą zostać osiągnięte przy użyciu systemu wizyjnego jest wykrywanie przeszkód na drodze robota mobilnego. Funkcjonalność ta może zostać osiągnięta przez montaż na korpusie robota czujnika odległości, który w sposób ciągły będzie monitorować przestrzeń wokół robota [107]. W ten sposób OMP2024_2 może w czasie rzeczywistym sprawdzać, czy nie zbliża się do przeszkody.

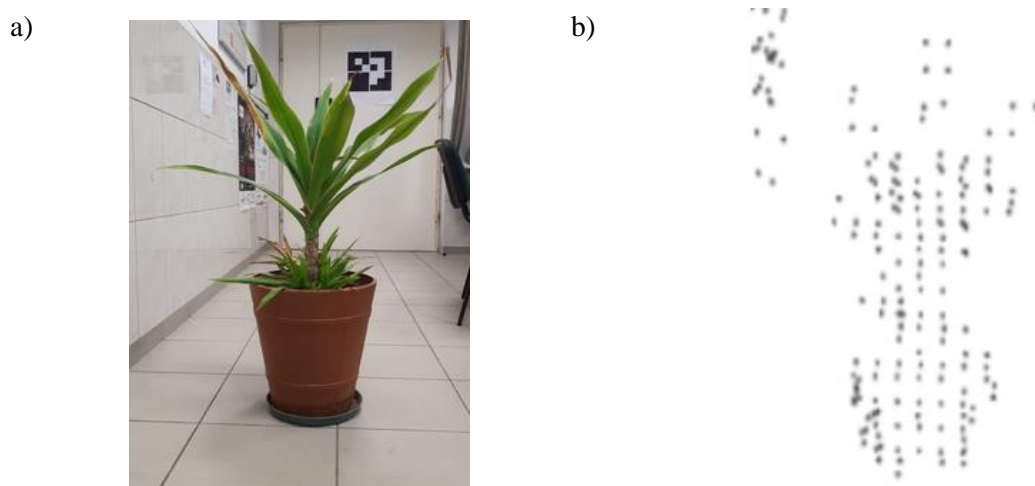
Optyczny czujnik odległości typu lidar, czyli *Light Detection and Ranging*, to urządzenie działające w zakresie światła podczerwonego. Czujnik ten emituje wiązkę światła podczerwonego, która po odbiciu od przeszkody trafia do detektora. Na podstawie czasu, jaki upłynął od wysłania wiązki do jej odebrania obliczana jest odległość pomiędzy czujnikiem a przeszkodą. Lidar może być nieruchomy, mierząc odległość w jednym, wybranym kierunku, bądź umieszczony na obrotowej podstawie. W takim przypadku, w zależności od ilości wysyłanych wiązek może dostarczać dane 2D, opisujące odległości pomiędzy skanerem a przeszkodami w jednej płaszczyźnie, bądź 3D, opisujące dane przestrzenne. Wybrane rodzaje lidarów przedstawiono na rys. 9.1. Na rys. 9.2 przedstawiono przykładowy skan 2D uzyskany za pomocą czujnika RPLidar, natomiast na rys. 9.3. widok obiektu zeskanowanego za pomocą czujnika VLP16.



Rys. 9.1. Rodzaje lidarów: a) TF Luna dostarczający dane w jednej osi [i48], b) RPLidar dostarczający dane 2D, c) Velodyne VLP16 dostarczający dane 3D



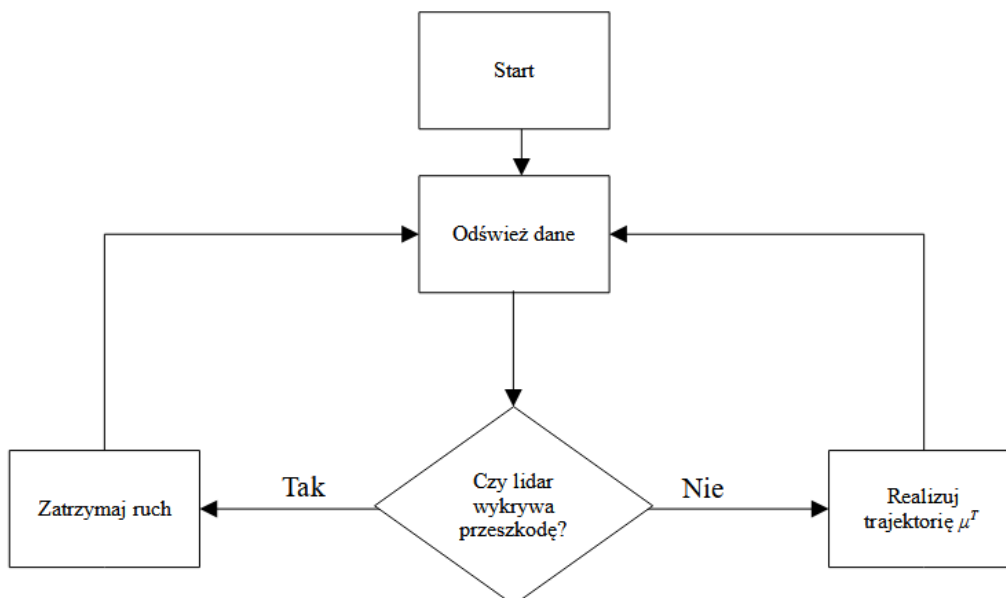
Rys. 9.2. Przykład działania czujnika 2D RPLidar: a) widok pachołków, b) wizualizacja pachołków wykonana za pomocą czujnika (widok z góry)



Rys. 9.3. Przykład działania czujnika 3D VLP16: a) widok rośliny, b) wizualizacja rośliny wykonana za pomocą czujnika (widok z przodu)

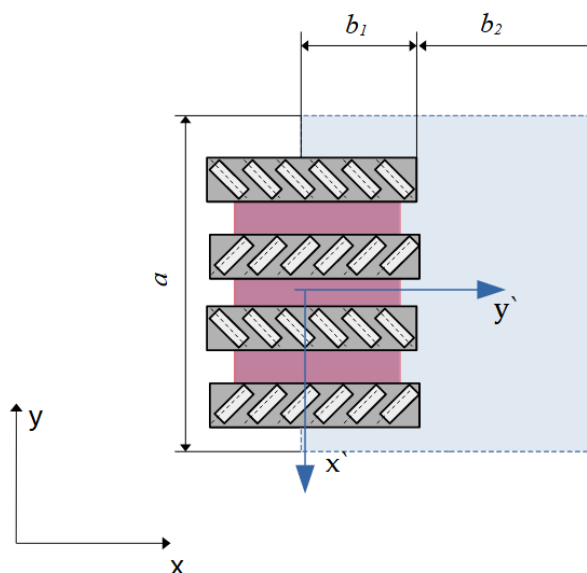
Pojazd OMP2024_2 wyposażono w czujnik RPLidar, który dostarcza dane 2D o otaczającej przestrzeni. Zasięg czujnik to około 12 m, częstotliwość odświeżania to około 10 Hz.

Schemat blokowy działania modułu wykrywania przeszkód przedstawiono na rys. 9.4.

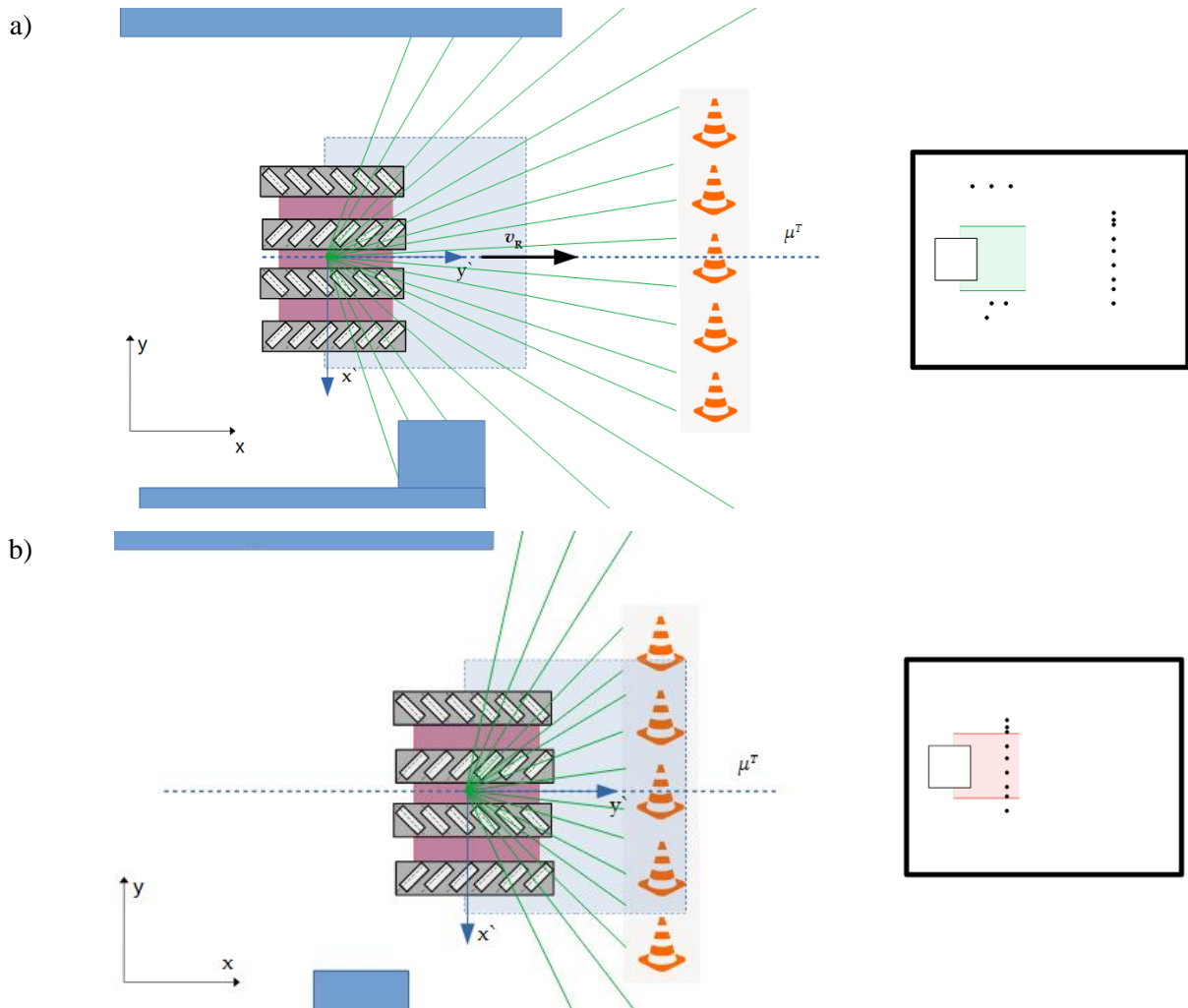


Rys. 9.4. Schemat blokowy modułu wykrywania przeszkód opartego o lidar

W czasie eksperymentu pojazd porusza się po zadanej trajektorii μ^T . Podczas ruchu lidar dostarcza do układu sterowania informacje o otaczających obiektach. Na podstawie otrzymanego skanu program sterujący wylicza, czy w przedniej strefie robota nie znajduje się przeszkoda. Jako przednią strefę robota zdefiniowano obszar o szerokości $a = 2$ m, obejmujący $b_1 = 0,5$ m przestrzeni bocznej pojazdu oraz $b_2 = 1$ m przestrzeni przed OMP2024_2 (rys. 9.5). Robot realizuje zadaną trajektorię, do czasu aż w wyznaczonej strefie zostanie wykryta przeszkoda, wtedy zatrzymuje się. Na rys. 9.6 przedstawiono schemat działania modułu wykrywania przeszkód



Rys. 9.5. Strefy wykrywania przeszkód OMP2024_2 wyznaczone na potrzeby modułu wykrywania przeszkód



Rys. 9.6. Schemat działania modułu wykrywania przeszkód wraz z wizualizacją danych rejestrowanych przez lidar: a) podczas wykonywania ruchu po trajektorii μ^T , b) po napotkaniu przeszkody

Test modułu wykrywania przeszkód polegał na wykonaniu przejazdu prostoliniową trajektorią μ^T . Na drodze OMP2024_2, w odległości 2 m od punktu startu znajdowały się przeszkody. Zadaniem robota było zatrzymać się, zanim w nie uderzy. Na rys. 9.7 przedstawiono widoki stanowiska pomiarowego wraz z pojazdem. Na rys. 9.8 zestawiono widoki z programu obliczającego położenie wykrytych przeszkód z odpowiadającymi im widokami pojazdu OMP2024_2 wykonującego przejazd testowy. W początkowej fazie ruchu (rys. 9.8a) pojazd w swojej strefie wykrywania nie wykrywa przeszkód, dlatego może rozpocząć ruch. W trakcie wykonywania ruchu (rys. 9.8.b) wizualizacja strefy wykrywania robota zaznaczona jest na zielono, co oznacza że nadal nie wykryto w niej przeszkód. Gdy robot natrafia na przeszkodę (rys. 9.8c) wizualizacja strefy wykrywania zmienia kolor na czerwony, a robot przerywa ruch.

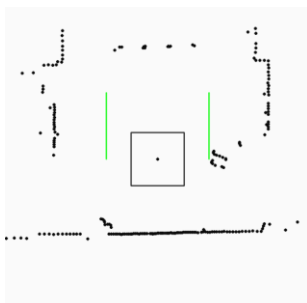


Rys. 9.7. Widoki pojazd OMP2024_2 na stanowisku do wykrywania przeszkód

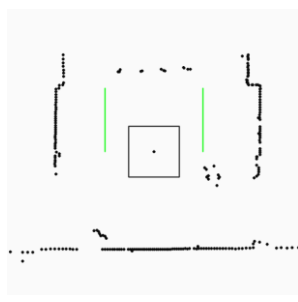
Widok programu obliczającego położenie przeszkód

Widok OMP2024_2

a)



b)



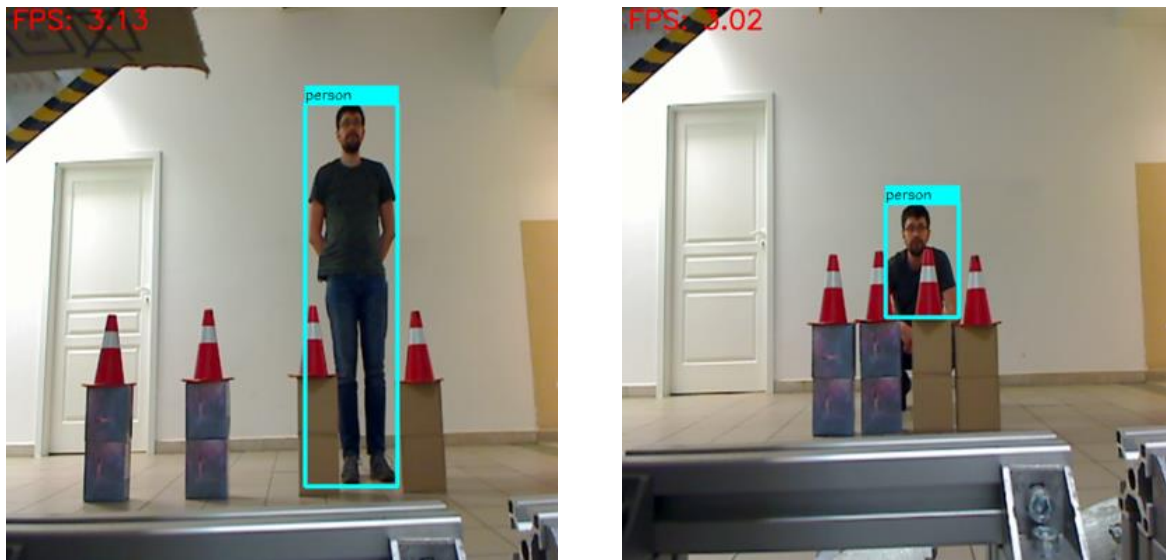
c)



Rys. 9.8. Wizualizacje otoczenia wygenerowane przez moduł wykrywania przeszkód uruchomiony na OMP2024_2 wraz z odpowiadającymi im klatkami z nagranego przejazdu OMP2024_2

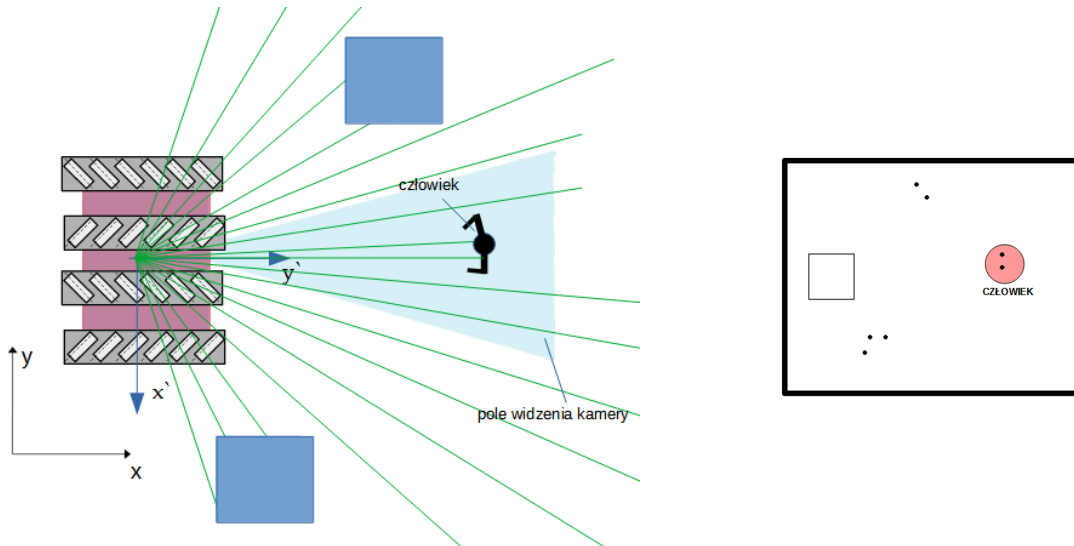
Stosując dodatkowe czujniki, takie jak kamera RGB bądź kamera termowizyjna, oprócz wykrywania nieruchomych przeszkód możliwa jest również ich identyfikacja. Jednym z najpopularniejszych sposobów rozpoznawania obiektów na obrazach są sieci neuronowe. Przykład sieci, która umożliwia wykrywanie i klasyfikację obiektów na obrazach jest należąca do rodziny *You Only Look Once*

(YOLO) (tłumaczenie: *patrzysz tylko raz*) sieć neuronowa *YOLOv5*. Działanie tej sieci, na przykładzie wykrycia i identyfikacji na obrazie sylwetek ludzkich przedstawiono na rys. 9.9.



Rys. 9.9. Sylwetki ludzkie, widoczne w całości bądź częściowo przesłonięte, wykryte przez *YOLOv5*

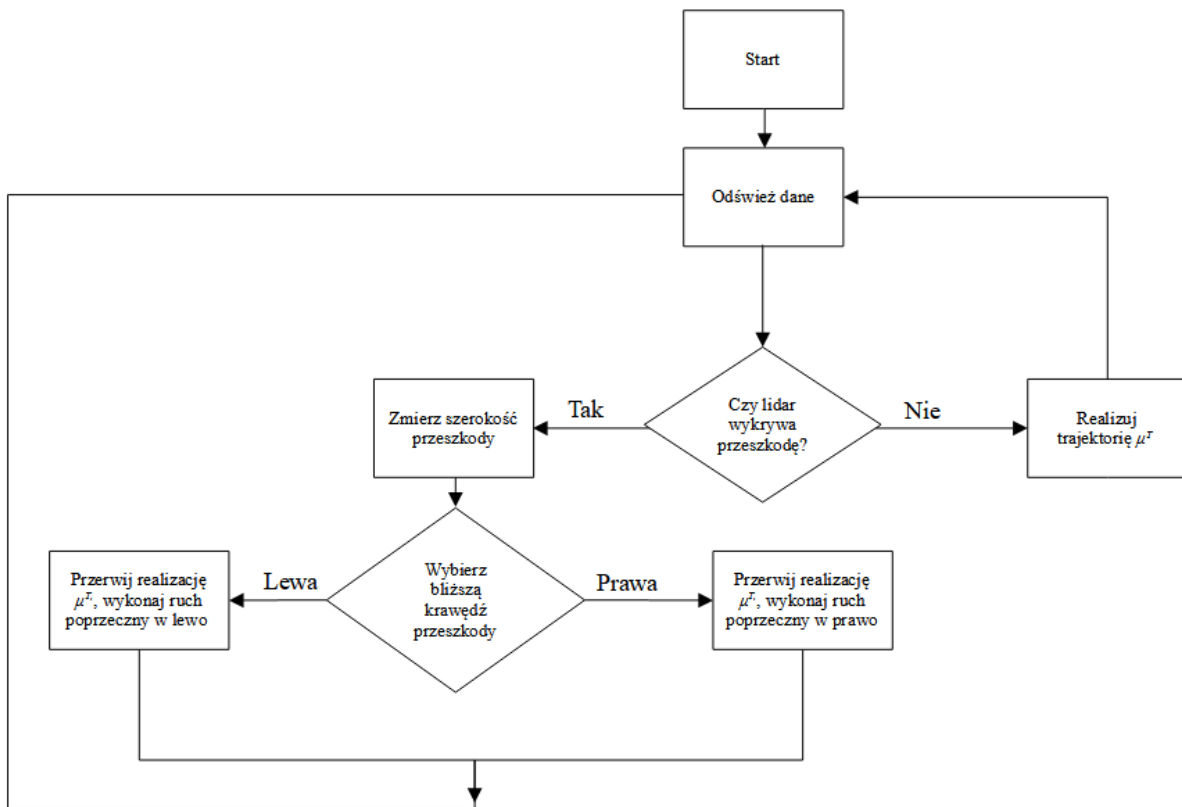
W odpowiedni sposób łącząc dane z jednej bądź kilku kamer RGB oraz lidara możliwe byłoby wygenerowanie mapy z zaznaczonymi sylwetkami ludzi, co mogłoby być szczególnie przydatne dla operatora pojazdu omnigąsienicowego podczas poruszania się w środowisku zurbanizowanym. Koncepcję takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 9.10.



Rys. 9.10. Koncepcja modułu oznaczającego sylwetki ludzi na skanie 2D na podstawie danych z kamery RGB wraz z przykładem wizualizacji tych danych

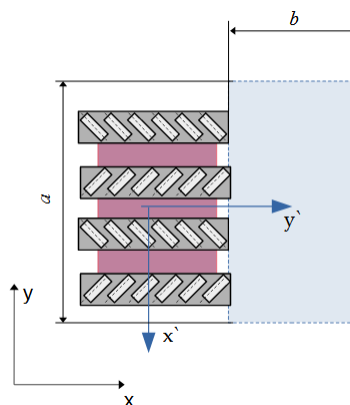
9.2 Omijanie przeszkód

Dane rejestrowane przez lidar mogą posłużyć również do planowania trajektorii ruchu i wyboru optymalnej ścieżki omijania przeszkody. Koncepcja ta jest rozwinięciem modułu opisanego w podrozdziale 9.1. Działanie modułu omijania przeszkód polega na cyklicznym monitorowaniu przedniej strefy przed OMP20224_2 w trakcie jazdy. Schemat blokowy modułu omijania przeszkód przedstawiono na rys. 9.11.

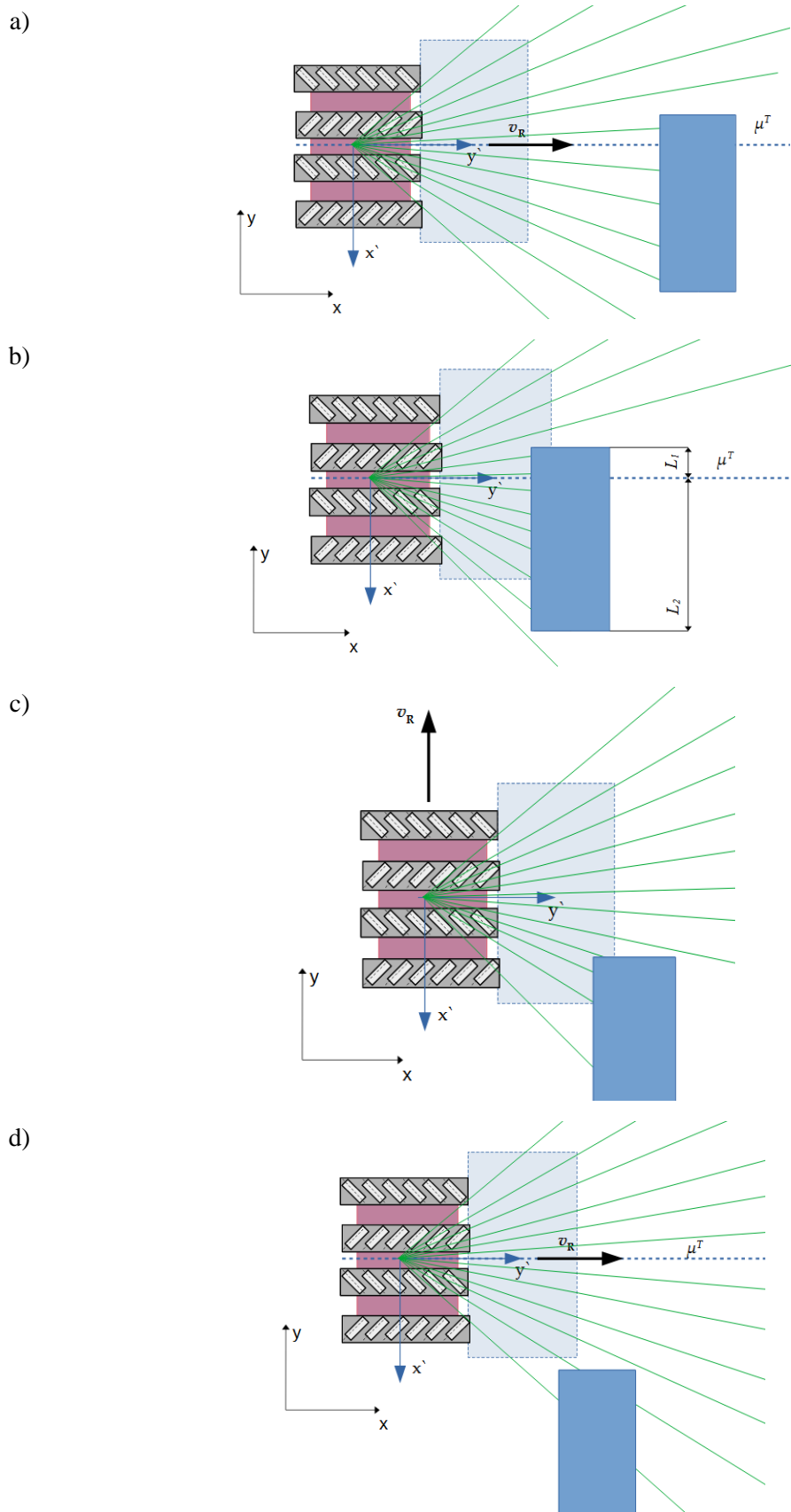


Rys. 9.11. Schemat blokowy modułu omijania przeszkód opartego o lidar

Jeśli podczas ruchu po trajektorii μ^T (rys. 9.13 a) w strefie o wymiarach $a = 0,8 \text{ m} \times b = 1,4 \text{ m}$ (rys. 9.12) wykryta zostanie przeszkoda uruchamiany jest algorytm wyszukujący najlepszą drogę do jej ominięcia. Na podstawie skanu z lidara moduł przelicza jak szeroka jest przeszkoda. Następnie znając aktualną pozycję pojazdu względem przeszkody wybierany jest kierunek L_1 bądź L_2 , który umożliwi najszybsze ominięcie przeszkody (rys. 9.13 b). Robot zaczyna poruszać się ruchem wzdłuż swojej osi poprzecznej, w wyznaczonym kierunku (rys. 9.13 c). Jeśli w przedniej strefie robota nie będzie już przeszkód, OMP2024_2 będzie kontynuował jazdę w zadanym kierunku (rys. 9.13 d). Na rys. 9.13 przedstawiono schemat działania modułu omijania przeszkód.

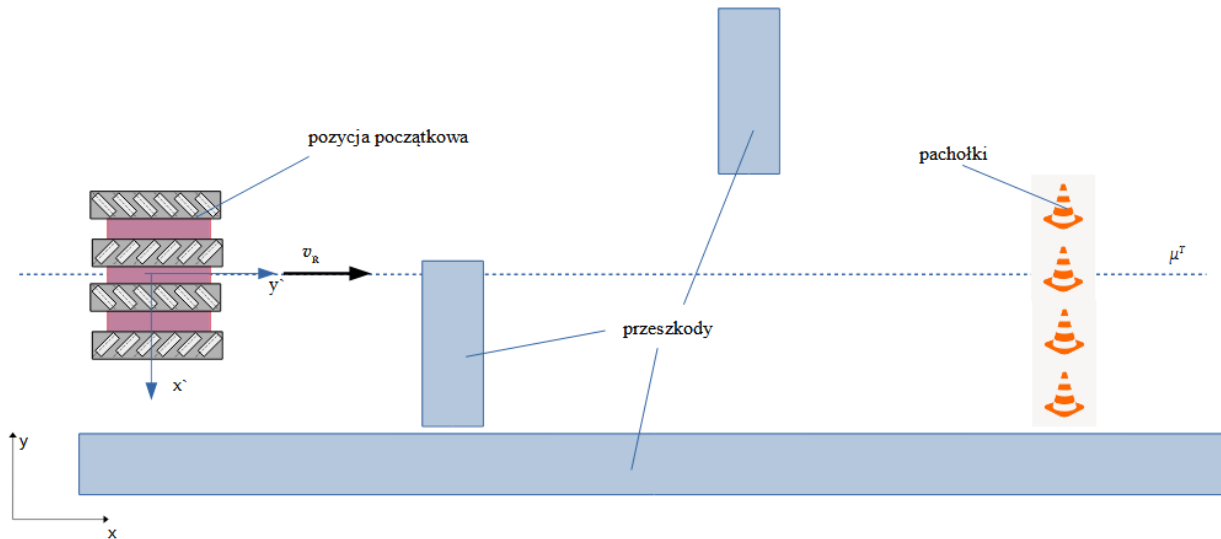


Rys. 9.12. Strefy wykrywania przeszkód OMP2024_2 wyznaczone na potrzeby modułu omijania przeszkód



Rys. 9.13. Schemat działania modułu dynamicznego omijania przeszkód: a) ruch po trajektorii μ^T , b) wykrycie przeszkody w przedniej strefie robota, określenie możliwych dróg omijęcia przeszkody, c) przerwanie realizacji trajektorii μ^T , omijanie przeszkody, d) ruch po trajektorii μ^T

Badanie modułu omijania przeszkód polegało na wykonaniu przejazdu po zaplanowanej, prostoliniowej trajektorii μ^T . Na drodze OMP2024_2 znajdowały się przeszkody, które robot miał za zadanie ominąć. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 9.14. Widoki rzeczywistego stanowiska wraz z pojazdem OMP2024_2 przedstawiono na rys. 9.15.



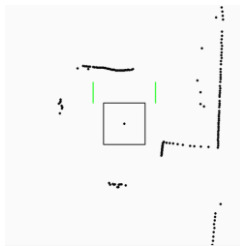
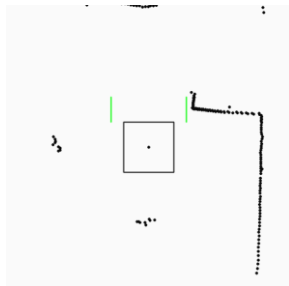
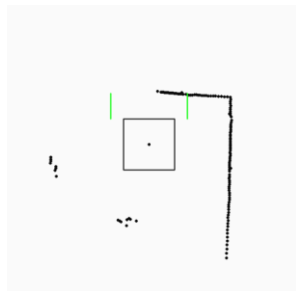
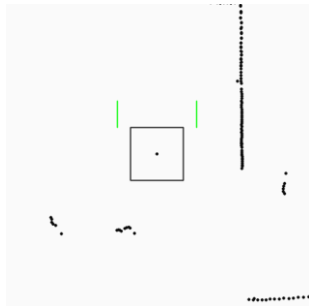
Rys. 9.14. Schemat stanowiska do omijania przeszkód



Rys. 9.15. Widoki stanowiska do omijania przeszkód wraz z robotem OMP2024_2

Na rys. 9.16 przedstawiono widoki programu sterującego omijaniem przeszkód wraz z odpowiadającymi im widokami OMP2024_2 podczas przejazdu testowego.

Widok programu obliczającego położenie przeszkód

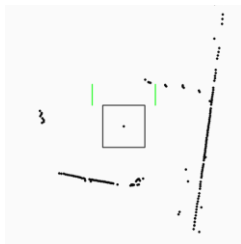
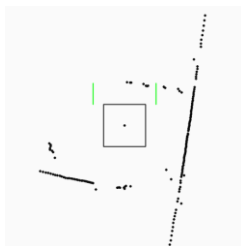
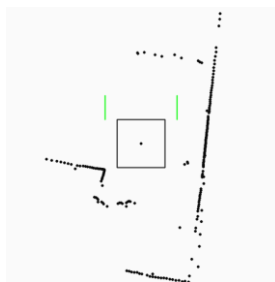


Widok OMP2024_2



Rys. 9.16. Wizualizacje otoczenia wygenerowane przez moduł omijania przeszkód uruchomiony na OMP2024_2 wraz z odpowiadającymi im klatkami z nagranego przejazdu OMP2024_2

Widok programu obliczającego położenie przeszkód

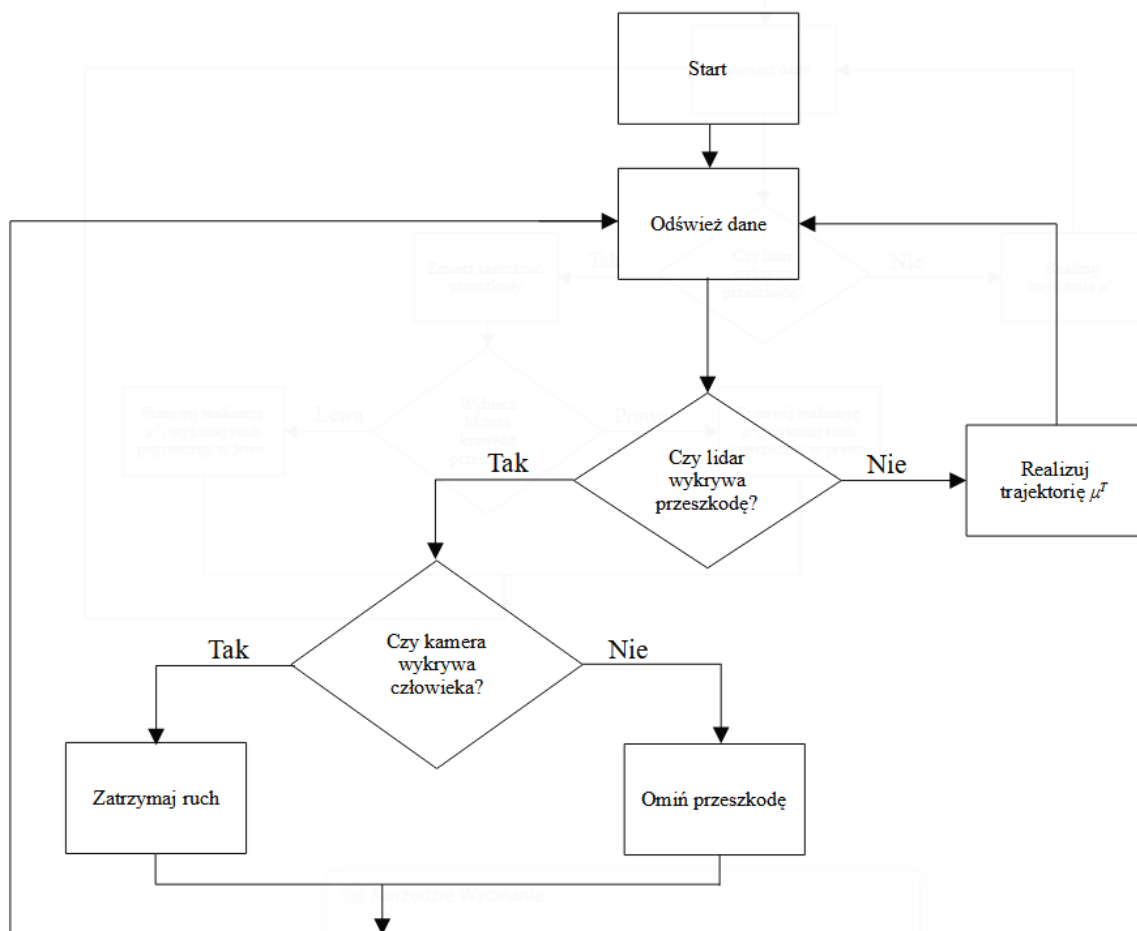


Widok OMP2024_2



Rys. 9.16. Ciąg dalszy. Wizualizacje otoczenia wygenerowane przez moduł omijania przeszkód uruchomiony na OMP2024_2 wraz z odpowiadającymi im klatkami z nagranego przejazdu OMP2024_2

Na podstawie modułów wykrywania ludzi, oraz omijania przeszkód opracowano koncepcję modułu umożliwiającego autonomiczną realizację zadanej trajektorii ruchu, którego schemat przedstawiono na rys. 9.17. Zadaniem modułu jest pokonywanie wyznaczonej trajektorii, przy jednoczesnej analizie danych o otoczeniu dostarczanych przez czujniki pokładowe.



Rys. 9.17. Schemat modułu autonomicznej realizacji trajektorii μ^T

Robot realizuje zadaną trajektorię do momentu wykrycia przeszkody. Wtedy, na podstawie danych dostarczonych przez kamerę RGB podejmowana jest decyzja o dalszym działaniu. Jeśli kamera wykrywa sylwetkę człowieka, robot zatrzymuje się i czeka, aż człowiek odejdzie. W momencie gdy człowiek zniknie z pola widzenia kamery uruchamiany jest moduł omijania przeszkody. Po ominięciu przeszkody robot wraca do realizacji trajektorii μ^T .

9.3 Koncepcja implementacji modułów rozpoznawania otoczenia

Przedstawione moduły umożliwiają akwizycję i interpretację danych dotyczących otoczenia, w którym operuje OMP2024_2. Moduły te można zaimplementować na różne sposoby, w zależności od potrzeb. Podczas teleoperacji opracowane moduły mogą działać poza układem sterowania, ograniczając się do dostarczania danych. Dzięki temu mogą w znaczący sposób zwiększyć zakres informacji o otoczeniu w przypadku działania OMP2024_2 poza zasięgiem wzroku operatora, ułatwiając mu sterowanie, czy ostrzegając o potencjalnych kolizjach. Możliwe jest także włączenie modułów rozpoznawania otoczenia do programu odpowiadającego za sterowanie OMP2024_2 niezależnie od tego, czy robot sterowany jest przez operatora, czy działa w trybie autonomicznym. Przy takim podejściu, gdy moduł rozpoznający otoczenie wykryje przeszkodę, system sterujący przerwie realizację aktualnego zadania, bądź uniemożliwi operatorowi dalsze sterowanie robotem i w zależności od programu, może rozpocząć procedurę omijania przeszkody, bądź zatrzymać OMP2024_2 i uniemożliwić jego dalszy ruch do momentu usunięcia przeszkody.

10. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy doktorskiej poruszono zagadnienia dotyczące projektowania i sterowania pojazdami omnigąsienicowymi wyposażonymi w gąsienice całkowicie zachodzące. Cel pracy, jak również cele pośrednie postawione w rozdz. 1.5 zostały w pełni zrealizowane. W poszczególnych rozdziałach przedstawiono opracowane i wykorzystane metody oraz badania, na podstawie których przygotowano elementy pracy doktorskiej.

W rozdziale pierwszym scharakteryzowano zastosowania i podział robotów mobilnych. Przedstawiono istniejące rodzaje podwozi robotów i pojazdów mobilnych, ze szczególnym uwzględnieniem podwozi pojazdów omniskierunkowych. Powołując się na źródła opisano luki badawcze w wiedzy dotyczącej pojazdów wyposażonych w omnigąsienicowy układ napędowy.

Rozdział drugi zawiera zagadnienia dotyczące aspektów konstrukcyjnych typowego pojazdu omnigąsienicowego. Przedstawiono jego zasadę działania, a także cechy wspólne i różnice w odniesieniu do typowego podwozia gąsienicowego.

W rozdziale trzecim opisana została metoda analizy kinematycznej omnigąsienicowych układów bieżnych w układzie gąsienic równoległych całkowicie zachodzących. Zbudowano i opisano model kinematyczny, który pozwala powiązać prędkość liniową poszczególnych gąsienic z wynikową prędkością korpusu pojazdu omnigąsienicowego. Zaprezentowano równania, umożliwiające wyznaczenie prędkości liniowej v_R punktu R znajdującego się na korpusie, a także orientacji kątowej γ wektora prędkości v_R . W rozdziale tym przedstawiono również symulację dynamiczną pojazdu omnigąsienicowego. W rozdziale tym spełniono cel pośredni polegający na opracowaniu metody analizy kinematycznej układu jazdy pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach całkowicie zachodzących, a także cel dotyczący budowy modelu obliczeniowego i badań dynamiki pojazdu omnigąsienicowego.

Rozdziały czwarty i piąty dotyczyły budowy i badań pojazdu omnigąsienicowego OMP2024_1. Przedstawiono proces projektowania i budowy tego prototypu oraz opisano algorytmy sterowania. Przeprowadzono badania eksperymentalne jazdy pojazdu OMP2024_1, polegające na wykonaniu szeregu przejazdów testowych wzdłuż zadanych trajektorii, które zarejestrowano zewnętrznym systemem pomiarowym. Badania te umożliwiły pomiar zjawiska zakrzywienia trajektorii ruchu. Następnie zaproponowano algorytm korekcji statycznej umożliwiający poprawę własności jezdnych badanego pojazdu, poprzez korektę zakrzywienia trajektorii. Algorytm ten, na podstawie zidentyfikowanych własności obiektu pozwalał na wyliczenie wartości poprawki, która uwzględniona w algorytmie sterowania zmniejszała zjawisko odchylenia trajektorii podczas ruchu w zdefiniowanym

kierunku, po wybranym rodzaju podłoża. Skuteczność przedstawionego rozwiązania zweryfikowano doświadczalnie.

Rozdział szósty dotyczył badań oporów ruchu pomiędzy rolką toczną a podłożem. W rozdziale tym przedstawiono stanowisko pomiarowe umożliwiające pomiar sił oporów ruchu wzdłużnego i poprzecznego występujących pomiędzy wybranym typem podłoża, a przeciąganą rolką toczną. Stanowisko to pozwoliło na zbadanie wpływu kształtu rolki tocznej, prędkości ruchu, kąta orientacji α , obciążenia oraz rodzaju podłoża na występujące siły tarcia.

W rozdziałach siódmym i ósmym opisano pojazd OMP2024_2. Przedstawiono metodykę projektowania pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących, realizując cel pośredni dotyczący opracowania metody projektowania pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach całkowicie zachodzących. Opisano przyjęte założenia konstrukcyjne, scharakteryzowano budowę układu sterowania. Zaprojektowany i wykonany pojazd różnił się od OMP2024_1. Robot OMP2024_2 wyposażono w dodatkowe czujniki, umożliwiające rejestrację orientacji kątowej korpusu, a także układy bieżne z dodatkowymi kołami jezdnyymi, zapewniające lepszy rozkład nacisku na podłoże. Ponadto opracowano metodę korekcji dynamicznej kierunku jazdy, będącej usprawnioną wersją metody opisanej w rozdz. 5. W ten sposób zrealizowano cel pośredni dotyczący opracowania metod kompensacji zakrzywienia trajektorii ruchu pojazdu omnigąsienicowego o gąsienicach całkowicie zachodzących. Dzięki zastosowaniu korekcji dynamicznej możliwe jest wykonywanie jazdy pojazdem omnigąsienicowym po różnych podłożach, bez konieczności ich wcześniejszej weryfikacji. Dzięki zastosowaniu dodatkowego czujnika orientacji kątowej pojazd omnigąsienicowy jest w stanie na bieżąco korygować kierunek swojego ruchu. W tej części pracy przedstawiono badania jazdy robota OMP2024_2 rejestrowane dzięki zewnętrznemu systemowi wizyjnemu, polegające na wykonaniu szeregu przejazdów testowych z aktywnym oraz wyłączonym modułem dynamicznej korekcji kierunku. Badania te przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych pojazdu OMP2024_2 w warunkach rzeczywistych. Badania te polegały na wykonaniu przejazdów testowych przy jednoczesnej rejestracji orientacji kątowej korpusu, zarówno z wyłączonym, jak i włączonym modułem dynamicznej korekcji kierunku jazdy.

Rozdział dziewiąty dotyczył systemów wizyjnych robota OMP2024_2. W rozdziale tym scharakteryzowano czujniki optyczne, które znajdują zastosowanie w robotyce mobilnej. Przedstawiono opracowane moduły, które na podstawie danych ze skanera przestrzeni oraz kamery RGB umożliwiają reagowanie na zmieniające się otoczenie robota. Przedstawiono moduły umożliwiające detekcję przeszkód, rozpoznawanie sylwetek ludzi na obrazie oraz omijanie wykrytych przeszkód. Ponadto zaproponowano koncepcję systemów o wyższym stopniu złożoności, które działają w oparciu o dane zgromadzone z kilku źródeł. Rozdziałem tym wypełniono cel pośredni polegający na zrealizowaniu badań stanowiskowych wykrywania i omijania przeszkód przez pojazd o gąsienicach równoległych, całkowicie zachodzących, na podstawie danych uzyskanych z systemu wizyjnego.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że przedstawiony moduł aktywnej korekcji kierunku jazdy pozytywnie wpływa na jakość odwzorowywania trajektorii ruchu pojazdu omnigąsienicowego. Moduł ten w znaczący sposób zmniejsza lub całkowicie eliminuje niepożądaną zmianę orientacji kątowej korpusu pojazdu podczas ruchu. Badania przedstawione w rozdziale ósmym wykazały, że zaproponowany układ sterowania napędami działa poprawnie podczas ruchu po utwardzonej nawierzchni, jednak w przypadku ruchu po podłożu piaszczystym uzyskiwane efekty nie są w pełni zadowalające. Może to wskazywać na konieczność przeprojektowania algorytmów sterujących, na przykład na zastosowanie adaptacyjnego algorytmu doboru nastaw regulatora PID bądź ich bezpośredniej zmiany.

Aktualnie prowadzone są prace, których celem jest opracowanie algorytmu umożliwiającego rekonstrukcję trajektorii, którą poruszał się pojazd omniskierunkowy. Algorytm na podstawie wskazań czujników pokładowych (kąta orientacji φ dostarczanego przez IMU, prędkości zadanej v_R , oraz wskazań enkoderów) ma umożliwić odtworzenie trajektorii ruchu pojazdu. Dzięki temu możliwe byłoby odwzorowywanie trajektorii pokonanej przez pojazd omniskierunkowy w rzeczywistym terenie, w którym montaż nieruchomego układu pomiarowego jest utrudniony. Niestety, zaproponowana wersja algorytmu nie odwzorowuje trajektorii w zadowalający sposób. Rozbieżności w przebytych dystansie wynikają z poślizgów pomiędzy podłożem a gąsienicami. W przyszłości wartość prędkości zadanej zostanie skorygowana o wartości wyliczone na podstawie żyroskopu oraz akcelerometru, co prawdopodobnie poprawi jakość odwzorowywania trajektorii.

Kolejne, planowane etapy badań będą koncentrowały się na dalszej analizie zjawiska odchylenia trajektorii. Planowane są badania wpływu kąta orientacji rolek tocznych α w poszczególnych układach bieżnych na to zjawisko. Rozważa się sprawdzenie wpływu prędkości liniowej poszczególnych gąsienic, a także ich wzajemnego usytuowania na występowanie zjawiska zakrzywienia trajektorii. Planowane są również badania dotyczące możliwości wykorzystania robota omniskierunkowego do zadań związanych z inspekcją oraz transportem. Badania te mają umożliwić sprawdzenie zdolności pojazdu omniskierunkowego do pokonywania przeszkód terenowych. Ponadto, opracowane i przetestowane zostaną scenariusze autonomicznego działania robota omniskierunkowego, obejmujące na przykład transport ładunku pomiędzy dwoma punktami w budynku, czy cykliczne patrolowanie przestrzeni wokół oraz wewnątrz budynku, realizowane poprzez poruszanie się po wyznaczonej trajektorii.

11. Bibliografia

- [1] Markets and Markets (2023). Mobile Robots Market by Type (Professional and Personal & Domestic Robots), Application (Agricultural, Cleaning, Educational, Healthcare, Manufacturing, Warehousing & Logistics) and Region (North America, Europe, APC, ROW) - Global Forecast to 2028. Markets and Markets SE3610; 07.2023
- [2] Hasan, K. M., & Reza, K. J. (2014, May). Path planning algorithm development for autonomous vacuum cleaner robots. In 2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) (pp. 1-6). IEEE
- [3] Grossi, N., Fontanelli, M., Garramone, E., Peruzzi, A., Raffaelli, M., Pirchio, M., ... & Volterrani, M. (2016). Autonomous mower saves energy and improves quality of tall fescue lawn. *HortTechnology*, 26(6), 825-830
- [4] Yang, B., Li, W., Wang, J., Yang, J., Wang, T., & Liu, X. (2020). A novel path planning algorithm for warehouse robots based on a two-dimensional grid model. *IEEE Access*, 8, 80347-80357.
- [5] Vis, I. F. (2006). Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European journal of operational research*, 170(3), 677-709
- [6] D'Andrea, R. (2012). Guest editorial: A revolution in the warehouse: A retrospective on kiva systems and the grand challenges ahead. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(4), 638-639
- [7] Pinkam, N., Bonnet, F., & Chong, N. Y. (2016, October). Robot collaboration in warehouse. In 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (pp. 269-272). IEEE
- [8] Cho, J. H., & Kim, Y. T. (2017). Design of autonomous logistics transportation robot system with fork-type lifter. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 17(3), 177-186
- [9] Lee, H. Y., & Murray, C. C. (2019). Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. *International Journal of Production Research*, 57(18), 5821-5841
- [10] Zuin, S., Hanson, R., Battini, D., & Persona, A. (2020). Design of AGV systems in working environments shared with humans: a multi case study. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10603-10608
- [11] Cheong, A., Lau, M. W. S., Foo, E., Hedley, J., & Bo, J. W. (2016). Development of a robotic waiter system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(21), 681-686

- [12] Ripel, T., Hrbáček, J., & Krejsa, J. (2011). Design of the Frame for Autonomous Mobile Robot with Ackerman Platform. *Proceedings Engineering Mechanics*, 515-518
- [13] Kiraga, M., Samsel, Z., & Indurkha, B. (2023, December). A field study on Polish customers' attitude towards a service robot in a cafe. In *International Conference on Social Robotics* (pp. 294-307). Singapore: Springer Nature Singapore
- [14] Filipescu, A., Minzu, V., Dumitrascu, B., Filipescu, A., & Minca, E. (2011, June). Trajectory-tracking and discrete-time sliding-mode control of wheeled mobile robots. In *2011 IEEE International Conference on Information and Automation* (pp. 27-32). IEEE
- [15] Schmitz, N., Proetzsch, M., & Berns, K. (2006). Pose estimation in rough terrain for the outdoor vehicle raven. *VDI BERICHTE*, 1956, 181.
- [16] Teller, S., Walter, M. R., Antone, M., Correa, A., Davis, R., Fletcher, L., ... & Sainath, T. (2010, May). A voice-commandable robotic forklift working alongside humans in minimally-prepared outdoor environments. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 526-533). IEEE
- [17] Clauer, D., Fottner, J., Rauch, E., & Prüglmeier, M. (2021). Usage of autonomous mobile robots outdoors-an axiomatic design approach. *Procedia CIRP*, 96, 242-247
- [18] Fehling, C., & Saraceni, A. (2023). Technical and legal critical success factors: Feasibility of drones & AGV in the last-mile-delivery. *Research in Transportation Business & Management*, 50, 101029
- [19] Vougioukas, S. G. (2019). Agricultural robotics. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 2, 365-392
- [20] Fountas, S., Mylonas, N., Malounas, I., Rodias, E., Hellmann Santos, C., & Pekkeriet, E. (2020). Agricultural robotics for field operations. *Sensors*, 20(9), 2672
- [21] Alberto-Rodriguez, A., Neri-Muñoz, M., Fernández, J. C. R., Márquez-Vera, M. A., Velasco, L. E. R., Díaz-Parra, O., & Hernández-Huerta, E. (2020). Review of control on agricultural robot tractors. *Int. J. Comb. Optim. Probl. Informatics*, 11(3), 9-20
- [22] Noguchi, N., & Barawid Jr, O. C. (2011). Robot farming system using multiple robot tractors in Japan agriculture. *IFAC Proceedings volumes*, 44(1), 633-637
- [23] Åstrand, B., & Baerveldt, A. J. (2002). An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. *Autonomous robots*, 13, 21-35
- [24] Machleb, J., Peteinatos, G. G., Kollenda, B. L., Andújar, D., & Gerhards, R. (2020). Sensor-based mechanical weed control: Present state and prospects. *Computers and electronics in agriculture*, 176, 10563
- [25] Utstumo, T., Urdal, F., Brevik, A., Dørum, J., Netland, J., Overskeid, Ø., ... & Gravdahl, J. T. (2018). Robotic in-row weed control in vegetables. *Computers and electronics in agriculture*, 154, 36-45
- [26] Tang, Y., Chen, M., Wang, C., Luo, L., Li, J., Lian, G., & Zou, X. (2020). Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: A review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 510
- [27] Bogue, R. (2016). Robots poised to revolutionise agriculture. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(5), 450-456

- [28] Basu, S., Omotubora, A., Beeson, M., & Fox, C. (2020). Legal framework for small autonomous agricultural robots. *Ai & Society*, 35, 113-134
- [29] Piza, E. L., Welsh, B. C., Farrington, D. P., & Thomas, A. L. (2019). CCTV surveillance for crime prevention: A 40-year systematic review with meta-analysis. *Criminology & public policy*, 18(1), 135-159
- [30] Ullah, R., Hayat, H., Siddiqui, A. A., Siddiqui, U. A., Khan, J., Ullah, F., ... & Karami, G. M. (2022). A real-time framework for human face detection and recognition in cctv images. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022
- [31] Sarfraz, M. S., Shahzad, A., Elahi, M. A., Fraz, M., Zafar, I., & Edirisinghe, E. A. (2013). Real-time automatic license plate recognition for CCTV forensic applications. *Journal of real-time image processing*, 8, 285-295
- [32] Guo, R., Li, B., Sun, Y., & Han, L. (2009, August). A patrol robot for electric power substation. In *2009 International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 55-59). IEEE
- [33] Portugal, D., & Rocha, R. P. (2016). Cooperative multi-robot patrol with Bayesian learning. *Autonomous Robots*, 40(5), 929-953
- [34] Mittal, S., & Rai, J. K. (2016, July). Wadoro: An autonomous mobile robot for surveillance. In *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)* (pp. 1-6). IEEE
- [35] Prassler, E., Ritter, A., Schaeffer, C., & Fiorini, P. (2000). A short history of cleaning robots. *Autonomous Robots*, 9, 211-226
- [36] Asafa, T. B., Afonja, T. M., Olaniyan, E. A., & Alade, H. O. (2018). Development of a vacuum cleaner robot. *Alexandria engineering journal*, 57(4), 2911-2920
- [37] Fink, J., Bauwens, V., Kaplan, F., & Dillenbourg, P. (2013). Living with a vacuum cleaning robot: A 6-month ethnographic study. *International Journal of Social Robotics*, 5, 389-40
- [38] Kemp, C. C., Edsinger, A., Clever, H. M., & Matulevich, B. (2022, May). The design of stretch: A compact, lightweight mobile manipulator for indoor human environments. In *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 3150-3157). IEEE
- [39] Voth, D. (2004). A new generation of military robots. *IEEE Intelligent Systems*, 19(4), 2-3
- [40] Villar, V. (2016). Unmanned Ground Systems in Future Warfare. *Digital Infantry Battlefield Solution*, 23
- [41] Szykarczyk, P. (2005). Neutralising and assisting robot SMR-100 Expert–design problematics. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 87-92
- [42] Czaplá, T., & Wrona, J. (2013). Technology development of military applications of unmanned ground vehicles. In *Vision Based Systems for UAV Applications* (pp. 293-309). Heidelberg: Springer International Publishing
- [43] Thornhill, L., Walls, A., Arkin, R., Beno, J., Bergh, C., Bresie, D., ... & Waldron, K. (2003, December). Design of an Agile Unmanned Combat Vehicle-A Product of the DARPA UGCV Program. In *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*
- [44] Ha, Q. P., Yen, L., & Balaguer, C. (2019). Robotic autonomous systems for earthmoving in military applications. *Automation in Construction*, 107, 102934

- [45] Santoso, F., & Finn, A. (2023). Trusted Operations of a Military Ground Robot in the Face of Man-in-the-Middle Cyber-Attacks Using Deep Learning Convolutional Neural Networks: Real-Time Experimental Outcomes. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*
- [46] Hellström, T. (2013). On the moral responsibility of military robots. *Ethics and information technology, 15*, 99-107
- [47] Singer, P. W. (2009). Military robots and the laws of war. *The New Atlantis, (23)*, 25-45
- [48] HARPER, J. (2020). ROBOTIC COMBAT VEHICLES. *National Defense, 104(797)*, 26-31
- [49] Wu, H., Li, H., Fang, X., & Luo, X. (2022). A survey on teaching workplace skills to construction robots. *Expert Systems with Applications, 205*, 117658
- [50] Melenbrink, N., Werfel, J., & Menges, A. (2020). On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. *Automation in construction, 119*, 103312
- [51] Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., & Gambao, E. (2013). Extending automation of building construction—Survey on potential sensor technologies and robotic applications. *Automation in construction, 36*, 168-178
- [52] Wos, P., Dindorf, R., & Takosoglu, J. (2021). Bricklaying Robot Lifting and Levelling System. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina, 23(4)*, B257-B264
- [53] Mu, Z., Liu, L., Jia, L., Zhang, L., Ding, N., & Wang, C. (2022). Intelligent demolition robot: Structural statics, collision detection, and dynamic control. *Automation in Construction, 142*, 104490
- [54] Derlukiewicz, D. (2019). Application of a design and construction method based on a study of user needs in the prevention of accidents involving operators of demolition robots. *Applied Sciences, 9(7)*, 1500
- [55] Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 16(2)*, 1729881419839596
- [56] Wong, J. Y., & Huang, W. (2006). “Wheels vs. tracks”—A fundamental evaluation from the traction perspective. *Journal of terramechanics, 43(1)*, 27-42
- [57] Tenreiro Machado, J. A., & Silva, M. (2006). An overview of legged robots. In *International Symposium on Mathematical Methods in Engineering* (pp. 1-40)
- [58] Bledt, G., Powell, M. J., Katz, B., Di Carlo, J., Wensing, P. M., & Kim, S. (2018, October). Mit cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 2245-2252). IEEE
- [59] Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., & Playter, R. (2008). Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes, 41(2)*, 10822-10825
- [60] Dębogórski, B., Fiedeń, M., Szrek, J., & Wodecki, J. (2023, May). A small legged robot for inspection purposes. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1189, No. 1, p. 012004). IOP Publishing
- [61] Hornback, P. The Wheel Versus Track Dilemma. *ARMOR 1998, 26*, 33–34
- [62] Sperzyński, P. G., Bałchanowski, J., & Gronowicz, A. (2020). Simulation of motion of a mobile robot on uneven terrain. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 58(2)*, 541-552

- [63] Gronowicz, A., & Szrek, J. (2009). Design of LegVan wheel-legged robot's mechanical and control system. In *SYROM 2009: Proceedings of the 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines, held in Brasov, Romania, october 12-15, 2009* (pp. 145-158). Springer Netherlands
- [64] Bałchanowski, J. (2016). Modelling and simulation studies on the mobile robot with self-leveling chassis. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54(1), 149-161
- [65] Mobility and stability of robots on rough terrain: modeling and control, Faïz BEN Amar i inni, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26, 2008
- [66] Zirong Luo, Jianzhong Shang, Guowu Wei, Lei Ren, A reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 128, 2018, Pages 16-32
- [67] Song, J. B., & Byun, K. S. (2004). Design and Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels. *Journal of Robotic Systems*, 21(4), 193-208
- [68] Watanabe, K. (1998, April). Control of an omnidirectional mobile robot. In *1998 Second International Conference. Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems. Proceedings KES'98 (Cat. No. 98EX111)* (Vol. 1, pp. 51-60). IEEE
- [69] West, A. M. T., & Asada, H. (1992). *Design of a holonomic omnidirectional vehicle* (Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering)
- [70] Doroftei, I., Grosu, V., & Spinu, V. (2007). *Omnidirectional mobile robot-design and implementation* (pp. 511-528). London, UK: INTECH Open Access Publisher.
- [71] Liu, Y., Zhu, J. J., Williams II, R. L., & Wu, J. (2008). Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization. *Robotics and autonomous systems*, 56(5), 461-479
- [72] Grabowiecki J., Vehicle wheel, US patent 1305535
- [73] Bae, J.-J.; Kang, N. Design Optimization of a Mecanum Wheel to Reduce Vertical Vibrations by the Consideration of Equivalent, Stiffness. *Shock. Vib.* 2016, 2016, 5892784
- [74] Li, Y.; Ge, S.; Dai, S.; Zhao, L.; Yan, X.; Zheng, Y.; Shi, Y. Kinematic Modeling of a Combined System of Multiple Mecanum-Wheeled Robots with Velocity Compensation. *Sensors* 2019, 20, 75
- [75] Samarasinghe, S. M. (2018). *Development and Balancing Control of an Active Omni-Wheeled Unicycle* (Doctoral dissertation, Asian Institute of Technology)
- [76] Liddiard W (2016). US 2016/0023511 A1,
- [77] Ferrière, L., & Raucant, B. (1998, May). ROLLMOBS, a new universal wheel concept. In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)* (Vol. 3, pp. 1877-1882). IEEE
- [78] Binugroho, E. H., Setiawan, A., Sadewa, Y., Amrulloh, P. H., Paramasastra, K., & Sudibyoy, R. W. (2021, September). Position and Orientation Control of Three Wheels Swerve Drive Mobile Robot Platform. In *2021 International Electronics Symposium (IES)* (pp. 669-674). IEEE
- [79] Park, K. P., Ham, S. H., Lee, W. Y., & Yoo, B. W. (2023). Development of transporter training simulator based on virtual reality and vehicle dynamics model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100547

- [80] Raj, L., & Czmerk, A. (2017). Modelling and simulation of the drivetrain of an omnidirectional mobile robot. *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, 58(2), 232-243
- [81] Killough, S. M., & Pin, F. G. (1991). *Design of an omnidirectional and holonomic wheeled platform prototype* (No. CONF-920540-7). Oak Ridge National Lab., TN (United States)
- [82] Taheri, H., Qiao, B., & Ghaeminezhad, N. (2015). Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot. *International journal of computer applications*, 113(3), 6-9
- [83] Nagarajan, U., Kantor, G., & Hollis, R. (2014). The ballbot: An omnidirectional balancing mobile robot. *The International Journal of Robotics Research*, 33(6), 917-930
- [84] Pokhrel, D., Luitel, N. R., Das, S., & Ray, D. N. (2013, December). Design and development of a spherical robot (spherobot). In *Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013), IIT Roorkee, India* (pp. 735-741)
- [85] Kim, D. Y., Kim, J. H., & Kim, D. (2017, June). Development of an omni-directional mobile base utilizing spherical robots as wheels. In *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)* (pp. 370-371). IEEE
- [86] Borroni-Bird, C. E., Vitale, R. L., Lee, C. J., Ambrose, R. O., Bluethmann, W. J., Junkin, L. Q., ... & Ridley, J. S. (2015). Modular robotic vehicle
- [87] Tadakuma, K., Takane, E., Fujita, M., Nomura, A., Komatsu, H., Konyo, M., & Tadokoro, S. (2017). Planar omnidirectional crawler mobile mechanism—development of actual mechanical prototype and basic experiments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1), 395-402
- [88] Takane, E., Tadakuma, K., Shimizu, T., Hayashi, S., Watanabe, M., Kagami, S., ... & Tadokoro, S. (2019, November). Basic Performance of Planar Omnidirectional Crawler During Direction Switching Using Disturbance Degree of Ground Evaluation Method. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 2732-2739). IEEE
- [89] Isoda, T., Chen, P., Mitsutake, S., & Toyota, T. (2002). Roller-Crawler Type of Omni-Directional Mobile Robor for Off-Road Running. *IEEE Trans. Robot. Autom*, 18, 251-256
- [90] Chen, P., Mitsutake, S., Isoda, T., & Shi, T. (2002). Omni-directional robot and adaptive control method for off-road running. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(2), 251-256.
- [91] Fang, Y., Zhang, Y., Li, N., & Shang, Y. (2020). Research on a medium-tracked omni-vehicle. *Mechanical Sciences*, 11(1), 137-152
- [92] Zhang, Y., Yang, H., & Fang, Y. (2018, September). Design and motion analysis of a novel track platform. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1074, No. 1, p. 012014). IOP Publishing
- [93] Zhang, Y., & Huang, T. (2015). Research on a tracked omnidirectional and cross-country vehicle. *Mechanism and Machine Theory*, 87, 18-44.
- [94] Hoppe, N., Kuznetsov, I., Uriarte, C., & Freitag, M. (2017). A New Omnidirectional Track Drive System for Off-Road Vehicles
- [95] Tadakuma, K., Tadakuma, R., Nagatani, K., Yoshida, K., & Iagnemma, K. (2008, September). Crawler mechanism with circular section to realize a sideling motion. In *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 2422-2428)

- [96] Tadakuma, K., Ming, A., Shimojo, M., Tadakuma, R., Nagatani, K., Yoshida, K., & Iagnemma, K. (2009, October). Basic running test of the cylindrical tracked vehicle with sideways mobility. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 1679-1684). IEEE
- [97] Tadakuma, K., Tadakuma, R., & Berengeres, J. (2007, October). Development of holonomic omnidirectional Vehicle with "Omni-Ball": Spherical wheels. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 33-39). IEEE.
- [98] Özdemir, M. N. (2016). Steering dynamics of tracked vehicles (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- [99] Szpaczyńska, D., & Łopatka, M. (2021). Analiza możliwości zastosowania elastomerowych systemów gaśnicowych w szybkobieżnych maszynach inżynierskich. Cz. 1, Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 70(1).
- [100] Miller, Stefan. "Teoria maszyn i mechanizmów." *Analiza układów kinematycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (1996).
- [101] Gronowicz, Antoni. (2003), Podstawy analizy układów kinematycznych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław* (2003).
- [102] Engström J., Richloow E., Wickström A. (2010). Modeling of Robotic Hand for Dynamic Simulation. Bachelor Thesis, School of Industrial Engineering and Management (ITM), MMKB 2010:23
- [103] Pasini D. (2019). Modelling of mobile vehicles for simulation and control. Master Degree Thesis, Politecnico di Torino
- [104] Guillén Ruiz, S.; Calderita, L.V. (2020). Hidalgo-Paniagua, A.; Bandera Rubio, J.P. Measuring Smoothness as a Factor for Efficient and Socially Accepted Robot Motion. *Sensors* 2020, 20, 6822
- [105] Fiedeń, M., & Bałchanowski, J. (2021). A Mobile Robot with Omnidirectional Tracks—Design and Experimental Research. *Applied Sciences*, 11(24), 11778
- [106] Fiedeń, M., & Bałchanowski, J. (2022). Badanie parametrów jazdy robota omnigąsienicowego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika*, 255-263
- [107] Szrek, J. (2023). Inspekcyjne Roboty Mobilne. Synteza, badania, aplikacje. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*

Źródła internetowe:

- [i1] <https://www.dvelocity.com/articles/50224-warehouse-robots-earn-their-diplomas> (Dostęp 16.01.2024)
- [i2] <https://tech-mate.pl/kerfus-carrefour-warszawa/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i3] <https://wiadomoscispozywcze.pl/artykuly/9465/robot-kelner-pojawi-sie-wnbsppizy-hut-siec-stawia-na-innowacje-wideo/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i4] <https://www.wiadomoscihandlowe.pl/najwieksze-sieci-handlowe/carrefour/kerfus-superstar-agencja-zbadala-fenomen-roboty-z-sieci-carrefour-2449907> (Dostęp 17.01.2024)
- [i5] <https://parametric-architecture.com/what-estonian-starship-robots-and-scooters-teach-us-about-our-relationship-with-technology/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i6] <https://profitechnika.pl/tag/ciagnik-autonomiczny-john-deere> (Dostęp 16.01.2024)

- [i7] <https://www.directindustry.com/prod/naio-technologies/product-177402-2087299.html> (Dostęp 16.01.2024)
- [i8] <https://www.agropolska.pl/aktualnosci/swiat/izrael-latajace-roboty-umozliwiaja-zbiory-przez-cala-dobe.716.html> (Dostęp 16.01.2024)
- [i9] <https://www.sad24.pl/technika/robot-do-zbioru-jablek-pracuje-30-szybciej-niz-przed-rokiem-kiedy-przescignie-czlowieka/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i10] <https://www.digitaltrends.com/news/security-robots-could-be-coming-to-a-school-near-you/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i11] https://smprobotics.com/application_autonomus_mobile_robots/robot-guard/ (Dostęp 16.01.2024)
- [i12] <https://www.fox4now.com/news/local-news/robots-taking-out-garbage> (Dostęp 16.01.2024)
- [i13] <https://www.komputerswiat.pl/artykuly/partnerskie/ewolucja-w-rytmie-roomby-jak-zmienialy-sie-inteligentne-roboty-sprzatajace/h4t05f5> (Dostęp 16.01.2024)
- [i14] <https://hello-robot.com/product> (Dostęp 16.01.2024)
- [i15] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Goliath_\(mina\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Goliath_(mina)) (Dostęp 16.01.2024)
- [i16] <https://miedzyrzecz.biz/aktualnosci/saperzy-na-emeryture-polski-robot-ktory-neutralizuje-bomby/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i17] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Teletank> (Dostęp 16.01.2024)
- [i18] <https://www.army-technology.com/projects/robotic-combat-vehicle-light-rcv-1/?cf-view> (Dostęp 16.01.2024)
- [i19] <https://www.biznesstransform.com/emaar-contracts-automated-robot-for-painting-at-forte-delivering-1000-sqft-per-hour/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i20] <https://techxplore.com/news/2017-04-bricklaying-robot-ergonomic-economic-impact.html> (Dostęp 16.01.2024)
- [i21] <https://arerobot.com/en/are-1-0/?lang=en> (Dostęp 16.01.2024)
- [i22] <https://www.wevolver.com/specs/marble-mobile-autonomous-robot-for-litter-emptying> (Dostęp 16.01.2024)
- [i23] <https://www.instalki.pl/news/technika/oto-mechaniczny-pies-od-boston-dynamics-wyglada-swietnie-wideo/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i24] <https://tech.wp.pl/s/konflikty-pl/bezalogowy-trx-shorad-nowa-jakosc-obrony-powietrznej.6884151216851904a> (Dostęp 16.01.2024)
- [i25] https://en.wikipedia.org/wiki/Omni_wheel (Dostęp 16.01.2024)
- [i26] https://www.rulmeca.fi/tuotteet/kappaletavaran-kasittely/k-tuotteet/kasittely/komponentit_painovoimaisiin_kuljettimiin/ (Dostęp 16.01.2024)
- [i27] <https://eu.robotshop.com/products/100mm-omnidirectional-wheel-brass-bearing-rollers> (Dostęp 16.01.2024)
- [i28] <https://elecena.pl/product/22722964/black-mecanum-wheel-97mm-left> (Dostęp 16.01.2024)

- [i29] <https://inhabitat.com/these-omnidirectional-wheels-turn-any-car-into-a-360-degree-maneuvering-machine/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i30] <https://www.motor1.com/news/537097/citroen-urban-collectif-goodyear-tires/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i31] http://team1640.com/wiki/index.php/3-Wheel_Swerve (Dostęp 16.01.2024)
- [i32] https://en.wikipedia.org/wiki/Kiwi_drive (Dostęp 16.01.2024)
- [i33] https://en.wikipedia.org/wiki/Killough_platform (Dostęp 16.01.2024)
- [i34] https://www.lehigh.edu/~eus204/teaching/ENGR5/FA04/project/project_description.html (Dostęp 16.01.2024)
- [i35] https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum_wheel (Dostęp 16.01.2024)
- [i36] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ballbot> (Dostęp 16.01.2024)
- [i37] <https://www.designboom.com/technology/guardbot-navigates-any-surface-turf-sand-snow-even-water-06-27-2018/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i38] <https://newatlas.com/spherical-drive-system-omnidirectional-electric-motorcycle/24095/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i39] <https://antyweb.pl/mrv-czyli-nasa-mistrzem-driftu> (Dostęp 16.01.2024)
- [i40] <https://blog.arduino.cc/2023/02/22/james-bruton-improves-his-triangle-tracked-tank/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i41] <https://www.youtube.com/watch?v=BTp2UAaihaI> (Dostęp 16.01.2024)
- [i42] <https://newatlas.com/omni-crawler-moves-in-all-directions/20386/> (Dostęp 16.01.2024)
- [i43] <https://www.morooka.com/products/forklift-truck> (Dostęp 04.03.2024)
- [i44] https://pl.wikipedia.org/wiki/G%C4%85sienicowy_uk%C5%82ad_bie%C5%BCny (Dostęp 04.03.2024)
- [i45] https://pl.wikipedia.org/wiki/Wsp%C3%B3%C5%82czynnik_tarcia (Dostęp 04.03.2024)
- [i46] <https://openev.org/> (Dostęp 12.03.2024)
- [i47] <https://budowlaneabc.gov.pl/standardy-projektowania-budynkow-dla-osob-niepelnospprawnych/budynek/komunikacja-poziona-budynku/ciagi-komunikacyjne-korytarze/> (Dostęp 10.06.2024)
- [i48] https://botland.com.pl/czujniki-time-of-flight/16638-laserowy-czujnik-odleglosci-lidar-tf-luna-8m-uarti2c-5903351249041.html?cd=20567593583&ad=&kd=&gad_source=1 (Dostęp 23.06.2024)