

dr hab. inż. Damian Krenczyk, prof. PŚ  
Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych  
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska  
ul. Konarskiego 18A  
44-100 Gliwice

Gliwice, 17.09.2021r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Grymina pt. „**Metody rozwiązywania dyskretno-ciągłych problemów marszrutyzacji**”

### Podstawa opracowania

Recenzję opracowano na podstawie pisma prof. dr. hab. inż. Andrzeja Diedzica, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej.

### Obszar problemowy i aktualność tematyki rozprawy

Podjęta przez Doktoranta w rozprawie tematyka dotyczy problemów planowania ścieżek w robotyce mobilnej, w szczególności bezzałogowych statków powietrznych, który jest obecnie jednym z najczęściej badanych tematów w tym obszarze. Potrzeba ciągłego rozwoju i poszukiwania coraz bardziej skutecznych metod planowania ścieżek wynika z rosnących wymagań w zakresie automatyzacji i autonomii działań w obszarach diagnostyki, monitorowania, poszukiwania czy kontroli, w szczególności działań w warunkach niebezpiecznych lub uciążliwych dla człowieka. Przykładami mogą być tutaj bezprzewodowe platformy zbierania danych w oparciu o technologię bezzałogowych statków powietrznych w rozproszonych bezprzewodowych sieciach czujników, pozwalające na pracę w wielu obszarach monitorowania i zwiększenia zasięgu ich pokrycia. W obszernej literaturze istnieje wiele podejść i technik planowania ścieżek robotów mobilnych. Autor rozprawy rozważa jedno i wielozadaniowe planowanie ścieżek, które można uznać za zrobotyzowane warianty problemu komiwojażera (Traveling Salesman Problem TSP). W centrum rozważań znajduje się obszar zastosowania metody rozwiązywania problemu komiwojażera z sąsiedztwami (TSPN) w kształcie koła, sformułowanej jako *Close Enough TSP* (CETSP), w planowaniu ścieżek bezzałogowych

WPLYNEŁO  
24-09-2021

RDN-AEE/161/2021

statków powietrznych. W tym kontekście Doktorant trafnie wskazuje zarówno na potrzebę poszukiwania szczególnych własności problemów dyskretno-ciągłych, jak i rozszerzenia definicji problemów oraz metod projektowania skutecznych algorytmów ich rozwiązywania. Poprzez skuteczność rozumiane jest tutaj zarówno skrócenie czasu wymaganego do wyznaczenia rozwiązania, jak i jego jakość. W wielu przypadkach praktycznych, ze względu na kombinatoryczny charakter problemu, obserwowany jest wzmacniający się trend poszukiwania i udoskonalania metod heurystycznych. Doktorant celnie zauważa, że w wielu tradycyjnych podejściach proponowanych w literaturze, w zależności od tego, która z części problemu (dyskretna lub ciągła) jest mniej znacząca, pomija się ją w rozważaniach i stosuje popularne algorytmy optymalizacji dyskretnej lub ciągłej. W swoich rozważaniach wskazuje na duży wpływ na wartość funkcji celu w problemach CETSP, zarówno części ciągłej jak i dyskretnej, i proponuje zastosowanie algorytmów hybrydowych, optymalizujących zarówno część ciągłą, jak i dyskretną problemu. Pomimo, że od zdefiniowania problemu TSP/CETSP w kontekście planowania ścieżek bezałogowych statków powietrznych minęło wiele lat, to tematyka ta jest ciągle aktualna. Za odniesienie może tutaj służyć krótki przegląd liczby publikacji naukowych w bazie *Scopus*, związanych z rozwojem i zastosowaniem metod TSP w tym obszarze, z którego wynika, że w ostatnich pięciu latach liczba tych publikacji znacznie wzrosła i utrzymuje się na niezmiennie wysokim poziomie. Oczywiście, zastosowanie proponowanych przez Doktoranta rozwiązań problemów optymalizacji dyskretno-ciągłej nie ogranicza się do wspomnianych zastosowań w obszarze automatyki i robotyki. Mają one charakter interdyscyplinarny, związany także z informatyką techniczną, badaniami operacyjnymi w różnorodnych zastosowaniach, transportem, inżynierią produkcji czy naukami o bezpieczeństwie.

Reasumując, recenzowana praca koncentruje się na rozwiązywaniu problemu planowania ścieżek bezałogowych statków powietrznych jako wariantów problemów dostatecznie bliskiego komiwożazera z wyróżnionym punktem startowym oraz cyklicznego problemu dostatecznie bliskiego komiwożazera. Doktorant proponuje dwie strategie rozwiązywania problemów dyskretno-ciągłych, w oparciu o które zostały opracowane efektywne metody rozwiązywania tych problemów. Przedstawione w rozprawie zagadnienia oraz wspomniane obszary problemowe mieszczą się w dyscyplinie automatyka i robotyka (wg klasyfikacji obowiązującej w momencie otwarcia przewodu doktorskiego), a ich zastosowania mają charakter interdyscyplinarny. W tym kontekście Doktorant prawidłowo formułuje cel i tezy pracy jako: *wykazanie, że przy zastosowaniu szczególnych własności problemów dyskretno-ciągłych oraz metod projektowania algorytmów możliwe jest:*

- *skrócenie czasu wykonywania obliczeń w rozwiązywaniu problemu dyskretno-ciągłego CETSP,*
- *zaprojektowanie efektywnego dwupoziomowego algorytmu przybliżonego dla problemu CETSP,*
- *znajdowanie lepszych czasowo i jakościowo rozwiązań problemów planowania ścieżki niż rozpatrywane w literaturze dzięki zastosowaniu oryginalnych algorytmów optymalizacji dyskretno-ciągłej,*
- *zredukowanie rozmiaru problemu, lub podzielenie problemu na podproblemy i stosowanie reguł redukcji rozmiaru dla podproblemów.*

Wybór tematyki badawczej poruszanej przez Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie uważam za zasadny, a omawiane w niej treści są aktualne i wpasowują się

w zagadnienia związane z dyscypliną automatyka i robotyka. Ponadto zaprezentowane wyniki mogą mieć duże znaczenie w praktyce w wielu obszarach.

### Ocena rozprawy i uwagi ogólne

Oceniana rozprawa liczy 153 strony, składa się z 9 rozdziałów, 4 dodatków, listy cytowanej bibliografii liczącej 226 pozycji oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. W dodatkach, poza spisem symboli, tablic i rysunków, zamieszczono akcelerację w algorytmie 2-Opt.

W pracy wyróżniono trzy zasadnicze części. Część pierwsza obejmuje *Wprowadzenie* (rozdział 1) oraz *Stan wiedzy* (Rozdziały 2 – 3). W rozdziale 1 Autor rozprawy sformułował, poprzedzone krótkim wstępem, cel, tezy oraz zakres pracy. Uważam, że zamieszczony we wstępie zakres informacji i uzasadnienie podjęcia się rozwiązania wybranych problemów, jak i wskazanie na braki obecnie stosowanych metod i lukę badawczą, są zbyt skrótowe - zabrakło głębszego uzasadnienia takiego wyboru. Z tego względu, wskazana chociażby powszechność występowania wybranych problemów dyskretno-ciągłych w automatyce i robotyce w planowaniu ścieżek autonomicznych bezzałogowych statków powietrznych (dronów), poparta trzema przykładami stwarza wrażenie słabo umotywowanej. Informacje te można znaleźć w kolejnych rozdziałach, lecz uważam, że powinny one zostać zaakcentowane już w tym miejscu.

W rozdziale 2 Doktorant prezentuje wyniki badań literaturowych dotyczących wybranych problemów marszrutyzacji. Przedstawiono definicje dyskretno-ciągłych problemów: Problemu Komiwojażera z Sąsiedztwami (TSPN), jego szczególnego przypadku w postaci Problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera (Close Enough TSP, CETSP), jak również uogólnionego problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera (Generalized Traveling Salesman Problem, GTSP). W kolejnym podrozdziale zdefiniowano Problemy Komiwojażera Dubinsa (DTSP), w tym DTSP z sąsiedztwami oraz Problem Wielu Komiwojażerów Dubinsa z Sąsiedztwami. Definicje uzupełnia krótki przegląd metod ich rozwiązywania oraz klasyfikacja. Trafnie wskazano przykłady rozwiązywania praktycznych problemów z obszaru automatyki i robotyki. Uważam, że wartościowym byłoby uzupełnienie tego rozdziału o odniesienie się do skuteczności omawianych metod i ich ograniczeń w ukierunkowaniu do przedstawionych problemów. Rozdział 3 poświęcono wybranym metodom optymalizacji ciągłej (Metoda Powella, Sekwencyjne Programowanie Kwadratowe) oraz metodom konstruowania algorytmów dla TSP (Metoda Podziału i Ograniczeń, Programowanie Dynamiczne, Algorytm 2-Opt, Algorytm Przeszukiwania z Zabronieniami, Symulowane Wyżarzanie). Rozdział kończy przegląd algorytmów metaheurystycznych, w ramach którego wymieniono aż 137 algorytmów. Wyjaśnienie wymaga zamieszczone tutaj stwierdzenie, że „prezentowane heurystyki mogą być z powodzeniem stosowane jako algorytmy rozwiązujące wysokopoziomowy problem w problemie CETSP”. Jak ta „skuteczność” będzie się kształtować w odniesieniu do innych problemów? Czym jest tutaj problem wysokopoziomowy? W kontekście wskazania, dopiero w podrozdziale 3.3. *Wnioski i uwagi*, że „w rozdziale dotyczącym algorytmu Podziału i Ograniczeń przedstawiono autorskie dolne ograniczenie dla problemu komiwojażera oraz autorski wzór na priorytet analizowania zbiorów” uważam, że wkład własny Doktoranta powinien zostać lepiej wyeksponowany w tej części rozprawy.

Druga część pracy obejmuje *Wybrane problemy dyskretno-ciągłe i metody ich rozwiązywania* (rozdziały 4 – 7). W rozdziale 4 Doktorant formułuje dwa wybrane problemy dyskretno-ciągłe – CETSP z Wyróżnionym Punktem Startowym (CETSP-SP) oraz Cykliczny CETSP (CCETSP). W pierwszej części przedstawia czynniki motywujące go do dokonania takiego wyboru, zwracając celnie uwagę na wymagania dotyczące algorytmów planowania ścieżek UAV w zastosowaniu do zdalnej kontroli i/lub nadzoru rozproszonych obiektów. W odniesieniu do zamieszczonego w pracy sformułowania CCETSP dyskusyjny jest, w mojej ocenie nadmiarowe wymaganie, aby komiwojażer pojawiał się w punktach w tych samych momentach względem momentu rozpoczęcia podróży w każdym cyklu. Jeżeli nie uwzględniono czynnika zmiany prędkości, przerw, a z przyjętej stałej kolejności odwiedzin punktów w każdym obszarze wynika stały czas przelotu, to momenty odwiedzania danego punktu będą stałe w odniesieniu do punktu startowego. Następnie przedstawiono własności wybranych problemów stosowane do konstrukcji efektywnych algorytmów, które wraz z opracowanymi strategiami konstruowania algorytmów uważam za największe osiągnięcia Doktoranta. Odnosząc się do własności wzrostu stopnia skomplikowania problemu wraz ze wzrostem liczby odwiedzanych sąsiedztw, Doktorant zauważa, że warto przed przystąpieniem do optymalizacji zastosować regułę redukcji rozmiaru problemu. Zabrakło jednak wyjaśnienia, przy jakiej liczbie sąsiedztw zastosowanie reguły redukcji będzie wskazane – czy dla dowolnej liczby? Nie podano także sposób generowania rozwiązania początkowego  $\vartheta^0$  w algorytmie optymalizacji ciągłej DAOC (Algorytm 8). Ponownie, część z tych informacji można znaleźć w kolejnych rozdziałach, poświęconych porównaniu wyników uzyskiwanych z zastosowaniem proponowanych algorytmów, lecz uważam, że powinny one zostać zaakcentowane już w tym miejscu. W rozdziale 5 zaprezentowano i porównano 4 algorytmy (Algorytm Siłowy, Algorytm Siłowy BFA, algorytm 2-Opt oraz Kaskadowy Algorytm Heurystyczny KAH) realizujące strategię I (DFCS) dla rozwiązywania problemu CETSP z punktem startowym. Doktorant wskazał na istotne powody ograniczeń w zastosowaniu tradycyjnych metod TSP, w postaci tego, że funkcja celu nie jest funkcją o złożoności wielomianowej oraz że dla rozważanej funkcji celu nie można skonstruować dolnego ograniczenia w wymaganej postaci. Dodatkowego komentarza wymagają pewne wyniki badań algorytmu siłowego (Tablica 5.1). Co oznaczają zerowe wartości w kolumnie *cpu*? Podobnie, w odniesieniu do kolumny *frac*. Czy są to przypadki, w których rozwiązanie początkowe w BFA było optymalne i można je traktować jako sytuacje specyficzne, wynikające z małej instancji problemu? Nie skomentowano ponadto, w przypadku wyników dla kaskadowego algorytmu heurystycznego KAH, obserwowanego znacznego zwiększenia czasu obliczeń względem algorytmu BFA. Rozdział 6 poświęcono badaniom algorytmu Tabu Search, realizując strategię II (CFDS) dla CETSP z punktem startowym. Jakość rozwiązań porównano zarówno z rozwiązaniami dokładnymi, jak i wynikami dostępnymi w sprawozdaniach z innych badań, zamieszczonych w publikacjach naukowych. W tym ostatnim przypadku wyniki porównano także z algorytmem KAH. Przedstawione rezultaty wskazują na przewagę algorytmu TS, w odniesieniu do czasów realizacji obliczeń, natomiast najlepsze rozwiązania Doktorant uzyskał stosując algorytm KAH. Dyskusyjny jest, formułowany przez Autora wniosek, dotyczący przewagi algorytmu TS w kontekście szybkości uzyskiwanych wyników. Należałoby zestawić korzyści z oszczędności czasów obliczeń (dla przyjętych instancji danych poniżej 9 [s]) z uzyskiwanymi oszczędnościami w realizacji zaplanowanej na ich podstawie trasy. Czy w pokazanych przez Doktoranta zastosowaniach w obszarze

przeprowadzania zdalnej kontroli i/lub nadzoru rozproszonych obiektów, których lokalizacje są znane przed wykonaniem zadania, taka przewaga wystąpi? W rozdziale 7, dla przyjętych instancji, porównano wyniki uzyskiwane algorytmami BF, BFA oraz KAH i TS, rozwiązując problem cyklicznego dostatecznie bliskiego komiwojażera. Ponownie stosując algorytm KAH uzyskano lepsze wyniki od algorytmu TS, natomiast przewaga algorytmu TS związana była z jego szybkością. Aktualne pozostają pytania o niskie wartości w kolumnach *cpu* oraz *frac*.

Część trzecia rozprawy poświęcona jest zastosowaniom praktycznym (Rozdział 8). Przedstawiony praktyczny problem inspekcji obejmował 20 obszarów i został zdefiniowany jako *m*-DTSPN. Doktorant zaproponował efektywny algorytm wyznaczania ścieżki autonomicznych dronów, w którym, w kontekście tematu pracy, najistotniejszy jest etap rozwiązania problemu DTSPN. Pewien niedosyt związany jest z brakiem uzasadnienia zastosowania w kroku 3 Algorytmu Lokalnej Iteracyjnej Optymalizacji, zaproponowanego przez Vana i Faigl ([205]) i braku powiązania z algorytmami i wynikami badań przedstawionymi w rozdziałach 4-7.

Rozprawę zamyka rozdział 9 *Wnioski końcowe*, który zawiera także jej podsumowanie oraz sformułowanie propozycji przyszłych prac w omawianym obszarze. Należy zwrócić uwagę na wniosek dotyczący uzyskanego przyspieszenia obliczeń dla wybranych instancji, stosując zaawansowany algorytm siłowy BFA względem standardowego algorytmu siłowego, dzięki wykorzystaniu sformułowanego twierdzenia eliminacyjnego. Nasuwa się jednak tutaj pytanie o ograniczenia jego stosowalności, szczególnie dla większych instancji. Kolejny ważny wniosek dotyczy wykazanej przewagi algorytmu TS, który uzyskiwał lepsze rezultaty czasowe niż najszybszy algorytm Behdaniego i Smitha. W kontekście kierunków dalszych badań należałoby także rozważyć możliwości zastosowania proponowanych rozwiązań w bardziej wymagających wariantach wielocelowego planowania ścieżek z regionami 3D.

Podsumowując, uważam, że kompozycja rozprawy, układ rozdziałów i podrozdziałów są poprawne oraz podporządkowane postawionemu i konsekwentnie zrealizowanemu przez Doktoranta celowi. Lista cytowanych źródeł literaturowych obejmuje pozycje istotne i aktualne. Także strona edycyjna pracy nie budzi większych zastrzeżeń.

### **Oryginalne osiągnięcia rozprawy**

W swojej pracy Doktorant poszukuje odpowiedzi na postawiony problem badawczy, dotyczący planowania ścieżek bezzałogowych statków powietrznych. W centrum rozważań znajduje się obszar zastosowań w planowaniu ścieżek UAV metod rozwiązań problemu dostatecznie bliskiego komiwojażera (CETSP), w którym wskazano zarówno na potrzebę poszukiwania szczególnych własności problemów dyskretno-ciągłych, jak i rozszerzenia definicji problemów oraz metod projektowania skutecznych algorytmów ich rozwiązywania. Odpowiedzią na postawiony problem badawczy, są:

- wprowadzenie nowego problemu Cyklicznego Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera (CCETSP), który został rozwiązany z zastosowaniem sformułowanego twierdzenia o transformacji CCETSP do CETSP,

- sformułowanie własności rozważanych Problemów Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera oraz Cyklicznego Problemu Dostatecznie Bliskiego Komiwojażera, pozwalających na opracowanie sekwencyjnych algorytmów dokładnych oraz efektywnych algorytmów przybliżonych ich rozwiązywania,
- opracowanie zaawansowanego algorytmu siłowego BFA, przyspieszającego obliczenia dzięki wykorzystaniu sformułowanego twierdzenia eliminacyjnego,
- opracowanie algorytmu bazującego na metaheurystyce *Tabu Search* oraz sformułowanemu twierdzeniu położenia punktu reprezentującego w sąsiedztwie, na przemian optymalizującym permutację oraz położenie punktów reprezentujących w sąsiedztwie, na dwóch poziomach: ciągłym oraz dyskretnym,
- opracowanie efektywnego algorytmu (Kaskadowy Algorytm Heurystyczny KAH) bazującego na metodach symulowanego wyżarzania, 2-Opt oraz Dedykowanym Algorytmie Optymalizacji Ciągłej w zastosowaniach do rozwiązania CCETSP oraz CETSP.

Wyniki pracy odpowiadają także aktualnym potrzebom praktycznym i poza wartością naukową posiadają dużą wartość użyteczną.

#### Uwagi szczegółowe

Poza uwagami natury ogólnej i dyskusyjnej, zawartymi w poprzednich częściach recenzji, można sformułować następujące uwagi szczegółowe:

- Algorytm 2: Algorytm Powella, str. 30: „Kroki (I)-(IV) powtarzaj tak długo, aż zajdzie warunek zbieżności” – zaprezentowany algorytm składa się jedynie z trzech kroków.
- Sformułowanie CETSP z Wyróżnionym Punktem Startowym zakończono stwierdzeniem (str. 57), że „w literaturze częściej rozważany jest problem dostatecznie bliskiego komiwojażera z punktem startowym i jest on oznaczany symbolem CETSP.” Czy chodzi o problem dostatecznie bliskiego komiwojażera, na co wskazuje zastosowane oznaczenie?
- Na rysunku 4.2, będącym ilustracją CETSP-SP punkt startowy oznaczono jako  $p_1$ , podczas gdy w pracy przyjęto oznaczenie  $p_0$  („Rysunek 4.2 ilustruje przykładową instancję CETSP-SP. Punkt  $p_0$  jest punktem startowym.”).
- Zależność (4.9): zamiast  $\dots + \frac{d(p_{\sigma_{i-1}}, p_{\sigma_i})}{v} + \dots$ , powinno być:  $\dots + \frac{d(p_{\sigma_n}, p_{\sigma_1})}{v} + \dots$
- Użyte w twierdzeniu 4.4 stwierdzenie „długość optymalnej ścieżki odwiedzającej obszary w kolejności  $\sigma$  można oszacować...” w odniesieniu do jej dolnego ograniczenia może powodować wątpliwości i zostać niewłaściwie zrozumiane.
- W rozdziale 8.3 (str. 111) w opisie etapu grupowania pominięto opis kroków „algorytmu centroidów”.
- Wśród zauważonych usterek o charakterze redakcyjnym warto zwrócić uwagę, że są one stosunkowo nieliczne. Zaznaczyłem je bezpośrednio w przedstawionej mi do oceny pracy.

## Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawione w niniejszej recenzji uwagi ogólne i szczegółowe mają głównie charakter dyskusyjny i nie podważają mojej pozytywnej oceny rozprawy. Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego problemu naukowego, natomiast podejście Autora do zagadnień prezentowanych w pracy dowodzi, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe.

Uważam, że opiniowana rozprawa mgr. inż. Radosława Grymina pt. „**Metody rozwiązywania dyskretno-ciągłych problemów marszrutyzacji**” spełnia warunki stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki w odniesieniu do rozpraw doktorskich (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595, z późn. zm.). Wniosuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej w dyscyplinie automatyka i robotyka.

