Załącznik 3 (A)

Autoreferat

1 Imię i nazwisko

Mateusz Bocian

2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku jego uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

(1) Stopień: **Bachelor of Engineering in Civil Engineering with Honours of the First Class**
Nadany przez: Heriot-Watt University, Edynburg, Wielka Brytania
Data: 23 czerwca 2009
Temat pracy końcowej: Human-structure interaction on a light footbridge (*Interakcja pomiędzy pieszym i lekkim mostem dla pieszych*)
Promotor: Profesor Ian Grant

(2) Stopień: **Doctor of Philosophy**
Nadany przez: University of Bristol, Wielka Brytania
Data: 24 czerwca 2014
Temat rozprawy doktorskiej: Determination of the self-excited forces on structures due to walking pedestrians using a biologically-inspired approach (*Identyfikacja sił samowzbudnych działających na konstrukcje wskutek ruchu pieszych z uwzględnieniem czynników biologicznych*)
Promotor: Profesor John H.G. Macdonald (Wydział Budownictwa Lądowego) i Doktor Jeremy F. Burn (Wydział Mechaniki)

(3) Dyplom: **Postgraduate Certificate in Academic and Professional Practice**
Nadany przez: University of Leicester, Wielka Brytania
Data: 17 lipca 2018

3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

(1) Pozycja: **Teaching Associate (*Pracownik Dydaktyczny*)**
Miejsce pracy: Department of Mechanical Engineering (*Wydział Mechaniki*), University of Bristol, Wielka Brytania
Okres: Październik 2012 – Czerwiec 2013

(2) Pozycja: **Associate Research Fellow (*Pracownik Naukowy na stażu podoktorskim*)**
Miejsce pracy: Vibration Engineering Section, University of Exeter, Wielka Brytania
Okres: Marzec 2014 – Listopad 2014

(3) Pozycja: **Project Engineer (*Inżynier Projektu*)**
Miejsce pracy: Full Scale Dynamics Limited, Wielka Brytania
Okres: Marzec 2014 – Wrzesień 2015

(4) Pozycja: **Visiting Fellow (*Honorowy Członek Wizytujący*)**
Miejsce pracy: Department of Civil Engineering (*Wydział Budownictwa Lądowego*), University of Bristol, Wielka Brytania
Okres: Wrzesień 2014 – obecnie

(5) Pozycja: **Research Associate (*Pracownik Naukowy na stażu podoktorskim*)**
Miejsce pracy: Department of Civil and Structural Engineering (*Wydział Budownictwa Lądowego*), University of Sheffield, Wielka Brytania
Okres: Grudzień 2014 – Wrzesień 2015

(6) Pozycja: **Lecturer in Structural Engineering (*Adiunkt Badawczo-Dydaktyczny*)**
Miejsce pracy: School of Engineering (*Wydział Inżynierii*), University of Leicester, Wielka Brytania
Okres: Wrzesień 2015 – Sierpień 2020

(7) Pozycja: **Guest Lecturer (*Wizytujący Wykładowca*)**
Miejsce pracy: School of Civil Engineering (*Wydział Budownictwa Lądowego*), University of Leeds, Wielka Brytania
Okres: Październik 2015 – Czerwiec 2018

(8) Pozycja: **Scientific Advisor (*Doradca Naukowy*)**
Miejsce pracy: ASDEC – Advanced Structural Dynamics Evaluation Centre, MIRA Technology Park, Nuneaton, Wielka Brytania
Okres: Październik 2015 – Lipiec 2018

(9) Pozycja: **Director of Biomechanics & Immersive Technology Laboratory (*Dyrektor Laboratorium Biomechaniki i Technologii Immersyjnych*)**
Miejsce pracy: School of Engineering (*Wydział Inżynierii*), University of Leicester, Wielka Brytania
Okres: Kwiecień 2018 – Sierpień 2020

(10) Pozycja: **Director of Dynamics, Vibration & Acoustics Laboratory (*Dyrektor Laboratorium Dynamiki, Wibracji i Akustyki*)**
Miejsce pracy: School of Engineering (*Wydział Inżynierii*), University of Leicester, Wielka Brytania
Okres: Sierpień 2019 – Sierpień 2020

(11) Pozycja: **Adiunkt Badawczy**
Miejsce pracy: Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wydział Budownictwa Lądowego, Politechnika Wrocławska, Polska
Okres: Wrzesień 2020 – obecnie

4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.)

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Identyfikacja i modelowanie obciążeń mostów ruchem pieszych

4.2 Forma osiągnięcia naukowego

Podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego jest cykl ośmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Wszystkie artykuły opublikowane zostały w czasopismach naukowych z Impact Factor'em, indeksowanych przez główne bazy naukowe, między innymi Elsevier Scopus oraz Web of Science Core Collection. Ponadto wszystkie czasopisma znajdują się w aktualnym wykazie czasopism punktowanych Ministerstwa Edukacji i Nauki (MEiN; załącznik do komunikatu MEiN z dnia 9 lutego 2021 r.). Lista artykułów wymienionych według daty publikacji przedstawiona jest poniżej. Dla każdego artykułu załączono informacje o wskaźniku cytowań danego czasopisma (Impact Factor, IF) według bazy Journal Citation Report (JCR) oraz o liczbie punktów według systemu punktacji MEiN (wcześniej Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, MNiSW), zgodnie z rokiem publikacji artykułu. Sumaryczny IF oraz sumaryczne punkty dla całego cyklu artykułów wynoszą, odpowiednio, 22,568 oraz 420. Wszystkie artykuły są współautorskie, a większość z nich powstała przy współpracy autorów z więcej niż jednej instytucji naukowej. Spowodowane to było koniecznością przeprowadzenia testów eksperymentalnych przy wykorzystaniu stanowisk bądź aparatury badawczej niedostępnej w obrębie jednej jednostki naukowej. Wnioskodawca jest pierwszym autorem czterech przedstawionych artykułów i drugim autorem trzech przedstawionych artykułów. Wnioskodawca miał największy wkład, samodzielnie lub *ex aequo*, spośród wszystkich współautorów, w powstanie siedmiu z ośmiu wyszczególnionych artykułów, dla których stworzył lub współtworzył koncepcję badań. Do opisu każdego artykułu załączono informację o merytorycznym oraz procentowym wkładzie wnioskodawcy. Oświadczenia współautorów o ich wkładzie w powstanie artykułów stanowią część Załącznika 5 – Wykaz wkładu autorskiego, w którym przedstawiono również zbiorcze zestawienie wkładu obejmujące każdy artykuł i każdego współautora. Pomimo wystosowanej prośby, nie wszyscy współautorzy dostarczyli stosowne oświadczenia. Dotyczy to szczególnie studentów 1go i 2go stopnia studiów, którzy zaproszeni zostali do asystowania przy testach eksperymentalnych, oraz reprezentantów partnerów branżowych.

[P1] **Bocian, M.**, Macdonald, J.H.G., Burn, J.F., Redmill, D., *Experimental identification of the behaviour of and lateral forces from freely-walking pedestrians on laterally oscillating structures in a virtual reality environment.* Engineering Structures, 105 (2015), 62–76.
JCR IF: **1,893**; MNiSW 2015: **35/50**.
Wkład: zapewnienie finansowania badań, koncepcja, stanowisko eksperymentalne, badania, algorytmy, weryfikacja algorytmów, oprogramowanie, analiza danych, manuskrypt, rewizja i edycja; **70%**.

[P2] **Bocian, M.**, Brownjohn, J.M.W., Racic, V., Hester, D., Quattrone, A., Monnickendam, R., *A framework for experimental determination of localised vertical pedestrian forces on full-scale structures using wireless attitude and heading reference systems.* Journal of Sound and Vibration, 376 (2016), 217–243.
JCR IF: **2,593**; MNiSW 2016: **35/50**.
Wkład: koncepcja, stanowisko eksperymentalne, badania, algorytmy, weryfikacja algorytmów, oprogramowanie, analiza danych, manuskrypt, rewizja i edycja; **70%**.

[P3] Brownjohn, J.M.W., **Bocian, M.**, Hester, D., Quattrone, A., Hudson, W., Moore, D., Goh, S., Lim, M.S., *Footbridge system identification using wireless inertial measurement units for force and response measurements.* Journal of Sound and Vibration, 384 (2016), 339–355.
JCR IF: **2,593**; MNiSW 2016: **35/50**.
Wkład: koncepcja, stanowisko eksperymentalne, badania, algorytmy, weryfikacja algorytmów, oprogramowanie, analiza danych, manuskrypt, rewizja i edycja; **40%**.

[P4] **Bocian, M.**, Burn, J.F., Macdonald, J.H.G., Brownjohn, J.M.W., *From phase drift to synchronisation – pedestrian stepping behaviour on laterally oscillating structures and consequences for dynamic stability.* Journal of Sound and Vibration, 392 (2017), 382–399.
JCR IF: **2,618**; MNiSW 2017: **35/50**.
Wkład: koncepcja, stanowisko eksperymentalne, badania, algorytmy, weryfikacja algorytmów, oprogramowanie, analiza danych, manuskrypt, rewizja i edycja; **70%**.

[P5] **Bocian, M.**, Brownjohn, J.M.W., Racic, V., Hester, D., Quattrone, A., Gilbert, L., Beasley, R., *Time-dependent spectral analysis of interactions within groups of walking pedestrians and vertical structural motion using wavelets.* Mechanical Systems and Signal Processing, 105 (2018), 502–523.
JCR IF: **5,005**; MNiSW 2017: **45/50**.
Wkład: koncepcja, stanowisko eksperymentalne, badania, algorytmy, weryfikacja algorytmów, oprogramowanie, analiza danych, manuskrypt, rewizja i edycja; **70%**.

[P6] Brownjohn, J.M.W., Chen, J., **Bocian, M.**, Racic, V., Shahabpoor, E., *Using inertial measurement units to identify medio-lateral ground reaction forces due to walking and swaying.* Journal of Sound and Vibration, 426 (2018), 90–110.
JCR IF: **3,123**; MNiSW 2019: **35/50**.
Wkład: badania, oprogramowanie, analiza danych, rewizja i edycja; **20%**.

[P7] Soczawa-Stronczyk, A.A., **Bocian, M.**, Wdowicka, H., Malin, J., *Topological assessment of gait synchronisation in overground walking groups.* Human Movement Science, 66 (2019), 541–553.
JCR IF: **2,096**; MNiSW 2019: **100/200**.
Wkład: zapewnienie finansowania badań, koncepcja, stanowisko eksperymentalne, badania, algorytmy, weryfikacja algorytmów, manuskrypt, rewizja i edycja; **46%**.

[P8] Soczawa-Stronczyk, A.A., **Bocian, M.**, *Gait coordination in overground walking with a virtual reality avatar*, Royal Society Open Science, 7 (2020), 200622.
JCR IF: **2,647**; MNiSW 2019: **100/200**.
Wkład: zapewnienie finansowania badań, koncepcja, stanowisko eksperymentalne, badania, algorytmy, weryfikacja algorytmów, manuskrypt, rewizja i edycja; **50%**.

4.3 Opis osiągnięcia naukowego

4.3.1 Wstęp

Modelowanie obciążenia mostów ruchem pieszych jest poważnym wyzwaniem w środowisku inżynierów budownictwa [45, 20]. Być może najlepszym świadectwem tego stwierdzenia są ubogie wytyczne projektowe oferowane w tym zakresie przez międzynarodowe normy dotyczące projektowania konstrukcji, np. ISO i Eurokody. Zamiast zestawu szczegółowych procedur umożliwiających projektowanie konstrukcji pod kątem obciążenia związanego z ruchem pieszych, normy te często ograniczają się do niejasnych sugestii, iż (i) szczegółowe analizy zachowania dynamicznego konstrukcji należy przeprowadzić w przypadku, gdy zakres częstotliwości drgań własnych w kierunku pionowym i poprzecznym pokrywa się, odpowiednio, z częstotliwościami kroków, tj. 1,6 – 2,4 Hz, i cyklu chodu, tj. 0,8 – 1,2 Hz, oraz, że (ii) już na etapie projektowania należy założyć konieczność instalacji tłumików drgań. Godnym uwagi jest brak jasnych instrukcji dla analiz w przypadku (i). Źródłem tego niedociągnięcia jest stosunkowo niewielka wiedza na temat zachowania się pieszych i związanego z nim obciążenia konstrukcji podatnych na drgania. Wynika to z faktu, że ludzie są zasadniczo złożonymi układami dynamicznymi, zdolnymi do przejawiania skomplikowanych zachowań, na które wpływają czynniki natury biomechanicznej i psychologicznej w sposób, który nie jest jeszcze dobrze poznany. Stoi to w kontraście do innych rodzajów obciążeń dynamicznych wpływających na zachowanie mostów, np. tych związanych ze zjawiskami sejsmicznymi oraz ruchem powietrza, które były intensywnie badane w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat i dla których wytyczne projektowe opracowane są stosunkowo dobrze.

Badania nad wpływem ruchu pieszych na dynamikę mostów zintensyfikowano znacznie w ciągu ostatnich dwóch dekad. Przełomowymi wydarzeniami, które się do tego przyczyniły, były przypadki niestabilności dynamicznej stwierdzone w trakcie uroczystego otwarcia mostów oddanych do użytku na przełomie tysiącleci. Najbardziej nagłośnione publicznie z tych wydarzeń to poziomapoprzeczna niestabilność Passerelle Leopold-Sedar-Senghor [17] w Paryżu, we Francji i London Millennium Footbridge [16] w Wielkiej Brytanii. Pomimo tego, że projekty tych mostów spełniały najbardziej konserwatywne dostępne wówczas wymogi projektowe, obie konstrukcje wykazały nieoczekiwanie wysoki poziom drgań podczas obciążenia ruchem pieszych świętujących ich otwarcie.

Amplitudy drgań tych konstrukcji wzrastały nieproporcjonalnie do liczby pieszych, co wskazuje, że musiała zajść pewna jakościowa zmiana w zachowaniu pieszych, która nie miała swojego odzwierciedlenia w wiedzy inżynierskiej, a jak okazało się znacznie później, również w wiedzy ogólnej. W następstwie tych wydarzeń mosty wyłączono z użytkowania na wiele miesięcy, umożliwiając zaprojektowanie i wdrożenie rozwiązań modernizacyjnych. Przypadki niestabilności dynamicznej tych prestiżowych – ze względu na lokalizację oraz wysokie wymagania estetyczne, konstrukcji spowodowały poważne kłopoty dla stron zaangażowanych w ich projektowanie. Architekci i inżynierowie budowlani publicznie obwiniali się nawzajem o zbyt odważną formę architektoniczno-konstrukcyjną i niewystarczającą wiedzę w zakresie projektowania konstrukcji. W ostatecznym rozrachunku, poza koniecznością poniesienia dotkliwych dodatkowych kosztów związanych z identyfikacją problemu i zaprojektowaniem oraz wdrożeniem stosownych rozwiązań przeciwdziałających niestabilności dynamicznej konstrukcji, i karami nałożonymi na biura konstrukcyjne w związku z opóźnieniami w uruchomieniu tych mostów, wydarzenia te podważyły zaufanie do zawodu inżyniera budownictwa w oczach opinii publicznej.

Aby zrozumieć wagę problemu oraz docenić wysiłek naukowy podjęty aby mu sprostać, wystarczy przeanalizować artykuły prezentowane przez kilkanaście lat po roku 2000 na największych światowych konferencjach dotyczących dynamiki konstrukcji, tj. EURODYN i IMAC. Największym zainteresowaniem autorów cieszyły się wówczas sympozja podejmujące tematykę drgań konstrukcji pod wpływem obciążeń generowanych przez ludzi. Po dzień dzisiejszy tematyka ta pozostaje w centrum naukowej uwagi.

Generalizując i systematyzując problem obciążenia mostów ruchem pieszych na podstawie przeglądu literatury, wyodrębnić można dwa główne mechanizmy rzekomo przyczyniające się do nadmiernych drgań konstrukcji. Jest to interakcja pieszy-konstrukcja (IPK) i interakcja pieszy-pieszy (IPP). IPK opiera się na założeniu, że drgania podłoża powodują zmianę chodu pieszego, a stąd siły wywieranej przez pieszego na podłoże, czyli również siły reakcji podłoża (SRP). Natura tej zmiany jest taka, że pieszy dodaje do mostu więcej energii niż można by oczekiwać pomijając IPK, tym samym wzmacniając odpowiedź dynamiczną mostu. Efekt ten jest rzekomo wzmocniony przez IPP, czyli istotną korelację w ruchu pieszych występująca naturalnie podczas chodu w tłumie. Innymi słowy, według IPP, pieszy ma skłonność do dopasowywania kroku do kroku innych pieszych znajdujących się w jego bliskim sąsiedztwie.

W literaturze naukowej, a w szczególności w przeważającej większości badań teoretycznych, nadal dominuje pogląd, że niestabilność wywołana ruchem pieszych jest spowodowana powszechnym występowaniem zjawiska synchronizacji ruchu pieszych z ruchem konstrukcji i sobą nawzajem [21, 34, 42]. Dotyczy to poprzecznych drgań mostów zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym, chociaż w tym drugim przypadku pogląd ten jest bardziej rozpowszechniony. Wciąż rośnie jednak materiał dowodowy pochodzący z pomiarów dynamicznego zachowania się mostów podczas obciążenia ruchem pieszych [16, 13, 29, 4], badań laboratoryjnych [36, 25] i badań teoretycznych [5, 28, 8, 9], który kwestionuje ten pogląd. Materiał ten motywuje chęć zrewidowania norm projektowych, które są obecnie powszechnie uważane za niewiarygodne. Najlepszym potwierdzeniem tego stanu rzeczy jest fakt, że od czasu wycofania odpowiednich polskich norm projektowych, w Polsce nie ma obecnie dostępnego załącznika krajowego do Eurokodów, który odnosiłby się do obciążenia mostów ruchem pieszych.

4.3.2 Cel osiągnięcia naukowego

Biorąc pod uwagę zagadnienia przedstawione w rozdziale 4.3.1, głównym kierunkiem badań wnioskodawcy oraz celem serii publikacji przedstawionych w rozdziale 4.2 jest zrewidowanie i rozszerzenie wiedzy na temat zachowania pieszych na mostach podatnych na drgania w kontekście identyfikacji i modelowania sił generowanych przez pieszych oraz odpowiedzi dynamicznej konstrukcji. Uwagę skupiono na dwóch mechanizmach interakcji, które rzekomo mają przyczyniać się do wywołanej przez pieszych dynamicznej niestabilności konstrukcji, tj. interakcji pieszy-konstrukcja omówionej w rozdziale 4.3.3 oraz interakcji pieszy-pieszy omówionej w rozdziale 4.3.4. Aby umożliwić badania IPK i IPP wprowadzono nowe podejście do testów eksperymentalnych i analizy danych. Celem

nadrzędnym wykonanych i wciąż prowadzonych badań jest opracowanie wiarygodnego fundamentalnego modelu pieszego oraz generowanych przez pieszego sił na mostach, służących do oceny stanu użytkowalności mostów ze względu na drgania.

Punktem początkowym jest sformułowanie równań opisujących dynamikę układu most – piesi. Zakładając, że rozpatrywane zagadnienie drgań jest liniowe oraz że tłumienie konstrukcji jest proporcjonalne do macierzy sztywności lub macierzy bezwładności mostu, bądź ich liniowej kombinacji, w związku z czym obowiązuje zasada superpozycji, w myśl której równania ruchu dla poszczególnych postaci drgań modalnych są od siebie wzajemnie niezależne, dla wyszczególnionej postaci drgań modalnych zachodzi następująca zależność:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = \sum_{n=1}^{N_p} (F_{\mathrm{ped},n}\phi_n) \tag{1}$$

gdzie M, C i K ozanczają prametry modalne mostu, odpowiednio, masę główną, tłumienie i sztywność główną odpowiadające danej formie drgań modalnych, X jest współrzędną główną, ϕ_n oznacza amplitudę postaci drgań modalnych w lokalizacji n-tego pieszego, N_p oznacza całkowitą liczbę pieszych na moście, $F_{\mathrm{ped},n}$ oznacza siłę generowaną przez n-tego pieszego, a kropki nad symbolami oznaczają stopień pochodnej liczonej względem czasu. Uproszczając problem, siłę generowaną przez pieszego, która jest równa co do wartości lecz przeciwna do kierunku SRP, można wyrazić:

$$F_{\mathrm{ped}} = F_{\mathrm{st}} + F_{\mathrm{mov}} \tag{2}$$

gdzie F_{st} i F_{mov} oznaczają, odpowiednio, składową siły generowanej przez pieszego podczas chodu po nieruchomym podłożu oraz dodatkową składową generowaną podczas chodu po podłożu ruchomym, tj. w obecności drgań mostu. Dla siły pionowej, tzn. działającej zgodnie z kierunkiem wektora grawitacji, idealizowana siła pieszego F_{st} wyrażona za pomocą widma amplitudowego transformaty Fourier'a składa się z komponentu stałego, komponentu harmonicznego w częstotliwości stawiania kroków f_p, równego podwojonej częstotliwości cyklu chodu f_s (cykl chodu składa się z dwóch kroków - po jednym kroku wykonanym prawą i lewą nogą), oraz komponentów w częstotliwościach całkowitych wielokrotności f_p. W przypadku siły bocznej, tzn. siły poziomej działającej poprzecznie względem osi wzdłużnej mostu, idealizowana siła pieszego F_{st} wyrażona za pomocą widma amplitudowego transformaty Fourier'a składa się z komponentu harmonicznego w częstotliwości cyklu chodu f_s oraz komponentów w częstotliwościach jej nieparzystych całkowitych wielokrotności. Podczas chodu po nieruchomym podłożu główne komponenty harmoniczne siły pieszego w osi pionowej i poziomej-poprzecznej względem kierunku chodu oddziaływują w częstotliwości, odpowiednio, f_p i f_s. Średnie amplitudy głównych komponentów tych sił mogą osiągnąć 50% i 5% ciężaru ciała człowieka, w zależności od częstotliwości chodu. W związku z istotną różnicą w skali tych komponentów, wysiłki badawcze podejmowane w celu zrozumienia oddziaływania pieszych na mosty przez długi czas skupiały się prawie wyłącznie na obciążeniu pionowym.

Naturalną (własną) częstość kołową wibracji układu definiuje się przez:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \tag{3}$$

a tłumienie, wyrażone jako współczynnik tłumienia krytycznego:

$$\zeta = \frac{C}{2M\omega_n} \tag{4}$$

wobec czego, w następstwie przekszałcenia równiania 1, uogólnione równanie ruchu przybiera formę:

$$\ddot{X} + 2\zeta\omega_n\dot{X} + \omega_n^2 X = \frac{1}{M}\sum_{n=1}^{N_p} (F_{\mathrm{ped},n}\phi_n) \tag{5}$$

Równanie 5 sugeruje, że odpowiedź dynamiczna mostu zależy od masy modalnej w taki sposób, że amplituda drgań wzrasta wraz z pomniejszeniem masy modalnej i vice versa. Masa modalna dla

danej postaci drgań jest zdefiniowana przez rozkład masy mostu oraz amplitudę modalną postaci drgań, co dla układu dyskretnego można zdefiniować jako:

$$M = \sum_{i=1}^{N_m} m_i \phi_i^2 \tag{6}$$

gdzie m_i oznacza masę mostu skoncentrowaną w punkcie i, ϕ_i oznacza amlitudę modalną postaci drgań w punkcie i, a N_m oznacza liczbę dyskretnych mas. Nowoczesne mosty budowane są z materiałów o dużej wytrzymałości i stosunkowo małej masie [6, 19]. Wynika to z chęci uzyskania pożądanego ze względów estetycznych efektu smukłości konstrukcji oraz dążeń do redukcji zużycia materiałów konstrukcyjnych ze względów ekonomicznych oraz ze względu na szkodliwość środowiskową procesów towarzyszących ich powstaniu. Konsekwencją tego stanu rzeczy są coraz częstsze przypadki nadmiernego poziomu drgań wywołanych ruchem pieszych. Związek pomiędzy masą mostu i jego podatnością na drgania, dla danej postaci drgań modalnych, wyrażony jest w równaniach 6 i 5.

Zakładając, że częstotliwość chodu pieszego i częstotliwość własna mostu nie pokrywają się, w perspektywie krótkoczasowej (np. podczas cyklu kroku lub chodu) F_{st} może dodać lub objąć energię z mostu, w zależności od fazy siły względem ruchu mostu i stosunku częstotliwości pieszego i mostu. Biorąc pod uwagę stabilność dynamiczną mostu, składowa siły pieszego właściwa dla chodu po nieruchomym podłożu, F_{st}, wywołuje w tym przypadku wzbudzenie tła, tzn. drgania o ograniczonej amplitudzie. Na poziom drgań mostu wpływa przede wszystkim interakcja pomiędzy mostem i pieszymi, wywołująca siły odziaływujące w częstotliwości drgań własnych mostu, będące składową F_{mov}. Kluczową, nierozwiązaną dotychczas kwestią jest to, czy piesi mają naturalną tendencję do synchronizowania częstotliwości chodu z częstotliwością drgań mostu – zjawisko to określa się często jako "lock-in" (ang. *usidlenie*), w którym to przypadku główne harmoniczne składowe siły pieszego F_{st} i F_{mov} działają we wspólnej częstotliwości. Próbę zdefiniowania tych sił podjęto podczas badań przedstawionych w publikacjach [P1], [P2], [P4] i [P5]. Aby umożliwić realizację tego zadania, zaproponowano nową metodykę identyfikacji sił generowanych przez pieszych, którą przedstawiono w publikacjach [P2], [P3] i [P6].

Na obciążenie mostu przez pieszego może mieć również wpływ dostosowanie chodu wynikające z obecności innych pieszych, np. poprzez zmianę trajektorii chodu lub szybkości kroków. Podjęto próby zdefiniowania tego efektu, które przedstawiono w publikacjach [P5], [P7] i [P8].

4.3.3 Interakcja pieszy-konstrukcja

Mechanizm interakcji pomiędzy pieszym i konstrukcją (IPK) w przypadku drgań poprzecznych mostu zachodzących w kierunku poziomym ma inny charakter niż w przypadku drgań zachodzących w kierunku pionowym. Podczas marszu po nieruchomym podłożu, chód pieszego jest pasywnie stabilny w płaszczyźnie strzałkowej, tj. pionowej płaszczyźnie zawierającej w sobie kierunek marszu, związanej z siłami reakcji podłoża (SRP) działającymi w osi pionowej. W płaszczyźnie czołowej, tj. pionowej płaszczyźnie ortogonalnej do płaszczyzny strzałkowej, związanej z SRP działającymi w kierunku poziomym, poprzecznie do osi podłużnej mostu, chód pieszego wymaga aktywnej kontroli równowagi. Z tego względu, aby uprościć problem, przypadki te rozpatruje się zazwyczaj osobno.

Poziome poprzeczne drgania mostów, których przykładem jest zachowanie dynamiczne Londyńskiego Mostu Milenijnego w dniu inauguracji [16], stanowią wyzwanie dla utrzymania stabilności chodu. Cecha ta jest jedną z fundamentalnych cech lokomocji zwierząt, w tym człowieka. Model predykcyjny obciążenia pieszego na moście oscylującym poziomo-poprzecznie, ujmujący tą cechę ludzkiego chodu, został zaproponowany przez Macdonald'a [28] w 2009 roku. W modelu tym, zainspirowanym badaniami Barker'a [5], ruch pieszego w płaszczyźnie czołowej modelowany jest za pomocą odwróconego wahadła (MOW = model odwróconego wahadła), tj. skupionej w punkcie masy przemieszczającej się podczas kroku w sposób wahadłowy na bezmasowej sztywnej nodze. Aby ograniczyć złożoność modelu, pominięto fazę podwójnego podparcia, tj. okresu cyklu chodu podczas którego obie nogi mają kontakt z podłożem, a transfer z jednej nogi na drugą odbywa się natychmiastowo z zachowaniem prędkości poprzecznej środka masy. Przyjmuje się również, że

drgania mostu nie mają wpływu na czas kroku. Aby zapewnić stabilny chód, przyjmuje się prawo sterowania szerokością kroku zaproponowane przez Hof *i in.* [24], zgodnie z którym perturbacje trajektorii środka masy (ŚM) kompensowane są w momencie początkowego kontaktu stopy z podłożem po okresie, w którym stopa znajduje się w powietrzu. Punkt przyłożenia wektora SRP, który w MOW tożsamy jest z punktem, w którym MOW jest w kontakcie z podłożem, zależy od prędkości bocznej ŚM w momencie początkowego kontaktu stopy z podłożem oraz stałej przesunięcia, zwanej marginesem stabilności (ang. *margin of stability*). W przypadku marszu po nieruchomym podłożu, MOW generuje SRP w osi poziomej-poprzecznej o komponentach widma amplitudowego Fourier'a w częstotliwości chodu f_s i jej nieparzystych całkowitych wielokrotności $\{3f_s, 5f_s, ...\}$, wykazując dużą zgodność z pomiarami empirycznymi [30]. W przypadku marszu po moście drgającym w kierunku poziomym-poprzecznym z częstotliwością f_b, która jest różna od f_s, MOW przewiduje dodatkowe składowe widma SRP Fourier'a rozmieszczone w odstępach $\pm|f_s - f_b|$ od wszystkich składowych występujących podczas chodu po nieruchomym podłożu. W tym przypadku, składową F_{mov} można zdefiniować jako sumę komponentów harmonicznych:

$$F_{\text{mov}} = \sum_j F_{jf_s \pm |f_s - f_b|} \tag{7}$$

gdzie $j = \{2k+1 : k \in \mathbb{Z}\}$, gdzie $\mathbb{Z}$ oznacza zbiór obejmujący 0 oraz liczby całkowite. Zgodnie z wynikami analiz MOW przedstawionymi w Bocian i in. [10, 9], w podobny sposób zdefiniować można F_{mov} wynikające z MOW, występujące podczas chodzenia po moście drgającym w osi pionowej, co potwierdziły testy eksperymentalne [18].

Warunkiem koniecznym występowania składowych SRP zdefiniowanych w równaniu 7 jest obecność drgań mostu, stąd oznacza się je mianem "sił zależnych od ruchu" (ang. *motion-dependent forces*) lub "sił samowzbudnych" (ang. *self-excited forces*) – ze względu na zjawisko sprzężenia zwrotnego pomiędzy układem drgającym (tj. mostem) a wzbudnikiem (tj. siłami generowanymi przez pieszego). Siły samowzbudne tym różnią się od sił zewnętrznych oddziaływujących na konstrukcje, którymi posługuje się zdecydowana większość zaproponowanych wcześniej modeli SRP [20], że siły zewnętrzne nie zależą od stanu kinematycznego konstrukcji. Najistotniejszy z komponentów sił samowzbudnych działa w częstotliwości własnej mostu, gdyż może on, w odpowiednich warunkach, bezpośrednio zasilać energią daną postać drgań modalnych powodując w ten sposób niestabilność dynamiczną. Obierając metodykę definiowania sił odziaływujących na konstrukcje podatne na drgania aeroelastyczne, wcześniej zastosowaną w tym kontekście przez Pizzimenti i Ricciardelli [36], Macdonald [28] rozłożył ten najistotniejszy komponent SRP na składowe w fazie z prędkością i przyspieszeniem mostu (inaczej niż w przypadku sił aeroelastycznych typu *flatter*, gdzie siły definiowane są zazwyczaj w fazie z przemieszczeniem i prędkością), które po odpowiednim przeskalowaniu można traktować jako dodatkowe tłumienie i masę mostu dla danej postaci drgań modalnych.

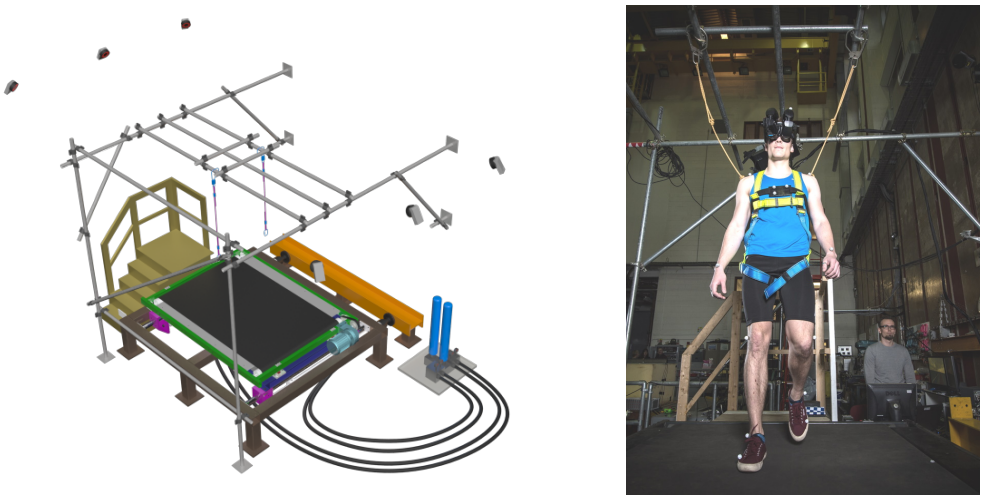
MOW przewidywał, że dodatkowe tłumienie związane z siłami samowzbudnymi może stabilizować lub destabilizować daną postać modalną, lub efekt ten może być neutralny, w zależności od częstotliwości ruchu pieszego i mostu. Ryzyko wystąpienia sił destabilizujących istnieje jednak dla szerokiego zakresu częstotliwości własnych mostu, włączając w ten zakres częstotliwości spoza zakresu częstotliwości cyklu chodu [28, 8]. Najistotniejszym wynikiem badań Macdonald'a [28] było więc wykazanie, że samowzbudne tłumienie może być generowane przez pieszego nawet jeśli częstotliwość jego kroku jest inna niż częstotliwość mostu. Stało to w sprzeczności z dominującym wówczas w literaturze naukowej i popularno-naukowej paradygmatem synchronizacji. Niskowymiarowy – a co za tym idzie stosunkowo łatwo poddający się analizie odkrywczej, MOW potrafił wyjaśnić szereg obserwacji poczynionych podczas pomiarów na pełnowymiarowych konstrukcjach [13, 29] oraz na stanowiskach laboratoryjnych [36]. Aby udowodnić jego przydatność dla dalszych analiz IPK należało jednak zweryfikować szereg założeń odnoszących się do następujących zagadnień:

- SRP wytwarzane za pomocą MOW nie zostały zweryfikowane z danymi zmierzonymi;
- Przyjęte w MOW prawo sterowania szerokością kroku, które znacząco wpływa na charakter SRP, nie zostało zweryfikowane z danymi zmierzonymi;

- Założenie, iż drgania podłoża nie wpływają na czas stawiania kroków było dyskusyjne;
- Nie były dostępne dane o wpływie bodźców sensorycznych na zachowanie pieszego, w szczególności tych pochodzących z aparatu wzrokowego, który odgrywa ważną rolę w sterowaniu chodem.

Aby sprostać tym wyzwaniom, przeprowadzono badania z wykorzystaniem nowego stanowiska badawczego, opracowanego w ramach doktoratu wnioskodawcy na University of Bristol w Wielkiej Brytanii [7]. Stanowisko badawcze, przedstawione na rysunku 1, składa się z bieżni wspartej na czterech siłomierzach umożliwiających bezpośredni pomiar SRP w osi poziomej-poprzecznej, zamontowanej na hydraulicznym stole wstrząsowym. Aby umożliwić pieszemu swobodne dostosowywanie sposobu chodu, bieżnia wyposażona została w system sterowania automatycznie korygujący prędkość pasa na podstawie dewiacji pozycji pieszego w stosunku do pozycji centralnej na bieżni. W celu pomiaru kinematyki pieszego oraz identyfikacji punktów charakterystycznych w cyklu chodu wykorzystano zestaw kamer monitorujących przemieszczenie znaczników odbijających światło emitowane przez kamery w pasie podczerwieni. W celu zapewnienia bodźców wzrokowych zgodnych z warunkami marszu w środowisku rzeczywistym wykorzystano środowisko wirtualnej rzeczywistości. W przeciwieństwie do typowych testów na bieżni, umożliwiono w ten sposób przepływ optyczny i paralaksę ruchu.

Opisane powyżej stanowisko badawcze zostało zaprezentowane w materiale opublikowanym przez Verge Science – platformę multimedialną popularyzującą osiągnięcia naukowe, przyciągając ponad 450 tys. odsłon w pięć dni od pierwszej publikacji [39]. Od około 2014 r. stanowi ono również stały element wizualny strony internetowej Department of Civil Engineering (*Wydziału Inżynierii Lądowej*) na University of Bristol w Wielkiej Brytanii [1].



Rysunek 1: Stanowisko doświadczalne do badań nad chodem pieszego po mostach dgrających w osi poziomej-poprzecznej.

Dogłębne analizy danych zebranych przy wykorzystaniu opracowanego stanowiska badawczego podczas testów z sześcioma pieszymi, przeprowadzone po uzyskaniu stopnia doktora, przeprowadzono na potrzeby artykułu [P1]. Wykazano, że widmo amplitudowe transformaty Fourier'a SRP zawiera składowe samowzbudne, zgodnie z przewidywaniami MOW [28], aż do komponentów rozmieszczonych wokół $5f_s$. Stało się to możliwe dzięki wysokiej jakości stanowiska badawczego oraz ulepszonej technice przetwarzania sygnałów, uwzględniającej fazowe zależności pomiędzy ruchem pieszego i mostu. Pomimo doskonałego dopasowania jakościowego między zmierzonymi SRP oraz przewidywaniami MOW, dopasowanie ilościowe wciąż wymaga dalszych badań. Ulepszona technika analizy sygnałów umożliwiła również wykazanie, że otrzymane wartości sił samowzbudnych wyrażonych za pomocą współczynników tłumienia i masy mają znacznie mniejsze zróżnicowanie niż wcześniej sądzono [25]. Oznacza to, że zachowanie pieszych w obecności drgań mostów w osi poziomej-poprzecznej jest bardziej spójne (lub przewidywalne).

Przebiegi czasowe szerokości kroku analizowano przy użyciu algorytmu Lomb-Scargle dla nierównomiernie próbkowanych danych [38], ponieważ czas pomiędzy kolejnymi uderzeniami piętą o podłoże (a więc czas cyklu kroków) jest generalnie zmienny z powodu inherentnej zmienności chodu. Pozwoliło to wykazać, że najczęstszym dostosowaniem pieszego do ruchu mostu jest modulacja szerokości kroku. Jest to zgodne z założeniami leżącymi u podstaw MOW [28] i z wynikami poprzednich badań eksperymentalnych [14]. W kontraście do wyników zaprezentowanych w [14], wyniki przedstawione w [P1] uzyskane zostały podczas marszu na bieżni umożliwiającej zmianę prędkości chodu. Okazało się to istotne, gdyż najczęstszym dostosowaniem kroku w obecności drgań bieżni w osi poziomej-poprzecznej było zwiększenie prędkości marszu, która determinuje wiele cech lokomocji. Stwierdzono również, że typ i dostępność informacji wizualnych powoduje statystycznie istotne zmiany w zachowaniu pieszych i w amplitudach SRP. Im mniej stacjonarnych punktów odniesienia w polu widzenia, tym większa zmienność marszu i większa średnia szerokość kroku. Może to wskazywać, że podczas poruszania się w tłumie, gdzie sygnały ruchu generowane przez każdego pieszego mogą utrudniać ocenę własnego ruchu, pieszy będzie generował SRP o wyższych amplitudach niż sugerują to rezultaty typowych badań laboratoryjnych przy użyciu bieżni, w których pominięte jest znaczenie informacji uzyskiwanych drogą wzrokową.

Wyniki przedstawione w [P1] uzyskano z testów, podczas których dominującym zachowaniem pieszego był *dryft fazowy*, który jest z jednym z podstawowych założeń MOW. Innymi słowy, pieszy chodził w częstotliwości cyklu chodu, która różniła się od poziomo-poprzecznej częstotliwości drgań bieżni, wobec czego różnica fazowa pomiędzy ruchem pieszego i bieżni zasadniczo ewoluowała w stałym tempie. Co więcej, przypisane drgania bieżni w osi poziomej-poprzecznej odbywały się zasadniczo w formie sinusoidy o stałej częstotliwości (0,9 Hz) i amplitudzie (10 mm). Z tego powodu wyniki przedstawione w [P1] stanowią zaledwie wycinek wszystkich możliwych przypadków IPK, które mogą mieć miejsce. Koniecznym było więc przebadanie rozleglejszej przestrzeni parametrycznej układu pieszy – most, czego rezultaty przedstawiono w artykule [P4].

Piętnastu pieszych wzięło udział w 137 testach, podczas których częstotliwość i amplitudę monoharmonicznych oscylacji bocznych bieżni zmieniano w zakresie, odpowiednio, od 0,54 do 1,1 Hz oraz od 5 do 15 mm. Zgodnie z założeniami leżącymi u podstaw MOW o niewrażliwości częstotliwości chodu na drgania podłoża [28] dla drgań o małej intensywności oraz z rezultatami przedstawionymi w [P1], najczęstszym zachowaniem pieszego był dryft fazowy, zidentyfikowany w 96 testach (70%). Tendencja pieszych do synchronizowania kroku z bocznymi oscylacjami bieżni była stosunkowo słaba, gdyż zachowanie takie było dominujące w 2 testach (<2%), chociaż piesi wykazali skłonność do przejściowej synchronizacji w kolejnych 7 testach (5%). Brak spójności parametrów chodu zidentyfikowano w 27 testach (20%). Najistotniejszym wynikiem badań przedstawionych w [P4] było odkrycie mechanizmu *przyciągania fazowego*. Przyciąganie fazowe powoduje nierównomierny lecz systematyczny rozkład różnicy fazowej, który jest konsekwencją modulacji czasu kroku wywołanej przez ruch podłoża. Odkryto dwa jakościowo odmienne tryby przyciągania fazowego, rozróżnione na podstawie relacji pomiędzy częstotliwością cyklu chodu i drgań mostu. Jeżeli średnia częstotliwość pieszego jest niższa od częstotliwości mostu, to nierównomierność rozkładu różnicy fazowej przyczynia się do niepożądanego w kontekście stabilności mostu efektu negatywnego tłumienia, który jest bardziej dotkliwy niż w przypadku dryftu fazowego. Jeżeli jednak średnia częstotliwość pieszego jest wyższa od częstotliwości mostu, to nierównomierność rozkładu różnicy fazowej przyczynia się do mniej dotkliwego efektu negatywnego tłumienia niż ten zaistniały w przypadku dryftu fazowego.

Mechanizm przyciągania fazowego został po raz pierwszy odkryty podczas analiz MOW zastosowanego do badań nad SRP generowanymi przez pieszych na mostach drgających w kierunku pionowym – patrz Bocian i in. [10, 9]. Hipotezę o tym, że ten sam mechanizm, chociaż określany jako *intermitencja fazowa* i ograniczony do jednego trybu, może występować podczas marszu po mostach drgających w kierunku bocznym wysunął McRobie i in. [33]. Odkrycie przyciągania fazowego w danych doświadczalnych przedstawionych w [P4] potwierdza te przypuszczenia.

Przyciąganie fazowe miało miejsce podczas 5 testów (<4%), chociaż klasyfikacja przyjęta w tym względzie w [P4] dla uniknięcia nieścisłości bazowała na wyjątkowo rygorystycznym kryterium.

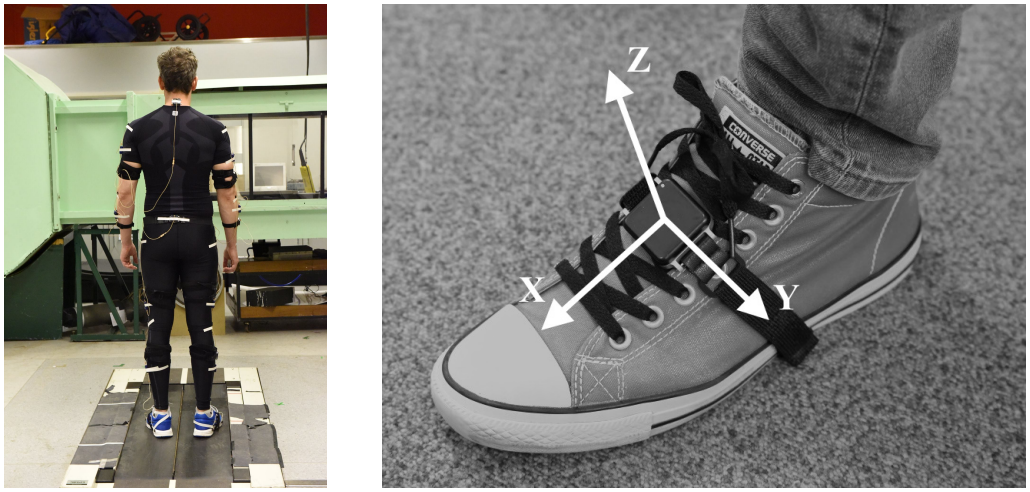
Analizując cały zbiór danych przedstawiony w [P4] stwierdzić można, że przyciąganie fazowe występowało również podczas testów przypisanych do innych kategorii. W szczególności, przyciąganie fazowe uwidaczniało się, gdy średnia częstotliwość cyklu chodu była oddalona o 0,05 Hz od częstotliwości drgań własnych mostu, jednakże maksymalna różnica między tymi częstotliwościami sięgała nawet 0,11 Hz. Argumenty te sugerują, że przyciąganie fazowe jest stosunkowo powszechne w przypadku mostów, dla których częstotliwości drgań własnych pokrywają się z zakresem częstotliwości chodu pieszego.

Z jednej strony wyniki przedstawione w [P4] wskazują, że synchronizacja (lub *usidlenie fazowe*) nie jest tak powszechna jak wcześniej przypuszczano, a co więcej nie jest ona warunkiem niezbędnym dla wystąpienia niestabilności dynamicznej mostów. Z drugiej strony odkryte przyciąganie fazowe może wyjaśnić rozbieżność pomiędzy wynikami wcześniejszych badań laboratoryjnych kwantyfikujących siły samowzbudne i wynikami pomiarów na pełnowymiarowych mostach. Amplitudy tych sił uzyskane z badań laboratoryjnych zwykle zawyżają znacznie współczynnik negatywnego tłumienia dla pieszego, zidentyfikowanego przez ARUP na podstawie testów obciążeniowych Londyńskiego Mostu Milenijnego na poziomie –300 $\mathrm{N\,s\,m^{-1}}$. W przypadku pieszych, których zachowanie wykazuje cechy przyciągania fazowego w sytuacji gdy ich średnia częstotliwość cyklu chodu spada poniżej częstotliwości drgań własnych mostu, współczynnik negatywnego tłumienia może osiągnąć wartość –9 $\mathrm{N\,s\,m^{-1}}$ na kilogram masy ciała. Oznacza to, że podczas obciążenia mostów tłumem pieszych, stosunkowo mały odsetek pieszych wykazujących tego typu zachowanie wystarczy aby znacząco zmienić średnie wielkości sił samowzbudnych, jak zasugerowano w [33].

Dzięki możliwości ścisłej kontroli nad warunkami eksperymentalnymi oraz zagwarantowania ich powtarzalności, badania laboratoryjne umożliwiają cenny wgląd w mechanizm IPK. Jednakże, ponieważ problem badawczy dotyczy ludzi, których zachowanie zależne jest od różnego rodzaju wpływów egzogenicznych, wyniki otrzymane w środowisku laboratoryjnym należy weryfikować pod kątem jakości. Dla przykładu, badania doświadczalne wykorzystujące bieżnie, np. [P1] i [P4], ograniczają się do testów dotyczących pojedynczego pieszego, podczas gdy mosty są zazwyczaj obciążone grupą lub tłumem pieszych. Pominięte są więc w tym przypadku wpływy interakcji pomiędzy pieszymi (IPP), które mogą prowadzić do zmiany trajektorii oraz fundamentalnych parametrów chodu, co związane jest ze zmianą parametrów SRP. Podobny wpływ mogą mieć warunki geograficzne i środowiskowe, np. lokalizacja mostu, sąsiedztwo obiektów budzących zainteresowanie pieszych, siła i oddziaływanie wiatru i temperatura otoczenia. Dlatego właśnie najlepszą formą podejścia doświadczalnego do badań nad IPK jest uzyskanie pomiarów umiejscowionych przestrzennie SRP oraz odpowiedzi dynamicznej pełnowymiarowych konstrukcji *in situ*, tj. w terenie, w miejscu ich posadowienia. Aby zrealizować ten ambitny cel, należy pokonać dwa główne wyzwania związane z aparaturą pomiarową i identyfikacją SRP. Aparatura pomiarowa musi umożliwiać synchroniczne przechwytywanie danych dotyczących kinematyki i/lub kinetyki wielu pieszych, umożliwiając bezpośredni pomiar SRP lub ich rekonstrukcję. Ponadto, ponieważ zgodnie z równaniem 5 siła modalna jest iloczynem SRP oraz amplitudy postaci modalnej, punkt przyłożenia SRP musi zostać dokładnie określony. Ponieważ piesi są w istocie autonomicznymi układami dynamicznymi, koniecznym jest aby aparatura pomiarowa operowała w trybie przestrzennie rozproszonym.

Pierwszą metodykę umożliwiającą wyznaczenie umiejscowionego przestrzennie pionowego komponentu SRP, tj. działającego zgodnie z kierunkiem wektora grawitacji, przedstawiono w artykule [P2]. Wykorzystano w tym celu sieć czujników bezprzewodowych (SCB), pierwotnie opracowanych do zastosowań w biomechanice. Każdy czujnik składa się z trójosiowego akcelerometru, żyroskopu i magnetometru, pamięci typu flash oraz mikroprocesora przetwarzającego dane. W SCB zaimplementowana jest tzw. synchronizacja kratowa, w ramach której każdy z czujników wysyła pakiety danych ze znacznikami czasu do innych czujników w celu ustalenia, w oparciu o modele statystyczne, wspólnego pojęcia czasu. Dane z SCB synchronizowane są z danymi opisującymi kinematykę mostu poprzez porównanie pomiarów ze współ-zlokalizowanych i współ-osiowych czujników SCB i akcelerometrów umiejscowionych na moście w punkcie o znaczącej amplitudzie dla danej postaci drgań modalnych.

Założono, że pomiar przyspieszenia z odpowiedniego punktu charakterystycznego na ciele pieszego pozwoli na zrekonstruowanie pionowej składowej SRP poprzez proste przeskalowanie tego sygna-



Rysunek 2: Pieszy wyposażony w bezprzewodowe czujniki do pomiaru ruchu w celu rekonstrukcji umiejscowionych przestrzennie sił reakcji podłoża (SRP) [P2].

łu, wyrażonego zgodnie z kierunkiem oddziaływania grawitacji, przez masę pieszego. Źródłem tej hipotezy jest założenie, iż pomiar kinematyki środka masy pieszego pozwala na oszacowanie SRP (zgodnie z prawami Newton'a). Aby ją zweryfikować, przeprowadzono badania eksperymentalne podczas których sześciu pieszych chodziło z różnymi prędkościami na bieżni wyposażonej w siłomierze, umożliwiające bezpośredni pomiar SRP. Ruch pieszego śledzono przy pomocy systemu optycznego. Czujniki SCB przymocowano na poziomie pępka, mostka, piątego kręgu lędźwiowego (dolna część pleców) oraz siódmego kręgu szyjnego. Walidacja zrekonstruowanej siły polegała na analizie porównawczej amplitudy i fazy transformaty Fourier'a pomiędzy zrekonstruowanym i bezpośrednio zmierzonym komponentem SRP. Stwierdzono, że błąd w podstawowej składowej harmonicznej SRP, zrekonstruowanej na podstawie danych z 7 kręgu szyjnego, był mniejszy niż 15% przy 90% poziomie ufności.

Algorytm martwych okresów ruchu stopy (tłumaczenie własne z ang. *pedestrian dead reckoning algorithm*; PDR) z heurystyczną korektą dryftu został wykorzystany w metodyce zaproponowanej w artykule [P2] służącej do wyznaczenia przemieszczenia punktu przyłożenia wektora SRP. PDR polega na inercyjnym pomiarze ruchu stopy, w którym w celu skorygowania dryftu związanego z całkowaniem numerycznym podczas obliczania przemieszczenia stopy wykorzystuje się okres, w którym stopa znajduje się na podłożu i jest względnie nieruchoma (stąd tzw. martwe okresy ruchu). Ruch drugiej (nieoprzyrządowanej) stopy można wyznaczyć przyjmując pewne założenia wynikające z dwunożnego charakteru chodu człowieka, na podstawie zarejestrowanego ruchu stopy oprzyrządowanej. Synteza danych dotyczących przemieszczenia obu stóp pozwala na ustalenie faz chodu, tj. okresów z pojedynczym i podwójnym podparciem, umożliwiając w ten sposób określenie przybliżonej lokalizacji punktu przyłożenia wektora SRP.

Metodyka zaproponowana w artykule [P2] została zastosowana podczas testów na Baker Bridge – podwieszonym moście dla pieszych o rozpiętości 109 m, zlokalizowanym w Exeter, w Wielkiej Brytanii. Zmierzono zachowanie mostu poddanego działaniu pieszego i porównano je z modelem modalnym mostu poddanego działaniu zrekonstruowanego umiejscowionego przestrzennie pionowego komponentu SRP. Stwierdzono bardzo bliską zgodność dla dwóch badanych postaci drgań modalnych w częstotliwościach 1,61 i 2 Hz, przewyższającą wyniki wszelkich wcześniejszych prób pogodzenia obciążenia pieszego i odpowiedzi dynamicznej mostów na podstawie pomiarów na pełnowymiarowych konstrukcjach *in situ*. Pierwsze próby weryfikacji zaproponowanej metodyki powiodły się, motywując tym samym dalsze badania w tym obszarze przedstawione w artykule [P5] i omówione w dalszej części autoreferatu.

Podejście do rekonstrukcji sił generowanych przez pieszych zaproponowane w artykule [P2] zostało

rozwinięte w artykułach [P3] i [P6], w których zaproponowano, odpowiednio, metodykę rekonstrukcji siły podskoków i SRP w kierunku poprzecznym-poziomym.

Głównym motorem wysiłków opisanych w [P3] była chęć stworzenia prostej metodyki umożliwiającej klasyczną eksperymentalną analizę modalną mostów, która jest warunkiem wstępnym do badań analitycznych nad ich zachowaniem dynamicznym pod wpływem obciążenia generowanego przez pieszych. Pełna charakterystyka dynamiczna konstrukcji wymaga pomiaru siły wejściowej i odpowiedzi dynamicznej, co zwykle uzyskuje się za pomocą, odpowiednio, wzbudnika wibracyjnego lub młotka modalnego i zestawu przewodowych akcelerometrów. Wdrożenie takiego systemu oprzyrządowania jest często kłopotliwe ze względu na wyzwania logistyczne związane z okablowaniem i pozycjonowaniem systemu przechwytywania danych, a także pociąga za sobą znaczne koszty. Aby temu zaradzić, zaproponowano procedurę bazującą na pomiarach z wykorzystaniem SCB. Siła wejściowa generowana jest przez *oprzyrządowanego człowieka* (ang. instrumented human), tj. osobę wyposażoną w SCB w celu rekonstrukcji siły podskoków na podstawie pomiaru inercyjnego z charakterystycznego punktu na ciele. Stosowność tej metody potwierdziły analizy porównawcze wykonane w oparciu o dane zebrane podczas podskoków oprzyrządowanego człowieka na płycie siłowej. Podobnie jak w przypadku rekonstrukcji pionowego komponentu SRP w chodzie [P2], najlepszą lokalizacją czujnika okazał się siódmy kręg szyjny. W celu weryfikacji zaproponowanej metodyki przeprowadzono eksperymentalną analizę modalną trzech mostów, tj. Baker Bridge w Exeter, w Wielkiej Brytanii, oraz dwóch mostów zlokalizowanych w Narodowej Galerii Sztuki w Singapurze (*National Gallery Singapore*), dla których najistotniejsze postaci drgań modalnych występują, odpowiednio, wokół pierwszej (Baker Bridge) i drugiej (National Gallery Singapore) harmonicznej częstotliwości podskoków. Odpowiedź dynamiczną mostów zmierzono przy pomocy SCB kompatybilnych z tymi umieszczonymi na oprzyrządowanym człowieku. Stwierdzono dobrą zgodność pomiędzy wynikami uzyskanymi za pomocą SCB oraz metodami konwencjonalnymi, co potwierdza potencjał zaproponowanej metodyki. Według ustaleń autorów, opisane w [P3] testy przeprowadzone na potrzeby analizy modalnej dostarczyły pierwsze na skalę światową dowody demonstrujące potencjał kompleksowej analizy modalnej mostów dla pieszych wykorzystującej wyłącznie SCB do pomiaru ruchu. Godnym podkreślenia jest fakt, iż zaproponowana metodyka umożliwia określenie masy modalnej. Znaczenie masy modalnej, o czym informuje równanie 5, polega na tym, że reguluje ona amplitudy odpowiedzi dynamicznej mostów poddanych oddziaływaniom generowanym przez wiatr i pieszych. Zależności te wyrażone są, odpowiednio, w liczbie Scruton'a [40] i liczbie Scruton'a dla pieszych [32, 11].

Kolejnym etapem badań, podjętym w następstwie analiz przedstawionych w artykule [P2] i [P3], było zdefiniowanie metodyki umożliwiającej rekonstrukcję poziomych-bocznych SRP generowanych podczas chodu i kołysania ciałem. Głównym motorem tej aktywności, opisanej w artykule [P6], było stworzenie narzędzi umożliwiających badanie IPK na mostach in-situ oraz umożliwienie eksperymentalnej analizy modalnej konstrukcji charakteryzujących się poziomymi-poprzecznymi postaciami drgań modalnych o niskiej częstotliwości.

W odróżnieniu od wyników przedstawionych w artykule [P2] i [P3], pomiar ruchu przy pomocy pojedynczego czujnika okazał się niewystarczający dla rekonstrukcji poziomych-bocznych SRP podczas chodu. Wynika to z faktu, że dolne i górne segmenty ciała, posiadające istotne masy, zazwyczaj nie poruszają się w tej samej fazie. Dlatego też nie jest możliwe wyznaczenie jednej lokalizacji dla miejsca montażu czujnika, z którego można by uzyskać sygnał reprezentujący ruch środka masy ciała. Jednakże stwierdzono, że liniowa kombinacja przyspieszeń z dolnej części pleców i mostka, przy odpowiednim doborze współczynników kierunkowych (generalizując, przybierają one wartość, odpowiednio, około 30% i 70% masy ciała), daje wyniki umożliwiające rekonstrukcję SRP w opisywanym przypadku. Średnia amplituda podstawowej składowej harmonicznej SRP (tj. w częstotliwości chodu) w widmie transformaty Fourier'a była o 3% wyższa niż ta zmierzona bezpośrednio na bieżni wspartej na siłomierzach, umożliwiającej bezpośredni pomiar siły. Istotny okazał się współczynnik zmienności błędu rekonstrukcji, który wyznaczono na poziomie 16,5%.

Dla rekonstrukcji SRP generowanych podczas kołysania również zastosowano liniową kombinację przyspieszeń zmierzonych za pomocą SCB umiejscowionych na dolnej części pleców i mostku.

Przy odpowiednim doborze współczynników kierunkowych, które określać należy indywidualnie dla każdego człowieka (gdyż nie wykazano wartości dających ogólnie najlepsze rezultaty), różnica w średniej amplitudzie transformaty Fourier'a dla podstawowej składowej harmonicznej SRP wynosiła kilka procent w stosunku do zmierzonej bezpośrednio na płycie siłowej. Współczynnik zmienności błędu rekonstrukcji wyznaczono w przedziale od 21.1% do 35.4%. Stosunkowo niska dokładność rekonstrukcji była przyczyną sporego rozrzutu masy modalnej wyznaczonej na podstawie eksperymentalnej analizy modalnej przy wykorzystaniu oprzyrządowanego człowieka dla dwóch wielopiętrowych budynków zlokalizowanych w Exeter w Wielkiej Brytanii oraz w Szanghaju w Chinach. Jednakże wykazano, że oprzyrządowany człowiek może wygenerować siły poziome w częstotliwościach poniżej 2 Hz, których amplituda jest większa od sił generowanych za pomocą stosowanego powszechnie wzbudnika wibracyjnego, tj. APS 400. Częstotliwości własne poniżej 2 Hz są typowe dla wielopiętrowych budynków oraz mostów o rozpiętości powyżej 30 m. Ze względu na potencjał przedstawionej metodyki, kontynuowane są wysiłki dla jej usprawnienia i ulepszenia.

Metodyka opracowana w celu identyfikacji umiejscowionego przestrzennie pionowego komponentu SRP, przedstawiona w [P2], została wykorzystana w [P5] w celu zbadania wpływu grup pieszych na dynamiczne zachowanie mostów. Sześciu pieszych wyposażonych zostało w SCB, z czujnikami umiejscowionymi na wysokości piątego kręgu lędźwiowego. Testy obciążeniowe Baker Bridge w Exeter, w Wielkiej Brytanii, zostały przeprowadzone z formacją pieszych 3/2, 2/3 i 1/6 (kolumny/rzędy). Odpowiedź dynamiczną mostu zmierzono przy pomocy systemu konwencjonalnych akcelerometrów. Głównym rezultatem testów opisanych w [P5] w kontekście IPK była większa skłonność pieszych do koordynowania częstotliwości kroków z ruchem mostu niż z sobą nawzajem. Wydaje się to zgodne z tezą, że w sytuacjach, w których stabilność chodu jest zagrożona – tak jak w przypadku chodzenia po drgającym moście, dostosowania chodu prowadzące do odzyskania równowagi są traktowane priorytetowo w stosunku do innych funkcji kontroli chodu. Analizy ekwiwalentnego modelu modalnego mostu pod wpływem zrekonstruowanych SRP przedstawione w [P5] wykazały, że metodyka przedstawiona w [P2] pozwala na uzyskanie dobrej zgodności modelu z danymi zmierzonymi podczas testów z grupami pieszych. Dalsze prace badawcze podejmujące tematykę przedstawioną w [P2] i [P5], realizowane są obecnie przez wnioskodawcę w ramach projektu sponsorowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (NAWA) w ramach programu Polskie Powroty.

4.3.4 Interakcja pieszy-pieszy

Interakcja pieszy-pieszy (IPP) była przedmiotem stosunkowo niewielkiej uwagi w środowisku inżynierów budownictwa [41]. W większości przypadków koordynacja ruchu pieszego z innymi pieszymi, która może mieć istotny wpływ na zachowanie dynamiczne mostów, jest uwzględniana w modelach obciążenia poprzez zwiększoną amplitudę składowych harmonicznych (Fourier'a) SRP lub zastosowanie mnożnika zwiększającego amplitudę SRP wyznaczoną dla pojedynczego pieszego [31]. Podejście to może nie być adekwatne, z uwagi na szereg założeń i uproszczeń poczynionych w stosunku do zachowań pieszego jak również pominięcie współ-występowania IPK i IPP [20]. Główną przeszkodą dla zdefiniowania wiarygodnych modeli obciążeń, uwzględniających oba mechanizmy interakcji, jest ograniczona dostępność odpowiednich danych empirycznych. Większość dostępnych danych pochodzi z badań zainicjowanych w innych dziedzinach nauki, np. psychologii, neurobiologii oraz, bardziej ogólnie, nauki o ruchu człowieka. Badania te koncentrują się na chodzeniu w parach, podczas gdy mosty są zwykle obciążone przez (często rozproszone przestrzennie) grupy pieszych. Wątpliwym jest, aby wyniki badań nad parami mogły być ekstrapolowane na bardziej złożone rozkłady pieszych. Istotnym ograniczeniem metodycznym większości tych badań jest użycie zmotoryzowanych bieżni, narzucających prędkość chodzenia a tym samym uniemożliwiających, lub przynajmniej utrudniających, adaptacyjne dostosowanie kroków. W przypadku nielicznych badań umożliwiających badanym chodzenie naziemne, dystans pokonywany przez pieszych był często zbyt krótki aby rozróżnić prawdziwą i pozorną koordynację chodu.

Przed rozpoczęciem prezentowanych w autoreferacie prac nad IPP, wyniki badań zainicjowanych w środowisku inżynierii budownictwa dawały niejasny obraz koordynacji chodu pomiędzy pieszymi. Wyniki analiz synchronizacji pieszych podczas poziomej-poprzecznej niestabilności Toda Park Bridge w Japonii na podstawie obrazów z kamer sugerowały synchronizację na poziomie 20% [21].

Wyniki analiz zachowania pieszych na 12-metrowej swobodnie podpartej płycie z danych uzyskanych tą samą metodą nie wykazały istotnej synchronizacji [3]. Z kolei wyniki analiz ruchu pieszych chodzących po nieruchomym podłożu na dystansie 130 m, na podstawie pomiarów z krokomierzy, wykazały dużą różnorodność zachowań pieszych [37]. Jedyny zestaw danych uzyskany metodą bezpośredniego pomiaru z pieszych chodzących po moście pochodził z pracy Van Nimmen i in. [35]. Analizy sygnałów z SCB wykazały, że synchronizacja kroków pieszych jest okresowa, chociaż siła i jakość synchronizacji nie zostały skwantyfikowane. Wspólnym wnioskiem z wszystkich przytoczonych prac było zalecenie dalszych badań nad IPP.

Biorąc pod uwagę niski stan wiedzy na temat IPP i niedociągnięcia metodyczne związane z procesowaniem zmierzonych sygnałów, w artykule [P5] przedstawiono nową metodykę kwantyfikacji IPP. Bazując na rezultatach przedstawionych w [P2], pionowa składowa SRP, tj. działająca zgodnie z kierunkiem wektora grawitacji, została wykorzystana do ilościowych analiz synchronizacji przy użyciu transformaty falkowej. Większość wcześniejszych badań nad synchronizacją pieszych wykorzystywała transformatę Hilbert'a w celu zdefiniowania przebiegu czasowego fazy chodu. Metoda ta wymaga filtrowania pasmowo-przepustowego sygnału wokół jego fundamentalnej częstotliwości, co prowadzi do utraty części informacji dotyczących dynamiki chodu. Analiza bazująca na krzyżowej transformacie falkowej z wykorzystaniem kompleksowej falki Morlet'a znosi to ograniczenie ze względu na dobre dopasowanie jądra przekształcenia (tj. falki bazowej) z badanym sygnałem (tj. pionową składową SRP). W konsekwencji, w widmie mocy transformaty falkowej energia skoncentrowana jest w wąskim paśmie skali (lub pseudo–częstotliwości), w którym różnica fazowa jest względnie stacjonarna (aczkolwiek może ona być niestacjonarna w czasie). Otrzymany w ten sposób przebieg czasowy różnicy fazowej, odzwierciedlający większość informacji związanych z dynamiką chodu, wykorzystany jest do ilościowej oceny siły i kierunkowości synchronizacji chodu pomiędzy parą pieszych przy pomocy wskaźników otrzymanych na podstawie, odpowiednio, entropii Shannon'a i metod statystycznych dla danych kątowych.

Metodyka zaproponowana w [P5] została wykorzystana do oszacowania koordynacji ruchu w układzie grupa pieszych – most, z testów przeprowadzonych na Baker Bridge w Exeter, w Wielkiej Brytanii. Siła i kierunkowość koordynacji ruchowej została przypisana do topologicznej mapy pieszych, ujawniając w ten sposób złożoną sieć interakcji w obrębie grupy pieszych.

Najsilniejszą koordynację chodu stwierdzono w przypadku par, w których piesi umiejscowieni byli jeden-za-drugim, a następnie dla par pieszych idących obok siebie. Stwierdzono, że siła koordynacji chodu słabnie wraz ze wzrostem dystansu pomiędzy bodźcem (tj. pieszym dostarczającym sygnał do koordynacji) a obserwatorem (tj. pieszym reagującym na sygnał do koordynacji). Co ciekawe, odkryto asymetrię w zachowaniu pieszych, objawiającą się silniejszą koordynacją obserwatora z pieszymi po prawej stronie, co może odzwierciedlać dominację oczną populacji – w zależności od źródła szacuje się, że około dwie-trzecie populacji ma dominację prawo-oczną. Uogólniając, koordynacja chodu w grupie była niższa od koordynacji chodu w parach, która często służy do kalibracji modeli obciążeń konstrukcji. Jest to najprawdopodobniej spowodowane obfitością bodźców koordynacji ruchu generowanych przez wielu pieszych w grupie i niezdolnością obserwatora do reagowania na bodźce od pojedynczego pieszego przez długi okres czasu. Stwierdzono jednak ujemną korelację między siłą synchronizacji a modułem różnicy wysokości pieszych, co jest zgodne z wynikami badań nad marszem w parach.

Analiza fazowa wykazała, że w przypadku pieszych idących z normalną prędkością w układzie jeden-za-drugim, następca najprawdopodobniej postawi stopę na podłożu w tym samym momencie lub nieco wcześniej niż poprzednik. W przypadku pieszych idących w tym samym układzie z niską prędkością, następca najprawdopodobniej postawi stopę na podłożu nieco wcześniej niż poprzednik. W przypadku pieszych idących z normalną prędkością bok-w-bok, piesi najchętniej synchronizują krok, chociaż tendencja ta jest stosunkowo słaba i ulega osłabieniu przy małych prędkościach chodu. Należy podkreślić, że w analizie przedstawionej w [P5] nie rozróżniano synchronizacji ipsilateralnej (tj. kończynami po tej samej stronie ciała) i kontralateralnej (tj. kończynami po przeciwnej stronie ciała), gdyż z punktu widzenia stabilności dynamicznej mostu, przy drganiach w kierunku pionowym, te dwa warunki są równoważne.

Metodyka przedstawiona w [P5] została wykorzystana w [P7] w celu zdefiniowania podstawowych charakterystyk chodu w grupie po nieruchomym podłożu. Dziewięciu pieszych, nieświadomych celu protokołu eksperymentalnego, chodziło w formacji 3/3 (kolumny/szeregi), będąc wyposażonymi w SCB. Czujniki zlokalizowane były na poziomie siódmego kręgu szyjnego. Dodatkowo, kolejny pieszy szedł w awangardzie grupy aby sterować prędkością jej przemieszczania. Ponieważ częstotliwość i prędkość chodu danej osoby są ściśle skorelowane, aby sterować prędkością grupy wykorzystano taktomierz. Częstotliwość taktomierza ustawiono w przedziale od 1,3 Hz do 2,3 Hz, w odstępach co 0,1 Hz, w losowym porządku. W sumie przeprowadzono czterdzieści cztery testy grupowe, w tym trzydzieści trzy testy, podczas których piesi byli poinstruowani jedynie do utrzymania formacji chodu, oraz jedenaście testów, podczas których piesi byli również poinstruowani do synchronizacji kroków.

Ustalono liniową zależność pomiędzy prędkością i częstotliwością chodu dla testów przeprowadzonych bez instrukcji aby synchronizować kroki. Zależność ta okazała się znacząco odmienna od zależności obowiązującej dla chodu pojedynczego pieszego. Silniejszy wpływ prędkości na częstotliwość chodu stwierdzono w przypadku synchronizacji zamierzonej, co najprawdopodobniej wiąże się z dostosowaniem chodu charakterystycznym dla tego przypadku. Najsilniejszą korelację chodu stwierdzono dla układu pieszych idących jeden-za-drugim, a następnie dla pieszych idących bok-w-bok. Generalizując wyniki, siła synchronizacji kroków była niższa od zaobserwowanej na podstawie danych dla par pieszych [44], osiągając próg zaproponowany w celu rozróżnienia niesynchronizowanego i zsynchronizowanego chodu wyłącznie dla testów podczas których piesi otrzymali instrukcję do synchronizowania kroków, dla układów jeden-za-drugim i bok-w-bok.

Co ciekawe, stwierdzono, że siła koordynacji chodu wzrasta wraz ze wzrostem prędkości chodu w obu scenariuszach doświadczalnych, tj. synchronizacji nieinstruowanej i instruowanej. Wydaje się to stać w sprzeczności z powszechnie głoszonym poglądem motywującym przyjęcie zwiększonych współczynników korelacji SRP dla chodu wolno poruszających się tłumów pieszych [15]. Zaobserwowana zależność związana jest najprawdopodobniej z dostępnością przestrzeni wokół pieszego, która determinuje charakterystykę jego chodu. Przy niskich prędkościach chodu, sprzyjających zagęszczeniu pieszych, piesi podejmują działania w celu uniknięcia kolizji z innymi pieszymi kosztem osłabienia koordynacji ruchowej. Przy normalnych i wysokich prędkościach chodu wymóg ten przestaje obowiązywać, umożliwiając pieszym podjęcie (najprawdopodobniej nieświadomego) wysiłku, aby chodzić z wyższym stopniem koordynacji ruchowej.

Podsumowując, chodzenie w grupie charakteryzuje się innym reżimem dynamicznym niż chodzenie pojedynczo. Siła synchronizacji podczas chodzenia w grupie jest mniejsza niż podczas chodzenia parami. O spontanicznej (tj. nieinstruowanej) synchronizacji w większym stopniu decyduje podobieństwo anatomiczne/biomechaniczne, w szczególności różnica pomiędzy wzrostem pieszych, niż ich topologiczne rozłożenie. Pomimo tego, że siła i kierunkowość synchronizacji zostały oszacowane w [P7] dla chodu po nieruchomym podłożu, przedstawione rezultaty sugerują, że mechanizm IPP powinien być uwzględniony w modelach obciążeń mostów przez pieszych.

Artykuły [P5] i [P7] zaprezentowały jedne z pierwszych dowodów na koordynację ruchową pieszych podczas chodu w grupach. Jednakże badania doświadczalne przeprowadzone na ich potrzeby zostały przeprowadzone w starannie zaaranżowanej formacji pieszych, tj. w narzuconym układzie ich rozmieszczenia. Aby uzyskać obiektywne wyniki, protokół eksperymentalny powinien umożliwiać zbieranie danych w warunkach swobodnego chodu. Oznacza to, że piesi powinni mieć możliwość swobodnego wyboru prędkości (a co za tym idzie trajektorii) chodu. Ponadto pożądana jest powtarzalność warunków doświadczalnych, w przeciwnym razie aby zapewnić statystyczną wiarygodność wyników konieczna jest duża ilość danych. W celu uzyskania wiarygodnego obrazu dynamiki grupy lub tłumu pieszych, należy również zapewnić możliwość obserwacji chodu wszystkich pieszych.

Powtarzalność warunków eksperymentalnych i obserwowalność ruchu pieszych jest trudna do osiągnięcia w warunkach nieskrępowanego chodu w środowisku rzeczywistym. Wyzwania te można jednak przezwyciężyć dzięki zastosowaniu wirtualnej rzeczywistości (VR), która umożliwia realizację szerokiego zakresu symulowanych scenariuszy w ściśle kontrolowanym środowisku laboratoryjnym. Możliwości zastosowania VR do badania dynamiki pieszych zostały zbadane w pracy [P8], bazując na pomysłach zaprezentowanych w [P1].

Rysunek 3: Stanowisko badawcze do pomiarów koordynacji ruchu pieszych z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości [P8].

Główną ideą leżącą u podstaw działań przedstawionych w artykule [P8] było opracowanie metodyki badań nad IPP w środowisku VR. Środowisko VR składało się ze statycznej sceny, dostosowanej do wymogów protokołu eksperymentalnego, oraz wirtualnych pieszych (tj. awatarów) sterowanych przez algorytm sztucznej inteligencji (AI). Wykorzystując infrastrukturę Biomechanics & Immersive Technology Laboratory (*Laboratorium Biomechaniki i Technologii Immersyjnej*), utworzonego przez wnioskodawcę w 2018 roku na University of Leicester w Wielkiej Brytanii, opracowano stanowisko doświadczalne umożliwiającą nieskrępowany chód pieszego w obecności awatarów. Stanowisko doświadczalne, zlokalizowane w obrębie hali sportowej, składało się z 24 kamer OptiTrack Prime 17W i 10 kamer OptiTrack Prime 13 wraz z urządzeniami peryferyjnymi obsługiwanymi za pomocą dedykowanego komputera, jak pokazano na rysunku 3. Badany pieszy wyposażony był w przenośny komputer MSI VR One 7RE podłączony do gogli VR Oculus Rift CV1. Pozycja i orientacja sceny VR prezentowanej w goglach była aktualizowana na podstawie danych zarejestrowanych za pomocą kamer do śledzenia ruchu. Pionową (tj. zgodną z kierunkiem grawitacji) składową ruchu stopy, zmierzoną za pomocą SCB, wykorzystano w celu wyznaczenia przebiegów czasowych fazy cyklu chodu. Ponieważ zachowanie awatara było w pełni programowalne, kompatybilny sygnał był wyodrębniony dla awatara z wirtualnej stopy. Umożliwiło to określenie siły i kierunkowości koordynacji ruchu pomiędzy pieszym i awatarem zgodnie z metodyką przedstawioną w [P5].

Badania walidujące stanowisko doświadczalne VR miały na celu określenie, czy sposób koordynacji ruchu badanego pieszego podczas chodu z innym pieszym (tj. prawdziwym człowiekiem) różni się od sposobu koordynacji ruchu podczas chodu z awatarem. W związku z tym, w ramach protokołu doświadczalnego, badany pieszy chodził w parze z drugim pieszym bądź awatarem w układzie jeden-za-drugim i bok-w-bok, po pętli w kierunku zgodnym i przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Aby zapewnić kompatybilność bodźca koordynacji chodu, awatar został zbudowany w taki sposób, aby reprezentował on prawdziwego pieszego (towarzyszącego badanemu pieszemu) pod względem cech anatomicznych i biomechaniki chodu. Aby zapewnić kompatybilność warunków doświadczalnych VR z warunkami rzeczywistymi, zapewniono również dźwiękowe wskazówki towarzyszące wykonywaniu kroków. W pierwszym zestawie testów, badany pieszy otrzymał polecenie utrzymania formacji chodu. W drugim zestawie testów, badany został również poinstruowany żeby zsynchronizować kroki z towarzyszącym pieszym.

Stwierdzono, że spontaniczna synchronizacja chodu w parach jest stosunkowo słaba, niezależnie od środowiska wizualnego i topologicznego układu pieszych. W przypadku koordynacji instruowanej, siła synchronizacji chodu jest większa dla chodu z prawdziwym pieszym oraz dla układu pieszych jeden-za-drugim. Chodzenie w VR wiąże się z większą zmiennością parametrów chodu. Badani piesi w 92% przypadków inicjowali krok później niż prawdziwy towarzyszący pieszy, ale w 54% przypadków wcześniej niż wirtualny towarzyszący pieszy. Chociaż może się to wydawać znaczną różnicą

jakościową w zachowaniu pieszych, różnica w średnim kierunku kątowym jest stosunkowo mała – wszystkie wartości mieszczą się w zakresie od –0,07π do 0,06π dla fazy zdefiniowanej w przedziale od $-\pi$ do π. Główna różnica pomiędzy chodem z prawdziwym i wirtualnym akompaniującym pieszym dotyczy zmienności średniego kierunku kątowego. Odchylenie standardowe jest 3,6 i 4,8 razy wyższe podczas testów z VR, odpowiednio, dla pieszych idących bok-w-bok i jeden-za-drugim.

Podsumowując rezultaty przestawione w [P8], pomimo różnic natury ilościowej pomiędzy rezultatami otrzymanymi z testów w środowisku rzeczywistym i wirtualnym, różnice natury jakościowej są stosunkowo małe w kontekście IPP. Dlatego też [P8] stworzyła podstawy do dalszych badań nad zachowaniem tłumu z wykorzystaniem technologii VR.

4.3.5 Podsumowanie

Główny wkład wnioskodawcy w rozwój dyscypliny *inżynieria lądowa i transport*, na podstawie cyklu ośmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, stanowiącego podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego, jest następujący:

- Zaproponowanie nowego podejścia do badań laboratoryjnych nad interakcją most – pieszy z wykorzystaniem bieżni. Podejście to opiera się o prosty postulat – aby uchwycić prawdziwe zależności pomiędzy tymi układami dynamicznymi, należy zapewnić możliwie największą zgodność pomiędzy środowiskiem laboratoryjnym i środowiskiem rzeczywistym [P1]. Aby zrealizować jego założenia, proponowane podejście opiera się na wykorzystaniu środowiska wirtualnej rzeczywistości, zapewniając w ten sposób przepływ optyczny i paralaksę ruchu, oraz na umożliwieniu swobodnego dostosowywania sposobu chodu poprzez zastosowanie sprzężenia zwrotnego w mechaniźmie sterowania prędkością bieżni. Filozofia ta została przyjęta w VSimulators przedstawionym na rysunku 4, tj. nowoczesnym laboratorium powstałym w ramach projektu zasilonego kwotą 4,8 miliona funtów z budżetu Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), którego wnioskodawca jest pomysłodawcą, o czym informuje oficjalna strona projektu: https://vsimulators.co.uk/about. Partnerami projektu ze strony przemysłu są między innymi: Akt II, Atkins, BMT, Buro Happold oraz COWI. VSiumaltors jest największą inwestycją poczynioną przez Research Councils UK (obecnie United Kingdom Research and Innovation, UKRI) na badania nad interakcją pomiędzy ludźmi i konstrukcjami w kontekście drgań mechanicznych.
- Weryfikacja modelu odwróconego wahadła (MOW) zaproponowanego przez Macdonald'a [28] dla uchwycenia zachowania pieszego na mostach drgających w kierunku poziomym-poprzecznym, a następnie badanego w pracy Bocian i in. [8], w zakresie sił reakcji podłoża (SRP) generowanych przez pieszego [P1]. Oprócz składowych sił występujących w widmie amplitudowym transformaty Fourier'a podczas marszu po nieruchomym podłożu, zlokalizowanych w częstotliwościach nf_s, gdzie n jest nieparzystą liczbą całkowitą, występują również składowe samowzbudne, wynikające z oddziaływania ruchu podłoża na pieszego, które są rozmieszczone w odstępach $\pm|f_s - f_b|$ od nf_s.
- Odkrycie mechanizmu przyciągania fazowego podczas marszu na podłożu drgającym w kierunku poziomym-poprzecznym [P4]. Z uwagi na brak przekonywujących dowodów na wszechobecną synchronizację ruchu pieszego z ruchem mostu w ściśle określonej różnicy fazowej, można przypuszczać, że mechanizm ten jest odpowiedzialny za siły o stosunkowo dużej amplitudzie destabilizujące konstrukcje. Mechanizm przyciągania fazowego został zaobserwowany po raz pierwszy podczas badań nad MOW w kontekście interakcji pomiędzy pieszym i mostem drgającym w kierunku pionowym (Bocian i in. [10, 9]).
- Opracowanie metodyki służącej wyznaczaniu umiejscowionych przestrzennie pionowych komponentów sił reakcji podłoża na mostach, in situ, przy użyciu bezprzewodowych czujników ruchu [P2]. Metodyka ta została następnie rozszerzona aby umożliwić wyznaczanie sił poziomych-poprzecznych generowanych przez pieszych [P6]. Badania prowadzone obecnie na potrzeby projektu finansowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (NAWA) w ramach programu Polskie Powroty, mają na celu wykorzystanie tego podejścia do uchwycenia dynamiki systemu most–piesi, aby w efekcie końcowym zdefiniować wiarygodne wytyczne projektowe.

- Opracowanie metodyki służącej kwantyfikacji koordynacji ruchu w systemie pieszy–pieszy i pieszy–konstrukcja przy wykorzystaniu transformaty falkowej [P5]. Powszechną praktyką poprzedzającą zaproponowaną metodykę było wykorzystanie transformaty Hilbert'a w celu analizy sygnałów reprezentujących kinematykę ruchu pieszych dla otrzymania przebiegów czasowych różnicy fazowej. Podejście to wymaga wąskiego filtrowania pasmowo-przepustowego sygnału wokół jego podstawowej częstotliwości, co prowadzi do utraty części informacji dotyczących dynamiki chodu. Analiza bazująca na transformacie falkowej z wykorzystaniem kompleksowej falki Morlet'a znosi to ograniczenie, umożliwiając kwantyfikację siły i kierunkowości koordynacji ruchu.

- Opracowanie największej dostępnej obecnie bazy danych dotyczącej koordynacji ruchu pieszych podczas marszu w grupie po nieruchomym [P7] i ruchomym [P5] podłożu oraz przedstawienie pierwszych rezultatów analiz koordynacji ruchu pieszych z uwzględnieniem ich rozmieszczenia przestrzennego w grupie. Stopień koordynacji ruchu pieszych podczas marszu w grupie okazał się niższy niż podczas marszu w parach. Ponieważ wiele modeli obciążeń konstrukcji ruchem pieszych bazuje na wynikach badań nad marszem w parach w kontekście synchronizacji siły, może okazać się, że wytyczne projektowe otrzymane z tych modeli są zbyt konserwatywne.

- Pionierskie badanie koordynacji ruchu podczas marszu po nieruchomym podłożu z awatarem pieszego w środowisku wirtualnej rzeczywistości [P8] – patrz rysunek 3. Praca relacjonująca wyniki tego badania została upubliczniona przez Royal Society (brytyjski odpowiednik Polskiej Akademii Nauk) za pośrednictwem Twittera.

- Pierwsze komercyjne zastosowanie bezprzewodowych czujników ruchu do eksperymentalnej analizy modalnej przy wykorzystaniu oprzyrządowanego człowieka (lub *ludzkiego wzbudnika*) dla analizy użytkowalności mostów ze względu na drgania powstałe wskutek ruch pieszych [P3].

5 Inne osiągnięcia naukowe

5.1 Inne zainteresowania naukowe

Moje inne zainteresowania naukowe skupiają się na pomiarze drgań mechanicznych, analizie modalnej konstrukcji budowlanych, zastosowaniu wirtualnej rzeczywistości w budownictwie i psychologii kognitywnej, oraz biomechanice - w szczególności na stabilności człowieka podczas chodu.

Bezprzewodowe czujniki inercyjne (SCB = sieć czujników bezprzewodowych) są atrakcyjną alternatywą dla konwencjonalnych akcelerometrów, ponieważ ich zastosowanie pozwala uniknąć kłopotliwego okablowania, które jest czasochłonne i często zakłóca podstawowe funkcje konstrukcji, np. umożliwienie ruchu drogowego. Pozostaje jednak kwestią otwartą, czy CSB może zaoferować dokładność pomiaru pozwalającą na monitorowanie drgań konstrukcji inżynierii lądowej, szczególnie w kontekście analizy modalnej. Aby zbadać tą kwestię, przeprowadzono testy na mostach dla pieszych [12], mostach drogowych [22, 23] i wielopiętrowym budynku [23]. Wykazano, że (*i*) SCB może dostarczyć danych pozwalających na uzyskanie wiarygodnych informacji dotyczących dynamicznych charakterystyk szerokiego zakresu konstrukcji, (*ii*) SCB może być z powodzeniem stosowany do ekstrakcji parametrów modalnych, (*iii*) SCB znacząco poprawia wydajność testów dynamicznych konstrukcji.

Inną alternatywą dla konwencjonalnych akcelerometrów są optyczne systemy pomiaru drgań (OSPD). OSPD są obecnie wykorzystywane do rejestracji drgań konstrukcji budowlanych, jednak ich zastosowanie jest zazwyczaj ograniczone do pomiaru odpowiedzi dynamicznej w jednym bądź kilku punktach na konstrukcji. Problem zastosowania i wydajności OSPD w operacyjnej analizie modalnej (OMA), która opiera się wyłącznie na pomiarze odpowiedzi dynamicznej konstrukcji, jest stosunkowo rzadko poruszany w literaturze naukowej [43]. Podstawowym założeniem w OMA

jest to, że charakter siły wzbudzającej odpowiedź dynamiczną konstrukcji jest szerokopasmowo–losowy w zakresie częstotliwości, w którym występują analizowane postaci drgań modalnych. Ponieważ siła wzbudzająca w przypadku konstrukcji inżynierskich pochodzi często ze źródeł zewnętrznych, np. jest przenoszona przez powietrze lub grunt, w związku z czym jej pomiar jest stosunkowo trudny, istnieje znaczna niepewność co do parametrów modalnych wyznaczonych za pomocą tej metody. Co więcej, OMA nie pozwala na wyznaczenie masy modalnej, ponieważ nie jest w tym przypadku możliwe odpowiednie przeskalowanie postaci drgań modalnych. Chociaż zaproponowano modyfikacje OMA umożliwiające realizację tego zadania, wymagają one albo modelu numerycznego o wysokiej precyzji, albo lokalnej zmiany masy lub sztywności konstrukcji. Pierwsza metoda jest trudna do zastosowania, ponieważ modele numeryczne o wysokiej zgodności z rzeczywistymi charakterystykami dynamicznymi są notorycznie trudne do uzyskania nawet dla pozornie prostych konstrukcji inżynierskich. Druga metoda stanowi wyzwanie, ponieważ zmiana masy lub sztywności konstrukcji wielkogabarytowych jest niezwykle kłopotliwa do osiągnięcia. Z tych powodów eksperymentalna (tj. klasyczna) analiza modalna (EMA), która opiera się na pomiarze siły wejściowej i odpowiedzi wyjściowej, w wielu przypadkach pozostaje preferowaną metodą dla wyznaczania pełnej charakterystyki dynamicznej konstrukcji. Korzyści z zastosowania OSPD w EMA wynikają z łatwości wdrożenia, możliwości uchwycenia wielu punktów pomiarowych za pomocą każdego pojedynczego czujnika oraz możliwości redefinicji punktów pomiarowych w post-processingu danych. Wyniki uzyskane w tym zakresie w ramach przewodu doktorskiego, w którym pełnię funkcję głównego promotora (w Wielkiej Brytanii nie istnieje stopień doktora habilitowanego, stąd przewód doktorski może prowadzić osoba, która uzyskała stopień doktora), są obiecujące [26, 27].

Rola wirtualnej rzeczywistości (VR) w produkcji i budownictwie, a także w innych sektorach przemysłu, stopniowo rośnie. W kontekście inżynierii mostowej i dynamiki konstrukcji, VR może być używana do wizualizacji złożonych danych o drganiach mechanicznych, co pozwala na lepsze ich zrozumienie. W szerszym ujęciu, w połączeniu z bazami danych wdrożonymi w ramach tzw. Building Information Modelling (BIM), zawierającymi informacje na temat aktywów inżynieryjnych oraz ich powiązanych funkcji i procesów, VR może służyć do ułatwienia zarządzania infrastrukturą inżynierii lądowej i wodnej.

5.2 Aktywność naukowa poza głównym miejscem pracy

Od 2014 roku mam status Honorary Visiting Fellow (*Honorowego Członka Wizytującego*) w Department of Civil Engineering (na *Wydziale Budownictwa Lądowego*) na University of Bristol w Wielkiej Brytanii.

Od października 2017 r. pełnię funkcję promotora pomocniczego dla Rory White'a, przygotowującego pracę doktorską na Department of Civil Engineering (na *Wydziale Budownictwa Lądowego*) na University of Bristol w Wielkiej Brytanii.

6 Dydaktyka oraz aktywność promotorska, kierownicza i reprezentacyjna

6.1 Zajęcia dydaktyczne

Prowadziłem zajęcia dydaktyczne w czterech brytyjskich jednostkach akademickich:

(1) Organizacja: **University of Leicester, Wielka Brytania**
Przedmiot: Engineering Design and Experimentation (*Projektowanie i Eksperymenty Inżynieryjne*, EG1006; wcześniej: Engineering Design, EG1002)
Rola: Kierownik przedmiotu
Poziom: 1szy rok
Okres: 2016 – 2020

(2) Organizacja: **University of Leicester, Wielka Brytania**
Przedmiot: Mechanics of Structures 2 (*Mechanika Konstrukcji*; EG3103)
Rola: Kierownik przedmiotu
Poziom: 3ci rok
Okres: 2016 – 2020

(3) Organizacja: **University of Leicester, Wielka Brytania**
Przedmiot: BEng Project (*Projekt Dyplomowy*; EG3005)
Rola: Promotor i egazminator
Poziom: 3ci rok
Okres: 2015 – 2020

(4) Organizacja: **University of Leicester, Wielka Brytania**
Przedmiot: MEng Project (*Projekt Dyplomowy*; EG4006)
Rola: Egzaminator
Poziom: 4ty rok
Okres: 2018 – 2019

(5) Organizacja: **University of Leicester, Wielka Brytania**
Przedmiot: MSc Project (*Projekt Podyplomowy*; EG7020)
Rola: Promotor i egzaminator
Poziom: Studia podyplomowe
Okres: 2015 – 2020

(6) Organizacja: **University of Leeds, Wielka Brytania**
Przedmiot: Advanced Structural Analysis (*Zaawansowana Analiza Konstrukcji*; CIVE5959)
Rola: Wykładowca
Poziom: 4ty rok i studia podyplomowe
Okres: 2015 – 2017

(7) Organizacja: **University of Bristol, Wielka Brytania**
Przedmiot: Zajęcia laboratoryjne i ćwiczenia z projektowania konstrukcji i dynamiki płynów
Rola: Wykładowca
Poziom: 1szy i 2gi rok
Okres: 2014 – 2015

(8) Organizacja: **Heriot-Watt University, Wielka Brytania**
Przedmiot: Introduction to Structural Dynamics (*Wprowadzenie do Dynamiki Konstrukcji*)
Rola: Asystent dydaktyczny
Poziom: 2gi rok
Okres: 2008 – 2009

6.2 Aktywność promotorska i udział w komisjach egzaminacyjnych w przewodach doktorskich, na studiach podyplomowych i inżynierskich

Pełniłem funkcję głównego promotora (w Wielkiej Brytanii nie istnieje stopień doktora habilitowanego, stąd przewód doktorski może prowadzić osoba, która uzyskała stopień doktora) w przewodzie doktorskim dr Artura Adama Soczawy-Stronczyk (2017 – 2021; komisja egzaminatorska: prof. Elsa Caetano z University of Porto, Portugalia i prof. Simon Gill z University of Leicester, Wielka Brytania), który realizował pracę doktorską na University of Leicester w Wielkiej Brytanii. Pełnię obecnie funkcję promotora w przewodach doktorskich czterech doktorantów, w tym trzech na University of Leicester w Wielkiej Brytanii (Maksat Kalybek 2018 – , Jennifer Sudkamp 2018 – , Wentao Yin 2019 –) i jednego na University of Bristol w Wielkiej Brytanii (Rory White 2017 –), w tym funkcję promotora głównego dwóch z tych doktorantów. Niedawno zatrudniłem asystenta badawczego (mgr inż. Bronisław Czaplewski) do pracy nad moim projektem finansowanym przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (NAWA). Jednym z owoców tej pracy ma być złożona

przez niego rozprawa doktorska.

Pełniłem funkcję egzaminatora w komisjach egzaminacyjnych następujących doktorantów, którzy uzyskali stopień doktora:

(1) Imię i nazwisko: Dimitrios Statharas
Tytuł projektu: Experimental characterization of API-5L X65 steel and an improved, reliable method for assessing hot cracking susceptibility of materials (*Charakterystyka stali API-5L X65 i ulepszona, niezawodna metoda oceny podatności materiałów na pękanie*)
Organizacja: University of Leicester, Wielka Brytania
Jednostka: School of Engineering (*Wydział Inżynierii*)
Data: Listopad 2018

(2) Imię i nazwisko: John David Choules
Tytuł projektu: Mathematical and statistical modelling of animal movement (*Matematyczne i statystyczne modelowanie ruchu zwierząt*)
Organizacja: University of Leicester, Wielka Brytania
Jednostka: School of Mathematics and Actuarial Science (Wydział Matematyki i Nauk Aktuarialnych)
Data: Wrzesień 2019

Pomiędzy 2015 r. i 2020 r. prowadziłem 25 inżynierskich projektów dyplomowych i 9 projektów podyplomowych na University of Leicester w Wielkiej Brytanii. Studenci, których prace dyplomowe prowadziłem, otrzymali następujące nagrody i wyróżnienia:

(1) Student: H. Scourfield
Wyróżnienie: Nominowana do The David Holmes Prize (za najbardziej oryginalny projekt)
Tytuł pracy dyplomowej: Modelling of evacuation scenarios in the Engineering Building at the University of Leicester using social force model (*Modelowanie ewakuacji w budynku wydziału inżynierii na University of Leicester z wykorzystaniem modelu siły społecznej*)
Rok: 2017

(2) Student: C. Geary
Nagroda: TWI Best Student Prize (*Nagroda dla najlepszego studenta przyznawana przez The Welding Institute*)
Tytuł pracy dyplomowej: A roller coaster in the Victoria Park (*Kolejka górska w wesołym miasteczku w Parku Wiktorii*)
Rok: 2018

(3) Student: S. Tiplady
Nagroda: The David Holmes Prize (za najbardziej oryginalny projekt)
Tytuł pracy dyplomowej: To bend or not to bend - the effect of a knee bend on a tennis serve (*Zginać czy nie zginać – efekt zgięcia kolana na serw tenisowy*)
Rok: 2019

(4) Student: V. Salomon
Nagroda: The Institution of Mechanical Engineers (IMechE) Best Project Award (Nagroda za najlepszy projekt przyznawana przez Instytut Inżynierii Mechanicznej)
Tytuł pracy dyplomowej: An investigation quantifying the synchronisation of a rowing crew to examine how they synchronise and to identify the areas which need improvement (*Badanie synchronizacji załogi wioślarskiej*)
Rok: 2019

Byłem egzaminatorem około 40 projektów dyplomowych wykonanych przez studentów 1go i 2go stopnia.

Byłem również zaangażowany w następujące prace dyplomowe i badawcze przeprowadzone na University of Leeds w Wielkiej Brytanii:

(1) Rola: Współprowadzący Nuffield Foundation & Royal Academy of Engineering Undergraduate Research Bursary
Tytuł pracy: Wireless monitoring and dynamic analysis of the Centenary Bridge in Leeds, UK (*Bezprzewodowe monitorowanie i analiza dynamiczna Centenary Bridge w Leeds, w Wielkiej Brytanii*)
Student: S. Rontogianni
Inni członkowie zespołu: Dr N. Nikitas i Dr K.D. Tsavdaridis, University of Leeds, Wielka Brytania
Rok: 2013

(2) Rola: Współpracownik w projekcie finansowanym w ramach Seedcorn Funding Scheme na University of Leeds, Wielka Brytania
Tytuł pracy: Experimental study on sizing the parameters of a unified bio-inspired mechanical model of standing and walking (*Badania nad doborem parametrów zunifikowanego, inspirowanego biologicznie modelu stania i chodzenia*)
Inni członkowie zespołu: Dr N. Nikitas, University of Leeds, Wielka Brytania
Rok: 2014

(3) Rola: Promotor pomocniczy w pracach dyplomowych na poziomie BEng i MEng prowadzonych w School of Civil Engineering (na *Wydziale Inżynierii Lądowej*) na University of Leeds, Wielka Brytania
Studenci: J. Lawhon, T. Mullins and S. Day
Inni członkowie zespołu: Dr N. Nikitas, University of Leeds, Wielka Brytania
Okres: 2014 – 2016

(4) Rola: Współpromotor projektu prowadzonego w ramach Summer Nuffield Foundation Award w School of Civil Engineering (na *Wydziale Inżynierii Lądowej*) na University of Leeds, Wielka Brytania
Student: P. Okoro
Inni członkowie zespołu: Dr N. Nikitas, University of Leeds, Wielka Brytania
Rok: 2016

(5) Rola: Współpracownik Summer Bursary Scheme w School of Civil Engineering (na *Wydziale Inżynierii Lądowej*) na University of Leeds, Wielka Brytania
Tytuł projektu: Understanding human balance – research towards a unified model of human standing and walking (*Zrozumieć równowagę człowieka – badania w kierunku ujednoliconego modelu stania i chodzenia człowieka*)
Student: S. Jamaa
Inni członkowie zespołu: Dr N. Nikitas, University of Leeds, Wielka Brytania
Rok: 2016

6.3 Aktywność dydaktyczna poza głównym miejscem zatrudnienia

Pomiędzy październikiem 2015 r. i czerwcem 2018 r. pełniłem funkcję Guest Lecturer (*Wizytującego Wykładowcy*) w School of Civil Engineering (na *Wydziale Inżynierii Lądowej*) na University of Leeds, Wielka Brytania, gdzie prowadziłem wykłady w ramach przedmiotu Advanced Structural Analysis (*Zaawansowana Analiza Konstrukcji*; CIVE5959).

6.4 Udział w konferencjach poświęconych zagadnieniom dydaktycznym

(1) **Bocian, M.**, Nikitas, N., Jamaa, S., *On the applicability of virtual and augmented reality for teaching structural dynamics.* SEC/DigiFest 2017 - Student Education Conference and Digital Festival, 5-6 styczeń 2017, Leeds, Wielka Brytania.

(2) **Bocian, M.**, Nikitas, N., *Virtual and augmented reality in teaching engineering dynamics – a case study with ARIADNE.* Discovering Teaching Excellence at Leicester – Conference and Exhibition, 4 lipiec 2017, Leicester, Wielka Brytania.

(3) **Bocian, M.**, Stotsjuk, A., Selvarathinam, K., *Augmented and virtual reality in the design of mechanical systems: teacher's and students' perspectives.* Discovering Teaching Excellence at Leicester, 13 czerwiec 2018, Leicester, Wielka Brytania.

6.5 Aktywność kierownicza

(1) Jestem założycielem i pierwszym kierownikiem Biomechanics & Immersive Technology Laboratory (BITL; *Laboratorium Biomechaniki i Technologii Immersyjnej*) na University of Leicester w Wielkiej Brytanii. BITL zajmowało się badaniami teoretycznymi i stosowanymi nad zachowaniem się ludzi w środowisku rzeczywistym i w wirtualnej rzeczywistości, z wykorzystaniem najnowszej aparatury badawczej.

(2) Byłem kierownikiem Dynamics, Vibration and Acoustics Laboratory (DVAL; *Laboratorium Dynamiki, Wibracji i Akustyki*) na University of Leicester w Wielkiej Brytanii. DVAL zajmowało się badaniami teoretycznymi i stosowanymi nad projektowaniem, parametrami użytkowymi i utrzymaniem konstrukcji oraz maszyn poddanych siłom dynamicznym.

(3) W 2016 r. byłem uczestnikiem warsztatów zorganizowanych na Uniwersytecie Exeter w Wielkiej Brytanii, które zgromadziły czołowych międzynarodowych naukowców i firmy z branży budowlanej w celu opracowania międzynarodowej strategii zarządzania ogólnoświatowymi wysiłkami w zakresie badań nad użytkowalnością konstrukcji budowlanych ze względu na drgania.

6.6 Aktywność reprezentacyjna

(1) Pomiędzy 2015 r. i 2020 r. pełniłem funkcję Publicity Officer (*Specjalista ds. Promocji*) w School of Engineering (na *Wydziale Inżynierii*) na University of Leicester w Wielkiej Brytanii.

(2) Pomiędzy 2015 r. i 2020 r. brałem udział w Visit Days (*Dniach Wizyt*) i Open Days (*Dniach Otwartych*), mających na celu rekrutację i utrzymanie zainteresowania ze strony potencjalnych studentów w School of Engineering (na *Wydziale Inżynierii*) na University of Leicester w Wielkiej Brytanii. W 2016 r. wygłosiłem wykład podczas School of Engineering Taster Conference (*Konferencja Promocyjna Wydziału Inżynierii*).

(3) Pomiędzy 2019 r. i 2020 r. byłem członkiem Student Experience Action Group - specjalnego zespołu powołanego w celach poprawy zadowolenia studentów oraz wyników uzyskanych w ramach National Student Survey (NSS; *Narodowe Badanie Studentów*) przez School of Engineering (*Wydział Inżynierii*) na University of Leicester w Wielkiej Brytanii.

7 Inne istotne informacje

7.1 Nagrody, członkostwa i wyróżnienia akademickie, naukowe i zawodowe

(1) W 2009 r. zostałem odznaczony Watt Club Medal – najwyższym odznaczeniem nadawanym przez Heriot-Watt University, przyznawanym za osiągnięcia akademickie podczas studiów na poziomie BEng.

(2) Od 2011 r. jestem członkiem European Association for Structural Dynamics (EASD; *Europejskie Stowarzyszenie na rzecz Dynamiki Konstrukcji*).

(3) Od 2014 r. jestem Honorowym Członkiem Wizytującym na Department of Civil Engineering (*Wydział Budownictwa Lądowego*) na University of Bristol w Wielkiej Brytanii.

(4) Od 2017 r. jestem członkiem Institution of Mechanical Engineers (IMechE; numer członkostwa: 80338807).

(5) Od 2017 r. posiadam status Chartered Engineer (*Inżyniera Dyplomowanego*; numer członkostwa: 643776), nadawany przez Engineering Council UK (*Brytyjską Izbę Inżynierską*).

(6) Od 2018 r. posiadam status Fellow of the Higher Education Academy (przemianowane na AdvenceHE; *Członek Akademii Szkolnictwa Wyższego*; nr członkostwa: PR142456).

(7) W 2018 r. otrzymałem nagrodę Digital Innovation Partnership Award w uznaniu partnerstwa między pracownikami a studentami, które rozwinęło cyfrowe praktyki uczenia się i nauczania, podniosło umiejętności cyfrowe i promowało doskonałość nauczania na University of Leicester w Wielkiej Brytanii.

(8) Byłem członkiem wielodyscyplinarnego zespołu, który w 2019 r. otrzymał Research Team of the Year Award (*Nagrodę Zespołu Badawczego Roku*) w ramach Discovering Excellence Staff Awards (*Inicjatywy Odkrywania Doskonałości*) na University of Leicester w Wielkiej Brytanii.

(9) W 2019 r. zostałem wybrany jako jeden z dwudziestu Great Minds (*Wielkich Umysłów*) na University of Leicester w Wielkiej Brytanii i zostałem "twarzą" kampanii rekrutacyjnej dla studentów 2go i 3go stopnia.

(10) Od 2021 r. jestem członkiem International Association for Bridge Maintenance and Safety (IABMAS, *Międzynarodowe Stowarzyszenie na rzecz Utrzymania i Bezpieczeństwa Mostów*).

7.2 Środki przyznane na badania

Środki na badania przyznane po uzyskaniu stopnia doktora dzielą się na dwie główne kategorie: środki przyznane na badania oraz środki przyznane na wsparcie stypendialne. Wsparcie stypendialne obejmuje dofinansowanie, pozyskane w drodze konkursowej, projektów realizowanych przez studentów dla których pełniłem funkcję promotora.

(1) Projekt: Start-up grant
Fundator: School of Engineering, University of Leicester, Wielka Brytania
Okres: Wrzesień 2015
Kwota dofinansowania: 14 tys. GBP (70 tys. PLN)
Rola: Kierownik projektu i główny wykonawca

(2) Projekt: ARIADNE – Augmented Reality for Advanced Dynamics Engineering
Funder: Research & Enterprise Division, University of Leicester, Wielka Brytania
Okres: Wrzesień 2016 – Czerwiec 2017
Kwota dofinansowania: 8,6 tys. GBP (43 tys. PLN)
Rola: Kierownik projektu i główny wykonawca

(3) Projekt: Numerically simulated against real observed crowd loads – assessing the efficacy of crowd loading modelling tools for structural design
Fundator: The Institution of Structural Engineers (IStructE)
Okres: January 2017 – September 2017
Kwota dofinansowania: 0,9 tys. (4,5 tys. PLN)
Rola: Główny promotor

(4) Projekt: VSimulators: Human factors simulation for motion and serviceability in the built environment (patrz Rysunek 4)
Fundator: Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), Wielka Brytania
Links: Numer projektu: EP/P020690/1 oraz Strona internetowa projektu VSimulators
Okres: Maj 2017 – Kwiecień 2021
Kwota dofinansowania: 3,25 mln GBP (16,25 mln PLN)
Rola: Pomysłodawca, współwykonawca projektu i kierownik projektu na University of Leicester

(5) Projekt: Pedestrian-pedestrian interaction and its effects on vibration serviceability
Fundator: College of Science and Engineering, University of Leicester, Wielka Brytania
Kategoria: Stypendium na projekt doktorancki
Okres: Październik 2017 – Grudzień 2020

Rysunek 4: Laboratorium VSimulators na University of Exeter w Wielkiej Brytanii.

Kwota dofinansowania: 68 tys. GBP (340 tys. PLN)
Rola: Główny promotor

(6) Projekt: Non-contact vibration measurement in structural health monitoring
Fundator: Bolashak International Scholarship of the President of the Republic of Kazakhstan
Kategoria: Stypendium na projekt doktorancki
Okres: Marzec 2018 – Luty 2022
Kwota dofinansowania: 150 tys. GBP (750 tys. PLN)
Rola: Główny promotor

(7) Projekt: Biomechanics & Immersive Technology Laboratory
Fundator: School of Engineering, University of Leicester, Wielka Brytania
Okres: Czerwiec 2018 – Maj 2020
Kwota dofinansowania: 21,6 tys. GBP (108 tys. PLN)
Rola: Kierownik projektu i główny wykonawca

(8) Projekt: Should I stay or should I go – road crossing decision-making in immersive virtual reality
Fundator: College of Life Sciences, University of Leicester, Wielka Brytania
Kategoria: Stypendium na projekt doktorancki
Okres: Wrzesień 2018 – August 2021
Kwota dofinansowania: 60 tys. GBP (300 tys. PLN)
Rola: Promotor pomocniczy

(9) Projekt: Artificial Intelligence Research Network
Fundator: University of Leicester, Wielka Brytania
Okres: Październik 2018 – Wrzesień 2020
Kwota dofinansowania: 30 tys. GBP (150 tys. PLN)
Rola: Współwykonawca

(10) Projekt: Virtual Vauxhall Gardens
Fundator: University of Leicester, Wielka Brytania
Kategoria: Knowledge Exchange and Enterprise Fund
Okres: Styczeń 2019 – Lipiec 2019
Kwota dofinansowania: 10 tys. GBP (50 tys. PLN)
Rola: Współwykonawca

(11) Projekt: VR Heritage
Fundator: University of Leicester, Wielka Brytania
Kategoria: Leicester Institute for Advanced Studies - Tiger Team
Okres: Styczeń 2019 – Lipiec 2019
Kwota dofinansowania: 5 tys. GBP (25 tys. PLN)
Rola: Współwykonawca

(12) Projekt: Crowd dynamics and structural stability
Fundator: College of Science and Engineering, University of Leicester, Wielka Brytania & China Scholarship Council

Kategoria: Stypendium na projekt doktorancki
Okres: Sierpień 2019 – Lipiec 2023
Kwota dofinansowania: 70 tys. GBP & 43,2 tys. GBP (350 tys. PLN & 216 tys. PLN)
Rola: Główny promotor

(13) Projekt: Development of advanced pedestrian structural loading models calibrated with data from in situ measurements (STRIDE)
Fundator: Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej (NAWA)
Strona internetowa: Numer projektu: PPN/PPO/2019/1/00036 oraz Bocian Dynamics Laboratory
Okres: Wrzesień 2020 – Sierpień 2024
Kwota dofinansowania: 2 mln PLN
Rola: Kierownik projektu i główny wykonawca

7.3 Działalność recenzencka

Jestem recenzentem wniosków o dofinansowanie badań przez UK Research and Innovation (UKRI) – pozarządowej organizacji wspieranej finansowo przez UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS; *Brytyjskie Ministerstwo Biznesu, Energii i Strategii Przemysłowej*). UKRI jest główną organizacją rozdzielającą środki na badania naukowe w Wielkiej Brytanii.

Jestem recenzentem artykułów naukowych oddanych do publikacji w następujących czasopismach, przedstawionych w porządku alfabetycznym:

(1) Applied Mathematical Modelling

(2) Biology Letters

(3) Engineering Structures

(4) Frontiers Sociology

(5) International Journal of Control

(6) Journal of Bridge Engineering

(7) Journal of Sound and Vibration

(8) Mechanical Systems and Signal Processing

(9) PLoS One

(10) Scientific Reports

(11) Structural Engineering International

(12) Vibration

Jestem recenzentem referatów naukowych prezentowanych na następujących konferencjach: ICSV (International Congress of Sound and Vibration), EURODYN, Footbridge i CMMoST (Conference on Mathematical Models in Structural Engineering).

7.4 Działalność doradcza

Wykonałem szereg eksperckich prac doradczych dla firm działających w branży budowlanej (np. Arup, Atkins, Buro Happold) i organizacji rządowych, głównie podczas pracy jako inżynier projektu dla Full Scale Dynamics Ltd. Działania te koncentrowały się na pomiarach drgań konstrukcji, ocenie użytkowalności konstrukcji ze względu na drgania mechaniczne i tworzeniu rozwiązań opartych na technologii wirtualnej rzeczywistości (VR). Konstrukcje, nad którymi pracowałem, obejmują stałe i przenośne trybuny, podłogi o dużej rozpiętości w budynkach komercyjnych i laboratoriach z wyspecjalizowaną i wrażliwą na czynniki zewnętrzne aparaturą pomiarową oraz

mosty drogowe i mosty dla pieszych. Większości z testowanych konstrukcji nie można nazwać ze względu na wpisaną do umowy klauzulę poufności, jednak punktem kulminacyjnym moich działań konsultingowych była ocena użytkowalności wibracyjnej dwóch mostów dla pieszych znajdujących się w National Gallery Singapore (patrz rysunek 5). Brałem udział w opracowaniu odpowiednich protokołów testowych, kierowałem zespołem inżynierów prowadzących testy dynamiczne, dyrygowałem grupą około 100 osób dostarczających źródło wzbudzenia dynamicznego konstrukcji i zbierałem i analizowałem dane z pomiarów. Wyjątkową cechą testów było wdrożenie sieci bezprzewodowych czujników do pomiaru siły wejściowej i odpowiedzi konstrukcji, wykorzystanych następnie do eksperymentalnej analizy modalnej, z czego częściowy raport dostępny jest w [P3].

Rysunek 5: Ocena użytkowalności dynamicznej mostów dla pieszych zlokalizowanych w Narodowej Galerii Sztuki w Singapurze.

Pomiędzy październikiem 2015 i lipcem 2018 pełniłem rolę Doradcy Naukowego w Advanced Structural Dynamics Evaluation Centre (ASDEC; *Centrum Zaawansowanych Analiz Dynamiki Konstrukcji*). ASDEC było pierwszym w Wielkiej Brytanii komercyjnym laboratorium oferującym usługi pomiaru przestrzennego oraz identyfikacji modalnej przy pomocy laserów wykorzystujących efekt Doppler'a. ASDEC zlokalizowane było w Mira Technology Park (*Parku Technologicznym Mira*), tj. kampusie skupiającym odziały badawczo-rozwojowe podmiotów przemysłowych działających w branży motoryzacyjnej i lotniczej, oraz w innych branżach zaawansowanych technologii.

Pomiędzy 2016 i 2017 pełniłem rolę doradczą w Centre for Infrastructure Materials (CIM; Centrum Materiałoznawstwa Infrastruktury) zlokalizowanego w School of Civil Engineering (na *Wydziale Budownictwa Lądowego*) na University of Leeds w Wielkiej Brytanii. CIM zostało założone dzięki wsparciu finansowemu z UK Collaboratorium for Research on Infrastructure and Cities (UKCRIC; *Brytyjskiej Sieci Badawczej nad Infrastrukturą oraz Miastami*), aby koordynować i wzmocnić wysiłki związane z przystosowaniem infrastruktury do „zmian klimatu, zmieniającej się demografii, niedoboru zasobów i (*zapewnieniem*) sprawiedliwości społecznej" [2]. UKCRIC jest największą brytyjską strategiczną iniwestycją na badania nad infrastrukturą budowlaną. Przyczynia się do tego rządowe dofinansowanie w wysokości 138 milionów funtów szterlingów oraz dofinansowane z 13 brytyjskich uniwersytetów uczestniczących w tym projekcie.

7.5 Uczestnictwo w konferencjach naukowych

Jestem współautorem 18 referatów przedstawionych na konferencjach naukowych. Najistotniejsze z nich to 6 referatów przedstawionych na EURODYN (2011, 2014, 2017 and 2020) oraz wystąpienie plenarne przedstawione na Footbridge (2017).

7.6 Informacja o liczbie cytowań z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań

Liczba cytowań z uwzględnieniem autocytowań według Elsevier Scopus, Web of Science Core Collection oraz Google Scholar przedstawiona jest w Tabeli 1.

Tabela 1: Liczba cytowań wraz z indeksem Hirsch'a na dzień 30/10/2021.

Źródło (liczba obiektów w bazie)	Suma	Suma bez autocytowań	Indeks Hirsch'a
Elsevier Scopus (31)	358	289	11
Web of Science Core Collection (21)	298	brak danych	10
Google Scholar (37)	462	brak danych	11

7.7 Artykuły oddane do publikacji: oczekujące na recenzje, edytowane zgodnie z rekomendacjami recenzentów oraz oczekujące na decyzję edytora, oraz artykuły przygotowywane do publikacji

Artykuły oddane do publikacji:

(1) Belykh, I., **Bocian, M.**, Champneys, A., Daley, K., Jeter, R., Macdonald, J.H.G., McRobie, A., *A new paradigm for emergent instability: the real story of the London Millennium Bridge*, Nature Communications.
JCR IF: **14.919**; MNiSW 2019: **200/200**; Etap procesu: oczekiwanie na decyzję edytora.

(2) Sudkamp, J., **Bocian, M.**, Souto, D., *Judging vehicle speed and time-to-arrival from the roadside: Eye movements and perception*, Scientific Reports.
JCR IF: **3.998**; MNiSW 2019: **100/200**; Etap procesu: oczekiwanie na decyzję edytora.

(3) Souto, D., Kyle, N., **Bocian, M.**, *Tuning to a hip-hop beat: Pursuit eye movements reveal processing of biological motion*, Vision Research.
JCR IF: **1.886**; MNiSW 2019: **70/200**; Etap procesu: edytowany zgodnie z rekomendacjami recenzentów.

(4) Zhang, X., Li, W., Wang, Z., **Bocian, M.**, *Design optimization of blunt trailing-edge airfoil for wind turbines under rime ice conditions*, Alexandria Engineering Journal.
JCR IF: **3.732**; MNiSW 2019: **70/200**; Etap procesu: oczekiwanie na recenzje.

(5) Zhang, X., Li, W., Wang, Z., **Bocian, M.**, *Multi-objective optimization of blunt trailing-edge airfoil for wind turbines*, International Journal of Energy and Environmental Engineering.
JCR IF: **1.877**; MNiSWE 2019: **100/200**; Etap procesu: oczekiwanie na recenzje.

Artykuły przygotowywane do publikacji:

(1) **Bocian, M.**, Burn, J.F., Macdonald, J.H.G., Wdowicka, H., *Sensory determinants of medio-lateral foot placement in walking on laterally oscillating ground*, Journal of Biomechanics.
Stopień zaawansowania: 90%.

(2) **Bocian, M.**, Nikitas, N., Kalybek, M., Hawryszków, P., Kużawa, M., Biliszczuk, J., Bień, J., *Dynamic performance assessment of the Rędziński Bridge using camera-based vibration monitoring systems*, Archives of Civil and Mechanical Engineering.
Stopień zaawansowania: 90%.

(3) **Bocian, M.**, Czaplewski, B., *Dynamic instability of the Squibb Park Bridge – case study*, Structural Engineering International.
Stopień zaawansowania: 80%.

Literatura cytowana w autoreferacie

[1] Anon. *Department of Civil Engineering*. URL: `http://www.bristol.ac.uk/engineering/departments/civilengineering/` (visited on 07/13/2021).

[2] Anon. *UK Collaboratorium for Research on Infrastructure and Cities (UKCRIC) – About UKCRIC*. URL: `https://www.ukcric.com/about-ukcric/` (visited on 04/14/2021).

[3] M.C. Araujo, H.M.B.F. Brito, and R.L. Pimentel. "Experimental evaluation of synchronisation in footbridges due to crowd loading". In: *Structural Engineering International* 19 (2009), pp. 298–303.

[4] A. Banaś and R. Jankowski. "Experimental and numerical study on dynamics of two footbridges with different shapes of girders". In: *Applied Sciences* 10/13 (2020), p. 4505.

[5] C. Barker. "Some observations on the nature of the mechanism that drives the self-excited lateral response of footbridges". In: *Proceedings of the 1st International Conference Footbridge, Paris, 20–22 November*. 2002.

[6] J. Biliszczuk, P. Hawryszków, A. Maury, M. Sułkowski, and M. Węgrzyniak. "A cable-stayed footbridge made of glued-laminated wood — design, erection and experimental investigations". In: *Proceedings of IABSE Symposium, Weimar, Germany, 19–21 September* (2007), pp. 338–341.

[7] M. Bocian. *Determination of the self-excited forces on structures due to walking pedestrians using a biologically inspired approach, PhD Thesis*. Bristol, UK: University of Bistol, Department of Civil Engineering and Department of Mechanical Engineering, 2014.

[8] M. Bocian, J.H.G. Macdonald, and J.F. Burn. "Biomechanically inspired modelling of pedestrian-induced forces on laterally oscillating structures". In: *Journal of Sound and Vibration* 331.16 (2012), pp. 3914–3929.

[9] M. Bocian, J.H.G. Macdonald, and J.F. Burn. "Biomechanically inspired modelling of pedestrian-induced vertical self-excited forces". In: *Journal of Bridge Engineering* 18.12 (2013), pp. 1336–1346.

[10] M. Bocian, J.H.G. Macdonald, and J.F. Burn. "Modelling of self-excited vertical forces on structures due to walking pedestrians". In: *Proceedings of Eurodyn 20011 - 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven, Belgium* (2011).

[11] M. Bocian, J.H.G. Macdonald, and J.F. Burn. "Probabilistic criteria for lateral dynamic stability of bridges under crowd loading". In: *Computers & Structures* 136 (2014), pp. 108–119.

[12] J.M.W. Brownjohn, M. Bocian, and D. Hester. "Footbridge dynamic performance assessment using inertial measurement units". In: *Keynote Speech at Footbridge 2017, 6-8 September 2017, Berlin, Germany* (2017).

[13] J.M.W. Brownjohn, P. Fok, M. Roche, and P. Omenzetter. "Long span steel pedestrian bridge at Singapore Changi Airport — Part 2: crowd loading tests and vibration mitigation measures". In: *The Structural Engineer* 82.16 (2004), pp. 21–27.

[14] S.P. Carroll, J.S. Owen, and M.F.M. Hussein. "Experimental identification of the lateral human-structure interaction mechanism and assessment of the inverted-pendulum biomechanical model". In: *Journal of Sound and Vibration* 333 (2014), pp. 5865–5884.

[15] Research Fund for Coal & Steel. "Human induced vibrations of steel structures – Design of footbridges". In: RFS2-CT-2007-00033 (2008).

[16] P. Dallard, A.J. Fitzpatrick, A. Flint, S. Le Bourva, A. Low, R.M. Ridsdill Smith, and M. Willford. "The London Millennium Footbridge". In: *The Structural Engineer* 79.22 (2001), pp. 17–21.

[17] F. Danbon and G. Grillaud. "Dynamic behaviour of a steel bridge; Characterisation and modelling of the dynamic loadning induced by a moving crowd on the Solferino footbridge in Paris". In: *Proceedings of the 2nd International Conference – Footbridge, Venice, 6–8 December* (2005).

[18] H.V. Dang and S. Živanović. "Influence of low-frequency vertical vibration on walking locomotion". In: *Journal of Structural Engineering* 142 (12 2016), p. 04016120.

[19] I.J. Drygała, M.A. Polak, and J.M. Dulinska. "Vibration serviceability assessment of GFRP pedestrian bridges". In: *Engineering Structures* 184 (2019), pp. 176–185.

[20] A. Flaga. *Mosty dla pieszych (Footbridges)*. Warszawa, Poland: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2011.

[21] Y. Fujino, B.M. Pacheco, S. Nakamura, and P. Warnitchai. "Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge". In: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 22/9 (1993), pp. 741–758.

[22] D. Hester, J.M.W. Brownjohn, M. Bocian, and Y. Xu. "Low cost bridge load test: calculating bridge displacement from acceleration for load assessment calculations". In: *Engineering Structures* 143 (2017), pp. 358–374.

[23] D. Hester, J.M.W. Brownjohn, M. Bocian, Y. Xu, and A. Quattrone. "Using inertial measurements units originally developed for biomechanics for modal testing of civil engineering structures". In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 104 (2018), pp. 776–798.

[24] A.L. Hof, R.M. van Bockel, T. Schoppen, and K. Postema. "Control of lateral balance in walking: experimental findings in normal subjects and above-knee amputees". In: *Gait & Posture* 25 (2007), pp. 250–258.

[25] E.T. Ingólfsson, C.T. Georgakis, F. Ricciardelli, and J. Jönsson. "Experimental identification of pedestrian-induced forces on footbridges". In: *Journal of Sound and Vibration* 330.6 (2011), pp. 1265–1284.

[26] M. Kalybek, M. Bocian, and N. Nikitas. "Performance of optical structural vibration monitoring systems in experimental modal analysis". In: *Sensors* 21 (2021), p. 1239.

[27] M. Kalybek, M. Bocian, W. Pakos, J. Grosel, and N. Nikitas. "Performance of camera-based vibration monitoring systems in input-output modal identification using shaker excitation". In: *Remote Sensing* 13/17 (2021), p. 3471.

[28] J.H.G. Macdonald. "Lateral excitation of bridges by balancing pedestrians". In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 465 (2009), pp. 1055–1073.

[29] J.H.G. Macdonald. "Pedestrian-induced vibrations of the Clifton Suspension Bridge". In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering* 161/2 (2008), pp. 69–77.

[30] C.D. MacKinnon and D.A. Winter. "Control of whole body balance in the frontal plane during human walking". In: *Journal of Biomechanics* 26 (1993), pp. 633–644.

[31] Y. Matsumoto, T. Nishioka, H. Shiojiri, and K. Matsuzaki. "Dynamic design of footbridges". In: *IABSE Proceedings* P-17/78 (1978), pp. 1–15.

[32] A. McRobie and G. Morgenthal. "Risk management for pedestrian-induced dynamics of footbridges". In: *Proceedings of the 1st International Conference – Footbridge, Paris, 20–22 November* (2002).

[33] A. McRobie, G. Morgenthal, D. Abrams, and J. Predergast. "Parallels between wind and crowd loading of bridges". In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 371 (2013), p. 20120430.

[34] D.E. Newland. "Pedestrian excitation of bridges". In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C – Journal of Mechanical Engineering Science* 218 (2004), pp. 477–492.

[35] K. van Nimmen, G. Lombaert, I. Jonkers, G. de Roeck, and P. van den Broeck. "Characterisation of walking loads by 3D inertial motion tracking". In: *Journal of Sound and Vibration* 333 (2016), pp. 5212–5226.

[36] A.D. Pizzimenti and F. Ricciardelli. "Experimental evaluation of the dynamic lateral loading of footbridges by walking pedestrians". In: *Proceedings of Eurodyn 2005 - 6th International Conference on Structural Dynamics, Paris, France* (2005).

[37] F. Ricciardelli and P. Pandera. "An experimental investigation into the interaction among walkers in groups and crowds". In: *10th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, Southampton, UK, 12–14 July* (2010).

[38] J.D. Scargle. "Studies in astronomical time series analysis. III – Fourier transforms, autocorrelation functions, and cross-correlation functions of un-evenly spaced data". In: *Journal of Astrophysics* 343 (1989), pp. 874–887.

[39] The Verge Science. *Bridge collapse – Can a crowd take down a bridge just by walking on it?* URL: https://www.facebook.com/watch/?v=1688405747885005 (visited on 07/13/2021).

[40] C. Scruton. "Wind-excited oscillations of tall stacks". In: *Engineering* 199 (1955), pp. 806–808.

[41] E. Shahabpoor, A. Pavic, V. Racic, and S. Živanović. "Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures". In: *Journal of Sound and Vibration* 387 (2017), pp. 207–225.

[42] S.H. Strogatz, D.M. Abrams, A. McRobie, B. Eckhardt, and E. Ott. "Crowd synchrony on the Millennium Bridge". In: *Nature* 438.7064 (2005), pp. 43–44.

[43] K. Wilde. *Modal diagnostics of civil engineering structures.* Gdańsk, Poland: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2008.

[44] A.Z. Zivotofsky, L. Gruendlinger, and J.M. Hausdorff. "Modality-specific communication enabling gait synchronization during over-ground side-by-side walking". In: *Human Movement Science* 31/5 (2012), pp. 1268–1285.

[45] K. Żółtowski. *Pieszy na kładkach: obciążenia i odpowiedź konstrukcji.* Gdańsk, Poland: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2007.

(podpis wnioskodawcy)