

Załącznik 3a

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

1. Imię i nazwisko

Paweł Bogusławski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

Tytuł naukowy: **Doctor of Philosophy (PhD)**

Podmiot nadający: University of Glamorgan (obecnie University of South Wales), Faculty of Advanced Technology, Pontypridd, Wielka Brytania

Rok uzyskania: 2011

Temat pracy: Modelling and Analysing 3D Building Interiors with the Dual Half-Edge Data Structure (pl: Modelowanie i analiza trójwymiarowych wnętrz budynków przy użyciu struktury danych Dual Half-Edge)

Promotor: prof. Christopher Gold

Na podstawie Art. 328 ust. 1 (Dz. U. 2018 poz. 1668 Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) dyplom nie wymaga nostryfikacji, gdyż jest uznany za równoważny z odpowiednim stopniem naukowym nadanym w Polsce.

Tytuł zawodowy: **magister inżynier**

Podmiot nadający: Politechnika Białostocka, Instytut Informatyki, Białystok, Polska

Rok uzyskania: 2000

Temat pracy: Symulator procesu wrzenia na płaskiej powierzchni grzejnej

Promotor: dr Romuald Mosdorf

Kierunek studiów: informatyka

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

– **od 2020 adiunkt, kierownik Zakładu Geoinformatyki**

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

– **2019 – 2020 adiunkt**

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

– **2017 – 2019 adiunkt**

Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska

– **2014 – 2017 Research Fellow**

Faculty of Environment and Technology, University of the West of England (UWE), Bristol, Wielka Brytania

– **2011 – 2014 Senior Lecturer**

Faculty of Geoinformation and Real Estate, Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Johor Bahru, Malezja

– **2007 – 2008 Tutor**

Faculty of Advanced Technology, University of Glamorgan, Pontypridd, Wielka Brytania

– **2004 – 2006 asystent**

Wydział Nauk Technicznych, Wyższa Szkoła Finansów i Zarządzania, Ełk

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 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Jako główne osiągnięcie naukowe wynikające z ustawy o stopniach naukowych (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) zostaje wskazany cykl siedmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, pod wspólnym tytułem:

Topologiczna budowa modeli 3D do przestrzennych analiz budynków

Poniższy cykl publikacji dotyczy zagadnień związanych z przestrzennym modelowaniem wnętrza budynków. W szczególności opisane badania dotyczą budowy modeli 3D posiadających spójną reprezentację geometryczno-topologiczną w postaci grafu dualnego. Umożliwia to zastosowanie algorytmów grafowych i przeprowadzenie analiz przestrzennych. Modele wzbogacone o informację semantyczną zostały użyte między innymi do analizy zagrożeń i nawigacji wewnątrz budynków w sytuacjach kryzysowych.

Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

- C1. **Bogusławski, P.**, Gold, C., 2016, The Dual Half-Edge—A Topological Primal/Dual Data Structure and Construction Operators for Modelling and Manipulating Cell Complexes. ISPRS International Journal of Geo-Information, 5(2): 19, pp. 1-20. (IF: 1,502 MNiSW: 15, udział: 90%)
- C2. **Bogusławski, P.**, Gold, C., 2015, Buildings and terrain unified – multidimensional dual data structure for GIS. Geo-spatial Information Science, 18(4), pp. 151-158. (IF: --- MNiSW: 15, udział: 90%)
- C3. **Bogusławski, P.**, Mahdjoubi, L., Zverovich, V., Fadli, F., 2016, Automated construction of variable density navigable networks in a 3D indoor environment for emergency response. Automation in Construction, 72 (2016), pp. 115-128. (IF: 2,919 MNiSW: 40, udział: 90%)

- C4. **Bogusławski, P.**, Mahdjoubi, L., Zverovich, V. and Fadli, F., 2016, Two-graph building interior representation for emergency response applications. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-2, pp. 9-14. (IF: --- , MNiSW: 15, udział: 90%)
- C5. Zverovich, V., Mahdjoubi, L., **Bogusławski, P.**, Fadli, F., 2017, Analytic prioritization of indoor routes for search and rescue operations in hazardous environments. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 32 (9). pp. 727-747. (IF: 5,475 MNiSW: 45, udział: 50%)
- C6. **Bogusławski, P.**, Mahdjoubi, L., Zverovich, V., Fadli, F., 2018, A dynamic approach for evacuees' distribution and optimal routing in hazardous environments. Automation in Construction, 94, pp. 11-21. (IF: 4,313 MNiSW: 40, udział: 90%)
- C7. **Bogusławski, P.**, Zlatanova, S., Gotlib, D., Wyszomirski, M., Gnat, M., Grzempowski, P., 2022, 3D building interior modelling for navigation in emergency response applications. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 114, 103066 (IF: 7,672 MNiSW: 140, udział: 40%)

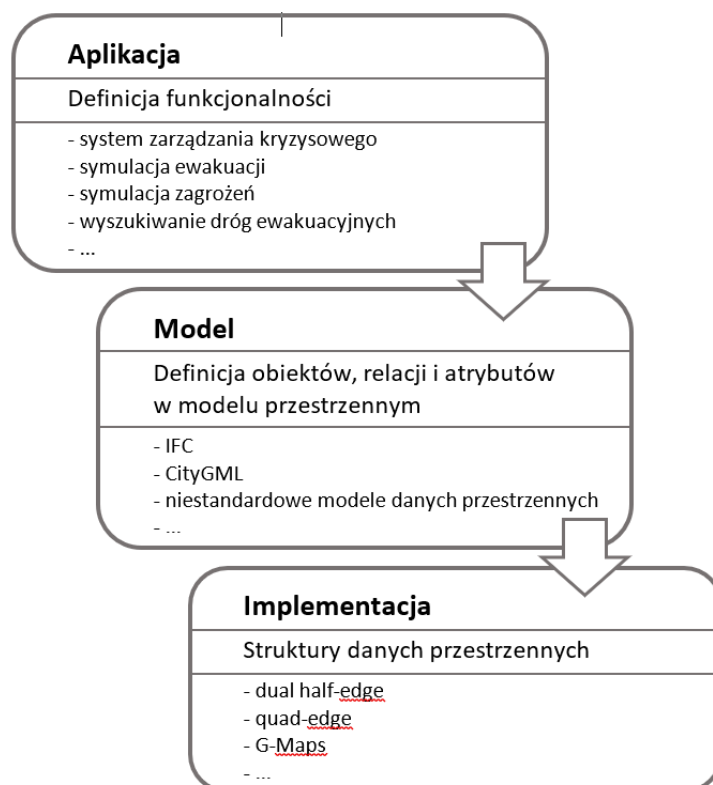
Habilitant od początku kariery naukowej uczestniczył w projektach naukowych realizowanych w zespołach badawczych, co skutkowało współautorstwem artykułów, a lista autorów w poszczególnych publikacjach obejmuje wszystkich członków zespołu badawczego. Udział procentowy został określony na podstawie wkładu własnego habilitanta w powstanie publikacji, a osiągnięcia opisane w niniejszym autoreferacie były w pełni opracowane przez niego.

Wprowadzenie

Już od początku badań naukowych prowadzonych przez habilitanta, głównym celem było opracowanie trójwymiarowego (3D) modelu umożliwiającego analizę przestrzenną w aplikacjach modelowania wnętrza budynków i sytuacji kryzysowych. W tym czasie modele trójwymiarowe nie były powszechnie dostępne i były wykorzystywane głównie do wizualizacji, co nie pozwalało na zaawansowaną analizę przestrzenną. Najdokładniejsze modele były tworzone przez architektów; oferowały one wysoki poziom szczegółowości istotny z punktu widzenia wizualizacji, ale nie zawierały informacji dotyczącej przestrzennego powiązania między obiektami. W związku z tym, operacje wyszukiwania, typowe dla analizy przestrzennej, bazowały na własnościach geometrycznych, co powodowało, że były one powolne i wymagały dużej ilości zasobów obliczeniowych komputera. GIS (ang. Geography Information System) natomiast oferował zaawansowane narzędzia do analizy przestrzennej, a

te z kolei wymagały informacji topologicznej zawartej w modelu. Dodatkowo, większość metod była przeznaczona do analizy modeli dwuwymiarowych (2D) i nie była łatwo adaptowalna do reprezentacji trójwymiarowej. W związku z tym, została zaproponowana ułamkowa wymiarowość (np. 2.5D czy 2.75D) do reprezentacji obiektów 3D (Penninga, 2008) w celu zastosowania metod analizy przestrzennej oferowanej przez GIS. Z technicznego punktu widzenia, w takiej reprezentacji punkty są określone przez współrzędne x i y , podczas gdy współrzędna z (tj. wysokość) jest atrybutem punktu. Należy tu zwrócić uwagę na to, że metody stosowane w GIS oparte są na mocnych podstawach geometrii obliczeniowej, co umożliwia ich rozszerzenie z 2D do 3D. Zwiększa to znacznie złożoność i wymagania obliczeniowe, lecz wraz z rozwojem technologicznym problemy stały się rozwiązywalne w rozsądnym czasie.

W celu przechowywania informacji topologicznej, takiej jak przestrzenne relacje pomiędzy obiektami, musi zostać użyta odpowiednia struktura danych. Struktura danych jest umieszczona na bardzo niskim poziomie hierarchii implementacyjnej. Różne struktury danych mogą być użyte do implementacji konkretnego modelu danych, a różne modele danych mogą zostać użyte w konkretnych aplikacjach. Hierarchia obejmująca aplikacje, modele i implementacje została przedstawiona na Rys. 1 Rysunek 1. Z punktu widzenia wydajności obliczeniowej istotny jest właściwy wybór odpowiedniej struktury danych i modelu danych. Modele danych łączące geometrię, topologię i informację semantyczną są niezbędne do efektywnej analizy GIS.



Rysunek 1. Hierarchia aplikacja-model-implementacja.

Jedną ze struktur, posiadającą mocne podstawy matematyczne, jest quad-edge (QE) (Guibas and Stolfi, 1985). Została ona zaprojektowana do implementacji podziału planarnego i przechowuje informacje w postaci grafu wraz z powiązaniem grafem dualnym. Taki model składający się z węzłów, krawędzi i ścian jest zbudowany z atomów, quadów. Każda krawędź wraz z powiązanymi węzłami i ścianą jest tworzona przez cztery quady. QE idealnie nadaje się do implementacji numerycznego modelu terenu, gdzie płaszczyzna terenu podzielona jest na zbiór przylegających trójkątów. Pozwala ona również na tworzenie modeli o ułamkowej wymiarowości, co daje możliwość uwzględnienia tuneli i mostów. Model jest jednak w dalszym ciągu reprezentowany jako jedna płaszczyzna, a relacje przestrzenne pomiędzy poszczególnymi obiektami 3D nie są możliwe do przedstawienia. Próba stworzenia rozszerzonej wersji struktury danych do reprezentacji podziału przestrzeni 3D doprowadziła do powstania struktury facet-edge (Dobkin and Laszlo, 1987). W związku z dużą złożonością konstrukcji modelu, zaproponowane rozwiązanie jest niepraktyczne i trudne w użyciu.

Nieco odmienny pomysł został wprowadzony w augmented quad-edge (AQE) (Ledoux and Gold, 2007): QE została użyta jako elementarna reprezentacja poszczególnych komórek w kompleksie 3D oraz struktura dualna do połączeń między komórkami. Jeden ze wskaźników QE, pierwotnie wskazujący na węzeł dualny, został użyty do połączenia struktury podstawowej z dualną. Umożliwiło to nawigację pomiędzy komórkami. Niemniej, operatory konstrukcyjne były skomplikowane i ograniczone do komórek czworościennych. Inne przykłady topologicznych struktur danych to: G-maps (Lienhardt, 1991) i radial-edge (Weiler, 1988).

Wszystkie wspomniane powyżej struktury danych umożliwiają reprezentację brzegową (b-rep) (Stroud, 2006), w której obiekt przestrzenny jest reprezentowany jako komórka (objętość) ograniczona ścianami, ściany ograniczone są krawędziami, a krawędzie wierzchołkami.

Dwa ostatnie przykłady (tj. G-maps i radial-edge) umożliwiają budowę obiektów 3D i łączenie sąsiadujących komórek siatki. Ich największą wadą w porównaniu z QE, AQE i facet-edge jest brak możliwości jednoczesnego przechowywania struktury dualnej wraz z podstawową. W związku z tym, informacja semantyczna związana z elementami modelu, np. z komórkami czy ścianami, nie może być jednoznacznie powiązana z atomowymi elementami konstrukcyjnymi, które są różne dla różnych struktur danych. Taka implementacja wymaga dodatkowych klas do reprezentacji elementów modelu, co powoduje zwiększenie złożoności samej struktury i procesu konstrukcji modelu.

Należy zwrócić uwagę, że wcześniej wspomniane struktury danych nie definiują pełnego zbioru dostępnych topologicznych struktur danych, ale są przedstawicielami najbardziej powiązanych z rozwiązaniem opracowanym przez habilitanta.

Abstrahując od struktury danych, istotny jest również kontekst, w jakim jest umieszczony obiekt przestrzenny (np. budynek). Biorąc pod uwagę GIS, w tym systemy zarządzania kryzysowego, ważne jest aby uwzględnić otaczający teren oraz infrastrukturę (np. sieć transportową). Rozszerza to potencjalną funkcjonalność aplikacji. Zarządzanie kryzysowe nie jest ograniczone do budynków, ale może wymagać złożonej analizy na większym obszarze. Jedną z typowych analiz przeprowadzanych w tym kontekście jest wyznaczanie marszrut dla osób ewakuowanych oraz zespołów ratowniczych, która opiera się na algorytmach do znajdowania ścieżek. Wymagany jest jednak model sieciowy, który umożliwi ich zastosowanie. Może być on uzyskany na podstawie modelu przestrzennego, jeśli takowy jest dostępny. Istnieją różne metody konstrukcji modelu sieciowego (Krūminaitė, 2014; Lee, 2007; Liu and Zlatanova, 2011). Część z nich bazuje na nieregularnym podziale przestrzeni przy użyciu diagramów Woronoja, co zostało wykorzystane w badaniach przedstawionych w cyklu publikacji. Zaproponowany został algorytm do tworzenia sieci nawigowalnej o zmiennej gęstości, co jest rozwiązaniem bardziej dostosowanym do rozpatrywanych zastosowań. Zostało ono przetestowane w agentowej symulacji ewakuacji i obliczaniu optymalnej marszrut dla zespołów ratowniczych, gdzie uwzględniono czas, bezpieczeństwo i złożoność ścieżek. Dodatkowo, połączenie modeli budynków z terenem oraz siecią transportową, co jest możliwe dzięki metodom przedstawionym w cyklu, umożliwi zastosowanie koncepcji nawigacji bezszwowej (ang. seamless), gdzie w spójnym modelu przestrzennym przeprowadzana jest jednorodna analiza obejmująca nawigację wewnątrz budynków oraz otaczającym środowisku. Jest to szczególnie istotne w analizie dotarcia do dużych budynków i identyfikacji optymalnych ścieżek dotarcia do występujących zagrożeń przez służby ratunkowe.

Kolejnym kluczowym elementem w zarządzaniu kryzysowym jest informacja na temat zagrożeń. Występowanie, typ i natężenie zagrożeń są potrzebne do oceny sytuacji i podejmowania trafnych decyzji dotyczących operacji ratowniczych, które muszą uwzględnić niezbędne zasoby i minimalizację czasu potrzebnego na dotarcie do miejsca katastrofy przy jednoczesnym omijaniu niebezpiecznych stref. W związku z tym, symulacja zagrożeń, ich rozprzestrzenianie i wpływ na badany obiekt powinny dostarczyć istotnych danych wejściowych dla procesu decyzyjnego. Taka analiza może być przeprowadzona w modelach stworzonych w ramach cyklu prac stanowiących rozprawę habilitacyjną.

W celu pełnego zdefiniowania osiągnięcia naukowego, w kolejnych sekcjach zostanie opisany rozwój badań przeprowadzonych przez autora. W szczególności zostaną zaprezentowane: nowa topologiczna struktura danych dual half-edge (DHE) i nowa metoda tworzenia nawigowalnej sieci. Następnie opisane zostaną: nawigacja w sytuacjach kryzysowych, analiza zagrożeń w kontekście wspierania podejmowania decyzji w sytuacjach kryzysowych i obliczanie optymalnych marszrut dla zespołów ratowniczych, a także przegląd metod modelowania 3D wnętrza budynków i nawigacji w sytuacjach kryzysowych.

Cel

Przedstawiony cykl publikacji powiązanych tematycznie stanowi osiągnięcie naukowe, którego celem było opracowanie metody budowy trójwymiarowych modeli wnętrza budynków z zastosowaniem topologicznej struktury danych umożliwiających efektywną analizę przestrzenną. Cele szczegółowe obejmują:

- wykorzystanie topologicznej struktury danych dual half-edge (DHE) do implementacji modelu budynku;
- opracowanie metody budowy sieci służącej do nawigacji i symulacji ewakuacji;
- opracowanie metody symulowania wpływu wieloogniskowych zagrożeń na poziom bezpieczeństwa w budynku;
- wykorzystanie algorytmów grafowych do analizy przestrzennej modelu, w szczególności do wyznaczania najkrótszych ścieżek.

Wyniki prac zostały przedstawione w artykułach opublikowanych w międzynarodowych czasopismach o tematyce z zakresu geoinformatyki i budownictwa.

Omówienie wyników

Publikacja C1. Boguslawski, P., Gold, C., 2016, The Dual Half-Edge—A Topological Primal/Dual Data Structure and Construction Operators for Modelling and Manipulating Cell Complexes. ISPRS International Journal of Geo-Information, 5(2): 19, pp. 1-20.

Wkład habilitanta w powstanie tej pracy został oszacowany na 90% i obejmuje: opracowanie i implementację nowej struktury danych DHE, operatorów konstrukcyjnych i nawigacyjnych, opracowanie przykładowych modeli przestrzennych, interpretację wyników oraz napisanie manuskryptu wraz z przeglądem literatury. Wkład drugiego autora polegał na udziale w dyskusji oraz na merytorycznym wsparciu w przygotowaniu manuskryptu.

Publikacja [C1] przedstawia nową strukturę danych DHE, która została opracowana przez habilitanta w projekcie badawczym, w którym uczestniczył podczas doktoratu. Prace nad DHE mające na celu zwiększenie efektywności i wykorzystanie w nowych aplikacjach są kontynuowane do chwili obecnej. Artykuł został opublikowany po uzyskaniu stopnia doktora. Przedstawienie idei związanej ze strukturą danych jest istotne ze względu na zagadnienia poruszane w niniejszej pracy.

Już od początku prowadzonych badań było oczywiste, że nie istnieje struktura danych, która jest odpowiednia do trójwymiarowego modelowania wnętrza budynków i efektywnej analizy przestrzennej. Niektóre struktury danych o solidnych podstawach matematycznych, np. G-maps szeroko stosowana w GIS, były trudne do zastosowania z powodu skomplikowanego procesu konstrukcyjnego i braku bezpośredniej reprezentacji elementów takich jak wielościany (komórki 3D). W związku z tym, nacisk został położony na stworzenie nowej struktury danych. Celem badań było zaimplementowanie koncepcji dualizmu i stworzenie operatorów do intuicyjnego budowania modelu przestrzennego.

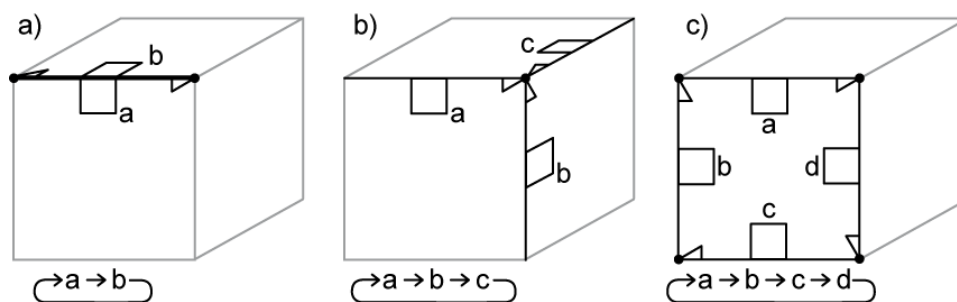
Jednym z osiągnięć było stworzenie nowej struktury danych DHE. Składa się ona z dwóch elementów atomowych: półkrawędzi i węzłów, które są użyte do konstrukcji modelu. Jedynie półkrawędzie zawierają informację topologiczną, podczas gdy węzły służą do przechowywania geometrii.

Model 3D reprezentowany jako kompleks komórek jest zbudowany z elementów atomowych, ale pozwala na reprezentację nie tylko krawędzi i wierzchołków, ale także komórek 3D i ścian bez dodatkowych klas elementów powiązanych z modelem. Jest to możliwe dzięki pełnej implementacji koncepcji dualizmu 3D Poincaré: w przestrzeni o wymiarze d dla elementu o wymiarze $k \leq d$ istnieje element o wymiarze $d-k$ (Munkres, 1984). W związku z tym, komórka w przestrzeni podstawowej jest reprezentowana przez węzeł dualny, ściana przez krawędź dualną, krawędź przez dualną ścianę, a węzeł przez dualną komórkę. Bazując na dualnym charakterze modelu, w celu dodania informacji do komórki, np. numer ID, można dołączyć atrybut do węzła dualnego reprezentującego komórkę. Atrybuty mogą być dodawane nie tylko do węzłów ale i do półkrawędzi, co sprawia, że załączenie informacji semantycznej do dowolnych elementów modelu staje się możliwe.

Wszystkie elementy są połączone w strukturę grafu. Z technicznego punktu widzenia, graf w przestrzeni podstawowej używany do przedstawienia geometrii jest na stałe połączony z grafem dualnym zawierającym połączenia między sąsiadującymi komórkami. Struktura grafu pozwala

na analizę przestrzenną modelu i wykonywanie zapytań, np. wyszukiwanie bezpośrednich sąsiadów komórki, czy znajdowanie najkrótszej ścieżki między wyznaczonymi komórkami. Dzięki wykorzystaniu informacji topologicznej, w zapytaniach nie ma potrzeby wykonywania obliczeń opartych na geometrii, co znacząco poprawia ich wydajność.

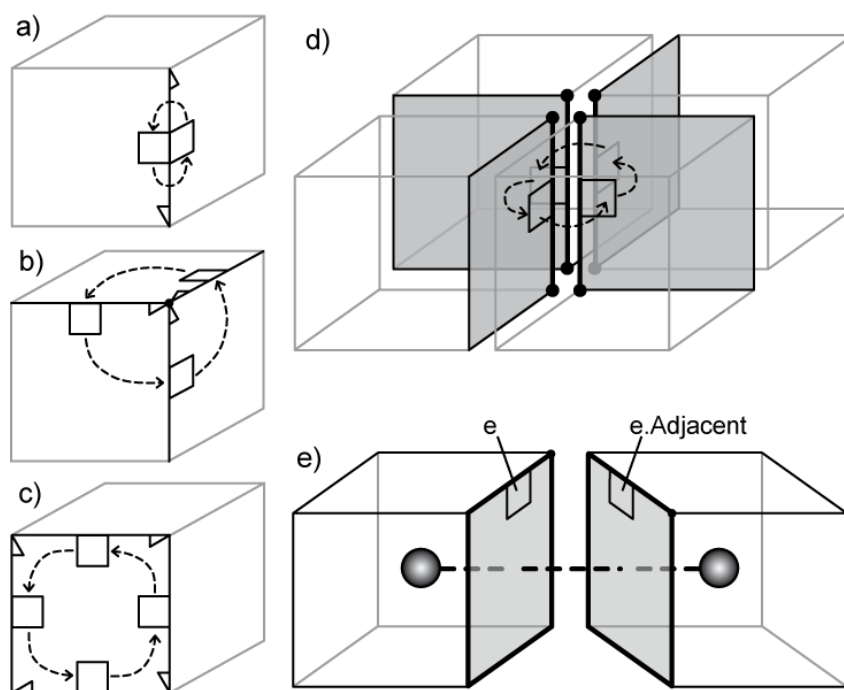
Podstawowym elementem konstrukcyjnym jest krawędź zakończona jednym bądź dwoma węzłami. Krawędź składa się z dwóch skierowanych półkrawędzi, która jest częścią granicy dokładnie jednej ściany. Jest ona reprezentowana przez pięciu wskaźników: V , S , N_V , N_F i D . Pojedyncza półkrawędź jest elementem atomowym, ale nie jest poprawnym elementem konstrukcyjnym. W celu stworzenia krawędzi, musi ona być połączona z inną półkrawędzią poprzez S . V służy do przypisania wskaźnika węzła. Wszystkie półkrawędzie komórki współdzielące ten sam węzeł są połączone przez N_V w kierunku odwrotnym do ruchu wskazówek zegara (CCW, ang. counterclockwise) patrząc z zewnątrz komórki, podczas gdy półkrawędzie ograniczające ścianę są połączone przez N_F i tworzą pętlę CCW. S , N_V i N_F służą do reprezentacji topologicznej pojedynczej komórki (patrz Rys. 2). Z matematycznego punktu widzenia jest ona rozmaitością 2-wymiarową (Munkres, 1984). Dwie sąsiednie komórki posiadają oddzielne powierzchnie i niemożliwa jest bezpośrednia nawigacja z jednej komórki do drugiej. Połączenia pomiędzy komórkami kompleksu są tworzone w przestrzeni dualnej. D jest użyte do stałego połączenia półkrawędzi w jednej przestrzeni z jej odpowiednikiem w przestrzeni dualnej. Taka para jest nazywana dualną półkrawędzią (dual half-edge). Aby nawigować z jednej komórki do innej, tj. sąsiedniej komórki, należy przejść z przestrzeni podstawowej do dualnej używając D , następnie S w dualnej i wrócić do podstawowej przez D . Należy zauważyć, że węzeł dualny jest dostępny z każdej półkrawędzi e komórki przy użyciu specyficznej sekwencji wskaźników: $e.D.V$.



Rysunek 2. Połączenia pomiędzy półkrawędziami w komórce: a) wskaźnik S ; b) wskaźnik N_V ; c) wskaźnik N_F .

Atomowe elementy w przestrzeni dualnej są zorganizowane i połączone w ten sam sposób jak w przestrzeni podstawowej. Te dwie przestrzenie są identyczne pod względem połączeń jak i nawigacji.

Nawigacyjne operatory DHE dostarczają intuicyjnej metody przechodzenia modelu. Bezpośrednie użycie wskaźników nie jest praktyczne. Na przykład, aby przejść z krawędzi e w jednej komórce do krawędzi o takich samych wierzchołkach związanej z tą samą ścianą, ale w sąsiedniej komórce, powinna zostać użyta następująca sekwencja wskaźników: $e.D.N_F.D.S$. Ta szczególna sekwencja służy do zdefiniowania operatora *Adjacent*. Pozostałe operatory są następujące: *Sym*, *Next_V*, *Prev_V*, *Next_F*, *Prev_F*, *Next_E*, *Prev_E*, i *Dual*. Są one stosowane do nawigacji: z jednej połowy krawędzi do drugiej – *Sym*, wokół współdzielonego wężła w kierunku CCW – *Next_V*, wokół współdzielonego wężła w kierunku CW (ang. clockwise) – *Prev_V*, wokół współdzielonej ściany w kierunku CCW – *Next_F*, wokół współdzielonej ściany w kierunku CW – *Prev_F*, wokół współdzielonej krawędzi w kierunku CCW – *Next_E*, wokół współdzielonej krawędzi w kierunku CW – *Prev_E* i z półkrawędzi w jednej przestrzeni do powiązanej dualnej półkrawędzi – *Dual*. Operatory te są pokazane na Rys. 3 (tylko kierunek CCW).



Rysunek 3. Operatory nawigacyjne: a) *Sym*, b) *Next_V*, c) *Next_F*, d) *Next_E*, e) *Adjacent*.

Architektura struktury danych DHE jest stosunkowo prosta, lecz konstrukcja i modyfikacja złożonych modeli byłaby bardzo skomplikowana bez dedykowanych operatorów, zwłaszcza konieczność zapewnienia poprawnych połączeń pomiędzy wskaźnikami reprezentującymi topologię modelu. Zostały zaproponowane dwie metody konstrukcji: Cardboard and Tape (C&T) i metoda bazująca na operatorach Eulera stosowanych w aplikacjach CAD (eng.

Computer-Aided Design). Obie metody umożliwiają bezpośrednie modyfikacje podstawowej przestrzeni, podczas gdy przestrzeń dualna jest aktualizowana automatycznie. Dodatkowo wszystkie zmiany są wykonywane lokalnie i dotyczą tylko niewielkiej liczby elementów atomowych. Zaproponowane metody umożliwiają budowę pojedynczych komórek oraz łączenie ich w kompleks komórek w taki sposób, aby zapewnić spójność pomiędzy geometrią i topologią, a tym samym poprawność modelu.

Publikacja C2. Boguslawski, P., Gold, C., 2015, Buildings and terrain unified – multidimensional dual data structure for GIS. *Geo-spatial Information Science*, 18(4), pp. 151-158.

Wkład habilitanta w powstanie tej pracy został oszacowany na 90% i obejmuje: opracowanie i implementację zunifikowanego modelu oraz trzech metod połączenia modelu budynku z otaczającym terenem, opracowanie przykładowych modeli przestrzennych, interpretację wyników oraz napisanie manuskryptu wraz z przeglądem literatury. Wkład drugiego autora polegał na udziale w dyskusji oraz na merytorycznym wsparciu w przygotowaniu manuskryptu.

Kolejnym osiągnięciem opisywanych badań było opracowanie zunifikowanego modelu, który jest w stanie połączyć w sobie obiekty o różnej wymiarowości. W przypadku GIS, modele miejskie zazwyczaj obejmują numeryczny model terenu, sieć transportową i inne tematyczne warstwy w 2D lub 2.5D (tj. 2D + atrybut wysokości), podczas gdy budynki czy skomplikowane struktury przedstawiane są w 3D. Analiza przestrzenna przeprowadzana na oddzielnych warstwach jest zazwyczaj trudna do realizacji. Spójna analiza może zostać wykonana w momencie, gdy zunifikowany model łączący różne warstwy jest dostępny.

W opisanych badaniach, zostały opracowane trzy różne metody łączące model 3D (tj. model budynku) z modelem 2D (tj. model terenu).

W pierwszej metodzie, model 2D jest „wyciągany” na stosunkowo niewielką wysokość. W tej operacji, dokonywana jest konwersja wielokątów 2D do komórek 3D, np. graniastosłup. Następnie, uzyskane komórki i komórki modelu 3D są łączone z wykorzystaniem podejścia stosowanego do budowy kompleksu komórek, które zostało przedstawione w poprzednim rozdziale. Metoda ta tworzy jednolity model, w którym taka sama reprezentacja 3D jest użyta dla pierwotnego modelu 3D oraz „wyciągniętych” komórek 2D. W rezultacie, takie same metody analizy przestrzennej mogą być zastosowane w całym modelu. Wadą takiego rozwiązania są wysokie wymagania pamięciowe powodowane przez reprezentację 3D części modelu pierwotnie przedstawionej w wersji 2D.

W drugiej metodzie, model 2D jest reprezentowany jako siatka dwustronnych ścian zbudowanych za pomocą metody C&T. Następnie jest ona łączona z zewnętrzną komórką modelu 3D. Ta sama struktura danych DHE jest użyta w całym modelu. Jednak trójwymiarowa analiza GIS zastosowana do modelu 3D nie może być użyta w części siatkowej. Zaletą metody jest mniejszy koszt pamięciowy w porównaniu z pierwszą metodą.

Trzecia metoda jest najmniej wymagająca pod względem wykorzystania pamięci komputera, ale wymaga zmodyfikowanej struktury danych DHE, operatorów konstrukcyjnych i dedykowanych interfejsów do połączeń na granicy między modelem 3D i siatką 2D. Największą wadą tego rozwiązania jest użycie odmiennej struktury danych dla różnych części modelu. Zmodyfikowana struktura danych jest zbliżona do QE. Z technicznego punktu widzenia, DHE i zmodyfikowana struktura są podobne, ale ze względu na pewne różnice, wymagane jest wprowadzenie nowego podejścia w analizie przestrzennej stosowanej w różnych fragmentach modelu. Analiza jest jednak przeprowadzana w spójnym modelu, co jest zaletą w porównaniu do analizy przeprowadzanej na odrębnych warstwach.

Wyselekcjonowanie najlepszej metody zależy od zastosowania i dostępnych zasobów. Pierwsza metoda wymaga dużo więcej zasobów pamięciowych niż pozostałe dwie, jednak, w przypadku złożonych modeli, jest ona naturalnym wyborem. Pełna reprezentacja 3D jest co prawda bardziej wymagająca pamięciowo, ale dostarcza jednolitej reprezentacji wszystkich części modelu włączając w to geometrię, topologię oraz informację semantyczną. Powinno to znacząco uprościć implementację metod analizy przestrzennej.

Publikacja C3. Boguslawski, P., Mahdjoubi, L., Zverovich, V., Fadli, F., 2016, Automated construction of variable density navigable networks in a 3D indoor environment for emergency response. *Automation in Construction*, 72 (2016), pp. 115-128.

Wkład habilitanta w powstanie tej pracy został oszacowany na 90% i obejmuje: opracowanie i implementację nowego algorytmu automatycznego tworzenia sieci nawigowalnej o zmiennej gęstości na podstawie modelu 3D budynku, opracowanie przykładowych modeli przestrzennych, interpretację wyników oraz napisanie manuskryptu wraz z przeglądem literatury. Wkład pozostałych autorów polegał na udziale w dyskusji oraz na merytorycznym wsparciu w przygotowaniu manuskryptu.

Publikacja C4. Boguslawski, P., Mahdjoubi, L., Zverovich, V. and Fadli, F., 2016, Two-graph building interior representation for emergency response applications. In: *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, III-2, pp. 9-14.

Wkład habilitanta w powstanie tej pracy został oszacowany na 90% i obejmuje: opracowanie i implementację metody budowy zunifikowanej sieci nawigowalnej na bazie modelu logicznego budynku oraz szczegółowych sieci w poszczególnych pomieszczeniach, opracowanie przykładowych modeli przestrzennych, interpretację wyników oraz napisanie manuskryptu wraz z przeglądem literatury. Wkład pozostałych autorów polegał na udziale w dyskusji oraz na merytorycznym wsparciu w przygotowaniu manuskryptu.

Publikacje [C3] i [C4] stanowią opis tworzenia spójnej sieci nawigowalnej na podstawie właściwości geometrycznych, topologicznych i semantycznych modelu. [C4] przedstawia metodę tworzenia zunifikowanej sieci nawigowalnej będącą kontynuacją prac przedstawionych w [C3], które z kolei polegały na opracowaniu algorytmu budowy sieci dla pojedynczych pomieszczeń.

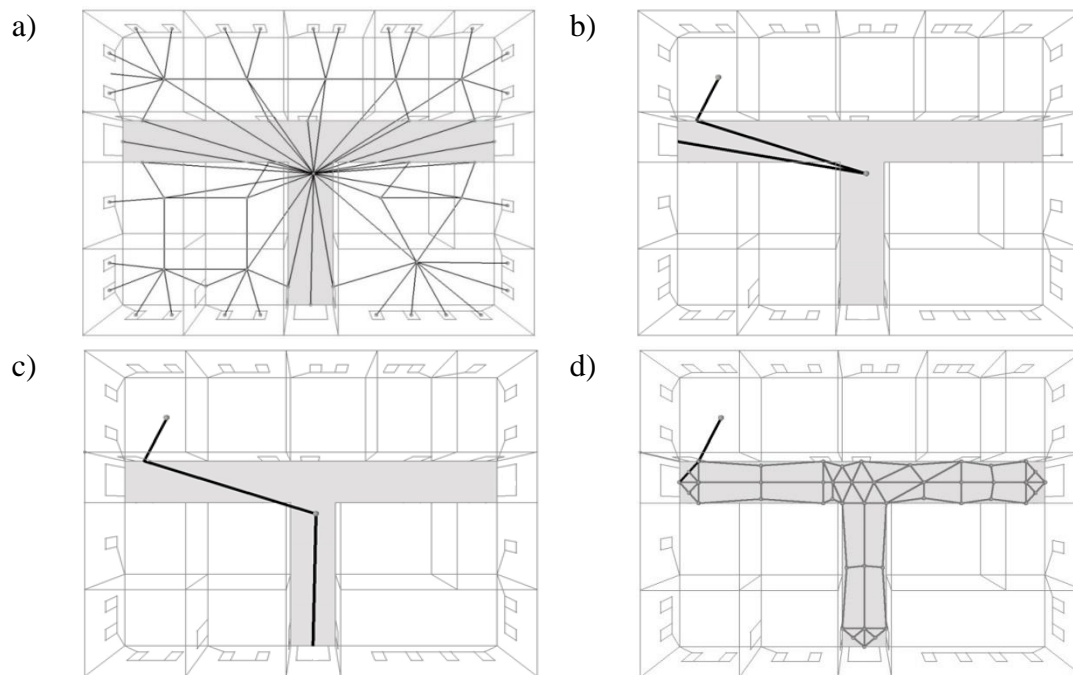
W badaniach rozpatrywane były różne dane wejściowe, od planów architektonicznych ręcznie przekształcanych na przestrzenne modele 3D, po standardy wymiany danych: OBJ, CityGML i gbXML. OBJ jest ogólnym formatem reprezentacji b-rep obiektów 3D, podczas gdy CityGML i gbXML są zaprojektowane do przechowywania informacji o budynkach i zawierają geometrię, prostą topologię i semantykę. Semantyka jest istotnym elementem, ponieważ opisuje funkcje obiektów przestrzennych. Na przykład, drzwi, które pełnią rolę portali pomiędzy sąsiednimi przestrzeniami (tj. pokojami), są identyfikowane na podstawie informacji semantycznej powiązanej z obiektem geometrycznym. Inne elementy zawarte w modelu oprócz drzwi, to przestrzenie wewnątrz budynku i elementy konstrukcyjne takie jak ściany i otwarcia, np. okna i drzwi. Są one używane do identyfikacji dostępnych przejść pomiędzy sąsiednimi przestrzeniami, np. pokojami i korytarzami. W sytuacji kryzysowej okna położone niewysoko nad poziomem terenu mogą być użyte do ewakuacji.

Jednym z wyzwań podczas konstrukcji modelu było określenie wszystkich relacji przestrzennych pomiędzy komórkami reprezentującymi przestrzenie wewnątrz budynku. Formaty wymiany danych zawierają jedynie prostą topologię, zazwyczaj ograniczoną do prawidłowej kolejności punktów wokół krawędzi ściany, podczas gdy przestrzenne relacje pomiędzy sąsiednimi komórkami nie są brane pod uwagę. Konieczne więc było odtworzenie takich relacji i dodanie odpowiednich połączeń w modelu. Wymagało to również dodania nowych elementów do modelu, takich jak krawędzie czy ściany, w celu zapewnienia dopasowania elementów w komórkach sąsiednich wyznaczonych do połączenia. Na przykład duża ściana w korytarzu musi być podzielona na mniejsze części dopasowane do ścian pokoi

sąsiadujących z korytarzem. Dopiero tak przygotowany model umożliwia połączenie wszystkich komórek za pomocą krawędzi dualnych.

Krawędzie grafu dualnego łączą sąsiednie komórki i tworzą tym samym sieć logiczną modelu opisującą topologię budynku. Jest ona istotna w analizie przestrzennej takiej jak wyznaczanie sąsiednich przestrzeni, co jest istotne w przypadku analizy rozprzestrzeniania zagrożeń. Może też być użyta do wyznaczania ścieżek i nawigacji w modelu, co jest istotne w przypadku symulacji ewakuacji. Grafowa implementacja modelu umożliwiła zastosowanie algorytmów grafowych, w tym algorytmów do przechodzenia grafów (ang. graph traversal) oraz do znajdowania najkrótszych ścieżek. Aby zaprezentować dowód poprawności, zaimplementowany został algorytm Dijkstry, który znajduje najkrótszą drogę od ustalonej lokalizacji do najbliższej lokalizacji, która spełnia określone warunki. Inne, bardziej wydajne algorytmy o niższej złożoności obliczeniowej, mogą zostać użyte zamiast algorytmu Dijkstry, np. A*. Jakkolwiek, ten szeroko używany algorytm został zaproponowany w badaniach, aby zapewnić przejrzystość ich opisu, a optymalizacja algorytmów była poza zakresem zainteresowań. Uwaga została skupiona na opracowaniu metody wyznaczania wag krawędzi, co jest istotne z punktu widzenia minimalizacji długości ścieżek.

Mimo że wyniki były obiecujące, były one poprawne tylko w przypadku prostych kompleksów komórek, w których komórki były wielobokami wypukłymi o zbliżonym rozmiarze. W przypadku komórek o dowolnym kształcie i rozmiarze uzyskane wyniki nie były dokładne, a spodziewane ścieżki nie były najkrótsze. Szczególnie problematyczne okazały się przypadki, gdzie długie komórki, np. korytarze, posiadały wiele mniejszych przylegających komórek, np. małe pokoje. W badaniach została również uwzględniona idea nawigowalnych portali pomiędzy komórkami, co dodatkowo zwiększyło złożoność problemu. Portale są jedyną dozwoloną drogą przemieszczania się z jednej komórki do sąsiedniej. Jeśli dwie komórki nie współdzielą portalu, to nawigacja między nimi jest niemożliwa. Znajdowanie ścieżek oparte na sieci logicznej okazało się niewystarczające do rozwiązania problemów tego typu. W celu wyznaczenia prawidłowych ścieżek pomiędzy dwoma lokalizacjami w budynku, niezbędne okazało się opracowanie sieci nawigowalnych dla skomplikowanych przestrzeni, np. w długich korytarzach lub pokojach o dowolnych kształtach i z wieloma drzwiami (patrz Rys. 4).



Rysunek 4. Problem najkrótszych ścieżek: a) sieć logiczna pojedynczego piętra; b) ścieżka z pokoju do najbliższego wyjścia; c) najkrótsza ścieżka z pokoju do wyjścia; d) najkrótsza ścieżka z pokoju do najbliższego wyjścia wyznaczona na bazie sieci nawigowalnej.

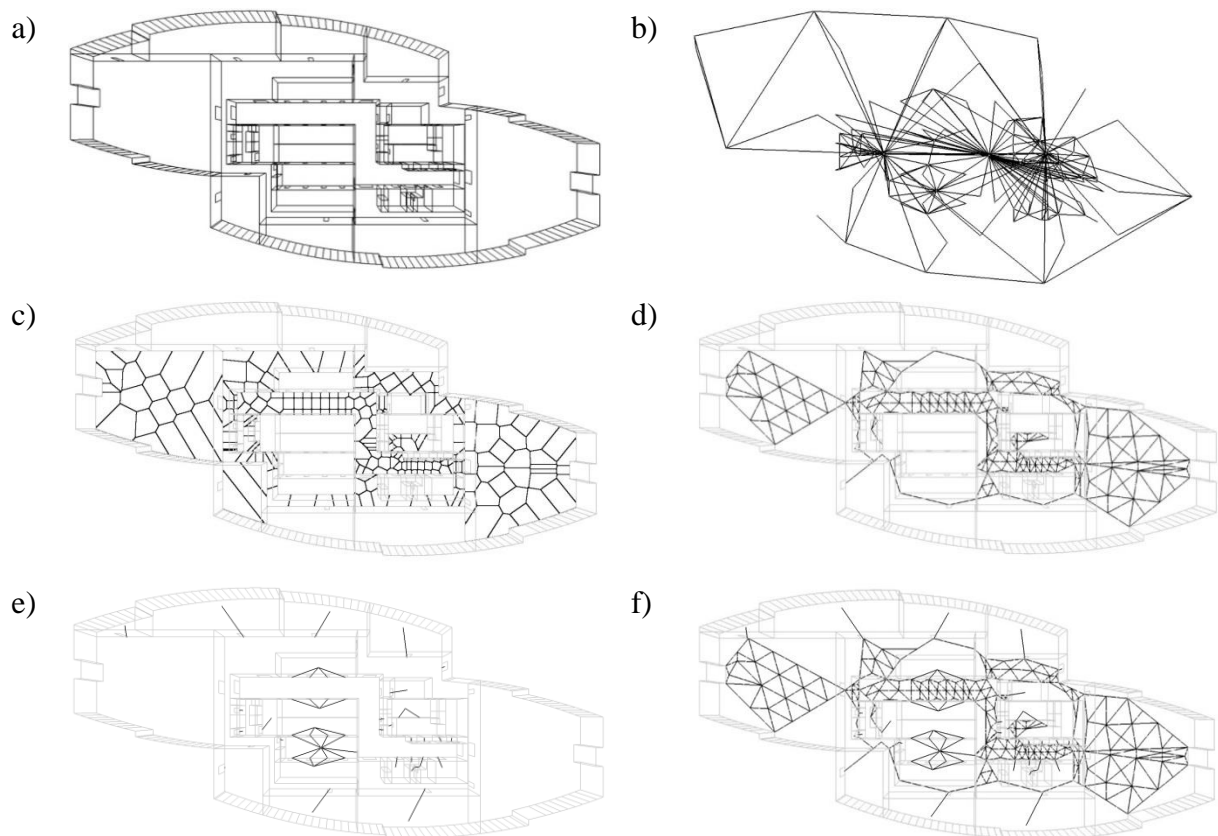
Opracowana została nowa metoda tworzenia nawigowalnej sieci o zmiennej gęstości. W związku z tym, że w centrum uwagi projektu znalazły się aplikacje GIS, w szczególności służące do symulacji ewakuacji, nawigacji w terenach miejskich i budynkach, konieczne było wyznaczenie terenu, na którym było możliwe przemieszczanie się, podczas gdy obiekty latające pozostały poza obszarem zainteresowań. Jedynie powierzchnie posiadające wektor normalny skierowany ku górze oraz powierzchnie o niewielkim spadku zostały sklasyfikowane jako nawigowalne i nazwane „podłogą”. W nowej metodzie do tworzenia sieci, ściany reprezentujące podłogę zostają podzielone na zbiór przylegających wielokątów (tj. siatka komórek 2D) przy użyciu zmodyfikowanego algorytmu do tesselacji Woronoja opartego na algorytmie Greena i Sibsona (Green and Sibson, 1978). Każda komórka wyznaczana przez tę metodę otacza dokładnie jeden punkt załączkowy. Początkowy zbiór punktów załączkowych zawiera wklęsłe kąty i węzły dualne portali zrzutowane na płaszczyznę podłogi. Krawędzie łączące dwa punkty załączkowe sąsiednich komórek tworzą dualny graf powiązań pomiędzy komórkami. Taki graf jest jednocześnie siecią użytą do nawigacji. Siatka komórek jest dalej zagęszczana poprzez dodawanie nowych punktów załączkowych. Na przykład, jeśli krawędzie dualne są dłuższe niż ustalony próg (tj. parametr wejściowy), to nowy punkt załączkowy jest dodawany na środku krawędzi. Kolejne punkty załączkowe generujące nowe komórki mogą być dodawane do siatki w zależności od założonej gęstości siatki docelowej. Parametr progowy

może być różny dla poszczególnych przestrzeni w zależności od semantyki. Niektóre komórki kompleksu, w których przewidywany jest wzmożony ruch (lub przepływ), wymagają dokładniejszego planowania ścieżek, a tym samym większej gęstości sieci. Metoda jest elastyczna, gdyż jej gęstość może być zwiększana lub zmniejszana w obrębie pojedynczych komórek lub lokalnie, jedynie w pobliżu wybranych punktów.

Uzyskane wyniki potwierdziły, że ścieżki uzyskane na podstawie tak zbudowanej sieci, stanowią dobre przybliżenie rzeczywistej sytuacji. Wyniki opracowane z wykorzystaniem innych dominujących metod tworzenia sieci nawigowalnych pokazują lepsze oszacowanie długości ścieżki i przewagę nowej metody.

Należy zwrócić uwagę, że sieci nawigowalne związane z odrębnymi przestrzeniami 3D nie są bezpośrednio powiązane. Wybrana krawędź z każdej sieci jest przypisywana do węzła dualnego przestrzeni 3D, ale połączenia pomiędzy samymi sieciami nie są tworzone. Wirtualne połączenia są obliczane w momencie, gdy algorytm znajdowania ścieżek natrafia na portal i jest kontynuowany w sieci związanej z sąsiednią przestrzenią. Opisane rozwiązanie zwiększa złożoność algorytmu uruchomionego dla takiego modelu, zwłaszcza gdy niezbędne jest wyznaczenie połączenia między dwoma sieciami nawigowalnymi lub pomiędzy nawigowalną siecią i siecią logiczną. Z tego powodu opracowana została zunifikowana sieć nawigowalna opisana w [C4].

Zunifikowana sieć nawigowalna łączy wszystkie sieci nawigowalne wyznaczone dla poszczególnych przestrzeni z fragmentami sieci logicznej związanymi z przestrzeniami, dla których sieci nawigowalne nie zostały wyznaczone (patrz Rys. 5). Jedną z charakterystycznych własności takiej unifikacji jest przedstawianie portali w postaci specjalnych krawędzi portalowych, podczas gdy pierwotnie były one przedstawiane jako węzły dualne w sieci logicznej. Tak zbudowana sieć pozwala na stosowanie algorytmów wyznaczania ścieżek w optymalny sposób.



Rysunek 5. Proces tworzenia zunifikowanej sieci nawigowalnej: a) model geometryczny; b) sieć logiczna; c) partycjonowanie skomplikowanych przestrzeni; d) sieci nawigowalne; e) pozostała sieć logiczna; f) zunifikowana sieć nawigowalna.

Publikacja C5. Zverovich, V., Mahdjoubi, L., Boguslawski, P., Fadli, F., 2017, Analytic prioritization of indoor routes for search and rescue operations in hazardous environments. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32 (9). pp. 727-747.

Wkład habilitanta w powstanie tej pracy został oszacowany na 50% i obejmuje: opracowanie wraz z pierwszym autorem algorytmu propagacji zagrożeń w budynku, parametryzacji algorytmów oraz interpretacji wyników, samodzielną implementację algorytmów, opracowanie przykładowych modeli przestrzennych oraz przygotowanie wyników do dalszej analizy. Wkład pozostałych autorów polegał na udziale w dyskusji oraz na merytorycznym wsparciu w przygotowaniu manuskryptu.

W niektórych badaniach dotyczących sytuacji kryzysowych bezpieczne ścieżki są rozpatrywane w symulacjach specyficznych scenariuszy katastrof. Często pod uwagę są brane jedynie plany 2D budynku, podczas gdy rozprzestrzenianie zagrożeń w trzech wymiarach już nie. Niebezpieczne strefy będące pod wpływem zagrożenia są identyfikowane i całkowicie wyeliminowane z nawigacji. Należy jednak pamiętać, że może być uzasadnione użycie

szybszej drogi, która przechodzi w niedużej odległości od epicentrum zagrożenia, niż pozostawanie w bezpieczniejszej strefie, ale przez dłuższy czas.

W opisywanych badaniach rozpatrywane są abstrakcyjne zagrożenia i ich wpływ na budynek. Epicentra zagrożeń są uwzględniane w modelu budynku. Taka informacja może być dodana przez operatora lub automatycznie przez aktywowanie sensora zintegrowanego z systemem zarządzania sytuacją kryzysową. Wpływ zagrożenia jest propagowany w modelu – indeks bliskości zagrożenia jest obliczany dla każdego z epicentrow i dla każdego węzła sieci logicznej i nawigowalnej. Kluczowymi parametrami są: odległość i liczba przeszkód (np. ścian) pomiędzy aktualnym węzłem a każdym z epicentrow, jak również współczynnik propagacji. Natężenie zagrożenia maleje wraz ze wzrostem odległości i liczby przeszkód pomiędzy węzłem sieci a epicentrum. Współczynnik propagacji określa prędkość zanikania wpływu zagrożenia – czym mniejszy współczynnik, tym wpływ zagrożenia na budynek jest większy. Poziom zagrożenia w węzle jest określany jako maksymalna wartość wszystkich indeksów bliskości zagrożenia obliczonych dla wszystkich epicentrow. Wagi krawędzi sieci, które są kluczowym parametrem w algorytmie Dijkstry, wyznaczane są jako iloczyn średniej arytmetyczna wartości w węzłach na końcach krawędzi oraz długości krawędzi.

Waga krawędzi zależy od wartości współczynnika propagacji. W związku z tym, zmiana współczynnika o pewną wartość powoduje zmianę ścieżki ucieczki wyznaczonej dla danej lokalizacji w budynku. Ścieżka jest najszybsza przy minimalnej wartości współczynnika. Wraz ze wzrostem wartości współczynnika ścieżka staje się bezpieczniejsza (preferowane są krawędzie położone dalej od epicentrow zagrożeń). W celu określenia zbioru możliwych i unikalnych ścieżek, stworzony został algorytm binarny wyszukiwania ścieżek w zależności do współczynnika propagacji.

Kolejnym kryterium wyznaczania ścieżek zaproponowanym w tych badaniach jest złożoność ścieżki, która zależy od liczby drzwi, klatek schodowych i kąta zakrętów wzdłuż ścieżki. Złożoność jest ważna w przypadku wyznaczania ścieżek dla osób niepełnosprawnych, zwłaszcza tych na wózkach inwalidzkich oraz dla robotów. Na przykład, ścieżka określona linią prostą jest mniej złożona niż ścieżka z zakrętami, a ścieżka z mniejszą liczbą drzwi jest mniej złożona niż ścieżka z wieloma drzwiami po drodze.

Po wyznaczeniu zbioru możliwych ścieżek uwzględniających trzy kryteria: czas, bezpieczeństwo i złożoność, obliczane są trzy współczynniki dla każdej ścieżki ze zbioru: czas przejścia, bliskość zagrożenia i złożoność ścieżki. Są one uwzględnione w nowej

stochastycznej wersji wielokryterialnej metody hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych (AHP, ang. Analytic Hierarchy Process). Ranking ścieżek ustalany jest w oparciu o macierz preferencji określającej ważność poszczególnych kryteriów. Na przykład, szybkie ścieżki mogą być preferowane bardziej niż te bezpieczne i mniej skomplikowane w przypadku osoby wyposażonej w strój ochronny, np. strażak; mniej złożone ścieżki mogą być lepsze dla osoby na wózku inwalidzkim, podczas gdy w przypadku ogólnym, najlepszą opcją są ścieżki bezpieczne i w miarę szybkie i proste.

Publikacja C6. Boguslawski, P., Mahdjoubi, L., Zverovich, V., Fadli, F., 2018, A dynamic approach for evacuees' distribution and optimal routing in hazardous environments. *Automation in Construction*, 94, pp. 11-21.

Wkład habilitanta w powstanie tej pracy został oszacowany na 90% i obejmuje: opracowanie i implementację nowej metody symulacji ewakuacji z uwzględnieniem modelu przestrzennego 3D budynku, lokalizacji zagrożeń wraz z ich wpływem na poziom bezpieczeństwa w całym budynku oraz dynamiczny rozkład osób ewakuowanych, który jest uwzględniony w wyznaczaniu ścieżek dla służb ratunkowych, opracowanie przykładowych modeli przestrzennych, interpretację wyników oraz napisanie manuskryptu wraz z przeglądem literatury. Wkład pozostałych autorów polegał na udziale w dyskusji oraz na merytorycznym wsparciu w przygotowaniu manuskryptu.

Ewakuacja jest jednym z ważniejszych zagadnień w aplikacjach zarządzania kryzysowego. Czas potrzebny na opuszczenie budynku przez wszystkie osoby jest jednym z wyznaczników w analizie bezpieczeństwa budynku. Celem jest ewakuacja budynku tak szybko, jak to tylko możliwe. Zazwyczaj najszybsze ścieżki są wyznaczone w symulacjach ewakuacji. Brane są pod uwagę różne aspekty poruszania się ludzi, np. wiek, niepełnosprawność, zachowanie ludzi i tłumu, itp. Istnieje wiele czynników mających wpływ na czas ewakuacji, np. prędkość poruszania się ludzi, zatory, itp. Nieodpowiedni projekt budynku może być jedną z przyczyn tworzenia się zatorów. To zagadnienie było badane w agentowej symulacji ewakuacji. Główną ideą zaproponowanej metody jest zminimalizowanie czasu obliczeniowego poprzez redukcję parametrów użytych w algorytmie symulacji. W modelu budynku są umieszczani agenci reprezentujący osoby ewakuowane. Drogi ucieczki dla każdego agenta są obliczane na podstawie algorytmu Dijkstry, w którym wagi krawędzi sieci odzwierciedlają czas przemieszczania się przez krawędź i lokalne zagęszczenie agentów. W wyniku otrzymywane są najszybsze ścieżki. Są one użyte w iteracyjnym procesie symulacji przemieszczania się agentów. Prędkość tego przemieszczania zależy od aktualnego przepływu agentów przez

krawędzie i lokalnego zagęszczenia agentów w węzłach sieci. W przypadku, gdy agent nie jest w stanie poruszyć się przez pewien czas zdefiniowany przez ustalony parametr progowy, wyznaczana jest nowa ścieżka ucieczki. W efekcie agenci są kierowani do najbliższego wyjścia przez mniej zagęszczone obszary, co odpowiada decyzjom podejmowanym przez ludzi zaznajomionych z układem budynku. Zaobserwowano także, że zagęszczenia występują głównie w pobliżu drzwi do klatek schodowych.

Podczas symulacji ewakuacji wartości zagęszczenia agentów są zapisywane w modelu. Zagęszczenie w każdym węźle sieci jest wyznaczane w regularnych odstępach czasu, tj. w każdej iteracji, i dodawane do węzłów wraz ze znacznikiem czasu. Następnie, wyznaczane są ścieżki dla zespołów ratunkowych od dowolnego wejścia do podanej lokalizacji wewnątrz budynku. Główną różnicą między ścieżkami dla osób ewakuowanych i zespołów ratunkowych jest kierunek przemieszczania się: odpowiednio na dół i w górę. Czas przejścia wzdłuż krawędzi reprezentujących nawigowalne połączenie pomiędzy poziomami klatek schodowych posiada różne wartości dla każdego z kierunków. Kierunek do góry jest wolniejszy niż przemieszczanie się w dół. Zakłada się, że zespoły ratunkowe znają lokalizację niebezpieczeństw, które są brane pod uwagę podczas określania bezpieczeństwa ścieżki. Poza tym, zespół ratunkowy jest reprezentowany jako pojedynczy agent poruszający się w kierunku przeciwnym do przepływu osób ewakuowanych. W związku z tym, zagęszczenie osób ewakuowanych wpływa na prędkość przemieszczania się zespołów ratunkowych. Zaproponowane zostało nowe dynamiczne rozwiązanie, gdzie czasowy rozkład osób ewakuowanych jest uwzględniony w wyznaczaniu optymalnych ścieżek. Wagi odzwierciedlające czas przejścia oraz lokalne zagęszczenie wykorzystywane przez algorytm znajdowania ścieżek są aktualizowane na bieżąco w oparciu o znaczniki czasowe i aktualny postęp wyznaczania ścieżki. Najszybsze ścieżki wyznaczone w ten sposób są na ogół różne od ścieżek wyznaczonych dla sytuacji statycznej, w której zagęszczenie osób ewakuowanych nie zmienia się w czasie. Dodatkowo, podczas wytyczania optymalnych ścieżek brane jest pod uwagę rozprzestrzenianie zagrożeń i ich wpływ na cały budynek.

Publikacja C7. Boguslawski, P., Zlatanova, S., Gotlib, D., Wyszomirski, M., Gnat, M., Grzempowski, P., 2022, 3D building interior modelling for navigation in emergency response applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103066.

Wkład habilitanta w powstanie tej pracy został oszacowany na 50% i obejmuje: opracowanie koncepcji i struktury artykułu, koordynację prac zespołu badawczego, przegląd metod

modelowania 3D wnętrzbudynków, tworzenia modeli sieciowych do nawigacji oraz wyznaczania ścieżek, napisanie manuskryptu (z wyjątkiem rozdziałów 2.3, 3.1 i 5). Wkład pozostałych autorów polegał na udziale w dyskusji oraz napisaniu rozdziałów 2.3, 3.1 i 5.

Publikacja [C7] jest przeglądem obecnych metod reprezentacji przestrzennej modeli wnętrzbudynków wykorzystywanych do nawigacji, w szczególności w aplikacjach do reagowania w sytuacjach kryzysowych. Przedstawione zostały trendy rozwoju oraz problemy badawcze dotąd w pełni nierozwiązane.

W artykule zostały poruszone cztery zagadnienia: wyszukiwanie ścieżek ewakuacyjnych w budynkach w sytuacjach kryzysowych, reprezentacja modeli trójwymiarowych, sieci nawigacyjne oraz wizualizacja. Są to podstawowe elementy składowe aplikacji, umożliwiającej wykonanie analiz przestrzennych i symulacji w budynkach: symulacja ewakuacji, wyznaczanie optymalnych ścieżek ucieczki, wyznaczanie poziomu zagrożenia itp.

Wyszukiwanie ścieżek ewakuacyjnych jest ściśle związane z obliczaniem najkrótszej ścieżki. Jest to problem z zakresu teorii grafów, gdzie dla zadanego grafu składającego się z wierzchołków połączonych krawędziami należy znaleźć takie połączenie pomiędzy dwoma dowolnymi wierzchołkami, że koszt jego przejścia jest najmniejszy. Koszt jest definiowany jako suma wag przypisanych do krawędzi składających się na ścieżkę. Standardowym algorytmem umożliwiającym rozwiązanie tego problemu jest algorytm Dijkstry oraz algorytmy na nim bazujące, np. A*.

Inną metodą znajdowania najkrótszych ścieżek jest wykorzystanie automatów komórkowych, które operują na regularnych siatkach wielokątów, np. siatka kwadratów. Poszczególne oczka takiej siatki reprezentują przestrzenie dozwolone dla nawigacji i niedozwolone, np. ściany. Dla aktualnego oczka siatki sprawdzane jest bezpośrednie sąsiedztwo i określany jest koszt ruchu do kolejnego oczka. Oczka te można traktować jak węzły grafu. Są one połączone krawędziami w przypadku, gdy dwa węzły reprezentują sąsiednie oczka siatki.

W celu zastosowania jednej z powyższych metod, tj. podejścia grafowego i automatów komórkowych, niezbędna jest odpowiednia reprezentacja przestrzenna danych. Dane wejściowe, w postaci modeli budynków zapisanych w ogólnie przyjętych standardach takich jak Industry Foundation Classes (IFC) (ISO 16739:2018, 2018) czy CityGML (OGC, 2012), nie umożliwiają bezpośredniego zastosowania. Konieczne jest zmapowanie istotnych elementów do modelu nawigacyjnego. Przestrzenie wewnętrzne (np. pokoje, korytarze, itp.) oraz portale (np. drzwi, okna, wirtualne przegrody, itp.) przedstawione są jako węzły grafu

połączone krawędziami w przypadku bezpośredniego sąsiedztwa. Taka reprezentacja opisuje model logiczny budynku. Nie jest on wystarczający w przypadku skomplikowanych modeli. Potrzebny jest jeszcze model nawigacyjny w obrębie pojedynczych przestrzeni o skomplikowanych kształtach i wielu drzwiach, np. korytarze w kształcie litery L. Dopiero połączenie logicznego modelu budynku i nawigacyjnych modeli dla poszczególnych pomieszczeń umożliwi przeprowadzenie analiz i symulacji w oparciu o wspomniane wcześniej algorytmy. Możliwa staje się analiza zagrożeń i uwzględnienie jej wyników w wyznaczaniu bezpiecznych ścieżek podczas ewakuacji.

Należy w tym miejscu wspomnieć o wokselowej reprezentacji przestrzeni wewnątrz budynku. Jest to siatka sześciątów w przestrzeni trójwymiarowej, gdzie poszczególne oczka, tzw. woksele, mogą mieć różne rozmiary. Reprezentują one puste przestrzenie oraz elementy blokujące swobodną nawigację, np. ściany i inne przeszkody. Modele wokselowe są coraz częściej stosowane w połączeniu z chmurami punktów uzyskiwanymi przy pomocy skanerów laserowych. Woksele niezawierające punktów są oznaczane jako nawigowalne, podczas gdy woksele z punktami są oznaczane jako przeszkody.

Model wokselowy jest reprezentowany w pamięci komputera w postaci drzewa. Taka struktura daje możliwość określania relacji przestrzennych pomiędzy poszczególnymi elementami modelu oraz przeprowadzenie prostej analizy przestrzennej, ale częstymi problemami są: brak informacji semantycznej i niejednoznaczne granice pomiędzy funkcjonalnymi elementami modelu, co może eliminować taką reprezentację w bardziej wymagających zadaniach.

Ostatnim zagadnieniem poruszonym w artykule [C7] jest wizualizacja 3D z elementami modelowania kartograficznego stosowana w aplikacjach do reagowania w sytuacjach kryzysowych. Ta część została zredagowana przez pozostałych współautorów artykułu i nie będzie omawiana w niniejszym streszczeniu.

Podsumowanie

Osiągnięcie naukowe przedstawione w niniejszym cyklu zostało opisane ze szczegółami w siedmiu artykułach (C1-C7) opublikowanych w prestiżowych czasopismach i materiałach konferencyjnych o zasięgu międzynarodowym. Zostały one wybrane z około 50 artykułów opublikowanych przez autora w celu pokazania konsekwentnego rozwoju badań dotyczącego metod modelowania 3D wewnątrz budynków i analizy przestrzennej. Dzięki wysokiemu poziomowi rozwoju proponowanych rozwiązań, których znaczna część została opracowana

jako metody ogólnego przeznaczenia, mogą one być z powodzeniem zastosowane w innych dziedzinach inżynierjno-technicznych.

Kamieniami milowymi badań potwierdzającymi ich zaawansowanie są:

- implementacja złożonych modeli 3D budynków z wykorzystaniem topologicznej struktury danych DHE;
- automatyczna rekonstrukcja topologii budynku na podstawie geometrycznych własności modelu wyjściowego;
- nowa metoda tworzenia sieci nawigowalnej o zmiennej gęstości;
- metoda symulowania wpływu wieloogniskowych zagrożeń na poziom bezpieczeństwa w budynku wraz z wyznaczaniem optymalnych ścieżek w sytuacjach kryzysowych;
- agentowa symulacja ewakuacji do obliczania dynamicznych zagęszczeń osób ewakuowanych wykorzystanych do wyznaczania optymalnych ścieżek dla zespołów ratunkowych.

Prace opisane w artykułach C3-C7 były prowadzone w zespołach międzynarodowych, w których brali udział partnerzy z Polski, Wielkiej Brytanii, Kataru oraz Australii. Ich specjalizacja w dziedzinach geoinformatyki, architektury oraz matematyki przyczyniła się do interdyscyplinarnego charakteru badań.

Prowadzone badania habilitanta mają nie tylko wymiar naukowy, ale mogą być z łatwością stosowane w systemach komercyjnych. Jednym z ważniejszych osiągnięć była implementacja struktury danych DHE (opisanej w artykule C1) przez firmę telekomunikacyjną Orange we Francji. Na podstawie osobistej komunikacji stwierdzono, że jest to jedyna struktura danych, która była w stanie sprostać postawionemu problemowi, w którym głównymi zagadnieniami były aspekty topologiczne modelu i wydajne wykonywanie zapytań przestrzennych w analizie sygnału radiowego w przestrzeni miejskiej. Struktura DHE znalazła także zastosowanie w badaniach nad spójnością geometryczno-topologiczną modeli 3D budynków.

Jednym z większych przedsięwzięć był projekt CUBER realizowany we współpracy brytyjsko-katarskiej, gdzie analizowanym obiektem był Word Trade Center Doha. Budynek ten ma zaimplementowane podwyższone standardy bezpieczeństwa, a badania miały na celu m.in. opracowanie metody wyznaczania ścieżek ewakuacyjnych w sytuacjach kryzysowych.

Metody przedstawione w cyklu zyskały uznanie środowiska naukowego i są wymieniane w artykułach razem z innymi dominującymi metodami modelowania 3D budynków i nawigacji

w ich wnętrzach, co niewątpliwie przyczyniło się do rozwoju dyscypliny reprezentowanej przez habilitanta, tj. inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Literatura

Dobkin, D.P., Laszlo, M.J., 1987. Primitives for the manipulation of three-dimensional subdivisions, Proceedings of the third annual symposium on Computational geometry. ACM, Waterloo, Ontario, Canada.

Green, P.J., Sibson, R., 1978. Computing Dirichlet Tessellations in the Plane. The Computer Journal 21, 168-173.

Guibas, L., Stolfi, J., 1985. Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computation of Voronoi Diagrams. ACM Trans. Graph. 4, 74-123.

ISO 16739:2018, 2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries.

Krūminaitė, M., 2014. Space Subdivision for Indoor Navigation. Delft University of Technology, p. 101.

Ledoux, H., Gold, C.M., 2007. Simultaneous storage of primal and dual three-dimensional subdivisions. Computers, Environment and Urban Systems 31, 393-408.

Lee, J., 2007. A Three-Dimensional Navigable Data Model to Support Emergency Response in Microspatial Built-Environments. Annals of the Association of American Geographers 97, 512 - 529.

Lienhardt, P., 1991. Topological models for boundary representation: a comparison with n-dimensional generalized maps. Computer Aided Design 23, 59-82.

Liu, L., Zlatanova, S., 2011. A "door-to-door" path-finding approach for indoor navigation, Gi4DM 2011: GeoInformation for Disaster Management. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Antalya, Turkey.

Munkres, J., R., 1984. Elements of Algebraic Topology. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

OGC, 2012. City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Open Geospatial Consortium Inc.

Penninga, F., 2008. 3D topography : a simplicial complex-based solution in a spatial DBMS. Delft University of Technology, Delft, p. 192.

Stroud, I., 2006. Boundary Representation Modelling Techniques. Springer-Verlag, New York.

Weiler, K., 1988. The Radial Edge data structure: A topological representation for non-manifold geometric boundary modeling, in: Encarnacao, J., L., Wozny, M., J., McLaughlin, H., W. (Eds.), Geometric Modeling for CAD Applications. Elsevier Science (North-Holland), Amsterdam, pp. 3-36.

Inne osiągnięcia projektowe, technologiczne i konstrukcyjne

Do najważniejszych osiągnięć technologicznych habilitanta opracowanych przy współpracy z partnerem przemysłowym (firma SHH Sp. z o.o.), należy zaliczyć narzędzia informatyczne, które zostały opracowane w ramach dwóch projektów realizowanych finansowanych przez Wrocławskie Centrum Akademickie (program Mozart):

– **Opracowanie rozwiązania informatycznego wykorzystującego przestrzenny model miejski do analizy czasu nasłonecznienia budynków z wykorzystaniem modeli BIM**

Projekt realizowany był w latach 2019-2020. Opracowane rozwiązanie informatyczne służy do analizy przestrzennej modelu miejskiego reprezentowanego w formacie CityGML oraz budynków w postaci szczegółowych modeli BIM w formacie IFC. Pozwala ono na obliczenie nasłonecznienia wewnątrz budynków oraz wzajemnego zacienienia, które są wyznaczane dla określonych przedziałów czasowych. Dzięki przeprowadzonej analizie możliwe jest sprawdzenie zgodności z wytycznymi dotyczącymi nasłonecznienia pomieszczeń zawartymi w § 60 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Model wynikowy będący rezultatem przeprowadzonej analizy został zintegrowany z platformą Smart3DCity umożliwiającą wizualizację 3D danych geoprzestrzennych. Dodatkowo w przypadku wykorzystania wyników projektu przez jednostki odpowiedzialne za urbanistykę i architekturę, mieszkańcy będą mogli uzyskać dostęp do narzędzia wspierających podejmowanie decyzji podczas zakupu mieszkania (kryterium nasłonecznienia pomieszczeń). Możliwe będzie też usprawnienie procesu decyzyjnego wydawania zezwoleń budowlanych.

– **Bazodanowe narzędzie informatyczne do analizy 3D obszarów miejskich w kontekście podziemnej budowy geologicznej**

Projekt realizowany był w latach 2020-2022. Narzędzie zostało wykonane w technologii bazodanowej i służy do trójwymiarowej analizy obiektów naziemnych w połączeniu z podziemnymi strukturami geologicznymi. Takie połączenie jest istotne z punktu widzenia identyfikacji zagrożeń w przypadku planowanych i istniejących inwestycji budowlanych. Proponowane rozwiązanie może także stanowić wsparcie przy podejmowaniu decyzji przy tworzeniu miejscowego planu zagospodarowania terenu. Jego wdrożenie przez przedsiębiorcę w jednostkach samorządu lokalnego umożliwi wsparcie identyfikacji zagrożeń geologicznych na inwestycje budowlane oraz podejmowanie decyzji mających wpływ na bezpieczeństwo tych inwestycji, a tym samym bezpieczeństwo mieszkańców.

Wykaz pozostałych wybranych osiągnięć

	Web of Science	Scopus	Google Scholar
Liczba cytowań	208	366	623
Liczba cytowań (bez autocytowań)	184	323	-
h-index	8	11	15

Sumaryczne zestawienie dorobku naukowego

Publikacje naukowe w czasopismach z bazy JCR	12
Publikacje naukowe w czasopismach spoza bazy JCR	3
Rozdziały w książkach	12
Publikacje peer-review w materiałach konferencyjnych	21
Inne publikacje	7
Opracowania zbiorowe, książki pod redakcją	5
Wygłoszone referaty na konferencjach	19
Kierownictwo i udział w projektach badawczych	12
Projekty we współpracy z przedsiębiorcami	2
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	2
Sumaryczny IF	58,841
Sumaryczna liczba punktów MNiSW	1067

Sumaryczne zestawienie dorobku naukowego**(po uzyskaniu stopnia doktora)**

Publikacje naukowe w czasopismach z bazy JCR	11
Publikacje naukowe w czasopismach spoza bazy JCR	3
Rozdziały w książkach	9
Publikacje peer-review w materiałach konferencyjnych	17
Inne publikacje	1
Opracowania zbiorowe, książki pod redakcją	5
Wygłoszone referaty na konferencjach	10
Kierownictwo i udział w projektach badawczych	11
Projekty we współpracy z przedsiębiorcami	2
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	2
Sumaryczny IF	55,956
Sumaryczna liczba punktów MNiSW	1005

Szczegółowy opis powyższych osiągnięć znajduje się w załączniku 4a.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, w szczególności zagranicznej**University of Glamorgan (obecnie University of South Wales), Wielka Brytania, 2006-2011**

Kariera naukowa habilitanta związana z tematyką modelowania przestrzennego rozpoczęła się wraz projektem PhD w 2006 r. na University of Glamorgan. Projekt był finansowany przez Engineering and Physical Sciences Research Council i Ordnance Survey. W czasie trwania doktoratu rozpoczęte zostały prace nad metodami modelowania 3D i topologiczną strukturą danych DHE. Osiągnięte wyniki położyły podwaliny pod dalsze badania. Praktyczne umiejętności, uzyskane wcześniej w przedsiębiorstwach jako programista i menedżer projektów, przyczyniły się do osiągnięć naukowych uzyskanych podczas doktoratu i w późniejszej karierze akademickiej.

Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Malezja, 2011-2014

Badania związane ze strukturą danych DHE i jej zastosowaniami były kontynuowane na UTM na Wydziale Geoinformacji i Nieruchomości (ang. Faculty of Geoinformation and Real Estate), gdzie po uzyskaniu stopnia doktora habilitant był zatrudniony jako starszy wykładowca. Dużym sukcesem było samodzielne przygotowanie pięciu wniosków o granty naukowe i uzyskanie finansowania na wszystkie złożone projekty. Habilitant był kierownikiem pięciu projektów o całkowitym budżecie przekraczającym MYR 600 000 (520 000 zł). Należy tu zwrócić uwagę, że kwota ta nie zawiera kosztów pośrednich oraz dodatkowego wynagrodzenia kierownika projektu, które nie były pokrywane przez instytucje finansujące w Malezji. Uzyskane fundusze umożliwiły zakup niezbędnego sprzętu i stworzenie zespołu naukowego składającego się z postdoka, dwóch asystentów i czterech doktorantów. Prace były realizowane w ramach działalności grupy badawczej 3D GIS Research Lab prowadzonej przez Prof. Alias Abdul Rahman'a. Szczególnym osiągnięciem było otrzymanie brązowego medalu „Industrial Art and Technology Exhibition (INATEX 2013)” za potencjał komercjalizacyjny produktu będącego wynikiem prac badawczych: „Rapid Data Acquisition and 3D Model Reconstruction in Indoor Environment”.

Podczas pracy na UTM-ie habilitant brał aktywny udział w organizacji konferencji międzynarodowych: International Workshop on Geoinformation Advances (GeoAdvances 2012) oraz International Symposium and Exhibition on Geoinformation (ISG 2013). Był członkiem komitetu organizacyjnego i przewodniczącym komitetu naukowego. Do

obowiązków należało m.in. przeprowadzenie procesu recenzji oraz publikacja książek konferencyjnych. Wydane zostały cztery książki z nadanym numerem ISBN, w tym dwie z materiałami konferencyjnymi i dwie zawierające najlepsze artykuły konferencji wydane przez wydawnictwo Springer w ramach serii „Lecture Notes in Geoinformation and Cartography”. Zaangażowanie w podnoszenie jakości badań zostało docenione przez władze uczelni. W 2013 r. habilitant otrzymał nagrodę Citra Karisma. Jest to coroczna nagroda przyznawana za wybitne osiągnięcia, którą w 2013 r. otrzymało jedynie 10 spośród 150 pracowników akademickich i administracyjnych zatrudnionych na wydziale.

University of the West of England (UWE), Wielka Brytania, 2014-2017

Po skończonym kontrakcie w Malezji w 2014 r. habilitant podjął pracę na stanowisku badawczym na UWE w Bristolu. Prace badawcze były związane z projektem „CUBER – Critical Urban Buildings Emergency Response” finansowanym przez Qatar National Research Fund. Celem projektu było stworzenie prototypu systemu wspomagającego podejmowanie decyzji w sytuacjach kryzysowych w wysokich budynkach, co obejmowało stworzenie platformy do analizy przestrzennej wewnątrz budynków, analizy zagrożeń i łagodzenie ich skutków oraz opracowanie algorytmów do wyznaczania optymalnych ścieżek dla zespołów ratunkowych. Wysoko sparametryzowane algorytmy zostały opracowane, zaimplementowane i przetestowane w scenariuszach uwzględniających różne zagrożenia w budynkach. Wyniki badań zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach naukowych.

Politechnika Wrocławska (PWr), Polska, 2017-2020

Powrót do Polski w 2017 r. był związany z podjęciem pracy na Politechnice Wrocławskiej na stanowisku adiunkta. Do istotnych zadań badawczych należał udział w dwóch projektach badawczo-rozwojowych finansowanych przez NCBiR: „SekoZ: System ewaluacji usług ekosystemowych zieleni miejskiej” (2019-2020 r.) oraz „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych” (2018 r.). Zadania szczegółowe obejmowały w pierwszym przypadku opracowanie zoptymalizowanego numerycznego modelu terenu w oparciu o regularne i nieregularne struktury topologiczne z uwzględnieniem zmiennych parametrów określających wymaganą dokładność oraz liczbę klas wysokościowych uwzględnianą w generalizacji modelu. Natomiast w przypadku drugiego projektu, zadaniem szczegółowym była grafowa reprezentacja danych o wypadkach budowlanych, ich przyczynach i skutkach, z możliwością dynamicznej filtracji wyników za pomocą graficznego

interfejsu użytkownika oraz wyznaczanie ścieżki krytycznej reprezentującej najbardziej prawdopodobny scenariusz wypadkowy.

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu (UPWr), Polska, od 2020

Od 2020 r. habilitant jest związany z Uniwersytetem Przyrodniczym we Wrocławiu, gdzie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki oraz jest kierownikiem Zakładu Geoinformatyki. Uczestniczył w projektach badawczo-rozwojowych EPOS-PL i EPOS-PL+ dotyczących systemu obserwacji płyty europejskiej finansowanych ze środków UE (POIR 4.2) wraz z wkładem własnym przedsiębiorcy i konsorcjantów. Obecnie jest kierownikiem projektu badawczego NCN Opus: "Nowa wielowymiarowa struktura danych do zmiennie-skalowej reprezentacji modelu przestrzennego", 2021/41/B/ST10/03178, realizowanego w latach 2022-2025.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

Przeważająca większość stanowisk akademickich, na jakich był zatrudniony habilitant, była związana z pracą naukowo-badawczą, ale prowadził też zajęcia dydaktyczne związane z informatyką, m.in.: Programowanie dla studentów GIS, C++, Projektowanie aplikacji internetowych, Systemy ekspertowe, itp. Zajęcia były prowadzone w języku angielskim (na uczelniach za granicą) i w języku polskim. Był również opiekunem czterech doktorantów na UTM w Malezji, z których trzech uzyskało już tytuł PhD: dr Siddique Ullah Baig, dr Ali Jamali, i dr Wan Muhd Hairi. W Polsce był opiekunem 4 prac inżynierskich i 2 magisterskich obronionych na PWr. Obecnie jest opiekunem 2 prac magisterskich na UPWr. Doświadczenie dydaktyczne zdobyte zostało w różnych krajach w różnych systemach edukacyjnych: w Polsce, Wielkiej Brytanii i Malezji.

Pierwsze doświadczenie dydaktyczne jest datowane na 1999 r., kiedy to podczas studiów magisterskich na Politechnice Białostockiej habilitant otrzymał możliwość pracy jako asystent stażysta w Instytucie Informatyki. Pomagał studentom w laboratoriach związanych z przedmiotem Metody analizy chaosu deterministycznego. Po przerwie, podczas której pracował w sektorze przemysłowym jako programista i menedżer projektów, wrócił na uczelnię w 2004 r. Pracował jako asystent w Wyższej Szkole Finansów i Zarządzania w Elku na Wydziale Nauk Technicznych. Był odpowiedzialny za prowadzenie zajęć, przygotowanie materiałów dydaktycznych i ćwiczeń, jak również ocenianie pracy studentów w ramach

laboratoriów: Systemy ekspertowe, Programowanie w C++, Programowanie w Assemblerze, Systemy operacyjne, Podstawy informatyki.

Podczas doktoratu na University of Glamorgan w Wielkiej Brytanii, Faculty of Advanced Technology, habilitant prowadził laboratoria z przedmiotów: Projektowanie aplikacji internetowych, Systemy operacyjne oraz Technologie komputerowe i sieciowe.

Po skończeniu doktoratu i przeprowadzce do Malezji habilitant pracował jako starszy wykładowca na UTM, Faculty of Geoinformation and Real Estate. Stanowisko to było w 70% poświęcone badaniom naukowym, a w 30% dydaktyce. Na uczelni były wprowadzone wysokie standardy edukacyjne, które wymagały stosowania sformalizowanych zasad, takich jak Outcome Based Education oraz Taksonomii Blooma w ocenianiu studentów. Prowadził wykłady i laboratoria z zakresu programowania dla studentów geoinformatyki, w tym technologii HTML, XML, JavaScript, AJAX i GoogleMaps API. Był odpowiedzialny za przygotowanie sylabusów, materiałów dydaktycznych i ocenę pracy studentów. Oprócz prowadzenia zajęć był głównym opiekunem i opiekunem pomocniczym czterech doktorantów (trzech z nich obroniło się w 2014, 2017 i 2022 r.).

Po skończonym kontrakcie w Malezji habilitant wyjechał do Wielkiej Brytanii, gdzie zatrudniony był na stanowisku naukowo-badawczym na UWE, Faculty of Environment and Technology. Dzięki doświadczeniu badawczemu przydzielono mu grupę studentów w ramach przedmiotu Strategie badawcze i projektowe. Zadaniem było przygotowanie uczestników kursu do pisania wniosków projektowych. Podczas pracy ze studentami habilitant obserwował ich postępy i udzielał wskazówek, co pomogło poprawić im umiejętność pisania prac naukowych. Na podstawie bardzo dobrych opinii studentów, można uznać, że habilitantowi udało się osiągnąć sukces w pracy dydaktycznej.

Po powrocie do Polski habilitant został zatrudniony na stanowisku adiunkta i był odpowiedzialny za szereg przedmiotów informatycznych skierowanych do studentów geoinformatyki PWr i UPWr, np. Technologie informacyjne, Zaawansowane technologie informatyczne, Informatyka I i II, Technologie internetowe i Modelowanie przestrzenne.

Do osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę należy też zaliczyć organizację **Szkoły Letniej ISPRS** pt. „Geospatial technologies for natural environment management and monitoring”, która odbyła się w dniach 26-30 sierpnia 2019 r. na PWr. Habilitant był inicjatorem i przewodniczącym tego przedsięwzięcia adresowanego do studentów i młodych naukowców z kraju i zagranicy. W Szkole Letniej uczestniczyli studenci,

młodzi naukowcy i wykładowcy z całego świata, w tym: Polski, Niemiec, Wielkiej Brytanii, Stanów Zjednoczonych Ameryki, Egiptu i Turcji. W ramach Szkoły odbyła się konferencja młodych naukowców, na której zaprezentowane zostały artykuły opublikowane w Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji.

Już od dwóch lat habilitant jest jurorem na UPWr w konkursie prac dyplomowych Engineer 4 Science pod patronatem IEEE. Był również opiekunem studenta podczas trzymiesięcznego stażu wakacyjnego, którego tematem było "Ulepszenie modelu obliczeniowego georeferencji dla map deformacji DInSAR". Stażysta zapoznał się ze specyfiką pracy w projektach badawczych i uzyskał obiecujące wyniki. Dzięki temu został on zatrudniony w projekcie badawczym EPOS-PL+, gdzie kontynuuje swoje badania nad metodą predykcji osiadania terenu na terenach górniczych.

7. Inne informacje, ważne z punktu widzenia kariery zawodowej

Habilitant jest autorem przeszło 50 artykułów naukowych publikowanych w wysoko ocenianych czasopismach i materiałach konferencyjnych. Jeden z artykułów „Modelling and Analysing 3D Buildings with a Primal/Dual Data Structure” opublikowany w ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing został uznany za **najlepszy artykuł roku 2011**. Był on jednocześnie jednym z czterech kandydatów do nagrody ISPRS UV Helava Award.

Badania nad strukturami danych i modelowaniem przestrzennym są prowadzone w projekcie **NCN Opus 2021/41/B/ST10/03178 pt. „Nowa wielowymiarowa struktura danych do zmienna-skalowej reprezentacji modelu przestrzennego”** realizowanym w latach 2022-2025. Celem jest opracowanie czterowymiarowej struktury danych umożliwiającej implementację modelu 3D reprezentowanego w różnej skali szczegółowości w spójnym modelu przestrzennym, gdzie poszczególne elementy modelu są mapowane pomiędzy poziomami szczegółowości w czwartym wymiarze przestrzennym. Habilitant jest autorem wniosku oraz kierownikiem projektu.

Działalność naukowa nie jest ograniczona do projektów i publikacji. Habilitant jest zaangażowany w prace różnych organizacji, a także współpracuje z wieloma zespołami redakcyjnymi czasopism i organizatorami konferencji międzynarodowych. Od 2008 r. aktywnie uczestniczy w pracach **International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)**. Obecnie jest **współprzewodniczącym grupy roboczej ISPRS Working Group IV/1 ‘Spatial Data Representation and Interoperability’**. Celem grupy jest promocja badań związanych z reprezentacją danych przestrzennych, ich standaryzacją i

interoperacyjnością. Członkowie grupy są odpowiedzialni za organizację konferencji mających na celu wymianę doświadczeń i najnowszych osiągnięć w ramach dziedziny zainteresowania. Organizowanych jest wiele cyklicznych imprez, na przykład: 3D Geoinfo, International Workshop on Geoinformation Advances (GeoAdvances), International Symposium and Exhibition on Geoinformation (ISG), Land Administration Domain Model Workshop (LADM), and International Symposium on Spatial Data Quality.

W latach 2013-2020 habilitant był **członkiem jury konkursu UV Helava Award**, w którym nagroda przyznawana jest co cztery lata autorom artykułu wybranego spośród czterech najlepszych publikacji w czasopiśmie ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing wyselekcjonowanych przez jury każdego roku. Jury składa się z pięciu członków o wysokiej pozycji naukowej, których ekspertyza obejmuje tematykę czasopisma.

Wspomniane czasopismo ISPRS nie jest jedynym, z którym została nawiązana współpraca. Habilitant jestem **członkiem recenzenckiego komitetu redakcyjnego czasopisma International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM)**. Był także **współredaktorem wydania specjalnego ISPRS International Journal of Geo-Information „Multidimensional and Multiscale GIS”** oraz **redaktorem zeszytu vol. 31 Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji**. Jest również zapraszany do **komitetów naukowych międzynarodowych konferencji** (około 20 konferencji) i jako **recenzent artykułów w czasopismach naukowych** (około 20 artykułów).

Szczegółowa lista publikacji, wystąpień konferencyjnych, projektów naukowych i innych osiągnięć znajduje się w załączniku 4a.

.....

(podpis wnioskodawcy)