Silesian University of Technology

DOCTORAL DISSERTATION

in the discipline: Civil Engineering, Geodesy, and Transport

Digital twins of bridges: establishing principles of virtualization with practical use cases

Poszerzone streszczenie (PL)

author:

Kamil Korus

supervisor:

Professor Marek Salamak PhD, DSc

additional supervisor:

Jan Winkler PhD

March 2023

Gliwice, Poland

Cyfrowe bliźniaki mostów: utworzenie podstaw wirtualizacji z praktycznymi sposobami użytkowania

1 Motywacje

1.2 Adaptuj się (lub kreuj) by efektywnie funkcjonować

Świat nieustannie się zmienia. To stwierdzenie – jakkolwiek trywialne – stało się też powodem do nowej aktywności inżynierów, która dotyczy pojęcia cyfrowych bliźniaków (ang. digital twins). Ale to stwierdzenie może być jeszcze mocniej zaakcentowane. Otóż, świat nieustannie się zmienia w ciągle rosnącym tempie. Walidacja tej tezy jest szczególnie widoczna w ostatniej dekadzie, która przez wielu nazywana jest czwartą rewolucją przemysłową. Wpisuje się też w trendy obserwowanej i osobiście przez nas doświadczanej transformacji cyfrowej z postępującą wirtualizacją kolejnych obszarów naszego życia. Cyfrowa transformacja stanowi główny element strategii rozwoju opisywanej w świecie jako Industry 4.0 (Przemysł 4.0).

Wszelkie zmiany dzielą ludzi na entuzjastów oraz przeciwników tych procesów. I to nie tylko w kontekście zmieniających się standardów moralnych i norm obyczajowych, ale też technologicznych innowacji, które wpływają na sposób naszego życia. Podczas rewolucji przemysłowych, ludzie postrzegali nadchodzącą automatyzację bardzo odmiennie. Niektórzy byli podekscytowani poprawą jakości życia, inni bali się utraty pracy i potrzeby odnalezienia się w nowych realiach. Dzisiaj jednak już wiemy, że grupy, które wykorzystały możliwości płynące z tamtych innowacji, nadały kształt naszej dzisiejszej rzeczywistości.

Trwająca obecnie transformacja cyfrowa niewątpliwie niesie ze sobą wiele zmian. Rzeczywistość jest coraz mocniej wirtualizowana. Ludzie są nieustannie podłączeni do sieci, produkując przy tym coraz większe ilości wnikliwie analizowanych danych. Sztuczna inteligencja przejmuje zadania zarezerwowane wcześniej tylko dla ludzi. Te zmiany budzą podekscytowanie i lęk. Oba te odczucia są oczywiście zasadne. Niemniej jednak, zgodnie z maksymą "musisz się rozwijać, żeby nie stać w miejscu", pojedynczy ludzie i społeczeństwa, biznes i całe sektory przemysłu, wspólnoty narodowe i globalne korporacje, niezależnie od swojego indywidualnego nastawienia, muszą być przygotowani na zmiany wynikające z powszechnej cyfryzacji życia.

Zestawiając tradycyjne słowa, jak *most* czy *filar* z takimi hasłami, jak *sztuczna inteligencja* lub *wirtualna rzeczywistość*, mosty wydają się być technologicznym reliktem zamierzchłych czasów. Niemal zabytkiem. Myśląc o mostach, wyobrażamy sobie przecież raczej monumentalne i statyczne konstrukcje, które powinny posiadać techniczną sprawność przez wiele dziesiątków lat. I to bez kosztownych ingerencji. Ale czy na pewno tak jest? Nie do końca. Niestety, mosty są cały czas narażone na destrukcyjne oddziaływanie środowiska i pojazdów. Ta stopniowa i powolna degradacja stanu technicznego jest często nawet niewidoczna dla użytkowników. Natomiast dostrzec ją mogą zarządcy i terenowi inspektorzy, którzy wykonują na nich cykliczne oceny stanu technicznego. Dlatego konstrukcje mostowe powinny być przez nich odpowiednio utrzymywane i monitorowane. Co więcej, mosty jako najbardziej wymagające

i odpowiedzialne konstrukcje budowlane, od zawsze stanowią obszary poszukiwania innowacji w inżynierii lądowej. To tu najczęściej stosowane są nowe materiały budowlane, rozwiązania konstrukcyjne, uprzemysłowione metody budowy i złożone elementy wyposażenia. Zbierane w inżynierii mostowej doświadczenia przenoszone są później do innych sektorów budownictwa. Wymagania współczesnego świata pchają inżynierów mostowych w kierunku poszukiwania innowacji. Wynika to choćby z konieczności adaptacji do zasad zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska oraz spełnienia potrzeb rosnącej i starzejącej się populacji.

Aby efektywnie funkcjonować, konieczna jest adaptacja do zmian, jakie serwuje nam otoczenie. Również w kontekście technologicznym. Ale adaptowanie nie oznacza pasywnego i bezkrytycznego naśladowania. Może to oznaczać również kreowanie. W cyfrowym świecie, sektory gospodarki są coraz mocniej połączone i interdyscyplinarne. Ta kooperacja wymaga nowych zasad i paradygmatów. Cyfrowe bliźniaki, które postrzegane są jako kluczowy składnik strategii Przemysł 4.0, stają się właśnie takim interdyscyplinarnym paradygmatem. Cyfrowe bliźniaki w wielu dziedzinach są już wykorzystywane, ale ich definicje i praktyki są wciąż formowane. Powinni w tym brać udział nie tylko programiści i automatycy, ale w przypadku mostów również środowisko inżynierów lądowych. W ten sposób będą mieli swój udział w formowaniu zasad globalnej cyfryzacji dla branży budowlanej, a cyfrowe bliźniaki mostów będą lepiej odpowiadać na potrzeby zarządców i właścicieli infrastruktury.

1.2 Łączniki ludzi i danych

Oddziaływanie mostów widoczne jest zarówno w codziennym życiu jednostek, jak i w skali całych państw i gospodarek, co można przecież wyrazić liczbami. Tylko w Stanach Zjednoczonych użytkowanych jest ponad 600 tys. mostów [2], z których aż 220 tys. wymaga znacznych prac remontowych lub w skrajnych przypadkach nawet wymiany. Ten problem staje się jeszcze bardziej złożony, jeśli weźmie się pod uwagę czynnik ekonomiczny. Szacowany koszt napraw lub wymiany wspomnianych mostów to 260 miliardów dolarów. Jest to wartość porównywalna z PKB Czech (282 mld USD), Nowej Zelandii (250 mld USD) czy Portugalii (250 mld USD). Dla porównania, PKB Polski to 674 mld USD (dane Banku Światowego na rok 2022).

Ogromna liczba i złożoność mostów wymusiły potrzebę poprawy efektywności gospodarowania tymi wciąż rosnącymi, a jednocześnie starzejącymi się zasobami. To poskutkowało opracowaniem dedykowanych systemów zarządzania mostami (ang. bridge management system) i standaryzacją w zakresie realizowanych procedur utrzymaniowych, ale również procesów przetwarzania gromadzonych przy tej okazji informacji. A te dziś muszą już być dopasowane do aktualnych możliwości technicznych, jakie niesie ze sobą transformacja cyfrowa. Niestety, zarządcy infrastruktury wciąż jeszcze wykorzystują starsze tradycyjne metody zarządzania swoimi zasobami. Jest to szczególnie widoczne w odniesieniu do nieefektywnego przetwarzania danych. Okresowe oceny stanu technicznego mostów dalej wykonuje się tradycyjnymi metodami wizualnymi, w których terenowy inspektor mostowy ręcznie wypełnia papierowy formularz. Proces jest nieefektywny i obarczony subiektywizmem. Istnieje ryzyko przeoczenia lub

pominięcia defektów, a to w przypadku starzejącej się infrastruktury, może skutkować stratami ekonomicznymi, a nawet awariami.

Cyfrowa transformacja sprawia, że obiekty mostowe powoli ewoluują ze statycznych konstrukcji w systemy zapewniające wielowymiarowe relacje. Proces ten można właściwie nazwać cybernetyzacją, w którym te dotychczas techniczne obiekty będą stawać się obiektami coraz bardziej cyber-fizycznymi. Będą to inteligentne obiekty działające zgodnie z założeniami Internetu rzeczy (Internet of Things, IoT). Wynikać to będzie z potrzeb ich właścicieli i zarządców, ale też bezpieczeństwa i komfortu fizycznych użytkowników. A to będzie wymuszało łączność i integrację już w wymiarze wirtualnym. Głównie w zakresie gromadzenia, przetwarzania i udostępniania danych. Mosty będą współpracować z innymi obiektami tak, by umożliwić holistyczne zarządzanie i formować w przyszłości cyfrowe sieci inteligentnych miast (ang. smart city). Aby było to możliwe, potrzebny jest globalny paradygmat cyfrowej współpracy. Takie możliwości kryje w sobie koncept cyfrowych bliźniaków.

1.3 Cele i założenia rozprawy

Zasadniczym celem rozprawy było zdefiniowanie podstaw tworzenia cyfrowych bliźniaków mostów i wskazanie sposobów ich wykorzystywania. Wpisuje się to w ogólne trendy wirtualizacji fizycznych obiektów i procesów w ramach trwającej cyfrowej transformacji. Cyfrowe bliźniaki rozumiane są tutaj jako wirtualne odwzorowania realnych obiektów w ich całym cyklu życia. Zaproponowany w pracy szablon tych wirtualnych modeli uwzględnia ogólne zasady idei cyfrowych bliźniaków, które są już od pewnego czasu stosowane w inżynierii. Zostały one jednak rozwinięte o specyfikę obiektów mostowych i warunki funkcjonowania w obszarze inżynierii lądowej. Praktyczność zaproponowanych rozwiązań została uzasadniona konkretnymi przypadkami użycia, które wykorzystują techniki zidentyfikowane jako komponenty proponowanego szablonu cyfrowych bliźniaków. Osiągnięcie tego zasadniczego celu rozprawy było możliwe przez realizację kilku poniższych celów pośrednich.

- Ocena aktualnego stanu rozwoju cyfrowych bliźniaków w innych dziedzinach poprzez studium dostępnej literatury oraz sprawdzenie przypadków implementacji w obszarze mostownictwa.
- Identyfikacja najważniejszych technik, które mogą być wykorzystane do tworzenia oraz użytkowania cyfrowych bliźniaków mostów.
- Opracowanie poszerzonej definicji cyfrowych bliźniaków mostów z ich zasadniczymi cechami i z uwzględnieniem faz cyklu życia.
- Przeprowadzenie praktycznej integracji modeli BIM i MES w środowisku programowania graficznego na potrzeby tworzenia cyfrowego bliźniaka w fazie projektowej, ale przy ograniczonym zakresie i z wykorzystaniem algorytmu optymalizacyjnego do automatyzacji procesu projektowania.
- Propozycja metody generowania syntetycznych chmur punktów w celu tworzenia i aktualizacji modeli geometrycznych cyfrowych bliźniaków w fazie operacyjnej z użyciem algorytmów uczenia maszynowego.

Zestawione powyżej cele pośrednie z pewnością nie wypełniają wszystkich definiowanych dziś w literaturze założeń, jakimi powinny cechować się ogólnie rozumiane cyfrowe bliźniaki. Jednak pracując nad opisem cyfrowych bliźniaków mostów wzięto pod uwagę początkowy etap rozwoju tego konceptu, który w przyszłości integrować przecież będzie wiedzę i rozwiązania stosowane w wielu dyscyplinach. Takie podejście umożliwia więc realizację procesu wdrażania w sposób ewolucyjny. Cyfrowe bliźniaki nie muszą przecież być kompletne i perfekcyjne od samego początku. Koncepcja ta powinna dojrzewać w naturalny sposób, zachęcając użytkowników korzyściami, jakie wynikają z ich stosowania. Nie bez znaczenia są także ograniczenia niniejszej pracy wynikające z czasu jej wykonywania i samej objętości. Zaproponowany opis cech cyfrowych bliźniaków wskazuje więc ogólne pryncypia, a nie szczegóły technicznych implementacji. Natomiast zawarte w pracy przykłady tworzenia i użytkowania nawet niekompletnego cyfrowego bliźniaka mają jedynie pokazać potencjalne możliwości takiego podejścia. Wykorzystane w przykładach technologie i rozwiązania dotyczą określonych potrzeb fazy projektowej (automatyzacja i optymalizacja procesu projektowego) oraz najdłuższej fazy operacyjnej (zmiany geometrii obiektu w trakcie długotrwałego użytkowania). Przykład z generowaniem syntetycznych chmur punktów nie omawia pełnego procesu tworzenia i aktualizacji geometrii modeli cyfrowych bliźniaków. Na tym początkowym etapie skupia się on na pierwszym, nieodzownym kroku do implementacji takich rozwiązań, jakim jest pozyskiwanie danych do trenowania algorytmów uczenia maszynowego. W dalszych pracach wytrenowane algorytmy będą mogły być wykorzystane przy implementacji cyfrowych bliźniaków mostów w powiązaniu z ich rzeczywistymi odpowiednikami. A w szczególności obiektami mostowymi, które podlegają wpływom deformacji terenu i narażone są na niebezpieczne zmiany geometrii.

2 Cyfrowy bliźniak jako kolejny etap rozwoju procesów symulacji

Cyfrowy bliźniak to wirtualne odwzorowanie obiektu w całym cyklu jego życia. Podejście takie początkowo stosowane było przez NASA [3] na potrzeby księżycowego programu Apollo, a dziś wykorzystywane jest w wielu obszarach, stając się elementem cyfrowej transformacji.

Cyfrowy bliźniak, jako model współistniejący z rzeczywistym obiektem, powinien zostać utworzony już podczas pierwszej fazy projektowania fizycznego obiektu. W tych początkowych etapach, które wynikają głównie z faktu użycia do zarządzania informacją o obiekcie budowlanym zasad metodyki BIM, cyfrowy bliźniak wirtualnie odzwierciedla formującą się koncepcję fizycznego obiektu. Wraz z rozwojem projektu, staje się on modelem informacyjnym z centralną bazą wiedzy o stosunkowo wysokim poziomie szczegółowości. Następnie odgrywa ważną rolę w planowaniu i optymalizacji fazy wykonawczej, podczas której uwzględniane są realizowane w terenie procesy budowlane. Wykorzystywanie modeli do symulacji i wizualizacji podczas projektowania i wykonawstwa jest coraz częstszą praktyką. Jednak paradygmat cyfrowych bliźniaków zakłada korzystanie z wirtualnych modeli w całym cyklu życia fizycznego obiektu. Dzięki synchronizacji z fizycznym odpowiednikiem także w fazie użytkowania, cyfrowy bliźniak przekracza możliwości izolowanych dotąd modeli, jakie tworzył projektant. Obiekt i jego wirtualny odpowiednik zaczynają współistnieć wymieniając się między sobą informacjami. Dane z fizycznego obiektu zasilają wirtualny model, a ten może wpływać na działanie fizycznego obiektu.

Cyfrowy bliźniak gromadzi dane, służące odwzorowaniu procesów zachodzących w obiekcie fizycznym. Rejestrowany jest sposób w jaki obiekt reaguje na zmieniające się warunki oraz jak te reakcje zmieniają się w czasie. Analizy takiego złożonego i obszernego zbioru danych pozwalają lepiej zrozumieć działanie samego obiektu. Dane pozwalają również trenować inteligentne algorytmy do rozpoznawania wzorców (ang. pattern recognition) i anomalii (ang. anomaly detection). Możliwa jest sukcesywna transformacja cyfrowego bliźniaka w system o coraz większej autonomii w zakresie podejmowania decyzji i przewidywania ich następstw. Cyfrowy model odzwierciedlający rzeczywisty aktualny stan obiektu pozwala na prowadzenie kompleksowych i wiarygodnych symulacji. Jednolite systemy danych umożliwiają holistyczne zarządzanie uwzględniające współoddziaływanie obiektów. Dzięki temu możliwa jest optymalizacja kosztów ekonomicznych, ekologicznych czy społecznych i to bez utraty poziomu bezpieczeństwa tych obiektów.

Zainteresowanie cyfrowymi bliźniakami wzrasta zarówno w środowiskach akademickich, co widoczne jest w dynamicznym wzroście publikacji na ten temat, ale też w zastosowaniach przemysłowych. Wciąż jednak są to głównie aktywności badawcze. Z jednej strony tworzone są teoretyczne podstawy, szablony i definicje cyfrowych bliźniaków, a z drugiej wprowadzane są już praktyczne sposoby ich użytkowania. Oba te aspekty zostały opisane w niniejszej rozprawie.

3 Idea cyfrowego bliźniaka mostu

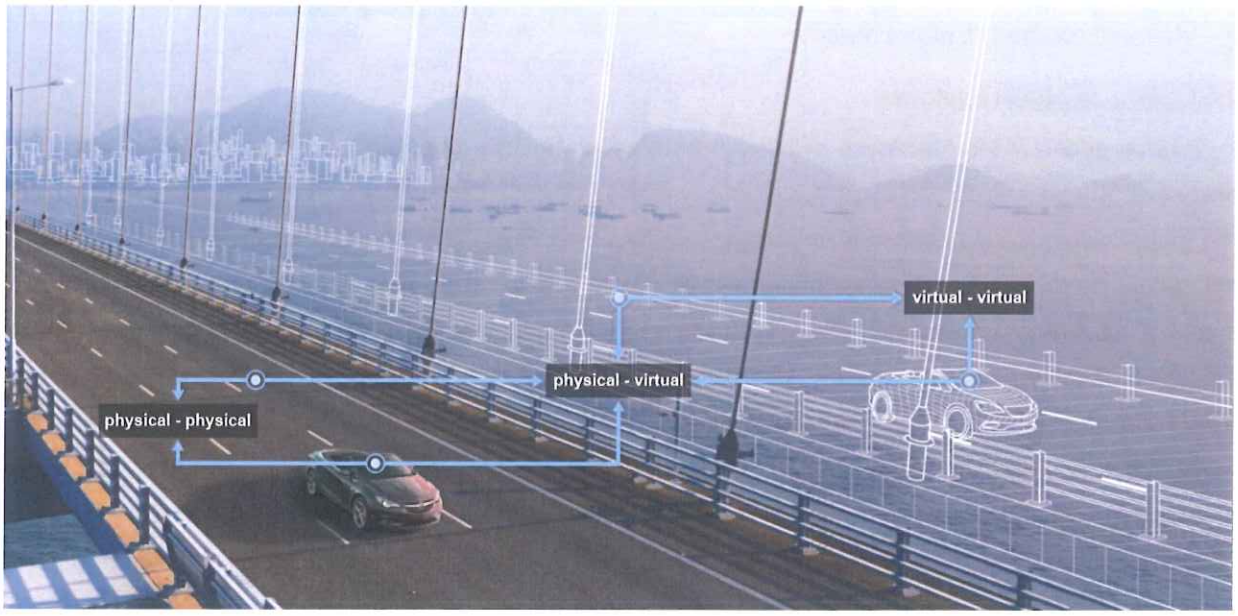
3.1 Ogólne założenia i potrzeby

Tworzenie podstaw teoretycznych cyfrowych bliźniaków mostów musi być zapoczątkowane pewną, być może nawet, wyidealizowaną wizją. Ale równie ważne są czynniki pozwalające wdrożyć tę wizję w praktyce. Nie mają bowiem sensu działania zmierzające do formowania samych wyidealizowanych koncepcji, które nie nadają się do praktycznego wdrożenia. Aby cyfrowe bliźniaki mogły się dalej rozwijać, takie podejście musi być zaakceptowane przez stosujących je praktyków branży budowlanej. Do tej grupy użytkowników zaliczyć można na pewno inżynierów, którzy na kolejnych etapach cyklu życia obiektu budowlanego pełnią różnorodne funkcje, czyli np. przedstawiciele projektantów, wykonawców, zarządców. Z pewnością nie mogą to być jedynie środowiska akademickie czy osoby z branży IT. Nawet jeśli to oni właśnie odpowiadają za zasady tworzenia wirtualnego modelu. Szablon cyfrowych bliźniaków powinien więc służyć osiągnięciu praktycznych korzyści dla wszystkich interesariuszy, a nie utrudniać i ograniczać ich działania poprzez konieczność stosowania wyidealizowanych zasad i modeli.

Pierwsze praktyczne próby wdrażania cyfrowych bliźniaków wykorzystują współczesne techniki i podejścia stosowane już inżynierii lądowej (np. MES, SHM, BIM, rekonstrukcja 3D itd.). Do ich integracji i wzbogacenia coraz częściej wykorzystywane są algorytmy sztucznej inteligencji. Próby te są jednak wciąż częściowe. Nie wprowadzają kompleksowych cyfrowych bliźniaków, a jedynie uwzględniają poszczególne funkcjonalności. Mogą to być na przykład wyizolowane modele geometrii 3D (i to nawet z elementami semantyki w opisie komponentów) lub gromadzenie danych z systemów monitoringu typu SHM. Niemniej

jednak, te działania promując automatyzację i cyfryzację w inżynierii lądowej, stawiają fundamenty pod przyszłość cyfrowych bliźniaków. Również obiektów mostowych.

Rozprawa proponuje pryncypia w zakresie tworzenia i wykorzystywania cyfrowych bliźniaków mostów (Rys. 1). Uwzględnia generalne zasady tej idei, ale też specyfikę inżynierii lądowej i doświadczenia inżynierów. Proponowany cyfrowy bliźniak jest zatem wirtualnym odzwierciedleniem obiektu mostowego w całym jego cyklu życia. Jest scharakteryzowany przez swoją aktualność, swoistą inteligencję i autonomiczność, interaktywność i interoperacyjność, modułowość i rozszerzalność, skalowalność i dostępność oraz bezpieczeństwo i unikatowość. Z perspektywy technologicznej jest on ewolucją już dziś stosowanych technologii, rozwiązań i metod, które jeszcze nie zostały w wystarczający sposób zintegrowane. Proponowany cyfrowy bliźniak wykorzystuje bowiem takie elementy, jak BIM (Building Information Modeling), SHM (Structural Health Monitoring) oraz AI (Artificial Inteligence). Przyjmuje standard IFC (Industry Foundation Classes) jako bazę dla modelu centralnego. Jest też wzbogacony przez dodatkowe techniki (np. programowanie graficzne, chmury punktów). Takie podejście umożliwia realizację procesu wdrażania w sposób ewolucyjny. Cyfrowe bliźniaki nie muszą przecież być perfekcyjne od samego początku. Koncepcja ta powinna dojrzewać w naturalny sposób, zachęcając użytkowników korzyściami, jakie wynikają z ich stosowania.



Rys. 1. Wizja cyfrowego bliźniaka mostu

3.2 Techniki stosowane w cyfrowych bliźniakach w inżynierii lądowej

Ten rozdział zestawia techniki i podejścia, które zidentyfikowane zostały jako kluczowe przy tworzeniu i wykorzystywaniu cyfrowych bliźniaków obiektów w inżynierii lądowej. Techniki te to:

- Building Information Modeling (BIM), czyli modelowanie informacji o obiekcie budowlanym;
- Industry Foundation Classes (IFC), czyli otwarty standard opisu obiektu budowlanego;
- Structural Health Monitoring (SHM), czyli monitorowanie stanu technicznego konstrukcji;

- Artificial Intelligence (AI), czyli sztuczna inteligencja;
- Visual Programming (VP), czyli programowanie graficzne;
- Point clouds, czyli chmury punktów.

Autorzy opisujący implementacje cyfrowych bliźniaków często nadużywają tego pojęcia. Jest to zrozumiałe w sytuacji, gdy nie zostało ono jeszcze w pełni zdefiniowane. Autorzy często używają tylko jednej z wymienionych technik lub metod, nazywając utworzony system kompletnym cyfrowym bliźniakiem. Wydaje się to jednak nie w pełni poprawne. Techniki te mogą być komponentami paradygmatu cyfrowych bliźniaków, ale jedynie ich świadome i interoperacyjne połączenie umożliwia kompleksowe wdrożenie takiej wizji. Model BIM lub system monitoringu SHM to jeszcze nie jest cyfrowy bliźniak. W tym rozdziale omówione zostały różnice pomiędzy tymi technikami i sposoby ich użycia przy tworzeniu i wykorzystywaniu cyfrowych bliźniaków mostów.

3.3 & 3.4 Studium cyfrowych bliźniaków mostów

Studium cyfrowych bliźniaków mostów odnosi się do technik i metod, jakie już dziś są stosowane w projektowaniu, budowie i utrzymaniu obiektów mostowych. Ich integracja oraz coraz większy stopień ich cyfryzacji i automatyzacji prowadzą do utworzenia nowej i rozszerzonej koncepcji cyfrowego bliźniaka mostu. Towarzyszą też temu pewne przemyślenia, które obejmują poniższe stwierdzania lub założenia.

- Wdrożenie cyfrowych bliźniaków jest owocne zarówno z perspektywy technicznej, jak i biznesowej.
- Szablony cyfrowych bliźniaków powinny być dedykowane konkretnym typom obiektów, również obiektów mostowych.
- Nie zawsze jest potrzebna bardzo wysoka wierność odwzorowania geometrii czy wszystkich właściwości konstrukcji.
- Synchronizacja danych pomiędzy obiektem fizycznym i wirtualnym nie zawsze musi odbywać się w czasie rzeczywistym.
- System cyfrowego bliźniaka powinien zostać zaprojektowany tak, by uwzględniać różnego rodzaju dane.
- Cyfrowy bliźniak wyposażony jest w dedykowane interfejsy użytkowników, które zależne są od etapu życia, w jakim znajduje się fizyczny obiekt i fazy rozwoju jego wirtualnego odpowiednika.
- Cyfrowy bliźniak zawiera dane pozwalające na analizę i symulowanie procesów, jakie zachodzą w rzeczywistym obiekcie.
- Cyfrowy bliźniak jest inteligentny i wraz z rozwojem zyskuje coraz większą autonomię.
- Cyfrowy bliźniak jest systemem systemów (systemem modeli i modułów), a nie pojedynczym modelem.
- Cyfrowe bliźniaki otwierają nowe możliwości empirycznego poznawania natury fizycznych obiektów.

- Cyfrowe bliźniaki powinny dostarczać właścicielom i użytkownikom realnych i wymiernych korzyści.

Studium omawia charakterystyczne cechy cyfrowych bliźniaków mostów, na które składają się między innymi:

- aktualność odwzorowania obiektu z odpowiednim poziomem szczegółowość i synchronizacji,
- inteligencję i autonomiczność podejmowania decyzji,
- interaktywność,
- interoperacyjność,
- modułowość,
- rozszerzalność i skalowalność,
- dostępność i bezpieczeństwo,
- unikatowość.

Opisane charakterystyki są ze sobą powiązane. Aktualność odwzorowania, inteligencja i autonomiczność oraz interaktywność to fundamenty idei cyfrowych bliźniaków. Interaktywność, czyli współpraca z innymi obiektami w cyfrowym wymiarze, jest możliwa przez interoperacyjność, czyli kompatybilność z ogólnymi zasadami i standardami wymiany danych. Modułowość umożliwia praktyczną implementację, gdyż nie wszystkie funkcjonalności cyfrowego bliźniaka muszą być implementowane od samego początku. Rozszerzalność i skalowalność to efekty implementacji poprzednich charakterystyk. Na przykład, modularność pozwala na implementację nowych modeli i funkcjonalności, które potem mogą podlegać skalowaniu w zakresie rozmiarów modelowanych obiektów i ilości przetwarzanych danych. Dwie kolejne powiązane cechy to dostępność dla użytkowników lub cyberfizycznych obiektów, ale przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa danych. Natomiast unikatowość sprawia, że utworzony cyfrowy bliźniak staje się osobnym cyberfizycznym bytem z unikalnym systemem identyfikacji i dostępu.

3.5 Potrzeba praktycznych sposobów tworzenia i użytkowania cyfrowych bliźniaków

Cyfrowe bliźniaki mostów to wciąż jeszcze słabo rozwinięta technologia, która wymaga szeroko zakrojonych badań. Pierwszym krokiem jest konceptualizacja zasad ich tworzenia i użytkowania. Jednak aby rozwój idei cyfrowych bliźniaków był możliwy, musi ona dostarczać nie tylko teoretycznych zasad, ale też praktycznych sposobów użytkowania, które zapewnią realne korzyści inżynierom.

Rozprawa omawia dwa zaproponowane przez autora praktyczne sposoby takiego użytkowania wykorzystujące techniki wskazane jako podstawowe komponenty cyfrowych bliźniaków. Sposoby te dotyczą różnych faz cyklu życia. Optymalizacja z wykorzystaniem programowania graficznego i algorytmu genetycznego automatyzuje głównie początkową fazę projektową [183]. Programowanie graficzne zostało tu wzbogacone funkcjonalnościami MES, tworząc jednolite środowisko optymalizacji geometrycznej oraz integracji z modelami BIM. Automatyzujące optymalizację algorytmy pozwalają na analizę zdecydowanie większej liczby wariantów niż w tradycyjnym sposobie projektowania. Z kolei integracja modeli BIM i MES jest kluczowa dla w pełni funkcjonalnego cyfrowego bliźniaka mostu.

Kolejny zaproponowany przez autora sposób użytkowania, to wykorzystanie chmur punktów do modelowania aktualnej geometrii obiektu, co może być wykorzystane przy ocenie zmian geometrycznych wpływających na bezpieczeństwo konstrukcji. Na przykład przemieszczenia łożysk i urządzeń dylatacyjnych, wychylenia filarów, deformacji przęseł itp. Chmury punktów mogą być bazą do modelowania aktualnej geometrii obiektu i to nie tylko podczas jego użytkowania, ale też w trakcie wznoszenia. W celu automatyzacji procesu pozyskiwania wartościowych informacji z chmur punktów, a nawet prób automatycznego generowania modeli, wykorzystywane są często algorytmy uczenia maszynowego. Niestety, dostępne zbiory chmur punktów nie pozwalają na efektywne trenowanie takich algorytmów. Alternatywą mogą być sztucznie wygenerowane dane w postaci syntetycznych chmur punktów. Taka metoda została zaproponowana w pracy i zwalidowana na przykładzie filara rzeczywistego obiektu mostowego.

Uzyskanie danych do treningu algorytmów to pierwszy krok do tworzenia systemów monitorujących zmiany geometrii modeli cyfrowych bliźniaków z użyciem chmur punktów. Powtarzane okresowo skanowanie fizycznego obiektu, a następnie użycie zaproponowanych algorytmów analizy nowej chmury punktów pozwoli na aktualizację modelu geometrii. Zaktualizowane i porównywane ze sobą kolejne wydania modelu będą mogły być wykorzystane do identyfikacji zmian w geometrii, które z kolei mogą wskazywać na ewentualne nieprawidłowości pracy fizycznego obiektu. W przypadku mostów zlokalizowanych na obszarach z deformacją terenu (np. aktywność górnicza, sejsmiczna lub tunelowanie), taka automatyczna aktualizacja modelu może być wykorzystana do monitorowania stanu deformacji konstrukcji i wynikających z tego zagrożeń bezpieczeństwa. Ale ten etap będzie dopiero przedmiotem dalszych prac.

4 Optymalizacja z użyciem programowania graficznego i algorytmu genetycznego

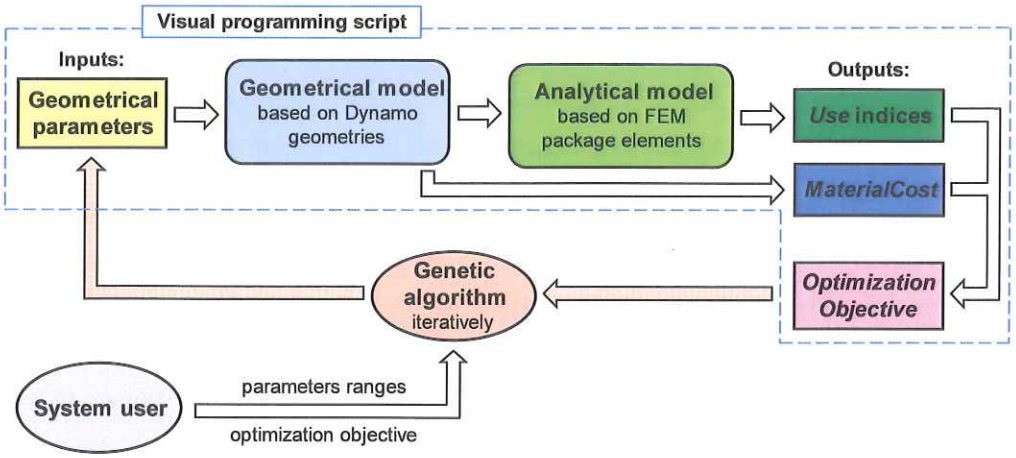
Mnogość zmiennych czyni projektowanie mostów bardzo złożonym zadaniem. Stosowana w tradycyjnym procesie projektowania optymalizacja z kilkoma krokami iteracji jest czasochłonna i zwykle obejmuje zbyt małą liczbę analizowanych wariantów. Towarzyszą temu liczne ograniczenia, np. czasowe (narzucony harmonogram projektu) i związane z dostępem do danych projektowych na określonym etapie realizacji procesu (projekt koncepcyjny, wykonawczy itd.). Skutkuje to nieoptymalnymi wyborami ostatecznego wariantu.

Techniki optymalizacji konstrukcji mostów są przedmiotem licznych i obszernych badań. Ze względu na funkcję tych obiektów i często istotne aspekty estetyczne, optymalizacja nie może ograniczać się już tylko do wielokrotnego użycia modelu analizowanego w środowisku programu MES. Coraz częściej te procesy są automatyzowane dzięki technikom programistycznym. Rozwiązania te zwykle wykorzystują typowe języki programowania tekstowego (np. Python, C#). Nie są one jednak łatwe w użyciu dla użytkowników nie będących programistami, a więc również inżynierów budowlanych. Odpowiedzią na te potrzeby może być programowanie graficzne (ang. visual programming). Języki programowania graficznego są często implementowane w środowiskach BIM, gdzie parametryczność i możliwość szybkiej edycji są kluczowe. Skrypty (algorytmy) programowania graficznego najczęściej automatyzują parametryczne modelowanie geometrii, ale mogą też pomagać w rozwiązywaniu innych zadań. Połączone z algorytmami

optymalizacyjnymi tworzą zautomatyzowany proces projektowania, który nazywany jest projektowaniem generatywnym (ang. generative design). W tym podejściu użytkownik ustala cele i obostrzenia parametrów zadania, a algorytm dobiera optymalne wartości.

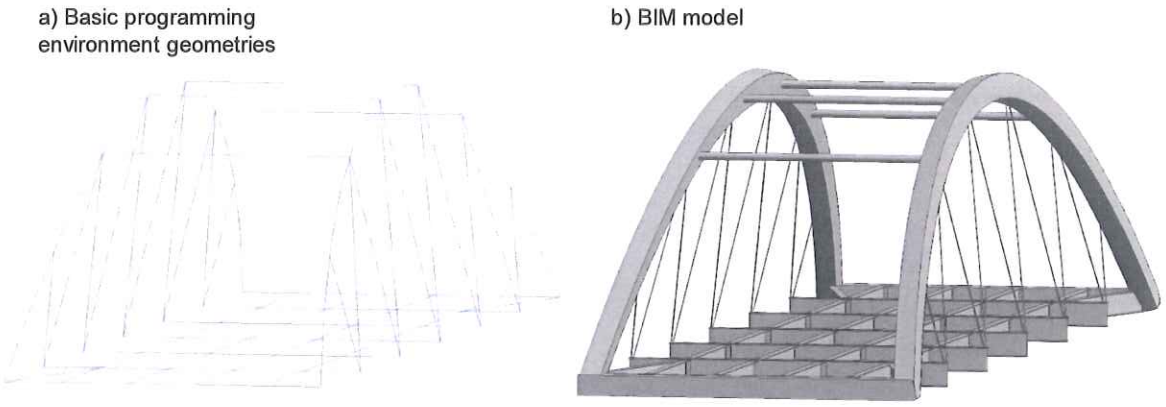
Projektowanie generatywne w powiązaniu z programowaniem graficznym może skutecznie wspomagać realizację czasochłonnych iteracyjnych zadań optymalizacyjnych. Przegląd literatury wykazał jednak, że implementacja tego podejścia do projektowania mostów jest wciąż jeszcze niedostatecznie rozpoznana, szczególnie w zakresie analiz konstrukcyjnych. Wynika to również z ograniczeń dostępnych narzędzi. Nie wszystkie środowiska programowania graficznego dedykowane inżynierii lądowej dostarczają odpowiednich narzędzi MES. A bez integracji modeli BIM i MES oraz użycia w nich automatyzujących algorytmów trudno jest zbudować poprawnie działającego cyfrowego bliźniaka mostu.

Autor podjął się próby [183] wykorzystania podejścia generatywnego do optymalizacji konstrukcji mostów z użyciem popularnego wśród inżynierów budownictwa języka programowania graficznego Dynamo. Pokazana została integracja modeli BIM i MES z algorytmami optymalizacyjnymi, ale użytymi w sposób zautomatyzowany. Środowisko Dynamo zostało wzbogacone przez autora o utworzony pakiet metod umożliwiający analizy MES (Rys. 2). Dzięki temu możliwa była analiza konstrukcji bezpośrednio w skrypcie programowania graficznego, który jednocześnie może również automatyzować proces modelowania BIM.



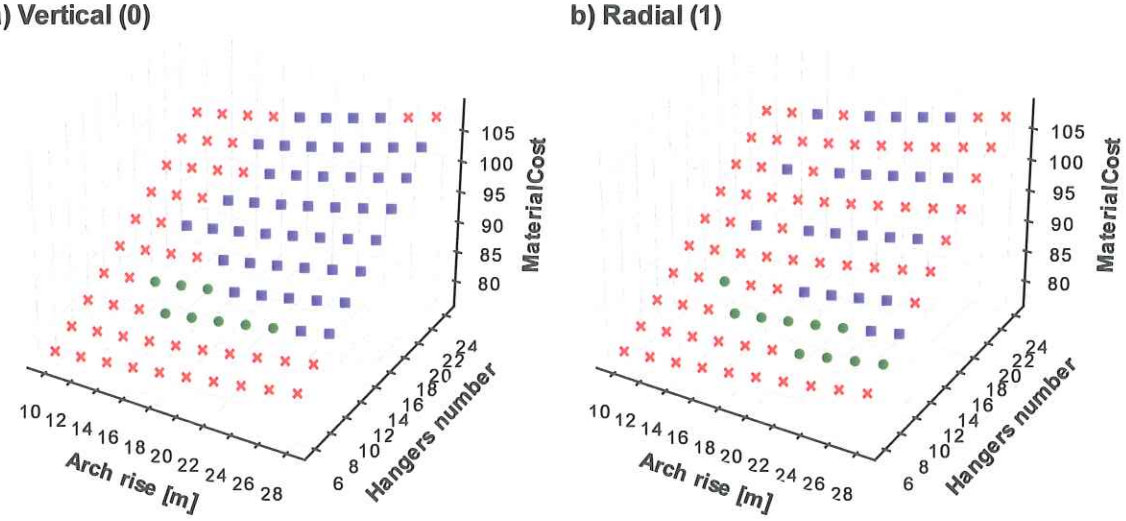
Rys. 2. Schemat procesu optymalizacyjnego projektowania generatywnego

W przeprowadzonym eksperymencie, utworzony skrypt Dynamo generował dużą liczbę sparametryzowanych modeli będących wariantami pewnego mostu łukowego. Wizualizację podstawowego modelu MES i BIM tego mostu pokazano na Rys. 3. Zmieniające się parametry obejmują układ wieszaków w czterech wariantach: pionowym (vertical), promienistym (radial), ukośnym (oblique) i siatkowym (network). Innymi parametrami są również rozstaw wieszaków lub inaczej ich liczba (hangers number), strzałka łuku (arch rise) oraz wymiary podstawowych elementów konstrukcyjnych i właściwości materiału.

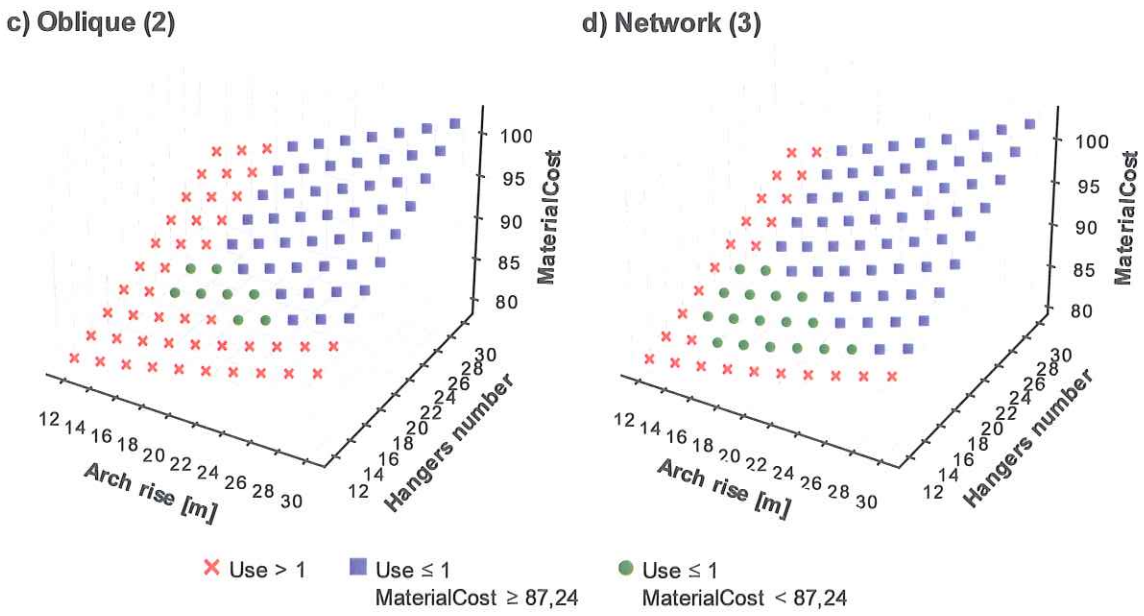


Rys. 3. Wizualizacje modeli mostu łukowego a) podstawowa geometria modelu MES b) wygenerowany modelu BIM

Generowane warianty modelu były następnie analizowane metodą MES. Połączony z systemem algorytm genetyczny pobierał rezultaty analiz jako parametry wejściowe do następnej generacji modeli. Algorytm iteracyjnie sterował parametrami geometrycznymi i materiałowymi, dążąc do minimalizacji przyjętej funkcji celu. Przyjętą funkcją celu był koszt zużytego materiału zależny od jego objętości i współczynnika ceny. Wyniki jednej z przedstawionych analiz pokazane są w postaci wykresów widocznych na Rys. 4. Jest to analiza wstępna rozwiązań o wybranych parametrach. Zadanie polegało na sprawdzeniu jaki zakres tych parametrów powinien zostać uwzględniony w poszerzonych analizach. Zakresy te zostały wyznaczone przez poszukiwania rozwiązań o dopuszczalnym wytężeniu (Use ≤ 1) i mniejszym koszcie materiału w stosunku do konstrukcji porównawczej (MaterialCost < 87,24).



Rys. 4 (cz. 1). Analiza wstępna rozwiązań o różnych parametrach (typ systemu wieszaków i ich liczba oraz strzałka łuku) z odniesieniem do maksymalnego wytężenia i kosztu porównawczego



Rys. 4 (cz. 2). Analiza wstępna rozwiązań o różnych parametrach (typ systemu wieszaków i ich liczba oraz strzałka łuku) z odniesieniem do maksymalnego wytężenia i kosztu porównawczego

5 Generowanie syntetycznych chmur punktów dla uczenia maszynowego

Chmury punktów coraz częściej stają się podstawowym źródłem geometrycznych danych o obiektach infrastruktury i to nie tylko mostowej. Dane geometryczne są jednak niewystarczające do wirtualizacji obiektów w postaci cyfrowych bliźniaków i prowadzenia dalszych kompleksowych analiz. Do tego potrzebne są bowiem również dane semantyczne. Manualna ekstrakcja semantycznych danych z chmur punktów jest czasochłonna, podatna na błędy i nieefektywna. Dlatego automatyzacja tego procesu wciąż jest przedmiotem wielu badań. Sposoby automatyzacji procesów chmur punktów często bazują na technikach uczenia maszynowego (ang. machine learning), co zostało wykorzystane również w tej pracy.

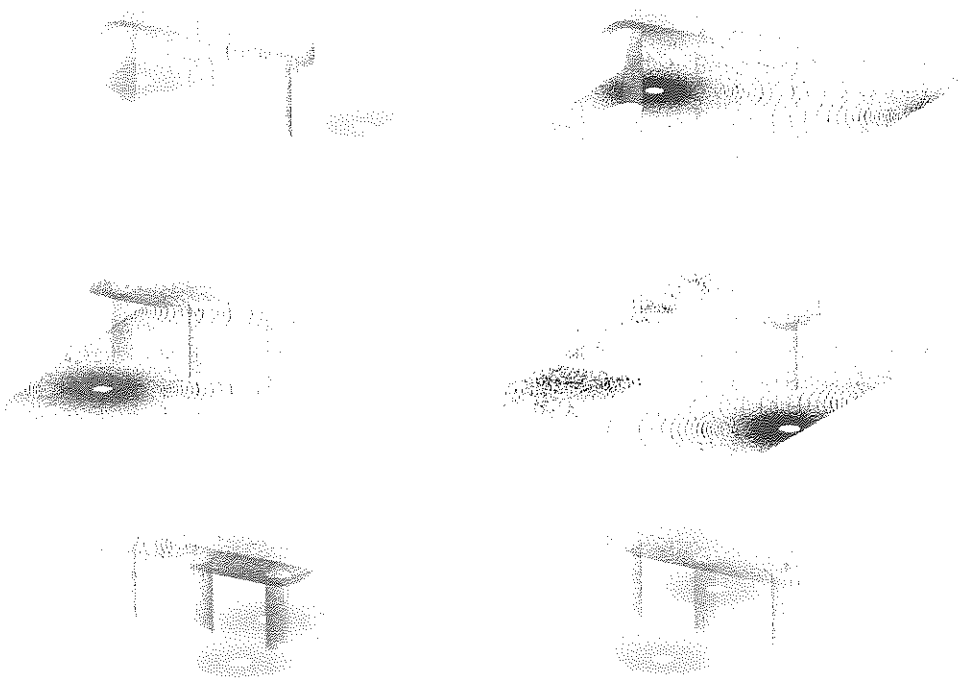
Skutecznie działający system uczenia maszynowego opiera się na dwóch fundamentach: poprawnym algorytmie i odpowiednim zbiorze danych do jego treningu. Wraz ze wzrostem możliwości algorytmów i mocy obliczeniowych, często to właśnie dane do treningu są ograniczeniem w stosowaniu tego podejścia. Odpowiedni zbiór takich przykładów treningowych powinien być zdywersyfikowany, miarodajny i powinien być odpowiednio liczny. Jeśli dodatkowo np. wybrany algorytm należy do grupy uczenia nadzorowanego (ang. supervised learning), to wówczas dane muszą być jeszcze etykietowane (ang. annotated, labeled). Niewystarczająca dla złożoności zadania liczba przykładów zmniejsza bowiem efektywność działania systemów uczenia maszynowego.

Pozyskiwanie chmur punktów jest czasochłonne i drogie. Skanowanie niektórych miejsc niesie trudności praktyczne (np. konieczność zamknięcia drogi przy skanowaniu dolnej części wiaduktu). Z kolei manualne etykietowanie chmur punktów, tak by mogły być użyte w treningu algorytmów, jest nieefektywne. To sprawia, że duże zbiory chmur punktów do treningu algorytmów są rzadkością. Efekt braku odpowiedniej liczby danych jest widoczny w rozwiązaniach uczenia maszynowego, które przeznaczone są do

automatyzacji procesów analizy chmur punktów. Jedną z metod na pokonanie tego problemu jest generowanie danych syntetycznych. Dane syntetyczne mają pewne zalety w stosunku do rzeczywistych. Przede wszystkim łatwiej je pozyskać, bo nie ma potrzeby prowadzenia wielokrotnego skanowania prawdziwego obiektu, które jest kosztowne i czasochłonne. Dane te są też skalowalne. Ich liczba jest ograniczona właściwie tylko mocami obliczeniowymi. Dają też kontrolę nad parametrami i dystrybucją przykładów, a także zapewniają efektywne etykietowanie. Niemniej, aby dane syntetyczne mogły zastąpić lub wspomagać dane realne w procesie trenowania algorytmów, muszą one odwzorowywać charakterystyki realnych przykładów.

Syntetyczne chmury punktów mogą być pozyskiwane poprzez proste próbkowanie modeli geometrycznych lub symulatory skanerów. Opisy symulatorów są dostępne w literaturze [331,332,334–336,338,340,342,343]. Wciąż jednak brakuje narzędzi dających elastyczną kontrolę nad parametrami symulacji i właściwościami generowanych chmur punktów. Pożądane są więc metody, które odwzorowują działanie prawdziwego skanera i które nie wymagają złożonych prac przygotowawczych. Na przykład polegających na tworzeniu specyficznych modeli jedynie na potrzeby symulacji procesu skanowania.

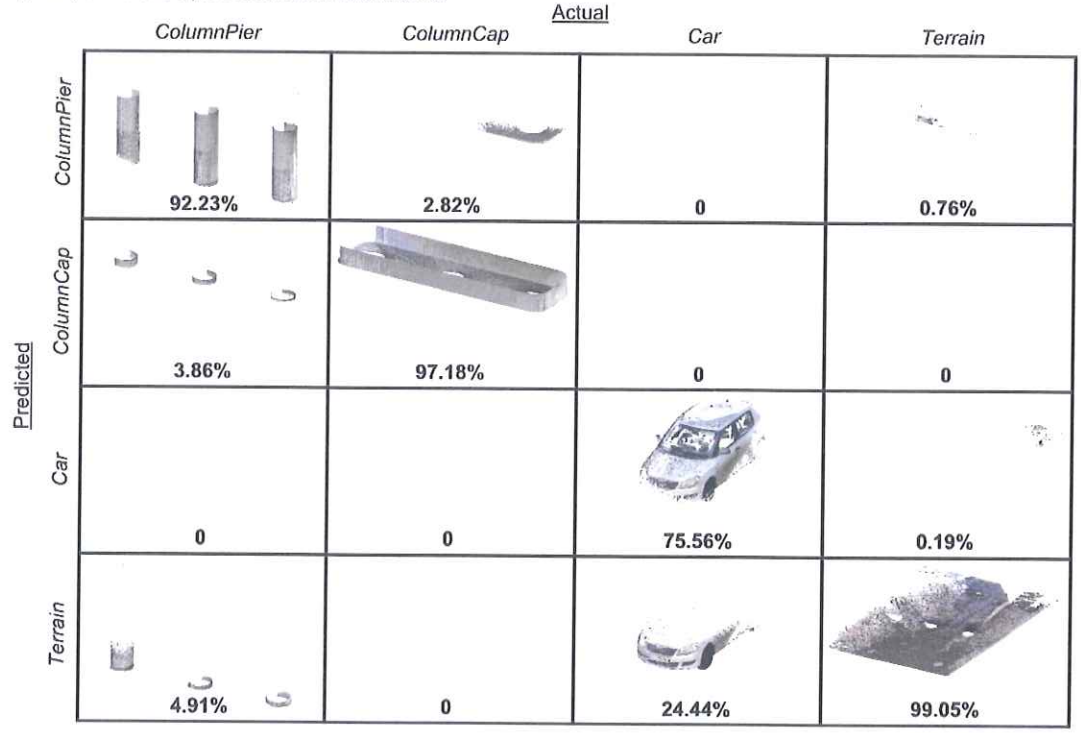
Autor podjął się więc próby generowania syntetycznych chmur punktów bezpośrednio w środowisku BIM. Na te potrzeby, utworzony został symulator skanowania laserowego nazwany DynamoPCSim. Na Rys. 5 pokazano przykłady wygenerowanych w pracy syntetycznych chmur punktów. Jest to filar mostu drogowego, na którym przeprowadzono eksperymenty terenowe. Opracowany symulator wykorzystuje technikę śledzenia promieni (ang. ray tracing), która naśladuje działanie skanerów laserowych. Dzięki temu utworzone chmury punktów mają charakterystyki zbliżone do tych realnych. Symulator został zaimplementowany w postaci pakietu metod działających w otwartym środowisku programowania graficznego Dynamo. Skrypty Dynamo mogą być łączone z modelami tworzonymi wprost w środowisku BIM programu Autodesk Revit. Dzięki temu, symulator może bazować bezpośrednio na źródłowych modelach BIM bez konieczności tworzenia dodatkowych pośrednich modeli, które miałyby jedynie realizować wirtualny proces skanowania. Modułowa budowa i elastyczność programowania graficznego sprawiają, że symulator może uwzględniać różne parametry skanowania i pożądane charakterystyki chmur punktów.



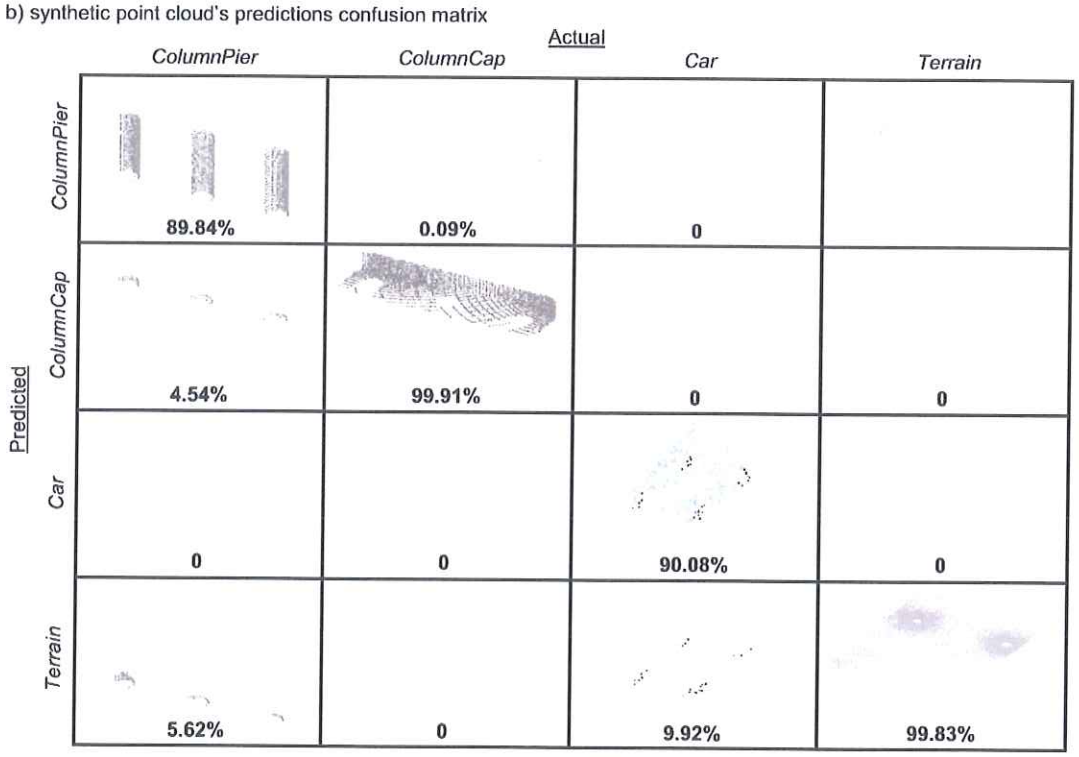
Rys. 5. Przykłady syntetycznych chmur punktów wygenerowanych przez DynamoPCSim

Przeprowadzony w pracy eksperyment, który polegał na segmentacji semantycznej (ang. semantic segmentation) z użyciem sieci neuronowej potwierdził użyteczność generowanych danych do uczenia maszynowego. Zastosowana architektura sieci neuronowej PointNet [222] została wytrenowana na wygenerowanych syntetycznych chmurach punktów. Następnie przeprowadzona została walidacja na zbiorach testowych. Pierwszy z nich zawierał sceny syntetycznej chmury punktów, a drugi pochodził ze skanowania realnego obiektu. Na Rys. 6 pokazano macierze błędów predykcji sieci na przygotowanych zbiorach testowych. Uzyskane wyniki obu testów są ze sobą porównywalne w zakresie wskaźnika kompletności (ang. recall). Potwierdza to więc, że generowanie syntetycznych chmur punktów może zastąpić w treningu sieci neuronowej stosowanie trudno dostępnych chmur realnych.

a) real point cloud's predictions confusion matrix



b) synthetic point cloud's predictions confusion matrix



Rys. 6. Macierz błędów (ang. confusion matrix) działania sieci neuronowej na a) realnej chmurze punktów oraz b) syntetycznych chmurach punktów

Utworzony przez autora symulator dotyczy pozyskiwania danych w postaci chmur punktów potrzebnych do treningu algorytmów uczenia maszynowego. Jest to pierwszy, ale nieodzowny etap tworzenia systemów, które automatyzują wykorzystywanie chmur punktów na potrzeby ekstrakcji informacji, ich segmentacji, a finalnie nawet generowania i aktualizowania geometrycznych modeli cyfrowych bliźniaków. W ten sposób automatycznie aktualizowane modele będą replikowały rzeczywistą geometrię, realizując ideę modelu współistniejącego z fizycznym obiektem. W przypadku mostów, informacje o zmianach geometrycznych umożliwią między innymi wykrywanie i porównywanie deformacji, monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i alarmowanie o niebezpiecznych zjawiskach.

6 Podsumowanie i wnioski

Nabierająca rozpędu cyfrowa transformacja niemal wszystkich dziedzin naszego życia stanowi duże wyzwanie, ale i szansę. W kontekście coraz bardziej przenikających się różnych dyscyplin naukowych i sektorów gospodarki, paradygmat cyfrowych bliźniaków zwiększa efektywność w obszarze inżynierii lądowej i umożliwia międzybranżową współpracę na cyfrowych platformach wymiany danych. Dostarcza też nowych, praktycznych narzędzi, które wspomagają realizację codziennych zadań wykonywanych przez inżynierów i zarządców infrastruktury.

Przedstawiona w rozprawie koncepcja cyfrowego bliźniaka mostu jest jedną z pierwszych prób zdefiniowania tych informacyjnych modeli w odniesieniu do konstrukcji mostowych. Rozprawa omawia techniki, które mogą być wykorzystywane do tworzenia i użytkowania cyfrowych bliźniaków mostów oraz opisuje ich zasadnicze cechy. Zaproponowana koncepcja tych złożonych wirtualnych obiektów obejmuje ogólne zasady tej idei, które przedstawiane są w coraz bogatszej literaturze przedmiotu. Uwzględnia też przy tym specyfikę konstrukcji mostów, a także zwyczajowe wymagania stawiane przez potencjalnych użytkowników cyfrowych bliźniaków, czyli inżynierów mostowych oraz właścicieli i zarządców infrastruktury mostowej. W ten sposób, cyfrowy bliźniak mostu może być przygotowany do interakcji z innymi obiektami w wirtualnym środowisku. Może też dostarczać realnych korzyści swoim użytkownikom. Te korzyści to między innymi automatyzacja prac projektowych, monitorowanie postępów robót na budowie, skuteczna ocena stanu technicznego konstrukcji, czy efektywne zarządzania zasobami. Są one realizowane przez wprowadzenie nowych sposobów użytkowania cyfrowych bliźniaków. Dwa przykłady takiego nowego podejścia zostały zaproponowane i szczegółowe opisane przez autora w rozprawie.

Pierwszy z nich to automatyzacja prac projektowych z użyciem programowania graficznego i optymalizacyjnego algorytmu genetycznego [183]. W tym podejściu pokazano w jaki sposób algorytmy programowania graficznego mogą zostać wykorzystane do praktycznej integracji modeli BIM oraz MES. A taka integracja jest nieodzowna w przypadku kompletnych cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych. Z kolei użyty w tym zadaniu algorytm optymalizacyjny pozwolił na analizę zdecydowanie większej liczby wariantów niż w tradycyjnym sposobie projektowania. W rezultacie prowadzi to do uzyskania bardziej optymalnych rozwiązań przy znacznie większej efektywności całego procesu.

Drugi z zaproponowanych sposobów dotyczy generowania i aktualizacji geometrii cyfrowych bliźniaków również w fazach wznoszenia i użytkowania. Jest to propozycja tworzenia zbiorów syntetycznych chmur

punktów do trenowania algorytmów uczenia maszynowego. Algorytmy takie mogą analizować chmury punktów, wyciągać z nich semantyczne informacje, a finalnie również generować lub uaktualniać geometryczne modele. Automatycznie aktualizowane modele będą w przyszłości mogły replikować rzeczywistą geometrię mostu, realizując ideę modelu współistniejącego z fizycznym obiektem. Akurat w przypadku mostów, informacje o zmianach geometrycznych umożliwią między innymi wykrywanie i porównywanie deformacji, monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i alarmowanie o niebezpiecznych zjawiskach.

Zagadnienia przedstawione w rozprawie stanowią początkowy etap badań nad cyfrowymi bliźniakami mostów i powinny być dalej rozwijane. Kierunki dalszych prac dotyczą zarówno teoretycznych podstaw definiujących te wirtualne obiekty jak również praktycznych sposobów ich użytkowania. Przede wszystkim należy określić techniczne szczegóły implementacji zaproponowanych w pracy właściwości cyfrowych bliźniaków. W przyszłości, koncepcja ta będzie wymagała uwzględniania również nowych, dopiero tworzonych technologii. W odniesieniu do automatyzacji procesu projektowego z użyciem programowania graficznego i algorytmów optymalizacyjnych, należałoby już uwzględnić dodatkowe parametry, które są trudne do stosowania przy tradycyjnym podejściu do projektowania. Dzisiaj są to najczęściej wymierne koszty rozumiane w aspekcie ekonomicznym. Natomiast w przyszłości coraz większą rolę będą odgrywały również koszty środowiskowe i społeczne. A takie analizy umożliwia dopiero wdrożenie środowiska BIM.

Z kolei zaproponowany symulator syntetycznych chmur punktów stanowi jedynie pierwszy krok do tworzenia cyfrowych bliźniaków w fazie operacyjnej. W dalszych pracach syntetyczne dane powinny zostać użyte do trenowania systemów uczenia maszynowego generujących i aktualizujących modele geometryczne cyfrowych bliźniaków. To z kolei otworzy możliwość tworzenia systemów eksperckich wykrywania zmian geometrycznych i alarmowania o potencjalnych niebezpieczeństwach.

Przeprowadzone rozpoznanie stanu wiedzy w zakresie cyfrowych bliźniaków mostów, prace koncepcyjne oraz eksperymenty in-situ pozwoliły zrealizować wszystkie zakładane na początku rozprawy cele. Zdefiniowano podstawy tworzenia cyfrowych bliźniaków mostów proponując szablon tych wirtualnych modeli, który uwzględnia specyfikę obiektów mostowych i fazy ich cyklu życia. Dzięki temu możliwe było pokazanie możliwości wirtualizacji już nie tylko samego fizycznego obiektu, ale również towarzyszących mu procesów. Autor ma świadomość, że przedstawiony materiał nie wypełnia wszystkich założeń koncepcji cyfrowych bliźniaków. Omówione badania i nabyte dzięki nim kompetencje są jednak zaczątkiem do kolejnych działań, które będą zmierzać do coraz bardziej kompletnych implementacji cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych w przyszłości.

Kamil Korus
13.03.2023 r.