

Przegląd możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji w modelowaniu BIM

An overview of the possibilities of using artificial intelligence in BIM modeling

dr hab. inż. Krzysztof Zima, prof. PK (ORCID: 0000-0001-5563-5482), dr inż. Damian Wieczorek (ORCID: 0000-0002-3191-2438), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4883

Streszczenie: Dokonując przeglądu stanu wiedzy nt. modelowania informacji o budynku – BIM (ang. *Building Information Modeling*) można zauważyć, że technologia BIM nie poczyniła ostatnio znacznych postępów, ponieważ sztuczna inteligencja – AI (ang. *Artificial Intelligence*) nie jest jeszcze w pełni wykorzystana. Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji – AI w modelowaniu BIM. Autorzy dokonali analizy trendów rozwoju sztucznej inteligencji, która jest obecnie wykorzystywana w modelowaniu BIM. W artykule przedstawiono również możliwości wykorzystania AI powiązanej z modelem BIM, a także omówiono wybrane przykłady wspomagania modelowania informacji o budynku z wykorzystaniem głównych czterech grup wybranych technik AI.

Słowa kluczowe: AI, BIM, budownictwo, sztuczna inteligencja, zarządzanie.

Abstract: When reviewing the state of knowledge on building information modeling (BIM), it can be noted that BIM technology has not made significant progress recently because artificial intelligence (AI) has not been fully used. The purpose of this article is to present the possibilities of using artificial intelligence – AI in BIM modeling. The authors analyzed the trends in the development of artificial intelligence, which is currently used in BIM modeling. The article also presents the possibilities of using AI related to the BIM model, and discusses selected examples of supporting building information modeling using the main four groups of selected AI techniques.

Keywords: AI, BIM, construction, artificial intelligence, management.

1. Wprowadzenie

Modelowanie BIM jest obecnie coraz bardziej popularne wśród uczestników procesu budowlanego. Bardzo obiecujące wydaje się jednak połączenie możliwości wykorzystania nowoczesnych technologii cyfrowych w budownictwie, tj. sztucznej inteligencji – AI (ang. *artificial intelligence*) oraz modelowania informacji o budynku – BIM (ang. *building information modelling*). Sztuczna inteligencja (AI) to dziedzina informatyki, która zajmuje się opracowywaniem inteligentnych maszyn i systemów komputerowych o ludzkich zdolnościach rozumowania, uczenia się i rozwiązywania problemów [1]. Modelowanie informacji o budynku (BIM) jest procesem tworzenia danych i zarządzania nimi w całym cyklu życia obiektu budowlanego [2]. Nowoczesne technologie, tj. BIM, rozwijają się bardzo szybko i warto na bieżąco śledzić ich rozwój, nie tylko w zakresie dostępności nowej literatury, czy odpowiednich wytycznych.

Możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji w branży budowlanej można znaleźć już na poziomie planowania kosztorysu i harmonogramu projektów. W trakcie prac budowlanych, AI może okazać się z kolei przydatna w momencie podejmowania zakupu materiałów budowlanych

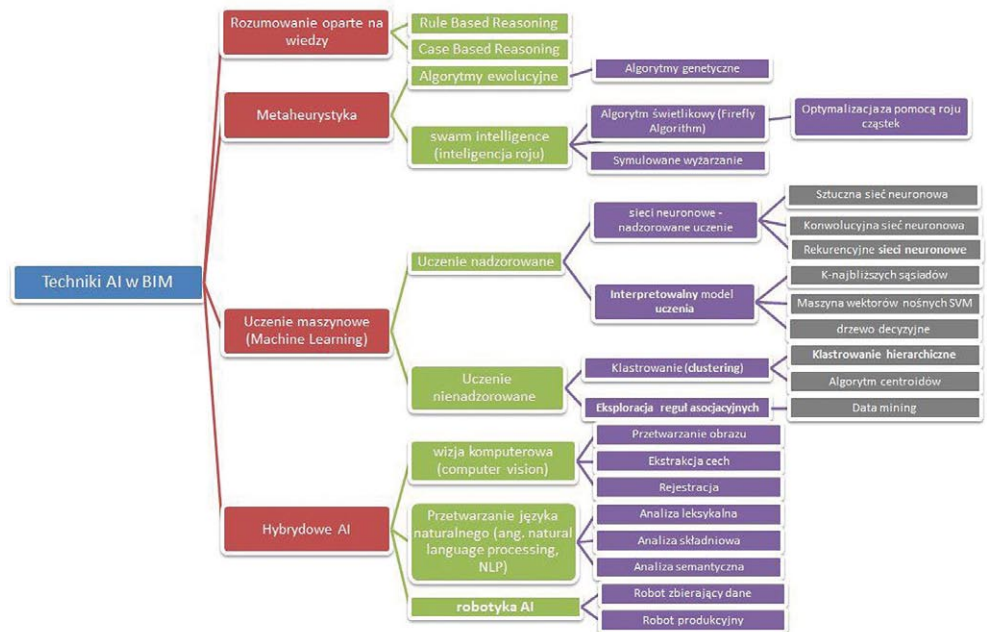
i ich dystrybucji [3]. W przypadku planowania i realizacji robót budowlanych, AI daje między innymi możliwość dostępu do wielu danych wykorzystywanych do analiz predykcyjnych, wspomagających kosztorysowanie i harmonogramowanie robót budowlanych, identyfikację możliwych zagrożeń i wielu innych.

Celem artykułu jest zaprezentowanie możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji – AI w modelowaniu BIM. Autorzy dokonali analizy trendów rozwoju sztucznej inteligencji, która jest obecnie wykorzystywana w modelowaniu BIM. W artykule przedstawiono również możliwości wykorzystania AI powiązanej z modelem BIM, a także omówiono wybrane przykłady wspomagania modelowania informacji o budynku z wykorzystaniem głównych czterech grup wybranych technik AI.

2. Trendy rozwoju wykorzystania technik sztucznej inteligencji w technologii BIM

Wydaje się, że po okresie dynamicznego rozwoju, tworzenia wielu podstaw, słowników, poradników i wreszcie aktów prawnych, norm, czy standardów rozwój technologii BIM nieco zwolnił. Obecnie technologia BIM jest na etapie

Rys. 1. Zestawienie głównych technik AI integrowanych z BIM; źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

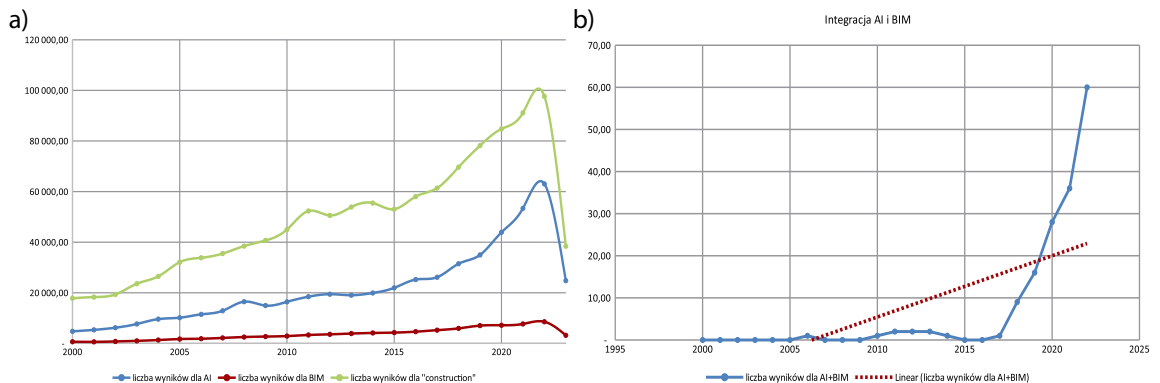


poszukiwania kolejnych dróg rozwoju. Zrealizowane do tej pory przez instytucje publiczne kontrakty z wykorzystaniem BIM mogą zachęcić ludzi do zastosowania spostrzeżeń uzyskanych podczas ich realizacji [4].

Autorzy w niniejszym artykule postarali się dokonać analizy kolejnych ścieżek rozwoju BIM. Wydaje się, że taką ścieżką rozwoju jest wykorzystanie sztucznej inteligencji (AI) w powiązaniu z technologią BIM. Modelowanie informacji o budynku nie rozwija się obecnie w pełni dynamicznie ze względu na brak wykorzystania sztucznej inteligencji, a raczej jej stosunkowo niewielkie zastosowanie w praktyce. Możliwości wykorzystania AI w aspekcie technologii BIM pokazano na rysunku 1. Do analizy trendów wykorzystano bazę publikacji Scopus.

techniki AI i metody związane z BIM są obecnie kluczowe. W tym celu przeprowadzono wyszukiwania słów kluczowych związanych z AI, opierając się na podziale na 4 główne grupy technik AI przedstawione na rysunku 1 oraz wykorzystując jako słowa kluczowe – także według autorów bardzo często pojawiające się określenia bardziej szczegółowe (ujawnione w kolejnych podpodziałach na rysunku 1).

Rys. 2. Analiza częstotliwości występowania słów kluczowych: a) „AI”, „BIM”, „construction” oraz b) „AI + BIM”; źródło: opracowanie własne



Na wstępie wyszukano częstotliwość występowania takich słów kluczowych jak „AI (artificial intelligence)”, „BIM”, „construction” oraz powiązanych ze sobą terminów „AI” oraz „BIM”. Wyniki przedstawiono na rysunku 2.

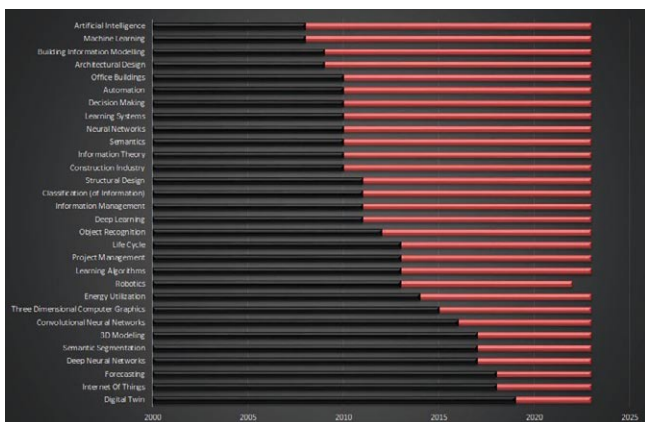
Wykres na rysunku 2a pokazuje stały wzrost artykułów zawierających słowo kluczowe „BIM”. Znacznie bardziej dynamiczny przyrost można zaobserwować dla słów kluczowych „AI” i „construction”, co tylko potwierdza jak kluczowe jest znaczenie sztucznej inteligencji dla budownictwa. W przypadku połączenia słów kluczowych „AI” (sztuczna inteligencja) z „BIM”, bardzo dynamiczny trend wzrostowy widać po 2017 r. (rysunek 2b), a więc stosunkowo niedawno. Wzrost artykułów z kombinacją słów kluczowych „AI” oraz „BIM” jest bardzo duży.

Autorzy spróbowali pogłębić swoje badania i sprawdzić jakie

Ostatecznie zapytanie w wyszukiwaniu w bazie Scopus wyglądało następująco:

(TITLE-ABS-KEY BIM AND AI) OR TITLE-ABS-KEY (“Machine Learning” BIM) OR TITLE-ABS-KEY (“Deep Learning” BIM) OR TITLE-ABS-KEY (“knowledge-based reasoning” BIM) OR TITLE-ABS-KEY (“neural network” BIM) OR TITLE-ABS-KEY (“Case Based Reasoning” BIM) OR TITLE-ABS-KEY (“metaheuristics” BIM) OR TITLE-ABS-KEY (“hybrid AI” BIM))

Badania przeprowadzono 11.06.2023 r. W wyniku wyszukiwania otrzymano 878 artykułów. Słowa kluczowe otrzymane w wyniku wprowadzonych ograniczeń (jako 30 najczęściej pojawiających się słów) pokazano na rysunku 3. Rysunek ten pokazuje także rozkład tych słów kluczowych w czasie,



Rys. 3. TOP 30 słów kluczowych pojawiających się w artykułach przy wprowadzonych ograniczeniach wyszukiwania wraz z okresem ich pojawiania się; źródło: opracowanie własne

począwszy od 2008 r. Należy zauważyć, że wcześniej (w latach 2000–2007) publikacje z takimi słowami kluczowymi nie były opracowywane.

Jak wynika z analizy rysunku 3, po 2008 r. w przypadku technologii BIM zaczęły pojawiać się i pojawiają się do dziś korelacje ze sztuczną inteligencją i takimi technikami jak: (i) sieci neuronowe, (ii) głębokie uczenie, (iii) segmentacja, (iv) rozpoznawanie obiektów, a ostatnio w szczególności (v) głębokie sieci neuronowe, (vi) internet rzeczy – IoT oraz (vii) cyfrowe bliźniaki. Z kolei zakres wykorzystania dotyczy przede wszystkim: (i) projektowania architektonicznego, (ii) wspomagania podejmowania decyzji, (iii) projektowania konstrukcji oraz (iv) zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi w całym cyklu życia obiektów budowlanych.

Najwięcej artykułów poruszających omawiane zagadnienia można zidentyfikować w: (i) Chinach – 219, (ii) USA – 124, (iii) Wielkiej Brytanii – 68, (iv) Niemczech – 59 oraz (v) we Włoszech – 58. Ok. 33,5% artykułów dotyczy zagadnień związanych z inżynierią, a 26,3% z informatyką. Artykuły w czasopiśmie naukowych i artykuły konferencyjne stanowią zdecydowaną większość publikowanych materiałów (odpowiednio: 386 i 332). Daje to ok. 81,7% udziału we wszystkich publikacjach. Znamienita większość artykułów poddanych analizie została napisana w języku angielskim. Jest to aż 846 spośród 878 pozycji (ok. 96,4%).

3. Przykłady wykorzystania technologii BIM w połączeniu ze sztuczną inteligencją w budownictwie

Poniżej zostaną zaprezentowane przykłady wykorzystania technologii BIM w połączeniu ze sztuczną inteligencją (AI) w budownictwie. Kierując się podziałem przedstawionym na rysunku 1, pokazane zostaną przykłady z 4 głównych grup technik AI w zakresie:

- rozumowania opartego na wiedzy (ang. *knowledge-based reasoning*),
- metaheurystyki,

- uczenia maszynowego (ang. *machine learning*),
- hybrydowej sztucznej inteligencji AI.

3.1. Rozumowanie oparte na wiedzy

Systemy oparte na wiedzy, np. wnioskowanie oparte na zasadach – RBR (ang. *Rule-Based Reasoning*), wnioskowanie z przypadków – CBR (ang. *Case-Based Reasoning*), czy wnioskowanie oparte na modelach to techniki mające obecnie powszechne zastosowanie. W obliczu definicji nowego problemu można pozyskać wcześniejsze informacje, po to, żeby znaleźć rozwiązanie dla obecnego problemu. Ten mechanizm ludzkiego mózgu jest główną inspiracją dla CBR [5]. CBR jako jedna z technik sztucznej inteligencji odwołuje się do wcześniejszej wiedzy i doświadczenia, aby stanowić punkt wyjścia do rozwiązania nowego problemu [6].

Zaprezentowany przykład dotyczy procesu identyfikacji, analizy i usuwania usterek w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych.

Na wstępie utworzono bazę przypadków zawierającą 3 grupy informacji R_i , OS_i oraz ZO_i :

$$BP = \{\text{Przypadek}_1[(R_1), (OS_1), (ZO_1)], \dots, \text{Przypadek}_i[(R_i), (OS_i), (ZO_i)]\}$$

gdzie:

BP – baza przypadków,

Przypadeki $[(R_i), (OS_i), (ZO_i)]$ – i -ty „stary” przypadek,

R_i – rozwiązanie dla i -tego przypadku,

OS_i – opis sytuacji dla i -tego przypadku,

ZO_i – zmienne objaśniające dla i -tego przypadku.

Rozwiązaniem R_i jest lista usterek wraz z informacją o elementach, na których pojawiły się usterki oraz informacją na temat ich istotności, kosztu i czasu wymaganego do usunięcia usterki. Opis sytuacji OS_i zawiera informacje identyfikujące przypadek, m.in. nazwa budynku, numer mieszkania. Zmienne objaśniające ZO_i zawierają dane określające parametry pomieszczenia, w którym wystąpiły usterki, tj.: (i) typ mieszkania, (ii) piętro, (iii) powierzchnia mieszkania, (iv) liczba pokoi w mieszkaniu, (v) funkcja pomieszczenia, (vi) powierzchnia pomieszczenia, (vii) liczba okien w pomieszczeniu, (viii) liczba drzwi balkonowych w pomieszczeniu oraz (ix) liczba drzwi wewnętrznych w pomieszczeniu.

Aby wyszukać podobne przypadki w bazie przypadków, należy wyznaczyć całkowite podobieństwo między dwoma przypadkami – nowym (rozpatrywanym), a starym (pochodzącym z bazy danych). Wyliczone zostają podobieństwa lokalne dla kolejnych parametrów OS_i oraz ZO_i : $\text{sim}_1(w_{1n}, w_{1s})$, $\text{sim}_2(w_{2n}, w_{2s})$, ..., $\text{sim}_n(w_{nn}, w_{ns})$. Następnie oblicza się podobieństwo globalne $\text{SIM}(w_n, w_s)$ wykorzystując do tego policzone podobieństwa lokalne z właściwymi wagami zmiennej objaśniającej w_i :

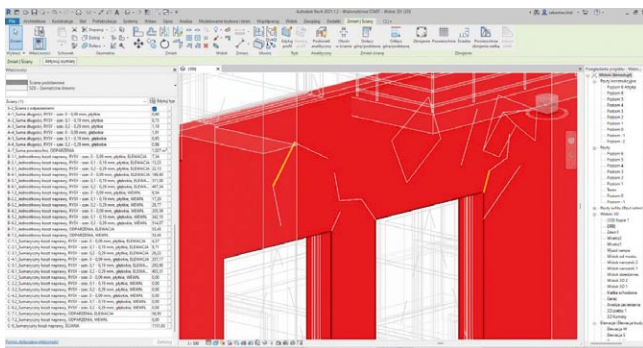
$$\text{SIM}(w_n, w_s) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \text{sim}_i(w_{in}, w_{is})$$

gdzie:

$SIM(w_n, w_s)$ – podobieństwo globalne między przypadkami w_n i w_s ; $sim_i(w_n, w_s)$ – podobieństwo lokalne między zmiennymi w_n i w_s ; ω_i – waga i -tego podobieństwa lokalnego.

Podobieństwo lokalne $sim_i(w_n, w_s)$ przypadków można obliczyć przy użyciu różnych formuł w zależności od rodzaju kryteriów, wykorzystując wzory na obliczenie odległości między przypadkami. Wybrany stary przypadek ma charakteryzować się możliwie największym podobieństwem w celu znalezienia przydatnego rozwiązania, a w tym przypadku możliwych do wystąpienia usterek w danym pomieszczeniu. Bardziej szczegółowo proces zarządzania usuwaniem usterek został omówiony w publikacji [7].

Model BIM umożliwia natomiast przede wszystkim prezentację wizualną otrzymanych wyników i stanowi źródło wiedzy, a więc jest także bazą danych. W omawianym przykładzie stanowi bazę kosztową i czasową, która pozwala dodatkowo na oszacowanie kosztów i czasu usunięcia usterek. Wykorzystanie skryptów opracowanych w Dynamo – narzędziu do programowania wizualnego, stanowiącego dodatek do programu Autodesk Revit pokazano na rysunku 4. Program automatycznie pokazuje ściany ze zidentyfikowanymi rysami (zaznaczone na czerwono). Baza danych o kosztach (jako arkusz MS Excel) jest wgrana do programu Revit i pokazuje ceny jednostkowe napraw poszczególnych usterek (rysunek 4, kolumna po lewej stronie). Po automatycznym zliczeniu poszczególnych usterek, w zestawieniach można otrzymać informację o sumarycznych kosztach naprawy.



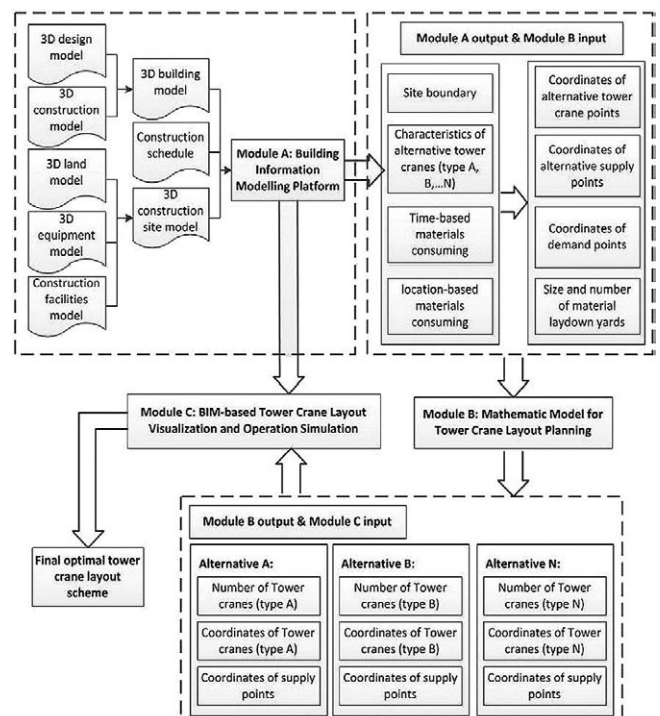
Rys. 4. Automatyczne zaznaczenie ścian z rysami wraz z wyliczeniem kosztów napraw usterek

3.2. Metaheurystyka

Inteligencja roju – IR (ang. *swarm intelligence*), zwana również inteligencją rozproszoną, to technika sztucznej inteligencji, którą zalicza się do grupy metod opartych na metaheurystyce. IR jest postrzegana w ujęciu ogólnym jako proces tworzenia się współpracy pomiędzy wieloma sprawcami naturalnymi (np. koloniami mrówek, pszczół, świetlików, stad ptaków, czy ławicy ryb) lub sztucznymi (np. robotami) bez uprzednio zdefiniowanego planu oraz bez jednego organu dowodzącego. Pojęcie zostało wprowadzone pod koniec lat 80. XX wieku

w zakresie zrobotyzowanych systemów komórkowych [8]. Inteligencja roju służy do uczenia się za pomocą złożonych metod uczenia się, planowania na dużą skalę i podejmowania decyzji. System IR składa się z wielu składowych lub autonomicznych węzłów edukacyjnych, które są wysoce rozproszone i niezależne od siebie. Jest to system oparty na przetwarzaniu równoległym, co pozwala w pełni wykorzystać wszystkie zasoby obliczeniowe. Ze względu na bardzo dużą moc przetwarzania obszerne zbiory danych mogą być szybko analizowane przez osobne węzły. Jeśli mają zostać wprowadzone zmiany w danych przekazywanych do systemu (np. ich aktualizacja), do ponownych obliczeń wdrożony zostaje tylko odpowiedni węzeł, a nie cały system. W inżynierii lądowej inteligencja roju może być wykorzystywana do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych wielu rodzajów, w tym do: (i) optymalizacji kombinatorycznej, (ii) optymalizacji z ograniczeniami, (iii) optymalizacji dynamicznej, (iv) zaszumionej, a także do (v) optymalizacji ciągłej i (vi) wielocelowej [8–10].

Omówiony przykład dotyczy zautomatyzowanego systemu planowania układu żurawi wieżowych [11]. System wykorzystuje m.in. technologię BIM, Schemat systemu, który składa się z trzech modułów – A, B i C, integrujących BIM z modelem matematycznym opartym na algorytmie świetlikowym (ang. *firefly algorithm*) przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat zautomatyzowanego systemu planowania układu żurawia wieżowego opartego na BIM [11]

Moduł A zwany inaczej „Platformą BIM” stanowi dane wejściowe dla modułu B, który odpowiada za automatyczne generowanie alternatywnych układów żurawia wieżowego za pomocą opracowanego modelu matematycznego. Każde

z uzyskanych w toku obliczeń alternatywnych rozwiązań zostaje zwizualizowane i ocenione za pomocą modułu C, który przedstawia m.in. w formie graficznej optymalny układ żurawi i punktów ich zasilania.

W ramach przygotowania danych wejściowych w module A proponowane jest opracowanie modeli branżowych 3D budynków/obiektów w zakresie architektury i konstrukcji, jak również modeli 3D terenu, czy wyposażenia placu budowy w sprzęt budowlany (np. żurawie wieżowe). Przy czym dane wejściowe 3D powinny być zintegrowane z harmonogramem budowy. Dane wyjściowe z modułu A są jednocześnie danymi wejściowymi do modułu B. Jak pokazano na rysunku 5, dane wyjściowe z modułu A dzielone są na dwie kategorie. Pierwsze mogą być generowane automatycznie lub przy udziale człowieka (użytkownika). Są to: (i) granice terenu, (ii) charakterystyki alternatywnych żurawi wieżowych, (iii) informacje o zapotrzebowaniu na materiały budowlane w danym czasie i miejscu, czy (iv) dane dotyczące zapotrzebowania na materiały wg planowanego miejsca wbudowania. Drugie wynikają ściśle z działania użytkownika i mają charakter danych wejściowych do modułu B. Można do nich zaliczyć: (i) współrzędne alternatywnych punktów żurawia wieżowego, (ii) współrzędne alternatywnych punktów zasilania, (iii) współrzędne punktów zapotrzebowania na materiały, czy (iv) wielkość i liczbę placów składowania materiałów.

Elementem centralnym w module B jest model matematyczny do planowania układów żurawi wieżowych. Celem modelu jest obliczenie lokalizacji punktów zasilania oraz żurawi w warunkach minimalnego czasu i kosztów transportu, zgodnie z następującą formułą:

$$\min TC = \min \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J T_{ij}^k \cdot Q_{ij}^k \cdot C^k$$

gdzie:

K – liczba żurawi wieżowych;

I – liczba punktów zaopatrzenia;

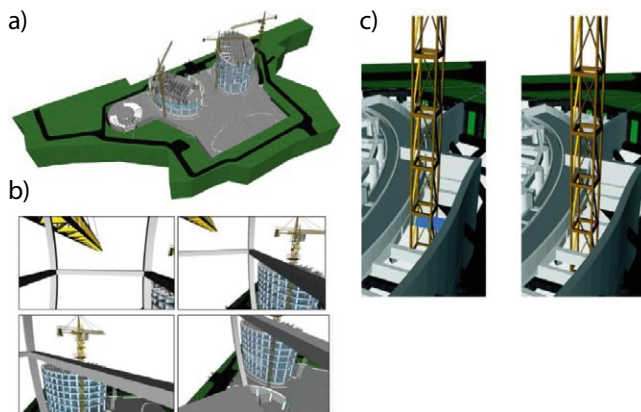
J – liczba punktów zapotrzebowania;

T_{ij}^k – czas przemieszczenia od i -tej dostawy do j -tego punktu zapotrzebowania;

Q_{ij}^k – wielkość przemieszczenia materiału przez k -ty żuraw;

C^k – koszt przemieszczenia jednostki materiału w jednostce czasu przez k -ty żuraw.

Moduł C odpowiada za wizualizację układu żurawi wieżowych i symulację działania w oparciu o technologię BIM. Danymi wejściowymi do tego modułu są dane wyjściowe z modułu B, tj. alternatywne układy żurawi wieżowych (od A do N) wraz z podaniem współrzędnych poszczególnych żurawi danego typu, czy współrzędnych alternatywnych punktów zasilania. Na rysunkach 6a, 6b i 6c pokazano odpowiednio: wizualizację 3D optymalnego układu żurawi wieżowych, symulację ich pracy z punktu widzenia operatora żurawia, a także weryfikację wyników otrzymanych z modelu matematycznego pod kątem korekty uwzględniającej



Rys. 6. Wizualizacja 3D optymalnego układu żurawi wieżowych (a) wraz z symulacją ich pracy (b) oraz przesunięciem żurawia z uwagi na wystąpienie kolizji z elementem konstrukcyjnym [11]

przesunięcia żurawi z uwagi na możliwość kolizji z elementami modelu branży konstrukcyjnej.

3.3. Uczenie maszynowe

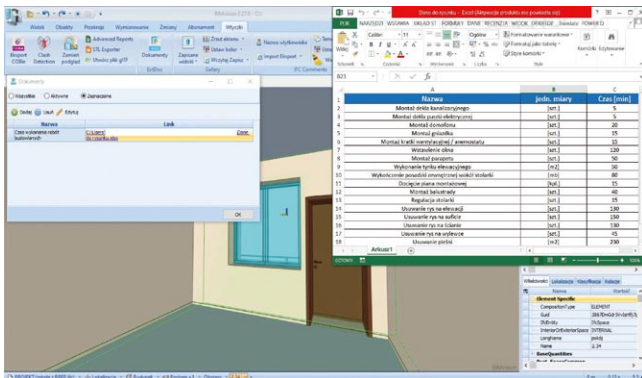
Sztuczne Sieci Neuronowe (SSN), od końca lat 50. XX wieku uznawane są za jedną z ważniejszych metod badawczych sztucznej inteligencji, a dzięki budowie opartej na wzorcach biologicznych układów nerwowych posiadają niezwykle właściwości [12]. Zaletami SSN są m.in. (i) szybki proces przetwarzania informacji wynikający z faktu, że neurony składające się na sieć wykonują przypadające im zadania obliczeniowe równocześnie oraz (ii) zdolność uczenia i uogólniania zdobytej wiedzy.

Pierwszy pokazany przykład dotyczy wykorzystania sieci neuronowych w obliczaniu planowanego czasu realizacji robót budowlanych, który następnie wykorzystywany jest w harmonogramach i symulacjach opartych na modelu BIM. Do rozwiązania tak zdefiniowanego problemu wykorzystano sieci jednokierunkowe, wielowarstwowe – MLP (ang. *Multi-Layer Perceptron*), stosowane w metodzie pn. „uczenie z nauczycielem”. Przy budowie sieci uwzględniano różną liczbę neuronów w warstwie ukrytej i różne funkcje aktywacji w warstwach wejściowej, ukrytej i wyjściowej w celu znalezienia najlepszej alternatywy. Celem uczenia sieci jest jej zdolność do wykorzystania zdobytej wiedzy na nowych przypadkach, które nie uczestniczyły w procesie uczenia (tzw. generalizacja). W procesie uczenia w zależności od rodzaju sieci wykorzystywano różne algorytmy uczące, tj.:

- BFGS (ang. *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*), czyli metodę zmiennej metryki Qasi-Newton,
- gradientów sprzężonych.

Jako kryterium dopasowania sieci pomiędzy odpowiedzią sieci, a wartościami oczekiwanymi przyjęto pierwiastek z uśrednionego błędów kwadratowego RMSE (ang. *Root Mean Squared Error*). Efektem działań na sieciach neuronowych jest otrzymanie czasów realizacji robót wynikających z danych historycznych.

Dane są potrzebne do zautomatyzowanej wymiany danych pomiędzy Revit a zewnętrzną bazą danych poprzez łączenie programu Revit z zewnętrznym plikiem z informacjami o modelu. Model powinien zawierać elementy i parametry projektu, które będą uzupełniane, tj. każdy element będzie posiadał przyporządkowany parametr a ten będzie odpowiednio uzupełniony według potrzeb autora modelu. Kolejną możliwością jest wykorzystanie programu firmy Datacomp – przeglądarki BIMvision. W celu dodawania informacji do modelu lub jego elementów należy jednak rozbudować przeglądarkę BIMvision o wtyczkę (plug-in) pn. „External Documents”. Wykorzystując wtyczkę można dołączyć dane do dowolnych elementów w modelu w postaci podlinkowanego dokumentu, np. bazy danych w pliku MS Excel. Dołączenie podlinkowanej bazy danych w MS Excel, która zawiera informację o czasach wykonania robót budowlanych pokazano na rysunku 7.

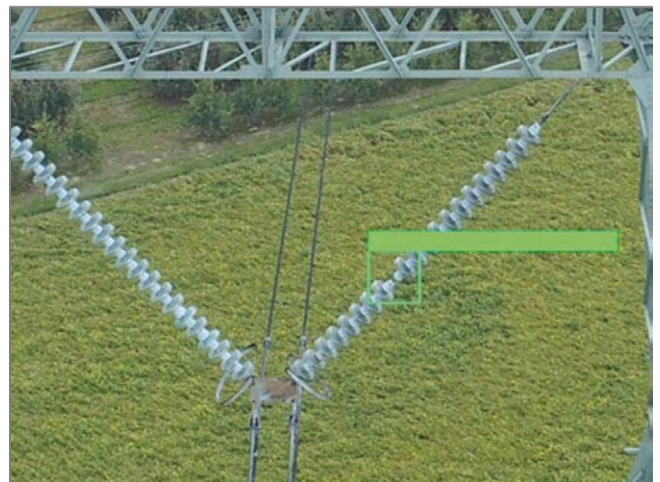


Rys. 7. Dane podlinkowane do modelu BIM za pomocą wtyczki „External Documents” wraz z widokiem otwartej w MS Excel podlinkowanej bazy danych

Dane takie można wykorzystywać w tworzeniu harmonogramu poprzez utworzenie bezpośredniego połączenia z bazą danych. Wykorzystując np. oprogramowanie MS Project można dokonać aktualizacji lub automatycznego wgrania arkusza zasobów z czasami powstałego na bazie wcześniejszych realizacji. Następnie przygotowany i zoptymalizowany harmonogram można zaimportować np. do programu Autodesk Navisworks Manage w celu stworzenia symulacji budowy.

Innym wykorzystaniem możliwości sztucznej inteligencji w połączeniu z modelem BIM może być wykonanie analizy integracji danych przestrzennych, które umożliwią przykładowo detekcję obiektów o różnych cechach fizycznych. Wyuczony model potrafi wykrywać błędy i usterki elementów obrazujących stan poszczególnych elementów w modelu BIM wykonanym na podstawie skanowania laserowego. System może integrować dane z różnych źródeł, w tym dane pozyskane z oblotów bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Operator systemu planuje trasy przelotu dronem, w trakcie którego następuje automatyczne zbieranie danych. Umożliwia to detekcję obiektów o zróżnicowanych

cechach fizycznych, tj.: kształcie, barwie, czy teksturze na zdjęciach [3]. Wyuczony model może wykrywać nieprawidłowości w obiektach budowlanych na podstawie modelu BIM. Do celów detekcji obiektów i ewentualnych usterek wykorzystywane są liczne metody sztucznej inteligencji oparte na technice wizji komputerowej (ang. *computer vision*) i sztucznych sieciach neuronowych (SSN). System taki może np. w przypadku sieci energetycznych identyfikować nieprawidłowości, tj.: brakujące śruby w połączeniach, uszkodzenia izolatorów, uszkodzenia powierzchni elementów, deformacje prętów itp. Przykładowo na rysunku 8 pokazano uszkodzenie izolatora szklanego słupa energetycznego, które zaznaczono w zielonej ramce stanowiącej jednocześnie etykietę z informacjami o usterce zidentyfikowanej w danej lokalizacji.



Rys. 8. Wykrycie usterki – uszkodzony izolator [3]

3.4. Hybrydowe AI

Jednym z przykładów zastosowania hybrydowego AI jest technika wizji komputerowej (ang. *computer vision*). Wizja komputerowa to interdyscyplinarna dziedzina nauki, którą można zdefiniować jako proces analizy obrazów lub filmów video w celu wydobywania przydatnych informacji dających możliwość zrozumienia lub przedstawienia leżącego u podstaw świata fizycznego [13].

Poniżej wyróżniono jedno z najbardziej popularnych zadań z zakresu wizji komputerowej:

- klasyfikowanie obrazu,
- rozpoznawanie obiektów,
- śledzenie obiektów,
- segmentacja.

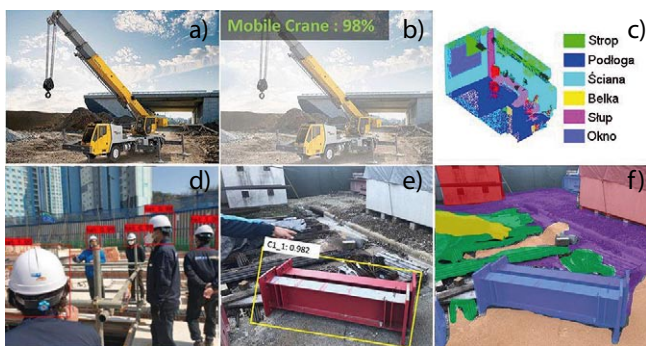
Klasyfikacja obrazu polega na pobraniu obrazu wejściowego i identyfikowaniu „klasy”, do której należy obraz lub określeniu prawdopodobieństwa z jakim obraz należy do określonej klasy. Przykładowo algorytm klasyfikacji obrazów może pobierać obrazy z różnych urządzeń na placu budowy jako dane wejściowe i przypisywać każdemu obrazowi etykietę klasy, tj. „koparka”, „wywrotka”, „wózek widłowy” lub może przyjąć pojedynczy obraz jako dane wejściowe

i podać prawdopodobieństwo, że obraz należy do określonej klasy sprzętu [14]. Przykład klasyfikacji pokazano na rysunkach 9a i 9b.

Rozpoznawanie obiektów jest pojęciem szerszym od klasyfikacji i obejmuje zarówno zadania związane z klasyfikacją, jak i lokalizacją obiektów. Pierwszym zadaniem w rozpoznawaniu obiektów jest identyfikacja tego, co znajduje się na badanym obrazie i z jakim poziomem pewności, co jest zadaniem klasyfikacyjnym. Natomiast kolejnym krokiem jest zlokalizowanie obiektu na obrazie za pomocą technik detekcji i segmentacji. Techniki detekcji wprowadzają przykładowo zaznaczenie obiektu przez wrysowany prostokąt wokół rozpoznanego obiektu (ang. *bounding box*), który jest wygenerowany metodą regresji (rys. 9e).

Śledzenie obiektów jest techniką używaną do śledzenia obiektów poruszających się w serii klatek wideo przy jednoczesnym zachowaniu ich tożsamości i trajektorii. Obiektami docelowymi mogą być np. robotnicy budowlani. Proces śledzenia obiektów rozpoczyna się od identyfikacji obiektów i ich wykrywania, przypisania identyfikatorów każdemu zidentyfikowanemu obiektowi na obrazie, a w kolejnych klatkach identyfikacji nowej pozycji tego samego obiektu. W ten sposób można śledzić zarówno czynności wykonywane przez robotników, trasy ruchu, a także identyfikować, czy robotnik ma np. założony kask (rys. 9d) lub kamizelkę.

Segmentacja to proces rozpoznawania, ale i próby zrozumienia tego, co znajduje się na obrazie. Celem segmentacji jest nadanie każdemu pikselowi na obrazie etykiety na podstawie tego, co dany piksel reprezentuje. W ten sposób obrazy są dzielone na różnego rodzaju obszary, które identyfikują objekty i ich granice, aby możliwe było uproszczenie obrazu i zwiększenie wydajności w jego analizie. Przykłady segmentacji pokazano na rysunkach 9c i 9f.



Rys. 9. Przykładowe zadania wykonywane w ramach wizji komputerowej; źródło: opracowanie własne na podstawie [14, 15, 16]

4. Podsumowanie

Integracja sztucznej inteligencji – AI z technologią BIM pozwala na przyspieszenie i ulepszenie procesu podejmowania decyzji. Sztuczna inteligencja, wykorzystując duże ilości

danych, umożliwia tworzenie prognoz oraz optymalizację harmonogramów robót budowlanych.

Sztuczna inteligencja daje ponadto możliwość ulepszenia procesu tworzenia nowych projektów na podstawie projektów wcześniej opracowanych (zrealizowanych) oraz tworzenia bardziej szczegółowych wizji komputerowych, a także zestawień i różnego rodzaju analiz.

Dodatkowo połączenie AI z technologią BIM daje możliwość wspomaganie symulacji robót budowlanych, analiz sposobów ewakuacji ludzi z budynku oraz tworzenia wirtualnych systemów szkoleniowych symulujących różne rzeczywiste sytuacje, np. na potrzeby szkoleń BHP robotników budowlanych poprzez symulację sytuacji wypadkowych możliwych do zaistnienia w warunkach budowy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zhang F., Chan A. P. C., Darko A., Chen Z., Li D., Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry, *Automation in Construction*, 7/2022, str. 104289
- [2] Borkowski A. S., Michałkiewicz A., Technologia BIM w procesie realizacji inwestycji budowlanych: studia przypadków firmy SXD Polska, *Builder* 2/2022, str. 24–29
- [3] Szarata A., Nowoczesne technologie w budownictwie LiDAR, BIM, GIS, AI – wybrane zagadnienia, *Przegląd Budowlany* 3–4/2022, str. 64–69
- [4] Zima K., Mitera-Kiełbasa E., Employer's Information Requirements: A Case Study Implementation of BIM on the Example of Selected Construction Projects in Poland, *Applied Science* 11/2021, str. 10587
- [5] Okudan O., Budayan C., Dikmen I., A knowledge-based risk management tool for construction projects using case-based reasoning, *Expert Systems with Applications* 173, 2021, str. 114776
- [6] Zou Y., Kiviniemi A., Jones S.W., Retrieving similar cases for construction project risk management using Natural Language Processing techniques, *Automation in Construction* 80, 2017, str. 66–76
- [7] Zima K., Biel S., The Concept of Method of Detecting and Analyzing Construction Defects in Residential Buildings, *Archives of Civil Engineering* 65, 2019, str. 81–95
- [8] Brezočník L., Fister I. Jr, Podgorelec V., Swarm intelligence algorithms for feature selection: a review, *Applied Sciences* 8(9), 2018, str. 1521
- [9] Lien L.C., Cheng M.Y., A hybrid swarm intelligence based particle-bee algorithm for construction site layout optimization, *Expert systems with applications* 39(10)2012, str. 9642–9650
- [10] Hou L., Zhao C., Wu C., Moon S., Wang X., Discrete firefly algorithm for scaffolding construction scheduling. *Journal of Computing in Civil Engineering* 31(3)2017, str. 04016064
- [11] Wang J., Zhang X., Shou W., Wang X., Xu B., Kim M.J., Wu P., A BIM-based approach for automated tower crane layout planning, *Automation in Construction* 59, 2015, str. 168–178
- [12] Leśniak A., Wspomaganie decyzji wykonawcy budowlanego z zastosowaniem sztucznej inteligencji, *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, t. XXXIII, z. 63 (1/I/16), 2016, str. 189–196
- [13] Huang M. Q., Ninić J., Zhang Q.B., BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives, *Tunnelling and Underground Space Technology* 108, 2021, str. 103677
- [14] Paneru S., Jeelani I., Computer vision applications in construction: Current state, opportunities & challenges, *Automation in Construction* 132, 2021, str. 103940
- [15] Liang H., Seo S., Automatic Detection of Construction Workers' Helmet Wear Based on Lightweight Deep Learning, *Applied Sciences* 12/2022, str. 10369
- [16] Ma J. W., Czerniawski T., Leite F., Semantic segmentation of point clouds of building interiors with deep learning: Augmenting training datasets with synthetic BIM-based point clouds, *Automation in Construction* 113, 2020, str. 103144