

ARCHITEKTURA WSPOMAGANA MECHATRONIKĄ. ROBOT AIDED DESIGN

JERZY WOJTOWICZ, STEFAN WRONA

STRESZCZENIE

Integrowanie projektowania i mechatroniki prowadzi ku nowej domenie architektury. Robotyka staje się obecna w twórczych procesach projektowania, modelowania i budowania architektury społeczeństwa wiedzy. Powstaje nowa architektura, która może reagować na zmienne warunki środowiska oraz zmienne wymagania funkcjonalne. Robotyka umożliwia współpracę projektanta i użytkownika w tych procesach. Wybrane przy-

kłady świadczą, że fabrykacja i montaż elementów architektury z wykorzystaniem robotów jest zjawiskiem potencjalnie istotnym w przekształceniach miasta i jego architektury.

Słowa kluczowe: architektura, mechatronika, robotyka, projektowanie, fabrykacja, montaż, automatyzacja budownictwa, architektura kinetyczna

ROBOT AIDED DESIGN. ARCHITECTURE WITH MECHATRONICS

ABSTRACT

The new phenomena resulting from the integration of architecture and mechatronics are discussed. In the society of knowledge, design, modeling, fabricating and assembling of architecture with robotics can be seen as part of creative design process. The use of robotics and automation affects the practice and world of architecture. Fabrication and assembly of structures and elements of building using robots is an important phenomenon, as

illustrated by the cited examples. Kinetic architecture becomes a form of interface that responds to changing conditions context and to dynamic user requirements.

Key words: architecture, mechatronics, robotics, design, fabrication, assembly, automation of construction, kinetic architecture

1. Zarzy technik komputerowych w architekturze

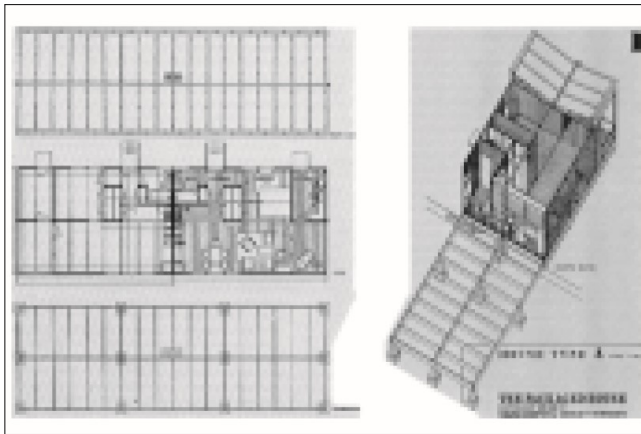
Projektowanie wspomagane komputerowo pozwala na tworzenie form, często inspirowanych światem przyrody i matematyką, odbiegających od klasycznie stosowanych form prostopadłościennych. Nowe geometrie wymagają nowych narzędzi, a te – w tym szczególnie roboty – pozwalają na fa-

brykację i montaż projektów powstających w środowisku cyfrowym. Rozwój metod komputerowych dał początek zapotrzebowaniu na narzędzia precyzyjne, sterowane cyfrowo, umożliwiające zrealizowanie wizji współczesnych architektów.

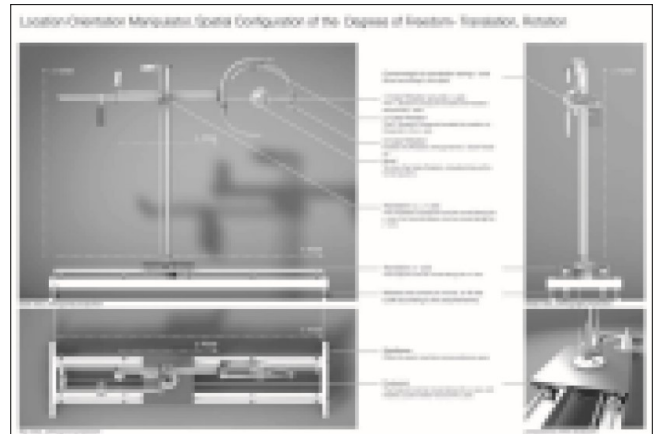
Narodziny dyscypliny określanej dziś mianem grafiki komputerowej zapoczątkował doktorat Ivana Southerlanda na MIT¹. Zaledwie cztery lata później

¹ I. Sutherland stworzył pierwszy interaktywny i parametryczny program graficzny w 1963 roku, opublikowany w jego

doktoracie *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System*, MIT, 1964.



a



b

1a. Packaged House zaprojektowany przez K. Wachsmanna i W. Gropiusa w 1942 r.;

1b. Rekonstrukcja Location Orientation Manipulator, wczesnego robota wg projektu Waschsmanna, z siedmioma stopniami swobody

1a. Packaged House designed by K. Wachsmann and W. Gropius in 1942;
1b. Reconstruction of Location Orientation Manipulator, Waschsmann's early robot, with seven degrees of freedom

student architektury i przyszły dyrektor MIT Media Lab, Nicolas Negroponte opublikował artykuł *Toward a Theory of Architecture Machines* (W kierunku teorii architektury maszyn), który potem rozwinął w książce.² Negroponte pisał o interakcji i projektowaniu wspomaganym komputerowo. Postulował tam trzy możliwe aspekty, w których maszyny mogą pomagać w procesie projektowania: (1) procedury mogą być zautomatyzowane; (2) istniejące metody mogą podlegać zmianom według specyfikacji i konstrukcji maszyn, ale zmianom poddane są tylko cechy kompatybilne z maszynami; (3) proces projektowania, uważany za ewolucyjny może być udostępniony maszynie, również uważanej za ewolucyjną.

W 1982 powstała pierwsza wersja programu CAD (*Computer Aided Design*) masowo zaakceptowanego przez architektów. Autocad był przeznaczony do dwuwymiarowego (2D), płaskiego projektowania schematów i układów elektronicznych. Początkowo używany był do opracowywania rysunków roboczych na komputerach IBM PC, które w tym okresie wchodziły na rynek. Wkrótce połączono z komputerem pierwsze zautomatyzowane urządzenia peryferyjne – dot matrix printer i vector ploter używający wymiennych pióra lub pisaków, a kilka lat później rozpowszechniły się frezarki laserowe, drukarki 3D i routery CNC 3-osiowe. Urządzenia te przekształcały instrukcje cyfrowe na format analogowy, dzięki czemu szybkie prototy-

powania i modelowanie wstępnych projektów stało się ważną częścią designu. Szerokie zastosowanie cyfrowych urządzeń peryferyjnych, a także akceptacja komputerów osobistych i rozwój współpracy w zakresie dystrybucji w sieciach, radykalnie zmieniły praktykę architekta. Proces tworzenia projektu otworzył tę drogę projektowania nie tylko profesjonalistom, ale także klientom i opinii publicznej. Znaczenie cyfrowo nagranych projektu zostało lakonicznie uchwycone przez Billa Mitchella, który przewidywał BIM (ang. Building Information System): „*Design today could be seen as report from the current state of the project database.*”³

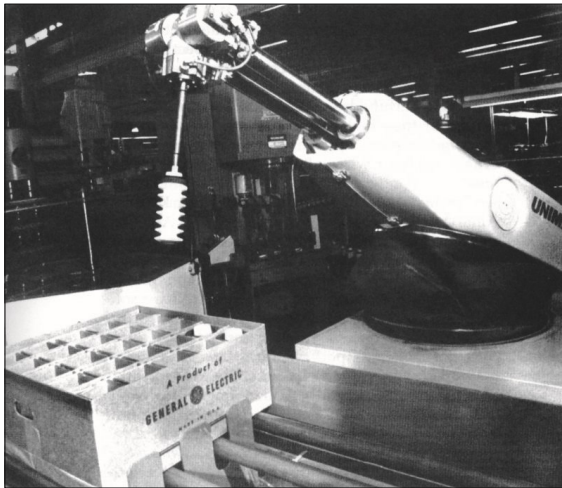
Wizja Negropontego, zawarta w jego pierwszej książce⁴, nakreśliła nową praktykę projektowania oraz rolę robota-projektanta. Autor zwrócił uwagę na to, że techniki grafiki komputerowej stały się paradygmatem systemów wspomaganých komputerowo, a maszyny w architekturze „muszą mieć oczy i uszy”. W obecnej kulturze ta myśl jest jeszcze dziwna, stwierdził Negroponte, ale dla naszych dzieci będzie to już zwykłe zdarzenie.

Prefabrykacja i masowa produkcja przemysłowa była w centrum zainteresowań modernistów i od początku stanowiła ważną część etosu architektury modernistycznej. Prefabrykowany Packaged House System, autorstwa Konrada Wachsmanna i Waltera Gropiusa, który powstał w 1940 roku stanowi ciekawy przypadek (il. 1a). Gropius widział maszynę jako potencjalnie dehumanizującą siłę, którą musiał

² N. Negroponte, *The architecture machine*, MIT Press, 1970, s. 6.

³ W. J. Mitchell, *The Logic of Architecture*, MIT Press, 1990.

⁴ N. Negroponte, *Toward a Theory of Architecture Machines*, „*Journal of Architectural Education*”, March 1969, s. 12.



a



b

2a. Unimate – pierwszy robot przemysłowy na linii montażowej GM, 1961 r.;

2b. Zastosowanie robota pozwoliło firmie Skanska Norway na wielokrotnie szybszy montaż sufitów niż w przypadku ekipy budowlanej; praca robota była możliwa dzięki bieżącemu przesyłaniu danych ze środowiska BIM, przy wykorzystaniu dynamicznego modelu informacji budowlanych

2a. Unimate – the first industrial robot on GM assembly line, 1961;

2b. The use of the robot allowed Skanska Norway to speed up the assembly of ceilings several times faster than in the case of a construction team; the work of the robot was possible thanks to the ongoing transmission of data from the BIM environment, using a dynamic building information model

kontrolować człowiek. Wachsmann zwykł mawiać „*Tomorrow is everything*” (Jutro jest wszystkim) i postrzegał technologię jako siłę zdolną wyzwolić pełny potencjał architektury. Wkrótce potem Wachsmann opracował Location Orientation Manipulator z siedmioma stopniami swobody (il. 1b), robotyczny układ dedykowany zautomatyzowanemu montażowi elementów budowlanych tego systemu. Pół wieku później Thomas Bock ocenił podejście Wachsmanna jako krytyczną misję wprowadzenia całkowicie zautomatyzowanych systemów budowlanych. „*To podejście jest oznaką cennego spojrzenia na współzależności między systemami produkcji, montażu i składania elementów a systemami projektowania i budowania. Ten rodzaj holistycznego podejścia do technicznych i technologicznych potrzeb i wymagań systemów budowlanych, produkcyjnych i montażowych jest obecnie znany jako Robot Oriented Design.*”⁵

Pierwsze nowoczesne roboty przemysłowe powstałe w 1960 roku takie, jak Unimate (il. 2a) użyty na linii montażowej General Motors były odległe od praktyki projektowania architektonicznego tamtych czasów. Obecnie – w erze przemysłu 4.0⁶ – robotyka i architektura nie są już obcymi sobie dziedzi-

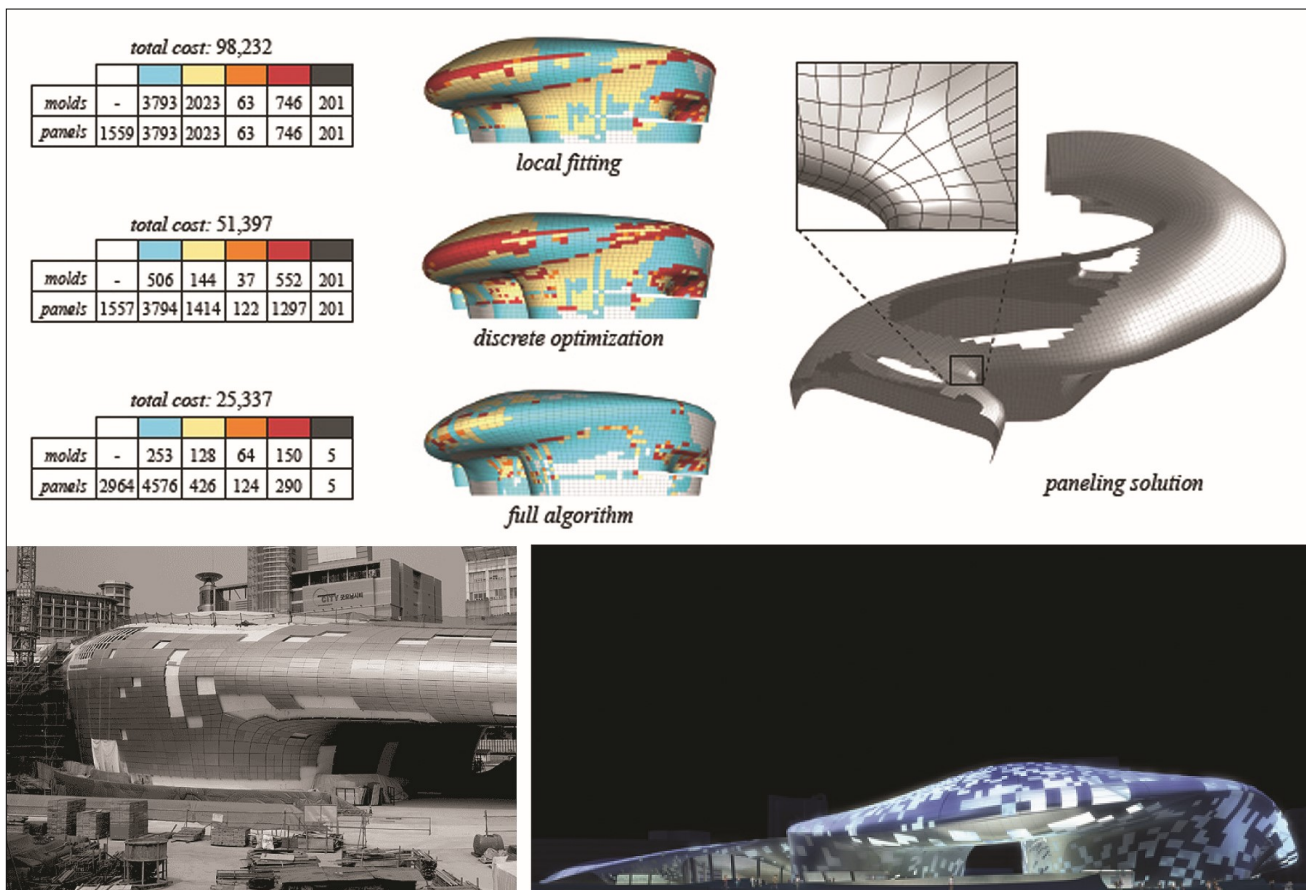
nami. Prototypowanie na maszynach sterowanych numerycznie i budowanie cyfrowych koncepcji architektonicznych prowadzi do zastosowania robotyki w modelowaniu, wytwarzaniu i montażu. W przemyśle motoryzacyjnym i elektronicznym zastosowanie automatyzacji jest już szeroko rozpowszechnione. Robotyka i automatyzacja w budownictwie mają też wielki potencjał, a ich zastosowanie na szeroką skalę w praktyce budowlanej wpłynie wkrótce na projekty, edukację i praktykę zawodową. W niedalekiej przyszłości pojawią się samodzielne, pracujące w sieci systemy robotów, konstruujące produkty zaprojektowane na potrzeby specyficznego użytkownika w czasie rzeczywistym, kontrolujące wszechobecne i elastyczne środowiska budowy.

2. Parametryzacja, optymalizacja, prototypowanie, fabrykacja i montaż

Zmienność parametru wynikającego z funkcji, formy lub czynników środowiskowych projektu jest istotną konsekwencją wykorzystania robotów w architekturze. „*Jest teraz możliwe traktowanie programowania komputera i formy architektonicznej*

⁵ T. Bock, W. V. Lauer, *Location Orientation Manipulator* by Konrad Wachsmann, John Bollinger and Xavier Mendoza, *Automation and Robotics in Construction (ISARC 2010)*, s. 9.

⁶ M. Olszewski, *Mechatronizacja produktu i produkcji – przemysł 4.0*, PAR, nr 3, 2016.



3. Optymalizowany podział na panele powłoki zaprojektowanego przez Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, Seoul, 2015 r.

3. Optimized shell panels division designed by Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, Seoul, 2015

jak procesy współzależne, a także ich wzajemność jako związek fundamentalny w erze cyfrowej.”⁷

Aby architekci mogli tworzyć i wznosić budynki za pomocą robotów, baza danych projektowych musi być dostępna w formacie cyfrowym. Gdy dane te są używane „w czasie rzeczywistym”, podczas projektowania, optymalizacji, prototypowania i budowania, stosowanie robota daje szansę na zrewolucjonizowanie pracy architekta.

Projektant zostaje swego rodzaju cyfrowym rzemieślnikiem, a jego proces twórczy, odzyskuje bezpośredni kontakt z placem budowy. Automatyzujące się narzędzia dają szansę na dynamiczne dopasowywanie projektu do zmieniających się warunków nawet podczas samego procesu budowy. Zmiana cyfrowego zapisu informacji o projekcie umożliwi dynamiczną zmianę realizowanego projektu, bez konieczności zmiany narzędzia. W BIM modelowanie informacji o budynku odgrywa ważną rolę w tym procesie. W przeciwieństwie do tradycyjnych programów CAD,

jest to nie tylko proces generowania, ale również zarządzanie cyfrowymi obrazami fizycznych i funkcjonalnych aspektów architektury przez cały czas jej życia. BIM w połączeniu z robotyką wchodzi już do branży budowlanej. Roboty zintegrowane z BIM są coraz częściej wykorzystywane na placach budowy (il. 2b).

Parametryzacja pozwala na produkowanie wielu zróżnicowanych geometrycznie wersji projektu, co oczywiście wymaga jego optymalizowania. Tworzenie bogatych geometrycznie struktur i obiektów jest możliwe dzięki jednoczesnemu generowaniu informacji do ich produkcji z wykorzystaniem narzędzi cyfrowych. Model parametryczny może być modyfikowany, optymalizowany i prototypowany przy zastosowaniu robotyki, a po końcowej produkcji jego fragmentów będzie budowany i montowany także przy użyciu robota. Jednym z przykładów wygenerowania trójwymiarowej struktury i podziału jej na elementy umożliwiające prefabrykację (panele elewacyjne) jest Dongdaemun Design Plaza w Seulu,

⁷ M. Kohler, et al., *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*, Park, 2015, s. 9.



4. Projekt DIANA (Dynamiczny Interaktywny Robotyczny Asystent dla Nowych Aplikacji), 2016 r.
4. Project DIANA (Dynamic Interactive Robotic Assistant for Novel Applications), 2016

projektu Zaha Hadid Architects. W produkcji form (czyli kopyt) paneli zastosowane zostały roboty, jednak montaż był wykonany dzięki taniej sile roboczej metodami konwencjonalnymi, co wpłynęło na wydłużenie czasu realizacji. Aby architektura osiągnęła w pełni poziom Industry 4.0, montaż musiałby zostać całkowicie zautomatyzowany z wykorzystaniem narzędzi robotycznych (il. 3).

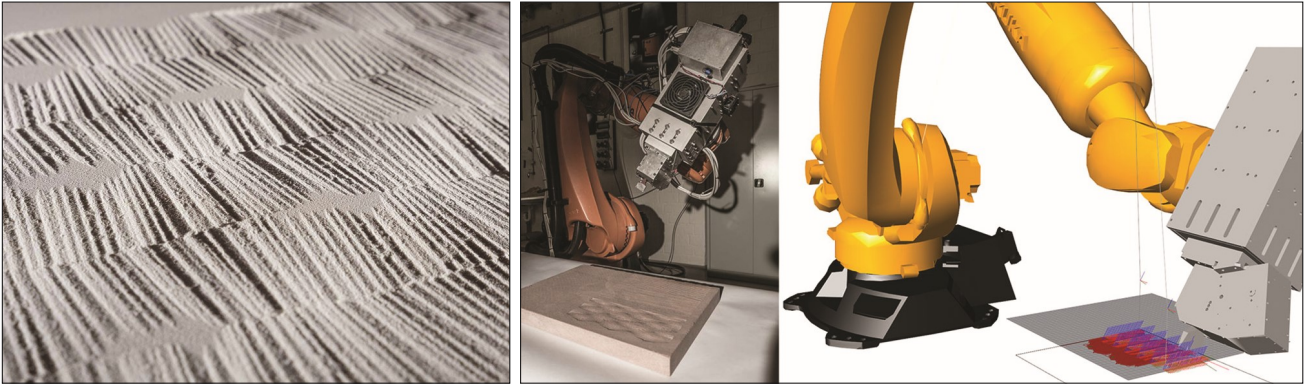
W projekcie DIANA (Dynamic Interactive Robotic Assistant for Novel Applications)⁸ Kuka robot wykorzystywany był do montażu nieregularnie ustawionych w przestrzeni elementów drewnianych. Założona geometria i materiał wymagały wykorzystania techniki montażowej umożliwiającej wykrywanie dynamiczne i reagowanie narzędzia na wszelkie odchylenia od założonego wymiaru (il. 4). W projekcie zastosowano siedmioosiowy robot The KUKA LBR-iiwa, który wyróżnia się tym, że dla każdej z osi, podczas pracy mierzony jest moment obrotowy. Czujniki momentu zostały tu wprowadzone w celu umożliwienia bezpiecznej współpracy robota z człowiekiem i ustępowania ramion robota przed napotkaną przeszkodą po osiągnięciu zadanego momentu oraz programowanie poprzez ręczne prowadzenie ramienia robota przez

operatora. W projekcie DIANA czujniki te zostały wykorzystane do wykrywania niedokładności podczas montażu i samego składania elementów, aby zrekompensować duże niedokładności występujące na placach budowy. Projekt DIANA miał stać się ważnym krokiem do implementacji przemysłu 4.0 w procesie montażu elementów na placu budowy.

Roboty jako narzędzie do obróbki materiałów wykończeniowych używanych przez architektów, zostały wykorzystane w projekcie badawczym AROSU Milestone⁹, Artistic Robot Surface Processing for Stone, prowadzonym przez Sigrid Brell-Cokcan, Thomasa Bocka i Andream Müllera, finansowanym ze środków Unii Europejskiej. Celem badań było, między innymi, odtworzenie struktury kamienia obrabianego ręcznie, ale przy wykorzystaniu robota. Współcześnie brakuje fachowych rzemieślników, którzy są w stanie obrobić powierzchnię kamienną zgodnie z historycznym wzorcem. Wcześniejsze próby zautomatyzowania procesu nie zakończyły się uzyskaniem satysfakcjonujących i jednorodnych rezultatów, które przypominałyby rezultaty ręcznej obróbki. Badania obejmowały szczegółową analizę ruchu dłuta podczas

⁸ S. Stumm, J. Braumann, M. von Hilchen, S. Brell-Cokcan, *On-Site Robotic Construction Assistance for Assembly Using A-Priori Knowledge and Human-Robot Collaboration*, [w:] A. Rodić, T. Borangiu (red.), *Advances in Robot Design and Intelligent Control. RAAD 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing*, materiały konferencyjne, t. 540, Springer, Cham, 2017.

⁹ J. Brüninghaus, S. Stum, J. Nelles, A. Mertens, Ch. Schlick, S. Brell-Cokcan, *Arbeitsorganisatorische und ergonomische Anforderungen an die Mensch-Roboter-Interaktion auf der Baustelle der Zukunft, Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA)*, At Aachen, 2016.



5. Powierzchnia uzyskana przez obróbkę kamienia przy użyciu robota – wynik projektu badawczego Artistic Robot Surface Processing for Stone

5. Surface obtained by stone processing using a robot – result of research project Artistic Robot Surface Processing for Stone



© Gramazio Kohler Research, ETH Zurich



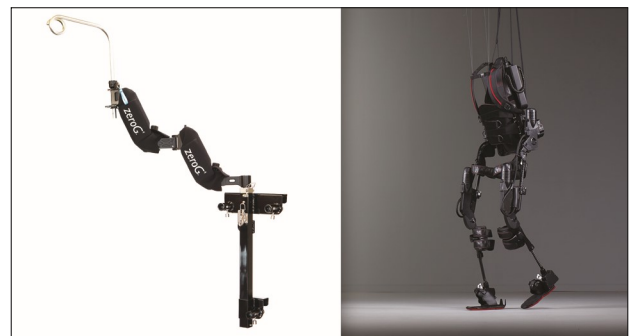
6. Winiarnia w Gantenbein projektu Gramazio & Kohler, 2006 r.

6. Wine cellar in Gantenbein, project Gramazio & Kohler, 2006

ręcznej obróbki oraz implementację uzyskanych reguł w pracy urządzenia wykonawczego (il. 5).

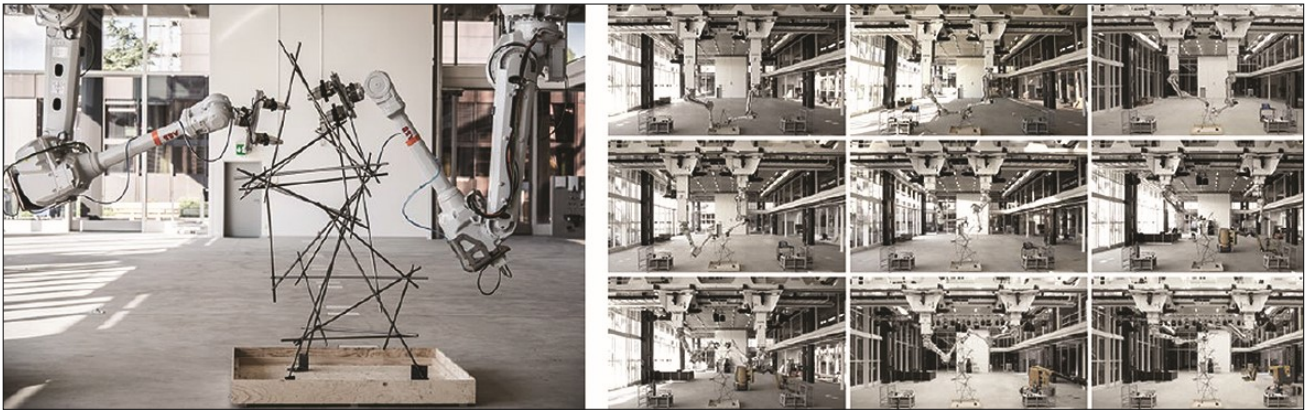
Jednym z pierwszych pomysłów na wykorzystanie robotów do automatycznego montażu w budownictwie było wznoszenie ceglanych murów, w których forma i rozmieszczenie poszczególnych cegieł odbiegały od klasycznych, płaskich struktur. Projekt UE ROCCO, Robot Construction System for Computer Integrated Construction został opracowany przez konsorcjum badawcze i partnerów przemysłowych z Niemiec, Hiszpanii i Belgii. Zaproprowany układ miał 10 m zasięgu i udźwig do 500 kg. Cztery lata później zmodyfikowano tę metodę na ETH i zastosowano do projektowania i budowy składów winnicy w Gantenbein przez Gramazio & Kohler. 20 000 cegieł ustawiono zgodnie ze złożonym wzorem generowanym w programie parametrycznym. Cegły ustawione w pożądanej pozycji zostały przygotowane w formie prefabrykowanych paneli i wykorzystane w takiej formie do budowy ścian winiarni (il. 6).

Oprócz wykorzystania robota do układania cegieł, stosowane są rozwiązania ułatwiające i przyspieszające wnoszenie systemów stalowych, słupowych i słupowo-belkowych. Japoński robot mobilny WR służy do wykonywania spawów konstrukcji na terenie budowy. Wykorzystywany jest on do słupów i belek o grubości do 100 mm i przekroju okrągłym, kwadratowym lub dwuteowym.

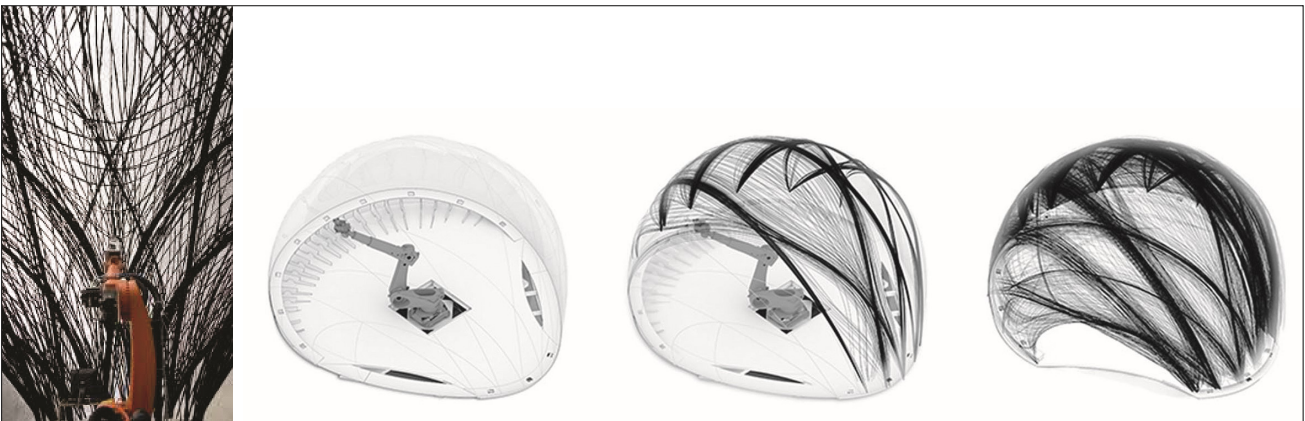


7. Egzoszkielet wspierający pracę robotników budowlanych

7. An exoskeleton supporting the work of construction workers



8. Spektrometria konstrukcji przestrzennych, Gramazio & Kohler, ETH Zurich Fabricate, 2017 r.
8. Spectrometry of spatial constructions, Gramazio & Kohler, ETH Zurich Fabricate, 2017



9. Instalacja Water Spider Pavilion, TU Stuttgart, projekt Achim Menges, 2014/2015 r.
9. Water Spider Pavilion installation, TU Stuttgart, project Achim Menges, 2014/2015

Automatyzacja i robotyzacja procesu wznoszenia budynku, może budzić szczególne zainteresowanie w przypadku budynków wysokich. Przykłady realizacji wieżowców tą metodą można odnaleźć w Japonii. Jednym z najbardziej znanych i cennych przykładów jest SMAT opracowany przez Shimizu (Miyatake, 1993). System składa się z mobilnej fabryki zlokalizowanej na powstającym budynku, umożliwiającej montaż pojedynczej kondygnacji. Po wykonaniu danego piętra, fabryka ta podnoszona jest ku górze tak, aby móc przystąpić do montażu kolejnej kondygnacji.

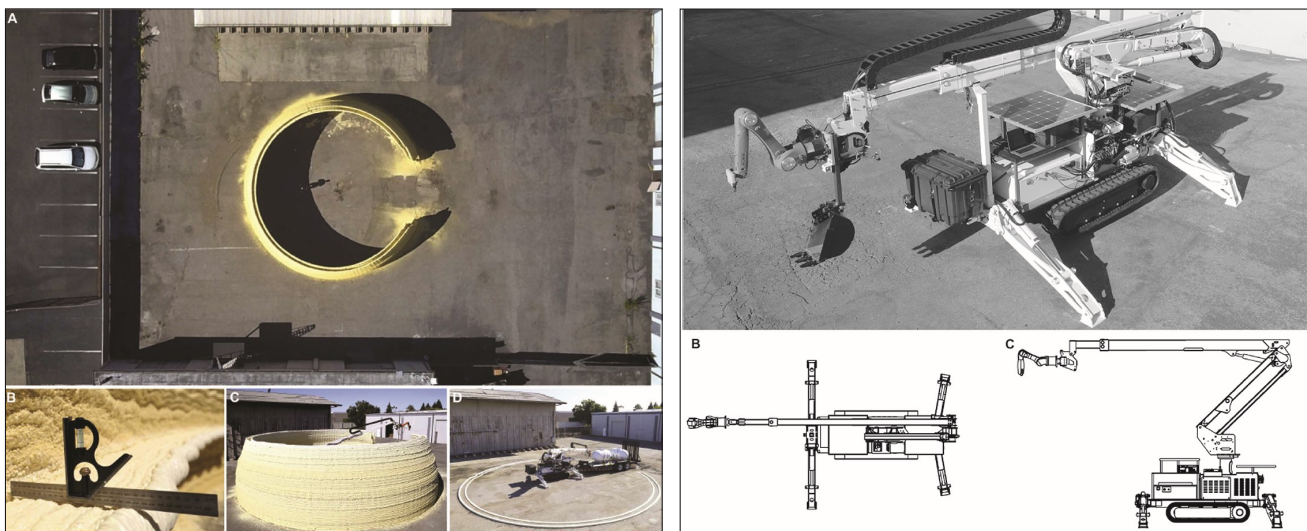
Co roku wielu pracowników budowy ulega wypadkom podczas pracy. Bezpieczeństwo operatorów na budowie jest ogromnie ważne. Rozwiązania takie, jak egzoszkielety chroniące pracowników przed przeciążeniami (il. 7) czy systemy GPS, odpowiadające za kontrolę lokalizacji pracowników, pomagają w unikaniu niebezpiecznych wypadków. W celu monitorowania sytuacji na budowie i unikania niebezpiecznych konfliktów, zarówno pra-

cownicy, jak i wybrane elementy konstrukcyjne, mogą być wyposażeni w kamery i nadajniki GPS. System GPS wykorzystywany jest do gromadzenia danych i umożliwia zautomatyzowanie wybranych procesów przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa ludzi.

3. Realizacje

Dla ilustracji zrealizowanych zastosowań robotów i aktuatorów mechatronicznych do procesu wznoszenia elementów budowlanych zaprezentowane zostały wybrane przykłady prac badawczych prowadzonych na wiodących wydziałach architektury oraz rozwiązania robotyczne wspierające roboty budowlane wdrażane i realizowane w Japonii.

Obecność robotów przemysłowych w laboratoriach badawczych uczelni technicznych jest dziś powszechna, nie wyłączając pracowni architektonicznych. W ETH robotyzacja jest głównym elementem



10. MIT Robotic, mobilna jednostka budowlana na platformie samojezdnej wykorzystująca druk 3D jako addytywne technię wytwarzania konstrukcji kopuły o średnicy 13 metrów

10. MIT Robotic, a mobile construction unit on a self-propelled platform that uses 3D printing as an add-on 13 m diameter dome construction technology

badania i prototypowego rozwoju procesu budowlanego¹⁰. Powstało tam nowe podejście do konstrukcji nieregularnych struktur przestrzennych, gdzie sześciokościowy robot potrafi precyzyjnie ustawiać elementy oraz interpretować swoją pozycję w stosunku do otoczenia (il. 8). Działanie robotem pozwala na precyzję konstrukcji nieosiągalną dla człowieka.

W projekcie Water Spider Pavilion realizowanym na TU Stuttgart w instytucie Achima Mengesa przemysłowy robot został zastosowany do nanoszenia włókna węglowego na wewnętrzną powierzchnię nadmuchiwanego konstrukcji membranowej. Robot rozprowadzał materiał w momencie wykrycia powierzchni bazowej, co było możliwe dzięki dynamicznemu pomiarowi nacisku narzędzia na powłokę (il. 9).

Artykuł niedawno opublikowany w „Science Robotics”, zatytułowany: *Architectural Robot, Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales*¹¹ (Robot architektoniczny, zaprojektowany dla konkretnego miejsca i samowystarczającego robotycznego wytwarzania na skalę architektoniczną) powstał w MIT Media Lab. Autorzy opisali robota na platformie jezdnej. Mógłby on wykonać i montować skomplikowane układy konstrukcyjne i szybko dostosowywać się do specyficznych dla danego miejsca ograniczeń (il. 10). Ten

automatyczny system, służący konstrukcji struktur architektonicznych, wykorzystuje lokalne informacje środowiskowe do zarządzania procesem. Zdolności gromadzenia danych mogą też bezpośrednio wspomagać szczegółowe obliczenia konstrukcyjne, generować użyteczne zbiory danych i opisywać szczegółowo konstrukcję.

Podczas gdy na wielu uczelniach realizowane są projekty badawcze, w Japonii mechaniczne marzenia stają się rzeczywistością. Można zaryzykować stwierdzenie, że Japonia jest dziś budowana przez roboty. Zautomatyzowany proces budowania narodził się w tam na początku lat osiemdziesiątych. Niedobory siły roboczej i starzejące się społeczeństwo wymusiły zwiększenie wydajności pracy, co osiągnięto dzięki zastosowaniu jednorodnych robotycznych systemów, wspierających pracę operatorów-ludzi. W czasach pierwszej fazy automatyzacji procesu budowlanego to właśnie ludzie mieli dostarczać informacje sensoryczne, których pozyskiwanie przy udziale technologii było zbyt skomplikowane i trudne do pomyślnego zautomatyzowania. O zasadach, na których obecnie opiera się japoński system montażu elementów budowlanych pisze Mark Taylor¹², który dzieli japońskie systemy automatyki na cztery podstawowe elementy: osłona

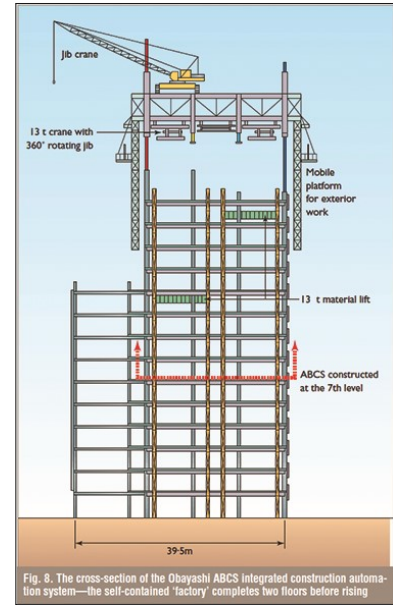
¹⁰ K. Gramazio, et al., 2014. ETH – Eidgenössische Technische Hochschule.

¹¹ J. Keating, et al., *Architectural Robot, Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales*, „Science Robotics”, t. 2, wyd. 5, 2017.

¹² M. Taylor, et al., *Automated construction in Japan*, materiały konferencyjne, ICE 2003, s. 34-41.



a



b

Fig. 8. The cross-section of the Obayashi ABCS Integrated construction automation system—the self-contained 'factory' completes two floors before rising

11. Robotyzacja w dużej i małej skali w Japonii: a – robot opracowany przez Shimizu Corp, pomaga pracownikom budowlanym w układaniu prętów stalowych – robot podnosi stal, a pracownicy kontrolują pozycję przeniesionego elementu; b – zintegrowany Obayashi Automated Building System Budowy dla wysokich projektów

11. Large and small scale robots in Japan: a – the robot developed by Shimizu Corp helps construction workers in laying steel bars – the robot lifts steel and workers control the position of the item being transported; b – integrated Obayashi Automated Building Construction System for high-end projects

platformy roboczej, system podnośnikowy, zautomatyzowany system przenoszenia materiałów i zintegrowane centrum sterowania na placu budowy.

Wśród przykładowych zintegrowanych systemów automatyki budowlanej jest System Automatyki Budowlanej (ABCS) firmy Obayashi Corporation oraz system Big-Canopy. Powszechne i długoletnie stosowanie zautomatyzowanych systemów budowlanych skutkuje poprawą bezpieczeństwa produkcji i ogromnym społecznym zaakceptowaniem samej automatyki (il. 11).

Według ostatniego artykułu w majowym wydaniu „The Japan Times”, place budowy czeka nowa fala automatyki. Około 30 procent wszystkich japońskich pracowników budowlanych osiągnęło lub przekroczyło 55 lat. Ze względu na rosnący niedobór pracowników coraz powszechniejsze staje się wykorzystywanie robotów i dronów do podnoszenia ciężkich elementów. Kajima, największa firma budowlana w Japonii wykorzystuje na placach budowy między innymi drony, bezzałogowe jednostki latające, które zbierają dane lotnicze i wykorzystują

technologię GPS. Korzystając z tabletu indywidualny robotnik kieruje zaprogramowanym ciężkim sprzętem i obsługuje sekwencję zadań wykonywanych przez pięć maszyn, które wysypują glebę i formują powierzchnię. Tu automatyzacja prowadzi niewątpliwie do wyższego poziomu wydajności.¹³

Prefabrykacja na placu budowy i poza nim stosowana jest na dużą skalę. Wielkoskalowa prefabrykacja (Large Scale Prefabrication) według profesora Thomasa Bocka¹⁴, jest szczególnie skuteczna w Japonii, w środowisku wysokiego poziomu automatyzacji przemysłu budowlanego, który wytwarza 150 000 prefabrykowanych mieszkań w skali roku.

4. Aspekty architektury ruchomej

Projektowanie, budowa i montaż wspomagany przez robotykę to istotny, ale nie jedyny przykład wykorzystywania systemów mechatronicznych w architekturze. Zautomatyzowane i zrobotyzowane środowisko życia umożliwia wspieranie użytkowników, w tym osób starszych i niepełnosprawnych, w wy-

¹³ „The Japan Times”, *Japan's labor-scarce building sites automating, turning to robots, drones*, (22.05.2017).

¹⁴ T. Bock, *Evolution of large-scale industrialization and service innovation in Japanese prefabrication industry*, „Construction Innovation”, t. 12, wyd. 2, s. 156–178.

konywaniu codziennych czynności. Pojawia się też możliwość poprawy i dostosowania parametrów środowiskowych do indywidualnych potrzeb i warunków zewnętrznych.

Mimo że idea stosowania ruchomych elementów w architekturze nie jest nowym pomysłem, czego przykładem są chociażby mosty zwodzone, to jej ukonstytuowanie nastąpiło dopiero na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku. Pozwolił na to rozwój nowych technologii, w tym akuatorów i systemów przetwarzania danych.

Określenie architektura kinetyczna odnosi się do budynków zaprojektowanych z myślą o możliwości wprawienia w ruch elementów struktury obiektu. Jednym z prekursorów nowoczesnej architektury ruchomej był Buckminster Fuller. Z kolei W. Zuk pogłębił zrozumienie pojęcia jej natury kinetycznej w książce *Kinetic architecture*, wydanej w 1970 roku, wyznaczając kierunki architektury ruchomej, między innymi poprzez czerpanie inspiracji ze świata roślin i zwierząt.

Pojęcie architektury responsywnej, odpowiadającej na zmieniające się potrzeby użytkowników oraz zmiany warunków środowiskowych narodziło się w podobnym okresie i zostało określone przez Nicholasa Negroponte jako naturalny produkt wykorzystania komputera w architekturze. Przewidując rolę czujników zintegrowanych z budynkiem pisał, że nie tylko będzie możliwe monitorowanie i regulowanie warunków środowiskowych, ale także ułatwianie zmian w aktywności użytkowników poprzez alokację przestrzeni funkcjonalnych.

Wobec obiektów architektonicznych, które są w stanie zmieniać swoje parametry, funkcję i geometrię – zdanie „*Architecture is a frozen Music*” ogłoszone przez Wolfganga von Goethe¹⁵ przestaje być aktualne. Statyczna przez wieki bryła może być wprawiona w ruch, a ten ma służyć potrzebom użytkowników. Dzięki nowym technologiom bezwładna dotychczas bryła zostaje wzbogacona o roboty, akulatory, czujniki oraz dynamiczne systemy obliczeniowe i sieci. Elementy kinetyczne budynku, które zmieniają jego charakter lub funkcjonalność przestrzeni dostosowującej się do wymogów stawianych przez użytkownika bądź zmienne warunki zewnętrzne, mogą zmieniać swoją pozycję w odpowiedzi na sygnał z czujników lub w wyniku



12. Interactive Wall, Hyperbody, TUD, 2009 r., copyright Festo AG – interaktywność jest tu zastosowana we fragmentach budynku, które wprowadzane są w ruch, odpowiadając na warunki środowiskowe i potrzeby użytkownika; elementy interaktywne zmieniają swoją geometrię za sprawą wbudowanych czujników i siłowników pneumatycznych
FESTO

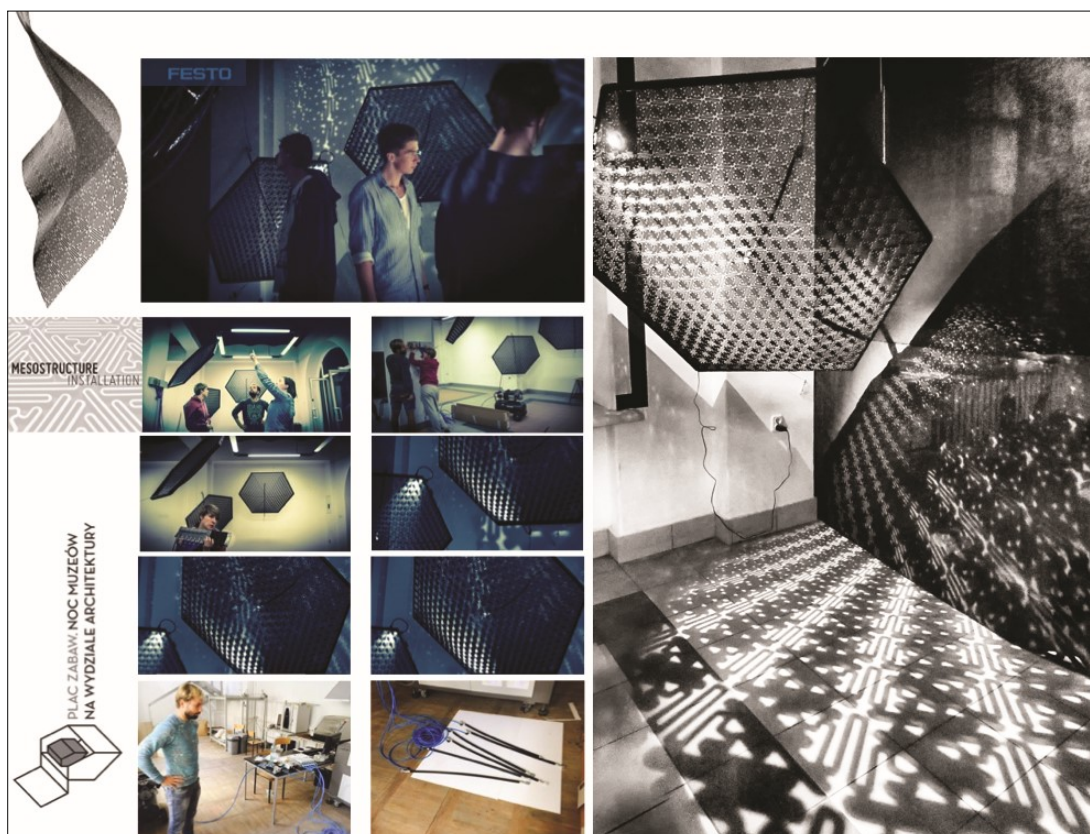
12. Interactive Wall, Hyperbody, TUD, 2009, copyright Festo AG – interaction here is applied to fragments of a building that are put into motion, responding to the environmental conditions and needs of the user; interactive elements change their geometry with built-in sensors and pneumatic actuators
FESTO

implementacji zaprogramowanej sekwencji sygnałów sterujących.

Współczesna architektura może być postrzegana jako system dynamiczny, który zmienia się reagując na otoczenie, a nawet jako organizm zdolny zmodyfikować sam siebie. Pojęcie architektoniki¹⁶ określające dyscyplinę łączącą w sobie architekturę i mechatronikę zostało stworzone w oczekiwaniu na rozwój integracji obu dziedzin. Razem z kontrolowanymi przez użytkownika zautomatyzowanymi

¹⁵ J. P. Eckermann, *Die Baukunst ist eine erstarrte Musik – Conversations with Goethe*, 1829.

¹⁶ J. Wojtowicz, et al., *Architectronics: Towards a Responsive Environment*, “International Journal of Architectural Computing”, t. 9, nr 1, 2011, s. 77–98.



13. Noc Muzeów, ASK, WAPW, FESTO, 2016 r.
13. Night of museums, ASK, WAPW, FESTO, 2016

systemami kinetycznymi wykorzystującymi akulatory, czujniki i roboty, zasługuje na szczegółową analizę i będzie przedmiotem najbliższej publikacji opisującej badania ROBOMoves prowadzone przez autorów artykułu. Poniższy przykład ilustruje potencjał architektury kinetycznej wzbogaconej systemami mechatronicznymi (il. 12). Interaktywność jest tu zastosowana we fragmentach budynku, które wprowadzane są w ruch, odpowiadając na warunki środowiskowe i potrzeby użytkownika. Elementy interaktywne zmieniają swoją geometrię za sprawą wbudowanych czujników i siłowników pneumatycznych FESTO.

Podsumowanie

Warto pamiętać, że historycznie architektura była silnie związana z rozwojem technologii, a wykorzystywanie nowo pojawiających się narzędzi było naturalną praktyką projektową. Dziś zmiany wprowadzone przez rozwój technologii informacyjnych

i rewolucję robotyczną powodują szybką transformację dość przestarzałego przemysłu budowlanego. Dla architektów we współczesnym społeczeństwie wiedzy pojawiają się nowe wyzwania projektowe. Te nowe aspekty oferują interesujące możliwości, ponieważ wdrożenie rozwiązań mechatronicznych wymaga systemowego i interdyscyplinarnego podejścia do rozwiązywania problemów projektowych.

We współczesnej praktyce architektonicznej i edukacji w dziedzinie nauk stosowanych pojawia się nowe podejście „badań przez projektowanie” (research by design). Na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej we współpracy z Wydziałem Mechatroniki badane są aspekty robotyki, techniki informacyjnej i inżynierii materiałów. Projektowanie stanowi tu istotną część procesu badawczego. Współpraca w dziedzinie projektowania odbywa się w czasie regularnych zajęć projektowych programu ASK (Architectural Society of Knowledge). Podczas zajęć w ROBOSTUDIO¹⁷ wykorzystywane

¹⁷ ROBO – przyjęty skrót dla słowa robotyczny, spopularyzowany przez dystopijny film „ROBOCOP” z 1987 r. i postać z francuskiej kreskówki ROBObot z 1980 r.



14. Atrium, ROBOstudio, ASK, WAPW, 2015 r.
14. Atrium, ROBOstudio, ASK, WAPW, 2015

są badania i metody oparte na projektowaniu, które jest rekurencyjnym procesem pytań i propozycji. W epoce społeczeństwa wiedzy proces ten będzie uwzględniać uczestnictwo społeczne, czyniąc projektowanie praktyką refleksyjną. Krytyczna ocena, metody porównawcze i ewaluacja odbywają się poprzez wspólne, multidyscyplinarne rozwiązywanie problemów. Poniżej przedstawiono kilka naszych projektów studyjnych ROBO (il. 13, 14).

Wśród realizowanych w projekcie tematów występuje ROBOconstruct, badający możliwość integrowania architektury i mechatroniki w projektowaniu, prototypowaniu i realizacji budynków. Projekt stara się zrealizować integrację poprzez cyfryzację procesu konstrukcyjnego i wykorzystywanie zaawansowanych materiałów i technologii, w tym robotów. W temacie ROBOsenior projektowane jest także środowisko dla osób starszych i niepełnosprawnych. Jest to interaktywny i modułarny system wspomagany nowymi technologiami, pozwalającymi na kontrolę środowiska domowego i stanu zdrowia mieszkańców. Celem projektu jest opracowanie prototypowego i modułarnego systemu, przeznaczonego również do zautomatyzowanego wsparcia osób starszych. Wzrost długości życia

i niski przyrost naturalny w krajach rozwiniętych sprawiają, że zautomatyzowanie procesów odpowiadających za komfort i bezpieczeństwo seniorów może być jedynym sposobem dla skutecznego zapewnienia im opieki, w obliczu braku kadry pielęgniarskiej.

W niedalekiej przyszłości robotyka w architekturze może być wykorzystana nie tylko do projektowania, wytwarzania, montażu budynków, ale także do uczynienia naszych domów i miast przestrzemią reagującą na zmieniające się warunki zewnętrzne i potrzeby użytkowników. W Polsce szanse tej transformacji są znaczne¹⁸ ze względu na obecny, względnie niski poziom zrobotyzowania. Ale wkrótce idee takie jak przemysł 4.0 będą miały głęboki wpływ na budowanie, projektowanie i realizację projektów architektonicznych i urbanistycznych. *„Można już zaobserwować, że technologia zautomatyzowanego budownictwa, jednozadaniowe roboty budowlane, systemy robotów serwisowych i inne technologie mikrosystemowe łączą się z budowanym środowiskiem, stając się nieodłącznymi elementami budynków, komponentów budowlanych, wbudowanych mebli... Robotyka staje się wszechobecna i zaczyna wieść własne życie tworząc nowe środowisko.”*¹⁹

¹⁸ Dzisiaj trudno jest włączyć Polskę do państw wysoce zrobotyzowanych. Według „Newsweeka” (22.10.2015): w Korei Południowej na 10 000 pracowników przemysłowych przypada 437 robotów, podczas gdy w Polsce jedynie 19 robotów na 10 000 robotników.

¹⁹ T. Brock, *Construction Robotics enabling Innovative Disruption and Social Supportability*, ISARC, materiały konferencyjne, International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius 32, 1–11, 2015.

Bibliografia

- S. Adriaenssens, et al. (red.), *Advances in Architectural Geometry 2016*, vdf Hochschulverlag AG ETH Zurich, (ISBN 978-3-7281-3778-4), Zurich 2016.
- S. Andreani, M. Bechthold, *(Re)volving Brick: Geometry and Performance Innovation in Ceramic Building Systems Through Design Robotics*, [w:] K. Gramazio, et al. (red.), *Fabricate*, gbt Verlag, Zurich 2014.
- M. Bechthold, *Design Robotics: A New Paradigm in Process-Based Design*, [w:] R. Oxman, *Theories of the Digital in Architecture*, Routledge/Taylor & Francis, Abingdon 2014.
- M. Bechthold, *Design Robotics: New Strategies for Material System Research*, [w:] B. Peters, T. Peters, *Inside Smart Geometry*, John Wiley & Sons, London 2013, s. 254–267.
- M. Bechthold, *Product and Process Approaches*, [w:] P. Piroozfar, F. Piller (red.), *Mass Customisation and Personalisation in Architecture and Construction*, Routledge/Taylor & Francis, Abingdon 2013.
- M. Bechthold, K. Griggs, *Coffee, Cake, CAD/CAM: Reinventing the Urban Diner*, Cambridge – Harvard Design School, Technology Report Series 2003-3.
- T. Bock, ISARC, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius 32, 1–11, Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, Vilnius 2015.
- T. Brock, T. Linner, *The Cambridge Handbooks on Construction Robotics series focuses on the implementation of automation and robot technology to renew the construction industry*, volume 1–5, 2017.
- GSD Design Robotics Group, *Material Processes and Systems Research*, <http://research.gsd.harvard.edu/drg/category/robotic-systems/>
- F. Gramazio, M. Kohler, J. Willmann, *The Robotic Touch – How Robots Change Architecture*, Park Books, 2017.
- J. Hartley, *Flexible Automation in Japan*, Springer, 1984.
- Y. Hasegawa, *New Wave of Construction Automation and Robotics in Japan*, Waseda 2000.
- International Association for Automation and Robotics in Construction, Robots and Automated Machines in Construction, International Association for Automation and Robotics in Construction, 1998.
- J. Keating, et al., *Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales*, „Science Robotics”, t. 2, wyd. 5, 2017.
- A. Menges (red.), *Material Performance – Fibrous Tectonics & Architectural Morphology*, Harvard University GSD, (ISBN: 978-1-934510-57-5), Cambridge 2016.
- W. J. Mitchell, *The Logic of Architecture: Design, Computation and Cognition*, MIT, 1990.
- D. Park, M. Bechthold, *Designing Biologically Inspired Smart Building Systems: Processes and Guidelines*, „International Journal of Architectural Computing”, t. 11, nr 4, 2013, s. 437–467.
- I. Smith, S. Wamuziri, M. Taylor, *Automated construction in Japan*, materiały Inst. Civil Eng. 156, 34–41, 2003.
- J. Wojtowicz, et al., *Architectronics: Towards a Responsive Environment*, „International Journal of Architectural Computing”, t. 9, nr 1, 2011.
- S. Wrona, J. Wojtowicz, *Wykorzystanie Sztucznej Inteligencji i Robotyki w Architekturze i Urbanistyce*, manuscript (niepubl.), 2017.
- W. Zuk, *Kinetic Architecture*, Reinhold, 1970.
- Jerzy Wojtowicz, prof. zw. dr hab. inż. arch.
Stefan Wrona, prof. zw. dr hab. inż. arch.
Katedra Projektowania Architektonicznego
Wydział Architektury Politechniki Warszawskiej

ROBOT AIDED DESIGN. ARCHITECTURE WITH MECHATRONICS

JERZY WOJTOWICZ, STEFAN WRONA

1. Background

Design aided by computer is established and it is fundamental to the current emergence of robotics in architecture. The seminal doctorate of Ivan Southerland¹ at MIT gave rise to the discipline of computer graphics. Just four years later, an architectural student, future director of MIT Media Lab, Nicolas Negroponte published his article *Toward a Theory of Architecture Machines*, which became the subject of his subsequent book². He forecasted the new practice of design: “*In an architect-machine partnership perhaps the most relevant sensory interfaces are visual. Computer graphics techniques have become the paradigm for computer-aided architecture systems, but beyond inputting and outputting lines architecture machines must have eyes [and ears and ...]. Setting aside the phantasmagoria of robot-designers, consider speaking with a machine that sees you. In our present culture the thought is foolish or frightening. To our children it will be an ordinary occurrence.*”³

The first version of Autocad (1982), initially intended for the electronic circuits layout, was massively adopted by architects on just released IBM PC. Soon connected to it were first automated peripherals: the vector graphic pen plotter, followed few years later by laser milling machines, 3D printers and CNC 3 axis routers. All were able to convert digital instruction to analogue format and used in design, rapid prototyping and for making schematic models in the years to come. The widespread adoption of digital peripherals, alongside the acceptance of personal computers and the development of distributed design collaboration on networks radically changed the architect’s practice. The process of creating a design project became accessible not only to consultants, but also to public and clients. The significance of digitally recorded

project was recognized by Bill Mitchell who anticipated BIM: “*Design today could be seen as report from the current state of the project database*”.

Industrial prefabrication and mass produced housing were important part of modernist ethos. Packaged House by Konrad Wachsmann and Walter Gropius developed in 1940’s stands out as interesting case (Fig. 1a). Gropius saw the machine as a potentially dehumanizing force that man had to control. Wachsmann, who was quoted as saying, “*Tomorrow is everything*”, had perception of technology as a liberating force in architecture. Few decades later he developed Location Orientation Manipulator with seven degrees of freedom (Fig. 1b). According to Brock “*Konrad Wachsmann and his team realized the gap of the automated assembly systems as mission critical for the introduction of totally industrialized and automated building systems. This approach is a sign of a highly valuable view of the interdependencies between the production and assembly systems and the building systems and concepts. This kind of holistic approach concerning the technical and technological needs and requirements of the construction, production and assembly systems, is currently well known as Robot Oriented Design.*”⁴

The 1960’s emergence of the first industrial robots like Unimate (Fig. 2a) was remote to the prevailing practice of architectural design at the time, but today, situation is different, In the era of *Industry 4.0* where “*product itself will play a significant role in each of its phases “Life”, from concept development, project development, virtual production and real, automated and robotic, quality control, market offer, logistics, including service and repairs, unties of waste generated from its completed operation, all phases are managed Informally and remotely – over the Internet.*”⁵

Today, robotics and architecture are no longer strangers. Prototyping on numerically controlled

¹ I. Sutherland, created the first interactive and parametric graphics program in 1963, publ. in his Ph.D. thesis: *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System*, MIT, 1964.

² N. Negroponte, *The architecture machine*, MIT Press, 1970, p. 6.

³ N. Negroponte, *Toward a Theory of Architecture Machines*, “*Journal of Architectural Education*”, March 1969, p. 12.

⁴ T. Bock, W. V. Lauer, *Location Orientation Manipulator by Konrad Wachsmann, John Bollinger and Xavier Mendoza*, Automation and Robotics in Construction (ISARC 2010), p. 9.

⁵ M. Olszewski, *Mechatronizacja produktu i produkcji – przemysł 4.0*, PAR, nr 3, 2016.

machines and building digitally conceived architecture leads to robotics applications in modeling, fabrication and assembly. In the automotive and electronics industry, the use of automation is already widespread. Robotics in building construction has no less potential and its global impact will soon affect the architect's design, education and their professional practice. In the near future we expect to experience highly autonomous, networked collaborating robot systems constructing in the in real-time custom designed products and controlling ubiquitous responsive build environments.

2. Fabrication & Assembly

Integration of parametric design, programming, materiality data and the environmental factors becomes essential to the use of robots in the building process. The critical generation of functions as well as forms is the consequence of the use of robots in architecture. Kohler discussing the work of his lab on ETH involving robotics in design writes: *"Today we are witnessing a "second digital age" of architecture, which, through the introduction of the robot, finds its contemporary expression and potential to thrive. It is now possible to regard computer programming and architectural construction as conditional upon each other, and to see their reciprocity as fundamental to architecture in the digital age."*⁶

For architects to fabricate and to assemble building using robots, the design database must be available in digital format. When this data is used "in the real time", during the parallel and recursive design, prototyping and implementation processes, then the impact of robots starts to revolutionize architecture. After delegating act of construction to builder for the last few centuries the designer will soon return to direct contact with the real project making, becoming a kind of digital artisan, or craftsman. BIM – Building Information Modeling plays an important role in this process. Unlike traditional CAD programs, it is not just a process of generating, but also managing digital representations of physical and functional aspects of architecture throughout its life time. BIM in conjunction with robotics is already entering the construction industry. Robotics integrated with BIM (Building Information System)

are used with the growing frequency by Skanska Norway on its construction sites (Fig. 2b).

Parametric design is increasingly common in architecture as it makes versioning, iteration, mass-customization and continuous differentiation of customized elements possible. Parametric model can be revised, optimized and fabricated in fragments. For example the fabrication panels for Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza in Seoul required robotic technology for mould production, but assembly was done with conventional methods impacting the cost of the project. For architecture to reach completely *Industry 4.0* level the process of assembly and erection of it has to be automated with robotics (Fig. 3).

In the DIANA (Dynamic Interactive Robotic Assistant for Novel Applications) project, the Kuka robot was used to install irregularly positioned wooden spaces. The geometry and material found were required to use a mounting technique that enabled dynamic detection and tool response to any deviation from the assumed dimension (Fig. 4). The project uses a seven-axis robot The KUKA LBR-iiwa, which is distinguished by the fact that for each axis, while working, the torque is measured. Torque sensors have been introduced here to enable a safe robot to cooperate with humans and to resign the robotic arms from encountered obstacles when they reach the preset torque and to program by manually guiding the robotic arm by the operator. In the DIANA project, these sensors were used to detect inaccuracies during assembly and assembly itself to compensate for large inaccuracies on construction sites. The DIANA project was to become a major step towards the implementation of industry 4.0 in the assembly of elements on the construction site.

Robots as a finishing tool used by architects were used in the AROSU Milestone, Artistic Robot Surface Processing for Stone project, led by Sigrid Brell-Cokcan, Thomas Bock and Andreas Müller, funded by the European Union. The purpose of the study was, among other things, the reconstruction of the hand-worked stone structure, but using a robot. Currently, there are no skilled craftsmen who can work the stone surface according to the historical pattern. Previous attempts to automate the process did not result in satisfactory and homogeneous results that would resemble the results of manual

⁶ M. Kohler, et al., *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*, Park, 2015, p. 9.

processing. The studies included detailed chiseling motion analysis during manual processing and the implementation of the obtained rules in the work of the actuator (Fig. 5).

The robots for automatic brick laying masonry, development of robotic prefabrication of wall elements were among first used in assembly. The EU project ROCCO, Robot Construction System for Computer Integrated Construction was developed by consortium of researches and industrial partners from Germany, Spain and Belgium. It claimed 10 m reach and payload of up to 500 kg. Four years later the robotic assembly method was redeveloped at the ETH and applied in design and construction of Winery at Gantenbein by Gramazio & Kohler. The 20,000 bricks were positioned according to complex screen pattern generated in parametric program at the desired position and in prefab panel form used in the winery construction (Fig. 6)

Among trends in construction automation with robotics the use of GPS for data collection is becoming very significant. The applications include automatic truck guidance and use of personal data assistance or tablets with GPS and web data transmission makes new applications possible. Safety of operators is critical since many construction workers are injured or killed in construction accidents. For example the helmet integrated camera, GPS, capable of personnel tracking and warning and conflicts is becoming popular on large projects sites. A wearable exoskeleton robot is potentially able to offer the assembly operator with more strength and allow to assist her in handling heavy tools during the construction (Fig. 7).

The assembly of steel-based buildings often involves welding, such as column-to-column and column-to-beam joints. The Japanese WR mobile robot performs a variety of column-to-column welding. The steel columns of up to 100 mm thickness can be round-, square-, or H-shaped, as well as box-sectional members. For column-to-beam welding, there is a combination of welder/transport type which can run on decks and a type which can weld lower flanges from below.

Automation and robotization of the complete building erection is the most exciting experience. Applying to the high-rise building there were sev-

eral Japanese projects. The most significant is the SMAT system developed by Shimizu (Miyatake, 1993). It was used for construction of more than 30 stories office building. It consists of all-wheatear, full-robotic factory on the top of the building. The lift-up mechanism automatically raises the construction plant and at the same time raises the on-site factory, called field factory.

3. Case studies

The selected research projects listed below come from leading schools of architecture and are followed by the short review of construction robotics and automation in Japan. The presence of an industrial robots in architectural research labs is increasingly common. At ETH it is central in the research and development of prototypical building process (Fig. 8): *“It offers a new approach for the construction of non-regular spatial structures, since a 6-axis robotic arm can precisely move, position, orient and hold a building element in space, something a human cannot accomplish without a reference system and support structure.”*⁷ Prof. Achim Menges at TU Stuttgart, Water Spider Pavilion used an industrial robot to lay carbon fiber adaptively to the inside surface of an inflatable structure by sensing pressure (Fig. 9).

The recent paper published in Science Robotics titled *Architectural Robot, Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales*⁸ and came out of MIT Media Lab. Its authors have described a robot that could perform difficult task and constructions as an automated building system that could quickly be adapted and modified to site-specific constraints. *“An automated system for the construction of architectural structures utilizes local environmental data for process control... Data collection capabilities can also support more direct, detailed construction calculations, generating valuable datasets, and describing the construction of the structure in detail.”* Robot can operate autonomously what makes it ideal in an unfavourable environment (Fig. 10).

Is modern Japan build by robots? Yes, the automated architecture construction originated in Japan in early 1980's resulting in improve productiv-

⁷ K. Gramazio et al., 2014. ETH – Swiss Federal Institute of Technology in Zurich.

⁸ J. Keating et al., *Architectural Robot, Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales*, „Science Robotics”, vol. 2, issue 5, 2017.

ity safety and massive acceptance of automation. Labour shortages and aging work force called for the increased productivity through the use of single-task, human-machine construction systems. The operators provided initially sensory abilities which were too technologically difficult for successful automation. “*Today, integrated construction automated systems consist of four fundamental elements: a temporary covered working platform and jacking system; an automated material handling system and centralized on-site integrated control centre.*”⁹ Among examples of integrated construction automation systems are the Obayashi Corporation’s Automated Building Construction System (ABCS) and the Big-Canopy system (Fig. 11).

According to recent article in May issue of Japan Time construction sites are experiencing a new wave of automation. Due to the increasing shortage of labourers and aging labor, about 30 percent of all Japanese construction workers were are 55 two years old the introduction of robots to do heavy lifting is increasing common and drones. Kajima, Japan’s largest construction firm is using drones that instantly collect aerial data, unmanned, automated dump trucks, bulldozers and vibrating rollers with GPS systems at its building sites. “*Using a tablet device, a worker directs the preprogrammed heavy equipment to carry out various tasks. Only one person using a tablet is required to operate a sequence of tasks carried out by five machines that dump soil, and compact and smooth surfaces. The automation ultimately leads to a higher level of productivity.*”¹⁰ Building sites were undergoing significant change. “*Productivity has boosted by five to 10 times through automation and we’re not at the site all night like we used to be. You don’t even have to be highly skilled anymore to get the work done. Work is completed in half the time it used to take.*”¹¹ Prefabrication on and off site is practiced at the large scale. Large Scale Prefabrication according to Thomas Bock¹² is particularly successful as in Japan very automated housing industry manufactures outputs 150 000 entirely prefabricated housing units per annum.

4. Architecture moves

We are witnessing the raise of responsive, performative build environment with ubiquitous and ambient robotics. Design, construction and assembly assisted by robotics is an important but not the only aspect of advancing changes in the new domain of architecture with mechatronics. Robotic systems in addition to being used as a technology and automated tool in these processes, create also the great opportunities for automating “intelligent, responsive and performative environments”. Digitally controlled, responsive architecture, changes in materiality, dynamic form of building and the city results in a revolution that radically changes the domain of architecture. Wolfgang von Goethe¹³ motto “*Architecture is frozen music*” is being today truly challenged. Architecture based on statics from its origin remained unmoved over the last few decades while accepting digital modeling and simulation to design. Today it is becoming enriched by kinetics, system dynamics, networks and by robotics. The kinetic elements of a building that change its character or the functionality of a space that adapt to variable programming requirements are increasingly common in experimental projects saturated today with sensors and actuators and responsive to user input.

Contemporary architecture can be seen as a dynamic system that changes in response to its environment and even as a system that can modify itself. Systemic arrangement of sensors and actuators with controlling adaption of kinetic elements of architecture designed to change functional, formal and physical conditions of the environment is increasingly frequent. Notion of Architectronics¹⁴ coined in anticipation of growth of this new discipline reflects the growing interest in this area. Together with the user controlled automated systems kinetic and robotically controlled architecture deserves to be considered in detail and will be the subject of the forthcoming publication titled ROBO-moves by authors.

⁹ M. Taylor, et al., *Automated construction in Japan*, Proceedings of ICE 2003, pp. 34–41.

¹⁰ “The Japan Times”, *Japan’s labor-scarce building sites automating, turning to robots, drones*, (22.05.2017).

¹¹ Ibidem.

¹² T. Bock, *Evolution of large-scale industrialization and service innovation in Japanese prefabrication industry*, “Construction Innovation”, vol. 12, issue 2, pp. 156–178,

¹³ J. P. Eckermann, *Die Baukunst ist eine erstarrte Musik – Conversations with Goethe*, 1829.

¹⁴ J. Wojtowicz, et al., *Architectronics: Towards a Responsive Environment*, “International Journal of Architectural Computing”, vol. 9, no. 1, 2011, pp. 77–98.

Conclusions

In architecture robotics suffer from *deus ex machina*¹⁵ syndrome, condition which implies sudden changes in the situation and in the scientific sense introduction of an unproven new concept that hypothetically solves the problem. For some it leads to the opposition of this critical transformation of the established practice of architecture. Historically, architecture was always grounded in the building technology of its times. Today the changes brought by IT and robotic revolution are triggering rapid transformation of rather obsolete construction industry. For the architects in the emerging society of knowledge the new design challenges become evident and pressing. This new condition is far from established and it is seen by some as destructive and leading to the collapse to the long established conventions. Yet, those new aspects to design offer rather exciting opportunities, as condition needed to implement practice of architecture in this environment require systemic and interdisciplinary approach to design problem solving.

In the field of applied science the new approach of “research by design” is emerging in the architectural education. At Warsaw Faculty of Architecture in cooperation with Mechatronics, aspects of robotics, information technology and material engineering in education and practice are explored. Design here is an important part of the research process. Collaboration on design of prototypical projects of architecture and mechatronics students with Festo support in now part of regular ASK program. The research projects include social participation, making the prototype design kind of reflective practice. The critical evaluation, comparative methods, and public evaluation through joint, multidisciplinary problem solving over network becomes possible. The few our ROBO¹⁶ studio projects are illustrated below (Fig. 13, 14). The projects are concerned with the use of robotics in the design, prototyping of buildings using new materials. Among them designed for seniors an interactive and modular support system with robotic technologies

allowing control of the domestic environment. The objective of the project is to develop prototypical and modular system intended also for the automated elderly support. Seniors life live expectancy increased dramatically impacting and straining established social services. An actuator requires a control signal and a source of energy. The control signal is relatively low energy and may be electric voltage or current, pneumatic or hydraulic pressure, or even human power. What makes our project different is that it will be integrated into the ROBOcapsule project, and the prototype mobile and multipurpose shelter unit and will become a testing laboratory for interface testing and measurement systems for those on need.

In the near future robotics in architecture will be deployed not only for designing, fabricating, assembling of buildings, but also to make our shelters and urban space responsive to changing condition of use and environment. In Poland opportunities for this transformation are considerable¹⁷. “*It can already be observed that construction automated technology, single task construction robots approaches, service robot systems and other microsystems technology are merging with the built environment, becoming inherent elements of buildings, building components, and building furniture... Robot technology becomes ubiquitous, and starts pervading life and built environments.*”¹⁸ The ideas like *Industry 4.0* will have profound impact on the way our built environment is conceived, designed and materialized.

Translated by the Authors

Bibliography

S. Adriaenssens, et al. (eds.), *Advances in Architectural Geometry 2016*, vdf Hochschulverlag AG ETH Zurich, (ISBN 978-3-7281-3778-4), Zurich 2016.

S. Andreani, M. Bechthold, *(Re)volving Brick: Geometry and Performance Innovation in Ceramic Building Systems Through Design Robotics*, [in:] K. Gramazio, et. al. (eds.), Fabricate. gbt Verlag, 2014.

M. Bechthold, *Design Robotics: A New Paradigm in Process-Based Design*, [in:] R. Oxman, *Theories of*

¹⁵ It comes from greek tragedy, where a machine was used to bring actors playing gods onto the stage. The effect of the device on audiences was a immediate emotional response and astonishment.

¹⁶ ROBO – accepted acronym for robotic, made popular by the 1987 dystopian movie *ROBOcop* and by the 1980 French cartoon character *ROBOhobo*.

¹⁷ Today it is rather difficult to include Poland among robotic states. According to “Newsweek” (22.10.2015) South Korea industry for 10, 000 workers there is 437 robots , while we had only 19 robots/10,000 workers.

¹⁸ T. Brock, *Construction Robotics enabling Innovative Disruption and Social Supportability*, ISARC, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius 32, 1–11, 2015.

the Digital in Architecture, Routledge/Taylor & Francis, Abingdon 2014.

M. Bechthold, *Design Robotics: New Strategies for Material System Research*, [in:] B. Peters, T. Peters, *Inside Smart Geometry*, John Wiley & Sons, London 2013, pp. 254–267.

M. Bechthold, *Product and Process Approaches*, [in:] P. Piroozfar, F. Piller (eds.), *Mass Customisation and Personalisation in Architecture and Construction*, Routledge/Taylor & Francis, Abingdon 2013.

M. Bechthold, K. Griggs, *Coffee, Cake, CAD/CAM: Reinventing the Urban Diner*, Cambridge – Harvard Design School, Technology Report Series 2003-3.

T. Bock, ISARC, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius 32, 1–11, Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, Vilnius 2015.

T. Brock, T. Linner, *The Cambridge Handbooks on Construction Robotics series focuses on the implementation of automation and robot technology to renew the construction industry*, volume 1–5, 2017.

GSD Design Robotics Group, *Material Processes and Systems Research*, <http://research.gsd.harvard.edu/drg/category/robotic-systems/>

F. Gramazio, M. Kohler, J. Willmann, *The Robotic Touch – How Robots Change Architecture*, Park Books, 2017.

J. Hartley, *Flexible Automation in Japan*, Springer, 1984.

Y. Hasegawa, *New Wave of Construction Automation and Robotics in Japan*, Waseda 2000.

International Association for Automation and Robotics in Construction, *Robots and Automated Machines in Construction*, International Association for Automation and Robotics in Construction, 1998.

J. Keating, et al., *Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales*, „Science Robotics”, vol. 2, issue 5, 2017.

A. Menges (ed.), *Material Performance – Fibrous Tectonics & Architectural Morphology*, Harvard University GSD, (ISBN: 978-1-934510-57-5), Cambridge 2016.

W. J. Mitchell, *The Logic of Architecture: Design, Computation and Cognition*, MIT, 1990.

D. Park, M. Bechthold, *Designing Biologically Inspired Smart Building Systems: Processes and Guidelines*, “International Journal of Architectural Computing”, vol. 11, no. 4, 2013, pp. 437–467.

I. Smith, S. Wamuziri, M. Taylor, *Automated construction in Japan*, Proceedings Inst. Civil Eng. 156, 34–41, 2003.

J. Wojtowicz, et al., *Architectronics: Towards a Responsive Environment*, “International Journal of Architectural Computing”, vol. 9, no. 1, 2011.

S. Wrona, J. Wojtowicz, *Wykorzystanie Sztucznej Inteligencji i Robotyki w Architekturze i Urbanistyce*, manuscript (unpubl.), 2017.

W. Zuk, *Kinetic Architecture*, Reinhold, 1970.

Jerzy Wojtowicz, prof. zw. dr hab. inż. arch.

Stefan Wrona, prof. zw. dr hab. inż. arch.

Department of Architectural Design

Faculty of Architecture, Warsaw University of Technology