Mechatronika w architekturze – architektronika

Mariusz Olszewski
Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Automatyki i Robotyki, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

Jerzy Wojtowicz, Stefan Wrona, Karolina Dąbrowska-Żółtak
Politechnika Warszawska, Wydział Architektury, Katedra Projektowania Architektonicznego, ul. Koszykowa, 00-659 Warszawa

Streszczenie: W artykule autorzy omawiają nowe realia wynikające z procesu integrowania architektury i mechatroniki, w tym przede wszystkim automatyki i robotyki. Stają się one narzędziami twórczymi w procesach projektowania, modelowania i budowania architektury społeczeństwa wiedzy. Omawiane w artykule przykłady rozwiązań architektonicznych świadczą o tym, że automatyzacja i robotyzacja fabrykacji i montażu struktur i elementów budowlanych są przedsięwzięciami i ważnymi, i oczekiwanymi. Zmechatronizowana, kinetyczna architektura staje się także doskonałym sposobem uwzględnienia zmieniających się warunków środowiska oraz wymagań użytkowników (ang. *Form of Interface*). Te zmieniające się warunki i wymagania stawiane produktom współczesnej architektury są bezpośrednimi analogiami zmieniających się wymagań i ich realizacji także w odniesieniu do produktów i produkcji przemysłowej, objętych zaakceptowanym już pojęciem (r)ewolucji przemysłowej 4.0.

Słowa kluczowe: mechatronika, architektura, automatyzacja i robotyzacja budownictwa, architektura kinetyczna

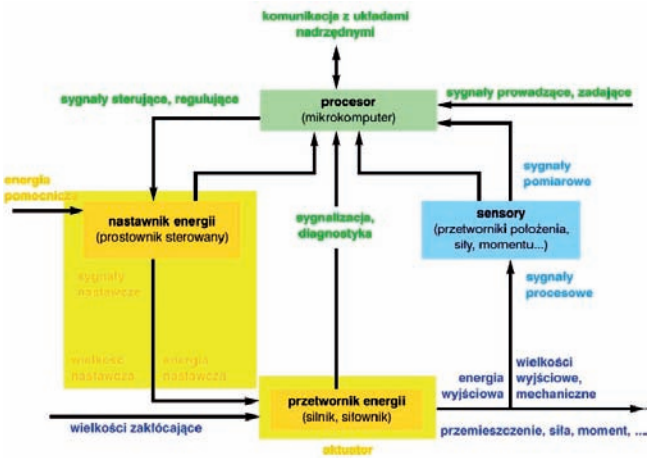
1. Wprowadzenie

Projektowanie architektoniczne wspomagane komputerowo pozwala na tworzenie form, często inspirowanych bioniką i matematyką, odbiegających od klasycznie stosowanych w budownictwie form prostopadłościennych [36]. Nowe geometrie wymagają nowych narzędzi, a te, w tym szczególnie narzędzia mechatroniczne, pozwalają na fabrykację i montaż projektów architektonicznych powstających w środowisku cyfrowym. Rozwój metod komputerowych dał początek zapotrzebowaniu na mechatroniczne urządzenia, maszyny i systemy [34], sterowane cyfrowo, umożliwiające realizację wspomnianych wizji współczesnych architektów.

Mechatronika – najogólniej – jest synergicznym połączeniem mechaniki, elektronicznego sterowania i systemowego myślenia w obszarze projektowania i wytwarzania wszelkich produktów [31, 33], w tym także produktów architektonicznych.

Mechatronizacja produktu architektonicznego, musi obejmować cztery działania:

– zastąpienie statycznej realizacji form stosowanych w budownictwie klasycznym realizacją kinetyczną wybranych elementów i struktur tworzących niekonwencjonalne formy architektoniczne, wprowadzane do nowoczesnego budownictwa



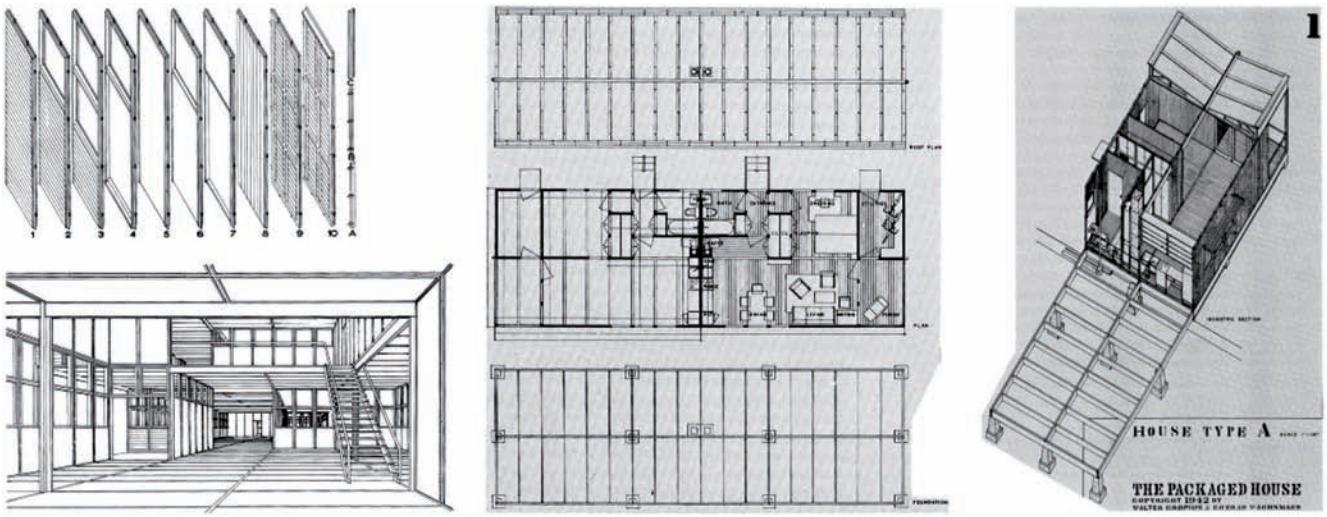
Rys. 1. Schemat warstw działań sterujących, regulacyjnych i przepływu informacji w produkcie mechatronicznym na przykładzie pneumotronicznego urządzenia wykonawczego [35]
Fig. 1. Scheme of control and regulation layers and the flow of information in the mechatronic product on the example of pneumotronic actuator

[19]. Wprowadzenie ruchu, kinetyki [45], jest warunkiem tego zastąpienia – ten ruch ma być realizowany przez elektryczne, pneumotroniczne lub hydrotroniczne urządzenia wykonawcze (rys. 1). Są to urządzenia kosztowne, wymagające nadzoru, konserwacji i obsługi, zarówno w trakcie uruchomienia, jak i podczas normalnej eksploatacji wspomnianych form architektonicznych – racjonalną istotą tej zamiany jest więc zmniejszenie ich liczby i zakresu działania, także poszukiwania innych rozwiązań wykonawczych, np. materiałowych lub bionicznych [28, 36, 38];

Autor korespondujący:
Jerzy Wojtowicz, jerzy@post.harvard.edu

Artykuł recenzowany
nadesłany 24.08.2017 r., przyjęty do druku 20.09.2017 r.

Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

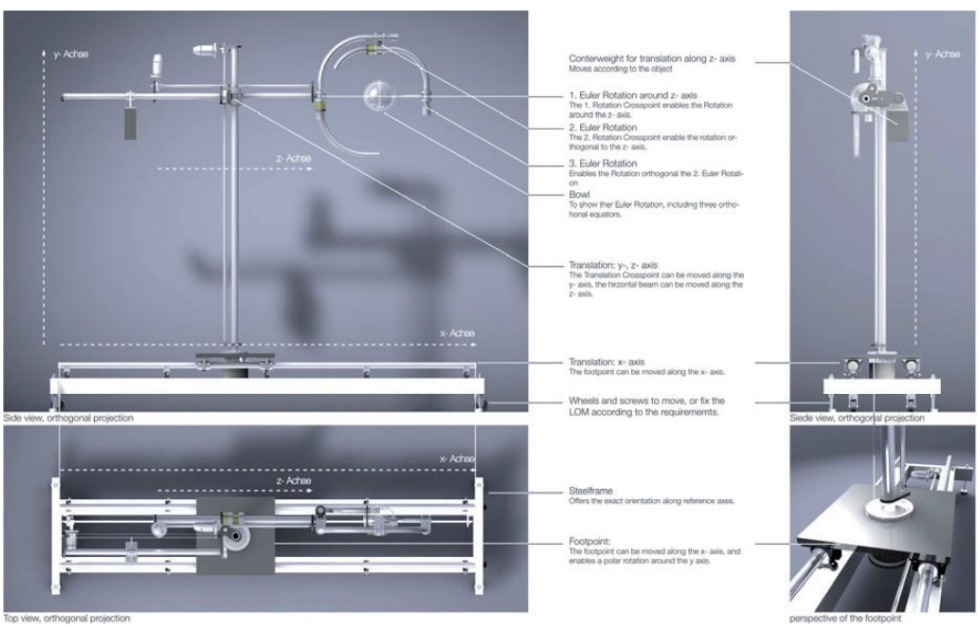


Rys. 2. Dom Spakowany zaprojektowany przez Wachsmanna i Gropiusa w 1942 r. [18]
Fig. 2. Packaged House designed through Wachsmann and Gropius in 1942

– wprowadzenie do produktu architektonicznego mikroprocesorowego układu automatycznego sterowania i regulacji parametrów rozwiązujących problemy prowadzenia, koordynacji, nadzoru i diagnostyki procesów realizowanych przez produkt oraz komunikacji sieciowej produktu;
– wykorzystanie w produkcie architektonicznym w możliwie największym zakresie niematerialnych możliwości kształtowania jego właściwości. Pozostawienie zespołów materialnych kształtujących jego właściwości ogranicza ich zmiany, wymianę na inne zespoły oraz diagnostykę i optymalizację działania w konkretnych warunkach środowiskowych i użytkowych. Programowanie, będące właśnie niematerialnym składnikiem zmechatronizowanego produktu architektonicznego, w połączeniu z konsekwentnym zastosowaniem mikroprocesorowego lub komputerowego sterowania (np. klasy IPC&Chip) do pobierania, przetwarzania, przesyłania i udostępniania informacji procesowych, zapewnia działanie produktu bez potrzeby ingerencji w jego działania sensoryczne i aktuacyjne [44];
– sprawdzenie możliwości wykorzystania w produkcie architektonicznym elementów i zespołów o różnych zasadach działania i budowy, pochodzących z różnych dziedzin techniki. Podejście systemowe, dzięki niekonwencjonalnemu ujęciu problemów doboru oraz integracji elementów i zespołów, pozwala na uzyskanie bądź nowych, bądź bardziej korzystnych charakterystyk i właściwości, niżby to miało miejsce w przypadku ograniczenia się do jednorodnych rozwiązań architektonicznych.

We współczesnym rozumieniu istoty mechatronicznego produktu architektonicznego mogą nim być dowolne formy techniczne, zaopatrzone w urządzenia i systemy przetwarzające informację lub energię na inną jej postać i użyteczną pracę, pożyteczną zarówno dla użytkowników tych form, jak i technologicznego, maszynowego wyposażenia ich fabrykacji i montażu w budownictwie. To, co łączy te tak różne użytkowo produkty, to zestawienie zespołów elektrycznych, elektronicznych i procesorowych z elementami i strukturami architektonicznymi w nowy, powiązany sprzętowo i informatycznie system (rys. 1).

W przeszłości przedmechatronicznej dokonywano takich prób przemysłowej prefabrykacji ruchomych, niepowiązanych trwale, form architektonicznych, np. domów składanych z dających się przemieszczać elementów i struktur – dobrym przykładem, ale tylko jednym z wielu, takiego wczesnego technicznie rozwiązania, jest Dom Spakowany (ang. *Packaged House*) zaproponowany w 1942 r. przez Konrada Wachsmanna i Waltera Gropiusa (rys. 2) [18]. Tu wzorów należy szukać w niedalekiej do tych lat przeszłości, a mianowicie odnieść je do początku XX stulecia i wprowadzenia przez Siemensa w 1901 r. i Forda w 1911 r.



Rys. 3. Rekonstrukcja Location Orientation Manipulator, dedykowanego realizacjom architektonicznym, wg projektu Wachsmanna z 1953 r. [12]
Fig. 3. Reconstruction of Location Orientation Manipulator, dedicated architectural redemptions, according to the Wachsmanna's project, 1953

Rys. 4. Próby zautomatyzowanego przez robotyzację montażu konstrukcji nośnych w budownictwie [11]
Fig. 4. Attempts of the automated assembly by the robotization of load-bearing structures in the building

podziału procesów przemysłowego wytwarzania na elementarne zadania technologiczne pozwalające zwiększyć produktywność, zmniejszyć wymagania kwalifikacji zatrudnionych w tych procesach robotników i stopniowo, przez umaszynowienie, automatyzować i robotyzować procesy produkcyjne [34].

Walter Gropius postrzegał jeszcze, zresztą jak większość jego rówieśników, każdą maszynę jako potencjalnie dehumanizującą siłę, którą powinien kontrolować człowiek. Świetnym przykładem takiego ówczesnego postrzegania uwikłania człowieka w świat maszyn jest film Charlie Chaplina *Modern Time* (*Współczesne czasy*) z 1936 r., na marginesie ostatni jego niemy film – a więc symptomatyczny świadek odchodzącej epoki.

Już Konrad Wachsmann zwykł mawiać *Tomorrow is everything* (*Jutro jest wszystkim*) i postrzegał umaszynowienie procesów jako siłę zdolną w przyszłości wyzwolić architekturę i budownictwo od mozolnej i nieefektywnej pracy ręcznej. Dwa dziesięciolecia później opracował zresztą sam maszynę manipulacyjną (ang. *Location Orientation Manipulator*) o siedmiu stopniach ruchliwości, dedykowaną do zautomatyzowanego, a właściwie zrobotyzowanego montażu elementów budowlanych (rys. 3). Thomas Bock [12] opisał w 2010 r. to podejście Wachsmanna jako pierwszą aplikację sygnalizującą epokę całkowicie zautomatyzowanych systemów budowlanych: *To podejście było 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 nazywany jako Robot Oriented Design* (projektowanie (architektoniczne) ukierunkowane na robotyzację (jego realizacji)).

2. Rozwój cyfryzacji projektowania i konstruowania architektonicznego

Dziedzina określana dziś mianem grafiki komputerowej narodziła się w 1964 r. Jej istotę, jako pierwszy, opisał Ivan Southerland w 1964 r. w swojej rozprawie doktorskiej [41]. Zaledwie cztery lata później student architektury i przyszły dyrektor MIT Media Lab, Nicolas Negroponte opublikował artykuł *Toward a Theory of Architecture Machines*, którego tezy rozwinął w opublikowanej w 1970 r. książce [30]. Negroponte pisał w niej o interakcji i projektowaniu wspomaganym komputerowo, określił między innymi trzy warunki koniecznie wymagane, aby maszyny cyfrowe mogły pomagać architektowi w procesie projektowania:

- algorytmy i procedury projektowania muszą poddawać się automatyzacji,
- istniejące metody projektowania mogą podlegać zmianom odpowiednio do specyfikacji i konstrukcji maszyn cyfrowych, ale do zmian tych metod poddawane są tylko ich cechy kompatybilne z działaniami maszyn,
- proces projektowania, uważany za ewolucyjny, może być udostępniony maszynie cyfrowej, również uważanej za twór ewolucyjny.

W 1982 r. w pracowniach architektów pojawia się AutoCAD. Ten wczesny program CAD (ang. *Computer Aided Design*), przeznaczony pierwotnie do dwuwymiarowego (2D), płaskiego projektowania schematów i układów elektronicznych, został szybko zaakceptowany także przez architektów. Początkowo wdrażany był na komputerach i drukarkach IBM PC, które w tamtym latach trafiały coraz częściej do pracowni architektonicznych, przeznaczone do wykonywania i przede wszystkim drukowania rysunków roboczych. Wkrótce połączono z nimi kolejne mechatroniczne urządzenia peryferyjne: plotery, pióra grafiki wektorowej, a po kolejnych kilku latach: frezarki laserowe, drukarki 3D i routery 3-osiowe CNC (ang. *Computer Numerical Control*). Urządzenia te przekształcały instrukcje cyfrowe na format analogowy, dzięki czemu możliwe stało się wprowadzenie szybkiego prototypowania i wykorzystanie komputerowo wspomaganego projektowania architektury.

Postępujące szybko w latach 90. XX stulecia zastosowanie cyfrowych urządzeń peryferyjnych, a przede wszystkim akceptacja komputerów osobistych i rozwój współpracy w zakresie dystrybucji rozwiązań sieciowych, radykalnie zmieniły praktykę pracy architekta. Skomputeryzowany proces projektowania otworzył drogę postępowania nie tylko profesjonalistom, ale także ich klientom i opinii publicznej. Znaczenie cyfrowo opracowanego projektu architektonicznego zostało podkreślone przez Billa Mitchella, który przewidywał już w 1990 r. powstanie BIM (ang. *Building Information Modeling*): *Design today could be seen as report from the current state of the project database* (*Dzisiaj projekt może być traktowany jako raport z aktualnego zaawansowania stanu projektu*) [29].

Wizja Negroponte, zawarta w jego pierwszych publikacjach [30], zapowiadała nową erę w praktyce projektowania architektonicznego oraz pojawienie się maszyny cyfrowej-projektanta w tym procesie oraz robota-robotnika w jego realizacji. Negroponte zwrócił uwagę na to, że techniki grafiki komputerowej stały się paradygmatem systemów wspomaganych komputerowo, a maszyny cyfrowe w architekturze *muszą mieć oczy i uszy*. W ówczesnej kulturze ta myśl wydaje się jeszcze dziwna, twierdził Negroponte na przełomie lat 60. i 70. XX stulecia, ale dla przyszłych pokoleń będzie to już zwykła, normalna codzienność.

Jakkolwiek automatyka i robotyka przemysłowa lat 70. i 80. XX stulecia [32] były bardzo odległe od praktyki projektowania architektonicznego i jego realizacji, to jednak prefabrykacja i seryjna produkcja elementów budowlanych stawała się już wtedy ważną częścią etosu modernizacji i racjonalizacji przemysłu budowlanego (rys. 4).

Obecnie, na styku dwóch etapów ewolucji przemysłowych, przemysłu zmechanizowanego, zautomatyzowanego i zrobotyzowanego (nazywanych Przemysłami 1.0, 2.0 i 3.0) oraz przemysłu zmechatronizowanego, zinformatyzowanego i zinternetyzowanego (nazywanego Przemysłem 4.0) [24, 34, 35], mechatronika, w niej automatyka i robotyka, oraz architektura nie są już obcymi sobie dziedzinami. Prototypowanie na maszynach sterowanych numerycznie i budowanie cyfrowych koncepcji architektonicznych prowadzi do stosowania automatyki i robotyki w modelowaniu, wytwarzaniu i montażu konstrukcji architektonicznych (rys. 5). W przemyśle motoryzacyjnym, elektromaszynowym i elektronicznym stosowanie automatyzacji i robotyzacji wytwarzania jest już przyjętym powszechnie standardem. Automatyza-

Rys. 5. Robot mobilny wykonujący instalację sufitów podwieszanych – aplikacja pozwala na 1,5× szybszy montaż płyt niż w przypadku dwuosobowej ekipy budowlanej, sterowanie zapewnia bieżące przesyłanie instrukcji ze środowiska BIM (ang. *Building Information Modeling*), wykorzystując dynamiczny model informacji budowlanych 3D, Skanska Norway 2016

Fig. 5. Mobile robot performing installation of utilities and ceilings – the application allows for 1.5× faster mounting of boards than for a two-person team, the control ensures that current instructions are sent from the *Building Information Modeling* environment (BIM), using dynamic 3D building information model, Skanska Norway 2016

cja i robotyzacja w budownictwie ma ciągle jeszcze, na początku XXI stulecia, bardziej wartość potencjalną niż realną. Przyjęcie w praktyce budowlanej założeń Przemysłu 4.0, a więc mechatronizacji, informatyzacji i internetyzacji, wpłynie bez wątpienia zarówno na projekty architektoniczne i ich realizację, jak i edukację architektów i inżynierów budownictwa. W niedalekiej przyszłości powinny pojawić się samodzielne, pracujące w sieci urządzenia, maszyny i systemy mechatroniczne, konstruujące i kontrolujące w czasie rzeczywistym produkty architektury zaprojektowane według indywidualnych specyficznych potrzeb użytkownika, w tym także obsługi i serwisowania tych produktów aż do czasu ich utylizacji lub recyklingu.

3. Mechatroniczna ewolucja fabrykacji i montażu projektów architektonicznych

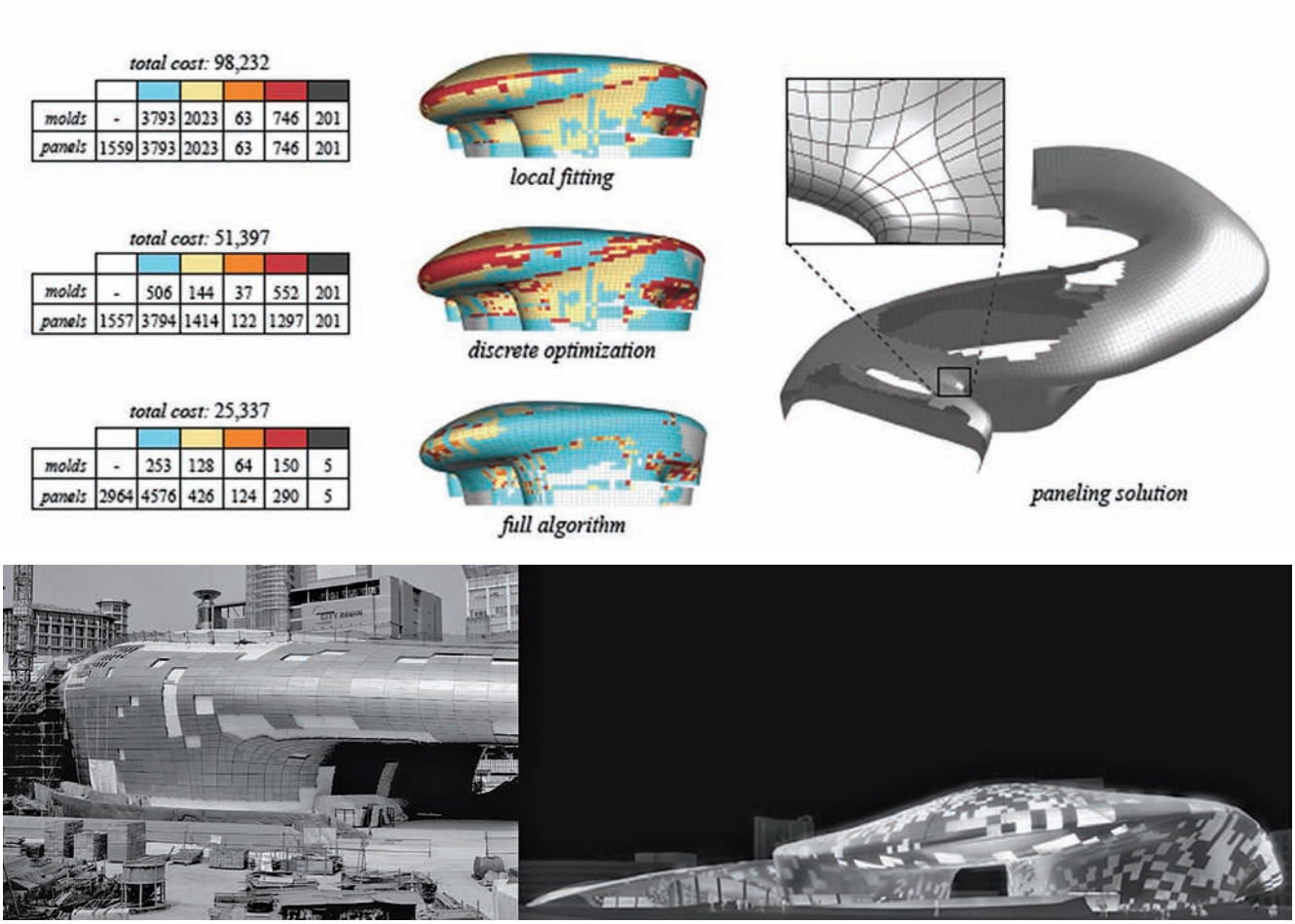
Mechatronizacja, rozumiana w sensie Platformy Przemysłu 4.0, nie tylko wyłącznie w odniesieniu do techniki i technologii, ale w znacznie szerszym ujęciu uwzględniająca aspekty pozatechniczne, jako elastyczna integracja czynności produkcyjnych i zarządzania produkcją, zarządzanie kadrami, informacją i logistyką [1], jest najefektywniejszą drogą do ewolucyjnego rozwiązania nie tylko problemu wzrostu produktywności i konkurencyjności konkretnych gałęzi gospodarki, w tym architektury i budownictwa, ale również drogą do zapewnienia tym branżom wykwalifikowanych pracowników zdolnych do sprostania nowoczesnym wymaganiom zawodowym i społecznym.

Integracja projektowania parametrycznego, oprogramowania oraz istniejących warunków środowiskowych ma zasadnicze znaczenie dla zastosowania mechatroniki w procesie budowlanym. Generowanie funkcji i formy jest konsekwencją wykorzystania wspomnianych już urządzeń, maszyn i systemów mechatronicznych w architekturze. Kohler [20, 26] prezentując dokonania swojego laboratorium w ETH Zurich (niem. *Eidgenössische Technische Hochschule*), związane z cyfryzacją projektowania i konstruowania architektonicznego, twierdzi, że *...jesteśmy dziś świadkami drugiej epoki cyfrowej w architekturze. Teraz jest już możliwe traktowanie programowania komputera i projektowania formy architektonicznej jako procesów współzależnych, a także ich wzajemności jako związku fundamentalnego w epoce cyfrowej.*

Aby architekci mogli tworzyć i robotyzować wykonywanie budynków, baza danych projektowych musi być dostępna w postaci cyfrowej. Gdy dane te są używane w czasie rzeczywistym, podczas projektowania równoległego i rekurencyjnego, prototypowania i implementacji, stosowanie robotyzacji daje szansę na zrewolucjonizowanie pracy architekta. Po oddaleniu się architekta w ostatnich stuleciach od świata budowy, projektant może powrócić do bezpośredniego kontaktu z placem budowy. Współczesne narzędzia projektowania i wykonywania budynków oraz narzędzia przewidywane w przyszłości dają szansę na dynamiczne dopasowanie projektu do zmieniających się warunków nawet podczas samego procesu budowy. Zmiana cyfrowego zapisu informacji o projekcie umożliwi dynamiczną zmianę realizowanego projektu, bez konieczności zmiany narzędzi wykonawczych. Architekt staje się swego rodzaju cyfrowym rzemieślnikiem. W systemie BIM (ang. *Building Information Modeling*) modelowanie informacji o budynku odgrywa ważną rolę w tym procesie. W przeciwieństwie do tradycyjnych programów CAD jest to nie tylko proces generowania, ale również zarządzania cyfrowymi obrazami fizycznych i funkcjonalnych parametrów architektury budynku przez cały czas jego życia. BIM w połączeniu z mechatroniką, w tym przede wszystkim z robotyką, już wchodzi do branży budowlanej. Maszyny manipulacyjne zintegrowane z BIM są coraz częściej stosowane np. przez koncern Skanska Norway na jej placach budowy (rys. 5) [43].

Konstrukcja parametryczna staje się coraz bardziej powszechna w architekturze. Pozwala ona na wersjonowanie, optymalizowanie generowanych struktur i tworzenie zróżnicowanych geometrycznie obiektów, generując jednocześnie informacje umożliwiające ich wytworzenie z wykorzystaniem obrabiarek CNC lub druku 3D [2, 3]. Model parametryczny może być zmieniany, optymalizowany i wykonywany we fragmentach. Jednym z przykładów wygenerowania trójwymiarowej struktury i podziału jej na elementy umożliwiające prefabrykację (panele elewacyjne), jest *Dongdaemun Design Plaza* w Seulu (rys. 6), projektu Zaha Hadid Architects. W produkcji form paneli zastosowane zostały maszyny manipulacyjne, jednak sam montaż był jeszcze wykonywany konwencjonalnymi metodami niekorzystnie wpływającymi na podniesienie kosztów projektu i wydłużenie czasu realizacji względem potencjalnie możliwego montażu robotycznego. Aby architektura osiągnęła w pełni poziom Przemysłu 4.0, montaż musiałby zostać w pełni zautomatyzowany z wykorzystaniem mechatronicznych narzędzi robotycznych.

W projekcie DIANA (ang. *Dynamic Interactive robotic Assistant for Novel Applications*) założono wykorzystywanie maszyny manipulacyjnej do montażu nieregularnie ustawionych w przestrzeni elementów drewnianych. Założona geometria i materiał budowlany wymagały wykorzystania techniki montażowej, umożliwiającej dynamiczne wykrywanie i reagowanie narzędzia na liczne odchylenia od założonego wymiaru. W procesie realizacji projektu zastosowano robota produkcji koncernu KUKA – *LBR-iiwa*, o siedmiu stopniach ruchliwości mechanizmu kinematycznego, który wyróżnia się tym, że dla każdej z osi ruchu, podczas jej pracy, mierzony jest generowany przez nią moment obrotowy. Sensory momentu obrotowego zostały wprowadzone w celu umożliwienia bezpiecznej współpracy robota z człowiekiem i ustępowania członów mechanizmu robota przed napotkaną przeszkodą po osiągnięciu zadanego, bezpiecznego momentu oraz programowanie ruchu mechanizmu przez nauczanie, metodą obwiedzenia trajektorii ruchu przez ręczne prowadzenie narzędzia robota przez operatora. W projekcie DIANA sensory te zostały użyte w trakcie montażu także do wykrywania niedokładności wykonania elementów i procesu ich łącze-

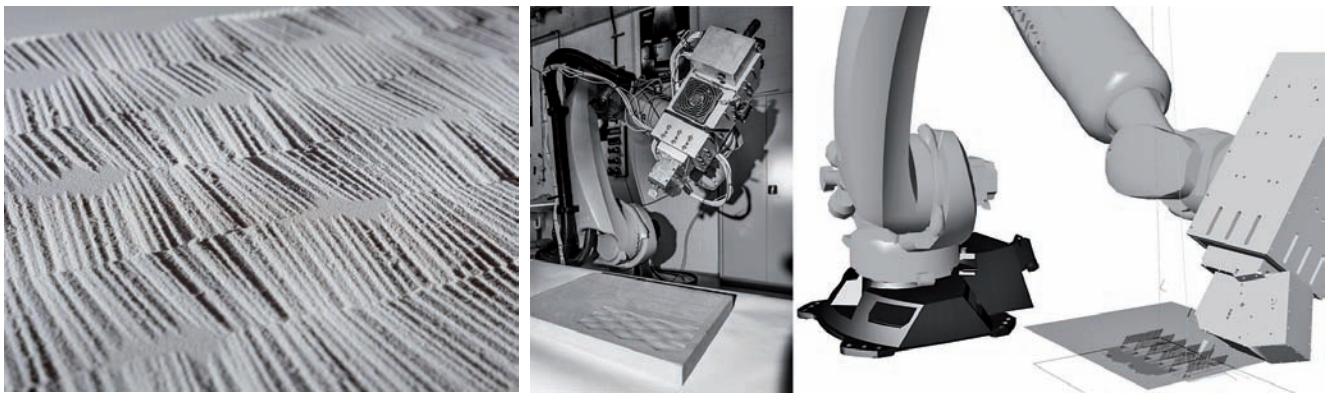


Rys. 6. Panelizacja powłoki architektonicznej zaprojektowanej przez Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, Seul 2015
Fig. 6. Panelization of Zaha Hadid Architects Dongdaemun Design Plaza, Seoul 2015

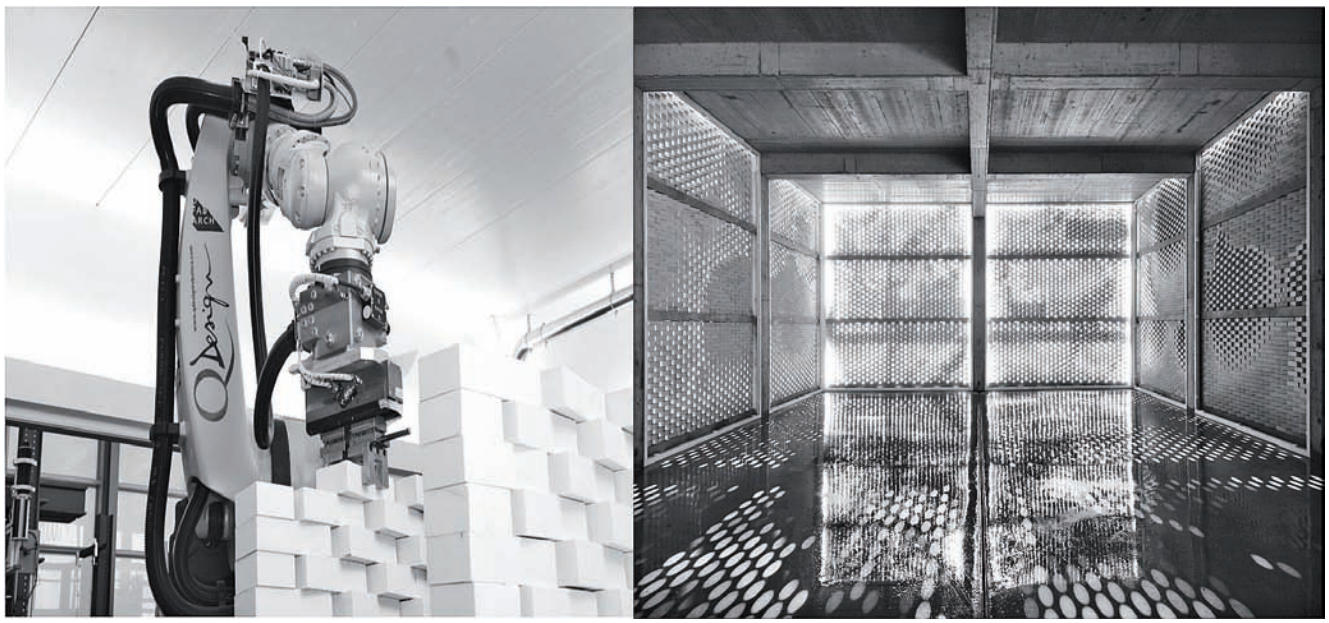
nia tak, aby rekompensować duże niedokładności wykonywania projektów architektonicznych występujące na placach budowy (rys. 7). Projekt DIANA stał się ważnym krokiem do implementacji założeń Przemysłu 4.0 w procesy montażu elementów architektonicznych na placach budowy [39].

Roboty jako narzędzia do obróbki materiałów wykończeniowych, używanych przez architektów, zostały wykorzystane w projekcie badawczym AROSU (ang. *Artistic Robot Surface Processing for Stone*), prowadzonym przez Sigrid Brell-Cokcan, Thomasa Bocka i Andreasa Müllera [16], finansowanym ze środków Unii Europejskiej. Celem badań było, między innymi, odtworzenie struktury kamienia obrabianego ręcznie, ale przy wykorzystaniu narzędzia osadzonego na mechaniźmie maszyny manipulacyjnej. Współcześnie brakuje fachowych rzemieślników, którzy potrafią obrobić powierzchnię kamienną zgodnie z historycznym wzorcem. Wcześniejsze próby zautomatyzowania

Rys. 7. Robot współpracujący (kolaboracyjny) LBR-iiwa użyty w projekcie architektonicznym DIANA (ang. Dynamic Interactive robotic Assistant for Novel Applications), KUKA 2016 [39]
Fig. 7. Collaboration robot LBR-iiwa used in the architectural project Dynamic Interactive robotic Assistant Novel Applications (DIANA), KUKA 2016



Rys. 8. Powierzchnia kamienia po obróbce przy użyciu robota – wynik projektu badawczego AROSU (ang. Artistic Robot Surface Processing for Stone) [16]
Fig. 8. Surface of the stone after processing with the robot – result of a research project Artistic Robot Surface Processing for Stone (AROSU)



Rys. 9. Ceglana winnica w Gartenbein zbudowana wg projektu wykonanego przez Gramazio & Kohler Research, ETH Zürich, 2006 [26]
Fig. 9. Brick construction of winery at Gantenbein by Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, 2006

procesu nie kończyły się uzyskaniem satysfakcjonujących i jednorodnych rezultatów, które przypominałyby rezultaty ręcznej obróbki. Badania projektu obejmowały szczegółową analizę ruchu dłuta podczas ręcznej obróbki oraz implementację uzyskanych reguł w pracy urządzenia wykonawczego (rys. 8).

Jednym z pierwszych pomysłów na wykorzystanie maszyn manipulacyjnych do zautomatyzowanego wznoszenia ceglanych murów w budownictwie, w których forma i rozmieszczenie poszczególnych cegieł odbiegają od klasycznych, płaskich struktur był projekt ROCCO (ang. *Robot Assembly System for Computer-Integrated Construction*), opracowany i zrealizowany przez konsorcjum badawcze i partnerów przemysłowych z Niemiec, Hiszpanii i Belgii. Zaproponowany w 2002 r. system robotyczny miał 10 m zasięgu i udźwig do 500 kg. Cztery lata później zmodyfikowano tę metodę w ETH Zurich przez zespół badawczy Gramazio & Kohler [20, 26] i zastosowano do projektowania i budowy składów winnicy w Gantenbein. Przeszło 20 000 cegieł ustawiono zgodnie z założonym wzorem, generowanym w programie parametrycznym. Cegły ustawione w pożądanej pozycji zostały przygotowane w formie prefabrykowanych paneli i wykorzystane w takiej postaci do budowy ścian winnicy (rys. 9).

Obok robotyzacji układania cegieł w realizacjach projektów architektonicznych, stosowane są rozwiązania ułatwiające i przyspieszające wznoszenie systemów stalowych, słupowych i słupowo-belkowych. Japoński robot mobilny WR służy do wykonywania spawów konstrukcji bezpośrednio na terenie budowy. Wykorzystywany jest do budowy słupów i belek o grubości do 100 mm i przekroju okrągłym, kwadratowym lub dwuteowym [21].

Automatyzacja i robotyzacja procesu wznoszenia budynku może budzić szczególne zainteresowanie w przypadku budynków wysokich. Liczne przykłady realizacji tą metodą wieżowców można znaleźć w Japonii. Jednym z najbardziej znanych i cennych przykładów jest SMART 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, aby przystąpić do montażu kolejnej kondygnacji [37].

Przemysł budowlany należy do branż szczególnie narażonych na niebezpieczne dla zdrowia i życia wypadki pracowników. I tu także mechatronika dostarcza rozwiązań pomagających w ich unikaniu. Należą do nich serwooperatory z mechanizmami np. typu egzoszkielety, chroniącymi przed przeciążeniami masowymi i siłowymi pracowników w trakcie ręcznej realizacji zadań (rys. 10) oraz systemy GPS kontrolujące lokalizację pracowników w trakcie wykonywania tych zadań. Dla monitorowania niebezpiecznych sytuacji konfliktu człowiek-maszyna lub

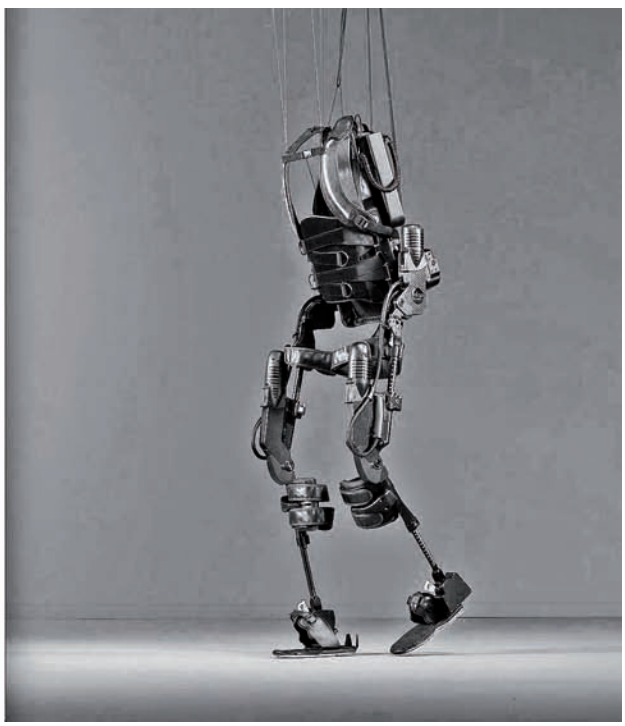
człowiek-konstrukcja, zarówno pracownicy, jak i wybrane elementy konstrukcyjne, mogą być wyposażone w kamery wizyjne i nadajniki GPS. Ten ostatni system pozwala też na gromadzenie informacji i danych, umożliwiając zautomatyzowanie wybranych procesów przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa zatrudnionych na budowie ludzi.

4. Wybrane realizacje mechatroniczne wspierające roboty budowlane

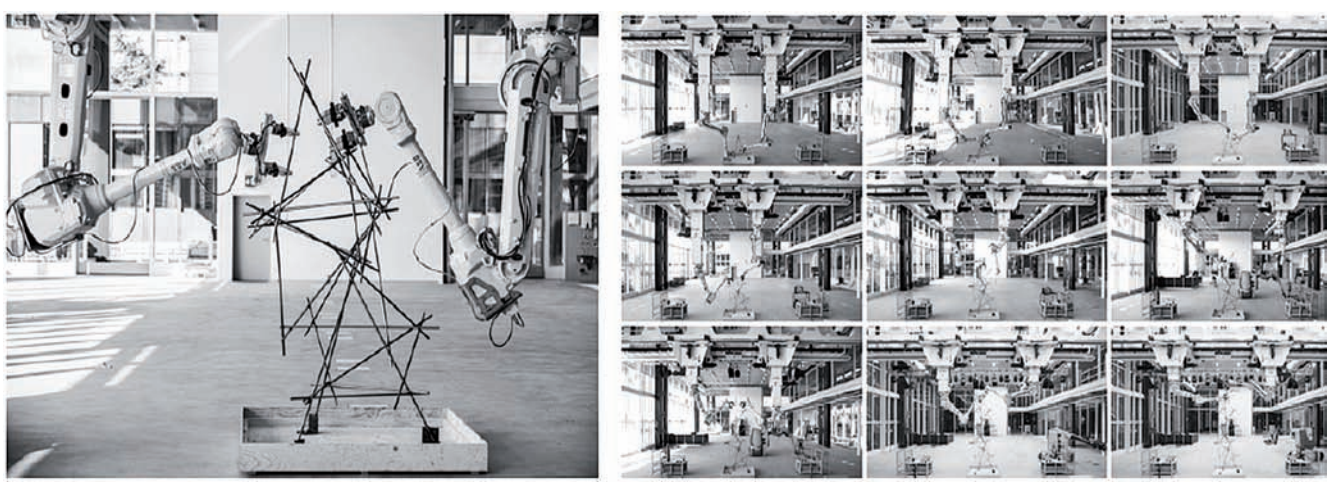
W krajach o zaawansowanym poziomie racjonalizacji technicznej procesów wytwarzania w przemysłach niebudowlanych, tzn. po ewolucyjnym przejściu od produkcji zmechanizowanej (Przemysł 1.0), przez produkcję zautomatyzowaną (Przemysł 2.0) do produkcji współczesnej, częściowo zrobotyzowanej (Przemysł 3.0) i osiągnięciu stanu tworzenia Platform Przemysłu 4.0, przygotowanie podobnej ewolucji w przemyśle budowlanym staje się przedmiotem zainteresowania licznych instytutów i wydziałów architektury uczelni w Azji, Europie i Ameryce Północnej [3–10, 13–15, 20, 23].

W Japonii wspomniane projekty badawcze stały się już rzeczywistością. Na pytanie, czy Japonia jest budowana przez roboty, śmiało można odpowiedzieć, że tak. Zautomatyzowany proces wznoszenia budynków rozpoczął się tam już w latach 80. XX stulecia. Powody były identyczne jak dopiero obecnie dostrzegane w Europie i Ameryce: niedobory siły roboczej i starzejące się społeczeństwo wymusiły zwiększenie wydajności pracy, co osiągnięto dzięki konsekwentnemu wdrażaniu systemów mechatronicznych, w tym przede wszystkim robotycznych, wspierających pracę operatorów-ludzi [11, 21, 22, 42].

Aktuatoryka mechatroniczna i robotyka w laboratoriach badawczych uczelni technicznych jest dziś powszechna, nie wyłączając pracowni architektonicznych. W szwajcarskiej ETH Zurich robotyzacja jest głównym elementem badań i prototypowego rozwoju urządzeń i maszyn procesu budowlanego (rys. 11). Powstało tam nowe podejście do konstrukcji nieregularnych struktur przestrzennych, w którym robot o sześciu

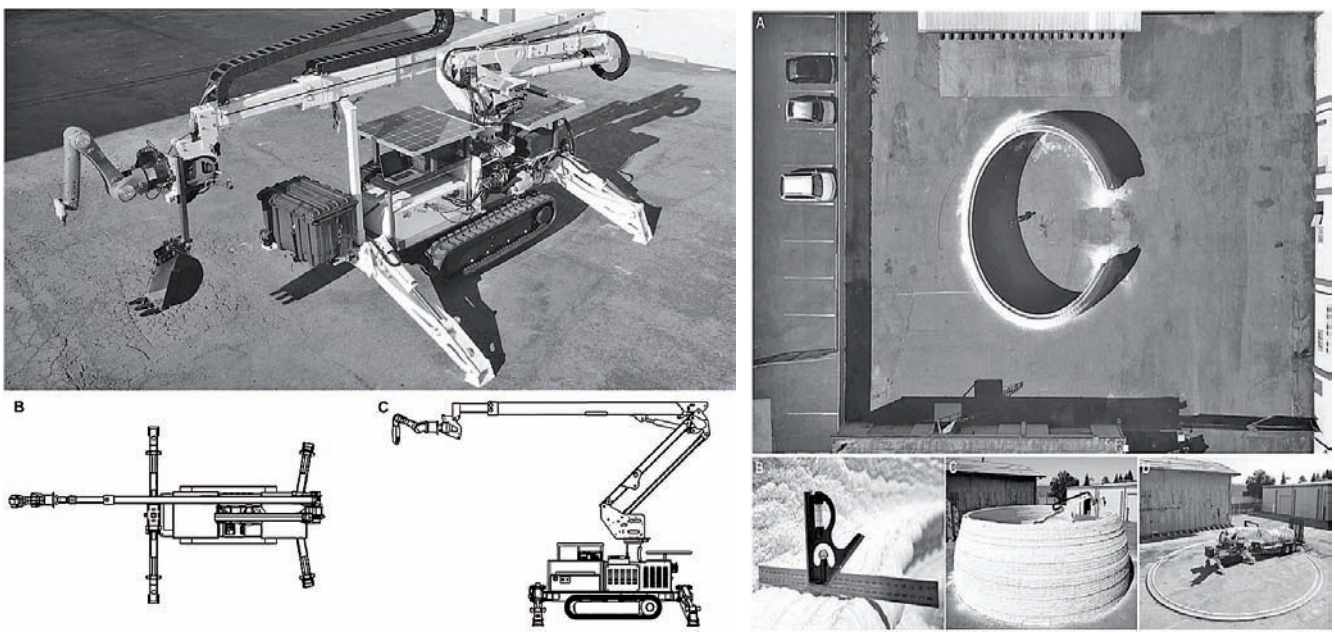


Rys. 10. Mechanizmy konwencjonalne oraz typu egzoszkielet serwooperatorów mogą przejmować obciążenia masowe i siłowe pracowników budowlanych
Fig. 10. A wearable exoskeleton robot potentially can offer the assembly operator with more strength and allow to assist her in handling heavy tools during the construction



Rys. 11. Spektrometria konstrukcji przestrzennych w budownictwie, Gramazio Kohler Research, ETH Zürich Fabricate, 2017 [20]
Fig. 11. Spectrometry of spatial structures in the building, Gramazio Kohler Research, ETH Zurich Fabricate, 2017

Rys. 12. Instalacja Water Spider Pavilion, projekt Achim Menges, TU Stuttgart 2016 [27]
Fig. 12. Installation Water Spider Pavilion, project Achim Menges, TU Stuttgart



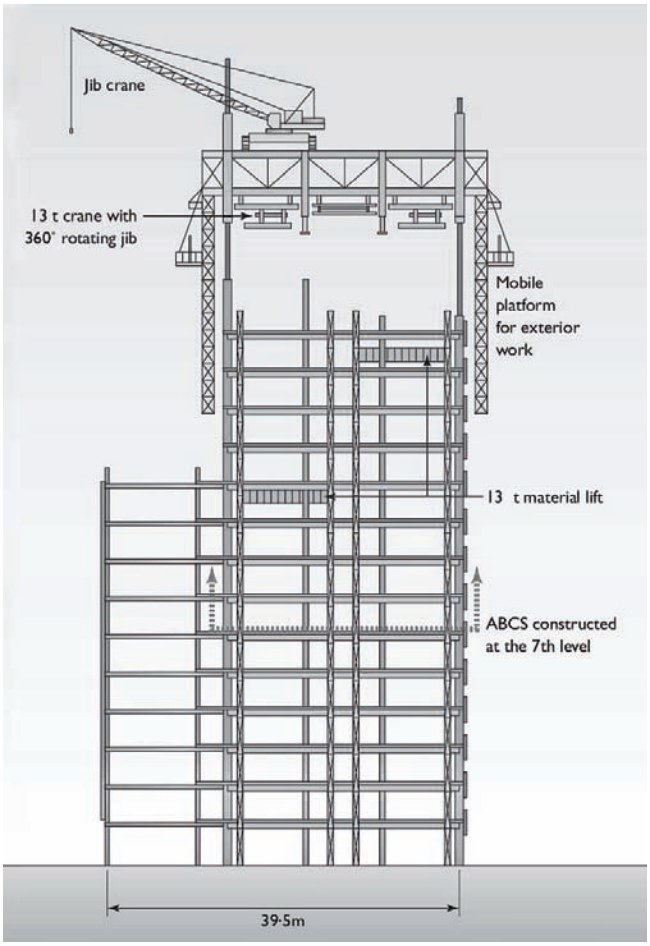
Rys. 13. Mobilna jednostka budowlana na platformie samojezdnej wykorzystująca druk 3D, jako addytywną technikę wytwarzania konstrukcji kopuły o średnicy 13 m. Po lewej cyfrowa platforma budowlana (ang. Digital Construction Platform – DCP), po prawej kopuła skonstruowana w technice druku 3D z wykorzystaniem DCP, MIT Robotics Groups, 2017 [23]
Fig. 13. Robotic building platform on a self-propelled platform using additive printing in the construction of the 13 meter dome formwork. On the left – the digital construction platform – DCP, on the right 3D printed dome, MIT Robotics Groups, 2017

stopniach ruchliwości (6 DoF) potrafi z żądaną dokładnością ustawiać elementy oraz interpretować swoją pozycję w stosunku do środowiska roboczego [20]. Pozwala to osiągać precyzję wykonania konstrukcji budowlanych nieosiągalną podczas pracy ręcznej człowieka.

W projekcie *Water Spider Pavilion* realizowanym w TU Stuttgart (niem. *Technische Universität Stuttgart*) konwencjonalny robot przemysłowy został zastosowany do nanoszenia włókna węglowego na wewnętrzną powierzchnię nadmuchanej konstrukcji membranowej (rys. 12). Robot rozprowadza materiał w momencie wykrycia powierzchni bazowej, co stało się możliwe dzięki dynamicznemu pomiarowi siły nacisku narzędzia na powłokę [27].

W opublikowanym w 2017 r. w „Science Robotics" artykule [23], opisany został opracowany w MIT Robotics Groups (ang. *Massachussets Institute of Technology Robotics Groups*) robot architektoniczny, zaprojektowany dla konkretnego zadania budowlanego, samodzielnie wytwarzanego na skalę architektoniczną. Robot, oprócz ruchów manipulacyjnych i orientacyjnych, realizuje dodatkowo ruchy lokomocyjne – może być wyposażony w platformę jezdną (rys. 13). Może wykonać technologicznie założone zadanie architektoniczne, np. za pomocą narzędzia drukarskiego 3D, także montować złożone układy konstrukcyjne, dostosowując się do specyficznych dla danego środowiska roboczego ograniczeń. Ten mechatroniczny system służyć ma do konstrukcji niekonwencjonalnych struktur architektonicznych, wykorzystując lokalne informacje środowiskowe do zarządzania procesem ich wytwarzania. Zdolności gromadzenia danych systemu mogą też bezpośrednio wspomagać szczegółowe obliczenia konstrukcyjne, generować pożyteczne zbiory danych i raportować aktualnie realizowane etapy zadania.

W Japonii, w latach 80., w pierwszej fazie automatyzacji procesów budowlanych, zadaniem operatorów-ludzi było dostarczanie informacji sensorycznych, których pozyskanie przez ówczesne



Rys. 14. Robotyzacja prac budowlanych w dużej skali w Japonii: Automated Building Control System (ABCS) korporacji Obayashi Corp. dla budownictwa wysokiego
Fig. 14. Robotization of building works in the great scale in Japan: Automated Building Control System (ABCS) of Obayashi Corp. for the high buildings

urządzenia pomiarowe było trudne lub niemożliwe. Pozwalało to na automatyzowanie tych procesów z ludzkim operatorem jako elementem pomiarowym układu regulacji. O zasadach, na których obecnie opiera się japoński system wspomagania wytwarzania i montażu elementów budowlanych, pisze Taylor [43], który dzieli japońskie systemy automatyki i robotyki budowlanej na cztery elementarne podsystemy mechatroniczne placu budowy (rys. 14):

- podsystem osłony platformy roboczej,
- podsystem podnośnikowy platformy roboczej,
- podsystem zautomatyzowanego dostarczania materiałów i elementów budowlanych na platformę roboczą,
- podsystem zintegrowanego centrum sterowania.

Do powszechnie stosowanych w Japonii zintegrowanych systemów automatyki i robotyki budowlanej należą dwa systemy: *Automated Building Control System* (ABCS) oraz *Big-Canopy* koncernu Obayashi Corp. (rys. 14). Powszechność oraz 15 lat doświadczeń zebranych w trakcie stosowania zautomatyzowanych systemów budowlanych skutkują wyraźną poprawą bezpieczeństwa produkcji budowlanej i co może jeszcze ważniejsze, ogromnym społecznym zaakceptowaniem działań automatyzacji i robotyzacji budownictwa (rys. 15).

Rys. 15. Robotyzacja prac budowlanych w małej skali w Japonii: serwooperator korporacji Shimizu Corp., sterowany przez jednego z pracowników, pomaga innym pracownikom budowlanym w układaniu ciężkich prętów stalowych
Fig 15. Robotization of building works in the low scale in Japan: servooperator of Shimizu Corp., controlled by one of workers, is helping builder workers for arrange heavy steel rods

Według ostatniego artykułu w majowym wydaniu (2017) czasopisma „Japan Times", place budowy w Japonii czeka nowa fala automatyzacji. Około 30% wszystkich japońskich pracowników budowlanych osiągnęło lub przekroczyło wiek 55 lat. Ze względu na rosnący niedobór robotników i starzejących się pracowników, coraz powszechniejsze staje się wykorzystywanie robotów i dronów do podnoszenia i przenoszenia ciężkich elementów i narzędzi budowlanych. Kajima, największa firma budowlana w Japonii, wykorzystuje na placach budowy między innymi drony, bezzałogowe jednostki latające, które zbierają dane wizyjne i korzystają z lokalizacji GPS. Wyposażony w indywidualny tablet operator-robotnik kieruje programowo na podstawie dostarczonych z drona informacji wizyjnych ciężkim sprzętem budowlanym i zestawia sekwencję zadań wykonywanych przez kilka, nawet do pięciu maszyn, np. formujących powierzchnię placu budowy.

Według Bocka [10–15] w japońskim przemyśle budowlanym prefabrykacja na placu budowy, także poza nim, stosowana jest już na nieporównywalnie dużą, z europejskim i amerykańskim budownictwem, skalę. Wielkoskalowa Prefabrykacja (ang. *Large Scale Prefabrication*), jest właśnie szczególnie skuteczna w Japonii, w sytuacji wysokiego poziomu automatyzacji i robotyzacji przemysłu budowlanego, który wytwarza około 150 000 prefabrykowanych mieszkań w skali roku.

5. Architektura kinetyczna

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

Choć idea stosowania ruchomych elementów w architekturze nie jest nowym pomysłem, czego przykładem są chociażby mosty zwodzone, jej ukonstytuowanie nastąpiło dopiero na przełomie lat 60. i 70. XX stulecia. Pozwolił na to rozwój nowych technologii, w tym aktuatorów i systemów przetwarzania danych.

Termin *architektura kinetyczna* odnosi się do budynków zaprojektowanych z myślą o możliwości wprawienia w ruch elementów struktury obiektu. Jednym z prekursorów architektury kinetycznej był Buckminster Fuller (1895–1983), amerykański konstruktor, architekt i filozof, twórca konstruktywizmu. W 1970 r., Zuk i Clark [45] w książce *Kinetic Architecture* pogłębiają rozumienie pojęcia natury architektury kinetycznej. Autorzy wyznaczają w niej warunki i kierunki rozwoju tej gałęzi architektury, między innymi przez czerpanie inspiracji właśnie ze świata natury, roślin, zwierząt, minerałów, tzn. przez bionikę [38].

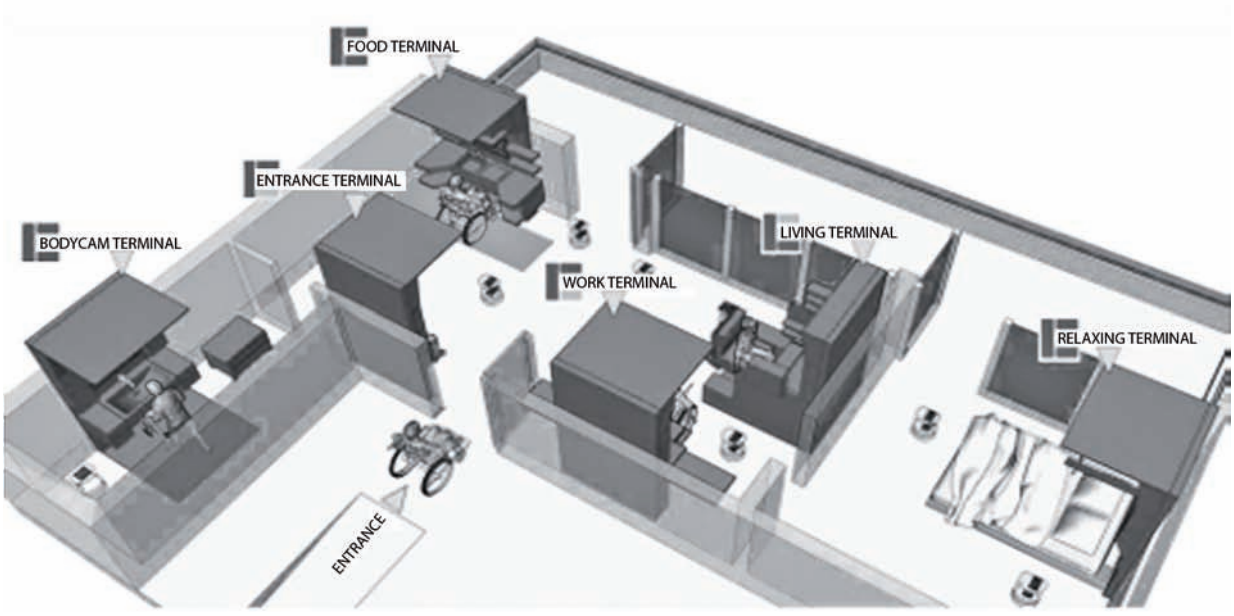
Pojęcie architektury responsywnej, odpowiadającej na zmieniające się potrzeby użytkowników oraz zmiany warunków środowiskowych narodziło się w podobnym okresie i zostało opisane przez Nicholasa Negroponte, założyciela w 1967 r. MIT *Architecture Machine Group*. Negroponte przedstawiał architekturę jako naturalny produkt wykorzystania techniki komputerowej [30]. Przewidując już w 1970 r. rolę sensorów i aktuatorów, zintegrowanych z budynkiem pisał, że nie tylko będzie możliwe monitorowanie i regulowanie warunków środowiskowych, ale także ułatwienie zmian w aktywności użytkowników przez alokację elementów i wyposażenia przestrzeni funkcjonalnych w tym budynku.

W XIX stuleciu filozofowie i artyści nazywali architekturę muzyką zastygłą (Friedrich W.J. Schelling, 1803) lub oniemiałą (Johan Wolfgang von Goethe, 1833, *Die Baukunst ist eine verstummte Tonkunst*) [17]. Wobec obiektów architektonicznych, które są w stanie zmieniać swoje parametry, funkcje i geometrię, porównania te są już nieaktualne. Statyczna przez wieki bryła budowli może być wprawiona w ruch przez nas, nawet przez nasze myśli lub przez zmieniające się parametry otoczenia bądź nawet muzykę. Dzięki nowym technologiom bezwładna dotychczas bryła zostaje wzbogacona o sensory, procesory, aktuatory, roboty oraz systemy obliczeniowe działające dynamicznie w czasie rzeczywistym oraz sieci komunikacyjne kontaktujące się ze światem zewnętrznym, stając się systemem łączącym mechatronikę i architekturę w nową całkiem dyscyplinę techniki: architektronikę. W najprostszym wykonaniu tego systemu, w etapie przejściowym, jako elementy kinetyczne budynku, zmieniające jego wygląd, charakter lub funkcjonalność (rys. 16). Mogą one zmieniać swoje położenie, pozycję lub orientację w odpowiedzi na sygnał z sensorów bądź w wyniku implementacji zaprogramowanej lub wymuszonej sekwencji sygnałów sterujących.

Współczesna architektura musi już być postrzegana jako system dynamiczny, który zmienia się w odpowiedzi na jego otoczenie, a nawet jako organizm zdolny modyfikować sam siebie. Pojęcie architektroniki lub ROBOarchitektroniki [43], określające dyscyplinę łączącą w sobie architekturę i mechatronikę, zostało stworzone w oczekiwaniu na sygnalizowany już rozwój integracji obu dziedzin. Razem z kontrolowanymi przez użytkownika zmechatronizowanymi systemami kinetycznymi wykorzystującymi sensory, procesory i aktuatory, zasługuje na szczegółową analizę i będzie przedmiotem badań nazwanych ROBOmoves, prowadzonych w najbliższym czasie przez autorów artykułu z Wydziału Architektury i Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

Dobrym przykładem podobnych badań był niedawno zakończony projekt LISA Habitec [15], prowadzony w wyniku dwuletniej (2014–2016) współpracy multidyscyplinarnej grupy kierowanej przez Thomasa Bocka w Technische Universität München. Jego celem była niezwykle ważna kwestia społeczna, jaką jest mechatroniczne i architektoniczne wsparcie seniorów, osób niedołężnych, chorych i kalekich, wymagających opieki. Celem projektu było *Opracowanie techniki, która może wspierać ludzi i zagwarantować im samodzielne życie dłużej. LISA oferuje funkcjonalne, inteligentne meble, które zapewniają pomoc fizyczną i techniczną. Wszystkie funkcje są modularne* (*umożliwiają* zmiany)*, a zatem adaptowalne do indywidualnych potrzeb i ograniczeń* (rys. 17). Ten przykład ilustruje wprost niewyobra-

Rys. 16. Interactive Wall, Hyperbody, TU Dresden, Festo 2009 – kinetyczność architektury polega na ruchu fragmentów budynku, odpowiadając na warunki środowiskowe i potrzeby użytkownika, elementy interaktywne zmieniają geometrię za sprawą wbudowanych sensorów, procesorów i aktuatorów pneumotronicznych
Fig. 16. Interactive Wall, Hyperbody, TU Dresden, Festo 2009 – interactivity is addressed here at the level of building fragments that become dynamic, responding to environmental factors or user specific needs, the real-time interactive elements are activated via embedded sensor and pneumotronic actuators



Rys. 17. LISA Habitec (ang. Habitat, Bits and Technology in an Ageing Society), składa się z serii dedykowanych, interaktywnych, zmechatronizowanych mikropomieszczeń i ich wyposażenia, zgromadzonych w istniejącej przestrzeni jednostki mieszkalnej [15]
Fig. 17. LISA Habitec (Habitat, Bits and Technology in an Ageing Society), consists of series of dedicated, interactive robotic micro-rooms situated within the existing space

żalny jeszcze dzisiaj potencjał architektury wzbogaconej urządzeniami, maszynami i systemami mechatronicznymi.

6. Podsumowanie

W przypadku idei kinetycznej (ROBOmoves) architektura cierpi na zespół *deus ex machina*[1]. To stan, który pociąga za sobą nagłe zmiany, a w naukowym znaczeniu wiąże się ze skokowym wprowadzeniem nowej hipotezy, która ma rozwiązać zadany problem. Wykorzystywanie mechatroniki, a dzięki niej aktuatorów i robotów, jako *panaceum* na wszystkie problemy architektury spotyka się jeszcze ciągle ze sprzeciwem i społecznym, i samych architektów. Warto jednak pamiętać, że, historycznie rzecz traktując, architektura była zawsze ewolucyjnie, silnie powiązana z rozwojem technologii, a wykorzystywanie nowo pojawiających się narzędzi i technologii było naturalną praktyką projektową [25, 40]. Dziś zmiany wprowadzone przez rozwój technologii informacyjnych i internetowych w połączeniu z narzędziami dostarczanymi przez mechatronikę, muszą powodować szybką transformację dość przestarzałego w tym obszarze przemysłu budowlanego. Dla architektów we współczesnym społeczeństwie wiedzy pojawiają się więc nowe wyzwania projektowe.

Te nowe aspekty oferują interesujące możliwości, ponieważ wdrożenie rozwiązań mechatronicznych wymaga systemowego i interdyscyplinarnego podejścia do rozwiązywania problemów projektowych architektury gwarantując jednocześnie efekt synergii.

We współczesnej praktyce architektonicznej i edukacji w dziedzinie nauk stosowanych pojawia się nowe podejście "badań przez projektowanie" (ang. *Research by Design*). Na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskie, we współpracy z Wydziałem Mechatroniki, badane są te projektowe aspekty robotyki, techniki informacyjnej i inżynierii materiałowej [44]. Projektowanie stanowi tu istotną część procesu badawczego. Współpraca tych dwóch wydziałów w tej dziedzinie odbywa się w trakcie regularnych zajęć programu ASK (ang. *Architectural Society of Knowledge*), z technicznym wsparciem ze strony firmy Festo Polska, reprezentującego wiodącego w skali światowej producenta sprzętu mechatronicznego.

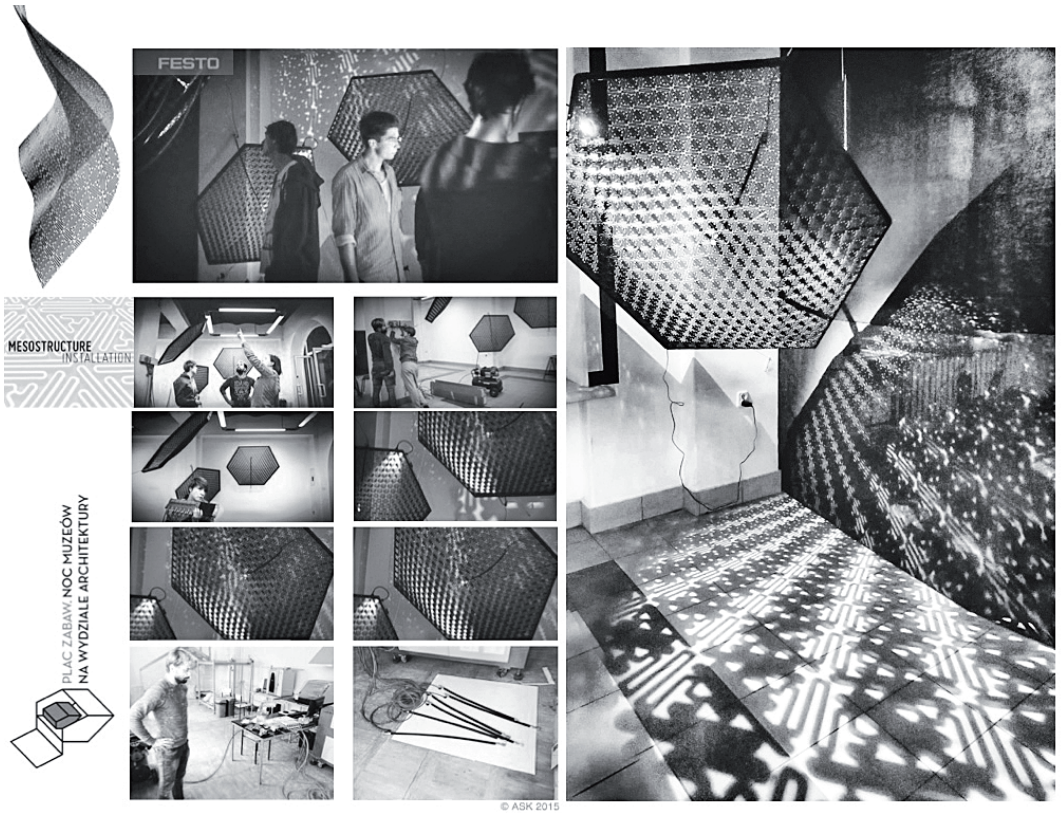
Podczas zajęć w ROBOstudio wykorzystywane są badania i metody oparte na projektowaniu, które jest rekurencyjnym procesem pytań i propozycji. W epoce społeczeństwa wiedzy proces ten uwzględnia uczestnictwo społeczne, czyniąc projektowanie praktyką refleksyjną. Krytyczna ocena, metody porównawcze i ewaluacja odbywają się poprzez wspólne, multidyscyplinarne rozwiązywanie problemów. Kilka zrealizowanych projektów studyjnych ROBOstudio przedstawiono na rys. 18 i 19.

Wśród realizowanych w projekcie tematów występuje ROBOconstruct, badający możliwość integrowania architektury i mechatroniki w projektowaniu, prototypowaniu i realizacji budynków. Projekt stara się realizować integrację tych dwóch dziedzin przez cyfryzację procesu konstrukcyjnego i wykorzystywanie zaawansowanych materiałów i technologii, w tym robotów [44].

W temacie ROBOsenior projektowane jest także środowisko dla osób starszych i niepełnosprawnych. Jest to interaktywny i modularny system wspomagany nowymi technologiami, pozwalającymi na kontrolę środowiska domowego i stanu zdrowia mieszkańców. Celem projektu jest opracowanie prototypowego systemu, przeznaczonego również do zautomatyzowanego i zrobotyzowanego wsparcia osób starszych, wymagających opieki osób trzecich. Zwiększająca się długość życia i niski przyrost naturalny w krajach rozwiniętych, także w Polsce, sprawiają, że zautomatyzowanie procesów odpowiadających za komfort i bezpieczeństwo seniorów może być jedynym sposobem dla skutecznego zapewnienia wspomnianej opieki. Czynnikiem, który musi być uwzględniony jest chroniczny brak kadry pielęgniarskiej lub przynajmniej usprawnienie jej działania przez zmniejszenie wysiłku fizycznego, np. w trakcie czynionych wspólnie z pacjentem ćwiczeń rehabilitacyjnych.

W niedalekiej przyszłości mechatronika w architekturze może być wykorzystana nie tylko do projektowania, wytwarzania, montażu budynków, ale także do uczynienia naszych domów i miast przestrzenią reagującą na zmieniające się warunki zewnętrzne i potrzeby użytkowników [40].

1 określenie to pochodzi z greckiej tragedii, gdzie ruchome platformy były stosowane do wynoszenia na scenę aktorów grających bogów. W efekcie wykorzystania tych urządzeń, wśród zaskoczonych widzów wywoływana była natychmiastowa reakcja emocjonalna ...



Rys. 18. Interaktywna instalacja z zastosowaniem pneumatycznych aktuatorów Festo, Noc Muzeów, ROBOstudio, Wydział Architektury Politechniki Warszawskiej, Festo 2016
Fig. 18. The interactive installation using Festo pneumatic actuators, Museums Night, ROBOstudio, Faculty of Architecture, Warsaw University of Technology, Festo 2016

Rys. 19. Prezentacja rozwiązań ROBOstudio, Interaktywne Atrium Wydziału Architektury Politechniki Warszawskiej, 2015
Fig. 19. Presentation of projects ROBOstudio, Interactive Atrium of the Faculty of Architecture, Warsaw Technical University, 2015

W Polsce szanse tej transformacji są znaczne z uwagi na obecny, bardzo niski poziom zautomatyzowania i zrobotyzowania i przemysłu, i życia społecznego i rodzinnego [34]. Ale wkrótce idee takie, jak Przemysł 4.0 będą miały istotny wpływ na budowanie, projektowanie i realizację projektów architektonicznych i urbanistycznych. Można już zaobserwować, że technologie zautomatyzowanej i zrobotyzowanej budowy, wykorzystanie maszyn budowlanych o charakterze robotycznym, systemy robotów serwisowych, technologie informacyjne i internetowe łączą się ze środowiskiem budowlanym, stając się nieodłącznymi elementami budynków, komponentów budynków, mieszkań, wbudowanych mebli... Automatyka i robotyka stają się wszechobecne i zaczynają wieść własne życie i tworzyć środowisko urbanistyczne [10, 43, 44].

Bibliografia

1. Abele E.,, Reinhart G., *Zukunft der Produktion.* Carl Hanser Verlag, München 2011.
2. Adriaenensens S., Gramazio F., Kohler M., Menges A., Pauly M. (eds.), *Advances in Architectural Geometry.* Proc. *Advances in Architectural Geometry* (AAG), ETH Zürich, vdf Hochschulverlag AG, Zürich 2016.
3. Andreani S., Bechthold M., *(R)evolving Brick: Geometry and Performance Innovation in Ceramic Building Systems Through Design Robotics.* [in:] Gramazio, K. (ed.), *Fabricate: Negotiating Design & Making,* Gbt Verlag, Zürich 2014.
4. Bechthold M., *Design Robotics: A New Paradigm in Process-Based Design.* [in:] Oxman, R., *Theories of the Digital in Architecture.* Routledge/Taylor & Francis, Abingdon 2014.
5. Bechthold M., *Design Robotics: New Strategies for Material System Research.* [in:] Peters B., Peters T. (eds.), *Inside Smart Geometry.* John Wiley & Sons, London 2013, 254–267.
6. Bechthold M., Griggs K., *Coffee, Cake, CAD/CAM: Reinventing the Urban Diner.* Cambridge-Harvard Design School: *Technology Report Series 2003-3.*
7. Bechthold M., Griggs K. et al., *New Technologies in Design I: Digital Design and Manufacturing Techniques I.* Cambridge-Harvard Design School: *Technology Report Series 2001-1.*
8. Bechthold M, Griggs K. et al., *New Technologies in Design I: Digital Design and Manfuacturing Techniques II & III.* Cambridge-Harvard Design School: *Technology Report Series 2003-2.*
9. Bechthold M., *Product and Process Approaches.* [in:] Piroozfar P., Piller F. (eds.), *Mass Customisation and Personalisation in Architecture and Construction.* Routledge/Taylor & Francis, Abingdon 2013.
10. Bock Th., *Construction Robotics enabling Innovative Disruption and Social Supportability.* [in:] Proc. of the *Intern. Symp. on Automation and Robotics in Construction* (ISARC). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, Vilnius 2015, 1-11.
11. Bock Th., *Evolution of Large Scale Industrialization and Service Innovation in Japanese Prefabrication Industry.* "Construction Innovation", Vol. 12, Iss. 2, 2012, 156–178, DOI: 10.1108/14714171211215921.
12. Bock Th., Lauer W.V., *Location Orientation Manipulator by Konrad Wachsmann, John Bollinger and Xavier Mendoz.* [in:] *International Symposium on Automation and Robotics in Construction,* ISARC 2010.
13. Bock Th., Linner Th., *Robotic Industrialization, Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication.* The Cambridge University Press, 2015.
14. Bock Th., Linner Th., *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction.* The Cambridge *Handbooks in Construction Robotics*, 2015.
15. Bock Th., Linner Th., *The Cambridge Handbooks on Construction Robotics. Series focuses on the implementation of automation and robot technology to renew the construction industry.* GSD Design Robotics Group, Material Processes and Systems Research, *Ambient Integrated Robotics*, Vol. 1–5, Harvard 2017.
16. Brüninghaus J., Stum S., Nelles J., Mertens A., Schlick Ch., Brell-Cockan S., *Arbeitsorganisatorische und ergonomische Anforderungen an die Mensch-Roboter-Interaktion auf der Baustelle der Zukunft.* Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.v., RWTH Aachen 2016.
17. Eckermann J.P., *Die Baukunst ist eine erstarrte Musik – Gespräche mit Goethe*, 1829.
18 Gilbert H., *The Dream of the Factory-Made House: Walter Gropius and Konrad Wachsmann.* The Amazon Book Review, 1984.
19. Graham W., *Miasta wyśnione. Siedem wizji urbanistycznych, które kształtują nasz świat,* Wyd. Karakter, Kraków 2016.
20. Gramazio F., Kohler M., Willmann J., *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture.* Park Books, Zürich 2017.
21. Hasegawa Y., *New Wave of Construction Automation and Robotics in Japan.* Waseda University, 2000.
22. Hartley J., *Flexible Automation in Japan*, Springer Verlag, 1984.
23. Keating S.J., Leland J.C., Cai L., Oxman N., *Toward Site-specific and Self-sufficient Robotic Fabrication on Architectural Scales.* "Science Robotics", Vol. 2, Iss. 5, 2017, DOI: 10.1126/scirobotics.aam8986.
24. Kaliczyńska M., Dąbek P., *Value of the Internet of Things for the Industry – An Overview.* [in:] *Mechatronics: Ideas for Industrial Applications*, 2015, 51–63, DOI: 10.1007/978-3-319-10990-9_6.
25. Knothe J., *Sztuka budowania.* Wyd. Karakter, Kraków 2015.
26. Kohler M., Gramazio F., Willmann J., *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*: *Gramazio & Kohler Research.* ETH Zurich, Zurich Park Books 2005–2017.
27. Menges A., *Material Performance – Fibrous Tectonics & Architectural Morphology.* Harvard University GSD, Cambridge 2016.
28. Miodownik M., *W rzeczy samej. Osobliwe historie współczesnych materiałów, które nadają kształt naszemu światu.* Wyd. Karakter, Kraków 2016.
29. Mitchell W.J., *The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition.* The MIT Press, 1990.
30. Negroponte N., *The Architecture Machine.* MIT Press, 1970.
31. Olszewski M., Barczyk J., Bartyś M., Mednis W., Chojecki R., *Urządzenia i systemy mechatroniczne.* Część 2, podręcznik opracowany pod kierunkiem Olszewski M. REA, Warszawa 2009.
32. Olszewski M., Barczyk J., Falkowski J.L., Kościelny W.J., *Manipulatory i roboty przemysłowe. Automatyczne maszyny manipulacyjne,* praca napisana pod kierunkiem Olszewski M. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, I wyd. 1985; II wyd. popr. i uzupeł. 1993.
33. Olszewski M., Kościelny W.J., Mednis W., Szaciłło-Kosowski J., Wasiewicz P., *Urządzenia i systemy mechatroniczne.* Część 1, podręcznik opracowany pod kierunkiem Olszewski M. REA, Warszawa 2009.
34. Olszewski M., *Mechatronizacja produktu i produkcji – przemysł 4.0.* "Pomiary Automatyka Robotyka", R. 20, Nr 3, 2016, 6–28, DOI: 10.14313/PAR_221/13.
35. Olszewski M., *Mechatronizacja produktu i produkcji – Przemysł 4.0.* "Napędy i Sterowanie", 6(19), 2017, 74–90.
36. Park D., Bechthold M., *Designing Biologically Inspired Smart Building Systems: Processes and Guidelines.* "International Journal of Architectural Computing", Vol. 11, No. 4, 2013, 437–467.
37. Smith I., Wamuziri S., Taylor M., *Automated Construction in Japan.* [in:] Proc. *Inst. Civil Eng.* 2003, 156, 34–41.

38. Stoll W., *Bionics. Inspiring technology.* H. Schmidt University Printing Press Publishing House, Mainz 2012.
39. Stumm S., Braumann J., von Hilchen M., Brell-Cokcan S., *On-Site Robotic Construction Assistance for Assembly Using A-Priori Knowledge and Human-Robot Collaboration.* [in:] Rodić A., Boranglu T. (eds), *Advances in Robot Design and Intelligent Control*, Vol. 540, Springer 2017.
40. Sudjic D., *Język miast.* Wyd. Karakter, Kraków 2015.
41. Sutherland I., *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System.* Ph.D. thesis, MIT, 1964.
42. Taylor M. et al., *Automated Construction in Japan.* Proc. of ICE 2003, 34–41, DOI: 10.1680/cien.2003.156.1.34.
43. Wojtowicz J., Johnson G., Meyboom A., *Architectronics: Towards a Responsive Environment.* "International Journal of Architectural Computing", 2011, Vol. 9, No. 1, 77–98.
44. Wrona S., Wojtowicz J., *Wykorzystanie sztucznej inteligencji i robotyki w architekturze i urbanistyce*, manuskrypt 2017 (w przygotowaniu).
45. Zuk W., Clark R.H., *Kinetic Architecture.* Van Nostrand Reinhold, New York 1970.

Architecture with Mechatronics – Architectronics

Abstract: In the thesis authors are discussing the new reality resulting from the process of integrating architecture and mechatronics, in it above all automations and robotizations. They are becoming creative tools in processes of the design, modeling and building architecture for the society of the knowledge. The examples of architectural solutions discussed in this article demonstrate that the automation and the robotization of the both fabrication and assembly of structures and building elements are important and expected undertakings. Mechatronizated, kinetic architecture is becoming also an excellent way of considering changing conditions of the environment and user requirements becomes the new form of interface. These changing conditions and requirements for products of modern architecture are direct analogies of changing requirements and their realization also in relation to products and the industrial production, included within a generally accepted term of industrial (r)evolution 4.0.

Keywords: mechatronics, architecture, automation and robotization of the building, kinetic architecture

dr hab. inż. Mariusz Olszewski,
prof. Politechniki Warszawskiej
m.olszewski@mchtr.pw.edu.pl

Pracownik Politechniki Warszawskiej od 1965 r., stypendysta Fundacji Alexandra v. Humboldta w latach 70., w 1978 r. organizuje pierwszą w Polsce konferencję naukową na temat robotyki przemysłowej, w 1985 r. WNT wydaje napisaną pod jego kierunkiem pierwszą polską monografię na temat maszyn manipulacyjnych, w minionym dziesięcioleciu wydawnictwo REA wydaje napisane pod jego kierunkiem pierwsze polskie podręczniki z zakresu mechatroniki: „Mechatronika" (2002), „Podstawy mechatroniki" (2006) oraz dwutomowe „Urządzenia i systemy mechatroniczne" (2009). Specjalista w zakresie napędów i sterowania maszyn i robotów przemysłowych. Dyrektor Instytutu Automatyki i Robotyki na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w latach 1994-2012; od 2003 r. członek Rady Naukowej Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów; wiceprzewodniczący Komisji Kształcenia Zawodowego w Polsko-Niemieckiej Izbie Przemysłowo–Handlowej.

prof. dr mgr arch. Jerzy Wojtowicz,
prof. zw. Politechniki Warszawskiej
Professor Emeritus The University of British Columbia
jerzy@post.harvard.edu

Wieloletnia praca w radach nadzorczych, naukowych i doradczych Architectural Institute of British Columbia, University Research Grants Council, International Review Board for CAAD Futures and Association of Computer Aided Design in Architecture, doradca Hong Kong Government, członek-założyciel Canadian Design Research Network (CDRN). Liczne publikacje z tematyki badawczej, nagrody i wystawienia konkursowych projektów architektonicznych wykorzystuje w propozycjach transformacji procesów kształcenia współczesnej generacji architektów w szkolnictwie wyższym Kanady, Hong Kongu, Japonii, USA i do wyłonienia nowej dziedziny projektowania wspomaganego komputerem i współpracy projektowej z wykorzystaniem sieci komputerowych VDS (Virtual Design Studio). Obecnie pracuje na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej nad zastosowaniem komputerów w modelowaniu i symulacji robotów w fabrykacji i montażu rozwiązań architektonicznych. Aktywnie uczestniczy w pracach zespołu formującego program ASK (Architecture for Society of Knowledge), kształtującego nowe tendencje w działalności zawodowej architektów społeczeństwa wiedzy.

prof. dr hab. inż. arch. Stefan Wrona, prof. zw. Politechniki Warszawskiej
wrona@arch.pw.edu.pl

Pracownik Wydziału Architektury Politechniki Warszawskiej od 1970 r., od 1967 r. prekursor zastosowań elektronicznej techniki obliczeniowej i projektowania wspomaganego komputerem w architekturze. Do chwili obecnej uprawia badania naukowe i nauczanie w zakresie projektowania i modelowania parametrycznego BIM (Building Information Modelling) oraz zastosowań mechatroniki i robotyki w architekturze i urbanistyce. W latach 1989-2008 Kierownik Zakładu Projektowania Architektonicznego Wspomaganego Komputerem, Dziekan Wydziału Architektury w latach 1994–2002 i 2008–2016, Kierownik Katedry Projektowania Architektonicznego od 2016 r. Pobyty studialne w Niemczech, Finlandii, USA i Norwegii. Od kilku lat współpracuje z Wydziałem Mechatroniki i firmą Festo Polska w ramach anglojęzycznych studiów magisterskich ASK (Architecture for Society of Knowledge).

mgr inż. Karolina Dąbrowska-Żółtak
karolina.e.dabrowska@gmail.com

Absolwentka dwóch wydziałów Politechniki Warszawskiej: Wydziału Mechatroniki (2015) i Wydziału Architektury (2016). Od 2016 r. studentka studiów doktoranckich na Wydziale Architektury. Zainteresowania naukowe w tematyce integracji mechatroniki i architektury oraz matematycznych inspiracji w projektowaniu architektonicznym.