

# ROBOTYZACJA I AUTOMATYZACJA

## Innowacje technologiczne w budownictwie. Część 4

**prof. PW, dr hab. inż. Roman Marcinkowski, dr inż. Anna Krawczyńska-Piechna**  
Politechnika Warszawska  
**dr inż. Sławomir Biruk**  
Politechnika Lubelska

Dokonujący się w ostatnich dziesięcioleciach postęp w zakresie technologii materiałowych wymusił (i stale wymusza) daleko idące zmiany i usprawnienia w dziedzinie zmechanizowania robót.

Automatyzacja i robotyzacja procesów technologicznych jest wyzwaniem przyszłości. W ośrodkach naukowych i badawczych, głównie w Japonii, opracowano wiele prototypów urządzeń i robotów mających na celu zautomatyzowanie prostych i złożonych procesów budowlanych. Są to najczęściej roboty z zaprogramowanym cyklem pracy, ze zdalnym sterowaniem i obserwacją wzrokową pola pracy lub z układem wizyjnym, ale także roboty adaptacyjne z możliwością korygowania czynności wykonywanych zgodnie z programem przy wykorzystaniu różnego rodzaju czujników i sensorów.

Wdrażanie robotyki w budownictwie jest utrudnione ze względu na jego tradycyjny, rzemieślniczy charakter, zmienne warunki pracy na budowie oraz wysokie koszty projektowania i eksploatacji automatów i robotów. Jest to powodem coraz intensywniejszych prac nad rozwojem technologii budownictwa modułowego, w którym rozwiązania przestrzenno-funkcjonalne obiektów są uzyskiwane z przygotowanych w zakładach produkcyjnych modułów i prefabrykatów.

### Roboty do prac budowlanych

Z wielu urządzeń zaprezentujemy te, które znalazły komercyjne zastosowania.

W sprzedaży dostępny jest SAM100 (ang. Semi-Automatic Mason), zaprojektowany w Stanach Zjednoczonych przez Wasco i Construction Robotics, półautomatyczny robot budowlany do murowania (rys. 1.).

Dzięki wielu stopniom swobody SAM100 jest w dużej mierze elastyczny, uniezależniając się od nierówności, po których porusza się platforma, do której jest zamontowany [20]. Manipulator robota nakłada zaprawę i układa elementy murowe zgodnie z zaprogramowanym wzorem lub sposobem wiązania. Pozycję cegły układanej w następnym cyklu oraz orientację względem muru podczas układania ustala wyposażony w laser efektor. SAM100 wykorzystywany był już w realizacji 16 obiektów kubaturowych w Stanach Zjednoczonych, poprawiając blisko 3-krotnie tempo realizacji prac.

Koncepcję druku 3D i zautomatyzowanego murowania łączy w sobie robot HadrianX – projekt grupy Fastbrick Robotics (rys.2.). W przeciwieństwie do SAMa100 prototypowe rozwiązanie australijskich inżynierów można nazwać mobilną maszyną, która drukuje bloczkami (lub innymi elementami murewymi). Robot pracuje w promieniu 30 m, docina elementy murowe, aplikuje masę klejową i, w odróżnieniu od innych urządzeń lub projektów urządzeń, wykonuje mur o dowolnej geometrii.

Wykonywanie prac ogólnobudowlanych jest wspomagane przez rozmaite manipulatory do przenoszenia ciężkich elementów (np. Mighty Hand firmy Kajima Co.), programowalne pompy i dystrybutory mieszanki betonowej (np. CONDIS firmy Takenaka Co.), roboty do zacierania powierzchni betonowych (np. FLATKN firmy Shimizu Co.), programowalne roboty do montażu płyt suchego tynku (np. CFR-1 firmy Shimizu Co.), automatyczne agregaty do nanoszenia wypraw tynkarskich na ściany i sufity, tzw. *plastering and rendering machines* (np. SB Multi-Coater Shimizu Co, EX-XP firmy EZ-Renda – rys. 3.). Na placach budowy z powodzeniem były wykorzystywane roboty spawalnicze pozwalające na wykrycie położenia miejsca styku łączonych elementów, skonstruowane np. w przedsiębiorstwach Takenake, Shimizu i Obayashi, roboty malarskie (np. TPR-02 firmy Taisei Co.), roboty do nanoszenia powłok ogniochronnych na konstrukcje stalowe (np. Shimizu SSR-3) i pozwalające zautomatyzować wiele innych procesów [22].

Niewątpliwie przyszłość należy do humanoidalnych, autonomicznych robotów, które odbierają informacje ze środowiska poprzez sensory, przetwarzają je i samodzielnie podejmują decyzje (rys.4.). Sterowane humanoidalne roboty mogą obecnie zastępować pracę operatorów większości maszyn budowlanych.



Fot. arch. Interhandler

### Automatyczne systemy sterowania maszynami

Wysoki stopień automatyzacji udało się osiągnąć w maszynach budowlanych. Powszecnie są stosowane automatyczne systemy sterowania do prac ziemnych i drogowych. Dają one możliwość kierowania maszynami na podstawie danych pochodzących z satelitarnych systemów nawigacyjnych (systemy 3D) lub obrotowych niwelatorów (systemy 2D). Stosowanie tych systemów zwiększa wydajność prowadzonych prac (nawet o 50%) poprzez zmniejszenie liczby przejazdów maszyny i zapewnianie ciągłości prowadzenia robót (eliminacja pośrednich wytyczeń), a przede wszystkim korzystnie wpływa na jakość robót.

Dostępne są także systemy zdalnego sterowania maszynami budowlanymi opracowane np. przez japońskie firmy Penta-Ocean Construction Co. i Fujita (rys. 5). Operator otrzymuje drogą bezprzewodową, w czasie rzeczywistym, obraz pochodzący z kamer zainstalowanych na sterowanej maszynie, z kamery szerokokątnej, która przekazuje obraz całego placu budowy oraz z dodatkowego układu niezależnie sterowanych kamer. Pozwala mu to na kierowanie maszynami poprzez interaktywny interfejs użytkownik–maszyna. Dzięki podłączeniu centrum sterowania do internetu jest możliwe kierowanie maszynami budowlanymi z odległości tysięcy kilometrów. Aby ułatwić sterowanie i kontrolę pracy maszyn, zastosowano pozycjonowanie korzystające z technologii GPS oraz technologię rozpoznawania otoczenia (integracji danych obrazowych i detekcji ruchu). Rzeczywista wydajność prac wynosi od 60 do 70% w stosunku do sterowania konwencjonalnego.

Obecnie są z powodzeniem wdrażane autonomiczne systemy maszyn budowlanych do robót ziemnych; transportowe (ang. *Autonomous Haulage System* – AHS) i ładunkowe (ang. *Autonomous Loading System*). Systemy te są złożone głównie z koparek oraz jednostek transportowych,



Rys. 1. Robot SAM100 podczas pracy [20]



Rys. 2. Widok prototypu robota HadrianX [21]



Rys. 3. Robot tynkarski firmy EZ-Renda [23]



Rys. 4. Montaż paneli z wykorzystaniem humanoidalnego robota HRP-2 "Promet" firmy Kawada Industries, Inc. [24]



Rys. 5. Zdalne sterowanie maszynami budowlanymi; a) zdalnie sterowany robot firmy Fujita [25], b) centrum sterowania maszynami – Penta-Ocean Construction Co. [26]

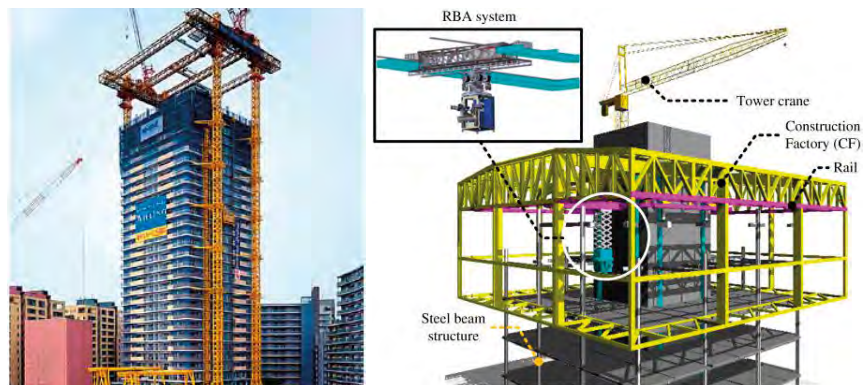
ale mogą obejmować także inne maszyny, np. ładowarki i spycharki. Liderem w tej dziedzinie są firmy Hitachi i Komatsu. Autonomiczne maszyny są wyposażone w inteligentny układ napędowy sterujący pracą silnika, skrzynią biegów, hamulcami i układem kierowniczym. Maszyny są wyposażone w system pozycjonowania GPS oraz kamery usytuowane na przodzie pojazdu, dzięki czemu jest możliwe rozpoznawanie ukształtowania terenu, przeszkód, innych pojazdów oraz znaków drogowych. Pojazdy są wyposażone także w laserowe skanery, których zadaniem jest wykrywanie przeszkód. Dane z placu budowy są przesyłane bezprzewodowo do centralnego komputera, który wyznacza trasę przejazdu i wysyła sygnały do układu sterującego maszyny. Głębokość kopania oraz najdogodniejsze położenie koparki jest obliczane na podstawie mapy cyfrowej terenu i aktualnej lokalizacji koparki. Położenie ładowanego samochodu jest wyznaczane przez pozycję łyżki koparki lub ładowarki wyposażonej w GPS. Na podstawie informacji z sensorów jest wybierane miejsce rozładunku kolejnej łyżki na skrzyni załadunkowej jednostki transportowej. Do wyznaczania tras przejazdu firma Komatsu wykorzystuje technologię tworzenia map terenu amerykańskiej firmy Skytech. Mapa jest tworzona na podstawie obrazów przekazywanych przez drony, bowiem stosowanie aktualnie dostępnych map cyfrowych nie zapewnia wymaganej dokładności prowadzenia prac.

Automatyczne moduły (tzw. enkodery) sterujące stosuje się także w dźwigach oraz podnośnikach, dzięki czemu możliwe jest zdalne sterowanie obracającym się wysięgnikiem. System czujników – inklinometrów oraz akcelerometrów – pozwala na automatyczne regulowanie położenia kabiny lub kosa wysięgnika w poziomie, co zapobiega ich nadmiernym przechyłom [27].

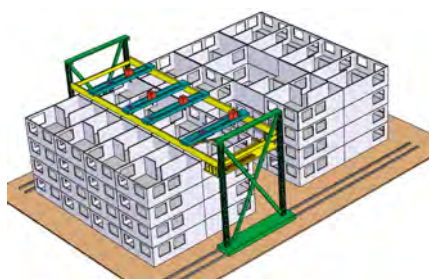
W betonowozach, w celu kontroli lub zaprogramowania prędkości obrotowej lub tempa podawania mieszanki, są instalowane elektroniczne sterowniki i czujniki indukcyjne. Sterowanie pracą maszyny może się odbywać w trybie dyskretnym – za pomocą przycisków albo joysticków, lub proporcjonalnym (prędkość obrotowa zadawana jest przy pomocy potencjometrów).

### Automatyczne systemy wznoszenia obiektów

Mechanizacja pojedynczych procesów budowlanych w niewielkim stopniu wpływa na wydajność i efektywność całego przedsięwzięcia budowlanego. Z tego powodu przedsiębiorstwa w krajach wysoko rozwiniętych, głównie w Japonii i Korei Południowej, dążą do integracji i komputerowego wspomaganie realizacji całego przedsięwzięcia budowlanego, na które składa się projektowanie, planowanie, produkcja prefabry-



Rys. 6. Automatyzowane systemy wznoszenia budynków a) system SMART firmy Shimizu Co. [38] b) System RCA (Robot-based Construction Automation) [32]



Rys. 7. Drukowanie przestrzenne budynku; a) idea metody Contour Crafting [40], b) pierwszy całkowicie „drukowany” budynek – firma HuaShang Tengda [41]

katów oraz realizacja procesów na budowie. Integracja powoduje lepsze wykorzystanie wszystkich zasobów zaangażowanych w proces inwestycyjno-budowlany. Takie ujęcie nosi nazwę CIC (ang. *Computer Integrated Construction*) i jest próbą wdrożenia do budownictwa znanych z przemysłu koncepcji Komputerowo Zintegrowanego Wytwarzania – CIM (ang. *Computer Integrated Manufacturing*). Pierwszym etapem wdrożenia koncepcji CIC w budownictwie jest zintegrowanie oprogramowania do projektowania architektonicznego, konstrukcyjnego, instalacji budowlanych, zarządzania przedsięwzięciem budowlanym i kosztorysowania. W tym celu może być wykorzystana koncepcja modelowania informacji o budynku – BIM. W celu zaspokojenia oczekiwań przyszłego użytkownika podczas projektowania należy wykorzystywać technologię wirtualnej rzeczywistości, pozwalającą na sprawdzenie funkcjonalności przyszłego obiektu.

Standaryzacja obiektów budowlanych w zakresie stosowanych technologii i materiałów ułatwia wdrożenie CIC, ponieważ zmniejsza złożoność procesów na budowie, wprowadza powtarzalność wykonywanych operacji i powoduje lepsze wykorzystanie specjalistycznych urządzeń. Następnym etapem jest zwiększenie stopnia wykorzystywania prefabrykatów o wysokiej jakości i o dużym stopniu wykończenia. Ostatnią fazą jest projektowanie systemów budowlanych, przede wszystkim połączeń monta-

wych dostosowanych do wymagań i możliwości robotów i manipulatorów. Wdrażane systemy zarządzania procesem budowy powinny integrować technologie informatyczne stosowane na wszystkich etapach procesu inwestycyjnego, łącznie z systemami zarządzania wytwórniami prefabrykatów budowlanych i sterowania zautomatyzowanymi maszynami na placu budowy.

Koncepcja CIC może być realizowana na trzy sposoby, poprzez:

- produkcję prefabrykatów przestrzennych o dużym stopniu wykończenia (koncepcja domów modułowych),
- stosowanie zautomatyzowanych systemów wznoszenia obiektów,
- drukowanie 3D prefabrykatów lub całych obiektów na placu budowy.

Japońskie przedsiębiorstwa budowlane, np. Toyota Housing Corporation, Sekisui Heim, Misawa Homes czy Daiwa House przeniosły doświadczenia z przemysłu samochodowego do prefabrykacji jednorodzinnych budynków mieszkalnych o konstrukcji modułowej. Moduły są produkowane we w pełni zautomatyzowanych wytwórniach, w których sterowanie procesem produkcji jest oparte na systemie Kanban. Jednolity system komputerowy pomaga zarządzać całym procesem produkcji: od etapu planowania poprzez zarządzanie łańcuchem dostaw i produkcją aż do spedycji wykończonych modułów [28].

Od początku lat 90. XX wieku, głównie przez przedsiębiorstwa japońskie, są wdra-

żane zautomatyzowane systemy wznoszenia budynków. Najbardziej znane z nich to:

- ABSC (ang. *Automated Building Construction System*) firmy Obayashi Co. [29], SMART System (ang. *Shimizu Manufacturing system by Advanced Robotics Technology*) [30], FACES (ang. *Future Automated Construction Efficient System*) firmy Penta-Ocean Construction Co. [31], RCA (ang. *Robot-based Construction Automation*) [32,33] – przeznaczone do wykonywania budynków o konstrukcji stalowej,
- Big Canopy [34] – zaprojektowany do realizacji budynków z prefabrykatów żelbetonowych,
- ROOF PUSH-UP firmy Takenaka Co. [35,36], w którym dach budynku, wypychany za pomocą siłowników hydraulicznych, osłania plac budowy, a do konstrukcji dachu są podwieszane systemy transportowe i montażowe oraz
- T-UP firmy Taisei Co. [37], w którym zmontowany na poziomie terenu strop ostatniej kondygnacji jest platformą roboczą wspierającą się po rosnącym trzonie.

Na rys. 6. przedstawiono przykłady zautomatyzowanych systemów wznoszenia budynków.

W każdym z systemów zautomatyzowanych można wyróżnić:

- konstrukcję osłaniającą miejsce prowadzenia robót przed warunkami atmosferycznymi, która samoczynnie podnosi się po wykonanej konstrukcji (np. ABSC) lub wspina po zewnętrznych masztach (np. Big Canopy) za pomocą siłowników hydraulicznych,
- system transportu pionowo-poziomego złożony zazwyczaj z automatycznie sterowanych wyciągów, żurawi oraz suwnic podwieszonych do dachu tymczasowej (np. Big Canopy) lub stałej (np. ROOF PUSH-UP) konstrukcji osłaniającej,
- zintegrowany system zarządzania, który składa się z podsystemu zarządzania produkcją, sterowania urządzeniami transportowo-montażowymi oraz podsystemu kontroli urządzeń podnoszących platformę roboczą.

Komputerowy podsystem zarządzania produkcją umożliwia, na podstawie projektu, sporządzenie harmonogramu robót, dostaw materiałów i prefabrykatów oraz kontrolę przebiegu realizacji robót. Każdy element, począwszy od wytwarzania w zakładzie prefabrykacji, jest kontrolowany za pomocą kodów kreskowych, które też są wykorzystywane do sterowania pracą automatycznych urządzeń transportowych i montażowych. Postęp robót jest wyświetlany na monitorach w centrum sterowania systemem [29].

W systemach wznoszenia obiektów stopień zautomatyzowania może dochodzić do 95%, a stopień wykończenia prefabrykatów może osiągać 85%. Nakłady robocizny mo-

gą być zredukowane nawet o 70% w stosunku do budownictwa tradycyjnego. Czas montażu i demontażu systemu na placu budowy zajmuje od 3 do 6 tygodni, a nakłady inwestycyjne wynoszą od 5 do 10 mln euro, ale szybki czas realizacji budynku umożliwia wcześniejsze wpływy z wynajmu powierzchni biurowej i mieszkalnej. Dzięki zastosowaniu systemu zarządzania produkcją Just-in Time nie ma konieczności składowania materiałów i prefabrykatów budowlanych. Ograniczenie niezbędnej powierzchni placu budowy jest szczególnie ważne podczas realizacji obiektów wysokich położonych w centrach miast [39].

W ostatnich latach upowszechniła się metoda drukowania przestrzennego (ang. *3D printing*), która służy do wykonywania gotowych elementów na podstawie modelu komputerowego. Elementy są wykonywane metodą przyrostową (warstwa po warstwie). Opracowane technologie drukowania 3D pozwalają na wykorzystanie powszechnie stosowanych w budownictwie tradycyjnym materiałów, takich jak: glina, gips, materiały drewnopodobne, stopy metali, tworzywa termoplastyczne czy kompozyty ceramiczne.

Pierwszym mostem metalowym wykonanym w technologii drukowania 3D jest obiekt w Amsterdamie. Firma MX3D dostosowała 6-osiove roboty przemysłowe do drukowania przestrzennego elementów o dowolnym przekroju, wykonywanych metodą wspornikową.

Ideę realizacji domów w technologii drukowania 3D zapoczątkował dr Khoshnevis z Uniwersytetu Południowej Karoliny i opracowywaną technologię nazwał *Contour Crafting* – CC (rys. 7a). Pierwszy dom w technologii drukowania 3D został wykonany przez chińskie przedsiębiorstwo budowlane *HuaShang Tengda*. Jest to budynek dwukondygnacyjny o powierzchni 400 m<sup>2</sup>. Wykonano go z betonu klasy C30. Czas realizacji wyniósł 45 dni. Fundamenty i zbrojenie konstrukcji wykonano w sposób tradycyjny, natomiast pozostałe elementy były „drukowane” (rys. 7b). Chińskie przedsiębiorstwo *WinSun Decoration Design Engineering Co.* stosuje technologie drukowania do wykonywania prefabrykatów budowlanych.

Metoda drukowania przestrzennego, zgodnie z informacjami dostarczonymi przez przedsiębiorstwo *HuaShang Tengda* [40], pozwala na skrócenie czasu realizacji konstrukcji nawet o 70%, znaczne zmniejszenie nakładów robocizny (od 50 do 80%), a przede wszystkim redukuje koszty wykonania i zwiększa bezpieczeństwo prowadzenia robót. Realizacja budynków jest podobna do technologii betonowania ślizgowego, przez co budynek charakteryzują się dużą sztywnością przestrzenną ze względu na występowanie małej liczby przerw roboczych – ciągłość elementów konstrukcyjnych. ■

## Bibliografia

- [20] materiały informacyjne firmy Construction Robotics: <http://www.construction-robotics.com/sam100/>.
- [21] materiały informacyjne firmy Fastbrick Robotics: <http://fbr.com.au/>.
- [22] Bock T., Linner T.: *Construction Robots: Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots*. Vol. 3. Cambridge University Press, 2017.
- [23] materiały informacyjne firmy EZ-Renda: [www.ezrenda.com](http://www.ezrenda.com).
- [24] materiały informacyjne firmy Kawada Industries Inc.: [global.kawada.jp](http://global.kawada.jp).
- [25] materiały informacyjne firmy Fujita: [www.fujita.com](http://www.fujita.com).
- [26] materiały informacyjne firmy Penta Ocean Construction Co.: [www.penta-ocean.co.jp](http://www.penta-ocean.co.jp).
- [27] materiały informacyjne dostępne w: <http://automatykab2b.pl/tematmiesiaca/4963-automatyka-w-pojazdach-specjalnych?showall=1#.WMmjX9vDsl>.
- [28] Furuse J., Katano M.: Structuring of Sekisui Heim Automated Parts Pickup System (HAPPS) to Process Individual Floor Plans. [In:] *Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Tokyo, Japan 2006.
- [29] Miyakawa H., Ochiai J., Oohata K., Shiokawa T.: Application of Automated Building Construction System for High-Rise Office Building. [In:] *Proceedings of the 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Taipei, Taiwan 2007.
- [30] Yamazaki Y., Maeda J.: The SMART System: An Integrated Application of Automation and Information Technology in Production Process. *Computers in Industry* 1998, no. 35.
- [31] Yoshida N., Kanagawa T., Tani Y., Oda Y.: Development of an Automatic-oriented Sheltered Building Construction System. [In:] *Proceedings of the 14th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Pittsburgh, USA 1997.
- [32] Chu B., Jung K., Lim M.-T., Hong D.: Robot-Based Construction Automation: An Application to Steel Beam Assembly (Part I). *Automation in Construction* 2013, no. 32.
- [33] Jung K., Chu B., Hong D.: Robot-Based Construction Automation: An Application to Steel Beam Assembly (Part II). *Automation in Construction* 2013, no. 32.
- [34] Wakisaka T., Furuya N., Inoue Y., Shiokawa T.: Automated Construction System for High-rise Reinforced Concrete Buildings. *Automation in Construction* 2000, no. 9.
- [35] Fujii T., Hagiwara C., Morita M., Miyaguti M.: Development of Roof Push Up Construction Method. [In:] *Proceedings of the 12th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Warsaw, Poland 1995.
- [36] Morita M., Muro E., Kanaiwa T., Nishimura H.: Study on Simulation for Roof Pushup Construction Method. [In:] *Proceedings of the 10th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Houston, USA 1993.
- [37] Sakamoto S., Mitsuoka H.: Totally Mechanized Construction System for High-rise Buildings (T-UP System). [In:] *Proceedings of the 11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Brighton, United Kingdom 1994.
- [38] materiały informacyjne firmy Shimizu Co.: [www.shimz.com.sgb](http://www.shimz.com.sgb).
- [39] Bock T.: *Construction Automation and Robotics*. [In:] Balaguer C., Abderrahim M. (eds.) *Robotics and Automation in Construction*. In-Teh Croatia 2008.
- [40] materiały informacyjne dostępne w: [www.contourcrafting.org](http://www.contourcrafting.org).
- [41] materiały informacyjne firmy HuaShang Tengda: [3DPrint.com](http://3DPrint.com).