

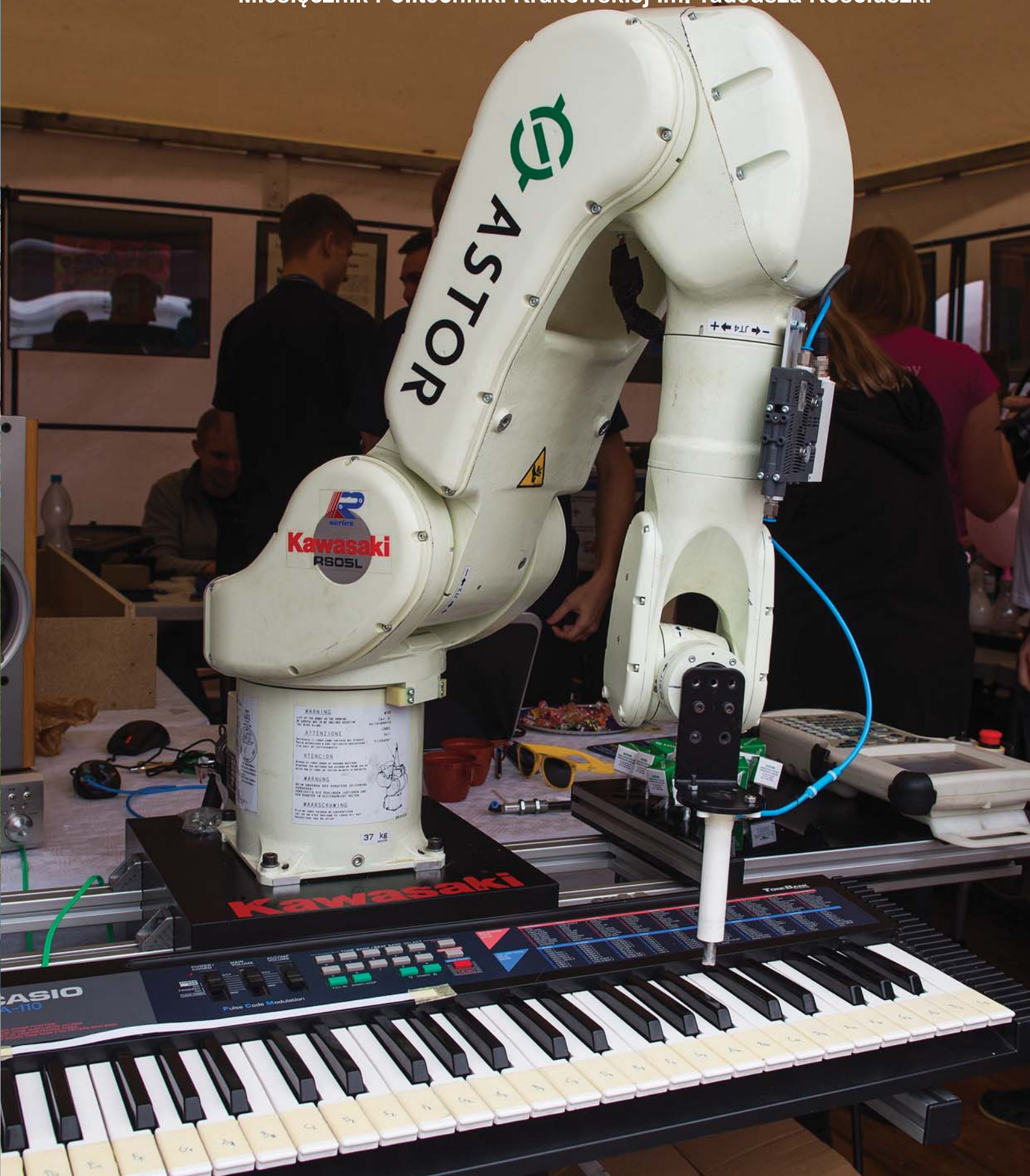


nasza politechnika

nr 11 (219) listopad 2021

ISSN 1428-295 X

Miesięcznik Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki



Od niewolnika do robota

Postęp techniczny w robotyce jawi się jako próba technicznego odtworzenia każdego kolejnego, uświadomionego fragmentu tajemnicy ludzkiej osoby

KRZYSZTOF KLUSZCZYŃSKI

ROBOT należy do najbardziej zaawansowanych obiektów technicznych, konstruowanych w dzisiejszych czasach przez człowieka. W swojej strukturze, jak też w sposobie funkcjonowania — niezależnie od tego, czy jest robotem kroczącym typu humanoidalnego, czy też tylko stacjonarnym, przemysłowym robotem antropomorficznym typu: tułów, ramię, przedramię — najbardziej wśród wytworów technicznych przypomina człowieka. Co więcej, wydaje się, że będzie tak również w przyszłości, albowiem ostatecznym celem żywiotowo rozwijającej się robotyki jest skonstruowanie jak najdoskonalszej imitacji ludzkiej osoby: „sztucznego człowieka”, zdolnego wyrażać emocje i gestykulować na jego wzór i podobieństwo.

Robot i człowiek

Schemat strukturalny, charakteryzujący budowę i sposób działania robota, podobny jest do schematu strukturalnego charakteryzującego pracę jednostki ludzkiej. Podobieństwo schematu blokowego i zasad działania robota do budowy i sposobu funkcjonowania człowieka pozwala oczekiwać, że robot jest zdolny do wyzwolenia człowieka z konieczności wykonywania pracy fizycznej. Biorąc pod uwagę to, że praca fizyczna jest zazwyczaj wykonywana rękoma, można użyć jeszcze bardziej obrazowego sformułowania: robot wyręcza człowieka w czynnościach fizycznych.

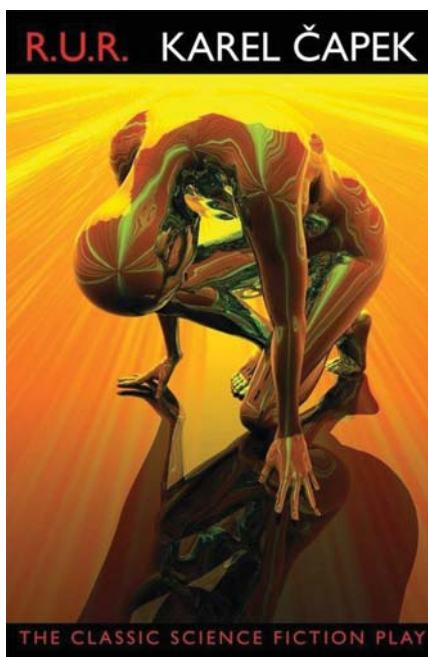
W odniesieniu do robotów, które są zdolne do zastępowania człowieka w realizacji określonych czynności wyższego rzędu, związanych z pracą umysłową, na przykład czynności sortowania, wymagającej umiejętności rozpoznawania kształtów i kolorów, używano do niedawna terminu „robot inteligentny”. Dziś — ze znacznie większą dozą pokory — mówi się raczej o robotach wyposażonych w inteligencję maszynową. Z końcem XX wieku roboty zaczęły szerokim frontem wkraczać do fabryk, zakładów produkcyjnych, tworząc podwaliny pod przekonanie, że wiek XXI będzie wiekiem robotyzacji. Tezę tę dobitnie potwierdza lawinowo wzrastająca liczba robotów, jak

też z roku na rok poszerzający się zakres ich stosowania — i to nie tylko w przemyśle, ale również coraz częściej i szerzej na rynku usług oraz w codziennym środowisku domowym człowieka.

Wydawałoby się więc na pierwszy rzut oka, że robot i idea robotyzacji są wymysłem ostatnich kilku dekad. Pierwsza wersja programowalnego robota powstała wszak zaledwie sześćdziesiąt siedem lat temu (w 1954 r.), pierwsze roboty o przeznaczeniu przemysłowym skonstruowano w 1961 r., a sama nazwa narodziła się niewiele wcześniej, bo w 1920 r. Użyta została po raz pierwszy — o dziwo — nie w monografii naukowej, czy też w czasopiśmie technicznym, ale w dramacie fantastyczno-naukowym czeskiego pisarza Karela Čapka pod tytułem „R.U.R. — Rossum’s Universal Robots”. Dramat ten wciąż nie traci na popularności, a na rynku wydawniczym ukazują się ciągle jego wznowienia.

Za zapowiedź powstania robota można też uznać powstałą w tym samym roku litografię profesora słynnej niemieckiej uczelni artystycznej Bauhaus, Lothara

Nazwa „robot” ma już ponad sto lat; pojawiła się pierwszy raz w dramacie czeskiego pisarza Karela Čapka „R.U.R. — Rossum’s Universal Robots”



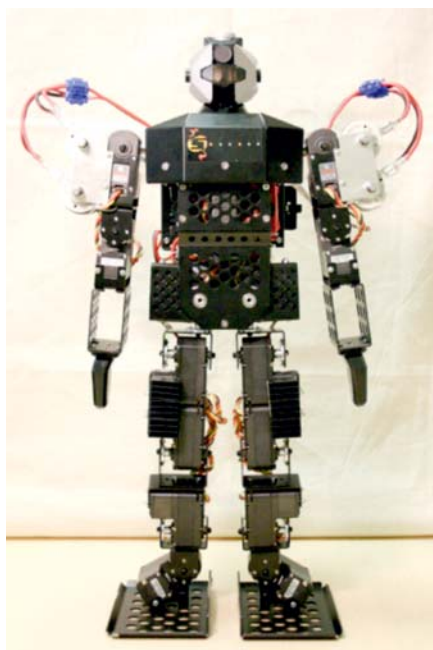
Schreyera, zatytułowaną „The man”. Ukryta w ciele bohatera tej kolorowej grafiki „maszyneria” nakazuje myśleć o nim jako o człowieku sztucznym. Należy zauważyć, że obie wizje — zarówno literacka, przedstawiona przez Karela Čapka, jak też i plastyczna, zaproponowana przez Lothara Schreyera, akcentują mocno tendencję nadawania robotowi formy i cech ludzkich.

Poszukując źródeł robotyki

W powszechnej świadomości robot jawi się jako wynalazek techniczny ostatnich czasów, jako nowe wspaniałe urządzenie, którego powstanie wymagało przede wszystkim rozwiązania wielu skomplikowanych problemów naukowych i inżynierskich, w szczególności: teorii automatów, teorii układów programowalnych (przełącznikowych, elektromagnetycznych, elektronicznych, scalonych i wreszcie mikroprocesorowych), teorii napędu (elektrycznego, pneumatycznego i hydraulicznego), języków i metod programowania, jak też — podjęcia wielu wyzwań technologicznych w zakresie materiałoznawstwa, mechaniki precyzyjnej oraz sensoryki.

Myśląc tak i koncentrując uwagę wyłącznie na wynalazkach i odkryciach, do których doszło w ostatnich stu, stu pięćdziesięciu latach, zapomina się o tym, że robot musi być również wynikiem poszerzania i pogłębiania wiedzy o samym człowieku, co dokonywało się stopniowo na przestrzeni ludzkich dziejów. Można to ująć jeszcze dobitniej: bez ciągłego i systematycznego uświadamiania sobie nowych ludzkich możliwości oraz nowych zdolności, ujawnianych w toku ciągłego wzrostu poziomu cywilizacyjnego i poziomu życia codziennego, nigdy nie narodziłaby się myśl o celowości poszukiwania środków technicznych — urządzeń, maszyn, machin, mechanizmów, narzędzi, aparatów, pozwalających owe możliwości i zdolności odtwarzać w sposób sztuczny, poza obrębem ludzkiego ciała.

Postęp techniczny, zwłaszcza w robotyce, jawi się jako próba technicznego odtworzenia każdego kolejnego, uświadomionego fragmentu tajemnicy ludzkiej osoby. Wydaje się być nieprzerwanym



Robot może być zarówno obiektem kroczącym... Źródło: <http://www.nenryoudenchi.co.jp/speecys-fc.html>

i bezustannym wysiłkiem, zmierzającym do wyprowadzenia na zewnątrz i odtworzenia poza ludzkim organizmem w sposób „sztuczny” uświadomionych i odkrytych możliwości, umiejętności i zdolności.

Niewolnik jako forma manipulatora

Droga prowadząca do powstania idei robota rysuje się więc jako bardzo, bardzo długa, a sam sposób jej narodzin — jako wyjątkowo przewrotny. Jeśli przyjąć, że robot jest próbą wyposażenia maszyny w cechy ludzkie, to początków robotyki należy szukać w początkach ludzkich dziejów, kiedy to człowiek wpadł na pomysł dokładnie odwrotnego działania: nadania obcej, pojmanej w walce ludzkiej istocie — cech maszyny. Dokonał tego poprzez zniewolenie, czyli podporządkowanie „osoby sobie podobnej” i uczynienie z niej niewolnika.

Z technicznego punktu widzenia możemy powiedzieć, że poprzez przekształcenie człowieka dotychczas wolnego i niezależnego w „żywy manipulator”, zmuszany do wykonywania — na żądanie nadzorca — zadawanych czynności fizycznych, możliwości fizyczne i intelektualne zniewolonego osobnika są celowo okrajane i umyślnie zawężane do tych, które — w sposób zaskakujący — przystają do współczesnej definicji robota. Mówi ona, że „robot to maszyna o wielu stopniach swobody, zdolna do zastępowania człowieka przy wykonywaniu określonych czynności

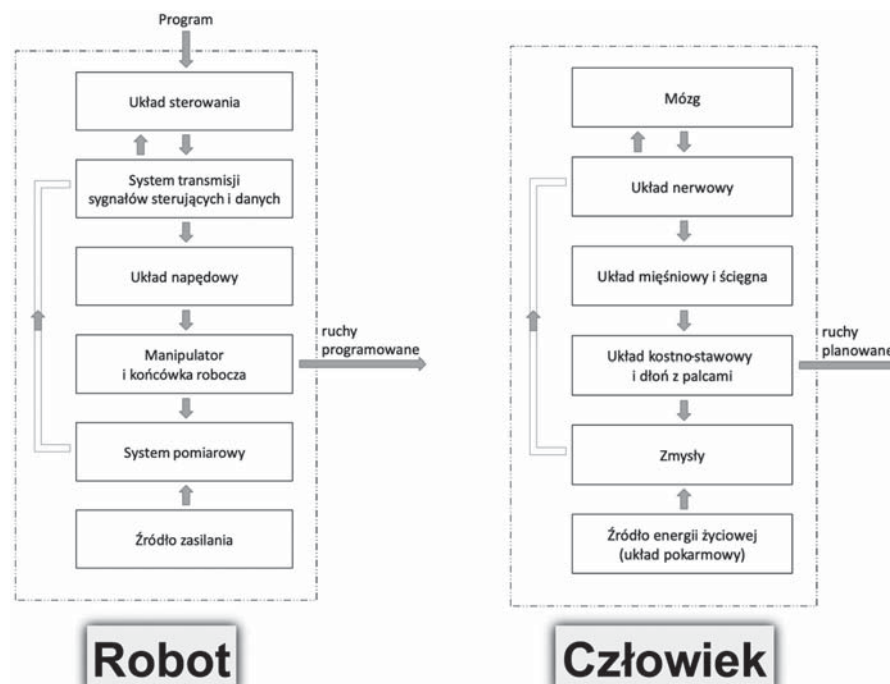
manipulacyjno-lokomocyjnych i dająca się zaprogramować do wykonywania dużej liczby różnorodnych sekwencji wybranych czynności precyzyjnych”. Podług takich właśnie zasad i wymogów był kształtowany niewolnik, będąc konsekwentnie i systematycznie przystosowywany i przyzwyczajany do realizacji w sposób dokładny, perfekcyjny i powtarzalny pewnej tylko liczby wybranych czynności, dziś powiedzielibyśmy — programów.

Ideę niewolnika jako „biologicznego manipulatora” oraz koncepcję przedstawionej społecznej struktury podległości typu: „nadzorca — niewolnik” ilustruje poniższy schemat blokowy. Jak widać, mózg niewolnika zyskuje nadrzędny układ sterowania w postaci mózgu nadzorca. Zauważmy, że takie hierarchiczne systemy sterowania i zarządzania typu: *master — slave*, bazujące na komputerach i sterownikach PLC, są szeroko wykorzystywane we współczesnej automatyce i inżynierii komputerowej.

Technika ukryta w starożytnych systemach organizacji zbiorowego wysiłku

Praca, wykonywana przez człowieka świadomie i celowo, jest ukierunkowana na zaspokajanie jego potrzeb. Wpierw zaspokajane są potrzeby najbardziej aktualne i podstawowe, później — potrzeby wyższego rzędu i wreszcie kolejne nowe potrzeby, które wykazują tendencje do niustającego, niemającego końca i coraz

Podobieństwo schematu blokowego i zasady działania robota do budowy i sposobu funkcjonowania człowieka uzasadnia możliwość wyzwolenia człowieka z konieczności wykonywania pracy fizycznej



...jak i urządzeniem stacjonarnym; w obu przypadkach jest obiektem technicznym w sposobie działania najbardziej przypominającym człowieka. Źródło: Z zasobów KUKA Poland Sp. z o.o.

bardziej nieumiarkowanego wzrostu. W którymś momencie ludzkich dziejów zaczęły się pojawiać potrzeby „ponad miarę ludzkich możliwości”, a ściślej — ponad miarę sił pojedynczego człowieka. Te potrzeby, wysnute z wyobraźni władców, dysponujących tysiącami niewolników i poddanych, to już nie tylko zwykłe potrzeby życiowe, ale przejawy pychy i próżności, które zaczęły przybierać postać marzeń o olśniewających pałacach i świątyniach, niebotycznych piramidach, gigantycznych posągach oraz potężnych fortyfikacjach.

Kluczową przeszkodą w spełnianiu tych wydumanych, wyrafinowanych potrzeb stało się górne ograniczenie

— patrząc z technicznego punktu widzenia — górny pułap maksymalnej siły i udźwigu pojedynczego człowieka. Uświadomienie sobie tego ograniczenia doprowadziło do wynalezienia wielu pomysłowych maszyn prostych: dźwigni, kołowrotów, wielokrążków, śrub itp., zwielokrotniających udźwig pojedynczej ludzkiej jednostki, ale przede wszystkim — do odkrycia innych jeszcze możliwości: nowych form zorganizowanego wysiłku zbiorowego.

Odnosnie do tych form, znalazły one najbardziej dobitne odzwierciedlenie w zasadzie równoległego i szeregowego łączenia „ludzkich manipulatorów”. Przykładem, ilustrującym zasadę szeregowego i równoległego łączenia „żywych źródeł energii mechanicznej”, jest rzymska galera, napędzana siłą wiosł, poruszanych przez galerników. Liczba galerników w jednym rzędzie m , równa liczbie źródeł energii połączonych szeregowo, związana jest z długością galery, zaś liczba gałęzi równoległych n jest uzależniona od typu statku (diera, dromona, triera, irema) i odpowiada liczbie pokładów. Taki zintegrowany układ napędowy, ułożony po obu burtach w matrycę o wymiarach $n \times m$, ma jeden wspólny układ sterowania, którym jest dozorca wyposażony w instrument sterujący ruchami wiosłarzy za pomocą rytmów wybijanych na bębnie, czy też wygrywanych na flecie.

Powyższa zasada szeregowego i równoległego łączenia źródeł legła w kolejnych wiekach u podstaw konstrukcji wielu różnych układów mechanicznych i mechanizmów, a po następnych kilkuset latach znalazła swoje szerokie zastosowanie w inżynierii elektrycznej, zwłaszcza w teorii obwodów elektrycznych, elektroenergetyce oraz napędach elektrycznych. Wymieńmy tylko najważniejsze jej aplikacje: szeregowo i równoległe łączenie źródeł i elementów, umożliwiające uzyskiwanie wysokich napięć i dużych prądów, synchroniczną pracę zespołów napędowych, pracę równoległą transformatorów, czy też pracę zespołową generatorów na sieć sztywną.

Marzenia o robocie-gigancie

Przekonanie, mówiące o tym, że zwielokrotnienie siły i udźwigu żywych ludzkich manipulatorów poprzez ich szeregowo i równoległe łączenie, to jednak nie to samo, co jeden wielki, potężny manipulator, znalazło swoje odbicie w przepięknych baśniach i legendach, powstających w różnych epokach i w różnych kręgach kulturowych na Ziemi. To, co nie mogło być spełnione w świecie rzeczywistym

i pozostawało marzeniem, doczekało się spełnienia i realizacji w świecie fantazji i wyobraźni.

W starożytnym Rzymie był to mit o Herkulesie, pół człowieku i pół bogu, dysponującym nadludzką siłą. Wykorzystał tę siłę do efektywnej realizacji dwunastu — wydawałoby się — niewykonalnych zadań, które przetrwały w ludzkiej pamięci do naszych czasów jako „prace herkulesowe”. W urzekającej arabskiej opowieści, zawartej w „Baśniach z tysiąca i jednej nocy”, pojawia się postać potężnego demona, dzina. Uwolniony przez ubożego chłopca Aladyna ze starej lampy oliwnej, w której spoczywał zamknięty w podziemiu przez wiele wieków, staje się z poczucia wdzięczności posłuszny woli wyzwoliciela. Dzin ma cechy „podległego manipulatora” o nadludzkiej sile, ale niewiele wiemy o tym, skąd się na tym świecie wziął i z czego jest zbudowany. Jest zjawą i duchem, powstałym z bliżej niezdefiniowanego medium — ognia bez dymu.



Rzymska galera — przykład szeregowego i równoległego łączenia „żywych źródeł energii mechanicznej”.

Źródło: <https://www.statkihistoryczne.pl>

Przełomem w myśleniu o manipulatorach-gigantach była średniowieczna legenda o Golemie, o którym wiemy, że powstał z konkretnego materiału, dobrze znanego i powszechnie dostępnego na Ziemi — z gliny. Nie wziął się nie wiadomo skąd, ale został stworzony przez człowieka. Znamy jego nazwisko i znamy miejsce jego urodzenia: to żydowski rabin Jehuda Loew ben Becalela, urodzony w Poznaniu, realizujący swoje powołanie w Pradze, gdzie w końcu XVI w. cieszył się sławą i poważaniem wielkiego uczonego. Jest więc gliniany olbrzym „Golem” tworem ludzkich rąk, który swoją gigantyczną siłą i wielką moc zawdzięcza wiedzy i pomysłowości twórcy. To przełom w myśleniu o manipulatorach-gigantach, sterowanych wolą człowieka.

Legenda o Golemie jest pierwszym spisaniem i udokumentowaniem przekonaniem, mówiącym o możliwości stworzenia przez człowieka struktury „na wzór i podobieństwo istoty ludzkiej”, wykonanej z materiału dostępnego na

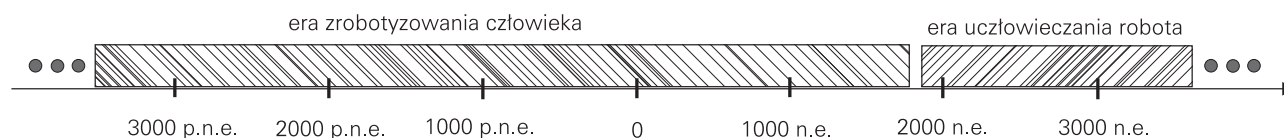
Ziemi i dysponującej wielką siłą, wielokrotnie przewyższającą siłę pojedynczego człowieka. Odwieczne marzenie o manipulatorze-gigancie, znajdujące swoje odzwierciedlenie w świecie fantazji, wyobraźni, doczekało się pełnej realizacji dopiero w dobie współczesnej. Udźwig oferowanych dzisiaj robotów przemysłowych mierzy się w tonach. Z pełnym przekonaniem można dodać: to roboty, które nie boją się „prac herkulesowych”. I można z podziwem też dodać: to istne tytany pracy. Przykładem takiego robota jest Tytan firmy KUKA o wysokości ponad 7 metrów i udźwigu 1,3 tony.

W marionetkowym świecie minimanipulatorów

Na drugim biegunie marzeń o manipulatorach-gigantach znalazły się marzenia o minimanipulatorach. Ich zalety nie stanowiła siła, ale fakt, że były przeznaczone, łatwe do ukrycia; że mogły działać niepostrzeżenie i pozostawać niezauważone dla otoczenia. Gama bajkowych i baśniowych wyobrażeń o tych minimanipulatorach jest przeogromna oraz równie stara, jak ta o manipulatorach-gigantach.

Do fascynującego świata w skali mikro, zrodzonego w wyobraźni i zasiedlonego przez ludzką fantazję, można zaliczyć starożytne elfy. Jego częścią w nowszych czasach są bohaterowie pięknych, ponadczasowych bajek o Tomciu Paluchu, Calineczce, czy też Ołowianym Żołnierzyku. Najbardziej frapującą z technicznego punktu widzenia realizacją marzeń o minimanipulatorach stał się świat lalek, marionetek i kukiełek. Znane od czasów starożytnego Egiptu rozprzestrzeniły się szeroko po świecie: Europie, Azji, Afryce i obu Amerykach, przybierając najróżniejsze postaci i formy. Z punktu widzenia przyszłej robotyki przyniosły one pogłębienie wiedzy o budowie ludzkiego ciała pod względem mechanicznym.

Przed wszystkim — wyodrębniłszy sztywne elementy ludzkiego łańcucha kinematycznego w postaci członów i ramion; wprowadzono połączenia ruchowe oraz dodano system ciągów, linek bądź drutów, pełniących rolę podwójną — układu przeniesienia napędowej siły, której źródłem jest układ mięśniowy aktora-animatora, oraz równocześnie systemu transmisji sygnałów sterujących, wysyłanych przez mózg lalkarza. Sygnały te są przekazywane bezpośrednio marionetkom za pośrednictwem dłoni i palców bądź za pomocą pomysłowego przetwornika zmiany kierunku ruchu: krzyżaka. Łańcuchy kinematyczne marionetek



Czy żyjemy na przełomie „ery zrobotyzowania człowieka” i „ery ucłowieczania robota”?

i lalek są bardzo uproszczone, a liczba członów, znajdujących swoje odpowiedniki w układzie kostnym człowieka, jest znacznie zredukowana.

Pomimo tak uproszczonej, wręcz prymitywnej konstrukcji, marionetki zachwycają różnorodnością zachowań oraz zdolnością ekspresji emocji i uczuć. Ich możliwości ruchowe są duże, a motoryka bardzo bogata, dzięki doskonałości algorytmów sterowania wypracowanych przez umysł lalkarza oraz dzięki wykorzystaniu połączeń ruchowych o większej liczbie stopni swobody. Stosowane połączenia ruchowe to najczęściej pary kinematyczne klasy III, czyli przeguby sferyczne. O takich niekonwencjonalnych rozwiązaniach coraz częściej czytamy we współczesnej literaturze technicznej.

W Polsce prototypy takich niestandardowych manipulatorów, wyposażonych w elektromagnetyczne aktuatory: liniowo-obrotowe, sferyczne, czy też dyskowe z precesją osi obrotu, były budowane w Zakładzie Maszyn Elektrycznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem profesora Grzegorza Kamińskiego oraz w stworzonej przeze mnie Katedrze Mechatroniki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Efektem tych prac były rozprawy doktorskie oraz przyznane stopnie doktora nauk technicznych.

Należy jeszcze dodać i zwrócić uwagę na to, że często rzeczywistość przerasta marzenia. I tak właśnie się stało w sferze ludzkich marzeń o miniaturyzacji robotów. Seria robotów przemysłowych, oferowanych przez firmę KUKA kończy się aktualnie na robocie AGILUS o udźwigu 3 kilogramów i wysokości około 50 centymetrów. Szokującym *novum* są mikroroboty i nanoroboty. Z roku na rok z coraz większą uwagą i coraz większym napięciem inżynierowie śledzą doniesienia o nowych rozwiązaniach, nowych możliwościach i nowych zastosowaniach nanorobotów, tworzonych w technologii MEMS (Micro Electromechanical Systems), niedostrzegalnych gołym okiem.

Czy żyjemy na przełomie er?

Podsumujmy, wiek XIX to formalny kres i likwidacja niewolnictwa, które zmieniało człowieka w „żywego robota”. Wiek XX — to początek pierwszych

programowalnych maszyn, zasługujących na obdarzenie ich terminem „robot” oraz pierwszych elektronicznych maszyn obliczeniowych, zwanych mózgiami elektronicznymi. W krótkim przedziale czasu, obejmującym zaledwie sto lat, zbiegły się więc zarówno ważne wydarzenia społeczno-polityczne, jak też odkrycia i innowacje o charakterze rewolucji technicznych. Nasuwa się myśl, że oto być może staliśmy się mimowolnymi świadkami przełomu dwóch wielkich er; że właśnie teraz na naszych oczach dobiega końca długa, trwająca przez całe tysiąclecia „era zrobotyzowania człowieka”, rozciągająca się od zarania ludzkich dziejów, aż po rezolucję Kongresu Wiedeńskiego z 1815 r., potępiającą proceder niewolnictwa oraz że rozpoczyna się nowa era — „era ucłowieczania robota”, czyli wyposażania maszyn w sztuczną inteligencję, sztuczne zmysły oraz zdolności lokomocyjne i manipulacyjne, pozwalające na naśladowanie różnorodnych zachowań człowieka w coraz to doskonalszy sposób.

W ciągu życia kilku najbliższych pokoleń okaże się, czy nowa era będzie tą, o której myślimy jako o „erze ucłowieczania robota” i czy przyniesie ona ludzkości wymarzone szczęście — całkowite wyzwolenie się człowieka z konieczności wykonywania pracy fizycznej i umysłowej. Dowiemy się również tego, czy wśród skonstruowanych przez człowieka robotów znajdzie się w przyszłości ten, który zyska miano Herkulesa lub Golema.

Credo

Czas, aby podsumować nasze rozważania oraz z natłoku i różnorodności myśli wyłowić te, które powinny pozostać w pamięci jako trwałe ślad i zapis przedstawionych — czasem nieco przewrotnych — rozumowań. Myśli te składają się na credo, które brzmi:

- Postęp techniczny nie jest przywilejem ludzi najlepiej przygotowanych, ale ludzi o największej śmiałości myśli. Nie jest li tylko domeną ludzi wykształconych technicznie, ale domeną wszystkich ludzi o wielkiej i nieograniczonej wyobraźni. To im zawdzięczamy właśnie wizję robota, która doczekała się realizacji w XX wieku.
- Postęp techniczny w istotny sposób zależy od wiedzy o człowieku

i uwarunkowany jest stopniowym odkrywaniem, odsłanianiem, uzmysławianiem i uświadamianiem sobie przez ludzką jednostkę kolejnych, coraz to nowych możliwości, umiejętności, zdolności i talentów. Postęp to nie tylko konsekwentne i uporczywe poszukiwanie „nowości” w świecie zewnętrznym, ale nieustanne poszukiwanie „nowości” w samym sobie i we wnętrzu człowieka.

- Postęp techniczny jest emanacją marzeń i pragnień. Aby te marzenia i pragnienia nie wygasły, niezbędny jest świat ludzkich fantazji. Wiary w możliwości realizacji marzeń i pragnień skutecznie rozbudza i podtrzymuje ludzka wyobraźnia, której inspirujące działanie znajduje ujście w literaturze fantastyczno-naukowej, a także w sztuce i działalności artystycznej człowieka.
- Postęp techniczny nie jest tylko ciągiem odkryć i wynalazków dokonujących się „tu i teraz”, w laboratoriach badawczych i centrach innowacyjnych, parkach technologicznych i na uczelniach. Współczesne odkrycia i wynalazki, realizowane w najnowocześniejszych technologiach i z zastosowaniem najnowszych materiałów, odnajdują często swoje paralele, analogie, odniesienia i prawzorcy w błyskotliwych pomysłach, realizowanych setki lub tysiące lat temu w kamieniu, drewnie, glinie czy brązie.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński wykłada na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, gdzie utworzył unikatowy w skali europejskiej kierunek studiów — infotronikę. Od 1999 r. jest przewodniczącym Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej. Wnosi wkład w humanizację studiów technicznych oraz odkrywanie relacji łączących technikę i inżynierię, nauki humanistyczne oraz sztuki piękne. Artykuł stanowi zaadaptowany do celów niniejszej publikacji wykład pt. „Jak w świadomości ludzkiej od zarania dziejów kształtowała się wizja robota?”, wygłoszony 12 października br., podczas inauguracji roku akademickiego Szkoły Doktorskiej PK. Tytuł pochodzi od redakcji. Ilustracje pochodzą z prezentacji towarzyszącej wykładowi.