

Robot humanoidalny ROMAN

Krzysztof Mianowski

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

Karsten Berns

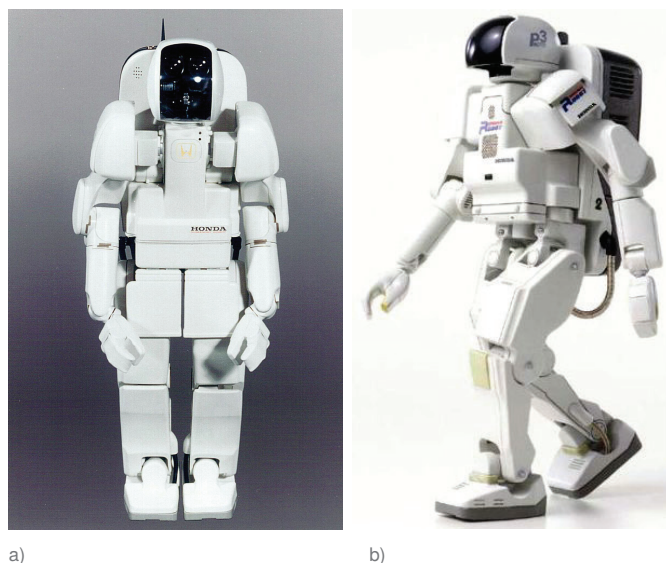
Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Informatik, AG Robotersysteme

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań i efekty prac nad prototypem robota humanoidalnego ROMAN, które są prowadzone w ostatnich latach na Uniwersytecie Technicznym w Kaiserslautern w Niemczech. Zaprojektowano, skonstruowano i wykonano prototyp kompaktowego, lekkiego i taniego robota humanoidalnego. Robot może wyrażać emocje w sposób werbalny jak i niewerbalny gestykulując rękami, wykonując ruchy głową i zmieniając wyraz twarzy. Ponieważ robot został zbudowany w sposób wiernie naśladujący człowieka i wyposażony w czujniki odpowiadające naturalnym zmysłom człowieka, więc sterowany komputerowo z zastosowaniem systemu pozwalającego na wyrażanie emocji, ma służyć do badań weryfikacyjnych dotyczących akceptacji działania robota w otoczeniu człowieka.

Słowa kluczowe: robot humanoidalny, sterowanie behawioralne, interakcje robot-człowiek

1. Wprowadzenie

Od pewnego czasu świat zachwyca się nowymi zabawkami mechatronicznymi, jak japońskie roboty HONDA i ASIMO jak też wieloma innymi podobnymi do nich, które zbudowano na kształt człowieka. W wielu ośrodkach badawczych na świecie prowadzi się intensywne badania nad robotami humanoidalnymi przeznaczonymi m.in. do asystowania człowiekowi w sytuacjach, w których zadaniem robota jest zastąpienie/wyręczenie go w pracy fizycznej ale też pomoc w pracy intelektualnej. Rozwój układów mechanicznych, napędowych i sterujących, opracowanie nowych materiałów, oraz rozwój układów elektronicznych, sensorycznych i komputerów, w powiązaniu z nowymi technologiami informatycznymi, pozwoliły na realizację starego, skrywanego marzenia związanego z chęcią poprawy bytu człowieka, jakim może być robot – towarzysz pracy i zabawy. Niemęczący się fizycznie i cierpliwy we wspomaganiu człowieka w różnych, nawet bardzo nietypowych sytuacjach, robot może stać się niezastąpionym towarzyszem. Robot-asystent zwany też robotem osobistym, jak najbardziej podobny do człowieka, najlepiej humanoidalny, wiernie służący swemu panu powinien reagować na swoje otoczenie i polecenia właściciela w sposób intuicyjny, móc wyrażać emocje i z radością podejmować zadania pomocy i towarzyszenia w zabawie. Oczywiście wszelka działalność takiego robota będzie ograniczona



Rys. 1. Robot Honda P3: a) widok ogólny, b) w trakcie chodu prostego
Fig. 1. Robot Honda P3: a) general view, b) walking mode

jego konstrukcją, strukturą układu kinematycznego, rodzajem użytych komponentów sensorycznych i układów wykonawczych oraz komputerów i oprogramowania użytego do analizy otoczenia i kontroli nad układami sterowania, jednak efekt ich współpracy obserwowany przez użytkownika powinien być odbierany i interpretowany jako podobny do efektów typowej działalności człowieka w różnych sytuacjach.

Wśród aktualnie dostępnych na rynku robotów humanoidalnych najbardziej rozwiniętymi, zdolnymi do pracy w środowisku człowieka i do komunikacji z otoczeniem są japońskie roboty Honda i Asimo. Na rys. 1a pokazany jest

Autor korespondujący:

Krzysztof Mianowski, kmianowski@meil.pw.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 18.01.2016 r., przyjęty do druku 10.02.2016 r.



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

robot Honda P3 w widoku ogólnym, na rys. 1b widzimy go w trakcie typowego chodu prostego po płaskiej powierzchni. Badania doświadczalne wykazały, że robot ten jest duży i ciężki i przy pracy na akumulatorach pokładowych nie jest w stanie pracować dłużej niż ok. 30 minut. Konstruktorzy kolejnych wersji odpowiednio zmniejszyli wymiary otrzymując w efekcie mniejszą wersję nazwaną Asimo na cześć twórcy książek science-fiction o tematyce robotowej, Izaaka Asimowa.

Na rys. 2a przedstawiono robota Asimo w widoku ogólnym [14]. Jak pokazano na rys. 2b i 2c, robot ten jest zdolny do współpracy z człowiekiem w typowym otoczeniu i do właściwych interakcji środowiskowych. Ma też wbudowane urządzenia do generowania mowy i wydawania innych dźwięków, jest więc zdolny do bezpośredniej komunikacji z człowiekiem. Natomiast głowa tych robotów są sztywnymi, pozbawionymi wyrazu pudłami z tworzywa sztucznego w których wnętrzu są ukryte kamery i inne czujniki. Roboty są wykonane z elementów metalowych pokrytych odpowiednio estetycznymi powłokami z tworzywa sztucznego. Uwagę zwraca jednak fakt, że jest to chłodny, nieprzyjemny w dotyku plastik a wygląd zewnętrzny budzi skojarzenia z czymś sztucznym i nieprzyjaznym. Obecnie istnieje wiele podobnych rozwiązań robotów humanoidalnych opracowanych i wykonanych w warunkach laboratoryjnych, jednak Honda i Asimo są najbardziej zaawansowanymi rozwiązaniami wdrożonymi do produkcji na skalę przemysłową i istniejącymi na rynku.

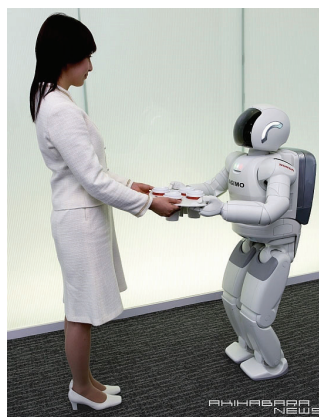
Jednym z trendów związanych z projektowaniem i budową robotów do pracy w środowisku człowieka jest rozszerzanie ich możliwości komunikacji z otoczeniem o różnego rodzaju interakcje, w tym możliwość wyrażania emocji niewerbalnych.

Komunikacja międzyludzka jest oparta z jednej strony na komunikacji werbalnej, tj. na prowadzeniu rozmów, jednak w wielu sytuacjach odbywa się ona z wykorzystaniem innych środków wyrazu, jak przede wszystkim gesty wyrażane rękoma, zmiany pozycji ciała, mimika statyczna oraz mimiczna, dynamiczna zmiana wyrazu twarzy. W wypadku robotów prace nad próbami generowania emocji wyrażanych przez zmianę wyrazu "twarzy" są prowadzone przede wszystkim w Japonii, jednak najczęściej wykorzystuje się do tego celu zbiory sztucznych markerów, za pomocą których przez zmianę ich geometrii generuje się syntetyczne obrazy mające znaczenie symboliczne. W związku z tym jakość realizowanego przekazu jest znacznie ograniczona, a w niektórych wypadkach może być krytykowana (np. przez osoby w podeszłym wieku) lub wywoływać konsternację, przerażenie lub oznaki zawodu (np. w komuni-

kacji z małymi dziećmi). W takiej sytuacji problem komunikacji robot–człowiek nabiera szczególnego znaczenia. Dla osób starszych i chorych oraz dzieci przebywających z powodu choroby w odosobnieniu/zamknięciu, a także dzieci autystycznych, odpowiednio skonstruowany robot może skutecznie zmienić warunki ich bytu i w określonej perspektywie pomóc przełamać zaistniałe bariery komunikacji z otoczeniem. W tej sytuacji wzory komunikacji międzyludzkiej mogą stanowić dobry punkt wyjścia do prac nad polepszeniem komunikacji człowiek–robot. Psychologowie uważają, że większość interakcji w komunikacji międzyludzkiej jest realizowana niewerbalnie. Z tego też powodu badacze–konstruktorzy robotów próbują implementować robotom humanoidalnym zarówno mechanizmy komunikacji werbalnej jak i niewerbalnej. Aplikacje takie w porównaniu z założeniami formułowanymi dla robotów typowo przemysłowych wymagają zupełnie nowych wymagań projektowo–konstrukcyjnych, np. dla robota–asystenta osobistego. Roboty takie wymagają implementacji zdolności wzajemnego oddziaływania i realizacji zachowań społecznych. Ponadto powinny mieć zaimplementowane mechanizmy rozumienia ludzkiego zachowania i pewnego rodzaju empatii pozwalające na wyrażanie w odpowiedni sposób swoich zachowań. Obecnie obserwuje się na świecie bardzo duże zainteresowanie tzw. robotami osobistymi. Roboty takie można wykorzystać w codziennym życiu przy wykonywaniu ciężkich prac lub do pomocy osobom starszym, nie w pełni sprawnym. Oba zastosowania wymagają robotów zdolnych do komunikacji z ludźmi w sposób naturalny, bez narzucania ograniczeń jedynie do komunikacji słownej i pisemnej (instruktażowej). Należy podkreślić, że dodatkowe aspekty jak gesty, mimika i ruch pełnią tutaj również bardzo istotną rolę. Aktualnie roboty nie mają możliwości komunikacji z człowiekiem w sposób naturalny. Ważną rolę komunikacji pozawerbalnej spełnia ruch szyi, oczu i górnej części ciała. Należy tu podkreślić, że bardzo trudno jest wykonać lekką, kompaktą konstrukcję np. mechanizmu oczu naturalnej wielkości z kamerami wewnątrz gałek o porównywalnych możliwościach ruchowych i odpowiedniej dynamice jak jest to u człowieka. Napędy linkowe są zazwyczaj mało precyzyjne, natomiast układy napędzane bezpośrednio lub z zastosowaniem przekładni nie osiągają niezbędnych, zakładanych parametrów, jak wysokie niezbędne przyspieszenia, duże prędkości w przegubach i zwarta kompaktowa konstrukcja. Dotychczas stosowane tanie miniaturowe układy zawierające małe kamery internetowe o niskiej rozdzielczości generują sygnały, które nie mogą być wykorzystane w skomplikowanych algorytmach roz-



a)



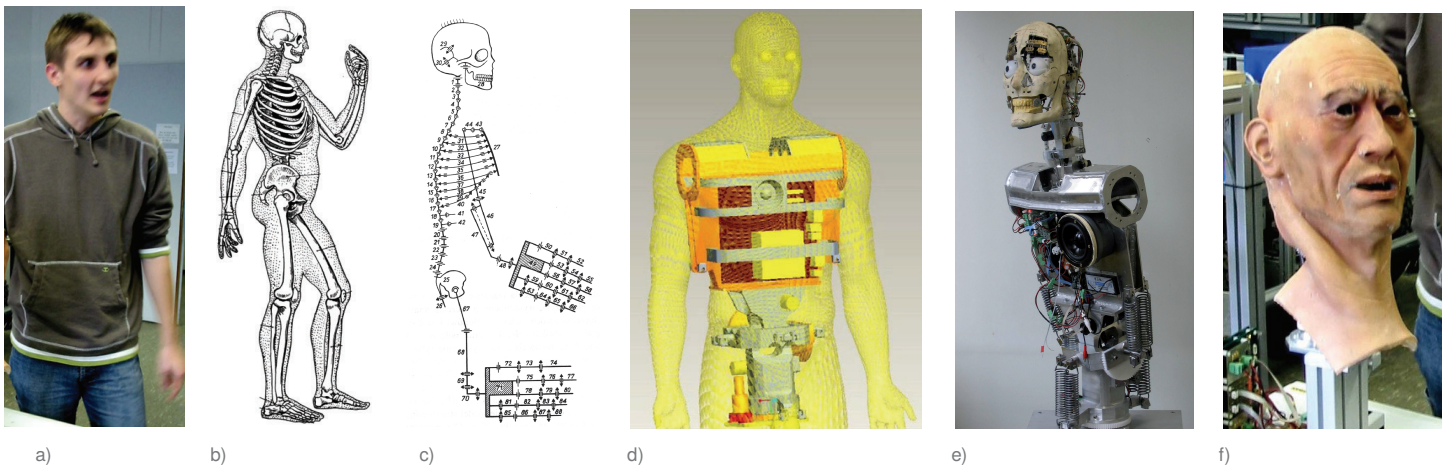
b)



c)

Rys. 2. Robot humanoidalny ASIMO: a) widok ogólny, b) współpraca z człowiekiem, c) interakcja z otoczeniem

Fig. 2. Humanoid robot ASIMO: a) general view, b) robot-human cooperation, c) interaction with environment



Rys. 3. Metodyka projektowania robota ROMAN: a) oryginał, b) obraz anatomiczny z atlasu, c) schemat kinematyczny, d) projekt 3D, e) fragment prototypu, f) maska twarzy robota

Fig. 3. Design methodology of the robot ROMAN: a) original, b) anatomical view from the book of anatomy, c) kinematic scheme, d) 3D design, e) the part of the prototype, f) the mask of the robot face

poznających, do wykorzystania we wspomaganiu komunikacji w sposób naturalny. Ważna jest też możliwość precyzyjnego ogniskowania układu sensorycznego w różnych wybranych, istotnych punktach wykrywanych automatycznie przez system. Głowa robota zawiera złożony system wizyjny w postaci mechanizmu oczu z kamerami i dodatkowe elementy służące do uproszczenia reakcji emocjonalnych wyrażanych przez mimikę, ruchy oczu i pozycję ciała. Zintegrowanie zarówno specjalnych sztucznych układów sensorycznych jak i komponentów tworzenia wyrazu twarzy jest problemem bardzo złożonym. Odrebną ważną cechą procesu komunikacji człowiek–robot jest prawidłowa interpretacja odruchów i wyrażanych zmianą pozycji ciała stanów emocjonalnych człowieka. Konieczna jest identyfikacja ruchów tułowia, szyi, oczu i w szczególności skóry twarzy. Prawidłowe rozpoznanie, identyfikacja i interpretacja takich ruchów z zastosowaniem układów sensorycznych jest trudnym problemem badawczym.

Oprócz konstrukcji układów mechanicznych robota, które powinny zapewnić czytelną komunikację człowiek–robot i robot–człowiek i odpowiedniego układu sensorycznego do zbierania informacji o otoczeniu, robot potrzebuje wydajnego i efektywnego układu sterowania, zapewniającego adekwatną do warunków realizowanego zadania dynamikę – jest to kolejny istotny problem naukowy. W celu realizacji naturalnych interakcji behawioralnych między człowiekiem i robotem niezbędny jest dynamiczny generator wyrażania emocji werbalno-pozawerbalnych. Do tego celu został opracowany system sterowania pozwalający na wyrażanie emocji.

2. Metodyka projektowania robota

Aktualnie najczęstszym sposobem zadawania sygnałów sterujących dla robota posiadającego komputer jest klawiatura i mysz. Podstawową barierą w nawiązywaniu kontaktów i realizacji interakcji człowiek-robot jest stan rozwoju i zastosowań czujników pomiarowych odbioru odpowiednich sygnałów z otoczenia robota. Przewidywane w przyszłości i planowane już obecnie nowe zastosowania robotów wymagają opracowania bardziej przemawiających do człowieka sposobów komunikacji z robotem, w sposób podobny jak w kontaktach człowiek–człowiek, tj. z wykorzystaniem podobnych mechanizmów komunikacji. Na przykład tzw. roboty osobiste powinny być zdolne do pomocy w pracach domowych i wykonywania/obsługiwanie typowych prac/czynności typowych dla człowieka z wykorzy-

staniem/zastosowaniem tych samych narzędzi pomocniczych. Niezbędne jest sterowanie/zadawanie ruchu i możliwość realizacji określonych zadań w sposób autonomiczny przez robota bez dodatkowej niezbędnej wiedzy czy specjalnych umiejętności technicznych ze strony użytkownika. Należy podkreślić, że w szczególności w stosunku do osób starszych i nie w pełni sprawnych, komunikacja z robotem powinna odbywać się w sposób wygodny i przyjazny. Dotyczy to również robotów-zabawek dla dzieci, które mogą spełniać również rolę opiekunów.

Dla komunikacji robota z człowiekiem, robot powinien dysponować możliwością odbioru i interpretacji właściwych sygnałów od partnera (człowieka lub robota) oraz możliwością reakcji na nie w odpowiedni sposób np. z wykorzystaniem mimiki twarzy, języka gestów, głosu (mowy), i pozycji ciała (mowy ciała). Pełnia tych możliwości w istotny sposób zależy od koncepcji i konstrukcji układu mechanicznego. Bardzo ważnym jest, aby robot dysponował odpowiednimi podukładami mechanicznymi, jak tułów, głowa, ręce, ale też, aby sztuczna skóra o odpowiedniej podatności, pokrywająca twarz poruszała się w odpowiedni sposób we właściwych kierunkach w celu wyrażenia zamierzonej emocji. Z drugiej strony dla właściwego sterowania robotem niezbędny jest szczegółowy model sytuacji uwzględniający sposób komunikacji z partnerem. Zagadnienie to jest aktualnie w robotyce nadal otwartym problemem badawczym.

Efektywne wprowadzenie robotów do środowiska człowieka w jego życiu codziennym w istotny sposób zależeć będzie od rozwoju takich systemów robotycznych, które w sposób kompleksowy będą zapewniały pewność działania, bezpieczeństwo i prostotę użytkowania. Planuje się, że już w najbliższej przyszłości roboty będą pomagać człowiekowi w pracy i życiu codziennym poprzez:

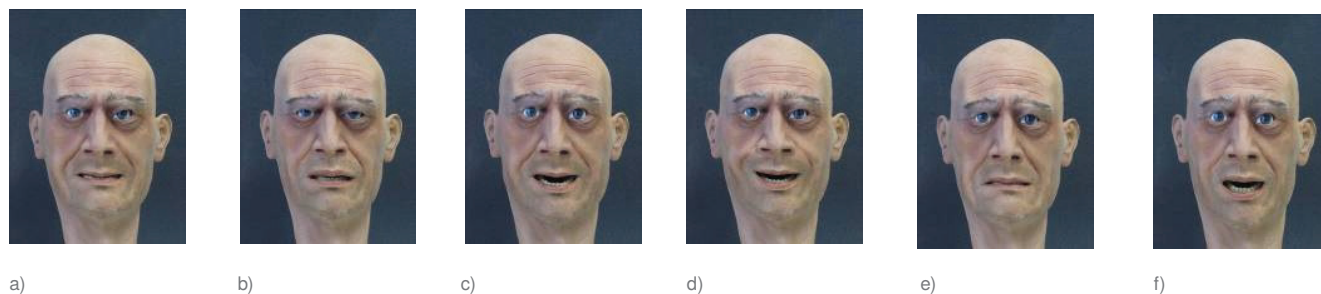
- zastępowanie człowieka w pracy, np. przez samodzielną pracę robota w zastępstwie człowieka (większość robotów przemysłowych),
- współpracę z człowiekiem, np. przez skoordynowane działanie nadążania za czynnościami człowieka,
- asystowanie w wykonywaniu pracy wymagającej wspomaganie, np. trzymanie lampy oświetlającej pole pracy lub kamery operacyjnej,
- telemanipulację, tj. „przedłużenie rąk człowieka”, również na odległość jako urządzenia do pracy, np. przy wykonywaniu operacji chirurgicznych przez Internet.

Wymaga to poszukiwania/rozwoju nowych koncepcji paradygmatów projektowych pozwalających na kompleksowe uwzględnienie w projekcie robota różnorodnych wymagań i warunków uwzględniających obsługiwane przez robot zadań i problemów typowych dla człowieka. Do takich paradygmatów należy projektowanie mechatroniczne, w sposób kompleksowy wiążące ze sobą nowoczesne koncepcje rozwiązań np. wzorowanych na przyrodzie z uwzględnieniem nowoczesnych rozwiązań układów mechanicznych, napędowych, przekładniowych, przeniesienia napędu, jak też sensorycznych i w szczególności systemów i układów sterowania oraz realizowanych przez nie algorytmów sterowania, łączonych ze sobą w sposób zapewniający wysoki stopień integracji i racjonalnego przenikania się elementów składowych. Pod pojęciem przenikania się należy tutaj rozumieć nie tylko ściśle dopasowanie geometryczne w przestrzeni ale też wszechstronne możliwe przenikanie i uzupełnianie się funkcji i zadań zarówno w zakresie pracy układu mechanicznego jak i czynności sensorycznych i funkcji sterujących, często wielokrotnie zwiększając możliwości i funkcje sieci powiązań (połączeń) wewnętrznych systemu. Tworzone w ten sposób relacje wewnętrzne systemu, usytuowane często na niskim i średnim poziomie hierarchii ważności czy ogólności obsługiwanych zadań i procesów, pozwalają na racjonalizację i optymalizację sposobów pracy systemu zwiększając bezpieczeństwo i pewność jego działania a jednocześnie dzięki uproszczeniu schematów (koncepcji) połączeń wewnętrznych polepszają prostotę jego użytkowania.

Według psychologów [2] szacuje się, że ponad 50% interakcji w kontaktach międzyludzkich zachodzi niewerbalnie. Ogólny schemat postępowania przy projektowaniu i budowie robota wzorowanego na obiektach naturalnych można łatwo wytłumaczyć na podstawie przykładu konstrukcji robota ROMAN (RObot huMan interAction machiNe) [2] opracowanego i budowanego w ostatnich latach na Uniwersytecie Technicznym w Kaiserslautern (Niemcy). Schemat ten zilustrowano na rys. 3. Wzorując się na oryginale – organizmie żywym (obiekcie naturalnym) traktowanym jako wzór biologiczny (rys. 3a) oraz jego przybliżonym opisie w postaci np. szkicu z atlasu anatomicznego traktowanego jako zbiór jego podstawowych elementów składowych (funkcjonalnych) (rys. 3b), do analizy funkcji ruchowych można zastosować metodę modelowania polegającą na stworzeniu schematu kinematycznego zgodnie z procedurą schematyzacji układów kinematycznych z użyciem symboli graficznych członów i par kinematycznych. Schemat ten można przedstawić poglądowo w ten sposób, aby obrazował przybliżony kształt oryginale (rys. 3c). Taki sposób reprezentacji graficznej ułatwia identyfikację przynależności schematu do oryginale a w trakcie analizy pomaga w interpretacji wyników cząstkowych dotyczących poszczególnych fragmentów funkcjonal-

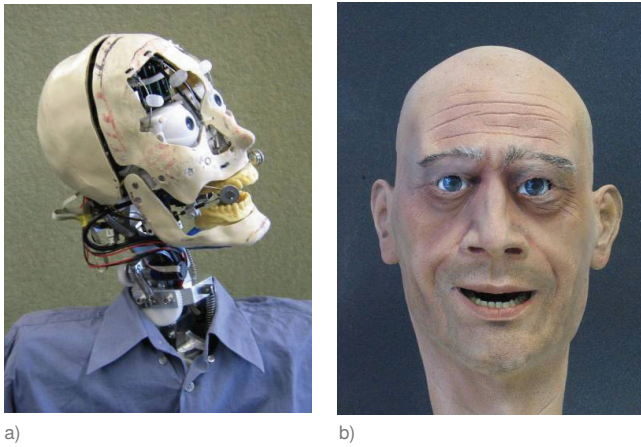
nych, co poprawia zrozumienie działania obiektu naturalnego traktowanego jako biomechanizm i stanowi punkt wyjścia do projektu robota humanoidalnego. Po podziale schematu kinematycznego na fragmenty odpowiadające podstawowym organom (ręka, noga, kręgosłup), odpowiadające im schematy analizuje się w celu dokonania niezbędnych uproszczeń a następnie projektuje się mechanizmy o uproszczonych schematach kinematycznych (modele oryginale) o właściwościach odpowiadających założeniom funkcjonalnym przyjętym w projekcie robota.

Mechanizmy te w postaci członów o odpowiednich kształtach wyposażone w układy łożyskujące, napędowe z przekładniami i układami przeniesienia napędu wraz z wbudowanymi sensorami a także układami zasilającymi i sterującymi, projektuje się aktualnie metodami 3D CAD jako zintegrowaną konstrukcję mechatroniczną o wysokich, z góry założonych właściwościach funkcjonalnych i estetycznych. Projekt – model 3D mechanizmów robota ROMAN opracowano w systemie ProEngineer (rys. 3d). Wykonany na podstawie tego projektu fragment robota przedstawiono na rys. 3e. Korpus robota jest zamocowany do podstawy na mechanizmie sferycznym odtwarzającym trzy stopnie swobody obrotów kręgosłupa lędźwiowego – obrót względem osi pionowej, pochylenie przód/tył i zgięcie boczne prawo/lewo. W celu skompensowania wpływu sił grawitacji na układy napędowe zastosowano tu odciążenie w postaci odpowiednich zespołów sprężyn. W blachownicowej konstrukcji korpusu wbudowano płytę główną komputera sterującego oraz stabilizowane napięciowo układy zasilające i sterowniki napędów. Głowa jest zamocowana na korpusie z zastosowaniem mechanizmu podobnego do mechanizmu zastosowanego w kręgosłupie lędźwiowym, jednak u jej nasady dodano jeden dodatkowy obrotowy stopień swobody w celu wizualnie bardziej naturalnego odtwarzania ruchów pochylania głowy do przodu/do tyłu. Głowę robota pokryto sztuczną skórą w postaci maski z elastycznego silikonu (rys. 3f), wiernie odtworzonej z modelu naturalnego. Jako ciekawostkę należy podać, że w procesie technologicznym odtwarzania maski twarzy odpowiednio przygotowane nitki z tworzywa sztucznego – włosy rzęs ulokowano w formie w ten sposób, że imitują naturalny wygląd a jednocześnie zostały wklejone w maskę w podobny sposób, jak naturalne włosy są zagnieżdżone w skórze ludzkiej. Maskę jest przymocowana do elementów czaszki i żuchwy oraz do dodatkowych ruchomych suwaków na powierzchni czaszki na tzw. rzepy w ten sposób, że podczas ruchów suwaków wymuszanych silnikami wewnątrz głowy skóra porusza się imitując zmiany wyrazu twarzy wiernie imitując wyrażanie emocji. Na rys. 4 zilustrowano przykładowe emocje generowane przez system i odtwarzane przez elastyczną skórę: a – gniew, b – wstręt, c – obawa, d – radość, e – smutek, f – podziw.



Rys. 4. Przykładowe emocje generowane przez system i odtwarzane przez elastyczną skórę: a – gniew, b – wstręt, c – obawa, d – radość, e – smutek, f – podziw

Fig. 4. Examples of emotions generated by computer system of control and mimic by elastic, artificial skin: a – anger, b – hate, c – apprehension, d – joy, e – sadness, f – admiration



Rys. 5. a) Rzut ogólny robota androidalnego ROMAN z szyją, oczami i czaszką, b) sztuczna skóra silikonowa wyrażająca emocje (np. radość)

Fig. 5. a) General view of android robot ROMAN with the neck, eyes and skull, b) artificial silicon skin for expression emotions (eg. the joy)



Rys. 6. Sztuczne oczy robota z kamerami Dragonfly i silnikami skokowymi Faulhaber

Fig. 6. Artificial eyes of the robot with Dragonfly cameras and stepper motors Faulhaber

Opracowane rozwiązanie stanowi model robota humanoidalnego pozwalającego na wysoce powtarzalne interakcyjne badania behawioralne kontaktów robot–człowiek z zakresu wyrażania emocji. W tym celu algorytmy sterowania robotem są skomunikowane z programami sztucznej inteligencji.

3. Konstrukcja mechanizmów i sterowanie

Głowa humanoidalnego robota ROMAN (ROBot-huMan interAction machiNe) została opracowana jako urządzenie testowe do badań nad interakcjami komunikacji człowiek-robot. Dla osiągnięcia wysokich walorów komunikacji pozawerbalnej robota, opracowano specjalne mechatroniczne zespoły systemu, jak: tułów, szyja, głowa, układ oczu i sztuczna skóra. Ponadto opracowano odpowiednie systemy sensoryczne i układy sztucznej percepcji mające służyć do obserwacji i identyfikacji stanów emocjonalnych i intencji partnera komunikującego się z robotem. W układzie sterowania robotem zaimplementowano inteligentny system komunikacji werbalnej i pozawerbalnej. Robot ROMAN zbudowany jest z szeregu podukładów.

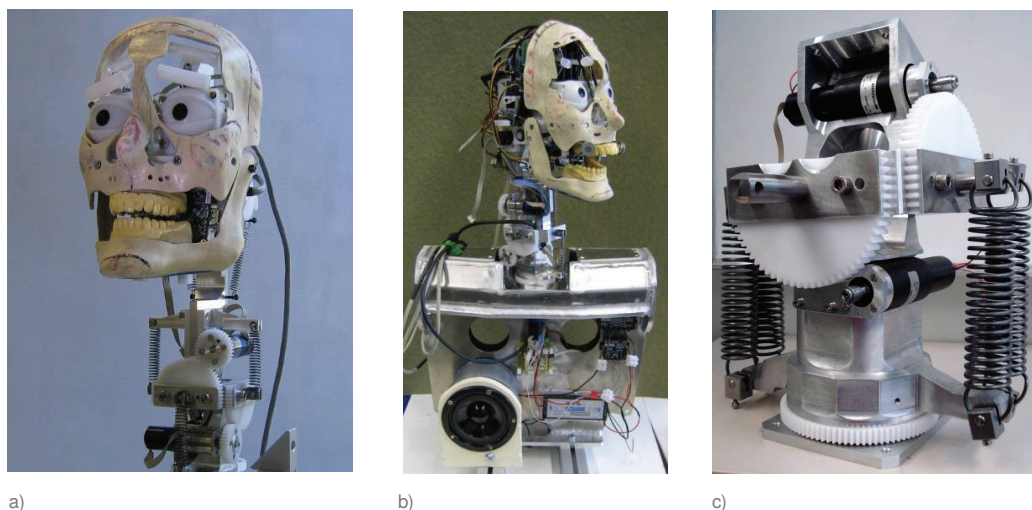
3.1. Układ mechaniczny

Zespół głowy składa się z wielu podzespołów (odpowiadających kościom czaszki) i zawiera obudowę czaszki, szczękę dolną, szyję, układy napędowe i mechanizm sztucznych oczu a także silikonową maskę elastyczną imitującą naturalną skórę. Na powierzchni wewnętrznej skóry, w odpowiednich miejscach określonych przez Ekmana dokleiono 8 płytek metalowych o odpowiednim kształcie z uchwytami dla linek napędzających, co pozwala poruszać skórą dla wyrażania emocji twarzy. Do realizacji napędu zastosowano 10 miniaturowych serwo-mechanizmów napinających lub luzujących stalowe linki/cięgła. Również do napędu otwierania/zamykania szczęki dolnej zastosowano serwo-mechanizm elektryczny.

Na rys. 6 przedstawiono prototyp mechanizmu oczu, który jest wykonany w całości z tworzyw sztucznych zapewniających małą masę. Kompaktość rozwiązania pozwala na bezpośrednie zintegrowanie podzespołu z konstrukcją głowy w ograniczonym obszarze przestrzeni wewnątrz głowy robota. Gałki oczne mogą poruszać się niezależnie góra/dół i prawo/lewo. Plastikowy szkielet powieki górnej może się również poruszać, przy czym napinając/luzując doklejoną skórę pokrycia twarzy stwarza wrażenie zamykania/otwierania oka w sposób naturalny. Jest to niezbędne do wyrażania niektórych specyficznych emocji. W porównaniu z gałkami ocznymi człowieka, których średnica wynosi od ok. 23 mm do 29 mm, gałki oczne robota mają średnicę 46 mm. Takie zwiększenie średnicy wynika z konieczności umieszczenia wewnątrz gałek miniaturowych kamer typu Dragonfly. Układ ramki pojedynczego oka wraz z przekładniami i silnikami ma masę ok. 150 g. Podstawowym materiałem konstrukcyjnym mechanizmu jest tworzywo sztuczne POM (PolyOxyMetylen). Minimalna odległość osi optycznych kamer umieszczonych w gałkach wynosi 65 mm, podobnie jak u człowieka. Oczy mogą obracać się horyzontalnie, tj. względem osi pionowej o kąt $\pm 40^\circ$ oraz wertykalnie w ruchu sferycznym względem drugiej osi poziomej prostopadłej do pierwszej o kąt $\pm 30^\circ$. Czas przestawienia oka z jednej pozycji skrajnej do drugiej pozycji skrajnej wynosi 0,5 s.

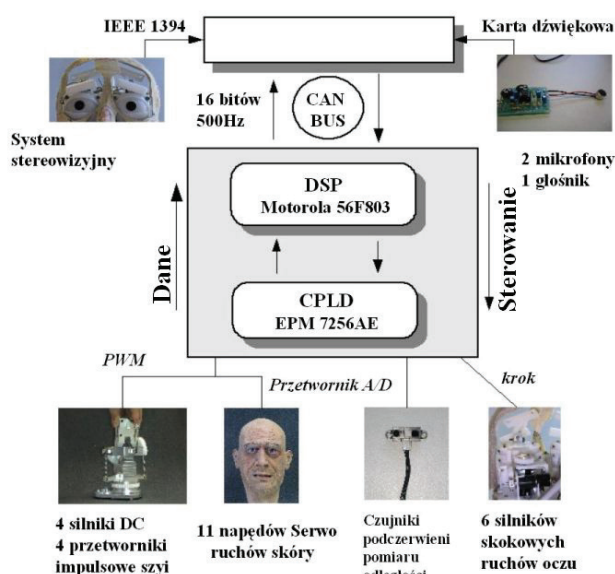
Powieka górna może obracać się o 70° w dół i 10° ku górze względem początkowego położenia horyzontalnego. Mruganie oczami można zrealizować w czasie 0,4 s, tj. z częstotliwością 2,5 Hz.

Mechanizm szyi robota ma cztery stopnie swobody (rys. 7a). Podczas projektowania szyi starano się jak najwierniej odtworzyć geometrię oraz podstawowe charakterystyki kinematyczne i dynamiczne naturalnej szyi człowieka. Na podstawie analizy ruchów głowy człowieka, które w podstawowych kierunkach wykazują ruch sferyczny, naturalnym dla ruchowego podparcia głowy względem tułowia, wydawało się zastosowanie przegubu kulistego o trzech stopniach swobody. Niestety, w takim wypadku bardzo trudno jest zrealizować odpowiedni układ napędowy mechanizmu. W opracowanym rozwiązaniu zastosowano kinematyczny łańcuch szeregowy podobny do konstrukcji tzw. kiści sferycznej manipulatora robota przemysłowego o trzech osiach kolejno do siebie prostopadłych. Układ składa się z trzech przegubów obrotowych o osiach: pierwszej pionowej, zamocowanej do górnej płaszczyzny skrzynki tułowia, zakres obrotu tej osi wynosi $\pm 60^\circ$, druga oś jest pozioma i prostopadła do pierwszej i pozwala na pochylanie głowy w kierunku do przodu/tyłu w zakresie kątowym $\pm 30^\circ$, trzecia oś jest prostopadła do drugiej, w położeniu neutralnym leży w płaszczyźnie poziomej i pozwala na zginanie szyi połączone z pochylaniem głowy na boki w zakresie kątowym $\pm 30^\circ$. Dla zapewnienia realizacji bardziej naturalnych ruchów głowy, u nasady czaszki zamocowano dodatkowy przegub obrotowy pochylania głowy do przodu/tyłu w zakresie kątowym $\pm 40^\circ$. Mechanizm zawiera układ sprężyn kompensujących wpływ momentów mechanicznych od sił grawitacji przy pochyleniu



Rys. 7. a) mechanizm sztucznej szyi robota ROMAN z przekładniami i układami sprężyn kompensujących momenty od sił grawitacji, b) tułów robota z zamontowaną szyją i głową., c) mechanizm kręgosłupa lędźwiowego

Fig. 7. a) the mechanism of artificial neck of the robot ROMAN with gears and springs for gravity compensation, b) the body of the robot with the neck and head, c) the mechanism of lumbar spine

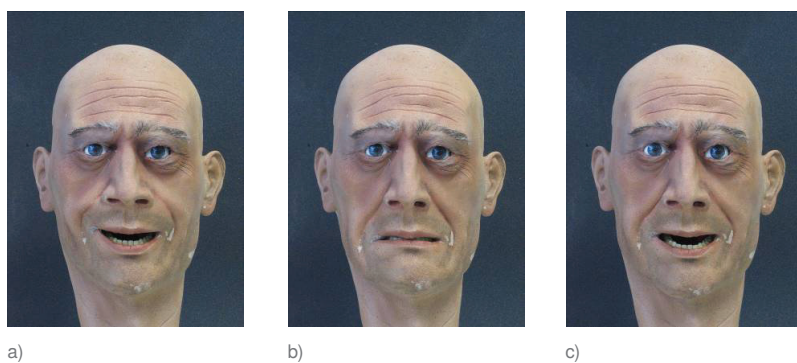


Rys. 8. System sterowania głową robota ROMAN

Fig. 8. Control system for the robot ROMAN head

głowy do przodu/tyłu i odchylaniu głowy na boki. Pozwolił on zmniejszyć moc silników napędowych ok. pięciokrotnie w stosunku do niezbędnej mocy silników w układzie bez odciążenia sprężynami.

Tułów robota (rys. 7b) ma konstrukcję skrzynkową i zawiera odpowiednio osłonięte powierzchnie przednią i tylną dla zamocowania płyt głównych komputerów sterujących typu PC i elementów dodatkowych jak głośnik, mikrofony itp. oraz w części górnej gniazdo mocowania mechanizmu szyi, w części dolnej płytę опорową przyłączeniową do mechanizmu kręgosłupa lędźwiowego, zaś w części górnej dwie symetrycznie rozmieszczone skrzynki układów napędowych z gniazdami mocowania sztucznych rąk – manipulatorów antropomorficznych, manipulatory nie zostały jeszcze opracowane. Tułów jest podparty na mechanizmie powielającym funkcje ruchowe kręgosłupa lędźwiowego, który zrealizowano podobnie jak mechanizm szyi. Jest on pokazany w rzucie ogólnym na rys. 7c. Mechanizm zapewnia następujące zakresy ruchów: obrót wokół osi pionowej $\pm 30^\circ$, zgięcie przód/tył $+40^\circ$, -30° , zgięcie lewo/prawo $\pm 30^\circ$. Do napędu zastosowano silniki prądu stałego Faulhaber z przekładniami oraz dodatkową przekładnią zębatą (rys. 7c). Na rysunku widoczne są ponadto układy sprężyn odciążających, które służą do kompensacji wpływu momentów mechanicz-



Rys. 9. Rezultaty wstępne sterowania mimiką twarzy robota ROMAN: a) poczucie szczęścia, b) wyrażanie smutku, c) wyrażanie obawy

Fig. 9. Initial results of the facial expressions control of the robot ROMAN face: a) happiness, b) sadness, c) apprehension

nych pochodzących od sił grawitacji pochylającego się tułowia i poprawy jakości sterowania oraz pracy układów napędowych. Pozwoliły one na zmniejszenie mocy silników napędowych do około 1/5 oraz zapewniają znacznie lepszą jakość sterowania serwo mechanizmami z wyeliminowanymi narastającymi ze wzrostem kąta pochylenia obciążeniami.

3.2. Układy sensoryczne

Silniki elektryczne są wyposażone w przetworniki obrotowo-impulsowe pomiaru kąta obrotu wału, co zapewnia odpowiednią dokładność sterowania względnymi położeniami członów układu mechanicznego. Są one bezpośrednio zintegrowane z konstrukcją jednostek napędowych. W konstrukcji robota zastosowano również czujniki pomiaru położenia kąтового w przegubach szyi, przegubach kręgosłupa lędźwiowego, na osiach ruchów obrotu oczu, kamery w układzie stereowizyjnym, mikrofony, czujniki podczerwieni do pomiaru odległości, czujniki inercyjne do pomiaru przyspieszeń. Czujniki te zostały odpowiednio zintegrowane z konstrukcją w celu osiągnięcia jak najlepszych efektów ich działania, w szczególności ze względu na współdziałanie z układem sterowania robotem. Na przykład rozwiązanie konstrukcyjne mechanizmu oczu zawiera kamerę i trzy jednostki napędowe ruchów obrotu trzech stopni swobody. Natomiast układ bezwładnościowy pomiaru przyspieszeń i czuciowy zapachów zostanie wbudowany w niedalekiej przyszłości, przy czym twórcy liczą na to, że w przyszłości czujniki te będą lepsze i tańsze niż obecnie. Czujniki podczerwieni są wbudowane na czole w celu pomiaru odległości od obiektu. Mikrofony mają wykrywać kierunek, z którego odbierany jest dźwięk i będą bezpośrednio podłączone do karty dźwiękowej pokładowego komputera PC. Na rys. 8 pokazano schemat systemu pomiarowo-sterującego z uwzględnieniem podstawowych jego komponentów składowych oraz połączeń z sensorami i układami wykonawczymi (napędowymi).

3.3. System sterowania

Sterowanie układami serwo odpowiedzialnymi za ruchy skóry, a także bezpośrednio silnikami prądu stałego ruchów robota w stawach oraz określanie pozycji robota na podstawie sygnałów z czujników bezwładnościowych jest realizowane za pomocą układów DSP (Motorola 56F803) połączonych z jednostką centralną CPLD (Altera EPM 70 128). Do sterowania głową użyto 5 takich układów: jeden dla czujników bezwładnościowych, jeden dla silników krokowych oczu, dwa dla 4 silników szyi i jeden dla 11 serw poruszających skórą. Układy te są połączone przez szynę CAN-BUS z komputerem pokładowym typu PC. Dwa mikrofony kierunkowe i głośnik są podłączone do karty dźwiękowej komputera PC.

Kamery zamontowane wewnątrz gałek ocznych wykorzystując wejście łącza szeregowego FireWire IEEE 1394 zamontowane w komputerze PC.

Aktualny stan projektu pozwala na wyrażanie emocji i realizację prostych ruchów jak kłanianie się. Natomiast, ponieważ wyrażanie emocji w kontaktach z partnerem w sposób pozawerbalny jest złożoną kombinacją różnych ruchów, wymagane jest dalsze rozwijanie dotychczasowego projektu, aby w przyszłości robot mógł dysponować możliwością wyrażania gestów i mimiki oraz pów w znacznie szerszym asortymencie.

3.4. Badania wstępne wyrażania emocji przez robota i komunikacji z robotem

Stan aktualny budowy głowy oraz układu sterowania pozwala na wyrażanie emocji przez ruchy gałek ocznych, szczęki dolnej, ruchy głowy na szyi oraz w szczególności zmiany wyrazu twarzy. Rezultaty wstępne zaprezentowano na rys. 9. Stany zachowań behawioralnych są określane z równoczesnym wyznaczaniem wyrazu twarzy i aktywacją silników poruszających sztuczną skórę.

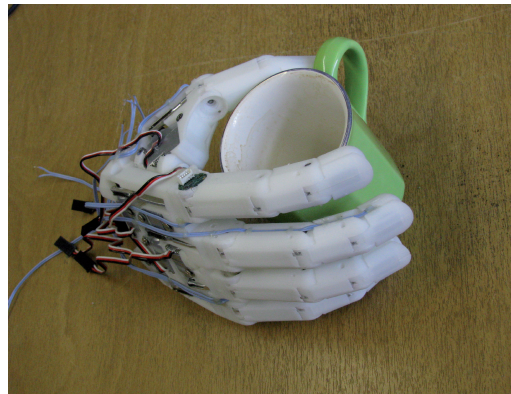
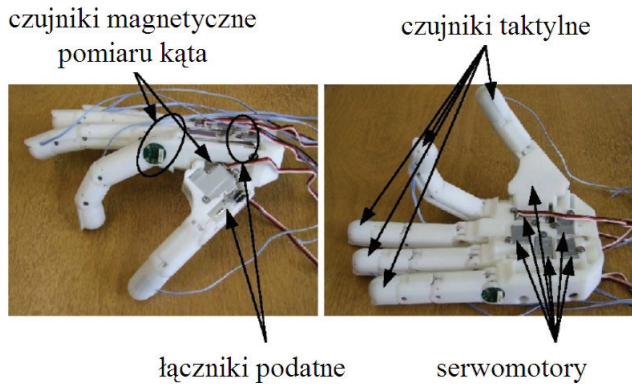
Na rys. 10. pokazano wyniki prób komunikacji werbalnej człowieka z robotem. Podczas seansu robot kłania się, kręci głową, ruchami gałek ocznych wyraża zdziwienie. Przy pożegnaniu robot również się kłania, wymawiając słowa z nutą zawodu, gdyż nie podtrzymało jego propozycji pomocy.

Projekt konstrukcji mechanicznej ręki charakteryzuje się bardzo wysokim stopniem integracji elementów mechanicznych, elektrycznych i elektronicznych i stanowi bardzo dobry przykład z jednej strony wykorzystania integracji systemów projektowych CAD/CAM/CAE a z drugiej strony wysokiej integracji konstrukcji. W prototypie zastosowano lekkie i wytrzymałe materiały konstrukcyjne, jak duraluminium i kompozyt węglowy. Warto podkreślić, że dzięki przyjętej metodzie zintegrowanego projektowania niektóre układy napędowe, pomiarowe i sterujące zostały wbudowane w elementy konstrukcyjne a projektowane człony dokładnie do nich dopasowane, dzięki czemu uzyskano rozwiązanie wysoce zintegrowane, tzw. skompaktowane. Ponadto uzyskano rozwiązanie wysoce funkcjonalne o wymiarach i osiągnięciach zbliżonych do wymiarów i osiągnięci ramienia/ręki człowieka.

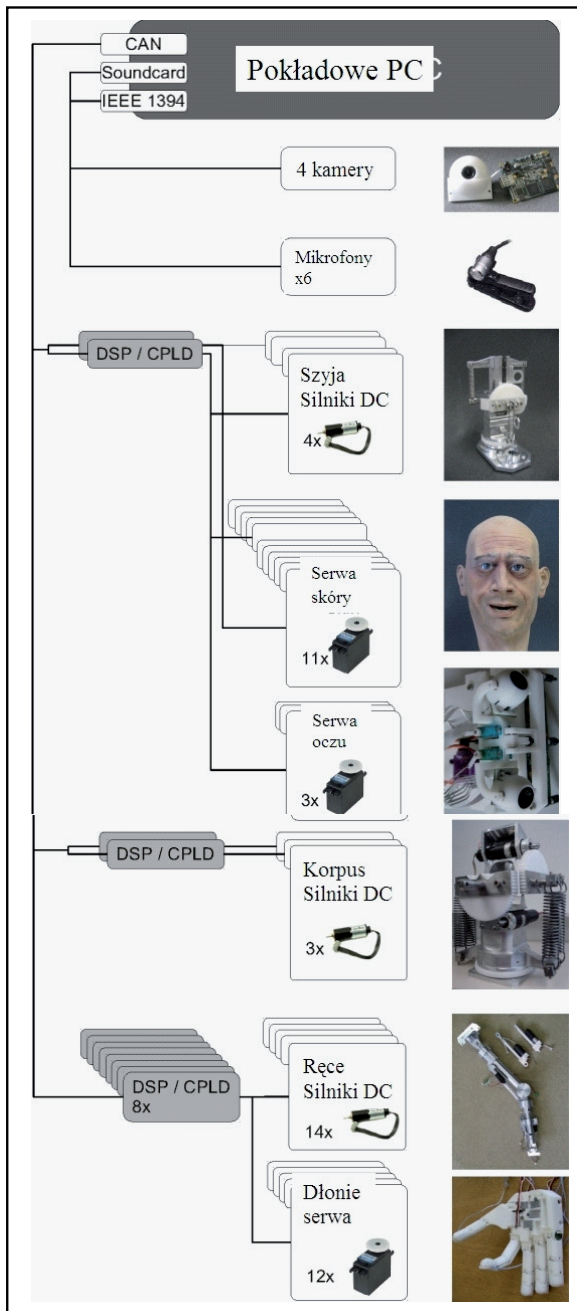
W opracowaniu konstrukcji dłoni robota bardzo istotne okazały się ich takie cechy jak wysoka funkcjonalność i estetyka ogólna. Mają one umożliwić robotowi możliwość realizacji manipulacji i gestykulacji w jak najszerszym zakresie. Wobec tego w projekcie i konstrukcji dłoni wykorzystano nadające się do tego nowoczesne technologie jak szybkie prototypowanie metodą material accretion manufacturing nakładania warstw.



Rys. 10. Rozmowa robota ROMAN z partnerem: a) powitanie robota, b) robot wyraża chęć pomocy, c) robot żegna się
 Fig. 10. Conversation of Robot ROMAN with human partner: a) welcome, b) desire to help, c) farewell

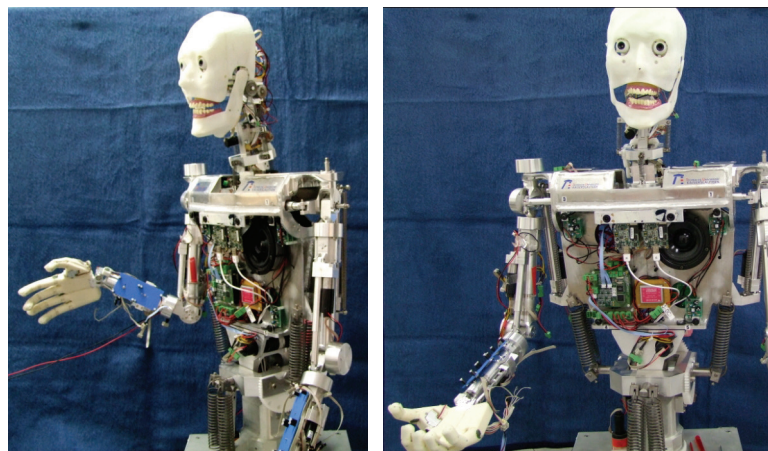


a) b)
Rys. 11. Mechatroniczna ręka robota humanoidnego Roman w postaci wydruku 3D: a) podstawowe elementy, b) właściwości adaptacyjne do typowego obiektu
 Fig. 11. 3D printed mechatronic hand of humanoid robot Roman: a) basic parts, b) adaptive properties with typical object



Rys. 12. System połączeń robota ROMAN
 Fig. 12. The network of connections between basic robot ROMAN functional systems and functional parts

Na rys. 11 pokazano prototyp dłoni wykonany na maszynie Stratasys z materiału ABS plus. Opracowując nowe rozwiązanie konstrukcyjne chwytaka sformułowano założenia co do klas kształtu chwytanych obiektów, ich wielkości, masy, twardości i podatności powierzchni zewnętrznej, wytrzymałości (odporności na zgniecenie siłami niezbędnymi do uchwycenia), stanu powierzchni, możliwości chwytania w określony sposób itp. Założenia te odpowiadają możliwościom pracy żywej dłoni ludzkiej ale wymagały obszernych analiz dotyczących technicznych możliwości realizacji równoważnych zadań modelowych z koniecznością zastosowania nieożywionej materii technicznej. Zgodnie ze sformułowanymi założeniami dokładnie przeanalizowano problem od strony technicznej, tzn. możliwości rozwiązania układu kinematycznego, napędu, ulokowania niezbędnych czujników i sensorów, doprowadzenia energii i sterowania w sposób jak najbardziej zintegrowany i kompaktowy, aby zapewnić wysokie właściwości funkcjonalne chwytaka. Dodatkowym czynnikiem, który warto było uwzględnić była chęć stworzenia rozwiązania, z użyciem którego pewne zadania chwytania obiektów, robot z chwytakiem mógłby rozwiązywać w sposób „maszynowo intuicyjny”, tzn. na podstawie bardzo ogólnie sformułowanych założeń działania, podczas gdy sam proces chwytania byłby wynikiem „rozmytego” uwzględnienia wielu różnych czynników o różnym charakterze. Dotyczy to takich obiektów jak sztywna



a) b)
Rys. 13. Możliwości gestykulacyjne robota ROMAN: a – gest przyżni, b – rozczarow
 Fig. 13. Gesticulation properties of the robot ROMAN: a) a gesture of friendship, b) disapproval

szklana butelka, plastikowa miękka butelka wypełniona płynem o zmiennej zawartości, sztywne płytki i kostki, piłka do golfa, piłka do tenisa lub do ping-ponga, jajko itp. Wobec tego w rozwiązywaniu konstrukcyjnym jak też i w sterowaniu należało uwzględnić wpływ pewnych dodatkowych czynników niedeterminowanych, wpływających na proces chwytania/manipulacji jak i na obiekty, którymi robot z chwytakiem będzie musiał efektywnie manipulować. Część elementów transmisyjnych wykonano z duraluminium. W konstrukcji mechanizmów napędowych zastosowano specjalne sprzęgi podatne, służące dodatkowo jako układy pomiarowe sił reakcji paliczek z obiektem.

Należy podkreślić, że zarówno układy napędowe, jak i transmisyjne a także pomiarowe i sensoryczne w pełni wbudowano w człony nośne, tworząc dzięki temu w pełni zintegrowaną konstrukcję tzw. mechatroniczną. Podatność do palców wprowadzono przez specjalną konstrukcję łącznika przenoszącego napęd z serwonapędu na paliczek pierwszy i zastosowanie elementu podatnego w postaci sprężyny spiralnej dwustronnego działania. Pozwoliło to na uelastycznienie mechanizmu każdego palca a jednocześnie na bezpośredni pomiar siły w każdym palcu. W tym celu u nasady palca wbudowano dodatkowy czujnik pomiaru kąta. Rysunek 11a ilustruje rozlokowanie serwowymotorów, łączników podatnych, czujników taktylnych i czujników magnetycznych pomiaru kątów. Na rys. 11b pokazano wstępnie badane możliwości chwytne sztucznej dłoni. Zostanie ona dodatkowo pokryta elastyczną powłoką z gumy silikonowej, tzw. sztuczną skórą zawierającą mikroelektroniczne czujniki taktylne do pomiaru pól nacisków powierzchniowych na styku z manipulowanym obiektem. Na rys. 12 pokazano schemat poglądowy systemu połączeń funkcjonalnych elementów składowych układu sterowania robota Roman.

4. Badania funkcjonalne

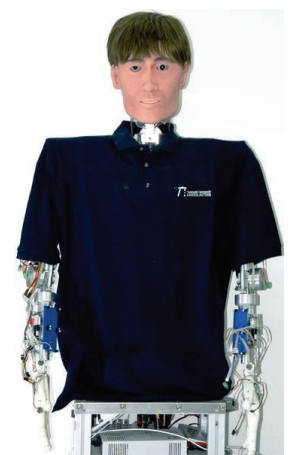
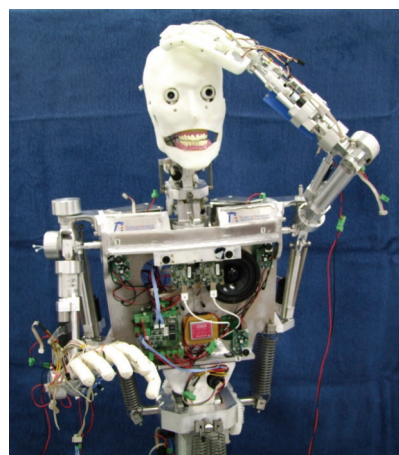
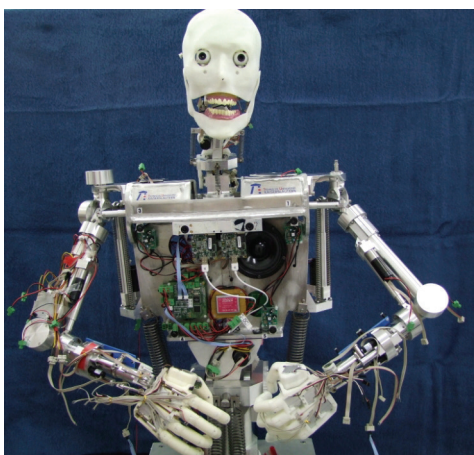
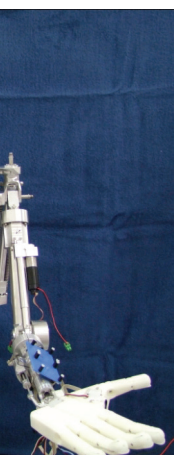
Na rys. 13 zaprezentowano możliwości gestykulacyjne robota Roman. Jak widać, robot może wyrażać gesty przyjaźni, rozczarowania, pewności siebie i zakłopotania. Niezależnie od tego robot może chwytać rękami typowe narzędzia pracy człowieka i może wykonywać typowe prace. Badania wstępne wykazały jednak, że założone wstępnie zakresy ruchów ramion w górę okazały się niewystarczające. W związku z tym planowane są dalsze modernizacje opracowanego rozwiązania.

5. Podsumowanie i wnioski

Laboratoryjne badania stanowiskowe wykazały wysokie walory funkcjonalne, użytkowe i estetyczne opracowanego rozwiązania robota. Projekt charakteryzuje się bardzo wysokim stopniem integracji elementów mechanicznych, elektrycznych i elektronicznych i stanowi bardzo dobry przykład z jednej strony wykorzystania integracji systemów projektowych CAD/CAM/CAE a z drugiej strony wysokiej integracji konstrukcji. Dzięki przyjętej metodzie zintegrowanego projektowania uzyskano rozwiązanie o wysokim poziomie integracji zespołów konstrukcji, tzw. skompaktowane. Aktualnie robot jest poddawany intensywnym badaniom użytkowym. Opracowane rozwiązanie stanowi model robota humanoidalnego pozwalającego na wysoce powtarzalne interakcyjne badania behawioralne kontaktów robot-człowiek z zakresu współpracy robota z człowiekiem.

Bibliografia

1. Tapus A., Matarić M.J., Scassellati B., *The grand challenges in socially assistive robotics*, "Robotics and Automation Magazine", Vol. 14, No. 1, 2007, 35–42.
2. Birdwhistell R.L., *Kinesics and Context: Essays in Body Motion Communication*, Philadelphia, USA: University of Pennsylvania Press, 1970.
3. Mehrabian A., Wiener M., *Decoding of inconsistent communications*, "Journal of Personality and Social Psychology", Vol. 6, No. 1, 1967, 109–114.
4. Engleberg I.N., Wynn D.R., *Working in Groups: Communication Principles and Strategies*. Allyn & Bacon, 2006.
5. Ekman P., Friesen W., Hager J., *Facial Action Coding System. A Human Face*, 2002.
6. McNeill D., *Hand and Mind*, The University Press of Chicago, 1992.
7. Kagami S., Mochimaru M., Ehara Y., Miyata N., Nishiwaki K., Kanade T., Inoue H., *Measurement and comparison of human and humanoid walking*, [in:] Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Vol. 2, 2003, 918–922, DOI: 10.1109/CIRA.2003.1222302.
8. Asfour T., Regenstein K., Azad P., Schröder J., Bierbaum A., Vahrenkamp N., Dillmann R., *Armar-III: An integrated humanoid platform for sensory-motor control*, [in:]



c)

d)

e)

anie, c – gest pewności siebie, d – zakłopotanie, e) ubrany w T-shirt i wyposażony w nową maskę – widok ogólny
pointment, c) confidence, d) embarrassment, e) robot dressed with t-shirt with new mask – general view

- Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Genoa, Italy, December 2006, 169–175, DOI: 10.1109/ICHR.2006.321380
9. Ishida T., Kuroki Y., Yamaguchi J., *Mechanical system of a small biped entertainment robot*, [in:] Proceedings of the 2004 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Los Angeles, California, USA, November 10–12, 2004, 235–252.
 10. Mianowski K., Schmitz N., Berns K., *Mechanics of the humanoid Robot ROMAN*, [in:]in Sixth International Workshop on robot Motion and Control (RoMoCo), Bukowy Dworek, Poland, June 11–13, 2007, 341–348.
 11. Hamill J., Knutzen K.M., Derrick T.R., *Biomechanical Basis of Human Movement*, 2nd ed. Lippincott Williams & Wilkins, 2003.
 12. Tittel K., *Beschreibende und funktionelle Anatomie des Menschen*. Urban & Fischer, 2003.
 13. Morecki A., Ekiel J., Fidelus K., *Cybernetic Systems of Limb Movements in Man, Animals, and Robots*. Polish Scientific Publishers, Warsaw, Ellis Horwood Limited Publishers, Chinchester, 1984.
 14. [<http://asimo.honda.com>]

Robot Roman – Humanoid for Expression Emotions

Abstract: This paper presents the design of humanoid robot Roman, which is able to generate of gestures as nonverbal interaction signals for communication with people. The geometry of basic links and ranges of motions have been investigated to obtain solution very similar to the human body. Mechanical design and the prototype of the robot Roman – artificial body, hands and the head was designed with using fully integrated CAD/CAM/CAE system Pro Engineer v.4.0. The methodology of very modern mechatronic design, which allow to highly integrated mechanical/electric/electronic parts of the prototype is described in the paper in details. It has been shown, that it is possible to create basic functional characteristics of the solution in the phase of the virtual design. Robot can be apply as a guiding principle for the construction of humanoid robot for expression emotions.

Keywords: humanoids, behavioral control, robot-human interaction

dr inż. Krzysztof Mianowski

kmianowski@meil.pw.edu.pl

Adiunkt w Zakładzie Teorii Maszyn i Robotów w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej w Politechnice Warszawskiej, którego jest absolwentem. Jego zainteresowania naukowe skupione są wokół tematyki konstrukcji mechanicznych robotów, w szczególności robotów medycznych i manipulatorów równoległych, jest także głównym konstruktorem układu mechanicznego robota humanoidalnego ROMAN, opracowanego w ostatnich latach na Uniwersytecie Technicznym w Kaiserslautern w Niemczech.



prof. dr. Karsten Berns

berns@informatik.uni-kl.de

Od 2003 r. jest profesorem na Uniwersytecie Technicznym w Kaiserslautern w Niemczech. Jego działania badawcze dotyczą niezawodności współdziałania kompleksowych systemów robotów autonomicznych. Głównym obszarem zastosowania jest robotyka off-road, dotycząca opracowania autonomicznych lub pół-autonomicznych pojazdów typu małe ciężarówki, koparki, kombajny, traktory i roboty ratunkowe. Prof. Berns jest recenzentem i członkiem komitetów redakcyjnych wielu czasopism i konferencji robotycznych. Jest członkiem IEEE, Gesellschaft für Informatik (GI) oraz Stowarzyszenia CLAWAR. Jest członkiem Komitetu Wykonawczego Stowarzyszenia Robotyki (DGR) Niemiec i przewodniczącym komitetu technicznego d/s systemów robotycznych w GI. Pełnił także funkcję dziekana Wydziału Informatyki na Uniwersytecie w Kaiserslautern (2007–2010).

