

ARTUR GMEREK*, TIGRAN SOGHBATYAN, MICHAŁ SUDOWSKI,

ALEKSANDER GRZELKA, MACIEJ JARZĘBSKI

*Instytut Automatyki, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyk i Automatyki,
Politechnika Łódzka

PROJEKT I BUDOWA ROBOTA PLANARNEGO O DWÓCH STOPNIACH SWOBODY PRZEZNACZONEGO DO ZASTOSOWAŃ DYDAKTYCZNYCH

Streszczenie

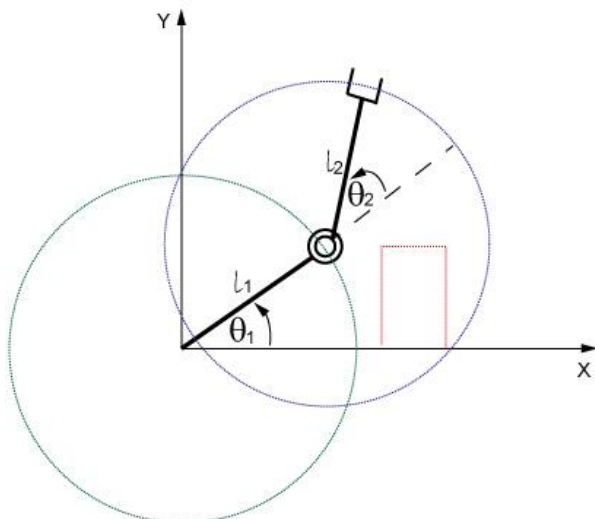
Niniejszy artykuł opisuje projekt budowy planarnego robota o dwóch stopniach swobody. Robot przeznaczony jest do zastosowań edukacyjnych. Autorzy opisują zarówno przyjęte rozwiązania konstrukcyjne, jak również wnioski z przeprowadzonych prac projektowych i eksperymentalnych.

Wstęp

W dzisiejszych czasach obserwuje się coraz większe zainteresowanie robotyką i automatyką. Jest to związane z tym, że roboty są w stanie odciążać człowieka w wielu pracach. Poprawne zaprojektowanie manipulatorów robotycznych jest jednak skomplikowane, ponieważ robotyka jest nauką, na którą składa się wiedza z wielu dziedzin. W celu wykonania robota potrzebna jest ogólna wiedza mechatroniczna, która pozwala na poprawne połączenie wszystkich elementów maszyny. Do zaprojektowania konstrukcji konieczna jest znajomość mechaniki i zasad doboru napędów. Sterowniki mocy i niskopoziomowe wymagają wiedzy elektronicznej i umiejętności programowania niskopoziomowego. Sterownik wysokopoziomowy wymaga natomiast dużej wiedzy natury informatycznej i umiejętności programistycznych. Jednym z ważniejszych elementów sterownika wysokiego poziomu robota jest wyznaczenie modeli kinematycznych i dynamicznych urządzenia, które służą do jego sterowania.

Autorzy niniejszego artykułu zaprojektowali manipulator planarny o dwóch stopniach swobody. Robot został nazwany *Planar 2 DoF*. Celem projektu było przejście przez wszystkie etapy projektowe budowy robota i stworzenie działającej maszyny. Przestanką do stworzenia robota była obserwacja, że nauka prostego i odwrotnego zagadnienia kinematycznego, jak również planowania trajektorii bez używania modelu rzeczywistego jest kłopotliwa. Tymczasem na rynku nie ma tego typu robotów z otwartym oprogramowaniem, z pomocą których można byłoby łatwiej poprowadzić zajęcia dydaktyczne.

Posiadając model kinematyczny robota możliwe jest odtwarzanie trajektorii nieosiągalnych w przypadku niesynchronicznego sterowania złączami manipulatora. Na rysunku 1 niebieskim okręgiem przedstawiono trajektorię zakreślaną przy ruchu drugiego złącza, natomiast zielonym okręgiem trajektorię zakreślaną przez koniec pierwszego ogniwa przy ruchu pierwszego złącza. Sterując tymi złączami w sposób synchronizowany można odtworzyć na przykład trajektorię prostokąta (oznaczoną na rysunku czerwoną linią). Byłoby to niemożliwe bez posiadania modelu kinematycznego manipulatora.



Rysunek 1 Schemat robota planarnego o 2. stopniach swobody

Przegląd podobnych rozwiązań robotycznych

Na rynku oraz w literaturze znane są podobne roboty wyposażone w dwa stopnie swobody. Jednym ze znanych robotów jest *2DoF Serial Flexible Joint* [1]. Jest to robot o dwóch stopniach swobody zbliżony konstrukcją do manipulatora przedstawionego w tej pracy. Jako jednostki napędowe w złączach zostały zamontowane silniki prądu stałego. Każdy z nich umożliwia skręcenie przegubu o +/- 90 stopni. W układzie zastosowano przekładnie harmoniczne. Informacje o przemieszczeniu lub zmianie kąta w złączu zostają odczytane przez enkodery optyczne. Złącza połączone są ramionami w postaci podwójnych aluminiowych prętów. Konstrukcja została w ten sposób zaprojektowana, że umożliwia tłumienie oscylacji mechanicznych. Robot charakteryzuje się również wysoką prędkością działania. Software należy do otwartej architektury, jest kompatybilny z obsługą przez *Matlaba* oraz *LabView*.

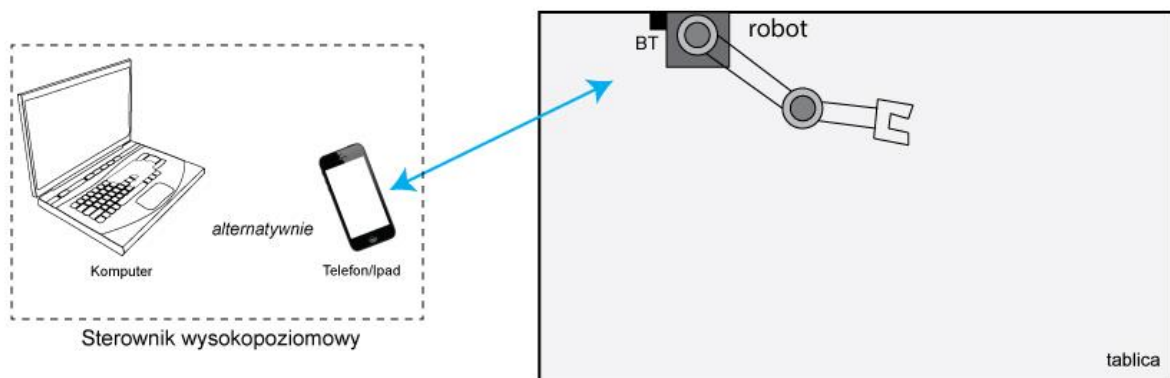
Kolejnym produktem jest *2 DOF Planar Robot* firmy *Quanser* [2]. Jego głównym przeznaczeniem jest odwzorowywanie zadanych kształtów na kartce papieru. Również dysponuje on silnikami prądu stałego z przekładniami harmonicznymi. Za pobieranie informacji o aktualnym wychyleniu poszczególnych części robota odpowiedzialne są enkodery optyczne. Jego waga wynosi 3,9 kg. Robot zainstalowany jest na metalowej podstawie, co pozwala na łatwe przemieszczanie całego urządzenia. Efektor ma postać chwytaka na długopis. Obszarem pracy jest poziomo leżąca kartka papieru o formacie A5. Kalibracji można dokonać bez ingerencji w oprogramowanie urządzenia. Stosuje się do tego manipulację odpowiednimi pokrętkami umieszczonymi na podstawie robota. Sterowanie robota odbywa się za pośrednictwem programu *QuarRC*, który jest zintegrowany z *Matlabem/Simulinkiem* oraz *LabView*. Architektura systemu jest otwarta.

Zagadnieniem opracowania robota będącego w stanie rysować zadane kształty na kartce papieru zajmowało się również wiele grup studenckich. Na szczególną uwagę zasługuje projekt studencki *PicasoBot* [3]. Potrafi on wiernie odwzorować dowolny rysunek przekazany z zewnętrznego źródła, jak chociażby tablet. Konstrukcja tego robota opiera się na dwóch złączach napędzanych silnikami krokowymi. Robot posiada również mechanizm opuszczający pisak.

Wśród wielu produktów i projektów można znaleźć takie, które poddane procesowi odpowiedniej adaptacji nadawałyby się do edukacji zagadnień z kursu Podstaw Robotyki. Roboty planarne o dwóch stopniach swobody nadają się do tego znakomicie, ponieważ są jeszcze stosunkowo proste, a jednocześnie dzięki dwóm stopniom swobody możliwa jest synchroniczna praca wszystkich napędów potrzebna do optymalnego osiągnięcia zadanych punktów trajektorii [4].

Ogólna budowa robota

Planar 2 DoF przeznaczony jest do zastosowań edukacyjnych. Konstrukcja została w ten sposób zaprojektowana, że umożliwia łatwe zawieszenie go na tablicy. Bezpośrednio przy robocie znajduje się sterownik niskopoziomowy, który komunikuje się ze sterownikiem wysokiego poziomu za pośrednictwem protokołu *Bluetooth*.



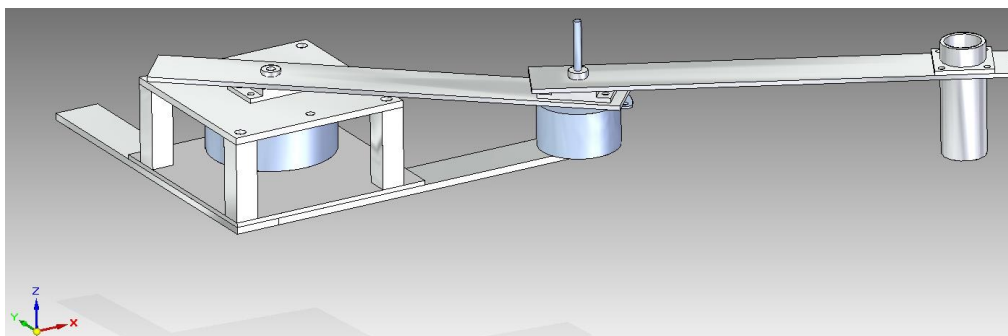
Rysunek 2 Ogólna struktura zaprojektowanego systemu

Na projekt robota składają się następujące elementy:

- konstrukcja mechaniczna
- napędy robota
- sterowniki mocy i sterownik niskopoziomowy robota
- sterownik wysokiego poziomu robota

Konstrukcja mechaniczna została zaprojektowana w ten sposób, aby umożliwić tanią i szybką produkcję robota. Robot składa się z aluminiowych płaskowników. Na początku i na końcu płaskowników umieszczone są łożyska, które zapewniają prawidłowe ułożyskowanie robota w płaszczyźnie ruchu. Efektor został wykonany w formie uchwytu na mazak. W podstawie robota znajdują się magnesy neodymowe, które umożliwiają podłączenie robota np. do tablicy. Do podstawy można również podłączyć wygięty pręt stanowiący rodzaj wieszaka, który umożliwia zawieszenie go w pozycji pionowej.

Napęd w złączach stanowią silniki krokowe bezprzekładniowe. Moc silnika została w ten sposób dobrana, aby możliwy był ruch z dużą rezerwową momentu obrotowego.



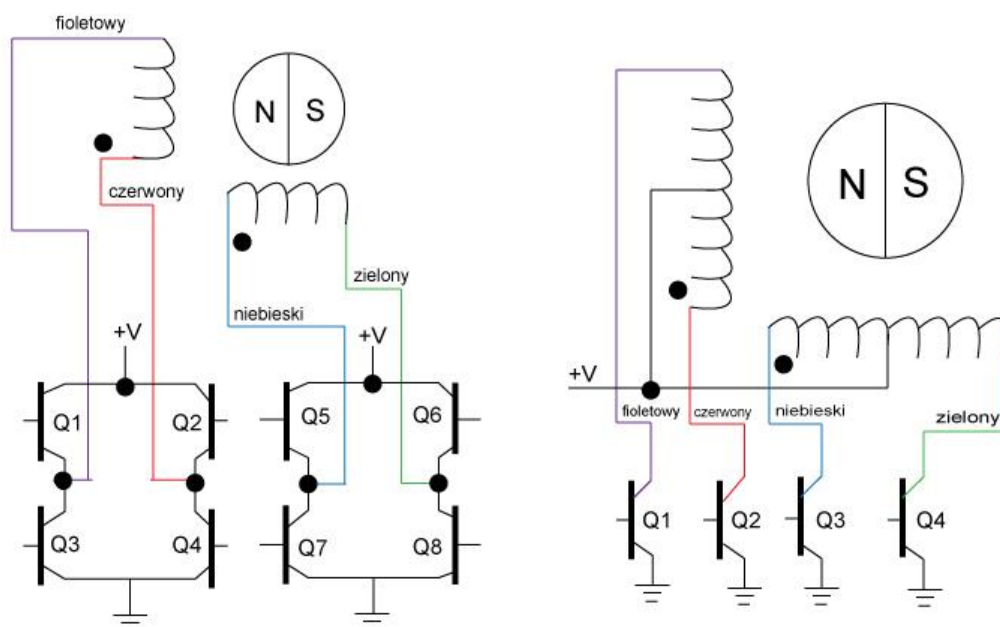
Rysunek 3 Projekt CAD konstrukcji mechanicznej robota

Niskopoziomowy sterownik robota

Sterownik niskopoziomowy składa się z dwóch głównych elementów:

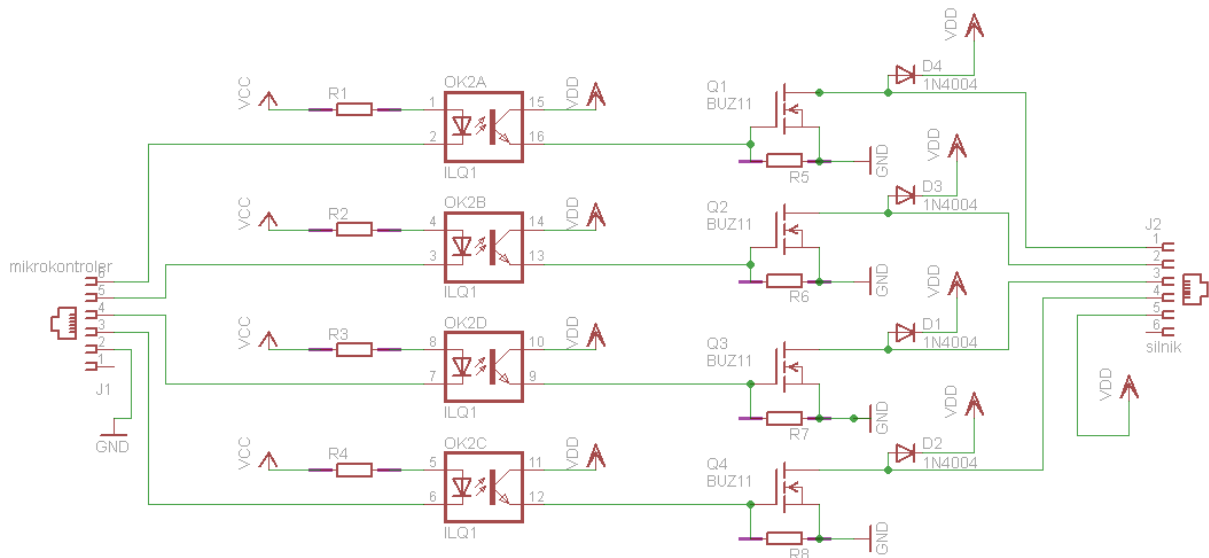
- układu sterującego pracą silnika (zespołu tranzystorów),
- programowalnego mikrokontrolera.

Układ odpowiedzialny za napędzanie silników krokowych składa się z transoptorów, zapewniających separację galwaniczną obwodu silnika od obwodu kontrolera oraz tranzystorów typu MOSFET odpowiedzialnych za prawidłowe kluczkowanie cewek silnika. W zależności od rodzaju użytego silnika krokowego (unipolarny, bipolarny), układ sterujący charakteryzuje się jedną z dwóch konfiguracji tranzystorów (Rysunek 4).

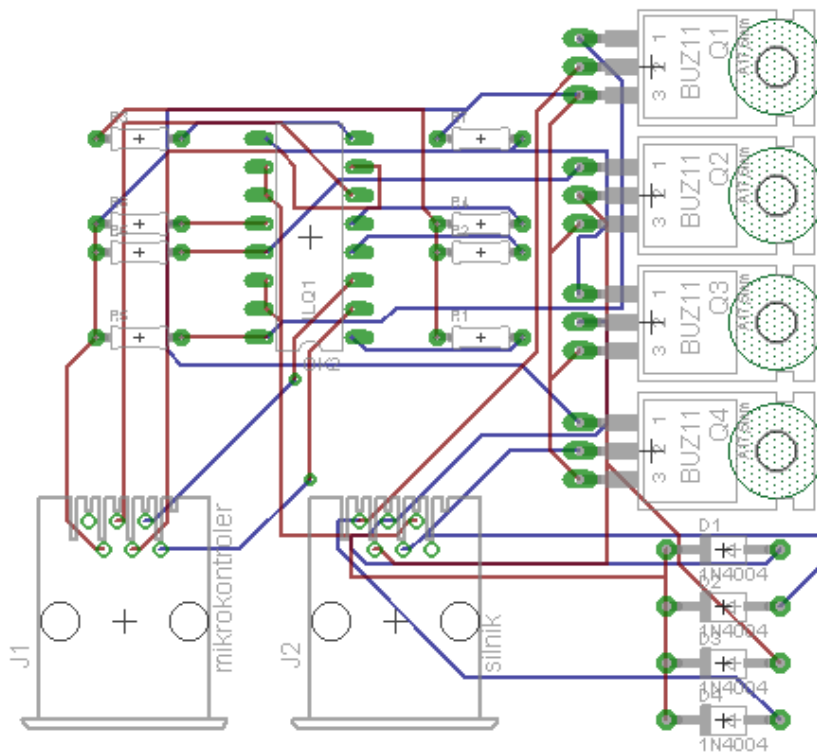


Rysunek 4 Dwie różne konfiguracje tranzystorów przeznaczone do sterowania silnikami krokowymi bipolarnymi (lewa) oraz unipolarnymi (prawa)

W przypadku silnika bipolarnego wymagane są dwa układy połączone w mostki H. Każdy mostek kontroluje jedną cewkę silnika. Do zrealizowania tego rodzaju sterownika wymaganych jest osiem tranzystorów (cztery z kanałem typu N i cztery z kanałem typu P). Silnik unipolarny ma wyprowadzenia ze środków cewek co umożliwia zastosowanie prostszego układu sterującego. W tym przypadku wymagane są jedynie cztery tranzystory kluczujące. W obu przypadkach sterowanie kluczami realizowane jest 4 sygnałami z mikrokontrolera, odseparowanymi galwanicznie za pomocą transoptorów.



Rysunek 5 Schemat elektryczny stworzonego sterownika unipolarnego



Rysunek 6 Stworzony schemat PCB sterownika unipolarnego

Podstawowym zadaniem mikrokontrolera z rodziny AVR jest komunikacja ze sterownikiem wysokopoziomowym. Transmisja odbywa się przez interfejs UART, który komunikuje się z urządzeniem Bluetooth, a ten zapewnia komunikację pomiędzy komputerem, a robotem. Poprzez to połączenie bezprzewodowe przesyłane są informacje dotyczące ilości kroków jakie silniki mają wykonać oraz ich częstotliwości (prędkości ruchu). Po otrzymaniu danych mikrokontroler generuje i wysyła do układu sterującego sygnały o przebiegu przedstawionym w Tabeli 1 i 2.

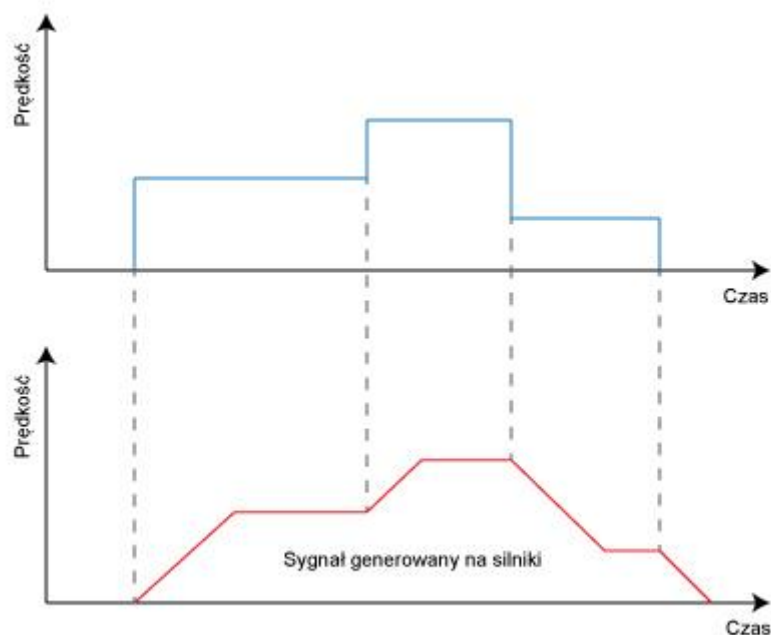
Tabela 1 Schemat pełnokrokowego sterowania silnikiem krokowym. Oznaczenia 1a, 1b oznaczają wyprowadzenia z pierwszej cewki, natomiast oznaczenia 2a i 2b oznaczają wyjścia z drugiej cewki.

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	1
2	1	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1

Tabela 2 Schemat sterownia półkrokowego silnikiem krokowym. Oznaczenia 1a, 1b oznaczają wyprowadzenia z pierwszej cewki, natomiast oznaczenia 2a i 2b oznaczają wyjścia z drugiej cewki.

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

Ze względu na inercję wirnika w silniku, bezpośrednie podanie sygnału o dużej prędkości spowodowałoby zgubienie kroków lub nieuruchomienie się silników. Aby dokonać prawidłowego rozruchu mikrokontroler generuje kolejne kroki z prędkością liniowo narastającą aż do prędkości zadanej (Rysunek 6).



Rysunek 7 Schemat zadawania sygnału na tranzystory

Kinematyczne modele sterowania

Opracowany manipulator posiada dwa stopnie swobody (2DOF) realizowane przez dwa silniki elektryczne (złącza obrotowe). Silniki elektryczne połączone są za pośrednictwem profili aluminiowych. Pierwszy z silników osadzony jest na podstawie, na której znajdują się również sterowniki mocy oraz sterownik niskopoziomowy robota. Manipulator 2DOF posiada możliwość pracy jedynie w płaszczyźnie kartezjańskiej.

W robotyce dla każdego manipulatora można wyznaczyć notację Denavita – Hartenberga (D-H). Jest to matematyczny opis zmiennych złączowych i pozostałych parametrów manipulatora, niezbędny do wyznaczenia prostego, czy odwrotnego zagadnienia kinematycznego. Notacja D-H dla opracowanego manipulatora wygląda następująco:

Tabela 3 Notacja DH rozważanego manipulatora

Numer ogniwa i	Kąt skręcenia ogniwa α_i	Długość ogniwa a_i	Przesunięcie liniowe w złączu d_i	Kąt złącza θ_i
1	0	l_1	0	θ_1
2	0	l_2	0	θ_2

Na podstawie powyższej tabeli zawierającej notację D-H można wyznaczyć macierze jednorodne przekształceń 0T_1 oraz 1T_2 , a po ich wymnożeniu 0T_2 , z której bezpośrednio można odczytać położenie i orientację efektora wyrażoną w układzie współrzędnych związanym z podstawą manipulatora.

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_1 C_1 + l_2 C_{12} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_1 S_1 + l_2 S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Zatem współrzędne efektora wynoszą:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 C_1 + l_2 C_{12} \\ l_1 S_1 + l_2 S_{12} \\ 0 \end{bmatrix}$$

gdzie: $C_1 = \cos(\theta_1)$; $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$; $S_1 = \sin(\theta_1)$; $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$;

Rozwiązując układ równań:

$$x = l_1 C_1 + l_2 C_{12}$$

$$y = l_1 S_1 + l_2 S_{12}$$

otrzymuje się rozwiązanie odwrotnego zagadnienia kinematycznego:

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2 * l_1 * \sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

$$\theta_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 * l_1 * l_2}\right)$$

Ze względu na przebieg trajektorii często trzeba znaleźć zależność $d\mathbf{q}/dt$ w zależności od wektora prędkości narzędzia $d\mathbf{x}/dt$. Zależność ta opisana jest przez macierz Jacobiego, zwaną w robotyce jakobianem manipulatora ($\mathbf{J}(\mathbf{q})$).

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) * \frac{d\mathbf{q}}{dt} \quad ; \text{proste zagadnienie kinematyczne dla prędkości}$$

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1} * \frac{d\mathbf{x}}{dt} \quad ; \text{odwrotne zagadnienie kinematyczne dla prędkości (założenie: jakobian jest macierzą kwadratową nieosobliwą)}.$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_2 C_{12} \end{bmatrix}$$

$$\det(\mathbf{J}(\mathbf{q})) = l_1 l_2 S_2$$

Konfiguracje, przy których jakobian traci rząd, są nazywane konfiguracjami osobliwymi, a odpowiadające im punkty w przestrzeni złączowej lub w przestrzeni konfiguracji narzędzia są nazywane punktami osobliwymi. Jeżeli jakobian jest macierzą kwadratową, to zbiór punktów osobliwych otrzymuje się rozwiązując równanie $\det(\mathbf{J}(\mathbf{q})) = 0$.

$$l_1 l_2 S_2 = 0$$

Rozwiązaniem powyższego równania jest $\theta_2 = 0^\circ$ lub $\theta_2 = 180^\circ$

Przykładowe scenariusze pracy z robotem

Robot przeznaczony jest zarówno do zajęć audytoryjnych, jak i laboratoryjnych. Podczas zajęć audytoryjnych manipulator mógłby być w szczególności pomocny do tłumaczenia zagadnień kinematycznych, jak i dynamicznych.

Proste w obsłudze menu, jak również czytelny kod źródłowy pozwalają na planowanie ruchu efektora przy wykorzystaniu współrzędnych złączowych lub kartezyjskich. Możliwe jest również stworzenie modeli kinematycznych sterowania robota w każdym innym układzie kartezyjskim np. związanym z efekтором robota.

Modelowe zajęcia audytoryjne mogłyby wyglądać w następujący sposób:

Studenci poznają teorię sterowania robotami na wykładzie. Na zajęciach rachunkowych i laboratoryjnych mogliby zweryfikować wiedzę teoretyczną z praktyką. I tak, np. po rozwiązaniu typowych zadań z kinematyki prostej i odwrotnej, uczniowie sprawdzaliby i porównywali swoje wyniki z rzeczywistym zachowaniem robota. Użycie realnego robota urozmaiciłoby lekcję i pozwoliło dogłębniej zrozumieć istotę problemów związanych ze sterowaniem robotów.

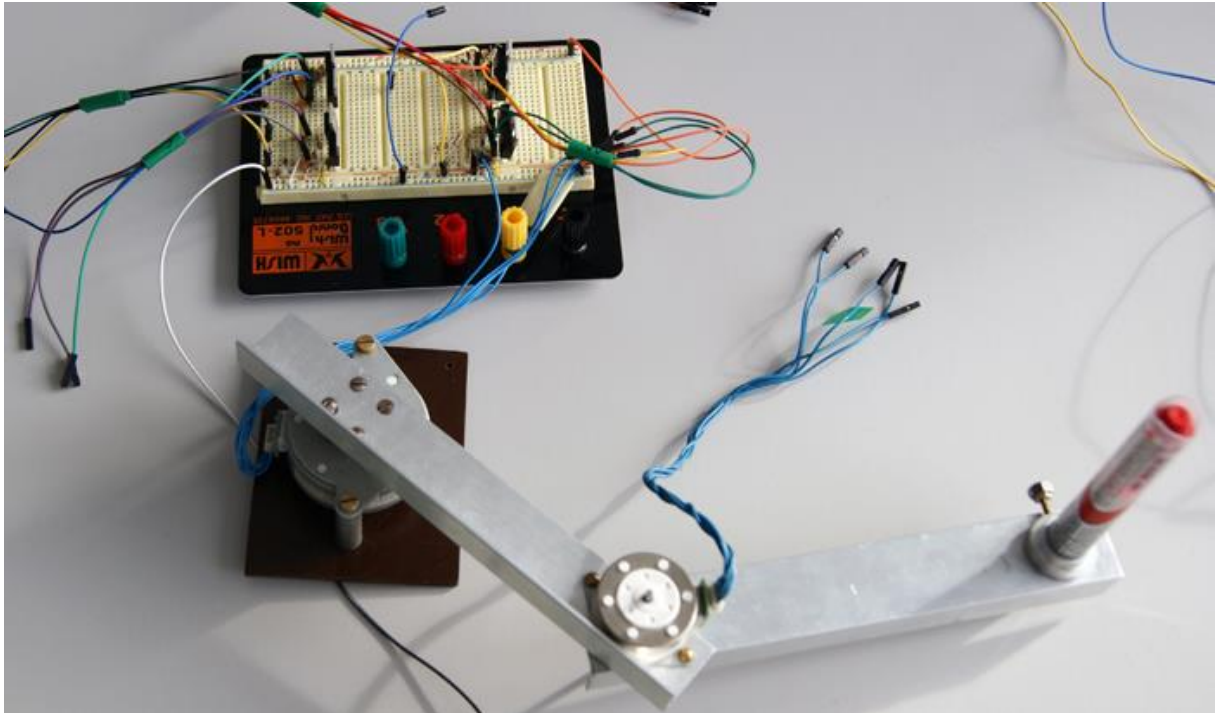
Przykładowe tematy zajęć laboratoryjnych i audytoryjnych przy wykorzystaniu robota:

- Przypomnienie wiadomości nt. wektorów, zapoznanie się z macierzami rotacji i ich właściwościami, transformacje jednorodne (analiza zmian wartości poszczególnych elementów macierzy transformacji podczas obserwacji pracy jednego i obu silników)
- Proste zagadnienie kinematyczne (zadania obliczeniowe, zapoznanie się i porównanie zagadnień: przestrzeni osiągalności i pełnej zręczności manipulatora, analiza zarysowanego toru ruchu efektorą)
- Konfiguracje osobliwe (przypomnienie wiadomości nt. macierzy Jacobiego, obliczanie możliwych konfiguracji osobliwych i analiza zachowania manipulatora)
- Odwrotne zagadnienie kinematyczne (zadania obliczeniowe, ruch po określonej trajektorii, analiza zmiennych przegubowych)
- Proste i odwrotne zagadnienie kinematyczne dla prędkości (zadania obliczeniowe, sprawdzenie zachowania manipulatora dla różnych prędkości – badanie dokładności robota w funkcji prędkości)
- Konfiguracje dolne i górne robota
- Planowanie trajektorii robota
- Sprawdzanie różnego typu regulatorów
- Dynamika (zadania obliczeniowe, analiza danych z manipulatora w oparciu o oprogramowanie Matlab/Simulink)

Podczas zajęć laboratoryjnych studenci mogliby tworzyć również oprogramowanie na mikrokontroler, odpowiadające za sterowanie silnikami krokowymi i komunikację z oprogramowaniem wysokopoziomowym. Można również modyfikować sterownik wysokopoziomowy robota, który został napisany w języku C#. Ćwiczenia odbywałyby się w oparciu o materiały pomocnicze dostarczone wraz z robotem.

Wnioski

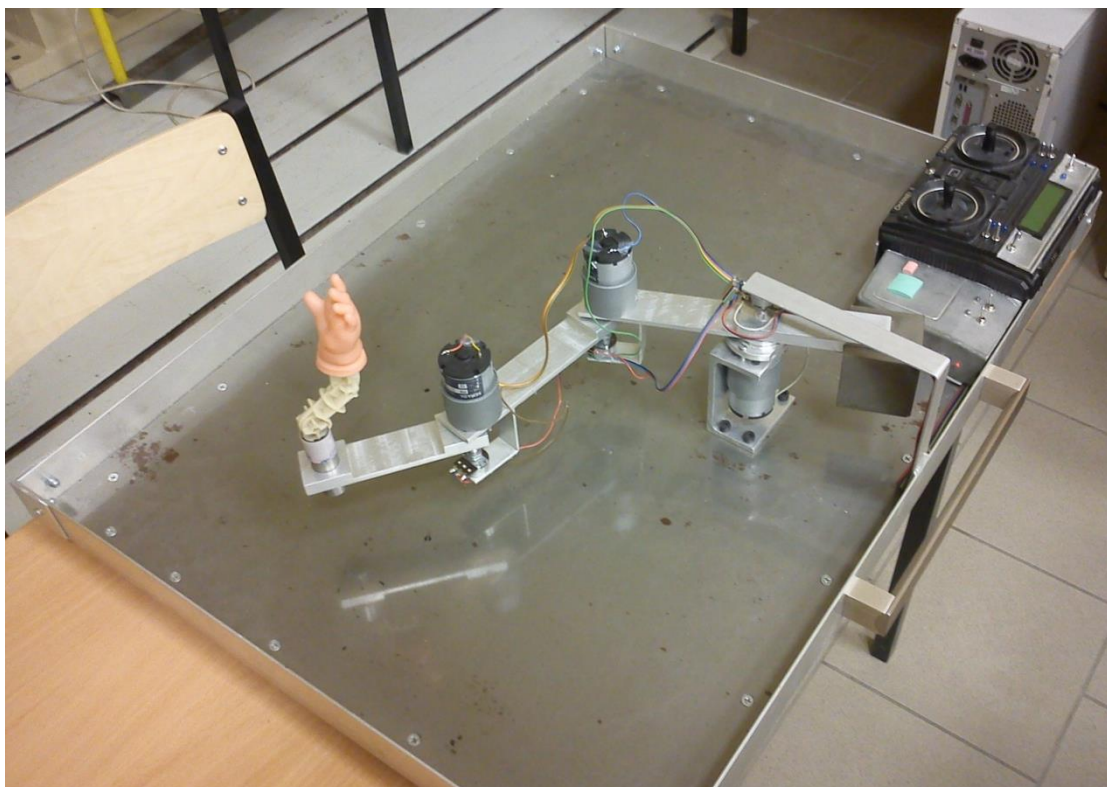
Po wykonaniu robota przeprowadzono podstawowe eksperymenty, które pozwoliły na ocenę zastosowanych w projekcie rozwiązań.



Rysunek 8 Pierwszy prototyp robota *Planar 2DoF*

Dużym problemem okazało się zastosowanie silników krokowych bezprzekładniowych. Silniki te wybrano z tego powodu, ponieważ umożliwiają sterowanie robotem w pętli otwartej, bez potrzeby stosowania drogich enkoderów. Brak przekładni umożliwia również testowanie zaawansowanych trybów sterowania podatnością manipulatora. To podejście miało jednak dwie zasadnicze wady. Pierwszą była niesamohamowność układu ogniwo-silnik, co wiązało się z tym, że w przypadku zaniku zasilania robot opadał praktycznie w sposób niekontrolowany do położenia o najniższej energii potencjalnej. Robot charakteryzował się również charakterystycznymi ruchami krokowymi, związanymi z przyciąganiem wału silnika przez kolejne obwody magnetyczne. Wady te zostaną zlikwidowane w przyszłych konstrukcjach robotów.

Wykonany robot był kolejnym prototypem zrealizowanym w ramach projektu opracowania optymalnej struktury manipulatora przeznaczonego do nauki robotyki. Jeden z pierwszych prototypów, wykonany wspólnie w ramach współpracy z Katedry Dynamiki Maszyn Politechniki Łódzkiej jest aktualnie używany w czasie prowadzonych tam zajęć dydaktycznych (Rysunek 9).



Rysunek 9 Pierwszy prototyp robota planarnego (3DoF) wykonanego w ramach współpracy z Katedrą Dynamiki Maszyn Politechniki Łódzkiej

Podsumowanie i przyszłe prace

W ramach niniejszej pracy został zbudowany robot o dwóch stopniach swobody przeznaczony do celów dydaktycznych. Konstrukcja manipulatora może w przyszłości być podstawą do zaprojektowania bardziej zaawansowanych robotów, charakteryzujących się lepszymi właściwościami sterowania.

Główny problem, który pojawił się w trakcie prac konstrukcyjnych wynikał z drobnych błędów natury mechanicznej oraz z tego, że były używane pierwsze - nieoptymalizowane sterowniki niskopoziomowe. Te problemy rzutowały następnie na cały projekt uniemożliwiając na przykład sprawne kontrolowanie manipulatora w obrębie zadanych punktów pracy. Błędy, które pojawiają się w strukturze robota na niższym poziomie (w opisywanym przypadku w konstrukcji mechanicznej i sterownikach silników) negatywnie rzutowały na wszystkie wyższe warstwy systemu uniemożliwiając wykonanie niektórych zadań.

Atutami zaprezentowanego manipulatora, które wyróżniają go spośród innych produktów są: łatwość instalacji obiektu na tablicy, dedykowany sterownik wysokiego poziomu pozwalający na łatwą obsługę, niski koszt produkcji oraz edukacyjne zastosowanie, związane z programem nauczania Podstaw Robotyki.

Autorzy mają nadzieję, iż na podstawie tego projektu deweloperzy podobnych maszyn będą mogli prawidłowo oszacować potrzeby ludzkie i finansowe potrzebne do budowy określonego robota. Należy jednak mieć świadomość tego, że w miarę zwiększania się stopni swobody robota, złożoność problemu rośnie w sposób szybszy niż liniowy.

W przyszłości prace nad budową innych manipulatorów będą kontynuowane. Planowane jest m.in. wykorzystanie oprogramowania do komunikacji głosowej, w celu sterowania robotem [5], jak równieżysterować manipulator przy pomocy biosygnatów [6]. Projekt pokazał, że możliwe jest wykonanie robotów przy małych zasobach finansowych. Autorzy referatu będą dążyć do rozwoju posiadanej technologii, a w dalszej przyszłości do jej komercjalizacji.

Podziękowania

Dziękujemy dr inż. Arturowi Dąbrowskiemu za konsultacje i wspólne prace nad pierwszą wersją robota planarnego (o 3 stopniach swobody), który jest obecnie wykorzystywany na zajęciach dydaktycznych w Katedrze Dynamiki Maszyn Politechniki Łódzkiej.

Bibliografia:

[1] http://www.imath-asia.com/assets/wp-content/uploads/2012/03/2DSFJ_PIS_031708.pdf

[2] <http://www.quanser.com/> - produkty robotyczne firmy Quanser

[3] <http://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&v=izUe-RZxFIQ&NR=1>

[4] Jeziński E., Gmerek A., Impedance Controllers for Electric-Driven Robots, JAMRIS vol. 7, No.4, pp. 13-20, 2013.

[5] Kamińska D., Gmerek A., The open-source speech recognition system for robots control, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 2012.

[6] Pakulski D., Gmerek A., The electrooculography control system, Pomiary Automatyka Robotyka (PAR), No. 12, pp. 160-163, 2012.