

Manipulator równoległy jako element systemu sterowania symulatora wybranych środków transportu

Janusz Hetmańczyk, Maciej Sajkowski, Tomasz Stenzel

1. Wstęp

Manipulator równoległy, oparty na kinematyce platformy Stewart-Gougha, jest szczególnym przypadkiem układu mechanicznego o zamkniętym łańcuchu kinematycznym. Tego rodzaju konstrukcja umożliwia realizację specjalistycznych aplikacji, na przykład w formie symulatorów lotu statków powietrznych lub ruchu pojazdów samochodowych. Przegląd konstrukcji i zastosowań manipulatorów równoległych można znaleźć między innymi w [7]. Celem publikacji jest zaprezentowanie opracowanej konstrukcji elektromechanicznego manipulatora równoległego jako głównego elementu systemu sterowania kompleksowego, sprzętowego symulatora przyspieszeń i przemieszczeń – rejestrowanych na pokładzie wybranego środka transportu – samochodu, samolotu lub statku.

Jedną z możliwości prowadzenia badań rozwojowych systemów stabilizacji i kompensacji ruchu jest wykorzystanie matematycznego modelu ruchu wybranego obiektu zaimplementowanego w programie komputerowym umożliwiającym wykonanie potrzebnych obliczeń i wizualizacji [1]. W końcowym etapie korzystne jest przeprowadzenie ilościowej i jakościowej analizy projektowanych rozwiązań na stanowisku laboratoryjnym w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy. Chociaż koszty wykonania przemysłowego symulatora dedykowanego do testów określonego urządzenia mogą znacznie przekroczyć koszt zakupu specjalistycznego oprogramowania i przeprowadzenia przy jego wykorzystaniu badań symulacyjnych służących do analizy fizycznych warunków pracy tego urządzenia, jednak zastosowanie uniwersalnego symulatora i zaadaptowanie go do określonych wymagań może okazać się właściwym rozwiązaniem kwestii weryfikacji opracowanego sprzętu. Opisany w artykule manipulator równoległy został zaprojektowany, aby pełnić rolę kompleksowego symulatora sprzętowego, który umożliwi pełną weryfikację przeprowadzonych badań symulacyjnych wybranego prototypowanego urządzenia. Złożoność układów, systemów i narzędzi wykorzystanych w budowie tego typu symulatora pozwala na adaptację tego rozwiązania do wymagań różnych systemów, takich jak opisany w dalszej części artykułu układ stabilizacji pozycji pacjenta czy też system stabilizacji głowy optoelektronicznej. W takim sensie opracowany i wykonany manipulator równoległy jest nazywany stanowiskiem badawczym.

Streszczenie: Artykuł zawiera opis systemu sterowania stanowiska badawczego wyposażonego w manipulator równoległy. Do napędu tego manipulatora wykorzystano bezszczotkowe silniki prądu stałego (PM BLDC). System sterowania manipulatora równoległego oparto na oprogramowaniu Matlab/Simulink współpracującym z platformą czasu rzeczywistego xPC Target, stanowiącą rozszerzenie pakietu Matlab/Simulink. Komunikację między jednostką sterującą a silnikami napędzającymi śruby kulowe siłowników zapewnia magistrała CAN. W artykule przedstawiono również opis stanowiska oraz wykorzystanie manipulatora równoległego w pracach naukowo-badawczych, w których pełni on rolę symulatora przyspieszeń generowanych przez wybrane środki transportu.

Słowa kluczowe: manipulator równoległy, napęd PM BLDC, system sterowania czasu rzeczywistego, symulator warunków pracy.

THE PARALLEL MANIPULATOR AS AN ELEMENT OF A CONTROL SYSTEM OF A SIMULATOR OF SELECTED MEANS OF TRANSPORT

Abstract: The paper contains a description of a control system of the laboratory stand equipped with a parallel manipulator. The Brushless DC motors (PM BLDC) were utilized to drive the manipulator. The parallel manipulator control system software is based on Matlab/Simulink environment cooperating with the xPC target real-time platform, which is the extension of the Matlab/Simulink package. Communication between the control unit and the motors driving the ball screws of the actuators is provided by a CAN bus. The article presents a description of the laboratory stand and explains the possibilities of using this equipment in further scientific research concerning simulators of selected means of transport. The parallel manipulator is used to project accelerations acting in selected means of transport on persons or on a special surveillance equipment.

Keywords: parallel manipulator, the PM BLDC drive, real-time control system, simulation of vehicle working conditions.

2. Manipulator równoległy

Manipulator równoległy składa się z nieruchomej podstawy (dolnej) i ruchomej platformy (górnej), połączonych ze sobą za pomocą sześciu niezależnych siłowników liniowych o minimalnej długości każdego $L_{min} = 890$ mm i translacji $\Delta l = 335$ mm. Nieruchoma podstawa dolna oraz ruchoma platforma górna zostały wykonane na planie sześciokąta (rys. 1). Długości krótszych boków sześciokąta wynoszą $d = 220$ mm, a dłuższych $D = 871$ mm. Każdy z sześciu siłowników (ramion) składa się z dwóch części połączonych za pomocą śruby i nakrętki kulowej, umożliwiającej zamianę ruchu obrotowego silnika na posuw siłownika. Śruba ramienia manipulatora napędzana jest bezszczotkowym silnikiem prądu stałego (PM BLDC). Dolna i górna część ramienia połączona jest odpowiednio z nieruchomą podstawą oraz ruchomą platformą górną za pomocą przegubów. Zmianę położenia platformy uzyskuje się dzięki odpowiedniej zmianie długości każdego z ramion.

W układzie napędowym zastosowano silniki PM BLDC o mocy 450 W, napięciu zasilania 40 V, wyposażone w zintegrowany układ sterowania i regulacji. Układ ten umożliwia zadawanie podstawowych parametrów pracy, takich jak: prąd maksymalny ciągły i chwilowy, prędkość obrotowa, kierunek i liczba obrotów. Możliwa jest też parametryzacja działania napędu na bardziej zaawansowanym poziomie. Komunikacja z nadrzędnym układem sterowania całego manipulatora odbywa się za pośrednictwem magistrali CAN [2].

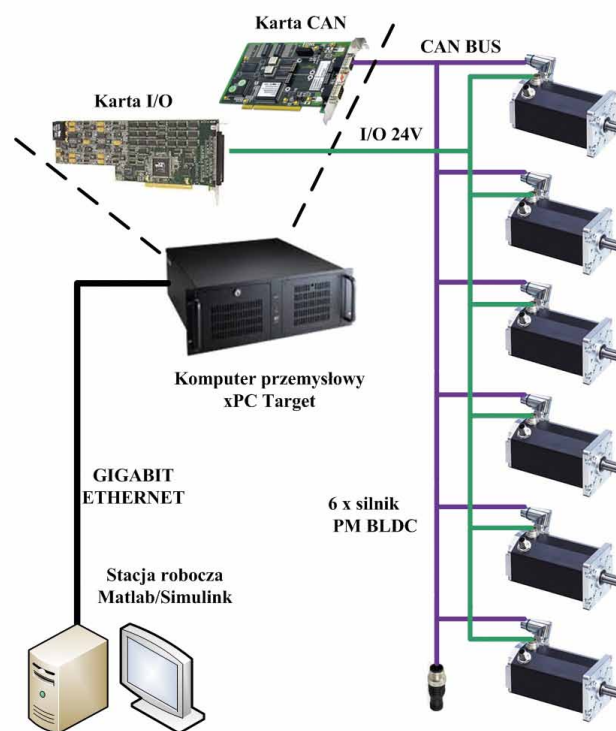
3. System sterowania manipulatorem

Ogólną architekturę systemu sterowania manipulatora równoległego przedstawiono na rys. 2.

Głównymi elementami architektury sterowania są komputer przemysłowy realizujący funkcję sterowania manipulatorem równoległym w czasie rzeczywistym oraz stacja robocza przeznaczona do modelowania struktury systemu sterowania w programie Matlab/Simulink. Stacja ta wykorzystywana jest również do wizualizacji oraz rejestracji danych pomiarowych w trakcie działania systemu. Komputery wchodzące w skład systemu sterowania połączono łączem sieciowym w standardzie



Rys. 1. Manipulator równoległy



Rys. 2. Architektura systemu sterowania stanowiska badawczego

Gigabit Ethernet o przepustowości 1 Gbit/sekundę. W komputerze przemysłowym zainstalowano karty rozszerzeń w formie interfejsu magistrali CAN oraz karty wejść/wyjść cyfrowych i wyjść analogowych (karta I/O). Magistralą CAN połączono komputer sterujący z sześcioma silnikami PM BLDC.

Sterowanie manipulatorem zaimplementowano w oprogramowaniu Matlab/Simulink pracującym w czasie rzeczywistym na platformie programowej xPC Target, będącej dedykowanym systemem operacyjnym, umożliwiającym sterowanie i realizację pomiarów w oparciu o sprzęt komputerowy klasy PC [8]. W przypadku tej metody najważniejszym elementem procesu projektowania oprogramowania sterującego silnikiem było opracowanie w środowisku Matlab/Simulink szkieletu oprogramowania obsługującego wysłanie i odbiór sekwencji ramek protokołu CANopen.

Zastosowane rozwiązanie należy do kategorii metod szybkiego prototypowania systemów i układów sterowania określanej jako *software in the loop*. W takim przypadku oprogramowanie sterownika jest testowane w rzeczywistym systemie. Kod programu jest uzyskiwany w sposób automatyczny na podstawie formalnego opisu bazującego na jednym z języków modelowania. W projekcie główną część sterownika zaprojektowano w formie opisu maszyny stanów w języku UML. Kodowanie sterownika zrealizowano przy wykorzystaniu narzędzia Stateflow, stanowiącego rozszerzenie oprogramowania Matlab/Simulink.

Na rys. 3 zaprezentowano fragment opracowanej w środowisku Matlab/Simulink struktury układu sterowania. Kompletny układ sterowania składa się z sześciu bloków analogicznych do przedstawionego na rys. 3. Każdy z bloków realizuje sterowanie pojedynczym silnikiem PM BLDC. Głównym parametrem wejściowym dla bloku sterowania jest wartość docelowej pozycji napędu, wyrażona w formie docelowej liczby impulsów enkodera absolutnego, w który wyposażony jest zastosowany silnik. Blok sterowania silnika otrzymuje również informacje o stanie pracy i błędach pozostałych napędów, dzięki czemu stanowisko z manipulatorem równoległym może bezpiecznie pracować bez zagrożenia dla obsługi oraz mechanicznej konstrukcji samego urządzenia.

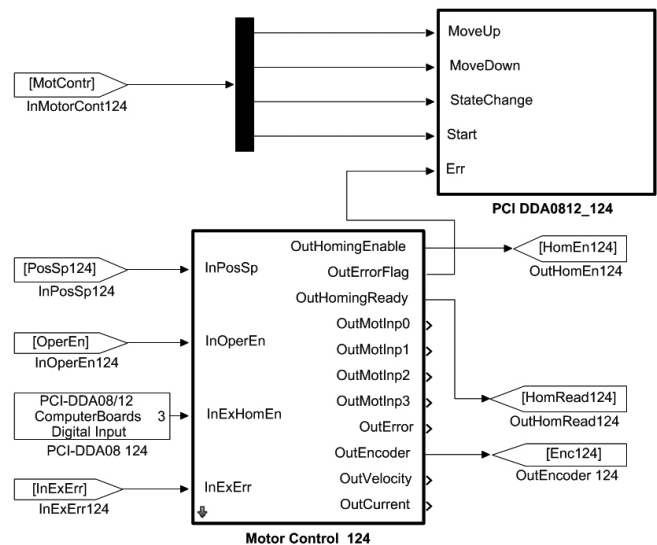
Wartości zadanego przemieszczenia Δl dla poszczególnych siłowników są wypracowywane na podstawie odwrotnego zadania kinematyki, pozwalającego na wyznaczenie długości l_n każdego z sześciu członów zamkniętego łańcucha kinematycznego na podstawie docelowej wartości wektorów przemieszczenia w trzech stopniach swobody oraz na podstawie wartości kątów obrotu w pozostałych trzech stopniach swobody. Wyznaczone w ten sposób translacje przekazywane są jako parametr do opisywanego układu sterowania każdego z siłowników liniowych [6]. Na rys. 4 a zaprezentowano widok struktury kinematycznej opracowanego manipulatora równoległego dla maksymalnej translacji siłowników, a na rys. 4 b przedstawiono przykładową pozycję tego manipulatora, stanowiącą efekt zmian długości siłowników.

Wewnętrzna struktura układu sterowania pojedynczym silnikiem składa się z widocznego z lewej strony modułu obsługi odbioru ramek interfejsu CAN (rys. 5). Dane pochodzące z tego elementu, łącznie z uprzednio wspomnianymi parametrami sterowania pojedynczym silnikiem, są przekazywane do maszyny stanów skończonych, w której zaimplementowano obsługę wybranych sekwencji poleceń protokołu CANopen. Na wyjściu maszyny stanów generowane są dane trafiające do widocznego w prawej części rysunku bloku obsługi transmisji interfejsu CAN.

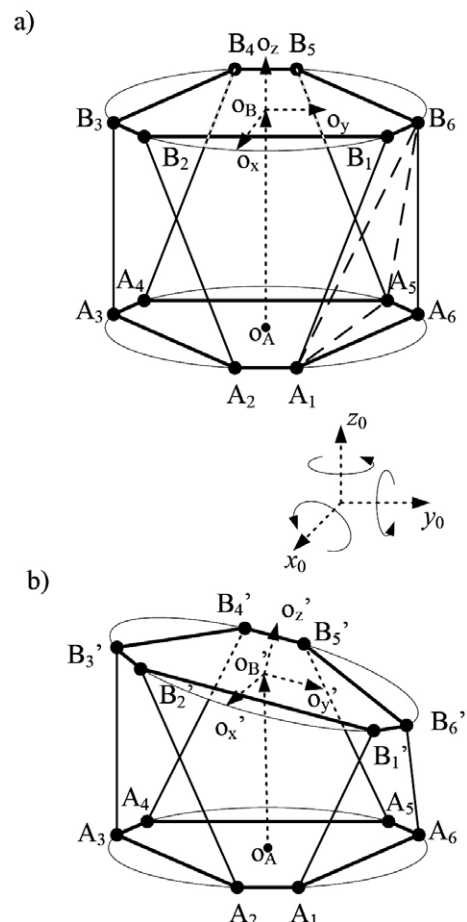
4. Możliwości implementacji manipulatora równoległego

Opisywany manipulator równoległy jest doskonałym obiektem badań dotyczących istotnych zagadnień z zakresu modelowania, sterowania oraz konstrukcji urządzeń tego rodzaju. Głównym kierunkiem prac jest opracowanie zaawansowanych algorytmów sterowania wymuszających planowany ruch platformy mobilnej. W przyjętej strukturze układu sterowania projektowanie jego działania następuje z poziomu środowiska Matlab/Simulink. W opracowanych algorytmach sterowania wykorzystywane są układy z regulacją położenia. Projektując oprogramowanie sterujące, kierowano się dążeniem do minimalizacji pętli czasowej sterowania z uwzględnieniem wymagań i ograniczeń implementacyjnych, np. kątów krytycznych ugięcia przegubów.

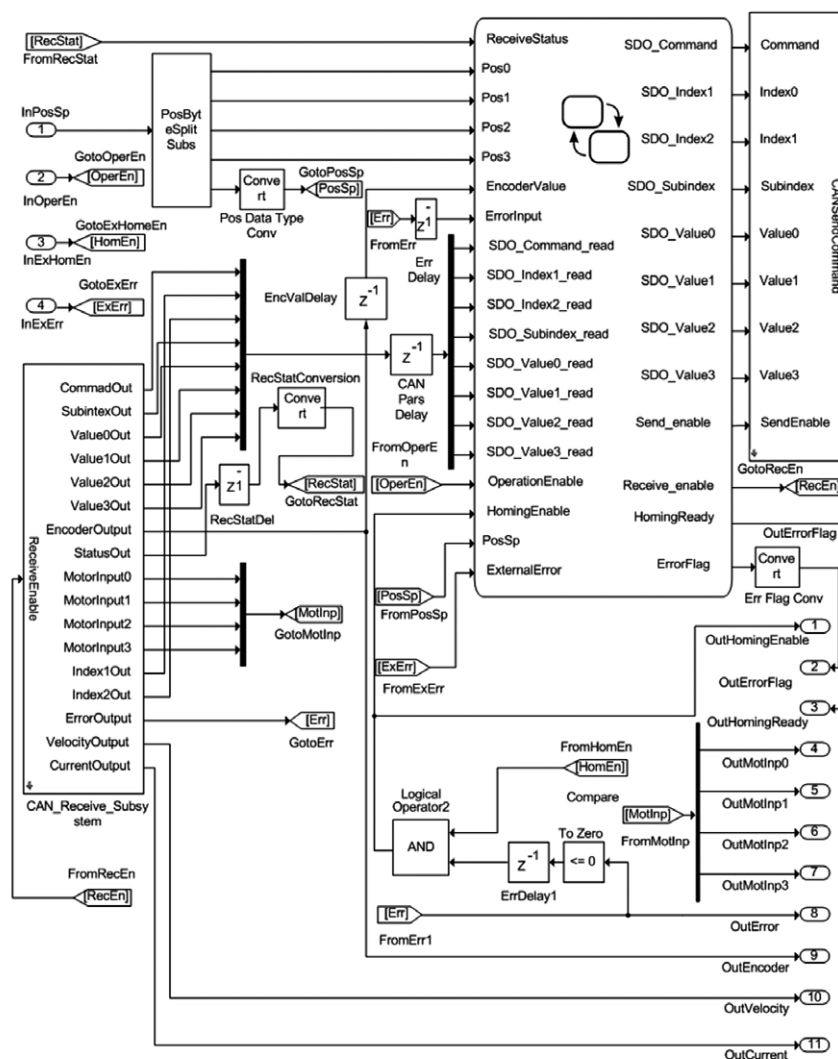
Manipulator równoległy jest obiektem dotychczasowych, bieżących i planowanych prac badawczych [4, 6]. Sprzęt ten jest też wykorzystywany jako stanowisko laboratoryjno-badawcze



Rys. 3. Blok sterowania pojedynczym silnikiem PM BLDC zrealizowany w formie modelu w programie Matlab/Simulink



Rys. 4. Struktura kinematyczna opracowanego manipulatora równoległego: a) w pozycji maksymalnej translacji każdego z siłowników liniowych; b) w pozycji odpowiadającej przykładowym wartościom translacji wybranych siłowników liniowych



Rys. 5. Wewnętrzna struktura bloku sterowania pojedynczym silnikiem PM BLDC z obsługą nadawania i odbioru ramek interfejsu CAN oraz automatem stanów implementującym protokół CANopen

do badania innych układów. W ramach projektu „Opracowanie, wykonanie i badania Zintegrowanego Systemu Kierowania Akcją Ratowniczą z wykorzystaniem innowacyjnych technologii Rapid Manufacturing” (PBS1/A6/12/2012) opisywane stanowisko było wykorzystane do analizy możliwości realizacji Modułu Stabilizacji i Zadawania Pozycji (MSZP) głowicy obserwacyjnej (rys. 6). Celem badań było określenie sposobu realizacji układu służącego do kompensacji wychyleń optoelektronicznej głowicy obserwacyjnej, spowodowanych kołysaniem statku ratowniczego w warunkach symulujących falowanie morza. MSZP ma zapewniać stabilizację neutralnego (poziomego) ustawienia zmechanizowanej platformy obrotowej głowicy obserwacyjnej względem linii horyzontu. Planuje się również wykorzystanie stanowiska do symulacji ruchu wybranego rodzaju statków powietrznych.

Ponadto realizowane są badania nad wykorzystaniem stanowiska manipulatora do implementacji „Urządzenia do stabilizacji pozycji pacjenta (USPP)” według autorskiego zastrzeżenia



Rys. 6. Moduł MSZP na stanowisku symulującym warunki pracy na morzu

patentowego. Urządzenie (USPP) powinno zapewnić stabilizację pozycji pacjenta transportowanego pojazdem ratunkowym, chroniąc go przed niekorzystnym wpływem gwałtownych przeciążeń, drgań, a w konsekwencji przemieszczeń i zmiany pozycji ułożenia ciała podczas transportu (rys. 7). Budowę oraz zasadę działania USPP przedstawiono w artykule [5]. Źródłem drgań w czasie transportu (rys. 7) jest pojazd ratunkowy, zaś w badaniach laboratoryjnych manipulator równoległy jest wykorzystywany jako symulator drgań takiego pojazdu.

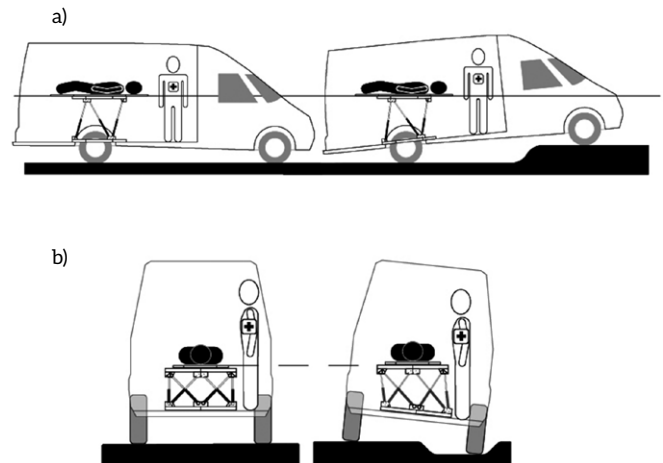
W celu sprawdzenia, czy manipulator równoległy może pełnić rolę symulatora drgań środków transportu, przeprowadzono pomiary wybranych wartości przyspieszeń $a(t)$ w kabine pojazdu samochodowego i porównano z wynikami uzyskanymi na stanowisku badawczym (rys. 1). Badania ograniczono do typowych manewrów drogowych, jak pokonywanie progu spowalniającego, omijanie przeszkody (rys. 8).

Na podstawie normy ISO 2631-1:1997 [9], określającej poziom dyskomfortu transportowanego człowieka na podstawie wibracji całego ciała (*Whole Body Vibrations* – WBV), i analizy literaturowej [3, 6] przyjęto, że minimalny poziom WBV w pojazdach transportowych wynosi $0,47 \text{ m/s}^2$. Poziom ten wymaga już ostrożności w odniesieniu do potencjalnych zagrożeń dla zdrowia człowieka.

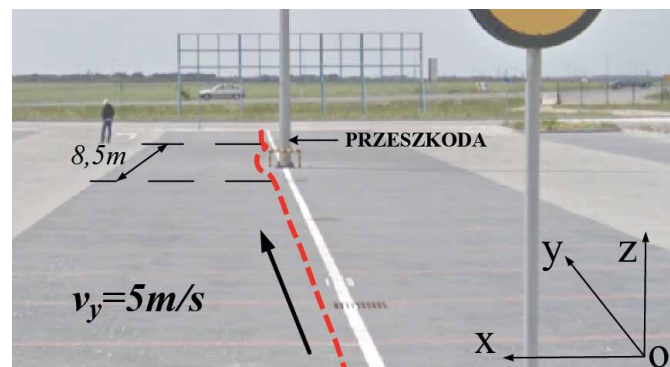
Do pomiaru przyspieszeń wykorzystano trójosiowy XYZ czujnik akcelerometryczny typu BMA250 firmy Bosch. Położenie czujnika jest traktowane jako początek układu współrzędnych O_{XYZ} . Na rys. 9 przedstawiono rozkład przyspieszeń $|a_x|$ uzyskany przy pomocy szybkiej transformaty Fouriera FFT. Zarejestrowane składowe amplitudy przyspieszeń $|a_x|$ oddziałują na kierowcę samochodu w poprzecznej osi X w czasie omijania przeszkody na odcinku $8,5 \text{ m}$ z prędkością $v_y = 5 \text{ m/s}$.

Zgodnie z zaleceniem normy ISO 2631 wyodrębniono przedział częstotliwości $f_d = 0,2 \text{ Hz}$ do $f_g = 2,7 \text{ Hz}$ drgań kabiny samochodu przekraczających poziom $0,47 \text{ m/s}^2$ WBV (rys. 9). Dla wyznaczonego przedziału można zauważyć trzy dominujące amplitudy przyspieszeń działających wzdłuż osi X , w szczególności $|a_{x1}|(f_1 = 0,6 \text{ Hz}) = 2,81 \text{ m/s}^2$, $|a_{x2}|(f_2 = 1,5 \text{ Hz}) = 1,53 \text{ m/s}^2$ i $|a_{x3}|(f_3 = 2 \text{ Hz}) = 1,43 \text{ m/s}^2$. W dalszej kolejności, na podstawie zarejestrowanego przyspieszenia $a_x(t)$ (rys. 9), wyznaczono metodą całkowania numerycznego przebiegi czasowe prędkości chwilowej $v_x(t)$ oraz przemieszczenia $s_x(t)$ całej kabiny samochodu w czasie t omijania przeszkody. Rysunek 10 przedstawia kolejne etapy omijania przeszkody w odniesieniu do przebiegów czasowych przyspieszenia a_x , prędkości v_x i drogi s_x . Dla czasu trwania manewru $\Delta t = 1,7 \text{ s}$ maksymalne chwilowe przyspieszenie poprzeczne $a_x(t)$, powstające w trakcie manewru omijania przeszkody, zmienia się w zakresie $(4,3 \div -4,23) \text{ m/s}^2$. Chwilowe wartości liniowych prędkości $v_x(t)$ wzdłuż osi X oscylują w zakresie $(-0,41 \div 0,38) \text{ m/s}$, a przemieszczenie poprzeczne $s_x(t)$ zmienia się w zakresie $(-0,25 \div 0,25) \text{ m}$. Następnie, na stanowisku badawczym z wykorzystaniem manipulatora równoległego oraz tego samego układu pomiaru przyspieszenia odwzorowano ten sam manewr omijania przeszkody (rys. 11).

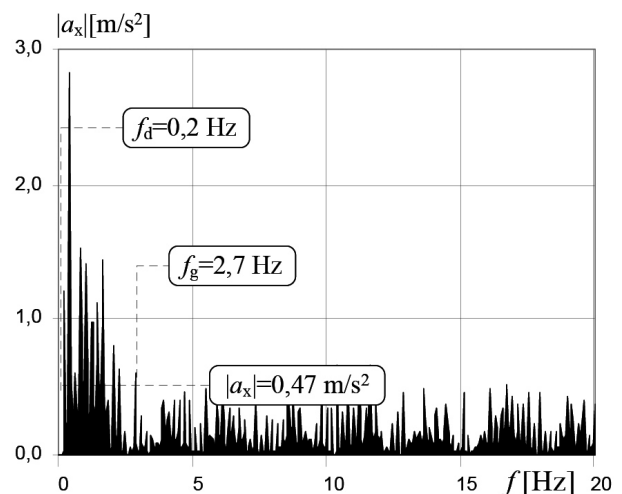
Z przeprowadzonych pomiarów dla skrajnych pozycji translacji platformy ruchomej wynika, że zakres maksymalnych wartości poprzecznych poziomych przyspieszeń $a_x(t)$ platformy



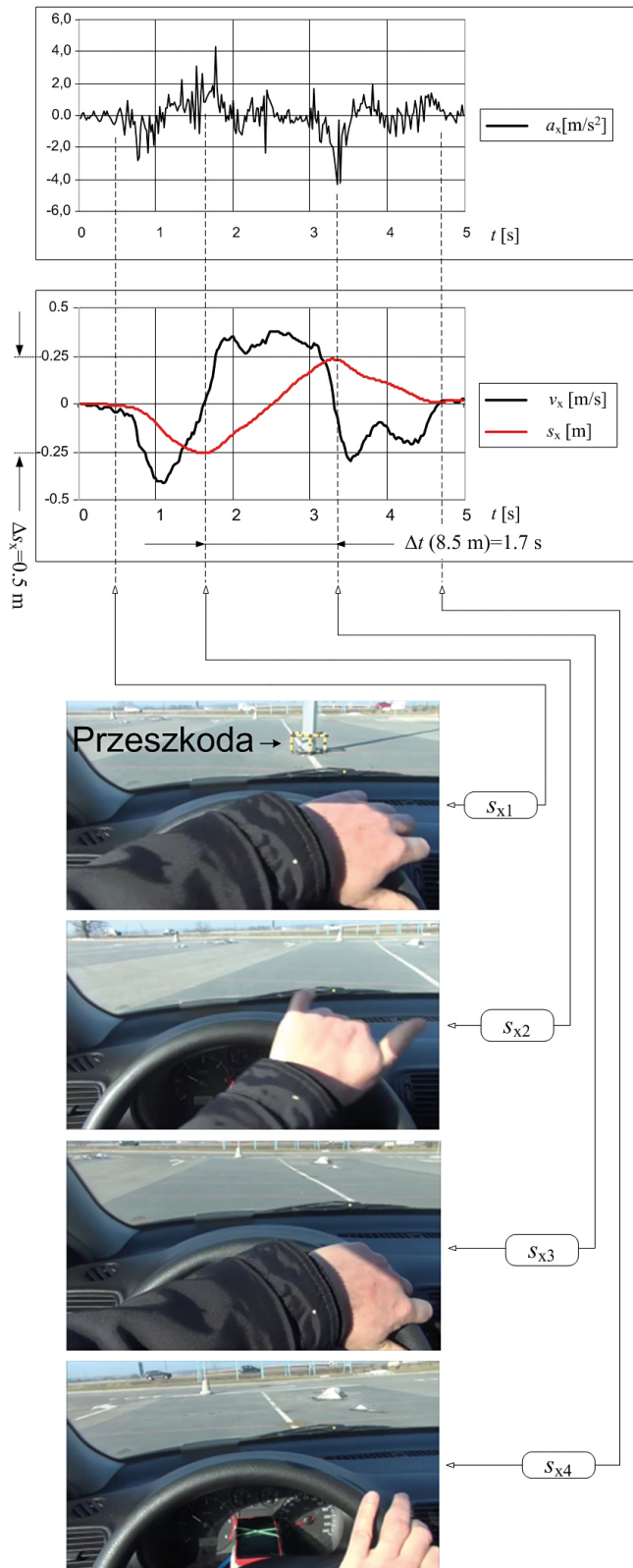
Rys. 7. Sposób stabilizacji pozycji pacjenta [Nr Patentu 214937]: a) widok z boku – pokonywanie poprzecznej nierówności drogi; b) widok z tyłu – pokonywanie wzdłużnej przeszkody



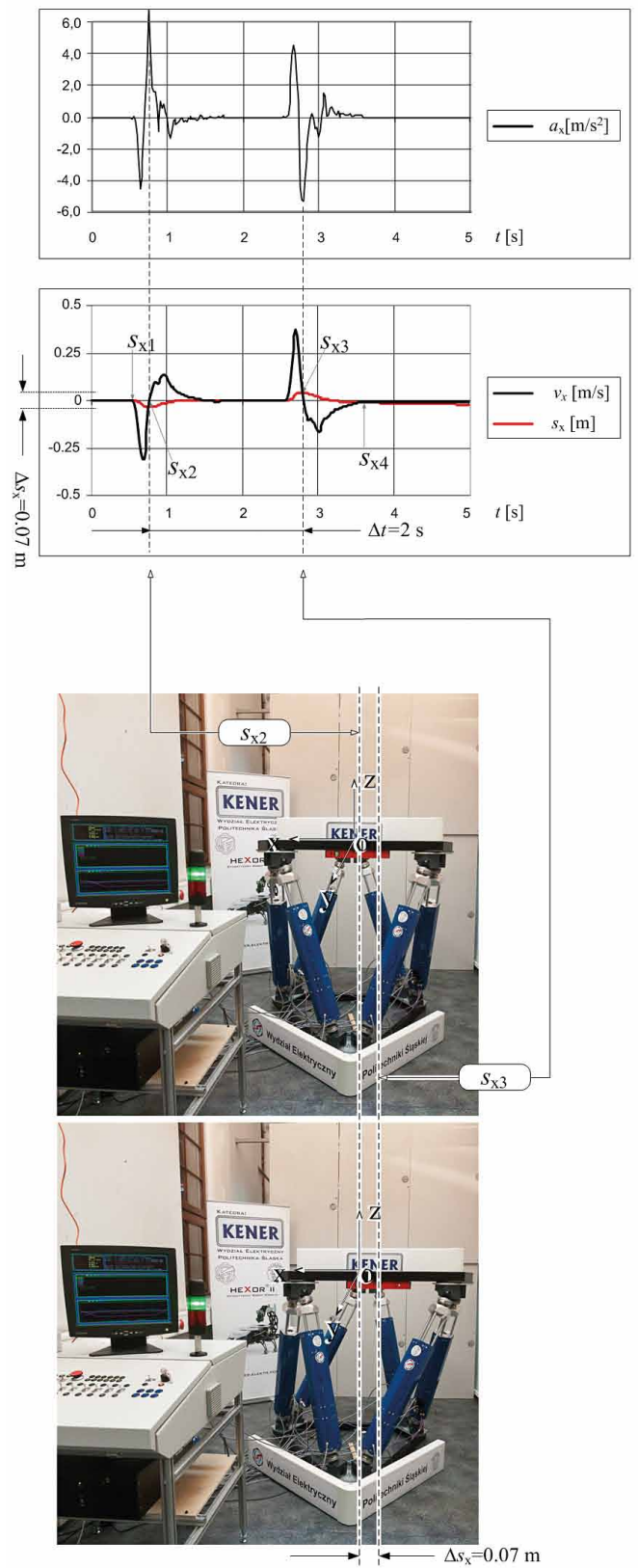
Rys. 8. Test omijania przeszkody na odcinku $8,5 \text{ m}$ z prędkością 5 m/s



Rys. 9. Rozkład FFT amplitud $|a_x|$ przyspieszeń działających na kierowcę samochodu w poprzecznej osi X w czasie omijania przeszkody na odcinku $8,5 \text{ m}$ z prędkością $v_y = 5 \text{ m/s}$



Rys. 10. Przebiegi chwilowych wartości prędkości poprzecznej samochodu $v_x(t)$, przemieszczenia $s_x(t)$, przyspieszenia $a_x(t)$, oddziałujące na kierowcę pojazdu w pionowej osi X, w trakcie omijania przeszkody



Rys. 11. Przebiegi chwilowych wartości prędkości $v_z(t)$ manipulatora przemieszczenie $s_z(t)$ oraz przyspieszenia $a_z(t)$, otrzymane na stanowisku laboratoryjnym

manipulatora oscyluje w zakresie $(-5\div 7)$ m/s². Wyznaczone na podstawie zmierzonego przebiegu $a_x(t)$ chwilowe wartości liniowych prędkości $v_x(t)$ wzdłuż osi X oscylują w zakresie $(-0,3\div 0,37)$ m/s, a przemieszczenia $s_x(t)$ poziome $(-0,035\div 0,041)$ m.

Przedstawione wyniki (rys. 11) są zbliżone z pomiarami drogowymi (rys. 10) i zostały osiągnięte w iteracyjnych cyklach walidacji badań symulacyjnych komputerowego modelu i testów laboratoryjnych.


5. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiony w artykule manipulator równoległy wraz z całym systemem sterowania i układami pomiarowymi jest stanowiskiem badawczym, które może być wykorzystane jako symulator różnych warunków pracy, np. drgań występujących w pojazdach. Opisane stanowisko badawcze manipulatora równoległego zostało wytworzone w ramach projektu finansowanego przez NCBiR nr 5142/B/T02/2011/40.

Sterowanie stanowiskiem opracowano w oparciu o oprogramowanie Matlab/Simulink pracujące w czasie rzeczywistym na platformie xPC Target. Tworzenie układów sterowania z poziomu Matlab/Simulink jest dużym ułatwieniem oraz pozwala na wielokrotne modyfikowanie metody sterowania. Złożona architektura układów wejść/wyjść pozwala na realizację sterowania pojedynczego napędu, a także umożliwia sterowanie kilkoma napędami jednocześnie. Szybkość komunikacji układu sterowania z pozostałymi podzespołami zapewnia magistrała CAN. Wykorzystanie wysokiej klasy karty sterującej w połączeniu z opracowanym oprogramowaniem umożliwia rejestrację najważniejszych wielkości opisujących działanie opracowanego napędu.

Literatura

- [1] AQUINO CAMPOS L.C., MENEGALDO L.L.: *Design of a simulator for eye and hand tracking tasks under horizontal whole body vibration*. 2013 ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference: Biosignals and Robotics for Better and Safer Living (BRC), Rio de Janeiro, 2013, s. 1–5.
- [2] AUGUSTYNEK P.: *CAN w napędach – cz. IV. Silniki Dunkermotoren z łącznością CAN*. „Napędy i Sterowanie” 6/2007.
- [3] CHEN J.C., CHANG W.R., SHIH T.S., CHEN C.J., CHANG W.P., DENNERLEIN J.T., RYAN L.M., CHRISTIANI D.C.: *Predictors of whole-body vibration levels among urban taxi drivers*. „Ergonomics” 11/2003.
- [4] HETMAŃCZYK J., SAJKOWSKI M., STENZEL T.: *Manipulator równoległy*. XV Sympozjum Energoelektronika w Nauce i Dydaktyce, ENiD 2016, Gliwice – Tarnowskie Góry 2016, s. 167–172.
- [5] HETMAŃCZYK J., SAJKOWSKI M., STENZEL T.: *Stanowisko laboratoryjne symulatora warunków pracy urządzenia do stabilizacji pozycji pacjenta*. „Zeszyty problemowe – Maszyny elektryczne”, 1/2015.
- [6] HETMAŃCZYK J., SAJKOWSKI M., STENZEL T.: *System sterowania manipulatorem równoległym przeznaczony do symulacji wybranych środków transportu*. „Zeszyty problemowe – Maszyny elektryczne” 1/2016.
- [7] HETMAŃCZYK J., STENZEL T., GRZESIK B.: *Selected aspects of design and modeling of linear actuator based on PM BLDC motor*. „Przegląd Elektrotechniczny” 6/2015.
- [8] <http://www.mathworks.com/help/index.html>.
- [9] Norma ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-part 1: general requirement. International Organization for Standardization 1997.

 dr inż. Janusz Hetmańczyk,
dr inż. Maciej Sajkowski,
dr inż. Tomasz Stenzel,
Politechnika Śląska;
Katedra Energoelektroniki,
Napędu Elektrycznego i Robotyki
e-mail: Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl
e-mail: Maciej.Sajkowski@polsl.pl
e-mail: Tomasz.Stenzel@polsl.pl