

Bartosz MINOROWICZ
Amadeusz NOWAK
Frederik STEFAŃSKI

WPŁYW TECHNOLOGII HAPTYCZNEJ NA JAKOŚĆ STEROWANIA W URZĄDZENIACH MECHATRONICZNYCH

STRESZCZENIE Autorzy przedstawili w artykule konstrukcje dwóch urządzeń mechatronicznych: manipulatora oraz pojazdu inspekcyjnego. Do sterowania zastosowano dżojstik z dwoma stopniami swobody. Całość wykonano, używając do budowy posiadanych zestawów Lego Technic oraz Mindstorms NXT 2.0. Sterowanie opracowane zostało przy użyciu środowiska symulacyjnego Matlab Simulink z dodatkowymi bibliotekami obsługującymi mikrokontroler, czujniki i serwomotory z zestawu Lego Mindstorms. Celem badań było sprawdzenie, jak siłowe sprzężenie zwrotne, odczuwalne przez operatora poprzez dżojstik, wpłynie na jakość sterowania. Scenariusze badań zakładały sterowanie manipulatorem znajdującym się w odległości 5 m od operatora. W drugim przypadku operator sterował pojazdem, patrząc jedynie na obraz przesyłany z zamontowanej na nim kamery na ekran laptopa. Dokonano porównania wartości uzyskanych dla wyłączanego oraz aktywnego sprzężenia, a także zaprezentowano otrzymane wyniki.

Słowa kluczowe: dżojstik, siłowe sprzężenie zwrotne, Matlab Simulink, Lego Mindstorms NXT 2.0, manipulator, pojazd inspekcyjny

mgr inż. Bartosz MINOROWICZ, mgr inż. Amadeusz NOWAK
mgr inż. Frederik STEFAŃSKI

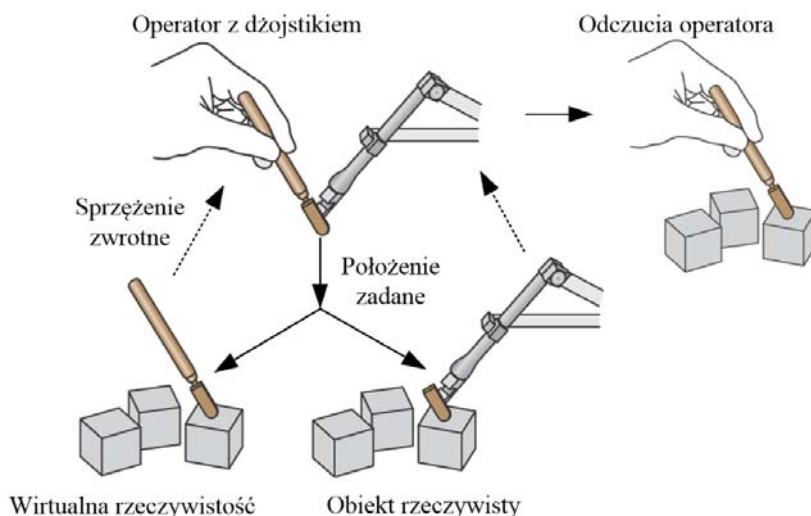
e-mail: bartosz.minorowicz@doctorate.put.poznan.pl
amadeusz.nowak@doctorate.put.poznan.pl
frederik.stefanski@doctorate.put.poznan.pl

Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 263, 2013

1. WSTĘP

Technologia haptyczna zdobywa coraz większe uznanie wśród użytkowników na całym świecie. Po etapie intensywnych badań w ośrodkach naukowych nastąpiła era wdrożeń przemysłowych. Aktualnie na wielką skalę urządzenia te stosowane są w medycynie i weterynarii do kształcenia przyszłych absolwentów tych kierunków oraz do odwzorowania doznań pochodzących z wirtualnej rzeczywistości. Idea działania pokazana została na rysunku 1. Ciekawym obszarem zastosowań są dźwostki z hamulcami magnetoreologicznymi, które zastosować można do operowania ciężkim sprzętem z napędem elektrohydraulicznym, np. ramieniem koparki. Niestety, konstrukcje te są skomplikowane, realizowane w zamkniętym układzie regulacji i wykorzystują materiały inteligentne, co skutkuje wysoką ceną. Na zakup pozwolić mogą sobie jedynie nieliczni użytkownicy. Dlatego też autorzy pragną pokazać w swojej publikacji, że budowa urządzeń mechatronicznych oraz sterowania haptycznego oparta na zestawach Lego Mindstorms NXT 2.0 jest możliwa, a skuteczność jej działania potwierdzają przeprowadzone badania. Zestaw NXT 2.0 składa się z mikrokontrolera oraz czujników i serwomotorów jako układów wykonawczych. Przy programowaniu posłużono się znanym środowiskiem symulacyjnym Matlab Simulink z bibliotekami umożliwiającymi programowanie mikrokontrolerów NXT 2.0. Uzyskano w ten sposób znaczną redukcję kosztów, ponieważ koszt profesjonalnych dźwostek wraz z dodatkowym sprzętem może sięgać nawet kilkuset tysięcy euro [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].



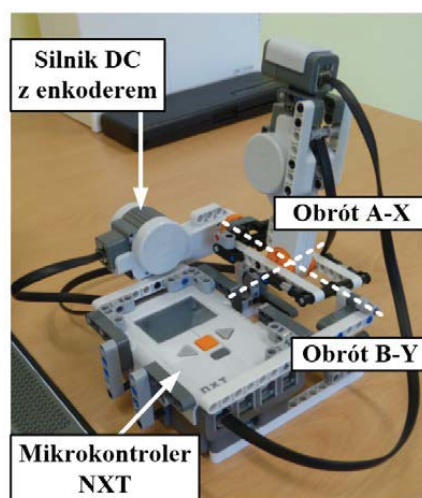
Rys. 1. Obrazowe ukazanie idei działania technologii haptycznej [9]

Słowo *haptic* pochodzi od greckiego *hapteshai*, co można przetłumaczyć jako zmysł dotyku lub czucie przez dotyk. Cała koncepcja użycia technologii haptycznej polega na wykorzystaniu w procesie sterowania kolejnego zmysłu – dotyku, który

dołączył do zmysłów wzroku i słuchu. Skóra jest największym ludzkim narządem, zawierającym receptory odpowiedzialne za odczuwanie temperatury, ciała Meissnera (zmysł dotyku), nocyceptory (odczuwanie bólu) oraz ciała blaszkowate (odczuwanie nacisku) [9].

2. DŻOJSTIK

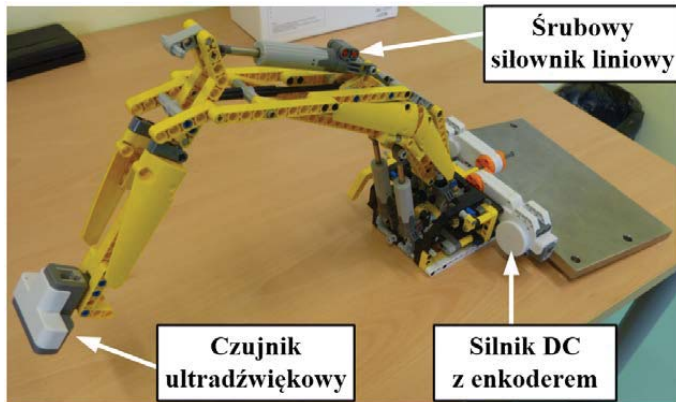
Oba urządzenia sterowane będą przy pomocy dżojstika posiadającego dwa stopnie swobody. Koncepcja tego urządzenia została zaczerpnięta ze strony internetowej pasjonata, a jednocześnie autora i recenzenta książek poświęconych tematyce Lego Mindstorms [10]. Konstrukcja zawiera dwa silniki prądu stałego, których zadaniem jest generowanie momentu obrotowego, co przekłada się na siłę mechanicznego sprzężenia zwrotnego, którą odczuwa operator. Dzięki wbudowanym enkoderom, odczytywana jest aktualna pozycja dżojstika, która jako informacja wejściowa jest przekazywana do mikrokontrolera. Układ ma możliwość wykonywania obrotów wokół osi A-X oraz wokół osi B-Y. Całą konstrukcję pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Konstrukcja dżojstika z oznaczeniem najważniejszych części

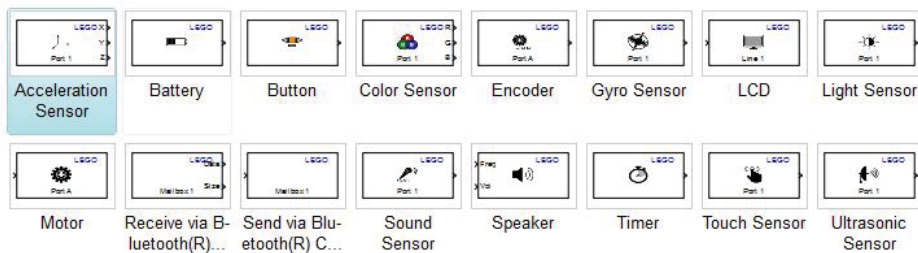
3. MANIPULATOR

Budując manipulator, posłużono się modyfikacją rozwiązania zastosowanego w zestawie Lego Technic 8043, wydanym w 2010 roku. Decyzja o zastosowaniu klocków wiąże się również z wykonanym przeglądem źródeł literaturowych; nie pominięto także przeglądu portali hobbyistycznych, tworzonych przez fanów klocków. Stwierdzono brak podobnych opracowań i badań. Na rysunku 3 ukazano konstrukcję ramienia oraz zaznaczono jej najważniejsze elementy, tj. siłownik linowy z przekładnią śrubową, służącą do zmiany ruchu obrotowego na linowy (dwa do napędu pierwszego członu oraz jeden napędzający drugi człon manipulatora), dwa silniki prądu stałego z wbudowanymi enkoderami (moment maksymalny 0,167 Nm dla $U = 9\text{ V}$ i $I = 0,6\text{ A}$) oraz czujnik ultradźwiękowy do pomiaru odległości pomiędzy przeszkodą a ramieniem. Do największych wad można zaliczyć małą sztywność konstrukcji oraz luzy występujące w układzie napędowym (w przekładniach mechanicznych).

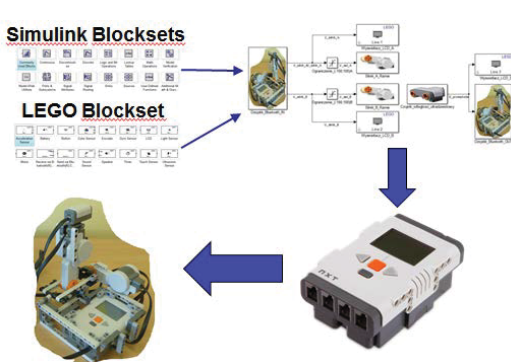


Rys. 3. Konstrukcja manipulatora z oznaczeniem najważniejszych części

Sterowanie manipulatorem jest podzielone pomiędzy dwa mikrokontrolery NXT 2.0, które komunikują się ze sobą poprzez bezprzewodowe połączenie Bluetooth. Do ich zaprogramowania wykorzystano środowisko Matlab Simulink 2012b i specjalny zestaw bloków LEGO NXT Toolbox, umożliwiający prosty dostęp do czujników, silników i innych elementów z zestawu LEGO Mindstorms (rys. 4).



Rys. 4. Biblioteka LEGO NXT Toolbox

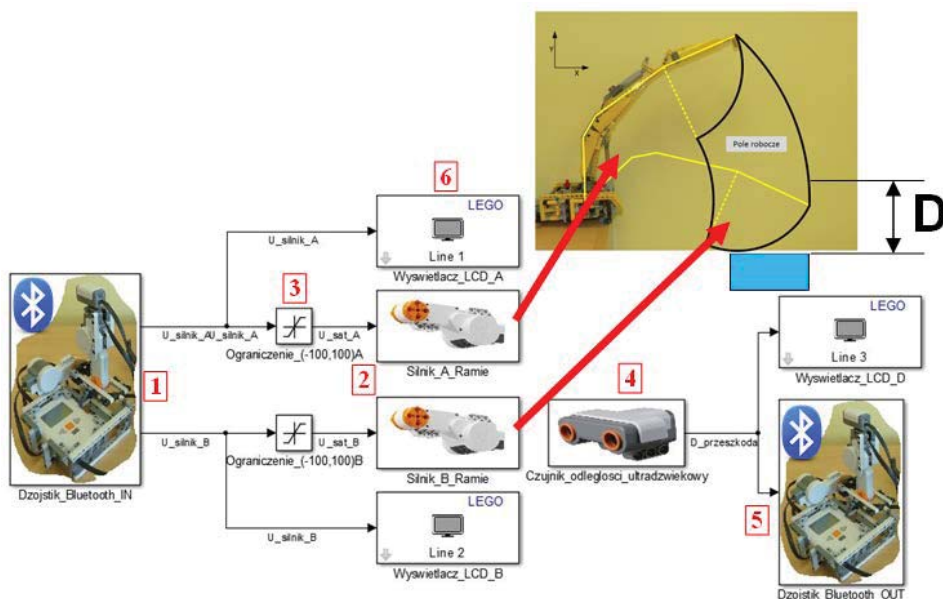


Rys. 5. Schemat programowania sterownika NXT 2.0

Tworzenie programu polega na połączeniu odpowiedniego schematu blokowego z wykorzystaniem standardowej biblioteki Simulink. Na podstawie takiego modelu generowany jest automatycznie program sterujący i przesyłany przez przewód USB do pamięci programowej sterownika NXT 2.0 (rys. 5). Graficzne programowanie ułatwia pracę, zwłaszcza, że programista ma dostęp do bardzo rozbudowa-

nej bazy gotowych bloków Simulink i LEGO NXT Toolbox. Możliwa jest prosta implementacja skomplikowanych algorytmów i sterowanie mikrokontrolerem bez żmudnej konfiguracji portów i elementów. Jedynymi ograniczeniami są możliwości sprzętowe sterownika, m.in. rozmiar dostępnej pamięci (256 KB pamięci typu flash) [11].

Założono, że program wykonawczy sterownika umieszczonego w manipulatorze powinien być możliwie jak najbardziej uproszczony (rys. 6). Główna część kodu sterującego znajduje się w dżojstiku. Rozwiązanie takie ma istotną zaletę – wszelkie zmiany w sterowaniu ograniczają się do zmiany i ponownego przesłania tylko oprogramowania dżojstika.

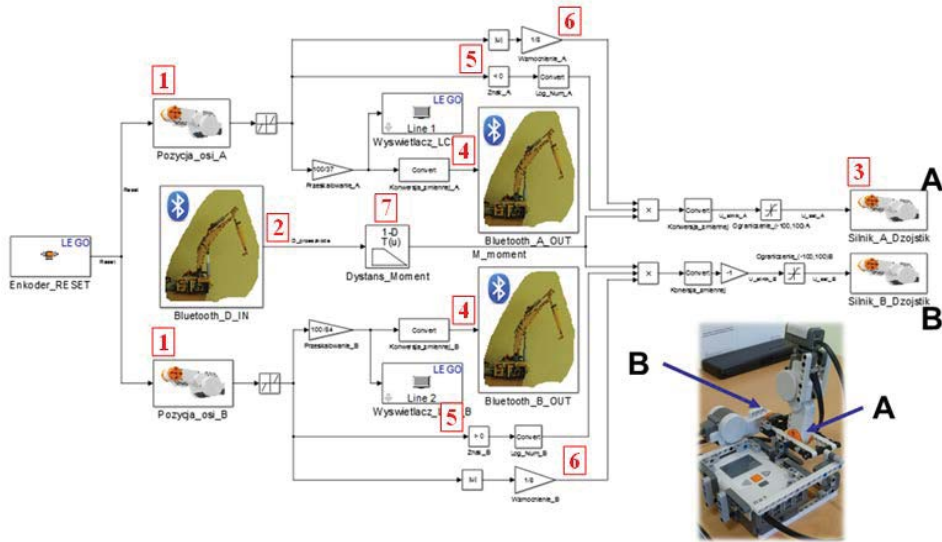


Rys. 6. Schemat programu sterownika NXT 2.0 – manipulator

Manipulator poprzez protokół Bluetooth odbiera dwa sygnały (1) sterujące prędkością ruchu dwóch silowników zamocowanych na ramionach (2). Oba silniki są sterowane niezależnie. Uwzględniono ograniczenie wartości sygnału do zakresu $\langle -100, 100 \rangle$, które wynika z budowy sterownika NXT 2.0 (3). Silniki prądu stałego wchodzące w skład zestawu sterowane są poprzez zmianę współczynnika wypełnienia sygnału prostokątnego w zakresie 0-100% (sygnał PWM), natomiast znak oznacza kierunek obrotów. Czujnik ultradźwiękowy zamontowany na końcu ramienia manipulatora mierzy, jaka jest odległość końcówki do przeszkody (4). Sygnał ten jest przekazywany bezprzewodowo do dżojstika (5). Dodatkowo możliwe jest wyświetlenie aktualnych wartości zmiennych na ekranie LCD mikrokontrolera (6). Ułatwia to diagnostykę poprawności działania programu – możliwe jest porównanie wartości w manipulatorze i dżojstiku oraz sprawdzenie połączenia sterowników.

Sterowanie dżojstika (rys. 7) polega na odczycie aktualnej pozycji rękojeści przy pomocy enkoderów (1) i przekształceniu otrzymanego bezprzewodowo sygnału odległości ramienia do przeszkody (2) na moment wywoływany przez silniki prądu

stałego (3). Zadana prędkość obrotowa silników manipulatora jest proporcjonalna do wychylenia dźwojstika; każda z dwóch osi steruje niezależnie tymi silnikami. Sygnał jest wysyłany do manipulatora poprzez Bluetooth (4).



Rys. 7. Schemat programu sterownika NXT 2.0 – dźwojstik manipulatora

W miarę zbliżania się końca ramienia do przeszkody, zwiększany jest moment obrotowy generowany na osi silnika. Dokładniej, zwiększany jest współczynnik wypełnienia sygnału sterującego PWM zgodnie z odcinkami liniową funkcją. Końcowy sygnał, który dociera do silników, może być określony poniższym wzorem:

$$P_A = k_z \cdot k_{\alpha A} \cdot \alpha_A \cdot M(D), \quad (1)$$

gdzie:

$$k_z = \begin{cases} 1 & \text{dla } \alpha_A > 0 \\ 0 & \text{dla } \alpha_A \leq 0 \end{cases} \quad \text{– współczynnik ograniczający zakres działania momentu dźwojstika;}$$

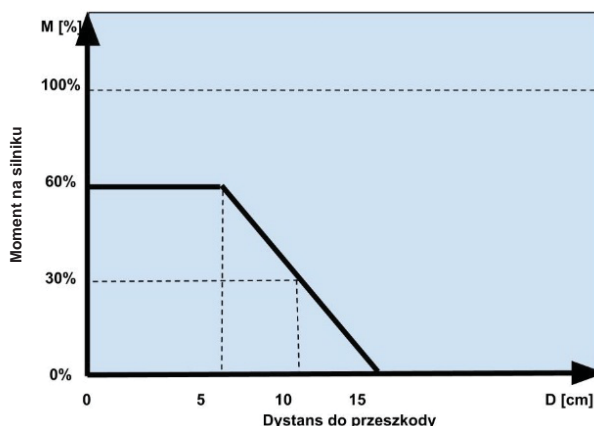
$k_{\alpha A}$ – współczynnik przekształcający zakres obrotu dźwojstika;

α_A – kąt wychylenia rękojeści dźwojstika;

$M(D)$ – funkcja przekształcająca dystans na stopień wypełnienia sygnału PWM.

Przyjęto, że pionowe ustawienie rękojeści jest równoznaczne z kątem 0° . Dodatkowo powyższy współczynnik k_z przyjmuje wartość logiczną zależną od znaku kąta wychylenia dźwojstika (5). Takie rozwiązanie skutkuje tym, że po zbliżeniu się do przeszkody generowany jest moment, czyli haptyczne sprzężenie zwrotne, ale jego wartość jest proporcjonalna do wychylenia dźwojstika (6). Moment zanika po powrocie do pozycji początkowej i nie występuje dla kątów ujemnych. Użytkownik ma możliwość swobodnego wycofania ramienia robota ze strefy niebezpiecznej i nie przeszkadza

mu w tym żadna dodatkowa siła podczas wychylania dźwostnika w przeciwnym kierunku. Strefa działania ultradźwiękowego czujnika odległości mieści się w zakresie 50-1000 mm. Funkcja przekształcająca wartość dystansu do przeszkody na moment (7) przedstawiona została na rysunku 8. Moment na silniku dźwostnika zaczyna narastać liniowo w odległości 150 mm od przeszkody; następnie ustala się na poziomie 60% maksymalnego momentu w odległości mniejszej niż 50 mm. Moment generowany przez silnik dla drugiej osi dźwostnika jest opisany identyczną funkcją.

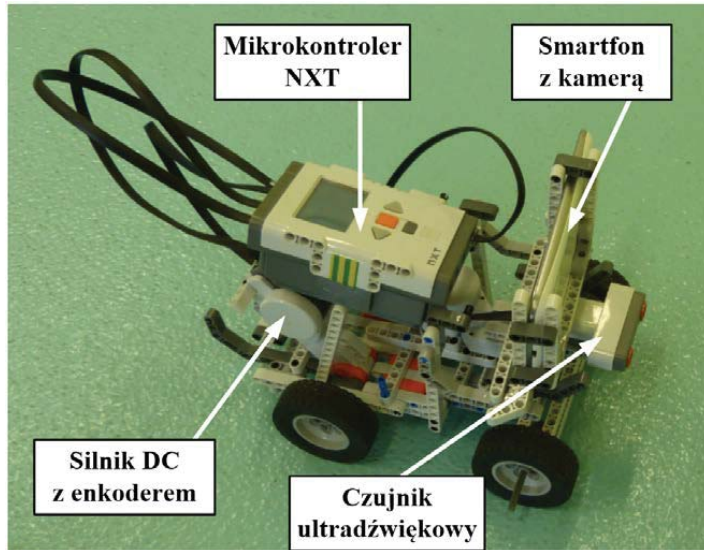


Rys. 8. Wykres przedstawiający moment na silniku w funkcji odległości od przeszkody

4. POJAZD INSPEKCYJNY

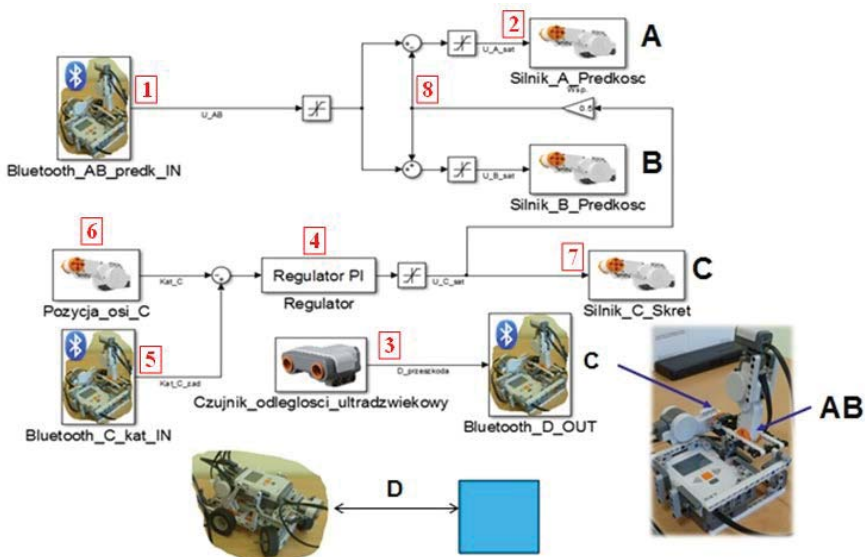
Pojazdy inspekcyjne, wykorzystywane w różnych sytuacjach, pozwalają na zdalne lub autonomiczne badanie danego otoczenia. Urządzenia te są wyposażone w specjalistyczne, dostosowane do ich przeznaczenia, czujniki i akulatory. Znane są roboty inspekcyjne, służące do sprawdzania poprawności instalacji i stanu technicznego wąskich (jak dla człowieka), długich, podziemnych tuneli, napowietrznych linii wysokiego napięcia, przewodów wentylacyjnych.

W artykule autorzy zaprezentowali autorską konstrukcję pojazdu inspekcyjnego wykonaną z klocków Lego Technic i Mindstorms NXT 2.0. Założono, że pojazd będzie poruszał się po płaskiej powierzchni i wykrywał potencjalne kolizje z przeszkodami. W tym celu zamontowano z przodu pojazdu czujnik ultradźwiękowy. Za napęd odpowiadają silniki prądu stałego z wbudowanymi enkoderami (takie same jak te zastosowane w ramieniu), zlokalizowane z tyłu pojazdu, podłączone osobno do każdego z kół. Poprzez modyfikację prędkości obrotowych kół tylnych zrealizowano funkcję podobną do mechanicznego dyferencjału. Taki sam silnik wykorzystano do realizacji skręcania przedniej osi pojazdu; uzyskano kąt skręcenia $\pm 45^\circ$ względem osi pojazdu. W przedniej części dodano również uchwyt na telefon, wyposażony w kamerę oraz możliwość wysyłania obrazu przy pomocy technologii Wi-Fi (rys. 9).



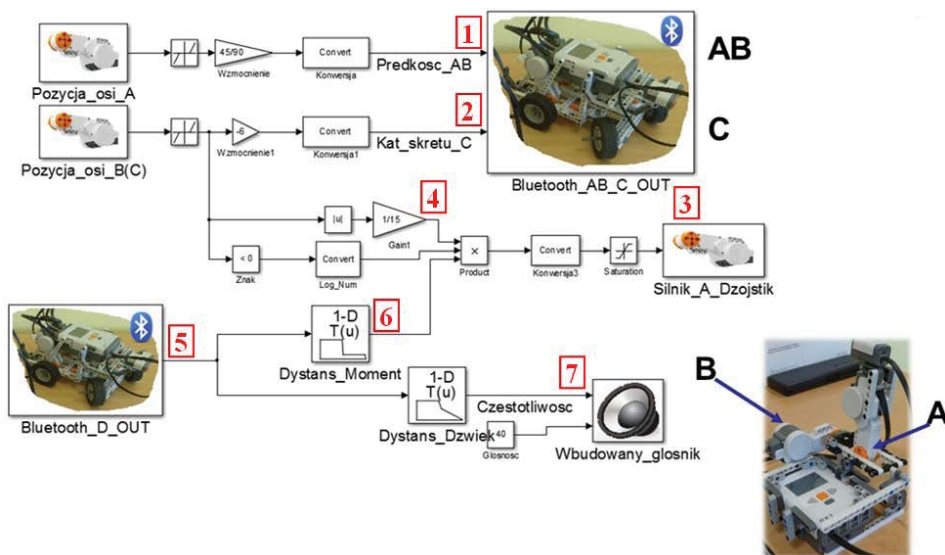
Rys. 9. Konstrukcja pojazdu z oznaczeniem najważniejszych części

Schemat i założenia sterowania pojazdem inspekcyjnym są podobne do zastosowanego w manipulatorze (rys. 10). Ruch dźwojstika w przód powoduje proporcjonalny wzrost prędkości obrotowej dwóch silników napędowych pojazdu i jazdę do przodu (1). Możliwe jest wycofywanie. Informacja o zadanej prędkości obrotowej jest odbierana bezprzewodowo (2). Ultradźwiękowy czujnik umieszczony na przodzie robota odczytuje, jaka jest odległość pomiędzy pojazdem a przeszkodą (3).



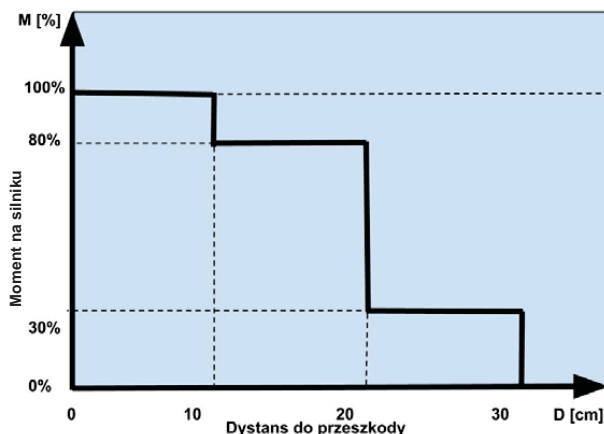
Rys. 10. Schemat programu sterownika NXT 2.0 – pojazd inspekcyjny

Trzeci silnik zamontowany w pojeździe odpowiedzialny jest za skręt kół osi przedniej. Ponieważ silniki wchodzące w skład zestawu LEGO Mindstorms sterowane są sygnałem PWM, który przekłada się na prędkość obrotową, konieczne było zastosowanie prostego regulatora położenia typu proporcjonalno-całkującego (4). Zadany skręt kół przesyłany jest bezprzewodowo z dżojstika (5) i porównywany z aktualnym kątem skreślenia, odczytanym przy pomocy wbudowanych endkoderów (6). Uchyb położenia kąтового jest przekazywany na wejście regulatora PI. Wyjście jest połączone z silnikiem osi C (7) oraz dodatkowo wykorzystywane jest do modyfikacji prędkości obrotowej kół napędowych, przez co uzyskano efekt elektronicznego mechanizmu różnicowego (8). Usprawnia to skręcanie robota mobilnego na śliskich powierzchniach. Rysunek 11 przedstawia program zaimplementowany w dżojstiku współpracującym z pojazdem inspekcyjnym. Sygnały o zadanej prędkości obrotowej (oś A) i skręcie kół (oś B) przekazywane są bezprzewodowo (1 i 2).



Rys. 11. Schemat programu sterownika NXT 2.0 – dżojstik pojazdu inspekcyjnego

Podobnie, jak w przypadku manipulatora, moment na silniku osi A dżojstika (3) zależny jest od kąta wychylenia (4) i odległości od przeszkody (5). Również w tym przypadku zależność ta może być opisana wzorem (1). Główna różnica jest w funkcji przekształcającej odległość na moment na silniku (6). Funkcję tę przedstawia rysunek 12. W odległości 300 mm od przeszkody występuje skokowa zmiana momentu na poziom 30% wartości maksymalnej. Jest to informacja dla operatora, że pojazd zaczyna zbliżać się do przeszkody i ma na celu podwyższyć czujność. Gdy pojazd nadal się zbliża, to w odległości 200 mm następuje kolejny skok do wartości 80%. Ostatni etap to odległość mniejsza od 100 mm, gdy na silniku generowany jest maksymalny moment.

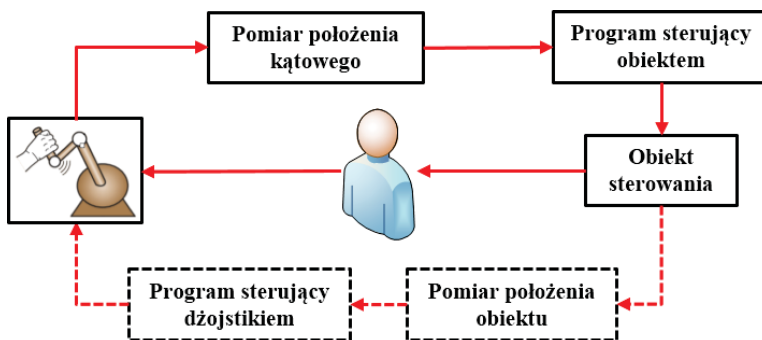


Rys. 12. Wykres przedstawiający moment na silniku w funkcji odległości od przeszkody – pojazd inspekcyjny

Dodatkowo w pojeździe inspekcyjnym wykorzystano wbudowany głośnik, który zmienia częstotliwość wydawanego dźwięku w miarę zbliżania się do przeszkody (7 na rys. 11). Funkcja jest podobna do tej przedstawionej na rysunku 12, z tą różnicą, że w zakresie 200-300 mm częstotliwość wzrasta liniowo. Jest to dodatkowa informacja dla operatora o zbliżaniu się do przeszkody.

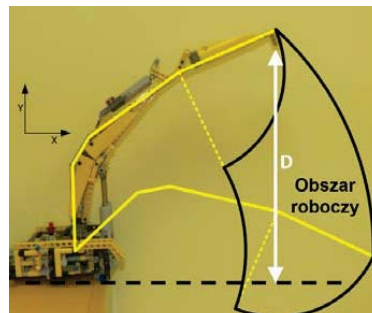
5. BADANIA I PREZENTACJA WYNIKÓW

Przeprowadzone badania dotyczyły sprawdzenia, jak wprowadzenie siłowego sprzężenia zwrotnego wpłynie na jakość sterowania ww. urządzeniami. Wykonano badania w dwóch wariantach, aby była możliwość porównania otrzymanych wyników. Wariant pierwszy zakładał badania bazujące jedynie na obserwacji obiektów sterowania przez operatora (oznaczone linią ciągłą na rysunku 13). W drugim wariantcie dodano sprzężenie siłowe, oznaczone linią przerywaną na rysunku 13.



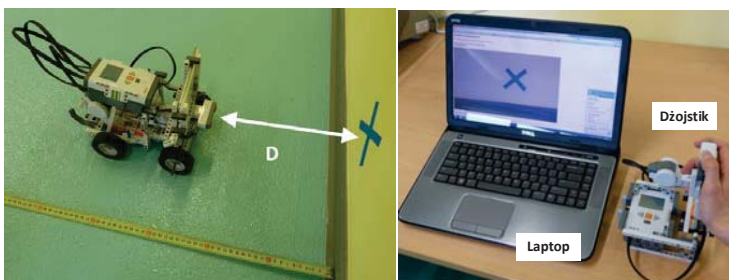
Rys. 13. Schemat sterowania bez i z dodatkowym siłowym sprzężeniem zwrotnym

Badania sterowania manipulatorem zakładały oddalenie operatora od sterowanego obiektu o 5 m oraz uzyskanie odległości $D = 100$ mm. W tym celu przeprowadzono badania na dwóch operatorach; każdy z nich miał wykonać 10 prób pozycjonowania dla wariantu 1. i 2. układu sterowania. Dodatkowo nie zostało im zademonstrowane położenie prawidłowe, w jakim żądana wielkość D została osiągnięta. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 16 i 17.

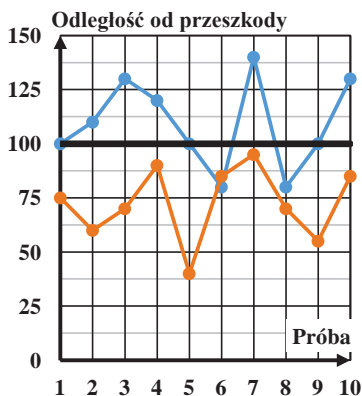


Rys. 14. Manipulator z zaznaczonym obszarem roboczym oraz celem sterowania

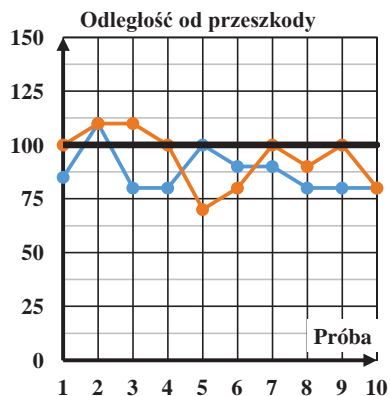
W przypadku pojazdu, zadaniem operatorów było zatrzymanie pojazdu w odległości $D = 200$ mm od ściany. Sterowany pojazd był niewidoczny dla operatorów, którzy w pomieszczeniu obok mieli możliwość obserwacji obrazu wysyłanego przez kamerę umieszczoną na pojeździe. Operatorzy wykonali po 10 prób dla 1. i 2. wariantu sterowania; również w tym przypadku pozycja prawidłowa nie została im wcześniej zaprezentowana. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 18 i 19.



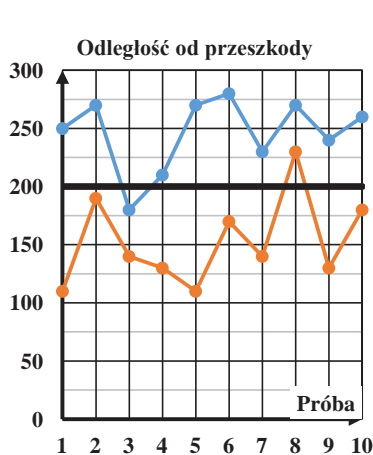
Rys. 15. Pojazd inspekcyjny oraz stanowisko sterowania



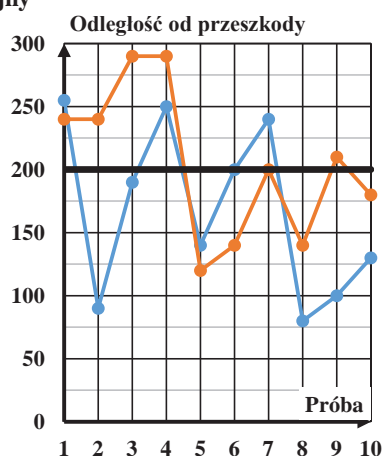
Rys. 16. Wartości uzyskane przez operatorów bez włączonego sprzężenia siłowego



Rys. 17. Wartości uzyskane przez operatorów z włączonym sprzężeniem siłowym



Rys. 18 Wartości uzyskane przez operatorów bez włączonego sprzężenia siłowego



Rys. 19 Wartości uzyskane przez operatorów z włączonym sprzężeniem siłowym

6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pokazały, że istnieje możliwość zbudowania skutecznych urządzeń haptycznych w oparciu o edukacyjne zestawy Lego Mindstorms. Uruchomienie siłowego sprzężenia zwrotnego pozwoliło na uzyskanie powtarzalnych wyników dla obu operatorów (rys. 17 i 19), co jest ważne, np. jeżeli sterowaniem maszyną budowlaną zajmuje się więcej niż jedna osoba. W czasie, gdy zadawane położenie polegało jedynie na obserwacji sterowanych obiektów, operatorzy uzyskali różniące się od siebie wartości, wynikające z ich subiektywnych odczuć (rys. 16 i 18). Na rysunku 17 widać wyraźnie opóźnienie w reakcji operatorów na pojawienie się siłowego sygnału sprzężenia zwrotnego; jako niepokojący można uznać fakt, że obaj operatorzy w tym przypadku oczekiwali na pojawienie się sił sprzężenia zwrotnego, a osiągnięte wyniki znajdują się poniżej wyznaczonego celu sterowania, za co odpowiada czas reakcji operatorów oraz bezwładność napędu. Skompensować można to, ustawiając nieco dalej granicę aktywacji siły na dźwostku (np. $D = 110$ mm). Do największych wad należy zaliczyć małą sztywność konstrukcji oraz występowanie luzów na przekładniach mechanicznych. Obie wymienione wady znacząco wpływają na małą precyzję sterowania. Dodatkowo, czynnikami niekorzystnymi była słaba wyczuwalność liniowej zmiany momentu oporowego przez operatora. Niemożliwe było dokładne rozróżnienie wartości zadanego momentu w przedziale 30-100%, co wpłynęło na jakość pozycjonowania. Żadna siła nie była wyczuwana poniżej 30% wartości maksymalnej (rys. 8), dlatego w sterowaniu pojazdem zaproponowano skokową zmianę wartości momentu oporowego (rys. 12). Przyczynami takich problemów mogą być cechy zastosowanego napędu (silniki prądu stałego) oraz układ sterowania mikrokontrolera NXT 2.0.

LITERATURA

1. Bachan P., Milecki A.: MR haptic joystick in control of virtual servo drive. *Jurnal of Physics: Conference Series*, nr 149, 2009.
2. Baillie S., Crossan A., Reid S., Brewster S.: Preliminary development and evaluation of a bovine rectal palpation simulator for training veterinary students. *Cattle Practice*, nr 2: pp. 101-106, 2003.
3. Behrens A., Atorf L., Aach T.: Teaching practical engineering for freshman students using the RWTH – Mindstorms NXT toolbox for Matlab [in:] *Matlab – Modeling, Programing and Simulations*. Sciyo, Rijeka 2010.
4. Behrens A., Atorf L., Schwann R.: MATLAB meets LEGO Mindstorms – A freshman introduction course into practical engineering. *Education, IEEE Transactions*, nr 53(2), pp. 306-317, 2010.
5. Diolaiti N., Melchiorri C.: Haptic tele-operation of a mobile robot. *IFAC 2003*.
6. Farkhatdinov I., Ryu J., An J.: Preliminary Experimental Study on Haptic Teleoperation of Mobile Robot with Variable Force Feedback Gain, *IEEE Hapics Symposium*, Massachusetts, USA, March 2010.
7. Kim L., Hwang Y., Park S.H., Ha S.: Dental training system using multi-modal interface. *Computer-Aided Design and Applications*, nr 2, pp. 591-598, 2005.
8. Milecki A.: Simulation investigations of electrohydraulic drive controlled by haptic joystick. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, nr 28.4, pp. 53-61, 2008.
9. Siciliano B., Khatib O.: *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin 2008.
10. <http://www.philohome.com/> [15.05.2013].
11. <http://www.mathworks.com/hardware-support/lego-mindstorms-simulink.html> [17.05.2013].

Rękopis dostarczono dnia 02.08.2013 r.

**IMPACT OF HAPTIC TECHNOLOGY ON STEERING QUALITY
IN MECHATRONIC DEVICES**

Bartosz MINOROWICZ, Amadeusz NOWAK
Frederik STEFAŃSKI

ABSTRACT *The authors presented a paper with the design of two mechatronic devices: the manipulator and inspection vehicle. For steering joystick with two degrees of freedom was used. The whole constructions are made of Lego Technic and Mindstorms NXT 2.0. Control system was developed by using simulation environment Matlab Simulink with additional libraries serving the microcontroller, sensors and servo motors from Lego*

Mindstorms kit. The object of the research was examination how force feedback affects on the control quality. Test scenarios assumed steering of the manipulator located 5 m far from the operator. In the second variant inspection vehicle was equipped with camera, operator steers the vehicle based only on view on notebook screen. To sum up the article, a comparison of the values obtained for the disabled and active feedback were shown.

Keywords: *joystick, force feedback, Matlab Simulink, Lego Mindstorms NXT 2.0, manipulator, inspection vehicle*

Mgr inż. Bartosz MINOROWICZ – doktorant w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych. Swoją działalność naukową skupia wokół zagadnień związanych z konstrukcją urządzeń elektrohydraulicznych oraz zastosowania narzędzi CAx. Aktualnie w ramach doktoratu prowadzi prace badawcze związane z wykorzystaniem w konstrukcji aktuatorów materiałów z magnetyczną pamięcią kształtu.



Mgr inż. Amadeusz NOWAK – doktorant w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych. Swoją działalność naukową skupia na modelowaniu i sterowaniu urządzeń elektrohydraulicznych, systemów mechatronicznych, wykorzystaniu materiałów inteligentnych.

Mgr inż. Frederik STEFAŃSKI – doktorant w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych. Swoją działalność naukową skupia wokół zagadnień związanych z konstrukcją urządzeń elektrohydraulicznych oraz wykorzystanie technik wspomagania komputerowego CAx w projektowaniu maszyn.

