

Tomasz Jedwabny, Michał Kowalski, Marcin Kiełczewski, Marek Ławniczak,
Mateusz Michalski, Maciej Michałek, Dariusz Pazderski, Krzysztof Kozłowski
Instytut Sterowania i Inżynierii Systemów
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań

Nieholonomiczny robot mobilny MiniTracker 3 do celów badawczych i edukacyjnych¹

Artykuł prezentuje robota MiniTracker 3 opracowanego w Instytucie Sterowania i Inżynierii Systemów Politechniki Poznańskiej, w skład którego wchodzi dwukotowa nieholonomiczna platforma mobilna, układy komunikacyjne i stacja operatorska. W pracy podano ogólne założenia konstrukcyjne robota oraz przedstawiono jego układ sterowania i pomiarowy. Na koniec zaprezentowano wyniki eksperymentalne badań układu napędowego.

NONHOLONOMIC MOBILE ROBOT MiniTracker 3 FOR RESEARCH AND EDUCATIONAL PURPOSES

This paper introduces MiniTracker 3 mobile robot, developed in the Institute of Control and Systems Engineering at Poznan University of Technology. The system, consisting of two-wheels, nonholonomic mobile platform, communication modules and operator station is presented. In the paper general input assumptions on which the system has been built are briefly summarized. The description of control system for the mobile platform is included as well. Finally, the experimental results obtained with MiniTracker 3 system are shown.

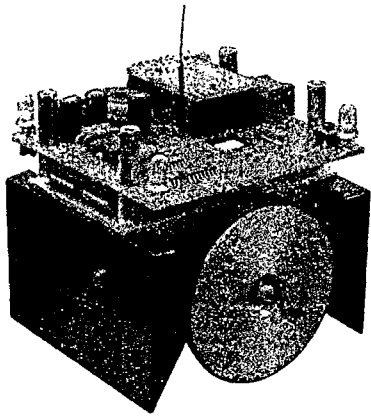
1. WPROWADZENIE

Wydaje się, że przyszłość robotyki będzie ściśle związana z rozwojem systemów mobilnych. Ogromna liczba potencjalnych zastosowań dla grupy autonomicznie poruszających się, ale współpracujących dla wykonania wspólnego celu jednostek, jest powodem, dla którego w wielu ośrodkach na całym świecie trwają prace nad rozwojem różnych aspektów systemów wieloagentowych [1], [5].

Niezbędnym elementem wymaganym dla realizacji różnorodnych projektów są inteligentne jednostki wyposażone w zaawansowane algorytmy sterujące. Aby opracować i przetestować takie algorytmy niezbędna jest do tego odpowiednia platforma sprzętowa [6].

Wychodząc naprzeciw temu zapotrzebowaniu w Zakładzie Sterowania Instytutu Sterowania i Inżynierii Systemów Politechniki Poznańskiej zaprojektowano i wdrożono no-

¹ Praca finansowana z działalności statutowej DS-93-121/04



Rys. 1. Robot mobilny MiniTracker 3

wego nieholonomicznego robota mobilnego MiniTracker 3 (MT 3) (rys. 1). Konstrukcja przeznaczona jest do zastosowań badawczo-dydaktycznych.

Podstawę robota stanowi dwukołowy, różnicowy system jezdny z niezależnymi silnikami prądu stałego dla każdego z kół. Zasilanie zapewnia akumulator umieszczony na pokładzie, którego wydajność typowo wystarcza na 30 minut nieprzerwanej pracy robota.

Centralnym elementem systemu sterowania robota jest 16-bitowy mikrokontroler jednoukładowy typu MSP430F149 firmy Texas Instruments wykonany w technologii RISC. Realizuje on obliczenia prędko-

ściowych pętli regulacyjnych PI dla obu napędów robota z częstotliwością 512 [Hz]. W każdej pętli wykonywany jest pomiar aktualnych pozycji katowych kół, pozycji i orientacji robota oraz średnich wartości prądów silników.

Dużą elastyczność zapewnia możliwość łatwej zmiany takich parametrów jak nastawy regulatorów, maksymalnej dopuszczalnej wartości prądu silników czy charakteru wymuszenia: prądowego bądź napięciowego. Wszystko to realizowane jest na drodze radiowej komunikacji z nadrzędnym układem sterowania. Moduł komunikacyjny umieszczony na pokładzie robota umożliwi wymianę danych z prędkością 115,2 [kbit/s]. Tą drogą przesyłane są także wartości prędkości zadanych dla każdego z kół robota oraz wyniki pomiarów wielkości mierzonych na pokładzie.

Uniwersalność zastosowań zapewnia, poza wymienionymi wyżej cechami, nadrzędny układ sterowania, który odpowiednio zaprogramowany realizować może praktycznie dowolny algorytm sterowania oraz strategię ruchu robota. Jedynym wymogiem jest konieczność dostosowania go do protokołu szeregowej wymiany danych z robotem, opartym o zdefiniowaną listę rozkazów. Platforma została przystosowana do współpracy z zewnętrznym systemem wizyjnym, pełniącym rolę sprzężenia zwrotnego wysokiego poziomu. Lokalizację robota ułatwiają w takim przypadku diody sygnalizacyjne umieszczone w narożnikach platformy.

Kilka robotów MT 3 może więc z powodzeniem stanowić podstawę do badania złożonych systemów wieloagentowych, umożliwiając ich testowanie na każdym poziomie i realizację zaawansowanych zadań. Sam robot jest też użytecznym przyrządem dydaktycznym

2. OPIS ROBOTA MiniTracker 3

2.1. Specyfikacja techniczna robota MT 3

Poniżej zebrano kilka parametrów nowej konstrukcji robota MT 3:

Rozmiary: 75×75×75 [mm],

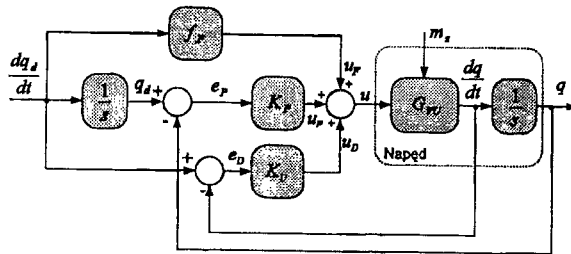
Masa z akumulatorem: 0,65 [kg],

Maksymalny moment napędowy: 0,12 [Nm],

Maksymalna prędkość liniowa: 2,2 [m/s].

2.2. System sterowania

Realizacja systemu sterowania napędów wynika z podstawowego założenia dotyczącego możliwości realizacji różnych algorytmów sterowania nieholonomicznego robota mobilnego, którego wyjściowymi sygnałami sterującymi są prędkości odpowiednio prawego i lewego koła (sterowniki kinematyczne). Z tego względu struktura systemu sterowania składa się z dwóch niezależnych podsystemów regulacji prędkości obrotowych silników prądu stałego dla obu kół platformy, które są zrealizowane w postaci cyfrowych pętli regulacyjnych pracujących z częstotliwością 512[Hz]. Na pokładzie robota zaimplementowano dwa niezależne regulatory prędkości PI. Jednak ze względu na występujące szумы w torze pomiaru prędkości oraz w celu zapewnienia stabilizacji pozycji q (rys. 2²) kół robota podczas postoju, zrezygnowano



Rys. 2. Schemat regulatora przy wymuszeniu napięciowym

z klasycznych regulatorów prędkości na rzecz dwóch niezależnych regulatorów PD pozycji kół

z całkowitymi generatorami trajektorii $q_d(t)$. Praca generatorów wynika bezpośrednio z zadanych wartości prędkości dq_d/dt . Takie podejście gwarantuje między innymi zatrzymanie napędów przy zerowej prędkości zadanej pomimo błędów w pomiarze bieżących prędkości dq/dt kół robota. Obliczany sygnał sterujący jest fizycznie realizowany poprzez odpowiednie sterowanie wzmacniacza mocy oparte o zasadę modulacji szerokości impulsu. Jako wzmacniacze mocy zastosowano dwa niezależne mostki tranzystorowe 4T pracujące w reżimie pracy jednobiegunowej i współpracujące z dwupołożeniowymi analogowymi regulatorami prądu twornika zintegrowanymi w jednym układzie scalonym.

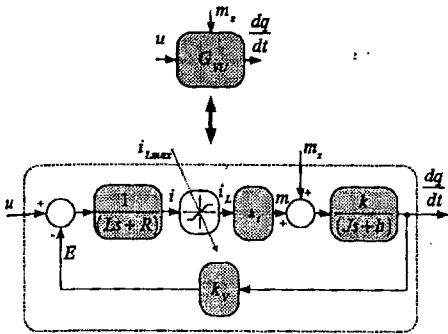
Układy regulacji mogą pracować w dwóch trybach:

- z wymuszeniem o charakterze napięciowym - obliczona wartość sterowania jest interpretowana jako wartość napięcia twornika, którą należy wymusić poprzez odpowiednie sterowanie wzmacniacza mocy,
- z wymuszeniem o charakterze prądowym - obliczona wartość sterowania jest interpretowana jako zadana wartość prądu twornika i jest podawana na wewnętrzny podrzędny obwód regulacji prądu (regulacja kaskadowa).

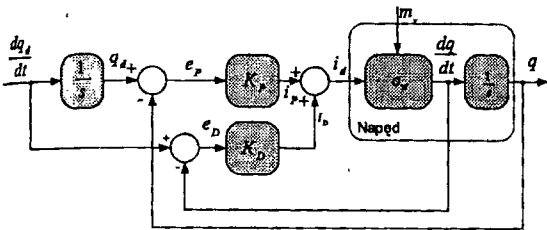
Zmiana trybu pracy układów regulacji jest możliwa poprzez wykorzystanie odpowiedniego rozkazu programowego przesyłanego z konsoli operatora.

² Przyjęte oznaczenia na rysunkach są zgodne z typową konwencją zapisu spotykaną w literaturze dotyczącej napędów elektrycznych, m.in. [4].

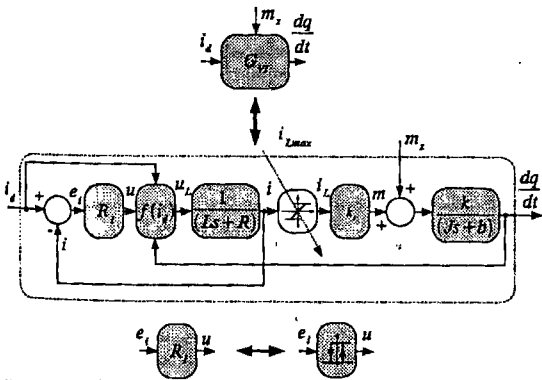
2.2.1. Sterowanie z wymuszeniem napięciowym



Rys. 3. Model napędu przy wymuszeniu napięciowym



Rys. 4. Schemat regulatora przy wymuszeniu prądowym



Rys. 5. Model napędu przy wymuszeniu prądowym

sterowanego napędu (silnik + przekształtnik + przekładnia + koło) – rys. 2.

2.2.2. Sterowanie z wymuszeniem prądowym

Rysunek 4 przedstawia schemat blokowy układu regulacji prędkości dla pojedynczego napędu przy wymuszeniu o charakterze prądowym.

Symbolem G_{VU} oznaczono blok dynamiki zmian prędkości silnika, którego strukturę wewnętrzną zobrazowano na rys. 5. W tym trybie pracy wartość sterowania jest interpretowana jako wartość napięcia twornika u powodując bezpośrednio wystawienie końcówki mocy. Podrzędna pętla regulacji prądu spełnia w tym schemacie regulacji jedynie rolę sprzętowego ogranicznika prądu silnika i została zaznaczona (rys. 3) jako blok typu „na-sycenie” z nastawialną wartością progu nasycenia.

Zmiany wartości tego progu można dokonać bezpośrednio z konsoli operatorskiej wykorzystując w tym celu specjalny rozkaz programowy.

Aby poprawić dynamiczną i statyczną jakość regulacji prędkości, do każdej pętli regulacyjnej dołączono dodatkowo blok sprzężenia wyprzedzającego f_F , którego pracę oparto o charakterystykę statyczną

towana jako zadana wartość prądu twornika i_d i podawana jest (za pomocą jednobitowego przetwornika C/A z filtrem FDP) na wejście podrzędnej sprzętowej pętli dwupołożeniowej regulacji prądu i (rys. 5). Ze względu na znacznie większą „sztywność” pętli regulacyjnej pracującej z wymuszeniem prądowym, zrezygnowano tutaj z bloku sprzężenia wyprzedzającego.

Dodatkowym niestandardowym elementem zrealizowanym w sterowniku jest blok korekcyjny oznaczony jako $f(i_d)$ (rys. 5), którego zadaniem jest ograniczenie wartości napięcia podawanego przez wzmacniacz mocy na uzwojenia silnika w funkcji obliczonej wartości sygnału i_d . Zabieg ten ma na celu ograniczenie zbyt dużej stromości narastania prądu twornika i tym samym poprawy jakości regulacji wartości prądu (zbyt duża stromość wynika z małej wartości indukcyjności zastosowanego silnika). Działanie bloku korekcyjnego opisuje następujące równanie:

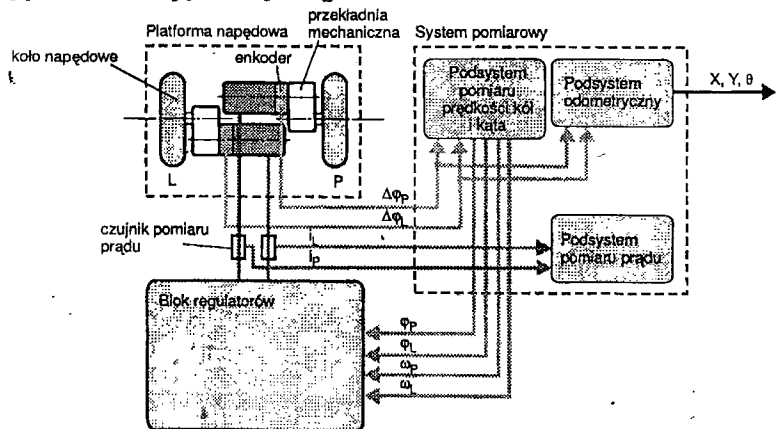
$$|u_L| = K_V \left| \frac{dq_d}{dt} \right| + K_{res} |i_d| + K_{const} \quad (1)$$

gdzie: $|u_L|$ – skorygowana wartość napięcia; $|dq_d/dt|$ – zadana wartość prędkości napędu, $|i_d|$ – obliczona zadana wartość prądu; K_V , K_{res} , K_{const} – dobierane współczynniki.

Wartości wszystkich nastaw regulatorów (K_P , K_D), współczynników korekcyjnych (K_V , K_{res} , K_{const}) oraz wartość progu nasycenia prądu twornika mogą być dowolnie zmieniane na żądanie operatora wykorzystując odpowiednio zdefiniowane rozkazy programowe.

2.3. System pomiarowy

Robot wyposażony został w autonomiczny wewnętrzny system pomiarowy (rys. 6) pozwalający na obserwację wewnętrznego stanu.



Rys.6. Struktura systemu pomiarowego

Całość systemu została zintegrowana wokół mikrokontrolera MSP430F149, który odpowiada za obliczanie prędkości obrotowej kół oraz prądów silników z częstotliwością 512 [Hz]. Układ realizuje także obliczanie lokalizacji względnej wykorzystując metodę odometrii inkrementalnej [2].

Podstawowym zadaniem systemu pomiarowego robota jest wyznaczenie danych pozwalających na zamknięcie wewnętrznych pętli regulacji prędkości obrotowej kół. Umożli-

wia on także przekazanie informacji uzupełniających do konsoli operatora, które obejmują m.in. jego położenie, orientację, prędkości kół oraz wartości natężenia prądów tworników silników napędowych. Dane te mogą być wykorzystane do realizacji złożonych strategii sterowania, którymi zarządza komputer PC.

2.3.1. Podsystem pomiaru drogi i prędkości kątowej kół

Z punktu widzenia zadania regulacji wyznaczanie odometrii kół oraz obliczanie prędkości kątowej determinuje podstawową funkcję systemu pomiarowego robota MT 3. Realizacja pomiarów tych wielkości wykonywana jest na drodze cyfrowej i wykorzystuje enkodery inkrementalne sprzężone z wałami silników napędowych.

Do wyznaczania prędkości obrotowej kół służy algorytm pomiaru częstotliwości sygnałów cyfrowych generowanych przez czujniki. Pracuje on w szerokim zakresie pomiarowym rozciągającym się od zera do kilku kHz, gwarantując jednocześnie niewielkie opóźnienia w torze pomiarowym układu regulacji również dla niskich częstotliwości mierzonego przebiegu.

Zaproponowany algorytm pomiaru opiera się na zależności (2), która definiuje częstotliwość przebiegu cyfrowego jako funkcję liczby n zliczonych impulsów w zmiennym przedziale czasu T określonym jako przedział między ostatnim a pierwszym impulsem w ramach danego cyklu pomiarowego

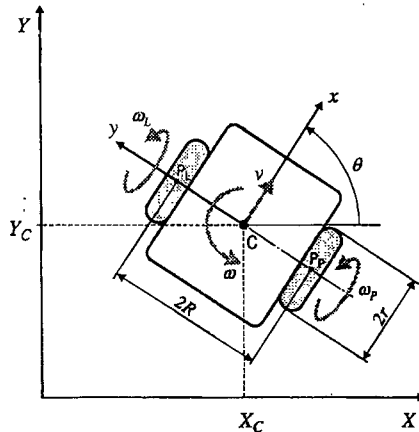
$$f = \frac{n}{T_n - T_1} \quad (2)$$

Jest oczywiste, że maksymalną możliwą do uzyskania częstotliwość aktualizacji wyniku pomiaru (dla $n = 2$) determinuje bieżąca częstotliwość mierzonego przebiegu. Z uwagi na parametry układu regulacji przyjęto, że okres pomiarowy jest wielokrotnością $1/512$ [s]. Z tego wynika, że jeśli częstotliwość sygnału wejściowego przekracza 512 [Hz], wówczas aktualny wynik pomiaru uzyskuje się dla każdego wywołania regulatora. W przypadku, gdy częstotliwość sygnału wejściowego jest mniejsza niż podana wartość progowa, czas po którym można aktualizować wynik pomiaru odpowiednio się wydłuża. Implikuje to pojawienie się dodatkowego opóźnienia w torze układu pomiarowego, co znacząco pogarsza jakość regulacji. Problem potęguje występowanie strefy martwej napędu oraz zjawiska tarcia slip-stick obserwowanego szczególnie w zakresie niskich prędkości obrotowych.

W opisywanym rozwiązaniu jakość regulacji dla niskich prędkości istotnie została poprawiona dzięki szacowaniu górnego zakresu wyniku. Metoda polega na wystawieniu dla układu regulacji wartości prędkości określonej przy założeniu, że chwila wywołania pętli regulacyjnej jest czasem domniemanego pojawienia się kolejnego impulsu sygnału cyfrowego. W algorytmie wprowadzono dodatkowo filtrację danych polegającą na tym, że wartość szacowana przyjmowana jest jako prawidłowa tylko wtedy, gdy jest mniejsza niż wartość określona poprzednio.

2.3.2. Podsystem lokalizacji względnej

Jak już wspomniano w robocie MT 3 w roli wewnętrznego systemu lokalizacji wykorzystana została odometria inkrementalna, określająca kinematyczny stan robota, który opisywany jest przez wektor $q = [X_c \ Y_c \ \theta]^T$ podający bieżące położenie punktu C w układzie globalnym oraz orientację układu lokalnego względem globalnego (rys. 7).



Rys. 7. Robot nieholonomiczny w globalnym i lokalnym układzie odniesienia

System odometryczny robota bazuje na pomiarze elementarnych przyrostów drogi kątovej określanych dla każdego koła napędowego na podstawie impulsów generowanych przez czujniki inkrementalne. Wyznaczone na tej podstawie przyrosty kąta dla obu kół przeliczane są na elementarne przyrosty pozycji (ΔX_c , ΔY_c) i orientacji $\Delta\theta$ z wykorzystaniem tablicy umieszczonej w stałej pamięci sterownika.

Ponieważ zastosowana metoda pomiaru przyjmuje założenie o spełnieniu kinematycznego modelu robota, który zakłada brak zjawiska poślizgu poprzecznego i wzdłużnego kół z podłożem oraz określone i stałe wymiary geometryczne opisujące układ jezdny, należy liczyć się z

zmniejszaniem się wiarygodności uzyskiwanych wyników wraz ze wzrostem czasu pomiaru. Stąd w praktycznych zastosowaniach konieczne jest uzupełnienie systemu odometrycznego przez metody nawigacji bezwzględnej w postaci np. systemu wizyjnego.

2.3.3. Podsystem pomiaru prądu silników

Pomiar prądów tworników silników ma w robocie MT 3 charakter uzupełniający i może być wykorzystywany przez zewnętrzny komputer sterujący do określania momentów generowanych przez silniki i wykrywania np. sytuacji kolizyjnych lub identyfikacji parametrów robota.

W podsystemie pomiaru prądów zastosowane zostały analogowe układy kondycjonowania sygnału prądowego oraz dolnoprzepustowe filtry II rzędu o częstotliwości odcięcia 1 [kHz], określanej przy 3 [dB] spadku współczynnika wzmocnienia. Do pomiaru sygnału napięciowego wykorzystane zostały wewnętrzne 12-bitowe przetworniki A/C mikrokontrolera MSP430F149.

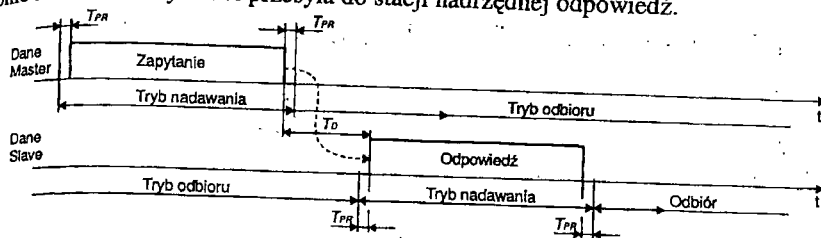
Ograniczenie pasma przetwarzanych sygnałów oraz nadpróbkowanie sygnału wraz z jego cyfrową obróbką pozwoliło zmniejszyć fluktuacje wartości chwilowej mierzonego sygnału i zmniejszyć wrażliwość układu pomiarowego na zakłócenia.

2.4. System komunikacyjny

Robot MT 3 w swojej podstawowej wersji wyposażony został w radiowy system komunikacji z nadrzędną stacją sterującą (rys. 8). Do tego celu wykorzystano standardowe nadajniki-odbiorniki małej mocy pracujące z modulacją amplitudy typu ASK z częstotliwością nośnej równą 433 MHz. System został tak zaprojektowany, aby umożliwić prędkość transmisji na poziomie 115,2 kbit/s, co pozwala uzyskać dobrą częstotliwość akwizycji danych pomiarowych i stosunkowo szybką pętlę generatora zadanych wartości prędkości platformy.

W systemie komunikacyjnym robota MT 3 zastosowano transmisję półdupleksową, którą zarządza stacja nadrzędna, zwana Masterem. Roboty z kolei traktowane są jako stacje podrzędne (tzw. Slave'y), którym przydzielone zostały unikalne numery identyfikacji

ne / adresy (w zakresie od 1 do 15). Roboty prowadzą nasłuch danych wysyłanych przez Mastera, który kieruje zapytanie do konkretnego urządzenia podrzędnego (rys. 9). Następnie zaadresowany robot przesyła do stacji nadrzędnej odpowiedź.



Rys. 9. Uprozczone przebiegi czasowe podczas wymiany danych

Zaznaczony na rysunku czas T_{PR} oznacza czas przełączenia radia pomiędzy trybem nadawania a trybem odbioru i odwrotnie. Typowo w systemie nie jest on dłuższy niż czas trwania jednego znaku. Interwał T_D z kolei określa czas, po którym robot zaczyna wysyłać odpowiedź. Jego wartość typowo wynosi kilka [ms].

W celu poprawienia niezawodności systemu komunikacji rozkazy wysyłane przez Mastera do robotów wymagają odpowiedzi (potwierdzenia), niezależnie od tego czy rozkaz zwraca użyteczne dane czy też nie. Wyjątek stanowi polecenie szybkiego zadawania prędkości kół robota, którego implementacja podyktowana była zamiarem maksymalnego skrócenia opóźnień komunikacyjnych, krytycznych zwłaszcza gdy w systemie pracuje jednocześnie kilka robotów.

Procedura przesyłu danych wykorzystuje standardową 8-bitową transmisję asynchroniczną o prędkości 115,2 kbit/s. W celu poprawienia jakości odmierzenia czasu pomiędzy komputerem PC a układem nadawczo-odbiorczym wprowadzony został mikroprocesorowy przełącznik kierunku transmisji. Pozwala on stosować zaprojektowany sposób komunikacji w systemach operacyjnych nie zapewniających determinizmu czasowego takich jak systemy rodziny MS Windows.

2.5. Oprogramowanie sterujące.

W skład podstawowego systemu MT 3 wchodzi testowa konsola sterująca. Pozwala ona na komunikację robota mobilnego z komputerem nadrzędnym drogą radiową lub poprzez łącze szeregowo RS232, pod kontrolą rodziny systemów operacyjnych Windows NT/2000/XP. Implementuje ona zaprojektowany protokół komunikacyjny oraz większość rozkazów realizowanych przez robota.

Podstawowym zadaniem aplikacji jest zadawanie trajektorii definiowanej przez prędkości kątowne odpowiednio lewego i prawego koła robota, z częstotliwością konfigurowaną przez użytkownika. Dodatkowo z poziomu aplikacji możliwe jest definiowanie ograniczenia maksymalnej wartości prądu płynącego przez silniki napędowe. W zależności od potrzeb można wybrać jakie parametry stanu robota mają być przekazywane w ramce odpowiedzi. Możliwy jest odczyt bieżącej pozycji i orientacji robota (zwracanej przez odometrię inkrementalną), zmierzonych prędkości kątowych oraz odometrii kół, jak również natężenia prądów silników. W trakcie komunikacji z robotem aplikacja pozwala na zapalanie bądź gaszenie diod LED znajdujących się na pokładzie, które mogą służyć np. jako znaczniki dla zewnętrznego wizyjnego systemu lokalizacji. Istnieje również możliwość wyłączenia pokładowych regulatorów prędkości, sekwencyjne zerowanie

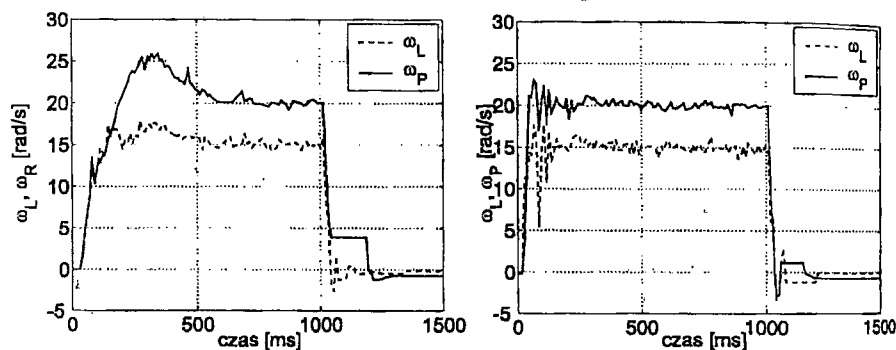
i przywracania nastaw domyślnych K_p/K_d regulatorów oraz wybór sposobu wymuszenia napięciowego lub prądowego dla napędów. Ostatnią dostępną opcją jest zerowanie układu pomiaru odometrii.

3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH NAPĘDÓW

W celu weryfikacji działania układu regulacji i systemu pomiarowego przeprowadzony został eksperyment, polegający na zbadaniu odpowiedzi robota na wymuszenie skokowe wartości prędkości jego kół. Obiekt poruszał się po płaskiej powierzchni. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem konsoli testowej i transmisji bezprzewodowej dla dwóch trybów pracy regulatora, przyjmując domyślne zestawy parametrów. Dane pomiarowe pobierano z częstotliwością 100 [Hz]. Jako sygnał zadany przyjęto skoki prędkości kątowych kół (wyrażone w [rad/s]) zdefiniowane następująco

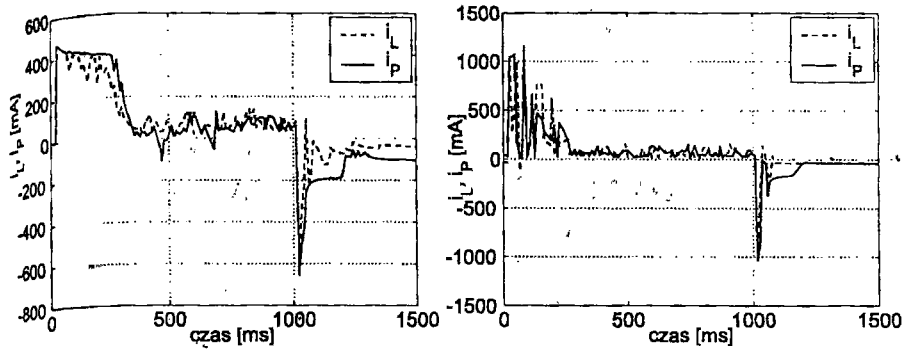
$$\omega_{Ld} = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ 15 & \text{dla } 0 \leq t < 1[s] \\ 0 & \text{dla } t \geq 1[s] \end{cases}, \quad \omega_{Rd} = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ 20 & \text{dla } 0 \leq t < 1[s] \\ 0 & \text{dla } t \geq 1[s] \end{cases}. \quad (3)$$

Maksymalną wartość natężenia prądów ograniczono na poziomie 1 [A].



Rys. 10. Prędkości kątowe przy wymuszeniu napięciowym (rys. lewy) oraz prądowym (rys. prawy)

Uzyskane wyniki wskazują na zasadniczo inny charakter przebiegów przejściowych uzyskanych w trybie wymuszenia napięciowego oraz prądowego. Już na etapie projektowym przyjęto, że pierwszy wymieniony tryb pracy powinna cechować stosunkowo duża „elastyczność” odpowiedzi układu regulacji. Pozwala to ograniczyć przyspieszenia (rys. 10), a tym samym zmniejszyć występowanie poślizgów kół z powierzchnią. Określone na podstawie pomiarów wartości przyspieszeń są rzędu 120 [rad/s²]. Drugi tryb pracy domyślnie cechuje znacznie krótszy czas ustalania się odpowiedzi i wielokrotnie większe przyspieszenia rzędu 650 [rad/s²]. W trybie tym ze względu na występowanie większych momentów chwilowych dochodzi często do utraty przyczepności kół z podłożem, co potwierdza obserwacja przebiegu prądów silników (rys. 11). Dla trybu z wymuszeniem napięciowym zarówno wartość natężenia prądu jak i szybkość jego zmian są znacznie mniejsze niż dla wymuszenia prądowego.



Rys. 11. Prądy tworników przy wymuszeniu napięciowym (rys. lewy) oraz prądowym (rys. prawy)

PODSUMOWANIE

Planowane jest rozszerzenie prezentowanej konstrukcji polegające m.in. na modyfikacji sterownika. Pozwoli to na realizację algorytmów sterowania wyższego poziomu, których sterującymi sygnałami wyjściowymi są momenty sił lub napięcia tworników napędów. W tym celu należy zapewnić zwiększenie przepustowości łącza komunikacyjnego na co pozwalają m. in. technologie IrDA [3] oraz BlueTooth.

Zwiększenie możliwości pomiarowych będzie polegać na wyposażeniu robota w dodatkowy zestaw czujników bezwładnościowych oraz wykorzystaniu zewnętrznego systemu wizyjnego do korekcji danych pozyskanych przez odometrię robota.

LITERATURA

- [1] D. Dobroczyński, P. Dutkiewicz, T. Jedwabny, K. Kozłowski, J. Majchrzak, G. Niwczyk: *Nonholonomic motion planing for a set of mobile robots*; MMAR, Mathematical Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje 2000, str. 599-604.
- [2] L. Feng, J. Borenstein, H. Everett: *Where am I, Sensors and Methods for Autonomous Mobile Robot Positioning*, Technical Report, University of Michigan, 1994.
- [3] T. Jedwabny, M. Kowalski, J. Majchrzak, G. Wiczyński, *Układ zdalnego sterowania minirobotem mobilnym*, Mat. VII Konf. Nauk. COE2002, Rzeszów
- [4] T. Kaczmarek, *Napęd elektryczny robotów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1998.
- [5] J. Kelemen, A. Kubik: *Robots and agents in basic computer science curricula*, Proceedings of the third IEEE Workshop on Robot Motion and Control, 2002, str. 309-317.
- [6] G. Oriolo, A. De Luca, M. Vendittelli: *WMR Control Via Dynamic Feedback Linearization: Design, Implementation, and Experimental Validation*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 10, no. 6, November 2002, str. 835-852.