

DWUKOŁOWY NIEHOLONOMICZNY ROBOT MOBILNY

Opisano model robota mobilnego, który został zaprojektowany i wykonany jako dwukołowy wózek bez dodatkowych punktów podparcia. Stanowi on samodzielne stanowisko do badania algorytmów sterowania obiektem nieholonomicznym z uwarunkowaniami dynamicznymi. Przekazywanie napędu z wykorzystaniem grawitacji wymaga uwzględniania parametrów dynamicznych robota przy rozwiązywaniu zadania nawigacji. Opisany wózek może znaleźć zastosowanie jako tani i niezawodny robot inspekcyjny.

TWO-WHEEL NONHOLONOMIC MOBILE ROBOT

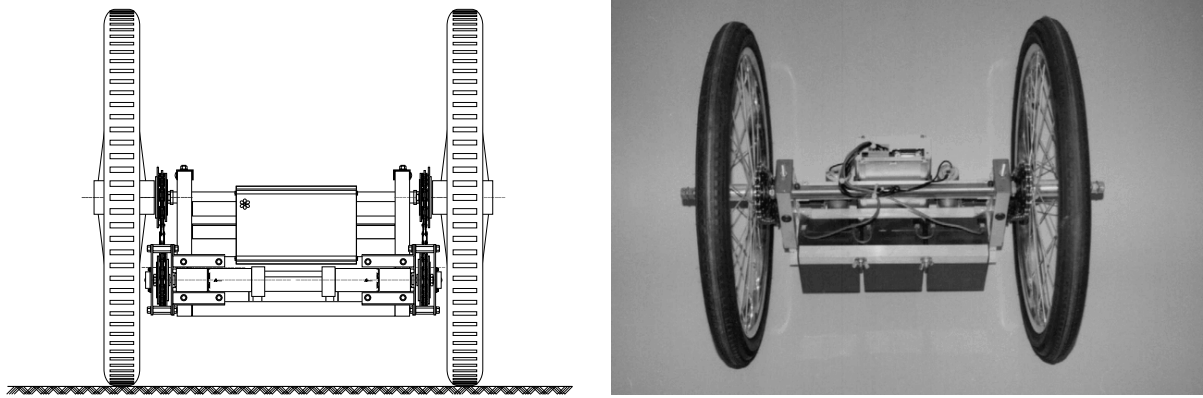
A mobile robot, designed and built as a two-wheel cart with no additional support points is described. It provides an experimental stand for implementing and testing control algorithms for nonholonomic objects with dynamic conditioning. The role played by the gravitation in the cart drive solution implies a necessity of considering the cart dynamics while solving the navigation problem. The described cart can find an application as a cheap and reliable inspection robot.

1 KONSTRUKCJA MECHANICZNA

Skonstruowany robot mobilny ma postać wózka, poruszającego się na dwóch kołach, bez dodatkowych punktów styku z podłożem. Koła są napędzane względem korpusu, który jest zawieszony, jako wahadło o jednym stopniu swobody, na wspólnej osi kół. Środek masy całego wózka w stanie spoczynku jest położony poniżej osi kół.

Zastosowano dwa typowe, 20-calowe koła rowerowe wraz z przekładniami łańcuchowymi. Osie piast połączono stalowym prętem, tworząc w ten sposób główną oś wózka, na której został zamontowany jego korpus (rys. 1).

Korpus wózka został wykonany z kształtowników z lekkich stopów połączonych przez nitowanie. Ma on postać ramy z poprzeczkami, do której są zamocowane



Rysunek 1: Widok ogólny modelu wózka

zespoły napędowe, akumulatory i kasetka sterownika. W szczelinie pomiędzy belkami korpusu jest umieszczona oś wózka. W czasie pracy jest ona nieruchoma względem korpusu, natomiast śruby służące do jej mocowania są wykorzystywane przy regulacji napędów do kasowania luzów przekładni łańcuchowych (napinania łańcuchów).

Oba koła są napędzane niezależnie. Użyto dwóch silników prądu stałego z trwałymi magnesami. Wraz z koderami i przekładniami stanowią one moduły, z których napęd jest przekazywany za pośrednictwem przekładni łańcuchowych na koła.

Sterownik zmontowano na płytce o wymiarach 160x100mm i wbudowano do kasetki 3U/6TE, która jest zainstalowana w prowadnicach stanowiących mechaniczne połączenie z korpusem.

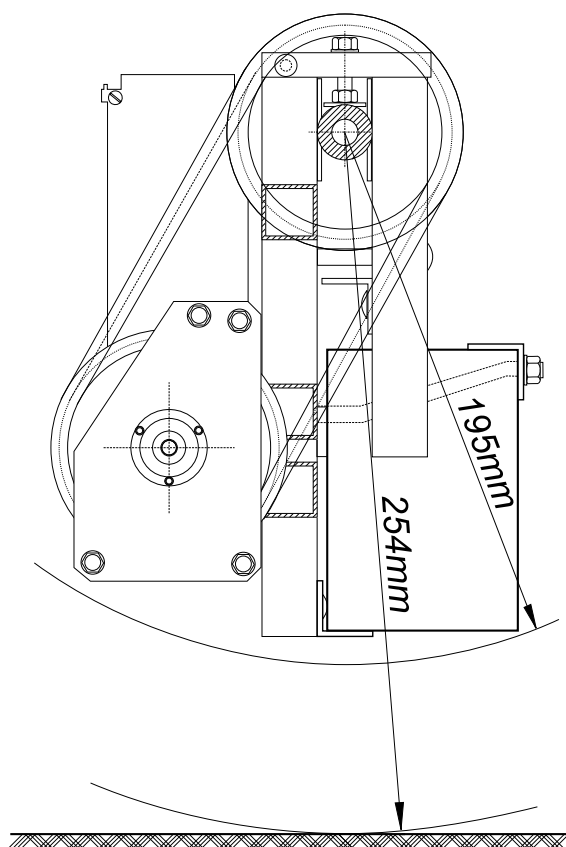
Do zasilania silników wózka zastosowano trzy hermetyzowane akumulatory ołowiowe 12V/4.5Ah połączone szeregowo. Układy elektroniczne sterownika są zasilane napięciem 5V uzyskanym przy pomocy przetwornicy impulsowej.

1.1 Napędy

Po doświadczeniach z pierwszym modelem wózka, w którym użyto silników prądu stałego z trwałymi magnesami i przekładni ślimakowych [2], [3] zmieniono moduły napędowe na produkowane przez firmę MAXON zespoły napędowe złożone z:

- silników prądu stałego A-max32 o mocy 20W,
- przekładni planetarnych GP32 o przełożeniu 1:66,
- koderów przyrostowo-impulsowych HEDS_55 o rozdzielczości 500 impulsów/obrót.

Zespoły napędowe są przymocowane do korpusu wózka w taki sposób, że ich osie są równoległe do głównej osi wózka. Przeniesienie napędu na koła odbywa się przy pomocy łańcucha rowerowego (rys. 2).



Rysunek 2: Prześwit pomiędzy korpusem a podłożem

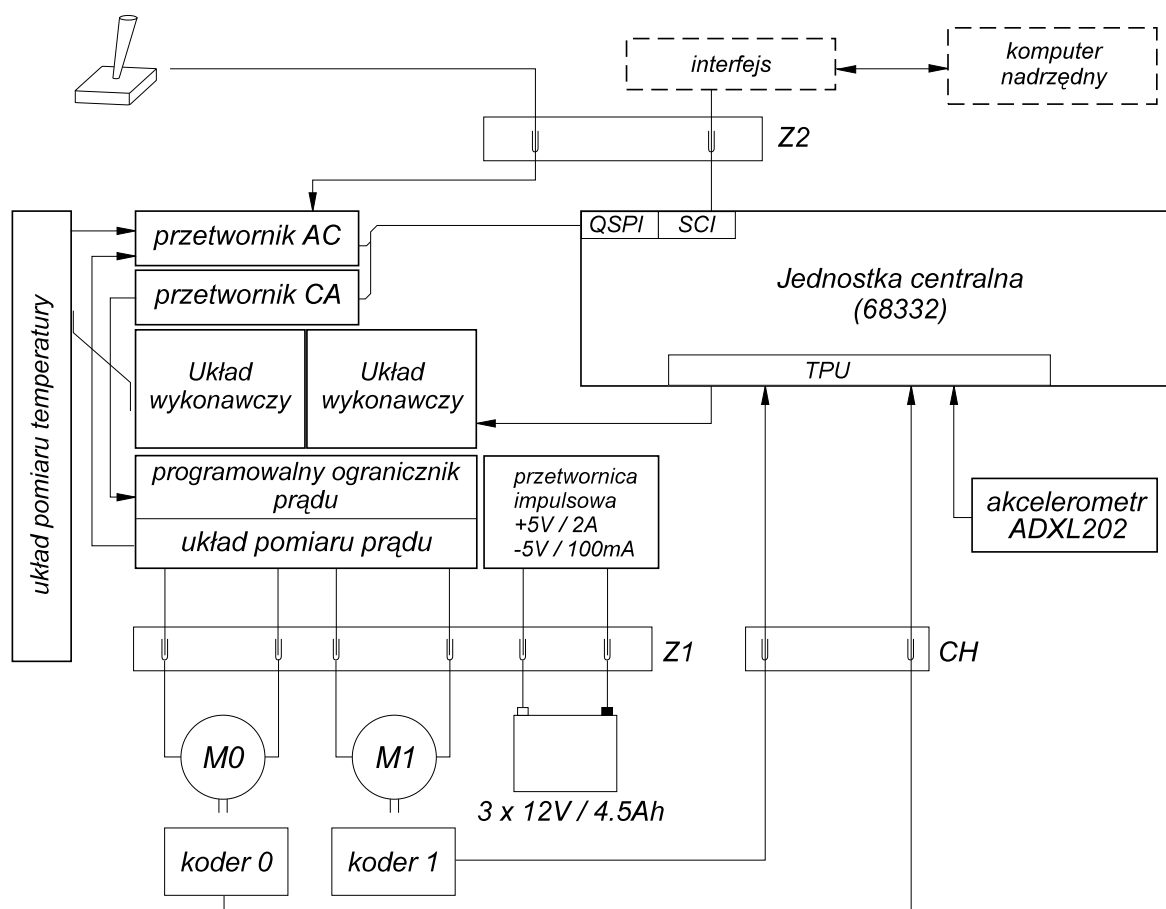
Każde z kół wózka jest wyposażone w potrójne koło łańcuchowe, identyczne jak przy zespole napędowym. Dzięki przeciwstawnemu ustawieniu stożków kół łańcuchowych uzyskano możliwość dobierania w niewielkim zakresie przełożeń ($20:16 = 1.25$; $18:18 = 1.0$; $16:20 = 0.8$).

Położenie korpusu wózka względem podłoża pokazano na rys. 2. Wielkość prześwitu (59mm) pozwala na poruszanie się wózka w obecności niewielkich nierówności powierzchni.

2 KONSTRUKCJA STEROWNIKA

Wózek został wyposażony w sterownik [3] pozwalający uzyskać pełną autonomię pojazdu. Wszystkie funkcje sterowania i obsługi czujników są wykonywane lokalnie. Komunikacja z komputerem nadrzędnym i (ewentualnie) z

operatorem służy do zadawania parametrów ruchu, modyfikowania oprogramowania sterownika, odczytywania parametrów ruchu i pomiarów z czujników. Schemat blokowy sterownika przedstawiono na rys. 3.



Rysunek 3: Schemat blokowy sterownika

Podstawowe bloki funkcjonalne to:

- jednostka centralna,
- układy wykonawcze z pomiarem i programowalnym ogranicznikiem prądu,
- układ odczytu koderów impulsowych,
- przetworniki CA i AC,
- układ pomiaru temperatury radiatora,
- akcelerometr dwuosiowy,
- przetwornica impulsowa.

2.1 Mikrokontroler

Jako jednostkę centralną sterownika zastosowano MC68332 [5], mikrokontroler firmy Motorola posiadający bogate zasoby:

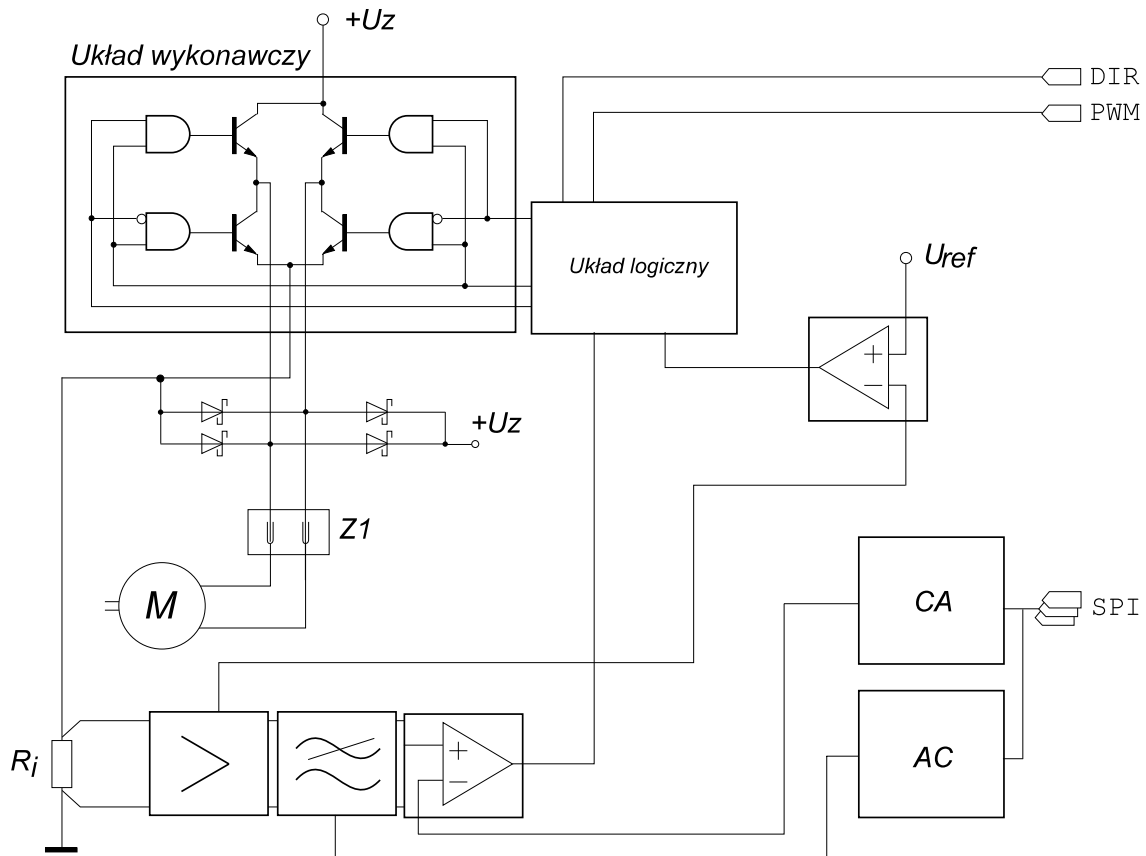
- jednostka centralna CPU32 - 32-bitowy procesor o niewielkim poborze mocy (max. 600 mW), wykorzystujący do generacji zegara pętlę PLL oraz ogólnie dostępny oscylator kwarcowy 32768 Hz,
- mikroprogramowany układ czasowy (*TPU - Time Processing Unit*) zawierający 16 niezależnych kanałów, które mogą pracować w wielu trybach (w tym również zdefiniowanych przez użytkownika) dostarczanych przez producenta (Motorola) w dwóch wersjach mikro kodu dla TPU (uniwersalnej *G - General purpose* i motoryzacyjnej *A - Automotive*),
- dwa podsystemy komunikacji szeregowej - rozszerzony interfejs komunikacji (uniwersalny asynchroniczny nadajnik/odbiornik transmisji *SCI - Serial Communication Interface*) oraz rozszerzony, szeregowy, peryferyjny interfejs kolejkowy do komunikacji synchronicznej z urządzeniami wejścia/wyjścia (*QSPI - Queued Serial Peripheral Interface*),
- 2kB pamięci statycznej RAM, która może być wykorzystana do współpracy z CPU lub jako pamięć mikro kodu dla TPU w przypadku tworzenia własnych funkcji czasowych,
- programowalny układ dekodera adresów umożliwiający wybór do 12 urządzeń zewnętrznych lub pamięci bez jakichkolwiek dodatkowych układów.

Umożliwiają one konstruowanie efektywnych sterowników, nie wymagających dużej ilości układów towarzyszących.

Wprowadzony w mikrokontrolerach rodziny 68300 tryb wbudowanej emulacji (*BDM - Background Debug Mode*) pozwala wygodnie uruchamiać sprzęt i oprogramowanie za pośrednictwem prostego interfejsu szeregowego [5].

2.2 Układy wykonawcze do sterowania silnikami

Schemat stopnia mocy dla jednego z silników przedstawiono na rys. 4. Silniki prądu stałego z trwałymi magnesami są zasilane przez mostkowy układ kluczujący sterowany sygnałami kierunku (*DIR*) i wypełnienia (*PWM*) za pośrednictwem prostego układu logicznego.



Rysunek 4: Schemat stopnia mocy dla modułu napędowego

Bieżąca wartość prądu silnika jest przetwarzana na napięcie na rezystorze pomiarowym i po wzmocnieniu wykorzystywana do:

- ograniczenia wartości chwilowej prądu silnika – przez porównanie z wartością progową U_{ref} ,
- pomiaru średniej wartości prądu – przez doprowadzenie odfiltrowanego sygnału do wejścia przetwornika AC,
- ograniczenia wartości średniej prądu silnika – przez porównanie z zadaną wartością (z przetwornika CA).

Oba przetworniki są przyłączone przez interfejs SPI i są obsługiwane za pomocą bloku QSPI mikrokontrolera MC68332. Zaletą QSPI jest możliwość odciążenia CPU od komunikacji z układami zewnętrznymi (w sterowniku cykliczny odczyt poszczególnych kanałów przetwornika AC odbywa się automatycznie).

Do generacji sygnałów sterujących prędkościami silników (przez zadawanie napięcia) został wykorzystany blok TPU [7]. Funkcja PWM pozwala na generację przebiegu prostokątnego o zadanym wypełnieniu i okresie. Do sterowa-

nia prędkością silników został zastosowany sygnał o częstotliwości 400Hz co pozwala na 655-stopniową regulację sygnału sterującego.

Stopień mocy wraz z układem ograniczenia prądu pozwala na zastosowanie dwóch trybów sterowania:

- napięciowego - *PWM* zadaje napięcie zasilające silnik (sterowanie prędkością), ograniczenie prądu jest zadawane z przetwornika CA,
- prądowego - wartość prądu jest zadawana z przetwornika CA (sterowanie momentem napędowym), *PWM* zadaje ograniczenie prędkości.

Kierunek ruchu silnika jest ustalany sygnałem binarnym *DIR*.

2.3 Odczyt parametrów ruchu kół

Parametry ruchu kół wózka są mierzone przy pomocy obrotowych przetworników przyrostowo–impulsowych HEDS_55 o rozdzielczości 500 impulsów na obrót, sprzężonych z osiami silników. Bieżące położenie uzyskuje się przez zliczanie zboczy sygnałów kwadraturowych z przetworników w liczniku rewersyjnym z uwzględnieniem kierunku obrotów.

Układ licznikowo-czasowy mikrokontrolera MC68332 (TPU) zawiera funkcję QDEC (*Quadrature Decode*) [7], która pozwala zrealizować odpowiedni licznik wraz z analizą kierunku obrotów. Dzięki uwzględnieniu wszystkich zboczy sygnału kwadraturowego uzyskuje się rozdzielczość 2000 działek na obrót osi silnika. Do realizacji odczytu pozycji z dwóch koderów wykorzystano 4 z 16 dostępnych kanałów TPU.

2.4 Pomiar odchylenia korpusu od pionu

Do pomiaru położenia kąтового względem pionu wykorzystano pomiar przyspieszeń w lokalnym układzie współrzędnych wahadła [2].

W modelu zastosowano dwuosiowy akcelerometr ADXL202 o rozdzielczości 5mg i zakresie pomiarowym $\pm 2g$. Sygnał wyjściowy akcelerometru ma postać przebiegu prostokątnego o wypełnieniu zależnym od aktualnej wartości przyspieszenia zmierzonego przez układ.

Sygnały z akcelerometru są dekodowane w układzie mikrokontrolera 68332 przez działający autonomicznie blok TPU. Wykorzystana została do tego celu funkcja PPWA (*Period/Pulse-Width Accumulator*) [7], pozwalająca mierzyć zarówno okres, jak i wypełnienie przebiegu prostokątnego. Takie rozwiązanie

odciąża jednostkę centralną od czasochłonnych operacji związanych z dekodowaniem sygnałów pomiarowych.

2.5 Komunikacja z otoczeniem

Do komunikacji robota mobilnego z otoczeniem wykorzystano układ szeregowej transmisji asynchronicznej SCI [6], dostępny w MC68332. Pozwala on przesyłać dane i komendy pomiędzy sterownikiem autonomicznego robota a komputerem nadrzędnym.

Sygnały danych nadawanych (*TxD*) i odbieranych (*RxD*) wyprowadzono na złącze komunikacyjne bez buforowania. Dzięki temu można zastosować różne nośniki fizyczne transmisji:

- przewód 3-żyłowy z konwerterem TTL/RS-232,
- bezprzewodowy układ transmisji IrDA, oparty na podczerwieni,
- modem radiowy.

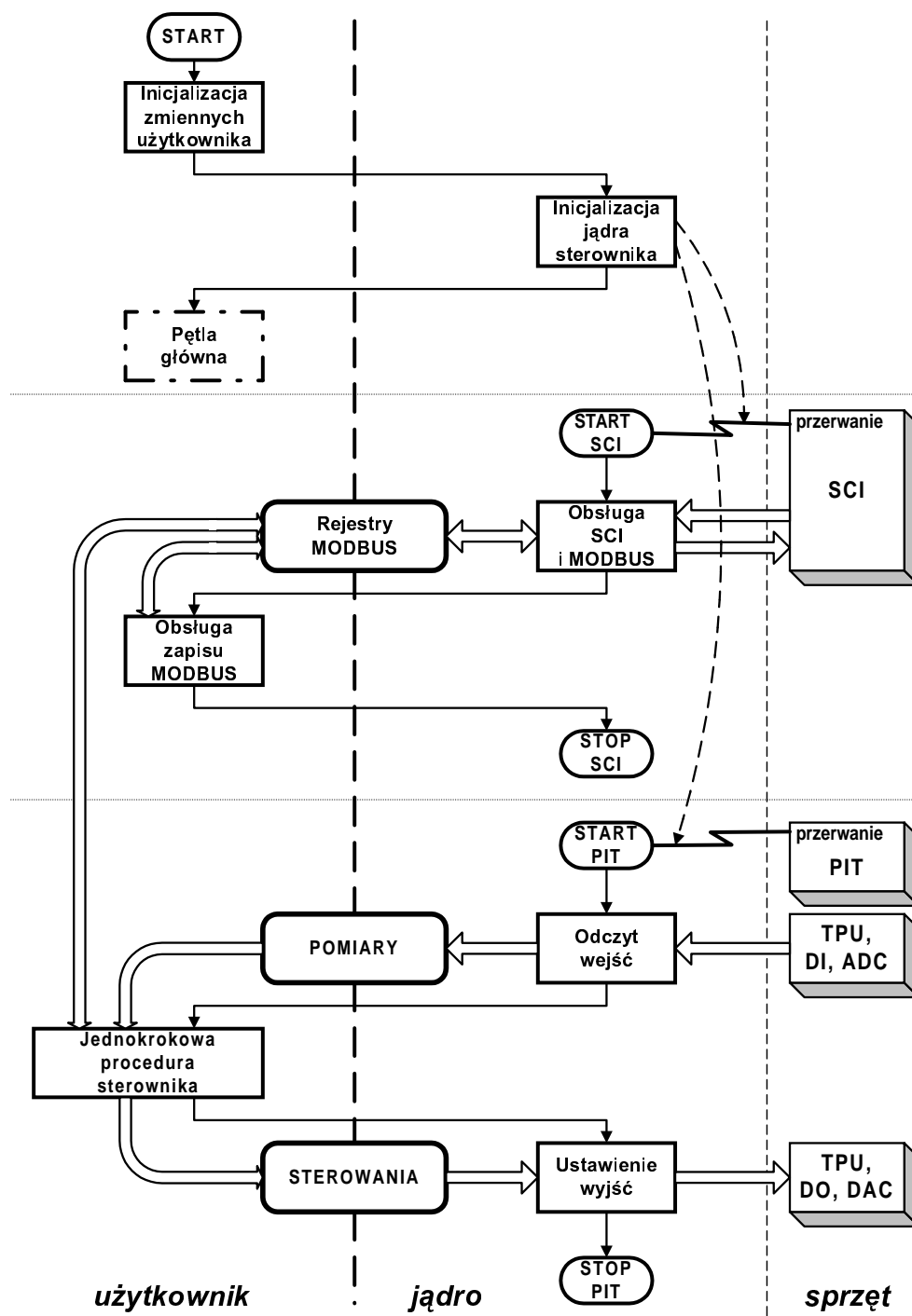
Można również bezpośrednio przyłączyć typowy joystick analogowy. Odczyt jego położenia jest zapewniony dzięki doprowadzeniu odpowiednich sygnałów do przetwornika analogowo-cyfrowego.

3 OPROGRAMOWANIE STEROWNIKA

Oprogramowanie sterownika może być tworzone przez użytkownika w języku C. Wykorzystano koncepcję swobodnie programowalnego sterownika [1], która umożliwia użytkownikowi łatwe implementowanie własnych algorytmów sterowania w taki sposób, by mogły one pracować w sterowniku autonomicznego robota mobilnego (rys. 5).

Aby zwolnić eksperymentatora z obowiązku szczegółowej znajomości zastosowanego w sterowniku sprzętu, przygotowano jądro sterownika, które obejmuje:

- procedury inicjalizacji sprzętu i globalnych struktur danych;
- obsługę komunikacji z otoczeniem w standardzie MODBUS;
- obsługę cyklicznego przerwania, w czasie której następuje kolejno:
 - odczyt sygnałów z obiektu,
 - wywołanie procedury realizującej jeden krok algorytmu użytkownika,
 - ustawienie wyliczonych sygnałów sterujących.



Rysunek 5: Struktura oprogramowania sterownika

Użytkownik, chcąc zrealizować własny algorytm sterowania, musi napisać w języku C:

- procedurę inicjalizacji własnych zmiennych roboczych;
- jednokrokową procedurę, która na podstawie bieżących wartości dostępnych w sterowniku pomiarów wylicza wartości sygnałów sterujących;

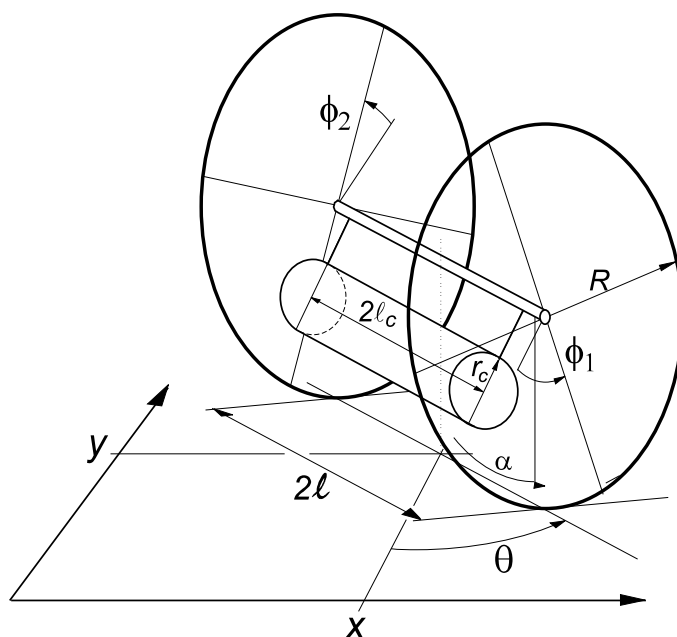
- procedurę reagującą na zdalny wpis do wybranych według własnych potrzeb rejestrów MODBUS.

Utworzenie kompletnego programu polega na dokonaniu kompilacji przy pomocy narzędzi skrośnych pracujących na komputerze klasy PC.

Wynikowy program może zostać załadowany do pamięci EEPROM jednostki centralnej sterownika za pośrednictwem łącza szeregowego i uruchomiony po zrestartowaniu sterownika.

4 MODEL DYNAMIKI WÓZKA DWUKOŁOWEGO

Przy wyprowadzeniu modelu przyjęto, że koła mają masy m_k równomiernie rozłożone na swoich obwodach, promień każdego z kół wynosi R , oś łącząca koła ma długość $2d$, masę m_o i zerowy moment bezwładności względem osi obrotu kół, wahadło ma postać jednorodnego walca o masie m_c i długości $2\ell_c$ zawieszono w odległości ℓ od osi kół, symetrycznie względem nich.



Rysunek 6: Współrzędne modelu dynamiki wózka.

Jako zmienne stanu (rys. 6) przyjęto: x, y – położenie wózka w układzie globalnym, α – wychylenie wahadła od pionu, ϕ_1, ϕ_2 – kąty obrotu kół względem wahadła, η_1, η_2, η_3 – prędkości pomocnicze (η_1, η_2 odpowiadają prędkościom liniowym w punktach styku kół z podłożem, a η_3 – prędkości liniowej środka masy wahadła) [4]. W modelu założono, że opory obrotu kół względem korpusu mają charakter tarcia lepkiego o współczynnikach k_1 i k_2 , a opór powietrza

pominięto. Wykorzystując formalizm lagranżowski i uwzględniając ograniczenia fazowe związane z brakiem poślizgu kół uzyskano następujący model dynamiki wózka:

$$\begin{aligned} & \left(\left(m_c + \frac{4}{3}m_o + 8m_k \right) d^2 + m_k R^2 + m_c \left(\ell^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{3}\ell_c^2 + \frac{1}{2}r_c^2 \right) \right) \dot{\eta}_1 + \\ & + \left(\left(m_c + \frac{2}{3}m_o \right) d^2 - m_k R^2 - m_c \left(\ell^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{3}\ell_c^2 + \frac{1}{2}r_c^2 \right) \right) \dot{\eta}_2 + \\ & + \left(m_o + m_c + 4m_k + \frac{m_c \ell}{R} \cos \alpha \right) d^2 \dot{\eta}_3 - \frac{m_c d^2 \ell \sin \alpha}{R^2} \eta_3^2 + \frac{4d^2 k_1}{R^2} \eta_1 + \\ & - m_c \ell \sin \alpha (2\eta_2 + \eta_3) (\eta_2 - \eta_1) - \frac{2m_c \ell^2}{R} \sin \alpha \cos \alpha \eta_3 (\eta_2 - \eta_1) = \frac{2d^2}{R} u_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\left(m_c + \frac{2}{3}m_o \right) d^2 - m_k R^2 - m_c \left(\ell^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{3}\ell_c^2 + \frac{1}{2}r_c^2 \right) \right) \dot{\eta}_1 + \\ & + \left(\left(m_c + \frac{4}{3}m_o + 8m_k \right) d^2 + m_k R^2 + m_c \left(\ell^2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{3}\ell_c^2 + \frac{1}{2}r_c^2 \right) \right) \dot{\eta}_2 + \\ & + \left(m_c + m_o + 4m_k + \frac{m_c \ell}{R} \cos \alpha \right) d^2 \dot{\eta}_3 - \frac{m_c d^2 \ell \sin \alpha}{R^2} \eta_3^2 + \frac{4d^2 k_2}{R^2} \eta_2 + \\ & + m_c \ell \sin \alpha (2\eta_1 + \eta_3) (\eta_2 - \eta_1) + \frac{2m_c \ell^2}{R} \sin \alpha \cos \alpha \eta_3 (\eta_2 - \eta_1) = \frac{2d^2}{R} u_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(m_c + m_o + 4m_k + \frac{m_c \ell}{R} \cos \alpha \right) d^2 \dot{\eta}_1 - \frac{m_c \ell \sin \alpha}{R} (\eta_2 - \eta_1)^2 (R + \ell \cos \alpha) + \\ & + \left(m_c + m_o + 4m_k + \frac{m_c \ell}{R} \cos \alpha \right) d^2 \dot{\eta}_2 - \frac{m_c \ell d^2}{R^2} \sin \alpha \eta_3^2 + \\ & + \left(m_c + m_o + 4m_k + \frac{2m_c \ell}{R} \cos \alpha + \frac{m_c}{R^2} \left(\ell^2 + \frac{1}{2}r_c^2 \right) \right) d^2 \dot{\eta}_3 + \frac{m_c g \ell d^2}{R} \sin \alpha = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \cos \left(\frac{R}{2d} (\phi_2 - \phi_1) \right), \quad \dot{y} = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \sin \left(\frac{R}{2d} (\phi_2 - \phi_1) \right), \\ \dot{\phi}_1 &= \frac{2}{R} \eta_1, \quad \dot{\phi}_2 = \frac{2}{R} \eta_2, \quad \dot{\alpha} = \frac{1}{R} \eta_3. \end{aligned}$$

Przedstawiony model dynamiki zostanie wykorzystany w algorytmach sterowania robota mobilnego. Aktualnie są prowadzone badania nad algorytmem linearyzacji dynamicznej [4].

5 UWAGI KOŃCOWE

Opisane stanowisko pozwala badać algorytmy sterowania ruchem robota mobilnego w oparciu o napęd względem wewnętrznego układu współrzędnych, a także algorytmy nawigacji wykorzystujące dane z sensorów.

Dalsze rozszerzenie możliwości wózka może wyniknąć z zastosowania jednostki centralnej o większej mocy obliczeniowej. Przewidziano zastosowanie mikrokontrolera MPC555 z jednostką centralną RISC (PowerPC), dwoma blokami TPU, interfejsami szeregowymi, przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Jednostka centralna jest wyposażona w szybki układ zmiennoprzecinkowy, co ma szczególne znaczenie przy realizacji złożonych algorytmów sterowania. Alternatywnym rozwiązaniem może być wykorzystanie procesora sygnałowego DSP56F805, który jest dobrze przystosowany do implementowania sterowników napędu.

Opracowany wózek dwukołowy, dzięki prostocie konstrukcji i odporności mechanicznej (praktyczna niewywrotność), nie tylko może być laboratoryjnym stanowiskiem badawczym, lecz także (po wyposażeniu w odpowiednie czujniki – np. kamery) może pełnić rolę autonomicznego robota inspekcyjnego.

Bibliografia

- [1] Gora S., Wnuk M., *VFMC - swobodnie programowalny sterownik napędu robota*, Raport SPR 13/97, Inst. Cyb. Techn. PWr, 1997,
- [2] Kabała M., Tchoń K., Wnuk M., *Robot mobilny napędzany w układzie wewnętrznym*, VII KKR, Łądek Zdrój, 2001, Prace Naukowe ICT PWr., Konferencje 46, t.1, ss. 149-158.
- [3] Kabała M., Wnuk M., *Dwukołowy robot mobilny napędzany w układzie wewnętrznym*, Raport SPR 21/2001, Inst. Cyb. Techn. PWr, 2001.
- [4] Tchoń K. i in. *Manipulatory i roboty mobilne*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 2000.
- [5] *MC68332 User's Manual*, MC68332UM/AD, Motorola Inc., 1991.
- [6] *Queued Serial Module Reference Manual*, QSMRM/AD, Motorola Inc., 1991.
- [7] *Time Processor Unit Reference Manual*, TPURM/AD, Rev.3, Motorola Inc., 1996.