

doi:10.15199/48.2015.01.10

Robot inspekcyjny

Streszczenie. Praca przedstawia konstrukcję prototypu robota inspekcyjnego. Na chwilę obecną operator ma możliwość zdalnego sterowania pracą robota - płynne poruszanie w płaszczyźnie poziomej (zmiana kierunku geograficznego, przemieszczanie się z punktu do punktu) unikanie kolizji z przeszkodami. Solidna konstrukcja gwarantuje odporność na uszkodzenia mechaniczne, a ergonomicznie zaprojektowany panel operatora, zapewnia wygodną i intuicyjną obsługę wszystkich modułów.

Abstract. The paper presents design of inspection robot. To date, the operator has the ability to seamlessly move and maneuver both horizontal (geographic change in direction, moving from point to point) avoiding collisions with obstacles. Solid construction provides resistance to mechanical damage, and the ergonomically designed operator panel, offers a convenient and intuitive use of all modules. (**Inspection robot**)

Słowa kluczowe: robot mobilny, czujniki, sterownik robota
Keywords: mobile robot, sensors, robot controller

Wstęp

W dzisiejszych czasach coraz częściej mówi się o istotnej roli jaką pełni robotyka w codziennym życiu. Inżynierowie różnych dziedzin starają się ciągle udoskonalać dostępne na rynku produkty poprzez wymianę swoich doświadczeń i wiedzy już na etapie tworzenia produktu. Obecnie najsilniej rozwijaną gałęzią robotyki jest robotyka mobilna. Szczególny nacisk kładziony jest na rozwój robotów, które mają wspomagać ludzi w różnych pracach na przykład inspekcja obiektów hydrotechnicznych [15, 17, 18], elektrowni [8], w zastosowaniach zwiadowczych [9]. W artykule zostaną poruszone istotne aspekty konstrukcji robota mobilnego, którego głównym zadaniem będzie dokonywanie inspekcji otoczenia.

W pracy [4] zawarto wszystkie niezbędne do zrozumienia sposobu działania robota zagadnienia teoretyczne. W tym celu zapoznano się z dostępnymi już rozwiązaniami i starano się zrealizować możliwie jak najwięcej zalet każdego z nich we własnym projekcie. Niewątpliwie ważnym kryterium wyboru był stosunek jakości do ceny. Nie wykluczonym jest, że możliwe byłoby zastosowanie lepszych podzespołów, lecz projekt nie ma charakteru komercyjnego. Wykonana elektronika oraz aplikacje miały pozwolić na zbadanie podstawowych właściwości robota o symetrycznej budowie umożliwiającej zachowanie stałego kierunku jazdy po wykonaniu obrotu o 180° . W tym celu został on wyposażony w czujniki różnego rodzaju pozwalające na detekcję wykonanego obrotu oraz na bezawaryjną i bezkolizyjną jazdę w zadanym otoczeniu.

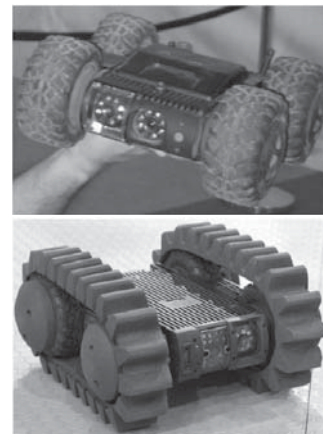
Poniżej przedstawione zostanie kilka rozwiązań robotów inspekcyjnych dostępnych komercyjnie. Taktyczny Robot Miotany to małe urządzenie do zastosowań wspomagających operacje prowadzone w trudno dostępnym i niebezpiecznym otoczeniu [9]. PIAP TRM powstał jako odpowiedź na zagrożenia, jakie niesie ze sobą rozpoznanie terenu i obiektów prowadzone przez jednostki odpowiedzialne za bezpieczeństwo publiczne. Wygląd robota wraz z dedykowaną stacją bazową przedstawiono na rysunku 1.

Robot EyeDrive jest produktem o zastosowaniu militarnym (rys. 2). Należy zwrócić na jego przykładzie uwagę na kilka istotnych aspektów i zastosowań robotyki mobilnej. Konstrukcja ta jest stworzona przede wszystkim do dokonywania inspekcji pomieszczeń i terenu [10, 11]. Firma ODF Optronics Ltd. dołącza do robota komputer przenośny wraz z dedykowanym oprogramowaniem, moduł komunikacyjny oraz zewnętrzną ładowarkę wraz z zapasowymi pakietami. Jeden moduł komunikacyjny i komputer są w stanie jednocześnie obsłużyć dwa roboty. W zależności od środowiska, w którym będzie zastosowany EyeDrive jest dostępna także wersja z



Rys. 1. Taktyczny robot miotany www.piap.pl

napędem gąsienicowym (rys. 2). Roboty tego typu nazywane są często ROV (ang. Remotely Operated Vehicle) [12, 17].



Rys. 2. Roboty EyeDrive z napędem kołowym i gąsienicowym www.odfopt.com/eyedrive/Eye_Drive_home.html

Przytoczone przykłady dostępnych na rynku rozwiązań jedynie potwierdzają bogatą gamę zastosowań robotyki mobilnej. Zaprezentowane przykłady nie wyczerpują wszystkich możliwych rozwiązań konstrukcyjnych dostępnych na rynku. Coraz więcej firm angażuje się w tą dziedzinę technologii co jest potwierdzeniem, na ile aktualny jest temat niniejszej publikacji. Oprócz poparcia niektórych też przykłady te, także będą miały bezpośrednie odzwierciedlenie w zaprezen-

wanym projekcie. Prawidłowym kierunkiem wydaje się połączenie dostępności i niskiej ceny robota wraz z wytrzymałością i jakością wykonania. O ile zapewnienie funkcji zdalnego operatora wydaje się jednym z fundamentalnych założeń, nie można zapominać też o tym jak istotne jest zapewnienie autonomiczności platformy mobilnej. Oba te założenia mają swoje konsekwencje w projekcie. Funkcja zdalnego sterowania wymusza zastosowanie komunikacji bezprzewodowej na duże odległości, natomiast autonomiczność wymaga szerokiego spektrum informacji zwrotnych z środowiska zewnętrznego. Informacje te pozyskamy poprzez zastosowanie odpowiedniego systemu czujników.

Robot inspekcyjny - ogólna charakterystyka

Główne pojęcia mające wpływ na postawione cele projektowe to: mobilność, autonomiczność, inspekcja oraz przystępność. Zapewnienie tych funkcji lub cech ma swoje bezpośrednie odzwierciedlenie w założeniach projektowych, dlatego też należało przyjrzeć się im dokładniej. Poprzez mobilność platformy rozumiemy swobodne i dowolne zmiany jej położenia w konkretnej przestrzeni. Niniejsza praca ograniczy się do mobilności w środowisku lądowym a w szczególności pomieszczeniach zamkniętych. Oprócz umożliwienia użytkownikowi funkcji zdalnego sterowania platformą pracującą w trybie teleoperatora, należy także zapewnić pewien stopień autonomiczności. Pozwoli ona na wykonywanie konkretnych zadań bez ingerencji użytkownika. Wymusza ona pozyskanie możliwie największej ilości informacji zwrotnych z środowiska o stanie i położeniu robota.

Pojęcie inspekcji również wymusza zastosowanie różnorodnego systemu sensorycznego, jednakże informacje w ten sposób pozyskane nie są już adresowane do samego robota, a użytkownika nadzorującego jego pracę. Na ich podstawie użytkownik dowiaduje się o stanie badanej przestrzeni lub obiektu i planuje dalsze zadania robota.

Ostatnim z wymienionych określeń jest przystępność. Będzie ona miała znaczący wpływ na wybór zastosowanych rozwiązań. Pod tym jednym pojęciem kryją się takie aspekty projektowania jak: łatwość tworzenia oprogramowania, czas wykonania prototypu, stosunek jakości do ceny zastosowanych elementów, dostępność oraz możliwość wykonania projektu bez zastosowania złożonych procesów technologicznych.

Na dobór elementów i materiałów wykorzystanych w projekcie największy wpływ miało ograniczenie odnośnie rozmiarów obudowy. Zgodnie z założeniami projektowymi powinna ona mieścić się w profilu kół i żaden jej element nie powinien wystawać poza całkowity obrys robota. Zapewnienie możliwie dużego prześwitu pod robotem umożliwi jazdę po bardziej nierównym terenie bez obawy, że robot się zawiesi. Istotnym parametrem konstrukcyjnym jest także rozstaw kół. Zwiększenie rozstawu wiąże się z poprawą właściwości jezdnych ale zarazem zwiększa się prawdopodobieństwo zawieszenia się w nierównym terenie.

Zgodnie z założeniami platforma powinna być zwrotna, kompaktowa, lekka oraz nie powinny występować żadne wystające elementy. Aby zmniejszyć wymiary zdecydowano się na zastosowanie silników z zamontowanym na końcu ich wału enkoderem. Wybór padł na rozwiązanie oferowane przez firmę MicroMotors i silnik serii E192 o maksymalnym momencie obrotowym $0,6 [Nm]$. Na etapie prac nad projektem zdecydowano się zastosować izolację pola magnetycznego pochodzącego od silników prądu stałego. Pole magnetyczne generowane przez silniki uniemożliwiało prawidłowy pomiar z wykorzystaniem magnetometru. Bez izolacji można było za-

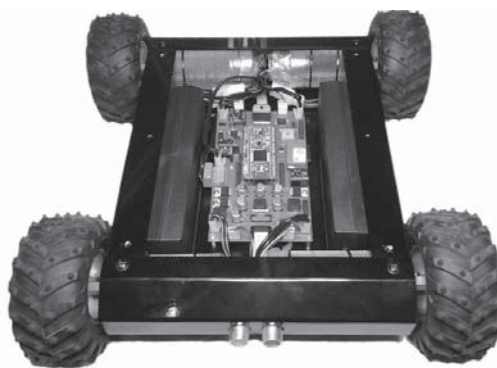
obserwować zniekształcenie prezentowanych przez kompas wyników. Po zapoznaniu się z tematyką wyznaczania kierunków świata z wykorzystaniem magnetometrów cyfrowych najprostszą [5] i najmniej inwazyjną metodą izolacji okazało się ekranowanie silników elektrycznych siatką z materiału przewodzącego o możliwie najmniejszych oczkach. Siatka zamontowana w ten sposób działa jak klatka Faradaya i zamyka linie zewnętrznego pola magnetycznego silników.

Jako, że projekt nie przewidywał zastosowania zawieszania, a jedynie sztywne połączenia z obudową, oczywistym wyborem wydaje się zastosowanie kół wyposażonych w miękkie ogumienie tłumiące drgania od podłoża. Po zapoznaniu się z wieloma rozwiązaniami stosowanymi przez modelarzy RC okazało się, że najodpowiedniejsze będą koła z dużych modeli typu Monster Truck. Charakteryzują się one dużą wytrzymałością, sporymi rozmiarami oraz miękkim ogumieniem, które przy wyborze plastikowych felg może w znaczący sposób wpłynąć na wydłużenie ich żywotności. Z innym podejściem do budowy platformy mobilnej wykorzystującej niezależne zawieszenie wszystkich kół można się zapoznać w [3].

Wszystkie elementy poszycia są wykonane z aluminium o grubości 1,5 [mm] natomiast kątowniki znajdujące się wewnątrz, których zadaniem jest zapewnienie odpowiedniej sztywności konstrukcji są grubości 2 [mm]. Ze względów estetycznych wszystkie elementy zostały pokryte czarnym lakierem samochodowym.

Po zapoznaniu się z wieloma rozwiązaniami związanymi z użytkowaniem akumulatorów litowo-polimerowych postanowiono w celu bezpieczeństwa zamknąć pakiety wewnątrz obudów z tworzywa sztucznego. Ma to zapobiec przypadkowemu przebiciu ogniwi takiego akumulatora. W nocie katalogowej producenta można także przeczytać, że nie zaleca się aby akumulatory te znajdowały się bezpośrednio na materiale przewodzącym.

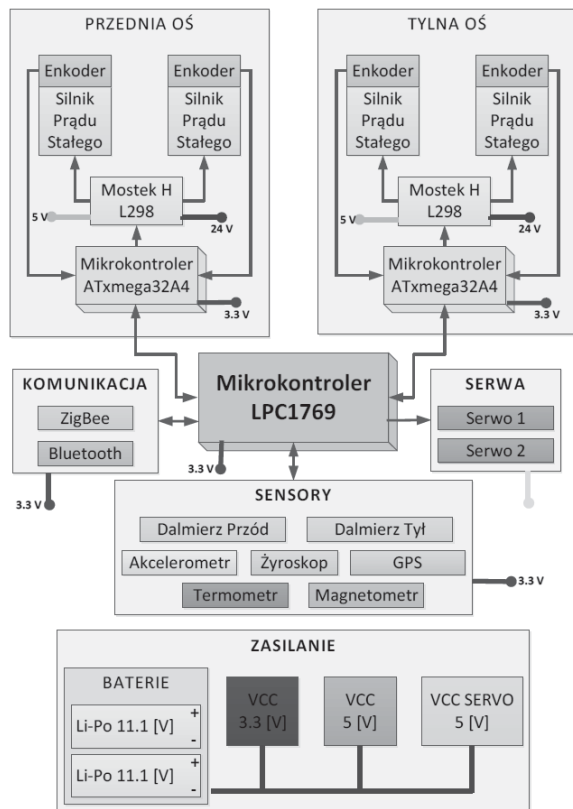
Ostateczny wygląd robota inspekcyjnego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Konstrukcja robota inspekcyjnego

W celu lepszej kontroli nad budową robota inspekcyjnego stworzono poglądowy schemat blokowy (rys. 4) przedstawiający powiązania poszczególnych podzespołów elektronicznych wykorzystanych w czasie realizacji sterownika robota inspekcyjnego oraz sposoby zasilania poszczególnych podzespołów.

Zadaniami oprogramowania mikrokontrolera LPC1769 (NXP) są: zapewnienie stałej i płynnej komunikacji z komputerem klasy PC poprzez sieć ZigBee (Telegesis), nadawanie wartości zadanych dla mikrokontrolerów ATXMEGA odpowiedzialnych za utrzymywanie zadanych prędkości na poszczególnych kołach, konfiguracja i odczyt wskazań wszystkich czujników poprzez interfejs I2C. Do zadań tego mikrokon-

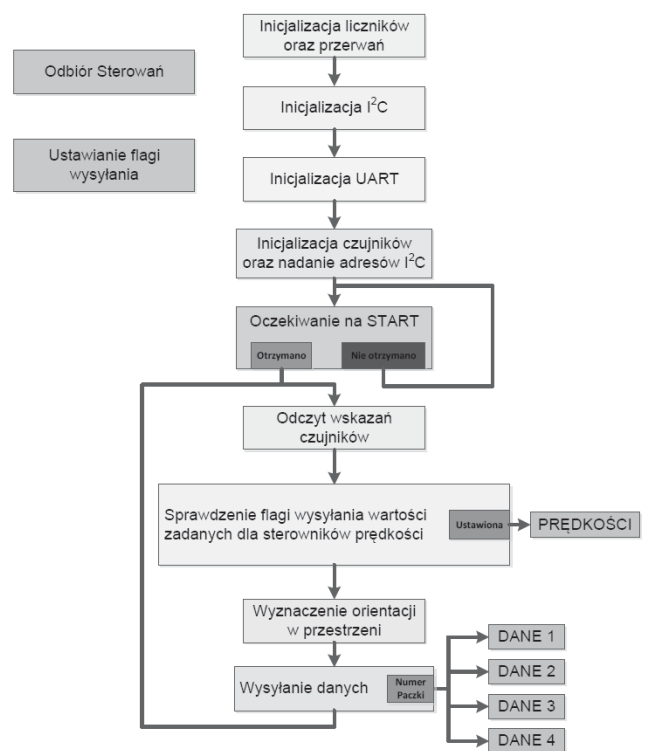


Rys. 4. Poglądowy schemat powiązań elementów elektronicznych

rola mikrokontrolera należy również obliczanie wszystkich ważniejszych zmiennych procesowych. Do jego zadań należy także interpretacja i przeliczanie wskazań czujników na kąty określające orientację robota. Komunikacja z urządzeniem GPS oraz kartą SD jest realizowana z wykorzystaniem interfejsu UART, natomiast wszystkie pozostałe czujniki komunikują się poprzez magistralę I2C. Można także wyróżnić sonary jako czujniki komunikujące się na osobnym wyprowadzeniu magistrali I2C w mikrokontrolerze. Oprogramowanie sterujące dla mikrokontrolera LPC1769 zostało napisane z wykorzystaniem narzędzia LPCXpresso będącego elementem zestawu deweloperskiego. Środowisko to zawiera wszystkie konieczne biblioteki oraz przykłady zastosowań peryferiów. Aplikacja działa zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 5.

Oprogramowanie przeznaczone na mikrokontrolery ATXMega32A4 firmy Atmel realizowało zadania związane z odbieraniem wartości zadanych od mikrokontrolera koordynującego LPC1769 i regulacją prędkości na kołach jednej z osi. Mikrokontroler ten posiada zaletę w stosunku do innych dostępnych na rynku rozwiązań jaką jest sprzętowa implementacja QDEC (Quadrature Decoder). Pozwala ona na odczytywanie przyrostów wartości generowanych przez enkodery inkrementalne niezależnie od pętli głównej programu bez obciążania procesora. Działanie programu przedstawiono na rysunku 6.

W celu kontrolowania pracy robota inspekcyjnego stworzono aplikację dla komputerów klasy PC (rys. 7). Jej zadaniem było umożliwienie użytkownikowi sterowanie robotem, prezentacja danych, archiwizacja danych oraz wizualizacja orientacji robota w przestrzeni. Aplikacja została napisana w języku C# z wykorzystaniem .NET 4.0. Natomiast wizualizacja robota została utworzona w środowisku Microsoft XNA. Jest to środowisko stworzone przede wszystkim do tworzenia gier na platformy PC oraz Xbox. W tym projekcie zostało

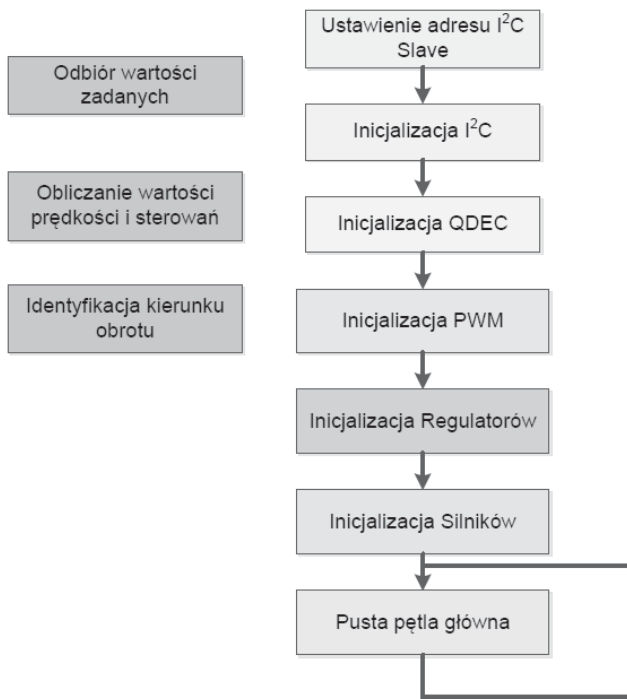


Rys. 5. Schemat działania aplikacji dla mikrokontrolera LPC1769
ono wybrane, gdyż w prosty sposób pozwala na importowanie modeli 3D z programu Google SketchUp po uprzednim ich wyeksportowaniu do formatu *.FBX. Komunikacja między robotem a aplikacją sterującą odbywa się z wykorzystaniem technologii bezprzewodowej - moduły ZigBee.

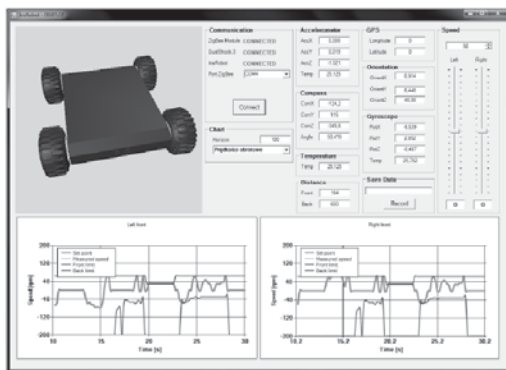
Magnetometr

Wykorzystanie magnetometru (HMC5883L) w celu pomiaru zewnętrznego pola magnetycznego ziemi umożliwi zachowanie stałego kierunku jazdy względem kierunków świata. Wskazania tego sensora będą miały kluczowe znaczenie podczas wykonywania zadań poruszania się po zadanej trajektorii. W trakcie realizacji projektu natknięto się na problem zakłócania wskazań magnetometru cyfrowego poprzez pola magnetyczne generowane przez magnesy stałe znajdujące się w silnikach prądu stałego. Po zapoznaniu się z literaturą poruszającą ten temat [16] można rozróżnić dwa rodzaje zakłóceń. Jedno z nich nosi nazwę Hard Iron drugie natomiast Soft Iron. Aby dowiedzieć się z jakim rodzajem zakłóceń ma się do czynienia należy wykreślić charakterystykę wskazania w kierunku osi Y do wskazania w kierunku osi X . Obracając magnetometr o 360 stopni na tak opisanej powierzchni przy braku zakłóceń powinno otrzymać się idealny okrąg o środku w początku układu współrzędnych. Pierwszy rodzaj zakłóceń czyli Hard Iron powoduje, przesunięcie charakterystyki tak, że środek okręgu nie znajduje się już w punkcie $[0,0]$. Kompensacja tego rodzaju zakłócenia polega na przesunięciu całej charakterystyki z powrotem do środka układu współrzędnych. Zakłócenie typu Soft Iron wywołuje zniekształcenie charakterystyki w taki sposób, że nie jest ona już dalszym ciągiem okręgiem a przyjmuje kształt eliptyczny. W tym przypadku należy sprowadzić po odpowiednich przekształceniach matematycznych charakterystykę do kształtu okręgu zgodnie z [13, 20].

Po zebraniu koniecznych danych i wykreśleniu ich na płaszczyźnie gdzie na osi X znajdują się wskazania siły pola magnetycznego w kierunku osi X oraz na osi Y wskazania siły pola magnetycznego względem osi Y jednoznacz-



Rys. 6. Schemat blokowy aplikacji dla mikrokontrolera ATxmega



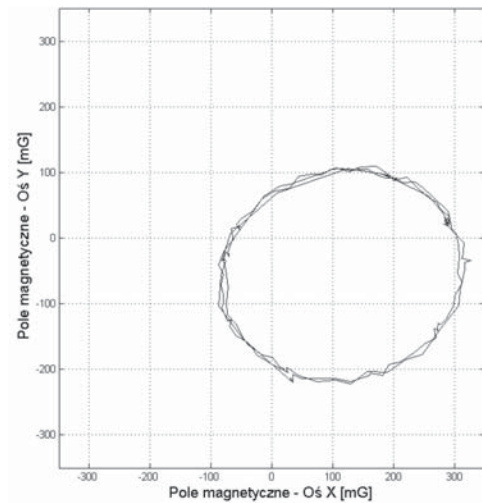
Rys. 7. Zrzut ekranowy aplikacji dla komputerów PC

nie można stwierdzić, że w tym przypadku mamy do czynienia z zakłóceniami Soft Iron. Nie dość, iż środek charakterystyki nie znajduje się w centrum układu współrzędnych to również jej kształt jest eliptyczny. W takim przypadku naniesione punkty należy przybliżyć elipsą i wyznaczyć jej środek ($[X_{ST}, Y_{ST}]$) oraz kąt przechylenia względem osi $X(\varphi)$. W tym przypadku wynoszą one: $X_{ST} = 114.79[mG]$, $Z_{ST} = -56.79[mG]$, $\varphi = 9.6037^\circ$. Stosując rozwiązanie podane w [16] należy przekształcić charakterystykę tak aby otrzymane w ten sposób pomiary tworzyły okrąg (rys. 9).

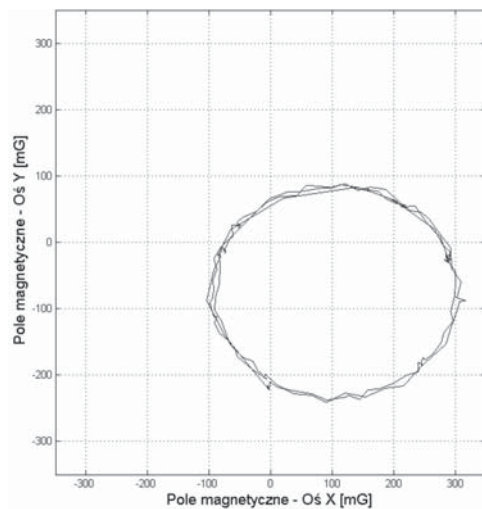
Po tym etapie otrzymano charakterystykę jak przy zakłóceniu Hard Iron. Ostatnim koniecznym krokiem do całkowitej kompensacji zakłóceń jest przesunięcie środka charakterystyki do początku układu współrzędnych (rys. 10).

Orientacja przestrzenna

Do wyznaczenia orientacji obiektu w przestrzeni wystarczy jedynie zastosowanie trójosiowego akcelerometru (BMA180 firmy Bosh). Wiedząc, że przyspieszenie ziemskie jest skierowane pionowo w dół i stosując podstawowe twierdzenia geometryczne możemy wyznaczyć kąt pochyłu (przód-tył) oraz kąt przechyłu boczny (lewo-prawo) opisa-



Rys. 8. Otrzymana charakterystyka wskaźników magnetometru w kierunku osi X i Y



Rys. 9. Otrzymana charakterystyka wskaźników magnetometru w kierunku osi X i Y po zastosowaniu pierwszej poprawki

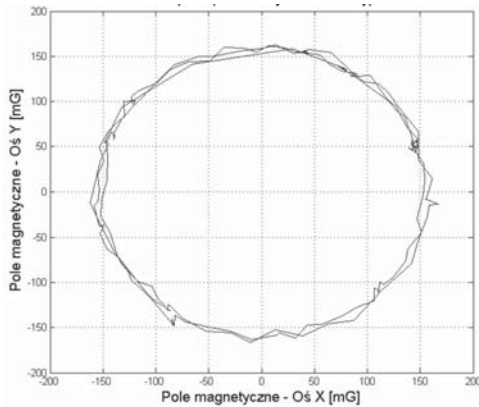
ne odpowiednio przez wzory 1, 2:

$$(1) \quad \alpha = \arctan\left(\frac{accY}{\sqrt{accX^2 + accZ^2}}\right),$$

$$(2) \quad \beta = \arctan\left(\frac{accX}{\sqrt{accY^2 + accZ^2}}\right),$$

gdzie: α - kąt obrotu wokół osi X, β - kąt obrotu wokół osi Y, $accX$ - przyspieszenie zmierzone względem osi X, $accY$ - przyspieszenie zmierzone względem osi Y, $accZ$ - przyspieszenie zmierzone względem osi Z. Wadą tak wyznaczonych kątów orientacji w przestrzeni jest ich "nerwowość".

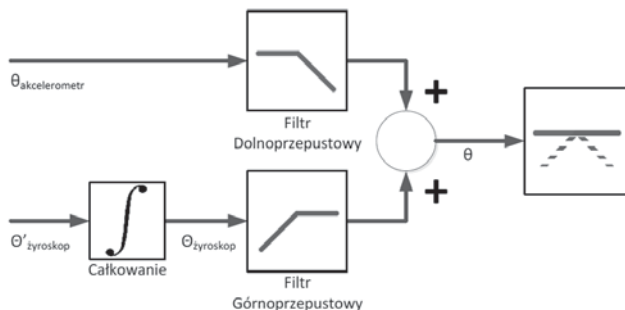
Dodatkowym czujnikiem pozwalającym na określenie orientacji obiektu w przestrzeni jest żyroskop cyfrowy inaczej zwany także czujnikiem pomiaru prędkości kątowej (ITG-3200 firmy IvenSense). Jego wskazania poprawione o wskazania akcelerometru będą podstawą detekcji czy robot nie wykonał obrotu o 180° i czy występuje konieczność zmiany kierunku obrotu silników. Będzie to zależne od aktualnie wybranego trybu jazdy. Zastosowanie tylko trójosiowego czujnika prędkości kątowej do wyznaczenia orientacji jest raczej bezcelowe gdyż wskazania już po chwili są bezużyteczne ze względu na obserwowane zjawisko dryftu. Pomiar kąta obrotu realizowany jest przez całkowanie prędkości kątowej wyra-



Rys. 10. Otrzymana charakterystyka wskaźnika magnetometru w kierunku osi X i Y po kompensacji zakłóceń w strefie przez wzór 3:

$$(3) \quad \Theta_i = \Theta_{i-1} + \omega * dt$$

gdzie: Θ - obliczony kąt, ω - zmierzona prędkość kątowa względem danej osi, dt - przyrost czasu pomiędzy pomiarami. Powtarzając tę operację dla każdej osi jesteśmy w stanie uzyskać pomiar trzech kątów. Kąty obliczane wyłącznie z wykorzystaniem żyroskopu posiadają wadę spowodowaną jego dryftem. Wraz z upływem czasu całkowane są drobne zmiany prędkości kątowej, które to sprawiają, że pomiar po chwili staje się bezużyteczny. W celu wyeliminowania powyższych problemów możemy zastosować filtrację danych pomiarowych. Po pierwsze uzyskujemy w ten sposób łagodne przebiegi pozbawione drgań oraz likwidujemy efekt dryftu czujnika prędkości kątowej. Wspomnianej filtracji dokonujemy zgodnie z poniższym schematem (rys. 11) zaczerpniętym z [6] i opisanej wzorem 4:



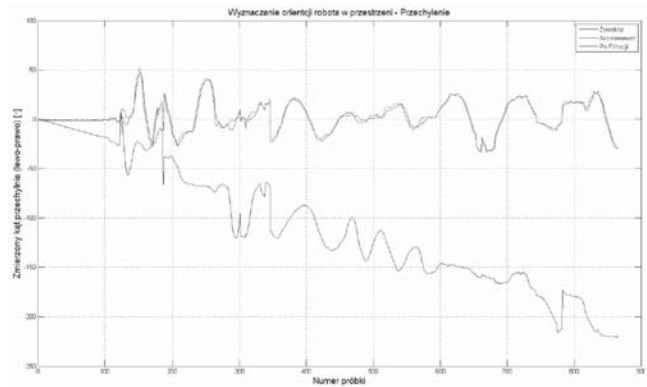
Rys. 11. Schemat filtracji danych pochodzących z pomiaru przyspieszenia liniowego oraz prędkości kątowej

$$(4) \quad \Theta_i = A(\Theta_{i-1} + \omega * dt) + (1 - A) * \Theta_{acc}$$

gdzie: Θ - obliczony kąt, Θ_{acc} - kąt obliczony ze wskazania akcelerometru, ω - zmierzona prędkość kątowa względem danej osi, dt - przyrost czasu pomiędzy pomiarami, A - współczynnik filtracji.

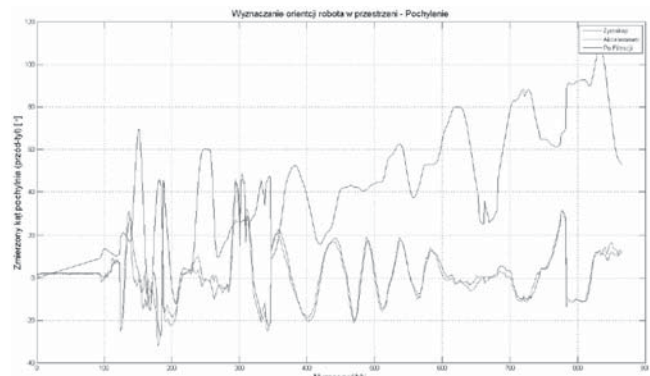
Jedynym występującym parametrem tej filtracji jest współczynnik A definiujący w jakim stopniu przy aktualnym pomiarze brana jest wartość pochodząca z całkowania wskazania czujnika przyspieszenia kątowego a w jakim wskazanie kąta obliczonego z wykorzystaniem akcelerometru. Przeprowadzono badanie polegające na zdjęciu charakterystyk czasowych kątów definiujących orientację robota. Badanie to ma na celu określenie przydatności metody opisanej wcześniej. Robota uniesiono do góry wykonując nim zarówno powolne jak i gwałtowne ruchy w obu płaszczyznach.

Już przy pierwszej zdjętej charakterystyce przedstawionej na rysunku 12 potwierdziły się przypuszczenia, że wska-



Rys. 12. Zmiana kąta przechylenia bocznego w czasie. Porównanie metod wyznaczania orientacji

zania samego czujnika prędkości kątowej nie nadają się do wyznaczania kątów orientacji robota. Wyraźnie widoczny jest trend malejący, który to jest spowodowany wykorzystaniem metody całkowania numerycznego. Przebiegi zmiany kąta wyznaczonego przy pomocy wskaźnika akcelerometru w znacznym stopniu pokrywają się z przebiegiem wyznaczonym z użyciem filtracji danych pomiarowych. Wyraźna różnica widoczna jest w chwili gdy nastąpił gwałtowny ruch robota w okolicach 300 próbek. Po dokładniejszej analizie potwierdza się także teza, odnośnie wygładzenia się przebiegów po filtracji. Podobnie zdjęto charakterystyki względem drugiego kierunku.



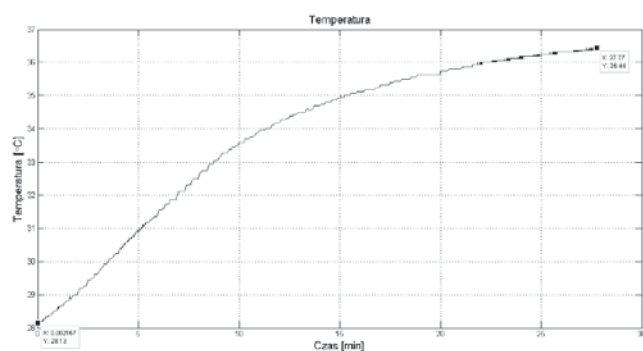
Rys. 13. Zmiana kąta przechylenia bocznego w czasie. Porównanie metod wyznaczania orientacji

Ponownie większe różnice pomiędzy przebiegiem czasowym wskaźnika akcelerometru a danymi po filtracji widoczne są w chwilach gdy nastąpił gwałtowny ruch (rysunek 13). I w tym przypadku przebieg danych po filtracji okazał się być najlepiej odzwierciedlającym rzeczywistość. Wszystkie powyższe przebiegi zostały wykonane dla współczynnika filtracji 0,7. Zmniejszanie tego współczynnika skutkowało większym stopniem zaszumienia przebiegu, gdyż większą wagę przyjmowało wskazanie akcelerometru. Gdy czasy d_t są możliwe małe należy zwiększać wartość współczynnika filtracji tak aby był on bliski jedności. W takim przypadku błędy numeryczne maleją a wartość wskazania akcelerometru jest jedynie brana z minimalną wagą w celu usunięcia efektu dryftu. Prezentowane podejście można zastąpić rozwiązaniem, które eliminuje powyższe wady pomiaru orientacji wykorzystując czujnik IMU (ang. Inertial Measurement Unit) [7, 14].

Pomiar temperatury

Ze względów bezpieczeństwa postanowiono wykorzystać cyfrowy czujnik temperatury (TMP102 firmy TI), którego zadaniem będzie pomiar temperatury wewnątrz robota. Jako, że w środku znajdują się liczne elementy generujące

ciepło takie jak: mostki H, baterie lub też silniki oczywistym wydaje się konieczność wykrywania zagrożenia przegrzania lub zapalenia się elementów. Odpowiednio wczesne wykrycie tendencji wzrostowej temperatury może pozwolić uniknąć uszkodzenia podzespołów. Ważnym aspektem każdego projektu sprzętowego jest zapewnienie możliwie długiego czasu pracy. Jednym z zabezpieczeń mającym na celu uniknięcie przegrzania się komponentów elektronicznych jest stała kontrola temperatury wewnątrz obudowy robota. W tym celu sterownik robota został wyposażony w cyfrowy czujnik temperatury o wysokiej rozdzielczości. Dodatkową informację o stanie podzespołów można pozyskać z wbudowanych w sensory czujników temperatury. Sensory zostały w nie wyposażone aby umożliwić kompensację błędów pomiarowych wynikających ze zmian temperatury samych czujników. W przypadku tego projektu są one wykorzystywane jedynie jako jedna z form zabezpieczeń. Aby określić stopień zagrożenia przegrzania się obwodu postanowiono wykonać badanie polegające na ciągłej pracy robota pod dużym obciążeniem przez dłuższy okres czasu. Dodatkowo jako środowisko badań wykorzystano teren otwarty o podłożu kamienistym. W trakcie trwania doświadczenia panowały dobre warunki pogodowe, na które składała się niska wilgotność powietrza oraz wysoki stopień nasłonecznienia. Nie bez powodu badanie zostało wykonane w powyższych warunkach. Oprócz ciepła generowanego przez elektronikę sterującą duży wpływ na temperaturę wewnątrz robota ma także temperatura otoczenia. Jako, że obudowa została wykonana z aluminium i pomalowana na czarny kolor można zaobserwować jej bardzo szybkie nagrzewanie się pod wpływem promieni słonecznych. W trakcie badania temperatura otoczenia wynosiła 28°C.

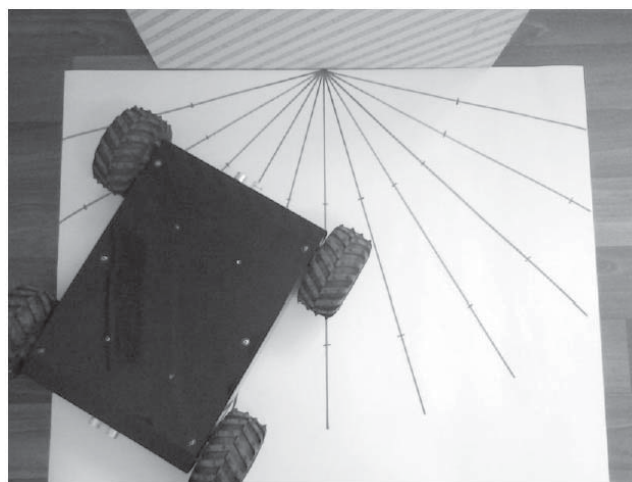


Rys. 14. Zmiana temperatury wewnątrz obudowy robota

Eksperyment trwał niespełna 30 minut i zarejestrowano zmianę temperatury z 28°C na 36,5°C. Można zaobserwować na podstawie wykreślonej charakterystyki przedstawionej na rysunku 14, że ponad połowa przyrostu wartości temperatury nastąpiła w ciągu pierwszych 10 minut. Zjawisko to należy tłumaczyć poprzez rozgrzanie się silników prądu stałego pod wpływem nieprzerwanej ich pracy pod dużym obciążeniem. W trakcie pozostałych 20 min doświadczenia większy wpływ na dalszy wzrost temperatury miały warunki atmosferyczne i nagrzewanie się metalowej obudowy robota. Analizując otrzymane wyniki zdecydowano się na ustawienie progu alarmowania o potencjalnym przegrzaniu lub awarii układu na poziomie 50°C. Zgodnie z notami katalogowymi wybranych podzespołów powinny one działać bez problemów do temperatury 85°C. Jednakże nie zaleca się przechowywania akumulatorów Litowo-Polimerowych w aż tak wysokiej temperaturze. Może to spowodować ich samoczynne zapalenie się bądź też znaczne skrócenie ich żywotności.

Czujniki ultradźwiękowe

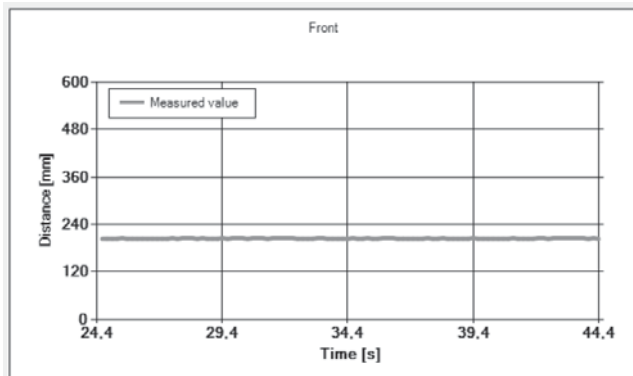
Do pozyskiwania informacji na temat otoczenia w jakim znajduje się robot oraz wykrywania wystąpienia potencjalnej kolizji z przeszkodami zastosowane zostały dalmierze ultradźwiękowe (MOBOT-US v2). W porównaniu do dalmierzy laserowych ich cena jest bardzo atrakcyjna i pozwalają one na pomiar o wystarczającej rozdzielczości na spore odległości. Dodatkowym atutem wybranego rozwiązania jest posiadanie cyfrowego interfejsu komunikacyjnego I2C. W ten sposób udało się uniknąć wykorzystywania przetwornika ADC do dokonania pomiaru. Na jednej platformie mobilnej bez większych modyfikacji jesteśmy w stanie wykorzystać do ośmiu sensorów tego typu na każdy kanał I2C. Przy wyborze czujników ultradźwiękowych liczone się z ich stosunkowo niską dokładnością, jednak ich głównym przeznaczeniem w projekcie było zapewnienie bezkolizyjnej jazdy. Podczas jazd próbnych zaobserwowano niepokojące błędy w detekcji przeszkód znajdujących się przed robotem. Jak się później okazało głównym parametrem odpowiedzialnym za prawidłowy pomiar odległości do obiektu ma kąt pod jakim został wyemitowany sygnał ultradźwiękowy. Zdecydowano się zatem sprawdzić jaki jest maksymalny kąt, pod którym czujniki ultradźwiękowe dają prawidłowe wyniki. Duży wpływ ma także materiał i typ powierzchni w kierunku której dokonywany jest pomiar. Zaprojektowano stanowisko pomiarowe pozwalające na zdjęcie charakterystyk co 15°, które przedstawiono na rysunku 15. Pomiary zostały wykonane z dwóch odległości: 20cm oraz 40 cm.



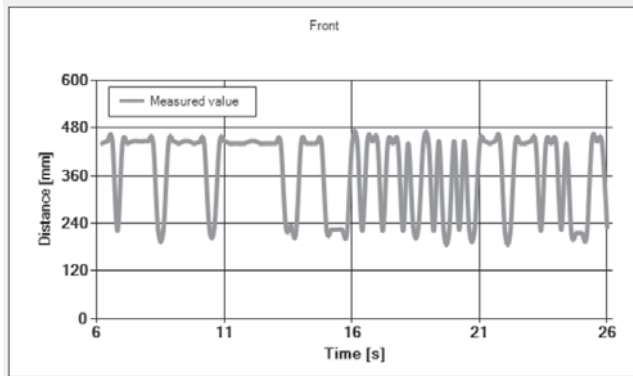
Rys. 15. Stanowisko do wyznaczenia maksymalnego kąta, dla którego czujniki ultradźwiękowe dokonują prawidłowego pomiaru

Po wykonaniu serii pomiarów odległości pod różnym kątem oraz z dwóch zadanych odległości, można wysunąć wniosek, że wartością graniczną kąta, dla której pomiar odległości jest prawidłowy wynosi 45°. Wraz z oddaleniem od przeszkody robota kąt ten malał. Dla potwierdzenia wykreślono przebiegi czasowe pomiaru z odległości 20cm dla kątów 30° (rys.16) oraz 45° (rys.17).

Pomimo różnicy jedynie 15 stopni widać wyraźne pogorszenie się skuteczności pomiaru. W ciągu 20 sekund eksperymentu wykonano 100 pomiarów odległości. O ile w przypadku gdy robot znajdował się pod kątem 30 stopni wszystkie pomiary zostały wykonane prawidłowo tak dla wartości 45 stopni większość pomiarów znacznie odbiegała od rzeczywistej odległości. Natomiast pomiary bliskie 200 mm były obciążone błędem w granicach kilku centymetrów. Zmiana płaszczyzny, do której mierzono odległość wpływała na skuteczność pomiarów zgodnie z [19].



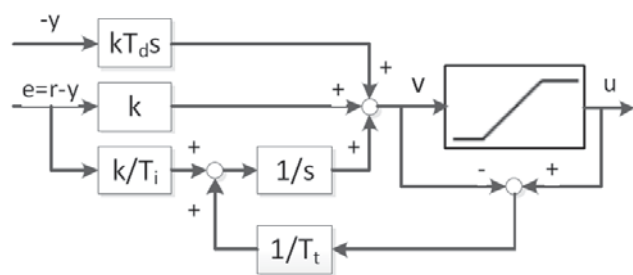
Rys. 16. Pomiar odległości 20 cm pod kątem 30 stopni



Rys. 17. Pomiar odległości 20 cm pod kątem 45 stopni

Regulatory

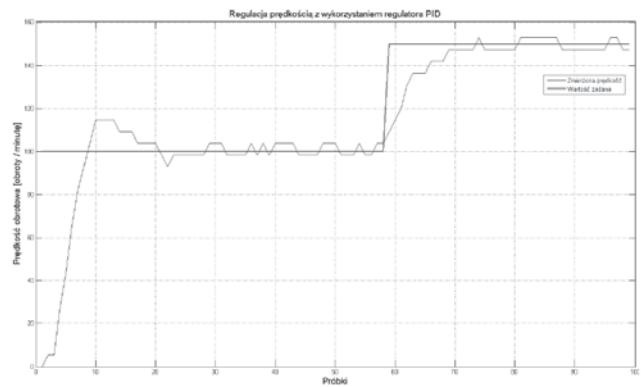
W trakcie tworzenia oprogramowania przeznaczonego dla mikrokontrolera ATXMega dokonano implementacji cyfrowego regulatora PID. Zastosowano dwa zabezpieczenia przed nadmiernym całkowaniem uchybu regulacji. Pierwsze zabezpieczenie polegało na ograniczeniu maksymalnej wartości do jakiej może doliczyć element całkujący. Jest ono także konieczne, aby zabezpieczyć się przed przekroczeniem zakresu zmiennej w jakiej jest przechowywana ta wartość. W przypadku 16-bitowej liczby typu całkowitego bez znaku wynosi ona 65535. Drugim zabezpieczeniem jest zastosowanie zmodyfikowanej wersji regulatora PID wzbogaconej o człon Integral Anti Wind-Up. Schemat takiego regulatora przedstawiono na rysunku 18 zgodnie z [6].



Rys. 18. Regulator PID z zabezpieczeniem anti wind-up

Do wyznaczenia nastaw początkowych regulatora PID posłużono się metodą Ziglera-Nicholsa polegającą na doprowadzeniu układu na granicę jego stabilności i odczytanie wartości wzmocnienia granicznego oraz okresu drgań [1]. Następnie na ich podstawie wyznaczono nastawy regulatora. Dokonując ich drobnej korekcji uzyskano następującą odpowiedź skokową układu regulującego prędkość obrotową silników (rys. 19).

W pierwszej chwili gdy silnik startował z prędkości 0 i osiągał prędkość zadaną o wartości 100 rpm można zaob-

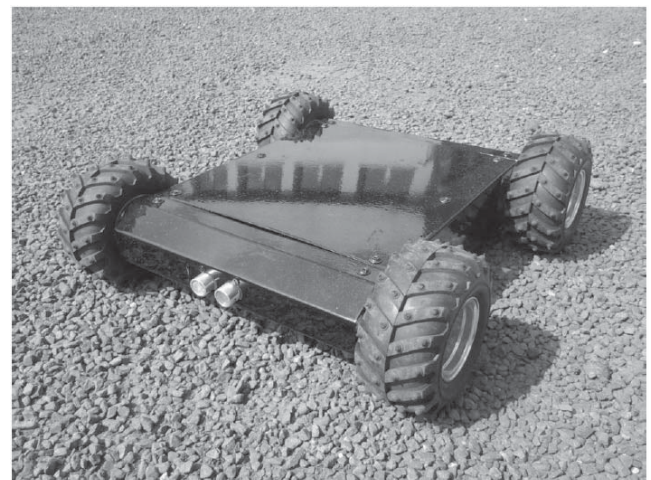


Rys. 19. Regulacja prędkości obrotowej silników

serwować lekkie przesterowanie. Wynika ono z faktu, że wartości nastaw były wyliczone dla punktu pracy 150 rpm. Aby poprawić jakość regulacji należało by zastosować jeden z adaptacyjnych układów regulacji. Implementacja złożonych regulatorów takich jak GPC jest znacznie utrudniona w systemach wbudowanych ze względu na brak bibliotek realizujących operacje na macierzach i rozwiązywanie układów równań liniowych. Jednocześnie bardzo ograniczona jest częstotliwość taktowania mikrokontrolera dlatego ważnym aspektem w implementacji takiego regulatora była by optymalizacja kodu. Ze wszystkich znanych metod adaptacyjnych można by zaproponować zmianę nastaw regulatora na podstawie rejestrowanej wartości aktualnej prędkości. Z języka angielskiego metoda ta nosi nazwę Gain Scheduling [2]. Programowalna zmiana parametrów wymaga doboru kilku zestawów nastaw regulatora dla różnych punktów pracy i ich przełączaniu na podstawie śledzonej wartości aktualnej.

Badania terenowe/Testy w terenie

Najważniejszą cechą charakteryzującą platformę mobilną jest jej zdolność do przemieszczania się w zadanym środowisku. Postanowiono zbadać jak zbudowany robot poradzi sobie na różnym podłożu oraz jaki rodzaj przeszkód będzie on w stanie pokonać. Wszystkie badania zostały przeprowadzone w trybie zdalnego operatora. Testy rozpoczęto od jazdy w terenie pokrytym drobnymi kamieniami oraz piachem (rys. 20). Doświadczenie to miało na celu sprawdzenie czy będzie możliwe skuteczne sterowanie robotem podczas jazdy po łuku oraz obrotu w miejscu.

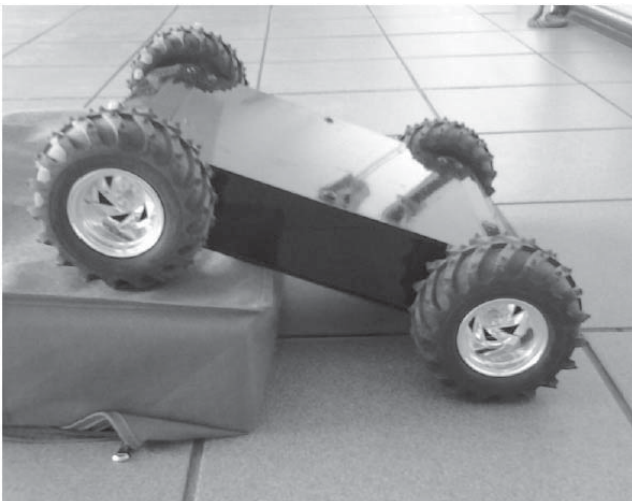


Rys. 20. Kamieniste środowisko badawcze właściwości jezdnych

Podczas jazdy na wprost nie zauważono żadnych trudności w sterowaniu robotem. W lekkim stopniu zauważalne były trudności przy skręcaniu w trakcie jazdy. Podobnie jak w

konstrukcjach o napędzie gąsienicowym występuje poślizg kół w trakcie skrętu można było zauważyć gwałtowniejsze reakcje regulatorów po zewnętrznej stronie zakreślonego łuku. W przeciwieństwie do jazdy po gładkiej powierzchni uległ także zmianie promień skrętu. Już po chwili jazdy po kamiennym podłożu osoba sterująca jest w stanie bez większych trudności kierować platformą jezdną. Podczas wykonywania obrotu w miejscu koła w nieznacznym stopniu zakopywały się w grząskim terenie, jednak zastosowanie kół z modeli typu Monster Truck okazało się w tym przypadku idealnym wyborem. Opony wyposażone w głęboki bieżnik oraz gumowe kolce bez problemu zapewniały dobrą przyczepność pomimo trudnych warunków jazdy. W trakcie tego doświadczenia zaobserwowano trudność polegającą na błędnym wykrywaniu przeszkód przez czujniki ultradźwiękowe. W chwili gdy robot wjechał na nierówny teren od czasu do czasu fale ultradźwiękowe odbite od podłoża generowały błędne wskazania czujników. Skutkowało to ograniczaniem maksymalnej prędkości zadanej. Aby zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia tego zjawiska postanowiono ograniczyć zasięg czujników do 60 cm. Podczas jazdy po terenie trawiastym lub po pomieszczeniach zamkniętych nie wykryto żadnych zastrzeżeń do modelu jazdy. Jedynie można stwierdzić, że na gładkim terenie zużycie opon jest znacznie mniejsze niż na chropowatych powierzchniach. Ponownie jest to spowodowane poślizgiem kół.

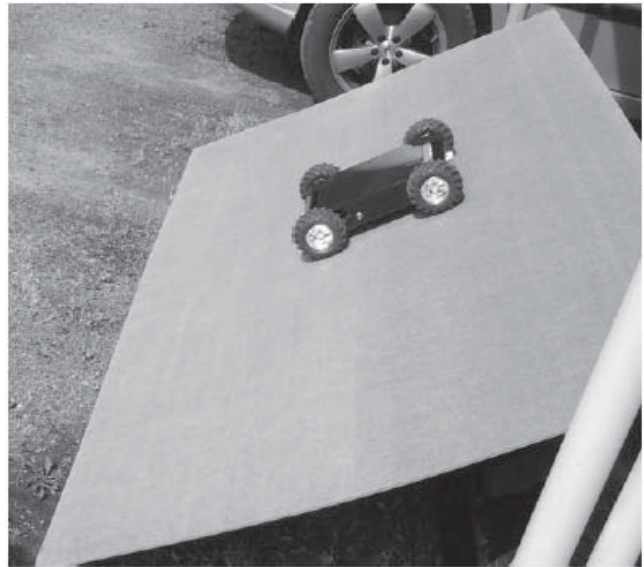
Następnie przystąpiono do badań, których celem było stwierdzenie jakie przeszkody robot będzie mógł pokonać. Jako pierwszy typ przeszkody wybrano niewysoki stopień (rys. 21). Jak się wkrótce okazało nie jest możliwy podjazd pod tego typu przedmioty z niską prędkością. O ile przednie koła bez problemu mogły wjechać na stopień, tak ze względu na niski prześwit pod korpusem robota dochodziło to zawieszenia się konstrukcji. Gdy podjazd wykonano z dużą prędkością robot pod wpływem nabranego pędu wjechał na przeszkodę. Metoda ta może powodować uszkodzenia obudowy spowodowane przytarciami podwozia o stopień.



Rys. 21. Próba pokonania przeszkody w postaci stopnia

Kolejnym krokiem była próba jazdy po stromym zboczu (rys. 22). Już po pierwszym doświadczeniu okazało się, że największą wadą wybranej konstrukcji jest niski prześwit pomiędzy korpusem a podłożem. Dlatego też postanowiono zbadać jak robot poradzi sobie podczas jazdy po terenie o dużym stopniu nachylenia. Prób tych dokonano na specjalnie stworzonym do tego celu stanowisku. Rozpoczęto od kąta nachylenia około 20° i stopniowo go zwiększano aż do momentu, gdy robot nie będzie w stanie wjechać na pochylnię.

W przypadku podłoża wykonanego z płyty wiórowej maksymalny



Rys. 22. Stanowisko do określenia maksymalnego kąta najazdu

malny kąt najazdu wyniósł około 45°. Poniżej tej wartości robot był w stanie zachować stałą prędkość podczas najazdu. Niewykluczone, że dla powierzchni o większym współczynniku tarcia kąt ten był by większy.

Kolejnym doświadczeniem odnośnie pokonywania przeszkód było porównanie dwóch podejść do regulacji prędkości obrotowej kół. Sprawdzono sterowanie obu kół znajdujących się po jednej stronie robota z wykorzystaniem jednego regulatora. Drugim podejściem jest zastosowanie oddzielnych regulatorów na wszystkie 4 koła. Badanie przeprowadzono w trudnym terenie pokrytym trawą a jako przeszkody do pokonania wybrano kamienie o ostrych i nieregularnych kształtach (rys. 23). Tor jazdy poprowadzono tak aby jednorazowo tylko jedno koło znajdowało się na przeszkodzie.



Rys. 23. Środowisko badawcze dla porównania metod regulacji prędkości kół

Po przeprowadzeniu kilku prób wyraźnie widać różnicę w zachowaniu się robota podczas jazdy. Gdy zastosowano jeden regulator dla kół po jednej stronie bardzo trudno było utrzymać zamierzony kierunek jazdy. Niejednokrotnie można było zauważyć, że koło tylne zaczyna wpadać w poślizg w chwili gdy przednie koło najechało na przeszkodę. Zjawi-

sko to nie występowało gdy za regulację były odpowiedzialne dwa niezależne od siebie regulatory.

Ostatnim zaplanowanym doświadczeniem była próba wykonania obrotu o 180° z wykorzystaniem pionowej ściany (rys. 24). Główną zaletą symetrycznej konstrukcji jest możliwość jazdy w dowolnym kierunku przy dowolnej orientacji w przestrzeni. Zastosowany układ sensoryczny pozwala na wykrycie aktualnej pozycji robota i ewentualne zmiany kierunku jazdy. Aby zaprezentowany manewr miał prawo zostać wykonany poprawnie konieczne jest zapewnienie dobrej przyczepności kół zarówno do powierzchni poziomej jak i pionowej. Ponieważ na etapie projektowania obudowy przewidziano taką funkcjonalność nie grozi uderzenie czujnikami ultradźwiękowymi o podłoże w trakcie wykonywania obrotu. Manewru tego nie należy wykonywać przy dużej prędkości ponieważ zastosowano koła z tworzywa sztucznego i w przypadku uderzenia o twarde podłoże rośnie prawdopodobieństwo ich uszkodzenia. Na podstawie powyższych badań stwierdzono, że zastosowanie konstrukcji symetrycznej niesie za sobą liczne korzyści, jednakże jej największą wadą jest możliwość zawieszenia się na przeszkodzie wyższej niż prześwit pod obudową. Wadę tę można zredukować poprzez zastosowanie kół o większej średnicy.



Rys. 24. Próba wykonania obrotu z wykorzystaniem pionowej powierzchni

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wykonanie i oprogramowanie robota inspekcyjnego według własnego projektu. Charakterystycznymi cechami robota miały być zwarta konstrukcja, której elementy nie wystają poza obrys kół oraz symetryczna budowa pozwalająca na poruszanie się bez względu na położenie robota względem ziemi.

Etap tworzenia oprogramowania składał się z trzech części, w których to zaprojektowano i wykonano aplikacje dla dwóch różnych typów zastosowanych mikrokontrolerów oraz aplikacji nadrzędnej przeznaczonej dla komputerów klasy PC. W trakcie tworzenia programów wykorzystano najnowsze technologie i rozwiązania mające na celu przyśpieszenie etapu wykonania prototypu. Zarówno przy tworzeniu sprzętu jak i programów starano się umożliwić dalszy rozwój projektu. W projekcie sterownika uwzględniono wyprowadzenie wszystkich ważnych interfejsów komunikacyjnych tak aby na dalszym etapie móc wyposażyć robota w dodatkowe moduły zwiększające jego możliwości. Aplikacje tworzone w sposób

modułowy tworząc liczne biblioteki przechowujące wszystkie ważniejsze dane w przejrzystych strukturach. Podejście takie pozwala na ewentualną migrację oprogramowania na mikrokontrolery innych firm. Ostatecznie udało się z powodzeniem uruchomić wszystkie zawarte w robocie podzespoły. Informacje pozyskane dzięki układowi sensorycznemu pozwalają na realizację podstawowych zadań lokomocji oraz zbieranie informacji na temat otoczenia, w którym znajduje się robot.

Pomimo, że projekt uznaje się na tym etapie za zamknięty możliwe są liczne drogi jego dalszego rozwoju. Podczas wykonanych badań na gotowym już sprzęcie okazało się, że nie wszystkie wybory na etapie projektowania były dobre. Jednym z głównych błędów było wybranie protokołu ZigBee jako głównej drogi transmisji danych. Kierowano się łatwością implementacji, jednakże okazało się, że nie nadaje się on do projektów, w których w czasie rzeczywistym konieczne jest przesyłanie dużych ilości danych. Ograniczenia modułów ZigBee wymusiły liczne modyfikacje na etapie tworzenia aplikacji. Konieczne okazało się wysyłanie kilku mniejszych paczek danych aby zapewnić sterowanie w czasie rzeczywistym. Pomimo starań nie udało się osiągnąć skutecznego zasięgu większego niż 15m. Niewątpliwie większość problemów można by ominąć gdyby zdecydowano się na zastosowanie modułu WiFi.

Kolejną modyfikacją byłaby zamiana czujników ultradźwiękowych na czujniki laserowe. Nie występowało by wtedy zjawisko błędnego pomiaru pod dużym kątem. W tym konkretnym przypadku na decyzję, który z czujników należało zastosować wpłynęła przede wszystkim ich cena. Jako, że utworzono niezbędne oprogramowanie do obsługi GPS oraz Bluetooth można by projekt rozwinąć o dodanie możliwości sterowania z poziomu urządzeń mobilnych takich jak telefony lub tablety. Początkowo zamierzano wykorzystać dane z GPS do nawigacji w terenie otwartym, niestety ograniczenie zasięgu do 15m przy dokładności GPS na poziomie kilku metrów skutecznie to uniemożliwiło.

Projekt na obecnym etapie z powodzeniem mógłby służyć jako obiekt dydaktyczny, na którego podstawie możliwe by było zapoznanie się z problemami regulacji rzeczywistych układów. Pozostawienie otwartej specyfikacji technicznej pozwala na poprowadzenie projektu w właściwie dowolnym kierunku. Po usunięciu niektórych wad można mu się nawet pokusić o przekształcenie go w produkt komercyjny przeznaczony dla grupy docelowej składającej się z entuzjastów tematyki robotyki mobilnej.

This work has been supported by Applied Research Programme of the National Centre for Research and Development as a project ID 178438 path A - Costume for acquisition of human movement based on IMU sensors with collection, visualization and data analysis software.

LITERATURA

- [1] Åström K. J., Hägglund T.: Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control, *Journal of Process Control* 14, pp. 635–650, 2004.
- [2] Åström K. J., Hägglund T.: *Advanced PID Control*, ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- [3] Babiarz A., Jaskot K.: *Autonomous mobile platform II*, Carpathian Control Conference (ICCC), 2011 12th International, pp. 167–171, 2011.
- [4] Babioch K.: *Projekt, konstrukcja i oprogramowanie robota inspekcyjnego*, Praca Magisterska, 2012, Gliwice
- [5] Bachmann E. R., Xiaoping Yun, Petersonand C. W.: An investigation of the effects of magnetic variations on inertial/magnetic orientation sensors, *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, volume 2, pp. 1115–1122, April 2004.
- [6] Bismor D.: *Programowanie systemów sterowania - narzędzia*

dzia i metody, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.

- [7] Brodie M. A., Walmsley A., Page W.: The static accuracy and calibration of inertial measurement units for 3D orientation, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 11(6), pp. 641–648, December 2008.
- [8] Caprari G., Breitenmoser A., Fischer W., Hürzeler C., Tâche F.: Highly Compact Robots for Inspection of Power Plants, *Journal of Field Robotics*, vol. 29, num. 1, pp. 47–68, 2012
- [9] Czupryniak R., Trojnecki, M.: Taktyczny robot miotany, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika*, z. 175, t. 1, pp. 149–160, 2010.
- [10] Czupryniak R., Szykarczyk P., Trojnecki M.: Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych, *Przegląd robotów mobilnych do zastosowań specjalnych, Pomiary Automatyka Robotyka*, 6/2008, pp. 11–14, 2008.
- [11] Czupryniak R., Szykarczyk P., Trojnecki M.: Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych, *Nowe kierunki w robotyce mobilnej, Pomiary Automatyka Robotyka*, 7-8/2008, pp. 10–13, 2008.
- [12] Filipek P., Kamiński T.: Remote controlled mobile inspection robot, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 18 No. 2, pp. 129–135, 2011.
- [13] Gebre-Egziabher D., Elkaim G. H., Powell J. D., Parkinson B. W.: Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain, *Journal of Aerospace Engineering*, 19(2), pp. 87–102, 2006.
- [14] Jaskot K., Babiaryz A.: Układ inercyjny do pomiaru orientacji obiektów, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, nr 11a, pp. 323–333, 2010.
- [15] Jaskot K., Sroka M., Nawrat A. M.: The Prototype of an Unmanned Underwater Vehicle—Mechanical Construction, the Operator Panel, *Innovative Control Systems for Tracked Vehicle Platforms*, Springer International Publishing, pp. 259–279, 2014.
- [16] Konvalin C.: Technical Document Compensating for Tilt, Hard Iron and Soft Iron Effects, [web page] http://memsense.com/docs/MTD-0802_1.2_Magnetometer_Calibration.pdf, Aug. 2008, Dec. 2008.
- [17] Murashima T., Aoki T., Tsukioka S., Hyakudome T., Yoshida H., Nakajoh H., Ishibashi S., Sasamoto R.: Thin cable system for ROV and AUV, *JAMSTEC, OCEANS*, 5, pp. 2695–2700, 2003
- [18] Sroka, M. Ściegienka, P. Babiaryz, A. Jaskot, K.: Prototyp bezzałogowego pojazdu podwodnego – układ stabilizacji i utrzymania zadanego kursu, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 9, pp. 205–217, 2013.
- [19] Paunovic I., Todorovic D., Bozic M., Djordjevic G. S.: Calibration of Ultrasonic Sensors of a Mobile Robot, *Serbian Journal Of Electrical Engineering*, 6(3), pp. 427-437, December 2009.
- [20] Vasconcelos J. F., Elkaim G., Silvestre C., Oliveira P., Cardeira B.: A geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame, *Guidance and Control of Underwater Vehicles*, volume 2, 2008.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Jaskot, Politechnika Śląska, Instytut Automatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, Email: krzysztof.jaskot@polsl.pl, mgr inż. Krystian Babioch, absolwent Instytutu Automatyki Politechniki Śląskiej