

Dominik Sankowski*, Sławomir Jeżewski*, Piotr Duch*, Sylwester Błaszczuk*

Wykrywanie obiektów ruchomych na podstawie danych z czujników odległościowych w robocie mobilnym

1. Wprowadzenie

Współczesny robot mobilny to urządzenie wyposażone w różnorodne układy czujników wzajemnie uzupełniających informację sensoryczną. Układy czujników wewnętrznych dostarczają informacji o stanie wewnętrznym robota, np. temperaturze silników wykonawczych, temperaturze układów elektronicznych, zasobach energetycznych, uszkodzeniach i awariach. Systemy czujników zewnętrznych przekazują do robota informacje o stanie otoczenia. Są to informacje o obecności, nieobecności przeszkód, usytuowaniu przestrzennym przeszkód, obecności w otoczeniu obiektów ruchomych. Do ich pozyskania stosuje się czujniki ultradźwiękowe, dalmierze podczerwone, sensory pojemnościowe, laserowe skanery liniowe, laserowe skanery przestrzenne, kamery [9]. Większość wymienionych sensorów zewnętrznych dostarcza spory strumień informacji, większy niż są w stanie przetworzyć pojedyncze węzły mikroprocesorowe robota mobilnego zasilanego bateryjnie. Zachodzi więc potrzeba takiej selekcji informacji oraz sposobów jej przetwarzania, aby uzyskać jak najlepszą efektywność energetyczną, najwyższy współczynnik niezawodności i odporności na zakłócenia, najlepsze rozłożenie obliczeń pomiędzy węzły obliczeniowe. Interesującą koncepcję selekcji obliczeń proponują nowoczesne teorie neuropsychologiczne [2, 3]. Kwestionuje się w nich blokowy, tradycyjny [4] podział mózgu i systemu przetwarzania w nim zawartego. W modelu tradycyjnym cała informacja sensoryczna jest gromadzona sumarycznie w jednym węźle percepcji, a tworzony w nim model otoczenia jest podstawą do dalszych procesów decyzyjnych. Teoria Millera i Goodale'a w to miejsce wprowadza model mózgu jako zespołu dłuższych lub krótszych łuków odruchowych [3]. Łuk odruchowy rozpoczyna się w sensorach, a kończy w efektorach, jakimi są np. kończyny.

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

Taki łuk odruchowy steruje np. zachowaniem żaby (*Rana Pirens*) uskakującej przed czarnym dyskiem gwałtownie wprowadzonym w pole widzenia. Badania nad systemami wzrokowymi płazów i prostych ssaków gryzoni oraz ssaków naczelnych dowiodły, że niektóre szlaki przetwarzania danych sensorycznych (łuki odruchowych) przetrwały w prawie niezmienionej postaci rozwój ewolucyjny [4]. Ta informacja ma istotną wartość techniczną, bowiem sugeruje, że można poszukiwać algorytmów przetwarzania danych, które będą niezależne od sprzętu wykonawczego oraz będą podstawowymi cegiełkami budulcowymi systemu operacyjnego robota mobilnego.

Koncepcja niezależnych łuków odruchowych (algorytmów odruchowych) jest z technicznego punktu widzenia atrakcyjna z następujących powodów:

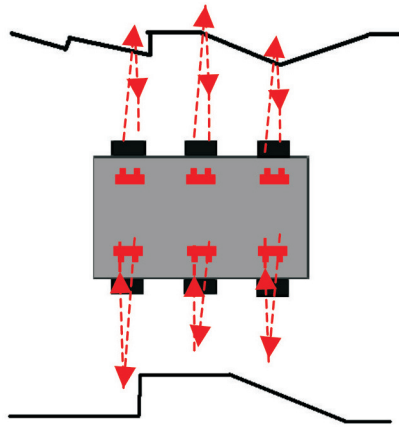
- łuk odruchowy można zaprojektować i wykonać jako potok obliczeń, który nie wpływa na inne potoki (separacja);
- łuk odruchowy można zaimplementować na dedykowanym systemie mikroprocesorowym, wtedy rozbudowa robota będzie polegała na dodawaniu kolejnych potoków obliczeń, a w razie potrzeby całych układów mikroprocesorowych (skalowalność);
- łuk odruchowy można poddać parametryzacji lub atenuacji z ośrodków decyzyjnych wyższego rzędu (otwartość);
- jeden z łuków odruchowych może przetwarzać dane zgrubnie i dawać wyniki z niewielkim opóźnieniem czasowym, podczas gdy inny przetwarzać je będzie wolniej, ale wydobywać będzie z nich więcej informacji potrzebnych dla wolniejszego łuku odruchowego.

W niniejszym artykule przedstawiono algorytmy analizy danych z podczerwonych czujników odległościowych niezbędne do implementacji łuku odruchowego unikania kolizji w 6-kołowym robocie mobilnym.

2. Konstrukcja układu czujnikowego w robocie mobilnym

W proponowanym robocie mobilnym użyto 6 zestawów czujników (rys. 1). Zostały one zamontowane na ścianach bocznych robota jeden za drugim. Odległość pomiędzy poszczególnymi zestawami ds jest ustalona konstrukcyjnie i wynosi 25 cm.

Dane ze wszystkich czujników zbierane są przez jeden system obliczeniowy oparty na procesorze sygnałowym z rodziny TMS320F2000. Wyniki przetwarzania danych przesyłane są do procesora sterującego napędem. Procesor analizy danych oraz procesor sterowania napędem stanowią dwa punkty kluczowe łuku odruchowego. Punktem krytycznym prezentowanego systemu analizy danych jest szybkość jego działania, im szybsze jest dostarczanie wyników, tym mniejsze prawdopodobieństwo kolizji, tym robot sprawniejszy w poruszaniu się w środowisku rzeczywistym.

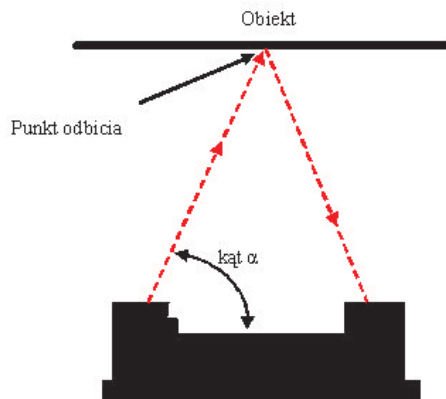


Rys. 1. Pomiar odległości za pomocą czujników podczerwonych umieszczonych na robocie mobilnym

2.1. Charakterystyka elektryczna zastosowanych czujników odległościowych

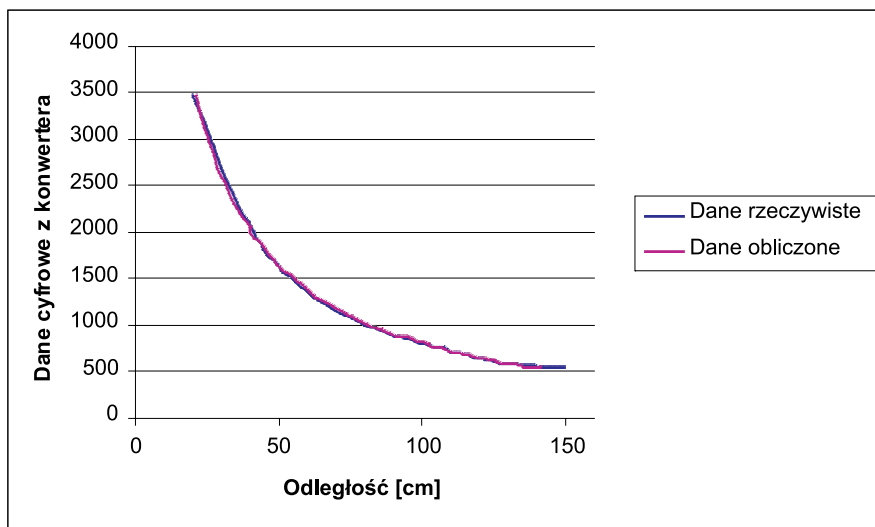
Zastosowane czujniki wykorzystują triangulację oraz liniową matrycę CCD. Główną ideą zastosowanego czujnika jest wysłanie światła podczerwonego przez emiter. Promień świetlny przemieszcza się w polu widzenia i albo trafi w obiekt, albo leci w nieskończoność. W przypadku gdy światło nie trafi na przeszkodę, nie odbije się, i czujnik wskaże brak obiektu w polu działania czujnika. Jeżeli natomiast światło odbije się od obiektu, wróci do detektora i utworzony zostanie trójkąt pomiędzy punktem odbicia, emiterem i transmitterem.

Kąt w trójkącie przedstawionym na rysunku 2 zależy od odległości od obiektu. Matryca CCD rozpoznaje kąt, pod jakim odbite światło wróciło do czujnika. Na podstawie pomiaru tej informacji sensor wyznacza odległość od przeszkody.

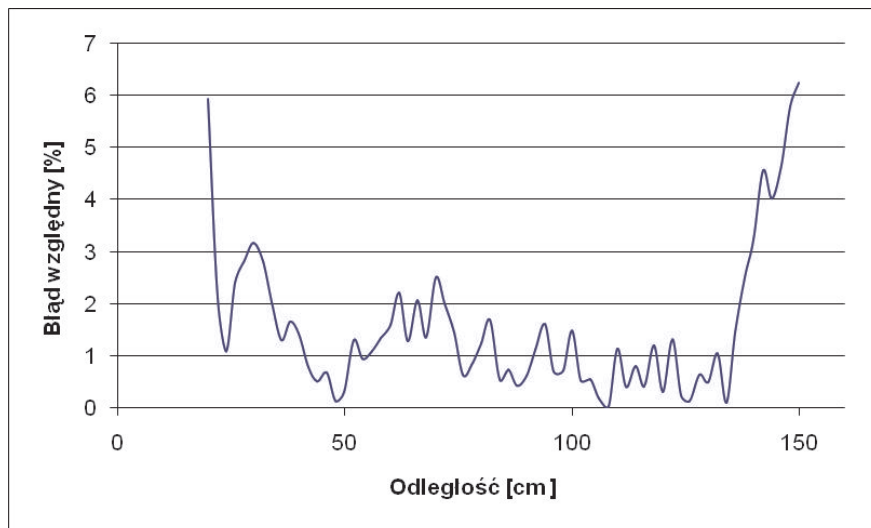


Rys. 2. Idea działania zastosowanego czujnika podczerwonego

Powyższe czujniki charakteryzują się nieliniową odpowiedzią. Konieczne jest wyznaczenie funkcji potrafiącej przeliczyć zmierzoną wartość napięcia wyjściowego na rzeczywistą odległość (rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyka czujnika podczerwonego i jej aproksymacja



Rys. 4. Błąd powstały w wyniku aproksymacji charakterystyki sygnału wyjściowego czujnika SHARP GP2Y0D02YK w zależności od odległości

Do wyznaczania funkcji transformującej sygnał wyjściowy czujnika na wartość odległości użyto metody liniowej aproksymacji, ze względu na prostotę i szybkość obliczeń. Istotną częścią procedury wyznaczania funkcji aproksymującej charakterystykę sygnału wyjściowego czujnika jest poprawność zebranych danych kalibracyjnych. Właściwe zebranie danych kalibracyjnych ma istotny wpływ na wyznaczanie parametrów funkcji aproksymującej, co wpływa bezpośrednio na błąd pomiaru odległości (rys. 4). Przeprowadzone testy wykazały, że różne egzemplarze czujników mają odmienne charakterystyki wyjściowe i wymagana jest kalibracja każdego czujnika z osobna oraz zapamiętania danych kalibracyjnych w systemie mikroprocesorowym.

3. Koncepcja algorytmu wykrywania obiektów ruchomych

Dane pobrane z sąsiadujących czujników odległościowych znajdujących się w jednym rzędzie umożliwiają znalezienie poruszających się obiektów w bezpośrednim otoczeniu robota. Zaprezentowany algorytm (rys. 5) pozwala na dokładne określenie kierunku poruszania się obiektu oraz jego prędkości w przypadku, kiedy robot stoi w miejscu lub w zasięgu czujników robota znajduje się tylko pojedynczy, poruszający się obiekt. Ze względu na uniwersalność algorytmu, obliczenia wykonywane są dla każdej pary sensorów z osobna. Następnie są uśredniane, co wpływa na poprawę wyników. Zaproponowany w niniejszym artykule algorytm można podzielić na kilka etapów. Pierwszym krokiem jest pobranie danych z czujników podczerwonych. Następnie odebrane dane są odfiltrowywane. Tak wstępnie przetworzone dane z pary czujników są ze sobą porównywane i obliczane jest ich przesunięcie względem siebie. Ostatnim krokiem jest obliczenie prędkości poruszającego się obiektu na podstawie wcześniej obliczonego przesunięcia, a także znanej już wcześniej odległości pomiędzy sensorami ds .

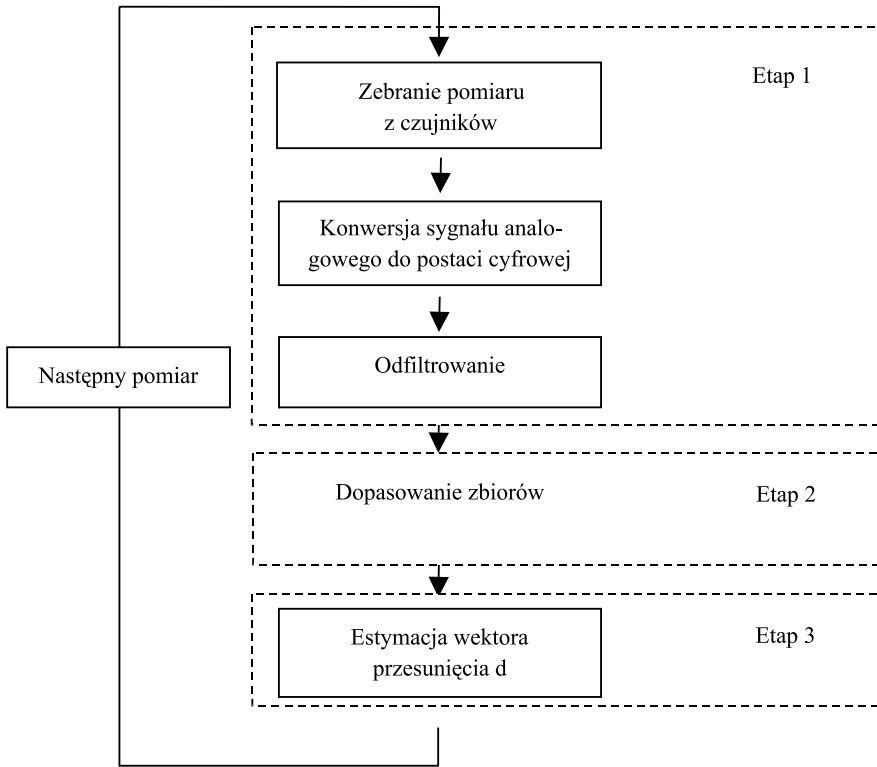
Zastosowane czujniki wysyłają dane w postaci analogowej, które wstępnie przetwarzane są do postaci cyfrowej. Zastosowano filtr dolnoprzepustowy o następującej charakterystyce:

$$y = y' + \alpha \cdot (x - y') \quad (1)$$

gdzie:

- y – obliczona wartość odległości,
- y' – poprzednia obliczona wartość odległości,
- x – zmierzona wartość odległości,
- α – waga.

Analizowane są wykresy ciągłe czasowe pomiarów uzyskiwanych ze wszystkich czujników robota. Różnica w przesunięciu danych względem siebie pozwala określić drogę, jaką przebył poruszający się obiekt.



Rys. 5. Schemat algorytmu wykrywania ruchu

W celu znalezienia wartości przesunięcia wykresów można zastosować kilka różnych algorytmów. W przeprowadzonych badaniach zostały sprawdzone dwie metody pozwalające na określenie przesunięcia:

- korelacja

$$r_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(y_i^{(1)} - \bar{y}^{(1)} \right) \left(y_i^{(2)} - \bar{y}^{(2)} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(y_i^{(1)} - \bar{y}^{(1)} \right)^2 \sum_{i=1}^N \left(y_i^{(2)} - \bar{y}^{(2)} \right)^2}} \quad (2)$$

gdzie:

$$y^{(1)} \in \{y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_N^{(1)}\}$$

$$y^{(2)} \in \{y_1^{(2)}, y_2^{(2)}, \dots, y_N^{(2)}\}$$

– różnica dwóch zbiorów

$$g_{1,2} = \sum_{i=1}^N \frac{|y^{(1)} - y^{(2)}|}{N^2} \quad (3)$$

gdzie:

$y^{(1)}, y^{(2)}$ – obliczona wartość odległości odpowiednio dla czujnika pierwszego i drugiego,

N – liczba pomiarów.

Z przedstawionych powyżej metod najlepsze wyniki zostały otrzymane dla metody obliczającej różnicę pomiędzy dwoma funkcjami. Na podstawie minimalizacji tej różnicy możliwe jest określenie wzajemnego przesunięcia dwóch zbiorów względem siebie.

$$shift = j \quad \text{dla} \quad \min \left(\sum_{i=j}^N \frac{|y_i^{(1)} - y_{i-j}^{(2)}|}{(N-j)^2} \right) \Bigg|_{j=0}^N \quad (4)$$

Znając wzajemne przesunięcie wektorów $y^{(1)}$ i $y^{(2)}$, jesteśmy w stanie na podstawie wzoru (5) określić prędkość poruszającego się obiektu, znajdującego się w zasięgu czujników.

$$V = \frac{dS}{shift \cdot \Delta t} \quad (5)$$

Zakładając że częstotliwość wykonywanych pomiarów jest stała, możemy wyznaczyć przesunięcie obiektu ze wzoru:

$$\Delta S = \frac{V}{shift} \quad (6)$$

gdzie:

ΔS – Odległość pokonana przez poruszający się obiekt [mm],

dS – odległość pomiędzy sensorami [mm],

$shift$ – wartość przesunięcia wektorów względem siebie,

V – prędkość obiektu,

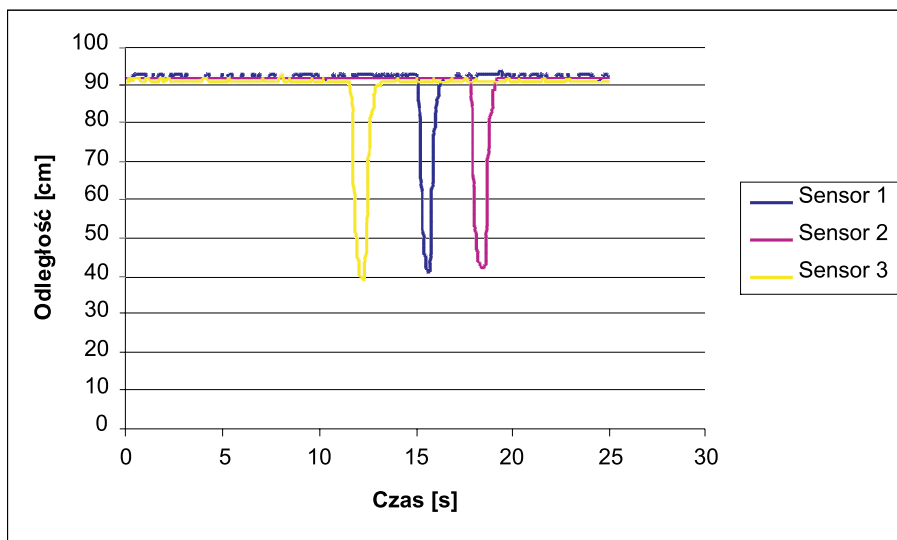
Δt – czas pomiędzy kolejnymi próbkami.

4. Wynik

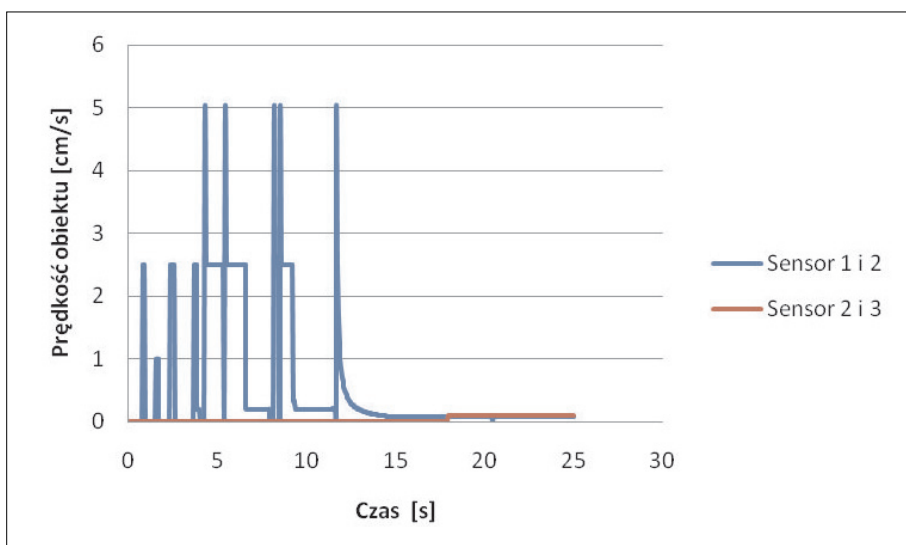
W celu zweryfikowania zaproponowanego algorytmu zostały przeprowadzone testy detekcji ruchu przy wykorzystaniu trzech czujników podczerwonych (rys. 6). W trakcie

eksperymentów w polu widzenia nieruchomych sensorów były przemieszczane obiekty o różnych gabarytach. Jako wyniki eksperymentu przedstawiono: wykres błędu dopasowania (rys. 8, 10) oraz wykresy prędkości wyliczonej w funkcji czasu (rys. 7, 9).

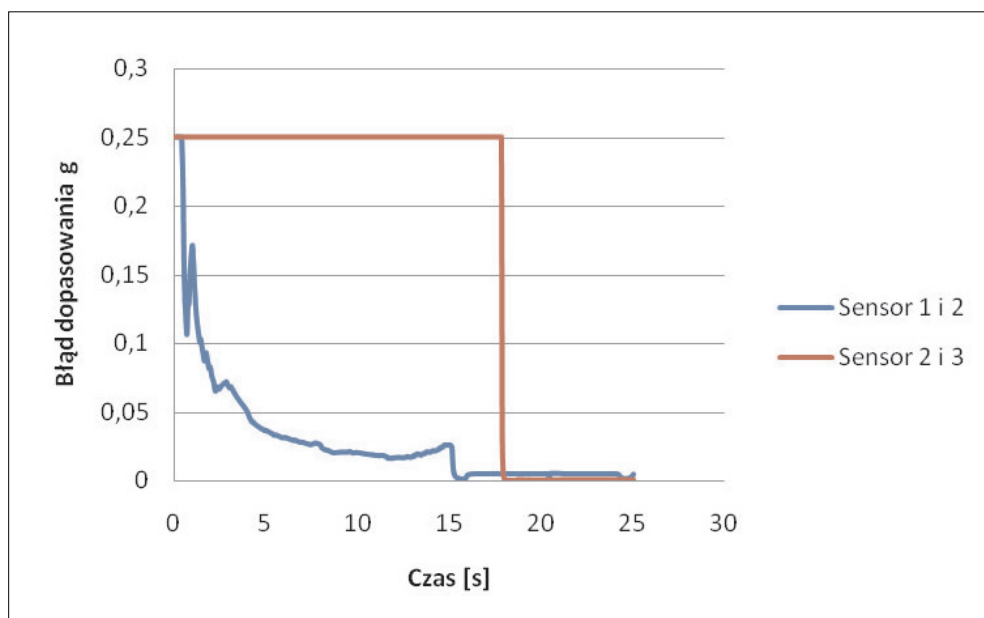
Poniżej przedstawiono rzeczywiste dane pomiarowe oraz wyliczone na ich podstawie prędkości oraz błąd dopasowania g .



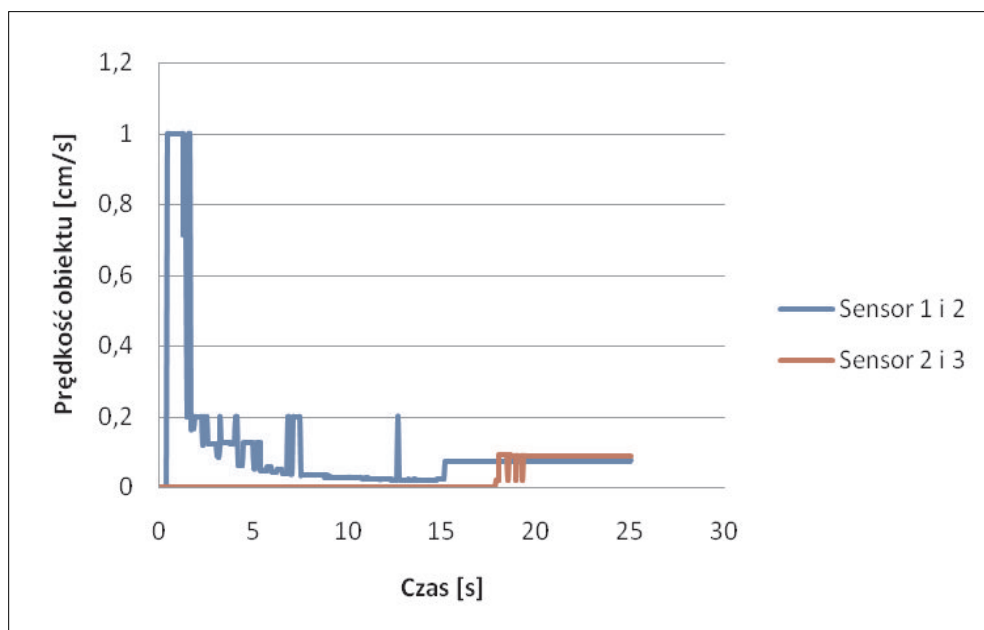
Rys. 6. Schemat algorytmu wykrywania ruchu



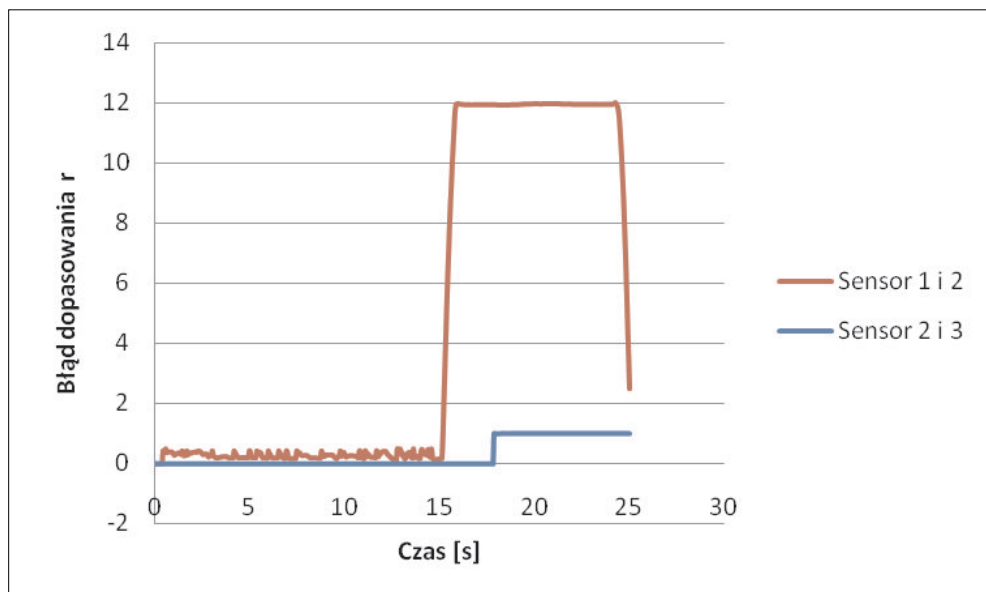
Rys. 7. Prędkość w danym przedziale czasowym



Rys. 8. Błąd dopasowania



Rys. 9. Prędkość w danym przedziale czasowym



Rys. 10. Błąd dopasowania

Tabela 1

Wyniki pomiaru prędkości kilku wybranych obiektów

Lp.	Szerokość obiektu [cm]	Prędkość	
		wyznaczona	rzeczywista
1	5,7	7,63	6,82
2	10	6,97	5,84
3	0,6	6,26	6,13
4	3,3	8,1	7,05
5	18	9,9	8,49
6	10	6,33	5,17

Przedstawione wykresy wykazują, że prędkość wyliczona jest wiarygodna, wtedy błąd dopasowania g nie przekracza wartości 0,02. Jeśli wartość g przekracza próg, wówczas wyliczone dane należy odrzucić. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiaru prędkości kilku wybranych obiektów.

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule w oparciu o procesor sygnałowy zaprezentowano praktyczną implementację algorytmu do detekcji poruszających się obiektów. Opracowany algorytm znajdzie zastosowanie w systemie nawigacyjnym robota do wykrywania obiektów poruszających się w jego otoczeniu. Ponadto umożliwia także określenie prędkości poruszającego się obiektu. Informacja ta wraz z danymi pochodzącymi z czujników umożliwi stwierdzenie, czy obiekt znajduje się na kursie kolizyjnym z robotem mobilnym. Na podstawie opracowanej procedury poruszający się robot jest w stanie wyznaczyć własną prędkość oraz przesunięcie w jednostce czasu.

Podziękowania

Współautorzy Piotr Duch, Sylwester Błaszczyk są stypendystami projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń – zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej – zarządzanie uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych” współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

- [1] Marr D., *Vision. A computational investigation into the human representation and processing of Visual information*. W.H. Freeman San Francisco, 1982.
- [2] Pąchalska M., *Neuropsychologia kliniczna*. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 2007.
- [3] Milner D.A., Goodale M.A., *Mózg wzrokowy w działaniu*. WNT, 2008.
- [4] Ingle D., *Two Visual systems in the frog*. Science 181, 1053, 1055.
- [5] Barton R.A., Dean P., *Comparative evidence indicating neural specialization for predatory behavior in mammals*. Proc. R. Soc. London, 1993, B254, 63–68.
- [6] Jeżewski S., Sankowski D., Dadan W., *Koncepcja autonomicznego robota pola walki przeznaczonego do zadań zwiadu i wykrywania min*. Automatyka, rocznik, ISSN: 1429-3447, 2009, 1107–1116,
- [7] Tarek Mohammad, *Using Ultrasonic and Infrared for Distance Measurement*. World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 51, March 2009, ISSN: 2070–3724.
- [8] Benet G., Blanes F., Simo J.E., Perez P., *Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 40, Issue 4, 30 September 2002, 255–266.
- [9] Koskinen S., *Sensor Data Fusion Based of Tyre-Road Friction to Enhance Collision Avoidance*. Espoo 2010 VTT Publications 730.