

Edward F. PLIŃSKI, Jerzy S. WITKOWSKI, Andrzej R. WOŁCZOWSKI

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI I AKUSTYKI

INSTYTUT CYBERNETYKI TECHNICZNEJ

Dalmierz laserowy do zastosowań robotycznych

Streszczenie

Krótko omówiono optyczne techniki pomiaru odległości możliwe do zastosowań w robotyce. Zaprezentowano nową konstrukcję dalmierza laserowego opartą na metodzie modulacji amplitudy. Omówiono zasadę działania skonstruowanego dalmierza wraz z algorytmem sterowania pomiarem. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów odległości.

Abstract

The paper briefly discusses optical techniques of distance measurement useful for robotics applications. A new construction of a laser rangefinder based on the method of amplitude modulation is presented. The principle of operation of the rangefinder as well as algorithm of measurement control are described. Experimentally measurement results have been provided.

Dalmierz jest urządzeniem do zdalnego (bezkontaktowego) pomiaru odległości do oddalonego obiektu. Znane są zastosowania dalmierzy do pomiarów geodezyjnych i kartograficznych, a także w budownictwie lądowym i wodnym oraz górnictwie i astronautyce. Nową dziedziną zastosowań jest robotyka, w której pomiary odległości służą do wyznaczania określonych cech geometrycznych otoczenia robota. Najomość tych cech jest szczególnie istotna w przypadku robotów inteligentnych, aktywnie rozpoznających swoje otoczenie. Ma to znaczenie zwłaszcza dla robotów mobilnych, dla których dalmierz może stanowić jeden z sensorów „dalekiego zasięgu” dostarczający informacji globalnych o otoczeniu. W zautomatyzowanej robotyce pomiary odległości znajdują zastosowanie przy realizacji szeregu zadań takich jak: nawigacja robota

mobilnego, inspekcja otoczenia (ukierunkowana na wykrywanie nieznanymi obiektów), elastyczne procesy montażowe a także lokowanie stopy robota kroczącego. Dla takich zastosowań dalmierz powinien charakteryzować się wysoką niezawodnością, zasięgiem rzędu od pojedynczych centymetrów do kilkunastu metrów, dokładnością od jednego do kilku centymetrów oraz rozdzielczością kątową rzędu dziesiątych części stopnia. Koncepcja budowy takiego dalmierza jest przedmiotem niniejszego opracowania.

Zdalny pomiar odległości charakteryzuje się brakiem bezpośredniego kontaktu mechanicznego (dotykowego) sensora z obiektem, którego oddalenie jest przedmiotem pomiaru. Bezkontaktowy pomiar jest szczególnie istotny w tych zastosowaniach robotycznych, w których mamy do czynienia z przemierzającym się swobodnie robotem.

Do najczęściej wykorzystywanych metod zdalnego pomiaru odległości należą metody wykorzystujące rozchodzenie się dźwięku i światła, czyli akustyczne i optyczne metody pomiaru. Zaletami sensorów akustycznych - ultradźwiękowych sonarów są: prostota budowy i niski koszt, a także uzyskiwana w określonych warunkach duża dokładność pomiaru odległości. Jednak ich podstawową wadą w zastosowaniach robotycznych [1] jest mała rozdzielczość kątowa (rzędu 20-30 stopni) oraz wrażliwość na odbicia lustrzane (zachodzące dla większości występujących w otoczeniu robota materiałów), związana ze względnie dużą długością fali dźwiękowej. Również dokładność pomiaru odległości w warunkach występujących typowo w otoczeniu robota jest niska. Wymienionych wad nie mają sensory optyczne wykorzystujące własności fali świetlnej, zwłaszcza sensory o bezpośrednim odczycie zwane lidarami [2].

Wśród takich sensorów optycznych zdecydowanie najbardziej korzystnymi parametrami dla zastosowań robotycznych charakteryzują się dalmierze wykorzystujące do celów pomiarowych wąski promień światła laserowego. Do podstawowych zalet sensorów laserowych należy wysoka rozdzielczość kątowa oraz niska wrażliwość na zakłócenia (np. zmiany oświetlenia zewnętrznego) występujące w otoczeniu robota.

Przy konstruowaniu takiego dalmierza należy zwrócić uwagę, że urządzenia wykorzystujące lasery mogą stanowić zagrożenie dla wzroku. Warunki pracy z laserami reguluje norma PN-91/T-06700 [3].

PRZEGLĄD LASEROWYCH METOD POMIARU ODLEGŁOŚCI

Istnieje wiele metod pomiaru odległości z wykorzystaniem światła laserowego [4]. Podstawowe z nich to:

* Dr Edward F. PLIŃSKI

absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu Wrocławskiego, obecnie adiunkt w Zakładzie Teorii Pola Elektromagnetycznego i Elektroniki Kwantowej Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Obszar zainteresowań: lasery falowodowe CO₂ wzbudzane prądem w.c.z., rezonatory optyczne laserów dużej mocy, technologia laserowa.

* Dr inż. Jerzy S. WITKOWSKI

absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, obecnie adiunkt w Zakładzie Teorii Pola Elektromagnetycznego i Elektroniki Kwantowej Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Obszar zainteresowań: lasery falowodowe CO₂, metrologia laserowa, układy elektroniczne z uwzględnieniem zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej.

* Dr inż. Andrzej R. WOŁCZOWSKI

absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, obecnie adiunkt w Zakładzie Podstaw Cybernetyki i Robotyki Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Zajmuje się systemami sterowania autonomicznych robotów mobilnych ich architekturą oraz praktyczną implementacją w systemach mikroprocesorowych, algorytmami planowania i realizacji działań lokomocyjnych, a także sensorami dostarczającymi informacji niezbędnej dla nadzoru takich działań. Jest konstruktorem pierwszego w kraju robota mobilnego.

a) metoda zbliżeniowa - dyfuzyjna

Układ pomiarowy obejmuje źródło i detektor światła o charakterystyce kierunkowej i przecinających się osiach optycznych. Odbiór światła ze źródła układu jest możliwy jedynie wtedy, gdy obiekt rozpraszający światło znajduje się dokładnie w rejonie przecięcia się osi optycznych. Umożliwia to zgrubne określenie odległości. Wadą jest skrajnie niska rozdzielczość.

b) metoda triangulacyjna

Układ pomiarowy składa się ze źródła światła i kamery wizyjnej o przecinających się osiach optycznych. Położenie punktu o największej intensywności (obrazu oświetlonego punktu na obiekcie) na obrazie z kamery jest jednoznacznie zależne od odległości obiektu od źródła światła. Wadą jest możliwość zakłócenia obrazu z kamery przez refleksy świetlne lub inne źródła światła.

c) metoda czasu przelotu (TOF)

Układ pomiarowy obejmuje źródło i detektor światła umieszczone współosiowo (optycznie) oraz licznik czasu. Źródło emituje impulsy światła, które po odbiciu od obiektu powracają do detektora. Licznik mierzy czas przelotu TOF (time of flight) światła od momentu nadania impulsu do momentu jego odbioru przez detektor. Ten czas jest wprost proporcjonalny do odległości. Ze względu na bardzo dużą prędkość propagacji światła ($3 \cdot 10^8$ m/s) zachodzi potrzeba pomiaru bardzo krótkich odcięć czasu z bardzo dużą, subnano-sekundową, dokładnością już dla niewielkiej (rzędu cm) rozdzielczości pomiaru odległości.

d) metoda modulacji amplitudy

W tej metodzie, w odróżnieniu od metody TOF, źródło emituje ciągłą falę świetlną o modulowanej sinusoidalnie amplitudzie. Mierzony dystans jest proporcjonalny do różnicy faz sygnału nadawanego i odbieranego. Dokładność pomiaru odległości jest podobna jak w metodzie TOF; jednak w realizacji zapewnia znacznie bardziej korzystny stosunek rozdzielczości, powtarzalności i niezawodności pomiaru do kosztu urządzenia. Wadą jest niejednoznaczność pomiaru dla dystansów przekraczających wielokrotność połowy długości fali modulującej. Tę wadę można zredukować stosując zmienną częstotliwość modulacji amplitudy.

e) metoda modulacji częstotliwości

W tej metodzie źródło emituje ciągłą falę świetlną o częstotliwości zmieniającej się według profilu pitokształtnego (przedziałami liniowego) [5]. Opóźnienie czasowe profilu częstotliwościowego odbieranego sygnału jest proporcjonalne do różnicy częstotliwości nadawanego i odbieranego sygnału, czyli częstotliwości zdudniania a zarazem proporcjonalne do mierzonego dystansu. Dokładność metody zależy od zgodności profilu częstotliwości generowanej fali z idealnym profilem trójkątnym. Częstotliwość optyczną diod laserowych można dostrajać termicznie przez modulowanie prądu sterującego, jednak uzyskiwana precyzja modulacji jest niewielka.

f) metoda analizy ostrości obrazu

Układ pomiarowy obejmuje źródło światła oraz kamerę z regulowanym obiektywem o małej głębi ostrości. Mała głębia

ostrości powoduje, że dla danej pozycji obiektywu na obrazie są ostro zarysowane jedynie te elementy otoczenia, które znajdują się w ściśle określonej odległości od kamery. Odległość ta jest jednoznacznie określona przez pozycję obiektywu. Gwałtowne zmiany obrazu związane z ostro zarysowanymi elementami (krawędzie, tekstura powierzchni) są reprezentowane w sygnale video składowymi o wysokiej częstotliwości. W celu określenia odległości elementów obserwowanego otoczenia, dla każdej pozycji składowe wysokiej częstotliwości sygnału video są odfiltrowywane, całkowane za okres analizy kadru i zapamiętywane. Po zakończeniu tego procesu profil zapamiętanego sygnału video w funkcji kolejnych wartości odległości jest przetwarzany dla redukcji szumu, a następnie analizowany pod względem położenia znaczących pików. Położenie każdego pików odpowiada odległości ostrego widzenia jakiegoś elementu otoczenia. Dokładność metody jest odwrotnie proporcjonalna do głębi ostrości obiektywu, a więc jest tym lepsza, im dłuższa ogniskowa i mniejsza przysłona. To z kolei powoduje zawężenie pola widzenia kamery oraz wzrost jej rozmiarów i ciężaru. Inną wadą metody jest złożoność obliczeniowa procedury pomiarowej.

ELEMENTY DALMIERZY LASEROWYCH

Źródła promieniowania laserowego

W dalmierzach laserowych stosowane jest wiele źródeł laserowych takich jak lasery gazowe, na ciele stałym, w tym lasery półprzewodnikowe. Najbardziej popularne źródła, to laser molekularny na dwutlenku węgla (CO_2 - $\lambda=10,6 \mu\text{m}$), neodymowy (NdYAG - $\lambda=1,1 \mu\text{m}$), helowo-neonowy (He-Ne $\lambda=0,63 \mu\text{m}$) i półprzewodnikowy ($\lambda=0,6-0,9 \mu\text{m}$) [6]. Zwykle, dalmierze stosowane w robotyce opierają się na diodach laserowych ze względu na ich niski koszt, małą wagę, małe wymiary, dużą sprawność, odporność i pracę w temperaturze pokojowej. Diody laserowe doskonale nadają się dla pomiarów odległości ze względu na łatwość modulacji wyjściowej wiązki optycznej z częstotliwością do setek megaherców przez modulację prądu lasera. Diody laserowe mogą również z łatwością pracować w reżimie impulsowym (w układach dalmierzy z pomiarem czasu przelotu sygnału optycznego od lasera do przedmiotu) z impulsami o długości nanosekund i częstotliwością repetycji rzędu kiloherców przez impulsowanie prądu lasera.

Diody laserowe dostępne są o zakresie emitowanej fali od widzialnego po bliską podczerwień. Jednak najbardziej efektywne okazują się być diody laserowe GaAlAs, których długość emitowanej fali leży w zakresie od około 800 do 900 nm. Są one szczególnie użyteczne ze względu na dostępne fotodetektory, o dużej sprawności, szybkie i tanie, których maksimum czułości przypada właśnie na ten zakres widma.

Detekcja promieniowania optycznego

Dalmierze laserowe wymagają szybkich, o dużej sprawności, o niskim poziomie szumów detektorów promieniowania optycznego. Klasycznym detektorem spełniającym te wymagania są fotopowielacze. Jednak ze względu na wysoką cenę i konieczność stosowania złożonych układów zasilania są rzadko stosowane w układach praktycznych. Zwykle dalmierze laserowe używane w robotyce wyposażają się w detektory krzemowe, których maksimum czułości przypada na zakres bliskiej podczerwieni. Najczęściej stosuje się krzemowe diody PIN oraz diody lawinowe APD (Avalanche PhotoDiode) [7]. Czułości diod

detekcyjnych są rzędu 0,5 A/W, pasmo optyczne zawiera się w granicach od 0,3 do 1,1 μm , z maksimum w granicach 0,8-0,9 mm, a ich szumy leżą na poziomie szumów kwantowych, częstotliwość pracy sięga gigaherców. W układach z diodami APD, dzięki efektowi powielania, możliwe jest uzyskanie znacznie lepszego parametru stosunku sygnału do szumu, co powoduje, że są częściej stosowane w praktycznych rozwiązaniach. Do ich wad zalicza się konieczność stosowania wysokiego napięcia zasilania i mniejszą stabilność termiczną parametrów.

SZCZEGÓŁOWY OPIS ZASTOSOWANEJ METODY POMIARU ODLEGŁOŚCI [8, 9]

W proponowanej metodzie sygnał optyczny lasera jest modulowany, podobnie jak w opisanej wcześniej metodzie modulacji amplitudy. Sygnał optyczny (rys. 1) lasera jest modulowany przebiegiem sinusoidalnym w.c.z. o przebiegu

$$h_1(t) = A \cos(\omega t) \quad (1)$$

Sygnał ten jest kluczowany przebiegiem prostokątnym m.c.z.: $P(t, T)$ o okresie T . W rezultacie otrzymujemy sygnał w.c.z. kluczowany sygnałem prostokątnym

$$h_2(t) = AP(t, T) \cos(\omega t) \quad (2)$$

Sygnał ten służy do sterowania prądem lasera półprzewodnikowego, a tym samym wiązkę optyczną padającą na badany obiekt. Wcześniej, przed laserem, sygnał sterujący przechodzi przez linię opóźniającą o długości elektrycznej l_0 . Sygnał optyczny odbity od badanego obiektu po odbiorze przez fotodetektor i wzmocnieniu daje sygnał elektryczny przesunięty w fazie proporcjonalnie do przebytej odległości

$$g_1(t) = k_1 P(t, T) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi(2d + l_0)}{\lambda}\right) \quad (3)$$

gdzie:

d - odległość od badanego obiektu,

$\lambda = 2\pi c/\omega$ - długość fali sygnału w.c.z. w próżni.

Po wzmocnieniu sygnał ten jest podawany na detektor fazy w postaci zrównoważonego mieszacza iloczynowego. Równocześnie do detektora fazy podawany jest sygnał odniesienia z generatora w.c.z. Za detektorem fazy otrzymuje się prostokątny sygnał małej częstotliwości o amplitudzie zależnej od przesunięcia fazowego:

$$g_2(t) = k_2 P(t, T) \cos\left(\frac{2\pi(2d + l_0)}{\lambda}\right) \quad (4)$$

Sygnał wyjściowy z detektora fazy po wzmocnieniu poddawany jest detekcji synchronicznej na kolejnym detektorze fazy, do którego równocześnie podawany jest sygnał odniesienia z generatora m.c.z. W rezultacie, za detektorem fazy, otrzymuje się sygnał:

$$g_3(t) = k_3 \cos\left(\frac{2\pi(2d + l_0)}{\lambda}\right) \quad (5)$$

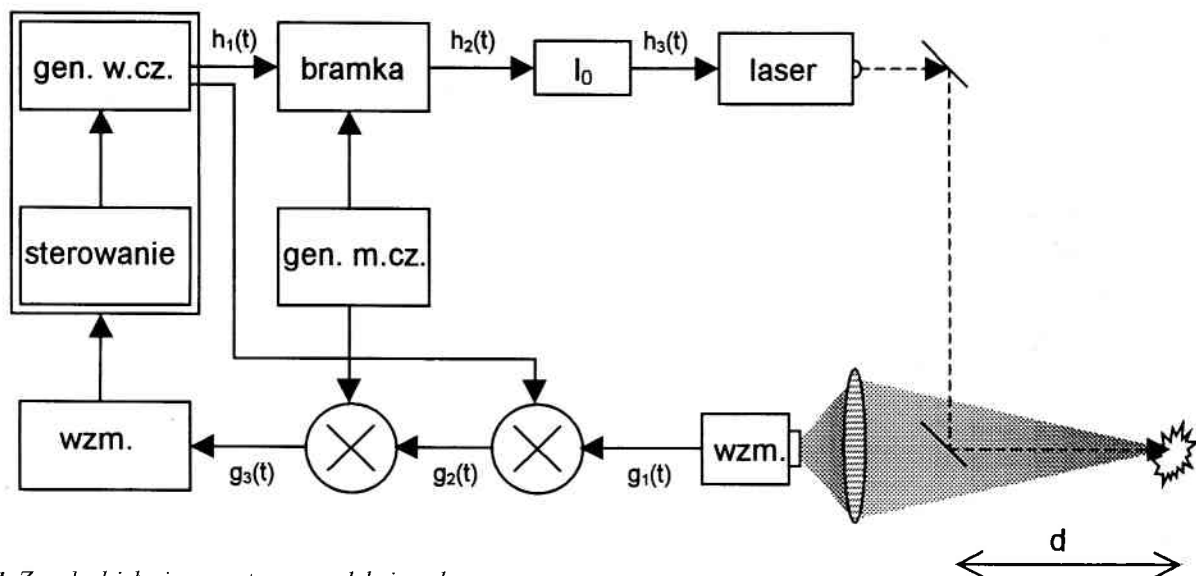
Jest on równy zero tylko wtedy, gdy odległość elektryczna między początkiem linii opóźniającej, umieszczonej przed laserem, a fotodetektorem jest równa $\lambda/4$, gdzie λ jest długością fali w.c.z. z generatora wiodącego. Stąd można napisać równanie:

$$\frac{\lambda}{4} = 2d + l_0 \quad (6)$$

Podstawiając, $\lambda = c/f$, gdzie: c - prędkość światła, f - częstotliwość sygnału w.c.z., otrzymamy:

$$f = \frac{c}{4(2d + l_0)} \quad (7)$$

Dla tej częstotliwości i odległości od obiektu równej d , sygnał z detektora synchronicznego jest równy zero. Z równania (2) wynika, że dla $d = 0$ częstotliwość f jest równa $f = c/4l_0$ i byłaby równa nieskończoności, gdyby nie zastosowano w układzie pomiarowym linii opóźniającej. Tym samym zakres zmian często-



Rys. 1. Zasada działania prezentowanego dalmierza laserowego

liwości generatora wiodącego zawiera się w granicach od $f_{min} = c/4(2d_{max} + l_0)$ do $f_{max} = c/4(2d_{min} + l_0)$ dla zmian odległości mierzonej od d_{min} do d_{max} . Reasumując pomiar odległości sprowadza się do takiej zmiany częstotliwości generatora wiodącego, aby na wyjściu detektora synchronicznego m.cz. otrzymać zawsze sygnał równy zeru. Wtedy odległość od badanego obiektu wynosi:

$$d = \frac{c}{8f} - \frac{l_0}{2} \quad (8)$$

W przedstawionej metodzie istnieje, jak w każdej metodzie modulacji amplitudy, niejednoznaczność odczytu odległości związana z występowaniem miejsc zerowych równania (5) dla odległości d równej wielokrotności długości fali w.cz..

Dokładność pomiaru

Zgodnie z [10], standardowe odchylenie mierzonej odległości, można wyrazić jako:

$$\sigma_d = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_\varphi = \frac{c}{4\pi f} \sigma_\varphi \quad (9)$$

gdzie σ_φ - standardowe odchylenie fazy odbieranego sygnału.

Analiza zakłóceń fazy jest trudna [10, 11]. Jednak biorąc pod uwagę, że współczynnik stosunku sygnału do szumu (SNR) jest większy od 3, odchylenie fazy może być przedstawione jako szum Gaussa o odchyleniu standardowym przedstawionym zależnością:

$$\sigma_\varphi = \frac{1}{\sqrt{2} \sqrt{\frac{S}{N}}} \quad (10)$$

gdzie: S/N jest współczynnikiem SNR.
Stąd

$$\sigma_d = \frac{c}{4\sqrt{2}\pi f} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (11)$$

Moc sygnału S zależy od mierzonego dystansu, orientacji powierzchni celu i współczynnika jej odbicia. Podstawowymi źródłami zakłóceń (mocy zakłóceń N) są:

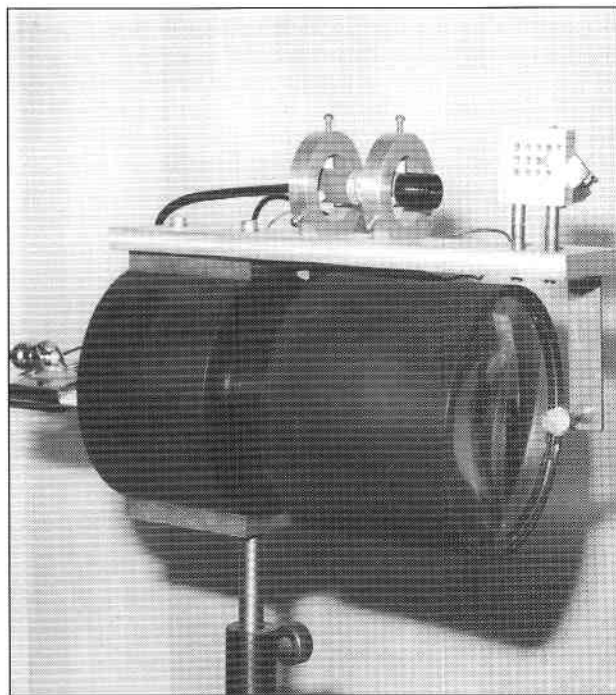
- Szum źródła światła ze względu na jego statystyczną naturę;
- Szum fotodetektora:
 - szum prądu ciemnego,
 - szum oświetlenia tła,
 - szum termiczny;
- Szum termiczny przedwzmacniacza fotodetektora.

W przypadku opracowanego dalmierza stwierdzono, że głównym źródłem szumu były szумы termiczne detektora i przedwzmacniacza.

KONSTRUKCJA DALMIERZA

Część sygnałowa

Mechanicznie głównym elementem skonstruowanego dalmierza jest (rys. 2) tubus, w którym umieszczono soczewkę sku-



Rys. 2. Konstrukcja dalmierza laserowego

piającą o średnicy 110 mm i ogniskowej 190 mm, a za nią filtr optyczny na bliską podczerwień typu RG9. W tylnej części tubusu zamocowano fotodetektor w postaci diody PIN zintegrowanej ze wzmacniaczem wstępnym (Hamamatsu S2858), wzmacniacz i iloczynowy detektor fazy. Laser półprzewodnikowy (Vector Ltd. BetaTx 820) o długości fali wiązki optycznej równej 820 nm przytwierdzono na wierzchniej części tubusu. Wiązka laserowa po dwukrotnym odbiciu od justowanych zwierciadeł kierowana jest na badany obiekt. Po odbiciu od obiektu wiązka przez soczewkę i filtr podczerwieni pada na fotodetektor. Dalej, otrzymany sygnał elektryczny z fotodetektora, poddawany jest stosownej obróbce elektronicznej opisanej w poprzednim rozdziale.

Część sterująca

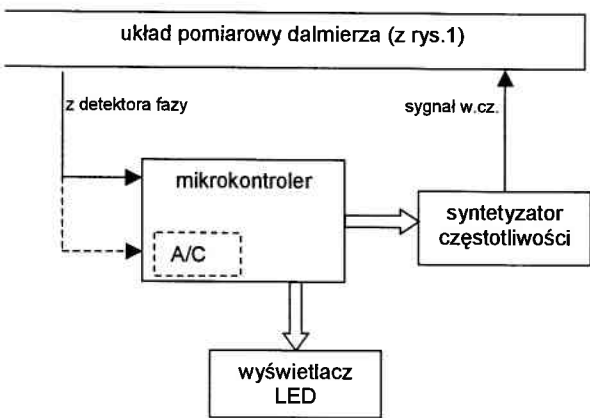
Jak wynika z przyjętej metody pomiarowej, proces pomiaru polega na przestrajaniu częstotliwości sygnału w.cz., modulującego amplitudę wiązki optycznej, do momentu, gdy długość λ fali modulującej zrówna się z czterokrotną długością drogi przebywanej przez sygnał pomiarowy. Taka równość jest sygnalizowana w układzie pomiarowym przez zerową wartość sygnału $g_3(t)$ na wyjściu detektora synchronicznego. Wtedy należy odczytać częstotliwość f modulacji i na podstawie wzoru (8) obliczyć odległość d .

Zadania opisane powyżej realizuje układ sterowania procesem pomiaru pokazany na rys. 3.

Układ ten obejmuje [12]:

- moduł mikrokontrolera 8051, który bada stan wyjścia detektora fazy oraz steruje, za pośrednictwem magistrali szeregowej I2C, układami syntezy częstotliwości i wyświetlacza wyników;
- syntezytor częstotliwości oparty na układzie PLL;
- układ wyświetlania wyników z 4-cyfrowym wyświetlaczem LED.

Badanie stanu detektora synchronicznego jest realizowane za pomocą pojedynczej linii. Stanem aktywnym jest stan niski.

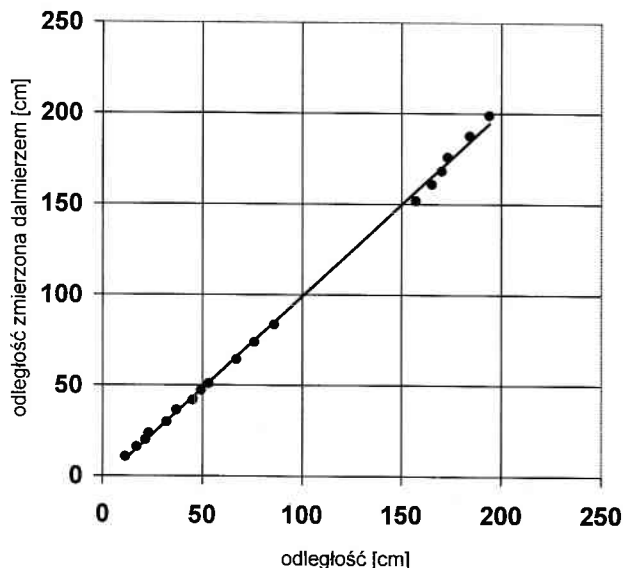


Rys. 3. Układ sterownia dalmierzem

OPIS UZYSKANYCH REZULTATÓW

Przeprowadzone eksperymenty z wykonanym modelem [13] potwierdziły poprawność przyjętej koncepcji pomiaru odległości i konstrukcji układu dalmierza. Podstawowe parametry urządzenia istotne ze względu na specyfikę zastosowania w robotyce to: zasięg pomiarowy, dokładność pomiaru, szybkość cyklu pomiaru, masa i rozmiary sensora.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zasięg dalmierza wynosi od 0,1 do 6 m (w zależności od powierzchni odbijającej) z dokładnością około 3% (rys. 4). Zasięg i dokładność zależą od stosunku mocy sygnału powrotnego do szumu. Ten stosunek można poprawić zwiększając moc lasera oraz czułość i pasmo odbiornika. Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo obsługi ludzkiej, moc lasera ograniczono do 15 mW. Globalna czułość dalmierza jest więc efektem jego rozmiarów (średnica soczewki) i czułości



Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów odległości skonstruowanym dalmierzem

fotodetektora. W zbudowanym modelu, ze względu na koszt, zastosowano diodę PIN. Znacznie lepsze parametry czułości można uzyskać stosując diody lawinowe APD (AvalanchePhotoDiode), jednak ich koszt jest kilkakrotnie wyższy. Z kolei gabaryty i masa sensora są istotne ze względu na zakres zastosowań: np. możliwe ulokowanie na chwytaku robota lub małym mobilnym robocie inspekcyjnym.

Jak wynika z przeprowadzonych testów nad dalmierzem, a także badań literaturowych w dziedzinie, na dokładność pomiaru odległości ma wpływ wiele parametrów otoczenia takich jak: temperatura, oświetlenie tła, współczynnik rozpraszania powierzchni mierzonych obiektów itp.

W dalszych badaniach zostanie wprowadzony dodatkowo pomiar poziomu sygnału odbieranego przez fotodetektor (rys. 3) w celu uzyskania dodatkowej informacji o stopniu szarości powierzchni odbijającej. Informacja ta w połączeniu ze skanowaniem pozwoli uzyskać obraz otoczenia w stopniach szarości skorelowanym z obrazem plastycznym tworzonym przez dalmierz, co zwiększy stopień rozróżnialności szczegółów przez dalmierz.

LITERATURA

- [1] A.R. WOŁCZOWSKI: Laboratorium stanowisko do badania systemu dalmierza ultradźwiękowego. Raport ICT, serii SPR nr 45/94, Politechnika Wroclawska, Wrocław 1994.
- [2] A. DUBRAWSKI, R. SAWA: Laserowe trójwymiarowe czujniki odległości w nawigacji ruchomych robotów. V Krajowa Konferencja Robotyki, Prace Naukowe ICT Politechniki Wroclawskiej, tom 1, Wrocław 1996, 324-333.
- [3] Bezpieczeństwo przy promieniowaniu emitowanym przez urządzenie laserowe. Klasyfikacja sprzętu. Wymagania i wytyczne dla użytkowników. Polska Norma PN-91/T-06700, (1991).
- [4] H.R. EVERETT: Survey of collision avoidance and ranging sensors for mobile robots. Robotics and Autonomous Systems, 5/1989 No. 1.
- [5] G. BEHEIM, K. FRITSCH: Range finding using frequency-modulated laser diode. Appl.Optics 25/1996, No. 9, 1439-1442.
- [6] D.C. CARMER, L.M. PETERSON: Laser radar in robotics. Proc. of the IEEE 84/1986 No. 2.
- [7] A. YARIV: Optical electronics. HRW 3rd edition, New York 1989.
- [8] J. S. WITKOWSKI, A. R. WOŁCZOWSKI, E. F. PLIŃSKI: Dalmierz laserowy. Zgłoszenie Patentowe Nr P323026, (1997).
- [9] J. S. WITKOWSKI, A. R. WOŁCZOWSKI, E. F. PLIŃSKI: Sposób pomiaru odległości. Zgłoszenie Patentowe Nr P323025, (1997).
- [10] A.R. WOŁCZOWSKI, P. FILIPIAK, M. ZNAMIROWSKI: System sterowania dalmierzem laserowym. Raport ICT Nr SPR 5/98, Politechnika Wroclawska, Wrocław 1998.
- [11] B.R. LEWIN: Teoria sluczajnych procesow i jejo primienienije w radiotechnice. So-wietkoje Radio, Moskwa 1957.
- [12] K. HOLEJKO: Precyzyjne elektroniczne pomiary odległości i kątów. WNT 1987.
- [13] E.F. PLIŃSKI, J.S. WITKOWSKI, E.K. ROSZKOWSKA, A.R. WOŁCZOWSKI: Laser rangefinder for robotics applications. Raport ICT serii PRE Nr 27/98 (praca zostanie zamieszczona w Proceedings of International Conference „Methods and Models in Automation and Robotics, Międzdroje, MMAR'98”).