

Paweł KOWALSKI *
Maciej CZYŻAK*

STEREOSKOPOWY POMIAR ODLEGŁOŚCI

Pomiar odległości jest jedną z podstawowych operacji spotykanych w systemach przemysłowych i militarnych. W pracy przedstawiono urządzenie do precyzyjnego pomiaru małych odległości nieprzekraczających 15 m. Urządzenie będzie zainstalowane na platformie mobilnej przewidzianej do pomiaru temperatury linii wysokiego napięcia z użyciem kamery termowizyjnej. Pomiar tą metodą wymaga określenia odległości od obiektu. Wartość odległości jest konieczna do prawidłowej interpretacji obrazu z kamery. Zaproponowano stereoskopowy pomiar odległości z użyciem dwóch kamer. Metoda taka umożliwi pomiar odległości od dowolnego punktu widocznego w dwóch kamerach. Kąt widzenia urządzenia jest zbliżony do kąta widzenia kamer, a więc nie ma potrzeby precyzyjnego nakierowywania urządzenia na obiekt. Najważniejszym zagadnieniem jest wyznaczenie współrzędnych obiektu w obrazie z kamer. Jest to generalnie zadanie o dużej złożoności obliczeniowej. W przeprowadzonym eksperymencie obiekt jest wykrywany na podstawie barwy i jasności.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiar odległości, wykrywanie obiektu, dalmierz, obraz stereoskopowy

1. WSTĘP

Pomiar odległości między dwoma obiektami ma zasadnicze znaczenie w wielu zastosowaniach technicznych i militarnych. Metody pomiaru odległości są szeroko prezentowane w literaturze np. w [1], [2]. Metody te dzielimy na aktywne i pasywne. Aktywne metody polegają na wysyłaniu sygnałów do obiektu np. wysyłanie promienia lasera, ultradźwięków lub sygnałów radiowych oraz analizie fal powracających. W przypadku metod pasywnych informacja o położeniu obiektu otrzymywana jest zwykle w oparciu o odbite lub emitowane przez obiekt fale nie pochodzące z dalmierza. Pomiar odległości wykonywany tą metodą jest niewykrywalny w przeciwieństwie do pomiarów aktywnych np. dalmierzem laserowym lub ultradźwiękowym, co może mieć znaczenie w zastosowaniach militarnych.

Jedną z metod pasywnych jest pomiar odległości w oparciu o obraz stereoskopowy. Zasada takiego pomiaru opisana została w [3–6].

* Politechnika Gdańska.

Metoda rozpatrywana w tej pracy jest metodą pasywną opartą o analizę obrazu stereoskopowego. Służyć ona będzie do pomiaru odległości od relatywnie małych obiektów, a w szczególności przewodów linii wysokiego napięcia z platform mobilnych. W sytuacji takiej nie można wykorzystać ani dalmierzy ultradźwiękowych ani też laserowych. Dalmierz ultradźwiękowy dokonuje pomiaru na podstawie odbitej fali dźwiękowej, która tworzy stożek o kącie rzędu kilku stopni. Zastosowanie takiego dalmierza uniemożliwia lokalizacja innych przewodów w sąsiedztwie mierzonego przewodu, niewielka średnica przewodu rzędu kilku cm oraz względnie duża odległość od urządzenia pomiarowego wynosząca od kilku do kilkunastu metrów. Odległość ta musi zostać zachowana ze względów bezpieczeństwa. Dalmierz laserowy pozwala na pomiar odległości od tak małego obiektu, wymaga on jednak nakierowania wiązki świetlnej na badany obiekt, która tworzy na nim plamkę pomiarową. Plamkę pomiarową tworzą również na obiekcie bezdotykowe czujniki temperatury. W przypadku stacjonarnego pomiaru odległości, dalmierz i przewód nie poruszają się względem siebie, wystarczy więc wykonać jeden pomiar i nie ma potrzeby ciągłego utrzymywania plamki pomiarowej na przewodzie. Jednak gdy chciałoby się monitorować w sposób ciągły temperaturę przewodu, konieczna byłaby stabilizacja plamki pomiarowej na przewodzie. Sposób stacjonarnego bezdotykowego pomiaru temperatury linii wysokiego napięcia z odległości 6 m z użyciem pirometru i soczewki Fresnela do zredukowania kąta widzenia został opisany w [7]. Zostało to zrealizowane poprzez stabilne zamontowanie pirometru i nakierowanie plamki pomiarowej na przewód, ponadto przewód nie porusza się względem pirometru, stąd nie ma potrzeby pomiaru odległości. Pomiar taki jest utrudniony w przypadku monitorowania linii z platformy mobilnej. W takim wypadku istnieje potrzeba ciągłego utrzymywania plamki pomiarowej zarówno dalmierza jak i czujnika temperatury na przewodzie. Jest to utrudnione w związku z wibracjami platformy mobilnej, względnie małym obiektem i dużą odległością oraz ciągłym przemieszczaniem się platformy mobilnej i przewodu względem siebie. Aby wyeliminować konieczność dokładnego pozycjonowania dalmierza wymagany jest taki sposób pomiaru, przy którym nie będzie wpływu ruchów przewodu oraz platformy mobilnej. Wymagania takie spełnia dalmierz realizujący pomiar odległości na podstawie obrazu stereoskopowego. Dalmierz taki wykorzystuje dwie kamery optyczne. Pomiar jest możliwy, jeśli obiekt jest widoczny w obu kamerach. Kamery dostarczają również informacji o kącie, pod jakim należy obserwować przewód. Umożliwia to korekcję wychylenia kamer poprzez ich obrót w taki sposób, aby zapobiegać zniknięciu przewodu z pola widzenia dalmierza. Mając kąt oraz odległość, możliwe jest określenie współrzędnych przewodu w przestrzeni 3D względem platformy mobilnej, co pozwala na bezpieczny przelot i monitorowanie linii przy której porusza się platforma mobilna. Możliwe jest również określenie kąta pod jakim powinna być wychylona kamera termowizyjna, tak aby przewód mieścił się w jej polu widzenia.

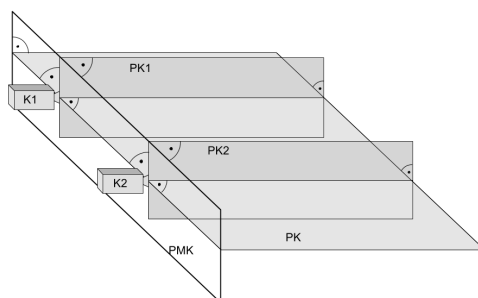
Planowany jest przelot w odległości między 6 a 10 m od linii. Przyjęto, że do poprawnego sterowania platformą, dokładność pomiaru rzędu kilkunastu cm jest wystarczająca. Poza sterowaniem platformą mobilną oraz kątem wychYLENIA kamer, dane z dalmierza stereoskopowego mogą zostać wykorzystane do korekcji błędu pomiaru temperatury linii kamerą termowizyjną na podstawie odległości.

W rozdziale 2 omówiono zasadę pomiaru stereoskopowego, a w rozdziale 3 przedstawiono budowę dalmierza optycznego oraz przykładowe wyniki pomiaru. Rozdział 4 zawiera podsumowanie.

2. ZASADA POMIARU STERESKOPOWEGO

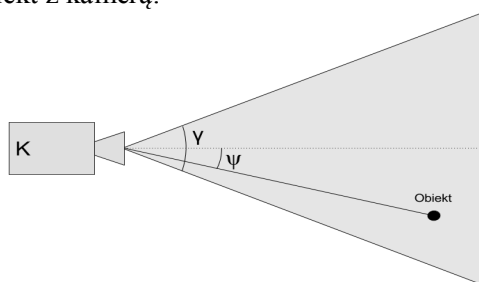
Przy realizacji pomiaru stereoskopowego wykorzystywane są dwie kamery rejestrujące dwa przesunięte względem siebie obrazy. Obrazy te są wykorzystywane do wykrycia położenia obiektu oraz określenia kąta pod jakim obiekt jest obserwowany. Znaleziony obiekt zajmuje pewną część obrazu generowanego przez kamerę. Dla uproszczenia obliczeń celowym jest określenie centralnego punktu obiektu wielkości jednego piksela, od którego będzie mierzona odległość. W opracowanym urządzeniu jeden piksel rejestruje obraz o kącie ok. $0,03^\circ$. Obiekt zajmuje zwykle od kilkudziesięciu do kilkuset pikseli. Centrum obiektu jest określane z dokładnością do jednego piksela. Efektem niedokładnego określenia pozycji obiektu jest kilkuprocentowy błąd pomiaru odległości.

Dla poprawienia czytelności rysunków przyjęto, że promienie rejestrowane przez kamerę ogniskują się dokładnie na powierzchni obiektywu kamery w jednym punkcie. W dalszej części pracy punkt ten reprezentuje kamerę i wszelkie obliczenia, obroty i przesunięcia są wykonywane względem tego punktu. Obliczenia wykonywane na kątach wykorzystują płaszczyzny: PMK – płaszczyznę montowania kamer, PK1 – płaszczyznę pionową przechodzącą centralnie przez kamerę K1, PK2 – płaszczyznę pionową przechodzącą centralnie przez kamerę K2, PK – płaszczyzna pozioma przechodząca przez środek kamer K1 oraz K2. Płaszczyzny te zaznaczono na rys. 1.



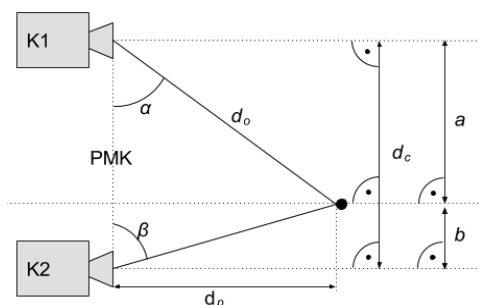
Rys. 1. Płaszczyzny wykorzystywane przy obliczaniu odległości

W dalszej części pracy schematy będą prezentowane jako rzuty na płaszczyzną PK. Na rysunku 2 przedstawiono kąt widzenia kamery γ , będący kątem zawartym między dwoma skrajnymi promieniami światła wpadającymi do obiektywu i możliwymi do zarejestrowania przez matrycę. Kąt ten określa pole widzenia w jakim może zostać wykryty obiekt. Po znalezieniu obiektu w obrazie, możliwe jest proste określenie np. kąta ψ zawartego między osią kamery a prostą łączącą obiekt z kamerą.



Rys. 2. Kąt widzenia kamery

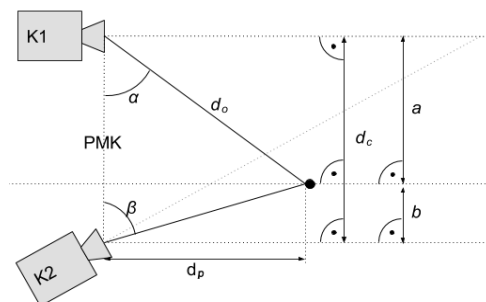
Ogólną zasadę pomiaru stereoskopowego przedstawiono na rysunku 3. Zastosowanie dwóch kamer zamontowanych w znanej odległości d_c od siebie umożliwia obliczenie odległości: d_p – odległość obiektu od płaszczyzny PMK, d_o – odległość rzutu obiektu na płaszczyznę PK od kamery K1. Do wyznaczenia odległości obiektu od kamery wystarczy informacja o kątach α i β . Kąty α oraz β są kątami między płaszczyzną PMK, a prostą łączącą daną kamerę z rzutem obiektu na płaszczyznę PK.



Rys. 3. Kamery ustawione równolegle

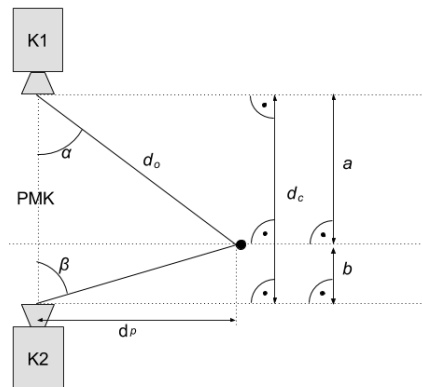
Obrót którejkolwiek z kamer skutkuje zmianą kąta ψ (rys. 2), lecz kąty α i β pozostają bez zmian. Taki sposób zdefiniowania kątów α i β nie wymusza równoległego ustawienia kamer względem siebie, co zostało zaprezentowane na rys. 4 i 5. W podejściu przedstawionym w [4] do obliczania odległości wyko-

rzystywany jest kąt ψ (rys. 2). Zakłada się też, że kamery są ustawione równolegle względem siebie. W takim przypadku zmiana kąta między kamerami będzie skutkować niepoprawnym obliczeniem odległości.



Rys. 4. Nierównoległe ustawienie kamer

Jedno z ustawień kamer wymagające najmniejszej ilości obliczeń zostało przedstawione na rys. 5. W tym przypadku $\alpha = \psi_{K1}$, $\beta = \psi_{K2}$. Jednak ustawienie takie umożliwia pomiar względnie małych odległości lub też konieczne jest stosowanie obiektywów szerokokątnych, co znacznie obniża dokładność pomiaru.



Rys. 5. Kamery usytuowane naprzeciwko siebie

Jeśli kąty α i β oraz odległość d_c są znane, to uwzględniając, że $\text{ctg}\alpha = \frac{a}{d_p}$,

$\text{ctg}\beta = \frac{b}{d_p}$ oraz $d_c = a + b$, po eliminacji a oraz b , odległość obiektu d_p od

płaszczyzny PMK można obliczyć jako

$$d_p = \frac{d_c}{\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta} \quad (1)$$

W prezentowanym dalmierzu zrealizowane zostało obliczanie odległości od kamery K1. W prezentowanych zależnościach (2), (3) d_o oznacza odległość kamery K1 od rzutu obiektu na płaszczyznę PK. Rzeczywista odległość w przestrzeni trójwymiarowej reprezentowana jest przez d_{ox} . Biorąc pod uwagę, że

$$d_o = \frac{d_p}{\sin\alpha} \quad (2)$$

otrzymujemy

$$d_{ox} = \sqrt{(\operatorname{tg}\delta \cdot d_p)^2 + d_o^2} \quad (3)$$

gdzie δ jest kątem zawartym pomiędzy prostą łączącą kamerę K1 i rzut obiektu na płaszczyznę PK1 a płaszczyznę PK.

Przykład. Obliczenie odległości dla typowych parametrów: $\alpha = 89^\circ$, $\beta = 88^\circ$, $\delta = 5^\circ$, $d_c = 35$ cm. Dla (1) otrzymujemy $d_p \approx 6,74$ m, następnie stosując (2) mamy $d_o \approx 6,74$ m. Finalnie z (3) otrzymujemy

$$d_{ox} = \sqrt{(0,0875 \cdot 6,74)^2 + 6,74^2} \approx 6,77 \text{ [m]} \quad (4)$$

Ze względu na wykorzystywanie kamer o małych kątach widzenia ok. 20° , różnica między d_p a d_{ox} nie przekroczy 3%. Różnica ta jest największa w przypadku, gdy obiekt zostanie wykryty w rogu kamery (3%). Przykład skrajnie dużego błędu można zaobserwować w sytuacji, w której zmierzone kąty wynoszą odpowiednio $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 96,07^\circ$, $\delta = 10^\circ$, a odległość między kamerami $d_c = 35$ cm. Stosując (1) otrzymujemy $d_p \approx 5$ m, dla (2) mamy $d_o \approx 5,08$ m, a (3) $d_{ox} \approx 5,15$ m. Błąd wynosi $(d_{ox} - d_p)/d_p \approx 3\%$.

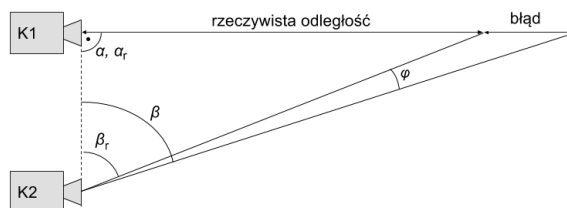
Przy zastosowaniu kamer o szerszym kącie błąd odpowiednio wzrośnie. Przykładowo, dla kamer o kącie widzenia 50° , błąd ten w skrajnym przypadku wyniesie ok. 20%.

Przy określaniu pozycji obiektu w obrazie możliwe jest określenie pozycji z dokładnością do jednego piksela. Błąd jednego piksela oznacza, że kąt rzeczywisty różni się o φ od kąta obliczonego na podstawie obrazu. Przy obliczaniu błędu założono, że obiekt znajduje się naprzeciw kamery K1, rzeczywisty oraz wyliczony kąt wynoszą $\alpha = 90^\circ$ i $\alpha_r = 90^\circ$. Kąt β określony na podstawie obrazu z kamery K2 różni się od kąta rzeczywistego β_r o kąt φ , różnica ta wynika z błędnego określenia pozycji obiektu o jeden piksel (rys. 6).

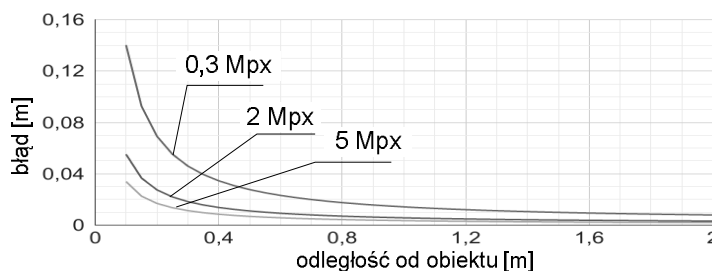
Istotnym problemem jest zależność między wielkością błędu a odległością między kamerami, rozdzielczością matrycy oraz mierzoną odległością. Na rysunku 7 zaprezentowano jak zmienia się błąd pomiaru w zależności od odległości między kamerami d_c oraz rozdzielczości kamery. Porównano kamery o roz-



dzielczościach 0,3 Mpx (640 px w poziomie), 2 Mpx (1600 px w poziomie) oraz 5 Mpx (2592 px w poziomie) oraz odległości między kamerami z przedziału [0,1 m, 2 m]. Przyjęto przy tym stałą rzeczywistą odległości obiektu równą 5 m oraz kąt widzenia kamer $\gamma = 20^\circ$.

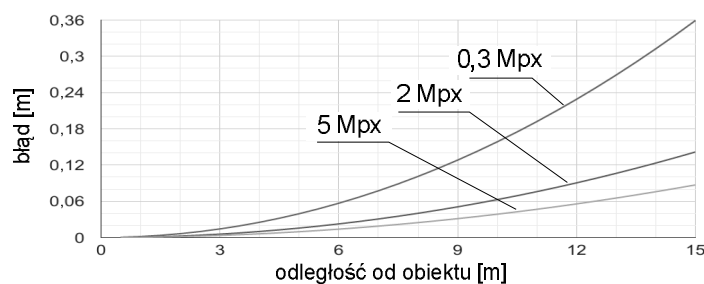


Rys. 6. Błąd pomiaru odległości przy przesunięciu o jeden piksel



Rys. 7. Błąd wyznaczania odległości w funkcji odległości między kamerami oraz rozdzielczości matrycy, dla zadanej odległości obiektu 5 m

Porównanie błędu wyznaczania odległości w zależności od rzeczywistej odległości obiektu z przedziału [0,4 m, 15 m] dla typowych rozdzielczości kamer 0,3 Mpx (640 px w poziomie), 2 Mpx (1600 px w poziomie) oraz 5 Mpx (2592 px w poziomie) zaprezentowano na rys. 8. Przyjęto przy tym zastosowanie kamer o kącie widzenia $\gamma = 20^\circ$ oraz stałą odległości między nimi $d_c = 0,35$ m.



Rys. 8. Błąd wyznaczania odległości przy rozstawie kamer 0,35 m

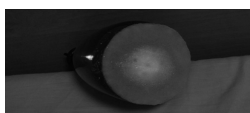
3. BUDOWA NOWEGO DALMIERZA STEREOSKOPOWEGO

Dalmierz został zbudowany z dwóch kamer o rozdzielczości 0,3 Mpx i kątach widzenia $\gamma = 20^\circ$. Kamery zostały na stałe przymocowane do aluminiowej konstrukcji (rys. 9).



Rys. 9. Konstrukcja dalmierza

W celu testowania dalmierza zbudowano nadajnik (rys. 10) traktowany jako obiekt do wykrycia. Emituje on niebieskie światło. Pozwala to na jego lokalizację poprzez filtrację obrazu względem koloru i jasności.



Rys. 10. Nadajnik emitujący niebieskie światło

Oprogramowanie przetwarzające obraz zostało napisane w języku C++ z wykorzystaniem biblioteki OpenCV [8]. Biblioteka OpenCV pozwala na proste wykorzystanie kamer. Obsługa kamery, jeśli stosuje się OpenCV, sprowadza się do stworzenia obiektu klasy `VideoCapture`. Konstruktor tej klasy wymaga podania jedynie identyfikatora systemowego urządzenia typu kamera. Nie jest wymagane określanie portu, rozdzielczości czy też częstotliwości odświeżania kamery, co powoduje, że kod programu staje się uniwersalny i prosty do analizy. Przechwycenie klatki obrazu wymaga zastosowania operatora pobierania ze strumienia `>>`. Obraz zwracany jest w formie obiektu typu `Mat` zawierającego macierzę o wysokości i długości równej rozdzielczości obrazu. Obraz może być wyświetlony z użyciem funkcji `imshow`. Funkcja ta jako argumenty przyjmuje nazwę okna oraz obraz do wyświetlenia. Do pobrania obrazu z kamery oraz wyświetlenia go na ekranie można wykorzystać kod przedstawiony na rysunku 11.

```
VideoCapture captureL = VideoCapture(1);  
Mat frame;  
captureL >> frame;  
imshow(window_name, frame);
```

Rys. 11. Fragment kodu pobierającego i wyświetlającego obraz

Z biblioteki OpenCV wykorzystano funkcję `cvtColor` do konwersji obrazu z formatu RGB (Red Green Blue) na format HSV (Hue Saturation Value), funkcję `inRange` do filtracji otrzymanego obrazu. Funkcja ta przyjmuje jako argument obiekt klasy `Mat`, dolny i górny zakres filtracji oraz wskaźnik do macierzy wynikowej. Filtracja polega tutaj na wykrywaniu, czy dana wartość należy do zadanego przedziału określanego jako dolny i górny zakres filtracji i przypisywaniu 1, jeżeli wartość mieści się w zadanym przedziale i 0 w przeciwnym przypadku. W wyniku takiego działania powstaje macierz binarna.

Dla celów redukcji szumów stosowane są funkcje `blur` (rozmycie, wyrównywanie tła) oraz `erode` (erozja). W przefiltrowanym i odszumionym obrazie, obiekt jest znajdowany za pomocą funkcji `findContours`, która przeszukuje macierz w poszukiwaniu konturów (w tym przypadku grup jedynek). Za pomocą funkcji `minEnclosingCircle` znajdowany jest promień koła opisanego na znalezionym konturze, dla każdego konturu osobno. Poprzez porównanie pola znalezionego koła z polem konturu odrzucane są kontury o kształcie znacznie odbiegającym od koła. Spośród pozostałych konturów wybierany jest ten o największym polu. W stworzonej aplikacji zastosowano dwa okna wyświetlające widok z każdej z dwóch kamer. W każdym oknie wyświetlany jest znacznik w postaci zielonego kwadratu z niebieskimi przekątnymi wskazujący na miejsce wykrycia obiektu. W środkowej części okna wyświetlana jest wartość przesunięcia obiektu względem środkowego piksela (niebieski napis). Zmierzona odległość wyświetlana jest w górnej części okna (zielony napis) z dokładnością do 1 cm (rys. 12).



Rys. 12. Widok uruchomionej aplikacji

Odległość mierzona w oknie różniła się o ok. 2 cm od odległości rzeczywistej. Na rysunku pokazano sytuację statyczną, obiekt jak i kamery są nieruchome.

4. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano zbudowany dalmierz stereoskopowy do pomiaru odległości nie przekraczającej 15 m. Dalmierz korzysta z dwóch kamer umieszczonych na statywie w odległości 35 cm od siebie. W pracy przedstawiono

opracowany własny algorytm wyznaczania odległości, a także realizację pomiaru. Proces pomiarowy obejmował najpierw pobranie obrazu z kamery, następnie wykrycie obiektu zrealizowane w języku C++ przy zastosowaniu funkcji z biblioteki OpenCV oraz obliczanie odległości w oparciu o zależności zaprezentowane w pracy. Przeanalizowano też bezwzględny błąd pomiaru odległości wynikający z wielkości rozstawu kamer dla rozstawów od 0,1 m do 2 m, zadanych rozdzielczości kamer oraz badanych odległości. Stwierdzono np., że błąd ten wynosi $e \approx 0,04$ m dla kamer o rozdzielczości 640 x 480 px i kątach widzenia $\gamma = 20^\circ$ rozstawionych w odległości $d_c = 35$ cm od siebie, dla zadanej odległości obiektu od dalmierza 5 m. Zbudowano urządzenie do pomiaru odległości wykorzystujące standardowe kamery internetowe o rozdzielczości 640 x 480 px i kątach widzenia $\gamma = 20^\circ$ oraz przeprowadzono testy pomiaru odległości. Wyniki testów potwierdziły rezultaty badań teoretycznych. W ramach dalszych prac przewiduje się zastosowanie kamer o lepszych parametrach umożliwiających zmniejszenie błędu pomiaru. Urządzenie będzie wykorzystane do współpracy z kamerą termowizyjną do mierzenia odległości wielokrotnie większych od rozmiarów obiektu (ok. 500 razy).

W przypadku urządzenia zainstalowanego na platformie mobilnej konieczne będzie przetwarzanie obrazu w czasie rzeczywistym, co będzie wymagało innego podejścia do przetwarzania obrazu. W pierwszym etapie planowane jest zastosowanie szybkiego mikrokontrolera, a jeżeli nie umożliwi on spełnienia wymagań czasowych, zostanie zastosowany układ FPGA.

LITERATURA

- [1] Navigation 2, Radio Navigation, Revised edition, Oxford Aviation Training, 2004.
- [2] Walcher H., Position sensing – Angle and distance measurement for engineers, Second edition, Butterworth–Heinemann Ltd., 1994.
- [3] Boonkwang S., Saiyod S., Distance measurement using 3D stereoscopic technique for robot eyes, 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Chiang Mai, 2015, pp. 232–236.
- [4] Mrovlje J, Vrančić D., Distance measuring based on stereoscopic pictures, 9th International PhD Workshop on Systems and Control: Young Generation Viewpoint, 2008, Izola, Slovenia.
- [5] Tjandranegara E., Yung–Hsiang Lu, Distance Estimation Algorithm for Stereo Pair Images, ECE Technical Reports – 05–10, 2005.
- [6] Dziech A., Czyżewski A., Object Detection and Measurement Using Stereo Images, MCSS 2012, CCIS287, pp. 159–167, 2012.
- [7] Moore P. J., Grace D. B., Remote sensing of overhead line conductor temperature using an infra–red sensor, 2000 International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM–00, 2000, vol.2, pp. 385–389.
- [8] Open Source Computer Vision Library, Reference Manual, 2014.

STEREOSCOPIC DISTANCE MEASUREMENT

The distance measurement is one of the basic operations encountered in industrial systems or military. In this work a device for the precise measurement of small distances not exceeding 15 m is presented. The device will be installed on a mobile platform that will be applied for temperature measurement of high voltage lines with the use of the infrared camera. The temperature measurement by this method requires the determination of the distance to the object. The distance is needed for the proper interpretation of the camera output. The stereoscopic distance measurement using two cameras is proposed. The method allows for the measurement of distance from any point visible in both cameras. The viewing angle of the device is close to the viewing angles of cameras so there is no need for centering the device onto the object. The most important problem is the determination of object coordinates in the picture captured from the camera. It is, in general, the task of high computational complexity. In the performed experiment the object position is being determined using its colour and intensity. The measurement algorithm is described along with the selected results.

(Received: 07. 02. 2017, revised: 17. 02. 2017)