

Marek STENCEL
KATEDRA METROLOGII AGH

System wizyjny pomiaru wielkości geometrycznych

dr inż. Marek STENCEL

Dyplom magistra inżyniera uzyskał w 1990 roku na Wydziale Elektrycznym AGH. Od 1992 r. jest pracownikiem Katedry Metrologii AGH, gdzie w 1998 r. uzyskał stopień doktora. Zajmuje się cyfrowymi systemami pomiarowymi, techniką mikroprocesorową i DSP. Autor szeregu prac teoretycznych i wdrożeniowych dotyczących pomiarów ruchu drogowego.



e-mail: masten@agh.edu.pl

Streszczenie

Prezentowana praca przedstawia wizyjny system pomiaru wielkości geometrycznych. System ten powstał w celu sprawdzenia koncepcji budowy uniwersalnego, konfigurowalnego, pomiarowego systemu wizyjnego wykorzystującego komponenty programowe środowiska LabView oraz elementy sprzętowe firmy National Instruments. W systemie wykorzystano również nowoczesną kamerę cyfrową wyposażoną w złącze IEEE 1394, która wraz z komputerem klasy PC stanowi platformę sprzętową systemu. Przeprowadzone testy zbudowanego systemu potwierdziły jego poprawność funkcjonalną. Zawierają one również jego ocenę metrologiczną.

Słowa kluczowe: wizyjny system pomiarowy, kamera, detekcja krawędzi, wielkości geometryczne.

Measurement vision system of geometrical quantity

Abstract

The paper presents a digital, visual system for geometrical quantity measure. Such system is configurable and can work online with camera or use picture register on computer disk. The system is equipped with zoom lens and special lighting system. Tests of constructed system confirm its correct work. The paper include also metrological evaluation of system's uncertainty.

Keywords: measurement system, vision, geometrical quantity

1. Wstęp

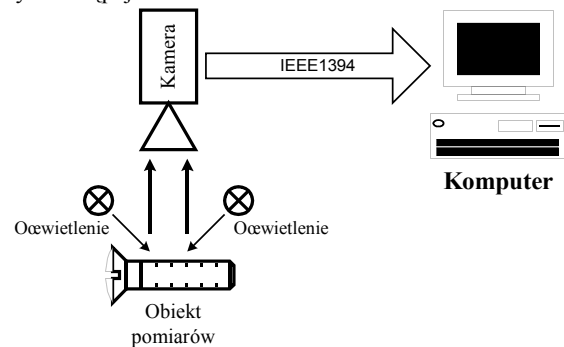
Postęp w dziedzinie technologii budowy elementów systemów wizyjnych (obiektywy, kamery, karty akwizycji obrazów, oprogramowanie integracyjne) z jednej strony oraz rosnące potrzeby przemysłu w zakresie kontroli parametrów wyrobów spowodowały stały wzrost liczby wizyjnych systemów pomiarowych.

Prezentowana praca przedstawia wizyjny system pomiaru wielkości geometrycznych zbudowany w ramach pracy magisterskiej realizowanej w Katedrze Metrologii AGH w roku 2005/2006 [6]. System ten powstał w celu sprawdzenia koncepcji budowy uniwersalnego, konfigurowalnego, pomiarowego systemu wizyjnego wykorzystującego komponenty programowe środowiska LabView oraz elementy sprzętowe firmy National Instruments. W systemie wykorzystano również nowoczesną kamerę cyfrową firmy Basler [2] posiadającą złącze IEEE 1394, która wraz z kartą interfejsu tego standardu umieszczoną w komputerze klasy PC stanowi platformę sprzętową systemu. W założeniach budowy systemu nie stawiano wygórowanych założeń co do jego dokładności, zwłaszcza że nie dysponowano

kosztownym obiektywem telecentrycznym stosowanym w tego typu systemach pomiarowych.

Jeśli chodzi o przyjęte założenia funkcjonalne systemu to podstawowym z nich była możliwość konfiguracji systemu przez użytkownika, zaprojektowania zadania pomiarowego które poprzez pliki konfiguracyjne może być zapamiętywane w komputerze i wielokrotnie powtarzane. Drugim z ważnych założeń była możliwość pracy na bieżąco lub off-line z obrazami zarejestrowanymi dowolnym sposobem i zeskanowanymi na dysku komputera.

Głównym elementem stanowiska pomiarowego jest komputer PC wyposażony w kartę interfejsu IEEE 1394 (FireWire), z zainstalowanym środowiskiem LabView połączony z kamerą cyfrową wyposażoną w obiektyw o zmiennej ogniskowej [3]. Akwizycja obrazu badanego obiektu dokonywana jest przez kamerę, która przesyła go po złączu cyfrowym do komputera w którym następuje analiza obrazu.



Rys.1.1 Schemat blokowy stanowiska pomiarowego
Fig. 1.1 Diagram of measurement system

Do stanowiska pomiarowego należą też lampy oświetlające badany obiekt. Celem zastosowanego oświetlenia jest wypuklenie konturów obiektu, które umożliwi dokładniejszą detekcję jego krawędzi. Dodatkowo lampy łagodzą wpływ zmian oświetlenia spoza stanowiska pomiarowego.

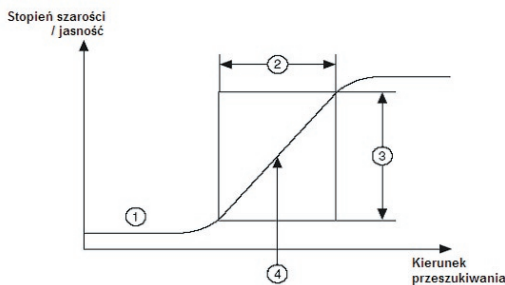
2. Detekcja krawędzi z wykorzystaniem NI IMAQ Vision

W pomiarach wielkości geometrycznych najbardziej istotną operacją dokonywaną na obrazie jest prawidłowa detekcja krawędzi. Narzędzia pakietu National Instruments IMAQ Vision [4], [5], który był podstawą oprogramowania systemu, wykorzystują do detekcji krawędzi lokalne nieciągłości stopnia szarości w zbiorze pikseli na obrazie. Nieciągłości te są zwykle kojarzone z nagłą zmianą jasności pikseli, znajdujących się na granicy obiektów.

Pierwszym krokiem, koniecznym do zlokalizowania krawędzi jest wydzielenie na obrazie obszaru, w którym będzie on wyszukiwany. W IMAQ Vision możliwe jest to zarówno w sposób interaktywny, jaki i programowo. Ponieważ krawędź zdefiniować można jako znaczące zmiany jasności sąsiednich pikseli na obrazie, dlatego IMAQ Vision, w celu zlokalizowania punktu na krawędzi wykorzystuje funkcję *line profile* zwracającą wartości będące odpowiednikami stopnia szarości każdego z punktów wzdłuż zadanej linii.

Aby zlokalizować punkt wchodzący w skład krawędzi, należy określić, kiedy zmiany jasności sąsiednich pikseli są już na tyle znaczące, że można stwierdzić, iż jest to fragment krawędzi. W

tym celu został przyjęty model krawędzi przedstawiony na rys. 2.1.



Rys. 2.1 Model krawędzi w IMAQ Vision: 1 – Jasność pikseli (*Grayscale Profile*) 2 – Szerokość krawędzi (*Edge Length*) 3 – Kontrast (*Edge Strength*) 4 – Punkt krawędzi (*Edge Location*)

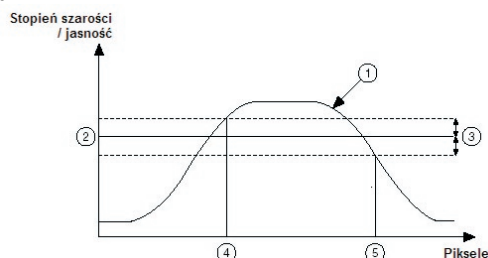
Fig. 2.1 Model of edge in IMAQ Vision: 1 – *Grayscale Profile* 2 – *Edge Length* 3 – *Edge Strength* 4 – *Edge Location*

Krzywa *Grayscale Profile* to przebieg zmian jasności pikseli wzdłuż zadanej prostej, w kierunku określonym przez parametr *Search Direction* (kierunek skanowania). Inne ważne parametry, z których korzysta powyższy model to:

- *Edge Strength* – określa minimalną różnicę stopnia szarości pomiędzy tłem a krawędzią; parametr ten jest utożsamiany z kontrastem krawędzi;
- *Edge length* – określa maksymalną odległość, w której musi się zawierać żądana różnica stopnia szarości pomiędzy tłem a szukaną krawędzią; parametr ten uzależniony jest od stopnia rozmycia krawędzi;
- *Edge polarity* – określa czy zlokalizowana krawędź jest jaśniejsza (*Rising Edge*) czy ciemniejsza (*Falling Edge*) od tła; wartość parametru w sposób oczywisty zależy od parametru *Search Direction*;
- *Edge position* – położenie krawędzi; współrzędne punktu zakwalifikowanego do krawędzi.

2.1 Metody detekcji krawędzi

W pakiecie IMAQ Vision zaimplementowano dwie metody detekcji krawędzi: *Simple Edge Detection* oraz *Advanced Edge Detection*. W metodzie *Simple Edge Detection* sprawdzane są kolejne piksele wzdłuż zadanej linii (*line profile*). Punkt zakwalifikowany zostaje do krawędzi, jeżeli jego wartość (rozumiana tutaj jako stopień szarości) przekroczy wartość progową (parametr *threshold value*), przy czym dodatkowo możliwe jest określenie wartości histerezy (parametr *hysteresis value*), co umożliwia zakwalifikowanie punktów do krawędzi, przy różnych ich jasnościach. Metoda ta sprawdza się dobrze, gdy elementy na obrazie są wyraźnie rozgraniczone i zaszumienie jest nieduże

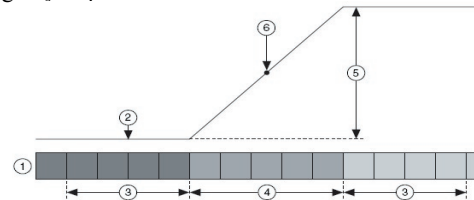


Rys. 2.2 Metoda detekcji *Simple Edge Detection*: 1 – Jasność pikseli (*Grayscale Profile*) 2 – Wartość progowa (*Threshold Value*) 3 – Wartość histerezy (*Hysteresis Value*) 4 – Krawędź jaśniejsza (*Rising Edge*) 5 – Krawędź ciemniejsza (*Falling Edge*)

Fig. 2.2 *Simple Edge Detection*: 1 – *Grayscale Profile* 2 – *Threshold Value* 3 – *Hysteresis Value* 4 – *Rising Edge* 5 – *Falling Edge*

W metodzie *Advanced Edge Detection* najpierw obliczana jest wartość parametru *Edge Strength* (kontrast). Odbywa się to poprzez uśrednienie dwóch zestawów pikseli przed i po analizowanym pikselu. Liczbę pikseli wchodzących w skład

jednego zestawu określa parametr *Filter Width* (szerokość filtra). Zestawy przesunięte są względem siebie o wartość parametru *Steepness* (szerokość przejścia), która uzależniona jest od stopnia rozmycia krawędzi. Uśrednianie eliminuje błędy związane z zaszumieniem pikseli, dlatego wartość parametru *Filter Width* powinna być tym większa, im większe jest przewidywane zaszumienie. Poniższy rysunek przedstawia zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami.



Rys. 2.3 *Advanced Edge Detection* – schemat poglądowy [4]

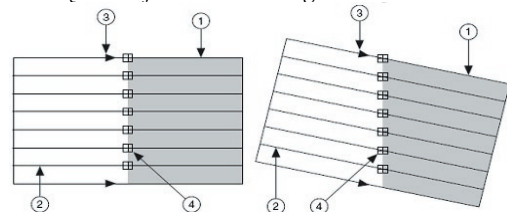
1 – Piksele 2 – *Grayscale Profile* 3 – Szerokość filtra (*Filter Width*) 4 – Szerokość przejścia (*Steepness*) 5 – Kontrast (*Edge Strength*) 6 – Położenie krawędzi (*Edge Location*)

Fig. 2.3 *Advanced Edge Detection* – 1 – *Pixels* 2 – *Grayscale Profile* 3 – *Filter Width* 4 – *Steepness* 5 – *Edge Strength* 6 – *Edge Location*

W celu zlokalizowania krawędzi obliczana jest wartość parametru *Edge Strength* dla każdego pikselu wzdłuż jednowymiarowego obszaru przeszukiwania. Piksel, w którym kontrast przekroczy wartość zadaną przez użytkownika, zostaje zapamiętany i począwszy od tego punktu sukcesywnie analizowane są kolejne, aż do momentu, gdy wartość kontrastu zacznie się zmniejszać. Punkt, w którym wartość kontrastu była maksymalna zostaje uznany za „początek krawędzi”. Natomiast „koniec krawędzi” stanowi punkt odległy od początku krawędzi o wartość parametru *Steepness*. Dla każdego z pikseli z przedziału wyznaczonego przez „początek” i „koniec krawędzi” wyliczana jest różnica pomiędzy wartością stopnia szarości punktu początkowego przedziału, a wartością stopnia szarości owego pikselu. Za element krawędzi zostaje uznany piksel, dla którego różnica ta będzie większa lub równa połowie różnicy wartości stopni szarości dla pikseli uznanych za „początek” i „koniec krawędzi”. W celu zwiększenia dokładności detekcji krawędzi, IMAQ Vision dostarcza opcji *Subpixel Accuracy* (zwiększenie precyzji detekcji), która umożliwia uzyskanie dokładności większej, niż do jednego pikselu. Wykorzystuje się tutaj funkcje interpolacyjne drugiego lub trzeciego rzędu (opcje: *Cubic Spline*, *Quadratic*).

2.2 Narzędzia detekcji krawędzi

W IMAQ Vision [4], [5] do wyodrębniania krawędzi na obrazie służą następujące narzędzia (funkcje): *IMAQ Rake*, *IMAQ Spoke* i *IMAQ Concentric Rake*, w których wykorzystuje się prostą detekcję 1-wymiarową, dobierając odpowiednio kierunek, kształt i liczbę linii, wzdłuż których wyszukiwany jest element krawędzi (*line profile*). Wszystkie trzy bloki wykorzystują przedstawioną wyżej metodę detekcji - *Advanced Edge Detection*.

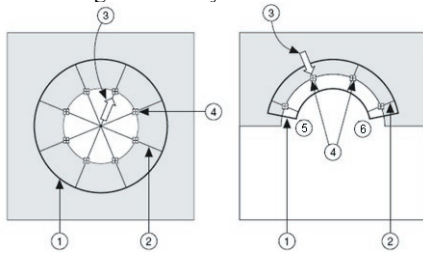


Rys. 2.4 Funkcja *IMAQ Rake*: 1 – Obszar wyszukiwania (*Search Area*) 2 – Linie wyszukiwania (*Search Lines*) 3 – Kierunek wyszukiwania (*Search Direction*) 4 – Znalezione punkty krawędzi (*Edge Location*).

Fig. 2.4 *IMAQ Rake* function: 1 – *Search Area* 2 – *Search Lines* 3 – *Search Direction* 4 – *Edge Location*

Funkcja *IMAQ Rake* wyszukuje krawędzie w obszarze prostokątnym (rys. 2.4). Linie, wzdłuż których szuka się punktu należącego do krawędzi (*Search lines*) są względem siebie

równoległe, a ich liczba uzależniona jest od parametru *Step Size*, który wyznacza odległość między nimi.



Rys. 2.5 Funkcja *IMAQ Spoke* 1 – Obszar wyszukiwania (*Search Area*) 2 – Linie wyszukiwania (*Search Lines*) 3 – Kierunek wyszukiwania (*Search Direction*) 4 – Znaleziony punkt krawędzi (*Edge Location*) 5 – Kąt początkowy (*Start Angle*) 6 – Kąt końcowy (*End Angle*)

Fig. 2.5 IMAQ Spoke function 1 – Search Area 2 – Search Lines 3 – Search Direction 4 – Edge Location 5 – Start Angle 6 – End Angle

W funkcji *IMAQ Spoke* linie, wzdłuż których szukany jest punkt należący do krawędzi (*Search lines*) są promieniami zadanego koła (*Outer Radius* – promień zewnętrzny), a ich gęstość określa parametr *Step Size*, który w tym przypadku wyznacza odległość w stopniach między sąsiednimi liniami wyszukiwania. Ich liczba zależy więc w sposób oczywisty od tego parametru oraz od zadanych kątów: początkowego (*Start Angle*) i końcowego (*End Angle*). Wyszukiwanie nie musi być konieczne przeprowadzane na całej długości promienia, ponieważ opcjonalnie podaje się jeszcze parametr *Inner Radius*, oznaczający promień wewnętrznego koła, w którym wyszukiwanie nie następuje.

Funkcja *IMAQ Concentric Rake* wyszukuje krawędzie w obszarze kołowym, zdefiniowanym w sposób podobny jak w poprzednim przypadku przez parametry *Outer Radius* i *Inner Radius* (rys. 2,5), przy czym linie wyszukiwania są koncentryczne, a ich długość i gęstość określają odpowiednio parametry *Start Angle* i *End Angle* oraz *Step Size*.

3.Oprogramowanie systemu

Program obsługi systemu pomiarowego został zbudowany w środowisku LabView firmy National Instruments. Większa część operacji pomiarów wizyjnych realizowana jest z wykorzystaniem pakietu funkcji IMAQ Vision [4], [5]. Program umożliwia dokonywanie pomiarów geometrycznych zarówno na obrazach pobieranych bezpośrednio z kamery jak też uprzednio zarejestrowanych na dysku komputera. Okno główne programu przedstawia rys. 3.1



Rys. 3.1 Okno główne programu
Fig. 3.1 Program's main window

Z poziomu okna głównego można przejść do podprogramów: *Kalibracja*, *Ustawienia*, *Wskaż obraz*. Opcja *Wskaż obraz* pozwala na wskazanie obrazu wzorca poprzez jego akwizycję z kamery lub pobranie pliku z dysku.

W celu dokonania pomiarów należy określić jakie wielkości będą mierzone i wskazać je na obrazie wzorca do czego służy opcja *Ustawienia*.

Istotną cechą odróżniającą prezentowany system od innych tego typu jest możliwość jego konfiguracji i przystosowania do określonego typu pomiarów. To operator systemu definiuje z poziomu interfejsu użytkownika jakie wielkości będą mierzone, a następnie zapisuje te informacje w pliku konfiguracyjnym. Plik ten pozwala w sposób prosty wrócić do przerwanych pomiarów nawet po długiej przerwie bez konieczności powtórzonego konfigurowania i tworzenia na nowo zadania pomiarowego. Rodzaje pomiarów, które przewidziano podzielone są na pomiary proste oraz złożone. Pomiary proste realizowane są wprost przez pojedyncze funkcje *IMAQ Vision*, które realizują pomiar:

- średnicy okręgu,
- współrzędnych krawędzi poziomych i pionowych
- wartości kąta wypukłego pomiędzy dwoma krawędziami

Pomiary złożone realizowane są przez podprogramy wykorzystujące funkcje pierwotne *IMAQ Vision*. Składają się na nie pomiary odległości pomiędzy dwoma dowolnymi obiektami geometrycznymi:

- punktem
- prostą
- krawędzią pionową
- krawędzią poziomą
- środkiem okręgu
- środkiem prostokąta

Jedną z najważniejszych operacji jaką należy przeprowadzić przed przystąpieniem do pomiarów jest kalibracja systemu, która polega na wyznaczeniu wartości współczynnika kalibracji, który później posłuży do przeliczenia wyników pomiaru z pikseli na milimetry.

Proces kalibracji przebiega w następujących krokach:

- wybór dwóch równoległych krawędzi na wczytanym obrazie, poprzez:
 - zaznaczenie prostokątnych obszarów, w których znajdują się krawędzie, lub wprowadzenie współrzędnych narożników tych obszarów przez operatora; w przypadku kiedy wybrane krawędzie nie są pionowe, użytkownik może wprowadzić korektę kąta odchylenia każdej z nich od pionu;
 - odpowiednie ustawienie parametrów funkcji detekcji krawędzi (omówione wyżej) w celu zwiększenia jej dokładności; użytkownik na bieżąco może obserwować wpływ każdego z ustawianych przez niego parametrów na wynik detekcji.
- podanie odległości między wybranymi krawędziami w kontrolce: *Odległość między krawędziami* w oknie *Kalibracja*; pamiętać należy, że niepewność określenia współczynnika kalibracji jest propagowana na niepewność pomiaru wszystkich parametrów mierzonych w systemie.

Okno kalibracji dostępne dla użytkownika systemu przedstawia rys 3.2.

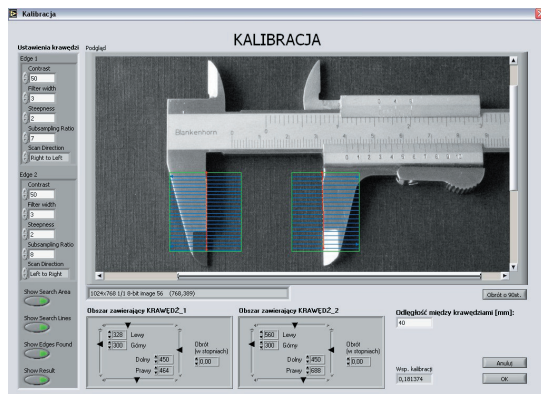
Po zakończeniu pomiaru użytkownik może zapisać wyniki pomiaru do pliku typu DATA oraz informacje o jego przebiegu w pliku typu LOG. Plik DATA zawiera wyłącznie kolumny danych, a mianowicie wyniki pomiarów (widoczne w oknie głównym w tabeli „Wyniki pomiaru”), do których dołączana jest jedna kolumna składająca się z zer lub jedynek określająca czy mierzony parametr przekroczył czy nie zadaną tolerancję. Każdy wiersz danych odpowiada jednemu analizowanemu obrazowi. Wiersz pierwszy stanowią dane dla obrazu wzorcowego. Wyniki traktować należy jako dane w milimetrach lub stopniach kątowych, w przypadku pomiaru kąta.

Plik LOG zawiera inne informacje o przeprowadzonym pomiarze, takie jak:

- data jego przeprowadzenia,
- pochodzenie wykorzystywanych obrazów,
- rodzaje przeprowadzonych pomiarów,

- wartość współczynnika kalibracji,
- lokalizację pliku z wynikami.

W przypadku pomiaru z wykorzystaniem plików zapisanych na dysku twardym podawane zostają tutaj również ich nazwy.



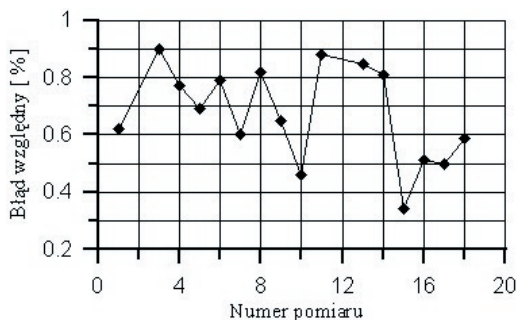
Rys. 3.2 Okno kalibracji systemu.
Fig. 3.2 Calibration system window

4. Testy systemu

W celu sprawdzenia dokładności zbudowanego systemu pomiarowego przeprowadzono szereg eksperymentów ją weryfikujących [6]. Jednym z nich był pomiar wielkości charakteryzujących obiekt jakim był klucz do wkładki bębnekowej. Zmierzono następujące jego parametry (w nawiasie typ zastosowanego pomiaru):

- średnica otworu (*Circle radius*),
- średnica uchwytu (*Circle radius*),
- długość całkowita (*Horizontal Max*).

Wykonano 18 pomiarów obiektu skalibrowanym systemem Kalibracji systemu dokonano przy użyciu suwmiarki umieszczonej w tej samej płaszczyźnie co klucz – współczynnik kalibracji wyniósł 0,13 [mm/piksel]. Podczas pomiarów, na każdym obrazie obiekt pomiaru znajdował się w różnych pozycjach kątowych, jednakże jego odległość od obiektywu była stała. Wyniki pomiaru średnicy uchwytu klucza przedstawia rys. 4.1.



Rys. 4.1 Błąd pomiaru średnicy uchwytu klucza.
Fig. 4.1 Measurement error of key diameter

Innym testem był pomiar średnic: zewnętrznej i wewnętrznej metalowych podkładek do śrub. Eksperyment pomiarowy zaprojektowano w ten sposób, aby system nie tylko mierzył zadane wielkości ale dokonywał selekcji elementów, których jeden z wymiarów przekraczał zadane wartości graniczne. Test obejmował 17 obiektów. Maksymalna niepewność wszystkich pomiarów średnicy zewnętrznej nie przekroczyła 2% a średnicy wewnętrznej 1%. Dla obiektu wzorcowego wartość średnicy

zewnętrznej wynosiła 4,24 mm, a średnicy zewnętrznej 11,56 mm.

Trzecim najtrudniejszym testem systemu był pomiar kątów. Pomiarowi poddano zestaw drewnianych klinów stolarskich. Jak w eksperymencie poprzednim oprócz pomiaru kąta system rozpoznawał obiekty, których wartość mierzonego parametru przekraczała wartość zadaną. Wartości mierzonych kątów leżały w zakresie 6° do 30° a maksymalna niepewność pomiaru nie przekroczyła 6.6%. Opis wszystkich testów i ich wyników zawarty jest w pracy [6].

Uzyskane niepewności wyników pomiarów wydają się być zadawalające, biorąc pod uwagę sprzęt którym dysponowano. Aby zmniejszyć poziom tych niepewności należało:

- zwiększyć rozdzielczość kamery,
- zastosować kamerę o mniejszych szumach własnych,
- zastosować obiektyw telecentryczny,
- zastosować oświetlenie monochromatyczne.

Wszystkie proponowane zmiany powinny spowodować lepszą dokładność detekcji krawędzi obiektów, która jest kluczową operacją w tego typu pomiarach. Podkreślić także należy że testy wykazały prawidłową, bezawaryjną pracę i bardzo dobrą funkcjonalność systemu, dzięki któremu można w sposób szybki, a włączając go w linię produkcyjną automatyczny, przeprowadzać stosunkowo złożone eksperymenty pomiarowe.

5. Podsumowanie

Zbudowana w środowisku *LabVIEW 7.1* aplikacja jest uniwersalnym narzędziem do pomiaru wielkości geometrycznych, określonych przez użytkownika. Największą zaletą zbudowanego systemu pomiarowego jest jego konfigurowalność. Użytkownik ma możliwość wyboru dowolnej liczby z szeregu dostępnych typów pomiarów, co umożliwi mierzenie dowolnych wymiarów lub kątów jednocześnie. Zaprogramowanie cyklu pomiarowego odbywa się poprzez zaznaczanie na obrazie wzorcowym elementów, które mają zostać zlokalizowane i zmierzone na kolejnych wczytywanych obrazach. Program w fazie pomiaru może pracować na obrazach na bieżąco przesyłanych z kamery lub korzystać z obrazów zapisanych wcześniej na dysku twardym. Istnieje również możliwość zapisywania każdego obrazu pozyskiwanego z kamery podczas pomiaru, co może się okazać przydatne w sytuacji, gdy zajdzie potrzeba ponownego pomiaru w innej konfiguracji systemu.

Poza wyborem odpowiedniego typu pomiaru ważnymi czynnikami wpływającymi na dokładność pomiaru jest dobór odpowiednich parametrów detekcji krawędzi oraz precyzyjna kalibracja systemu pomiarowego.

Wyniki przeprowadzonych testów i eksperymentów pomiarowych potwierdzają prawidłową pracę systemu.

6. Literatura

- [1] J.Nowicz Wizyjne systemy kontroli jakości, artykuł z: www.e-automatyka.eu/
- [2] Instrukcja obsługi kamery Basler A600f Users Manual
- [3] Dane techniczne obiektywu Navitar Lens DOZ-10X16 <http://www.navitar.com/>
- [4] Wprowadzenie do biblioteki IMAQ Vision IMAQ Vision Concepts Manual
- [5] Instrukcja obsługi biblioteki IMAQ Vision IMAQ Vision for LabVIEW User Manual
- [6] W. Filipiak, S. Baiński, Wizyjny system pomiaru wielkości geometrycznych. Praca dyplomowa, Katedra Metrologii AGH 2006.

Artykuł recenzowany