

Rafał GASZ¹, Sławomir ZATOR²¹ WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI, POLITECHNIKA OPOLSKA, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole² WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I LOGISTYKI, POLITECHNIKA OPOLSKA, ul. Luboszycka 5, 45-370 Opole**Pomiary geometryczne wybranych detali wyrobów odlewniczych z zastosowaniem analizy obrazów**

Dr hab. inż. Sławomir ZATOR

Aktualnie prodziekan ds. nauki na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. Podstawowy obszar działalności naukowej obejmuje metrologię, w obszarze pomiaru wielkości nieelektrycznych oraz diagnostykę eksploatacyjną urządzeń i instalacji energetycznych. Autor dwóch monografii w obszarze pomiaru strumienia płynów. Członek Komisji Metrologii i Komisji Elektroniki Oddziału PAN w Katowicach.



e-mail: s.zator@po.opole.pl

Mgr inż. Rafał GASZ

Doktorant na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w dyscyplinie Automatyka i Robotyka. Zainteresowania badawcze skupiają się wokół technik związanych z przetwarzaniem obrazów. Zajmuje się zastosowaniem metod fotogrametrycznych w identyfikacji obiektów przestrzennych oraz problemami związanymi z diagnostyką i oceną stanu elementów linii elektro-energetycznych.



e-mail: r.gasz@doktorant.po.edu.pl

Streszczenie

Główną zaletą korzystania z metod przetwarzania obrazów w zastosowaniach diagnostycznych i pomiarowych jest ich szybkość, względnie mała niepewność pomiaru oraz stosunkowo niski koszt układu pomiarowego. Autorzy w artykule przedstawiają wybrane metody oceny stanu wykonania elementów odlewniczych. Głównym celem analizy było wybranie metody określenia jakości wykonania otworów w elementach odlewniczych, tj. ich położenia, odchyłki od zarysu okrągłości oraz tolerancji wykonania powierzchni płaskich.

Słowa kluczowe: przetwarzanie obrazów, pomiar wielkości geometrycznych.

Measurements of the geometry of selected parts of foundry products with use of image processing**Abstract**

The main advantage of image processing methods for diagnostic and measurement applications is their speed, accuracy and relatively low price. The authors of the paper describe the method and algorithms used to assess the workmanship of casting components. The main task was to determine the quality of holes in the components, their location and deviation from the roundness profile as well as the tolerances of fabrication of flat surfaces. Currently, the most common method of assessing the condition of this type of castings is the use of appropriate templates. This method is inexpensive, but relatively slow. The method proposed in the paper is fast and accurate. A more accurate measurement can be obtained using the coordinate measuring machine (CMM), however, the cost of the assessment is disproportionate to its objective. An important aspect of the methods discussed is the use of suitable equipment for diagnostic purposes. The solution proposed by the authors used to evaluate the arrangement and shape of holes can be a fast and accurate tool for the evaluation of the workmanship of casting components. The proposed methods allow obtaining good results. They differ in the ways of obtaining images and image processing algorithms used. Both methods give results on the level of accuracy of several μm , which is sufficient for measurement purposes.

Keywords: image processing, hole roundness measurement.

1. Wstęp

Wykonując pomiary geometryczne z wykorzystaniem metod optycznych można uzyskać wysoką rozdzielczość, zmienną czułość i zakres pomiarów powierzchni obiektów trójwymiarowych. Pomiary z zastosowaniem przetwarzania obrazów dzielą się na dwie grupy: punktowe i polowe [1]. W metodach punktowych informacja o kształcie obiektu uzyskiwana jest z określonego zbioru punktów wyodrębnionych z powierzchni obiektu mierzono, natomiast w metodach polowych informację o kształcie obiektu uzyskuje się za pomocą obrazów całego badanego przedmiotu zarejestrowanych przez kamerę lub aparat.

Metody punktowe są związane z aktywnymi i biernymi technikami triangulacyjnymi. Wyróżnia się w nich dwie podstawowe grupy: fotogrametrię, która opiera swoje działanie na rejestracji i analizie obrazów tego samego obiektu z różnych (co najmniej dwóch) kierunków obserwacji oraz drugą grupę, wykorzystującą system projekcji z kalibracją dla jednego z kierunków triangulacyjnych [2]. Głównymi wadami tych metod są ograniczona liczba punktów, które mogą być analizowane, w przypadku w pełni zautomatyzowanej obróbki danych, oraz długi czas przetwarzania danych. Dlatego częściej wykorzystywanymi metodami są metody polowe. Ich główną zaletą jest dostarczanie informacji o kształcie obiektu z całego pola widzenia jednocześnie [3, 4]. Metody zaliczane do tej grupy opierają analizując deformację obrazów prążkowych rzutowanych na powierzchnię obiektu podlegającego badaniu. Uzyskanie małej niepewności pomiaru wymaga bardzo dobrego skorygowania układów optycznych [5].

W pomiarach optycznych, opartych na analizie obrazu, wykorzystywane są metody porównawcze oraz algorytmy detekcji krawędzi, najczęściej wykorzystujące zmiany luminancji wywołane: zmianą profilu, zmianą właściwości materiału lub oświetleniem. Wykrywanie krawędzi na obrazie zmniejsza znacząco ilość danych i filtruje informacje, które mogą być postrzegane jako mniej znaczące, zachowując ważne właściwości struktur znajdujących się na obrazie, które podlegają analizie lub pomiarowi.

Jest wiele metod detekcji krawędzi, ale większość z nich można pogrupować w dwie kategorie: metody gradientowe, które wykorzystują badanie pierwszej pochodnej (wyszukiwanie jej maksimum i minimum) i metody wykorzystujące badanie drugiej pochodnej (jej przejścia przez zero). Dla znalezienia krawędzi, przeważnie wykorzystuje się przejście przez zero operatora Laplace'a lub przejście przez zero nieliniowej różniczki.

Krawędzie mogą zależeć od punktu obserwacji, mogą się zmieniać wraz ze zmianą położenia obserwatora, typowo odzwierciedlając geometrię sceny, lub mogą być niezależne od punktu obserwacji, odzwierciedlając właściwości oglądanych obiektów takie jak znaki na powierzchni oraz kształty powierzchni. W związku z tym wykrywane krawędzie na zdjęciach nie zawsze pokrywają się z ich rzeczywistym położeniem. Przeważnie są obciążone jednym bądź większą liczbą efektów takich jak: optyczne rozmycie spowodowane skończoną głębiokością obrazu, półcieniowe rozmazanie spowodowane przez cień powstały od źródła światła o niezerowym promieniu, cieniowanie na obiektach o łagodnych krawędziach lub lokalne odbicia lub wewnętrzne odbicia w krawędzi obiektu.

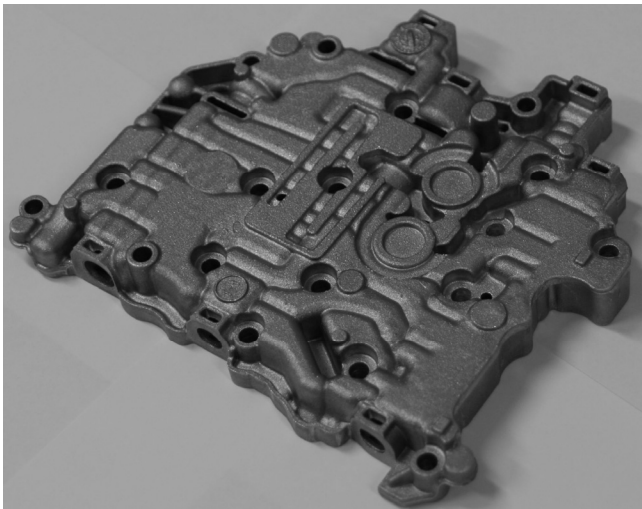
2. Pomiar elementów charakterystycznych

Badanym obiektem był element odlewniczy pokazany na rys. 1. Celem wykonywanych pomiarów była kontrola danego elementu obejmująca sprawdzenie: średnic otworów przelotowych, średnic otworów nieprzelotowych na górnych powierzchniach odlewów,

średnic otworów nieprzelotowych na bocznej powierzchni odlewu oraz płaskości wybranej powierzchni danego elementu.

Ze względu na to, że pomiar obiektu, miał być wykonywany w czasie kilku sekund na punkt, z zachowaniem niepewności pomiaru poniżej 0,1 mm, zaproponowano wykorzystanie w pomiarach analizy obrazu pozyskanego z kamery o wysokiej rozdzielczości jako metody podstawowej.

Pierwsza testowana metoda, porównania z wzorcem, wymaga zachowania stabilnych warunków oświetleniowych przy powtarzanym stanie powierzchni obiektu. W metodzie tej, zgodność zdjęcia danego detalu i wzorca była zdefiniowana do wybranych fragmentów, np. tylko otworów.



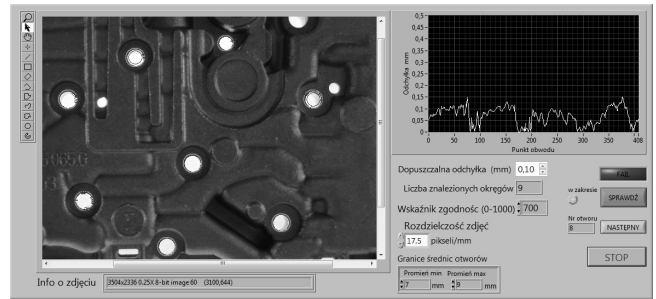
Rys. 1. Badany obiekt
Fig. 1. The tested object

Metoda jest teoretycznie prosta w realizacji, nie są istotne zniekształcenia obrazu, ponieważ stosując ten sam układ pomiarowy występują one zarówno na zdjęciach wzorca jak i porównywanego obiektu. Jednak tylko w warunkach laboratoryjnych uzyskano zadowalające rezultaty. Dlatego do implementacji wybrano drugą metodę polegającą na wykrywaniu krawędzi z rozpoznawaniem zadanych kształtów. Pozwalała ona na analizie jakościowej, polegającej na wykryciu i rozpoznaniu krawędzi otworów przelotowych o kształcie okręgów z użyciem algorytmów detekcji krawędzi, ale i ilościowej, polegającej na określeniu parametrów opisujących kształty. Dla otworów o założonych średnicach (8 mm) i o określonej lokalizacji należało określić odchyłkę kształtu od zarysu okręgu. Współrzędne otworów były określane względem środka otworu centralnego, a kierunek osi Y wyznaczała umowna lewa krawędź odlewu.

Aby pomiar nie był obciążony zniekształceniami obrazu, korzystając z standardowego obiektywu, inspekcję otworów należałoby przeprowadzać indywidualnie umieszczając oś obiektywu nad każdym z otworów. Wykorzystując układ przesuwu X-Y, na którym zamontowana jest kamera, proces kontroli można byłoby radykalnie przyspieszyć. Czas potrzebny na pomiar jednego otworu, z uwzględnieniem przesuwu, to około 2-3 sekund. W tej sytuacji można wykorzystać kamerę, o niezbyt dużej rozdzielczości ($1,3 \div 2$ MPx) i o krótkiej ogniskowej, przesuwaną w niewielkiej odległości od obiektu.

Alternatywnym sposobem, niewymagającym układu przesuwu, jest użycie obiektywu telecentrycznego. Jedne z największych obiektywów telecentrycznych mają pole widzenia obejmujące wymiary odlewu 360x230 mm i pozwalają dokonać pomiaru obiektu z użyciem jednego zdjęcia.

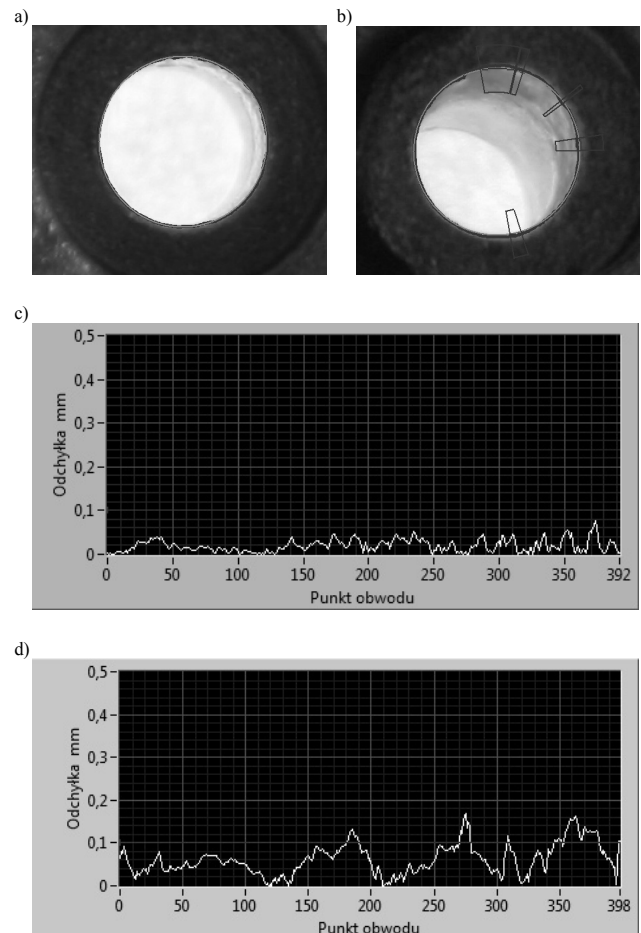
Przykład rozpoznawania otworów i kontroli ich odchyłek okrągłości, wykorzystując oświetlenie od dołu, przez aplikację stworzoną w środowisku LabView pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Aplikacja rozpoznająca otworu oraz oceniająca ich okrągłość
Fig. 2. Application recognizing the hole and evaluating the roundness

W wyniku pomiaru sprawdzane są m.in. odchyłki krawędzi otworów od zarysu kołowego, które wyświetlane są także w postaci wykresu. Gdy wszystkie otwory spełniają zadane kryterium (odchyłka dopuszczalna dla badanych odlewów wynosiła 0,2 mm), to kontrolka sygnalizacyjna wyświetla stosowny komunikat na zielonym tle.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów okrągłości dwóch otworów, przy założeniu dopuszczalnej odchyłki 0,1 mm. Rozdzielczość obrazu wynosiła 17,5 pikseli/mm, a analizę prowadzono z rozdzielczością podpikselową. Pierwszy otwór spełnia zadane kryterium. Na rys. 3a zaznaczono wykrytą krawędź a na rys. 3c odchyłkę krawędzi od okręgu średniego dla kolejnych punktów obwodu w rozwinięciu liniowym. Dla drugiego otworu, niespełniającego zdanego kryterium, na rys. 3b przedstawiono miejsca przekroczenia odchyłek dopuszczalnych, a na rys. 3d analogiczną jak dla otworu pierwszego odchyłkę kształtu.



Rys. 3. Przykład pomiaru otworów zakwalifikowanych jako: dobre (a i c) oraz złe (b i d)

Fig. 3. Example of the measurement of holes classified as pass (a and c) or fail (b and d)

Przy oszacowaniu niepewności pomiaru współrzędnych i średnic otworów uwzględniono tylko niepewność typu B (pomiaru są jednokrotne, realizowane na podstawie jednego zdjęcia). Dla aparatu o matrycy 8 Mpx i obiektywu standardowego 35 mm niepewność pomiaru zależy od odległości obiektu od aparatu. Pomiar wymiarów geometrycznych realizowany jest metodą porównawczą, w której matryca aparatu pełni rolę komparatora. Dla określenia rozdzielczości optycznej wykorzystano metodę porównawczą, umieszczając w kadrze przed pomiarem suwmiarkę ze szczękami rozsuniętymi na 20 mm dla każdego z kierunków osi matrycy. Wymiary liniowe (zarówno współrzędne X , Y jak i średnice D) są określane wg zależności (1), w której każda ze składowych określona została na podstawie kalibracji matrycy z użyciem ww. wzorca o długości L_w i odpowiadających mu liczby pikseli Δn_{wX} oraz Δn_{wY} dla każdej z osi matrycy oraz odczytanej liczby pikseli Δn_X oraz Δn_Y dla mierzonej wartości L . Układy współrzędnych matrycy CCD oraz przyjęty układ współrzędnych odlewu są w reguły w niewielkim stopniu obrócone względem siebie.

$$L = \sqrt{\left(\frac{\Delta n_X}{\Delta n_{wX}} L_w\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_Y}{\Delta n_{wY}} L_w\right)^2} \quad (1)$$

Dla uproszczenia obliczeń związanych z szacowaniem niepewności założono, że $\Delta n_{wX} = \Delta n_{wY} = \Delta n_w$. Kalibracja matrycy odbywała się dla każdej z osi oddzielnie. Każda z liczb Δn jest de facto różnicą współrzędnych (2) co należy podczas szacowania niepewności.

$$\Delta n = n_k - n_p \quad (2)$$

Wyznaczone metodą różniczki zupełnej równanie pozwalające dokonać analizy budżetu niepewności podaje zależność (3).

$$\frac{dL}{L} = \frac{dL_w}{L_w} + \frac{2dn_w}{n_w} + \frac{2\Delta n_x^2}{\Delta n_x^2 + \Delta n_y^2} \frac{d\Delta n_x}{\Delta n_x} + \frac{2\Delta n_y^2}{\Delta n_x^2 + \Delta n_y^2} \frac{d\Delta n_y}{\Delta n_y} \quad (3)$$

Na budżet niepewności składały się niepewności wynikające z rozdzielczości optycznej i korekty dystorsji obiektywu. W budżecie niepewności uwzględniono niepewność związaną z wyznaczeniem dwóch krawędzi wzorca. Pominięto wpływ dyfrakcji.

Tab. 1. Budżet niepewności (tylko typu B) pomiarów współrzędnych średnic otworów

Tab. 1. The uncertainty budget (only type B) of coordinates and diameter of holes

Składowa niepewności złożonej	Źródło niepewności	Typ rozkładu	Odchyłki graniczne	Niepewność standardowa u	Udział u_i^2 w u_c^2 , %
Niepewność długości wzorca	Wzorzec długości	prostokątny	10 μm	7,1 μm	0,2
Rozdzielczość optyczna CCD	Pomiar wzorca	prostokątny	1 piksel	0,71 piksela	12,8
Dystorsja obiektywu	Pomiar wzorca	normalny	1/6 piksela	0,17 piksela	0,7
Rozdzielczość optyczna CCD	Odczyt współrz. n_x	prostokątny	1 piksel	0,71 piksela	40,9
Rozdzielczość optyczna CCD	Odczyt współrz. n_x	prostokątny	1 piksel	0,71 piksela	40,9
Dystorsja obiektywu	Odczyt współrz. n_y	normalny	1/6 piksela	0,17 piksela	2,3
Dystorsja obiektywu	Odczyt współrz. n_y	normalny	1/6 piksela	0,17 piksela	2,3
Złożona niepewność standardowa $u_c=63 \mu\text{m}$					$\sum \approx 100\%$
Niepewność rozszerzona $U_A=126 \mu\text{m}$; $k=2$					

W tab. 1 podano budżet niepewności typu B przy pomiarze otworu o średnicy 8 mm. Oszacowana w tym przypadku rozszerzona niepewność pomiaru odległości wynosiła 0,13 mm.

Dokonano także sprawdzenia powtarzalności pomiarów, wykonując serię 20 zdjęć tego samego odlewu, określając niepewności typu A. Wyniki obliczeń dla 7 otworów zestawiono w tab. 2.

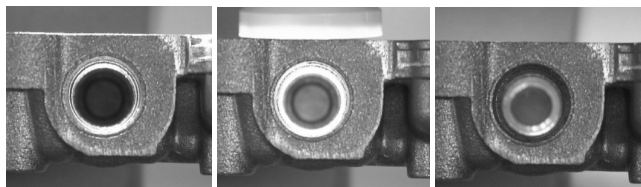
Tab. 2. Niepewności pomiaru typu A współrzędnych i średnic otworów
Tab. 2. The measurement uncertainty of type A of coordinates and diameter of holes

Lp.	X_{sr} mm	U_X mm	Y_{sr} mm	U_Y mm	R_{sr} mm	U_R mm	ΔR_{max} mm
1	25,048	0,028	118,500	0,008	4,049	0,002	0,120
2	69,521	0,019	138,746	0,012	4,006	0,002	0,124
3	70,821	0,018	105,564	0,006	4,041	0,002	0,106
4	130,625	0,007	11,945	0,012	4,054	0,003	0,140
5	139,140	0,07	141,192	0,012	3,986	0,002	0,139
6	140,324	0,006	91,559	0,003	4,081	0,003	0,114
7	164,376	0,002	32,635	0,008	4,060	0,003	0,170

W ostatniej kolumnie podano maksymalną odchyłkę kształtu otworów ΔR_{max} dla średnicy nominalnej 8 mm. Jak widać niepewność typu A jest przynajmniej o rząd mniejsza od niepewności typu B, dlatego też do podjęcia decyzji o klasyfikacji odlewu było wystarczające jedno zdjęcie.

Na obecnym etapie, realizację pomiaru metodą optyczną można było rozwiązać przy pomocy zaproponowanych dwóch rozwiązań sprzętowych. Realizacja z obiektywem telecentrycznym jest jednak zdecydowanie szybsza, lecz ze względu na, że rozdzielczość kamer przemysłowych nie przekracza 5 Mpx, jest mniej dokładna.

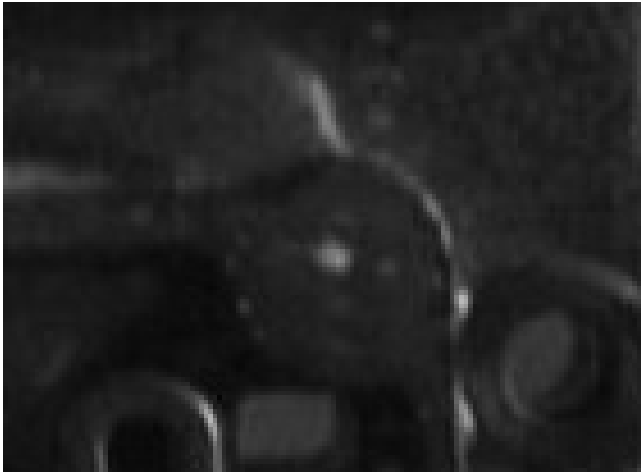
Opisanymi metodami można bezpośrednio dokonać pomiarów średnic i położenia otworów przelotowych (z oświetleniem od spodu) i otworów nieprzelotowych (z oświetleniem od góry). Trudnym do rozwiązania był problem pomiaru średnic otworów z boku odlewu (rys. 4). Otwory te dodatkowo skokowo zmniejszają swoją średnicę. Ze względu na dużą głębokość otworów pomiar z oświetleniem od góry nie dawał oczekiwanych efektów, ze względu na występujące półcienie. Rozwiązaniem okazało się oświetlenie od spodu odlewu, dzięki szczelinom, przez które światło mogło docierać do pewnych przekrojów otworu. Dzięki takiemu oświetleniu możliwe było dokonywanie pomiarów w kilku przekrojach. Pomiar taki wymagał zastosowania wielopunktowego sterownego oświetlacza.



Rys. 4. Oświetlane otwory z boku badanego obiektu
Fig. 4. Lighting of the lateral holes at different hole depths

Najtrudniejszym do rozwiązania problemem okazał się optyczny pomiar wysokości wybranych punktów odlewu w stosunku do płaszczyzny odniesienia.

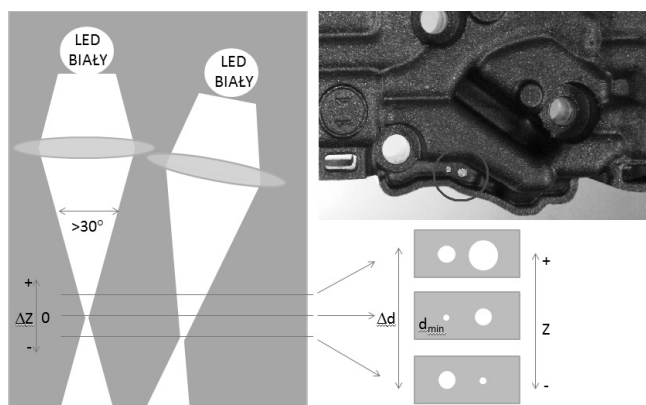
Zakładając, że pod trzema punktami odniesienia nastąpi podparcie odlewu, pomiar górnej powierzchni odlewu (zakładając znaną grubość odlewu w danym miejscu) można stwierdzić np. grubość bądź zwichrowanie powierzchni. Wykonano próby pomiaru wysokości metodą triangulacyjną, oświetlając wybrany punkt pod znanym kątem (60°) wiązką krzyżujących się linii lasera jak na rys. 5.



Rys. 5. Oświetlenie wybranego punktu wiązką lasera
Fig. 5. Lighting the selected point with the laser beam

Aby obraz mógł być zarejestrowany, wymagane było znaczne zaciemnienie pomieszczenia z obiektem, ze względu na niskie rozpraszanie światła lasera na powierzchni odlewu przy bocznym oświetleniu. Ze względu na gaussowski charakter linii były ledwo wykrywalne i automatyczny pomiar okazał się niemożliwy.

Zaproponowano inne rozwiązanie, którego ideę przedstawiono na rys. 6. Wybrane miejsce oświetlone zostało dwoma stożkami światła białego z LED (o kącie wierzchołkowym powyżej 30°), z przesuniętymi ogniskami, koniecznymi dla ustalenia znaku odchyłki wysokości obiektu. W przypadku, gdy powierzchnia będzie na wyznaczonej pozycji, widoczne będą dwa koła, jedno o minimalnej średnicy – około 1 mm, drugie 2 mm. Pośredni pomiar odchyłki wysokości polega na pomiarze średnic obu okręgów. Przykładowo zmiana wysokości o 1 mm (w kierunku osi Z) wywołuje zmianę średnicy o 1,15 mm, co można zmierzyć metodą wcześniej opisaną. Metoda ta jest obecnie testowana, a rozdzielczość kamery pozwala na określenie zmiany wysokości płaszczyzny z niepewnością 0,1 mm.



Rys. 6. Idea pomiaru wysokości przy oświetleniu dwoma stożkami światła
Fig. 6. The idea of measuring the height by lighting two cones of light

3. Podsumowanie

Przetwarzanie obrazów znajduje szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach, dzięki relatywnie niskiej cenie implementacji tego oprogramowania w procesie kontroli jakości. Otrzymuje się dobre narzędzie, przy pomocy którego można dokonywać oceny stanu elementów odlewniczych. Obecnie najpopularniejszą metodą oceny stanu tego typu odlewów jest stosowanie odpowiednich wzorników. Jest to metoda tania, stosunkowo wolna i subiektywna. Zaproponowana w artykule metoda jest relatywnie szybka i o zadowalającą dobrą dokładności. Dokładniejszy pomiar można uzyskać przy użyciu np. ramion pomiarowych lub maszyny współrzędnościowej, jednak koszt oceny stanu odlewu jest niewspółmiernie wysoki w stosunku do realizowanego celu produkcyjnego.

Ważnym aspektem omówionych metod jest wybór odpowiedniego sprzętu (kamery, obiektywów, układów przesuwu), przy pomocy którego będzie wykonywana diagnostyka.

Zaproponowane metody pozwalały uzyskać dobre wyniki. Różnią się one sposobami pozyskania obrazu oraz użytymi algorytmami przetwarzania obrazów. Wyniki pomiarów położenie oraz odchyłek kształtu z niepewnością na poziomie 0,1 mm, dla wykonywanych pomiarów, okazało się wystarczające.

Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadre naukowe województwa opolskiego.
Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



4. Literatura

- [1] Stencel M.: System wizyjny pomiaru wielkości geometrycznych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 9bis/2007, s. 556 – 560.
- [2] Zator S., Żłobicki Ł.: Metoda fotogrametryczna w śledzeniu zmian położenia obiektów, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2/2011, s. 150 – 152.
- [3] Said A.: Efficient and reliable dynamic quality control for compression of compound document images, *Image Processing*, 2004. ICIP '04. 2004 International Conference, s. 2869 – 2872.
- [4] Pissaloux E. E.: On the adequacy of image processing algorithms and massively parallel computers, *Massively Parallel Computing Systems*, 1994, Proceedings of the First International Conference, s. 113 – 115.
- [5] Elouardi A.: Image Processing Vision Systems: Standard Image Sensors Versus Retinas, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, s. 1675 – 1687.

otrzymano / received: 30.11.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.03.2014

artykuł recenzowany / revised paper