

Jacek REINER¹

ZWIĘKSZANIE DOKŁADNOŚCI WIZYJNYCH METOD KONTROLI JAKOŚCI WYTWARZANIA

W artykule omówiono czynniki wpływające na dokładność pomiarów optycznych realizowanych za pomocą systemów wizyjnych. Zwrócono uwagę na wpływ jakości badanej powierzchni, wynikającej z wad ostrza narzędzia obróbkowego. Podkreślono znaczenie obiektywów telecentrycznych i oświetlenia skolimowanego dla minimalizacji nieprawidłowości detekcji krawędzi. Przedstawiono możliwości pomiarów charakterystyk elementów optycznych tj. ich dystorsję oraz funkcję przenoszenia modulacji MTF.

1. WPROWADZENIE

Szeroko rozumiana dokładność dotyczy stopnia zgodności między wartością zadaną (referencyjną) a rzeczywistą. W takim rozumieniu obejmuje zagadnienia dokładności, precyzji, powtarzalności, odtwarzalności i liniowości [1]. Wymagania dla produkcji narzucają kryteria jakościowe, które zapewniane są poprzez odpowiednie technologie wytwarzania oraz pomiary i inspekcję. Narzędzia kontrolne coraz częściej wykorzystują metody optyczne, z uwagi na ich bezstykowość, szybkość, wielokryterialność, etc. Znajdują one zastosowanie zarówno w kontroli produktów jak i procesów. Do pierwszej grupy należą: pomiary optyczne 2D tj. długości, kąta, pola powierzchni – realizowane za pomocą kamer matrycowych oraz pomiary optyczne 3D – realizowane z użyciem triangulacji laserowej, czujników konoskopowych, konfokalnych chromatycznych. Ich zakres sięga aż do pomiarów chropowatości realizowanych metodami światła rozproszonego, konfokalnymi, czy interferometrycznymi.

W przypadku optycznego monitorowania i pomiarów procesów wymienić należy:

- pomiar drgań elementów maszyn np.: metodami interferometrycznymi,
- pomiary termiczne metodami termowizyjnymi czy pirometrycznymi oraz
- pomiary parametrów procesu np. rozkład temperatury i geometrię jeziora powstającego podczas laserowej obróbki materiałów.

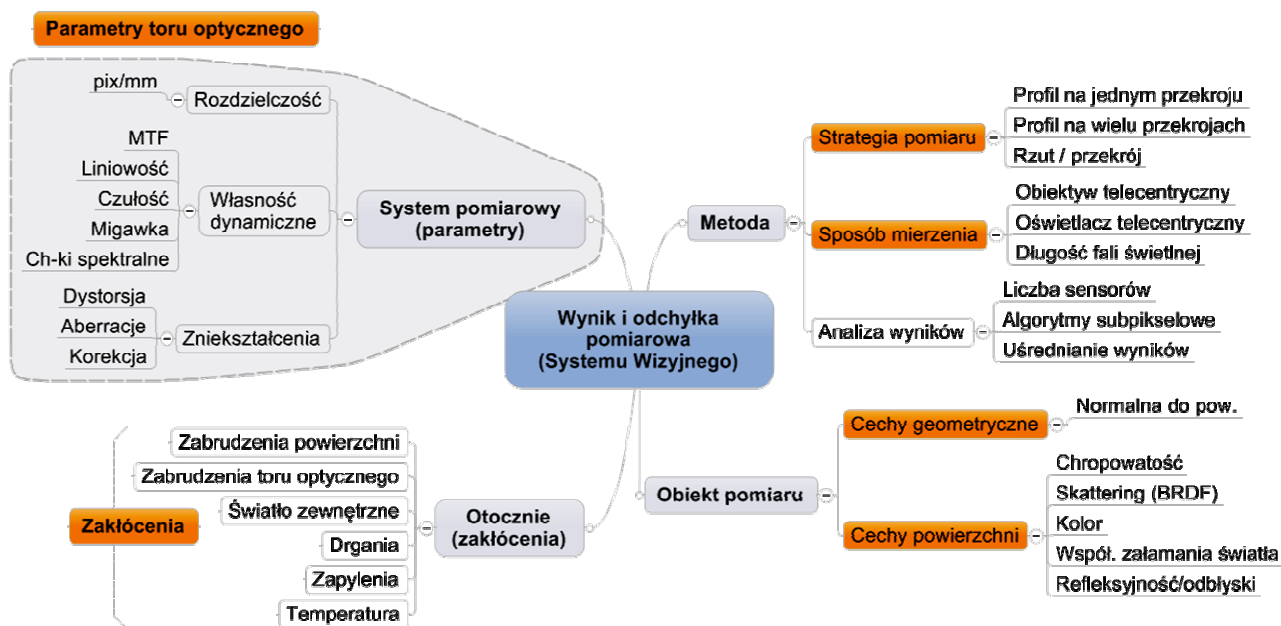
Pomiary wizyjne, podobnie jak obróbka laserowa, z uwagi na swą specyfikę

¹ Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, Politechnika Wroclawska

i ograniczenia, zaliczane są często do technologii niekonwencjonalnych, dlatego wymagają rzetelnego rozumienia i świadomego stosowania a coraz powszechniej również walidacji.

2. ŹRÓDŁA BŁĘDÓW SYSTEMÓW WIZYJNYCH

Bazując na diagramie Ishikawy obrazującym wpływ czynników na wyniki i odchyłki pomiarowe [6], opracowano diagram skutkowo-przyczynowy źródeł błędów systemów wizyjnych dla pomiarów 2D (rys. 1).



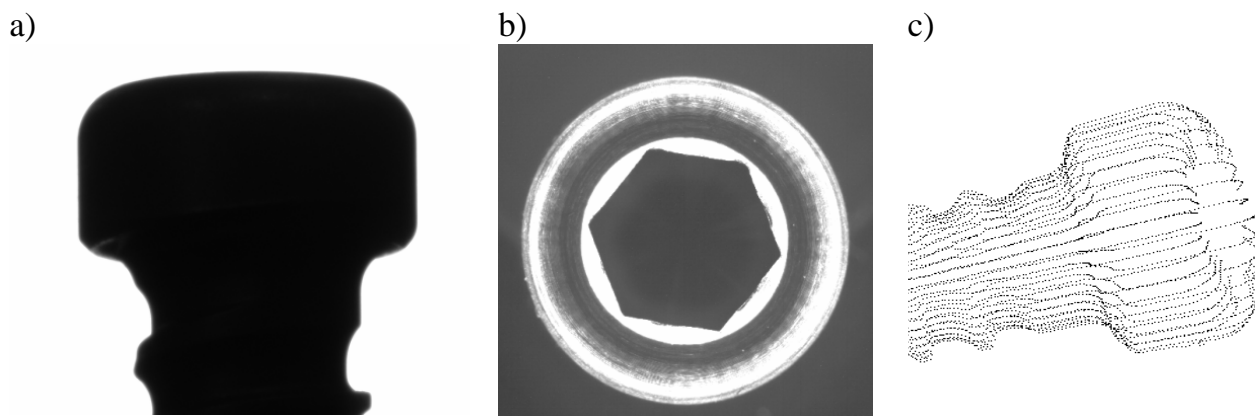
Rys.1. Źródła błędów systemów wizyjnych pomiarów 2D
Fig.1. Error causes for machine vision 2D measurements

Jako kluczowe źródła błędów podczas pomiarów 2D zidentyfikowano następujące: strategię pomiarów i sposób (mierzenia) rejestrowania obrazu, cechy geometryczne i optyczne powierzchni, parametry toru optycznego oraz zakłócenia.

2.1. STRATEGIA POMIARÓW

Zależnie od celu pomiarowego oraz geometrii obiektu, możliwe są różnorodne sposoby jego obrazowania. Przykładowo, dla pomiarów średnicy występuje możliwość obrazowania profilu mierzonego obiektu dla jednego przekroju (rys. 2a) lub wielu przekrojów (rys. 2c), co jest uzyskiwane poprzez obrót elementu. W przypadku drugim możliwe jest dodatkowo wyznaczenie okrągłości a nawet walcowości. Dla skrajnych, tj. zewnętrznych, średnic

możliwa jest rejestracja obrysu na podstawie widoku osiowego (rys. 2c). Każdą z powyższych strategii charakteryzują pewne zalety i ograniczenia. Najistotniejszym problemem widoku osiowego jest wpływ fazowania krawędzi na pomiar wartości reprezentatywnej średnicy. Skanowanie z obrotem generuje najwięcej danych, w tym szumu, co jest kosztowne czasowo i jednocześnie komplikuje algorytmy pomiarowe.



Rys. 2. Różne sposoby obrazowania obiektu (łba wkrętu) dla pomiarów średnicy.
 a) widok cienia (profil), b) widok współosiowy, c) model przestrzenny jako chmura punktów
 Fig. 2. Different methods of object (screw head) imaging for diameter measurement.
 a) shadow view (profile), b) coaxial view, c) range model as points cloud

Generalizując, należy podkreślić, że strategia pomiarów w pierwszej kolejności musi być podporządkowana zaleceniom konstrukcyjnym, które przywołują odpowiednie normy [5]. Specyfikacje konstrukcyjno – technologiczne dotyczą zwykle technologii konwencjonalnych – nie optycznych, stąd ich wdrożenie wymaga akceptacji realizowanej w formie walidacji. Przykładowo dla procesów wytwórczych urządzeń medycznych jest ona określona w FDA QSR 820.75 [3] i w ISO 13485 7.5.2 [4]. Niestety, dokumenty te, jak również ich rozszerzenia i uzupełnienia, nie wspierają bezpośrednio walidacji optycznych i wizyjnych systemów pomiarowych.

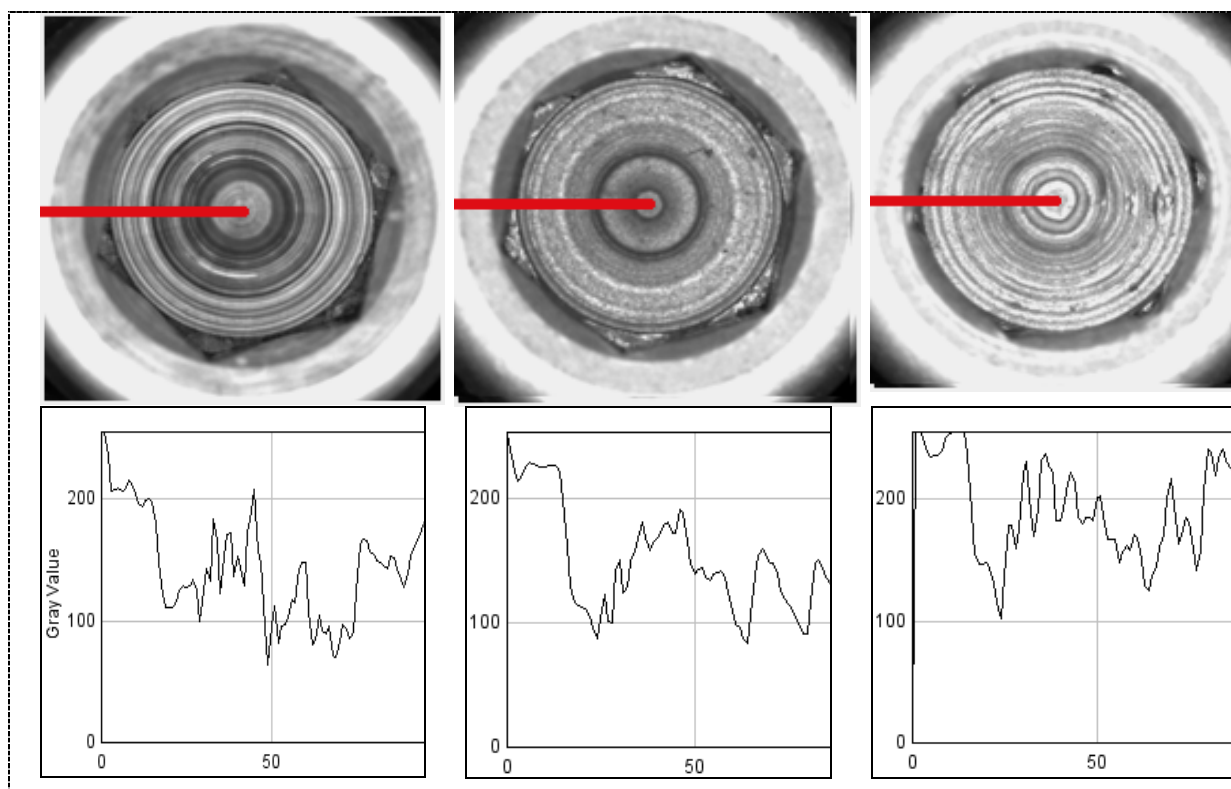
2.2. CECHY GEOMETRYCZNE I OPTYCZNE POWIERZCHNI

Pozyskiwanie obrazów bazuje na rejestracji światła odbitego lub zaabsorbowanego, w tym również przesłoniętego, przez powierzchnie obiektu. Natężenie światła odbitego (radiacja) zależy zatem od materiału warstwy wierzchniej, jej mikrostruktury oraz kierunku padania wiązki światła i kierunku obserwacji – funkcji rozpraszalności.

Skuteczna detekcja krawędzi wymaga maksymalizacji kontrastu między sąsiednimi stronami uskoku. Optymalne sposoby uzyskiwania takich obrazów bazują na oświetleniu prześwietlającym (ang. *backlight*) lub oświetleniu w ciemnym polu (ang. *dark field illumination*). Niestety, techniki te nie znajdują wszędzie zastosowania. Przykładowo, problem pomiaru średnicy wewnętrznej dna otworu nieprzelotowego (rys.2b) może być

rozwiązywany wyłącznie poprzez oświetlenie z kierunku obserwacji. Istotnym ograniczeniem takiego podejścia jest jednak okluzja, zależna od głębokości otworu, co ogranicza maksymalny kąt padania światła.

Gdy narzędzie obróbkowe w wyniku zużycia ostrza skrawającego pozostawia wypukłości i zarysowania na obrabianej powierzchni (rys.3), są one obrazowane jako dodatkowe krawędzie. Z uwagi na mały kontrast między krawędzią zewnętrzną - właściwą a otoczeniem, stanowią one silny sygnał zakłócający, co nie gwarantuje wysokiej skuteczności pomiarów średnicy. Profile zmiany luminancji mierzone na promieniu dna otworu (rys.3) potwierdzają brak jednorodności w ramach tego samego obrazu, ale również bardzo duże różnice zależnie od stopnia zużycia ostrza wiertła.



Rys. 3. Różne obrazy powierzchni dna otworów nieprzelotowych, jako wynik wad ostrza narzędzia oraz odpowiadające im profile luminancji

Fig. 3. Different surface images of blind holes as a result of flaws on edge of tool and corresponding luminance profiles

Dla powyższego przypadku przeprowadzono analizę MSA, wyznaczając wskaźnik zdolności jakościowej C_g dla zadanej tolerancji zgodnie z zależnością (1):

$$C_g = \frac{0,2 * T}{4 * S_g} \quad (1)$$

gdzie: T - pole tolerancji, S_g - odchylenie standardowe.

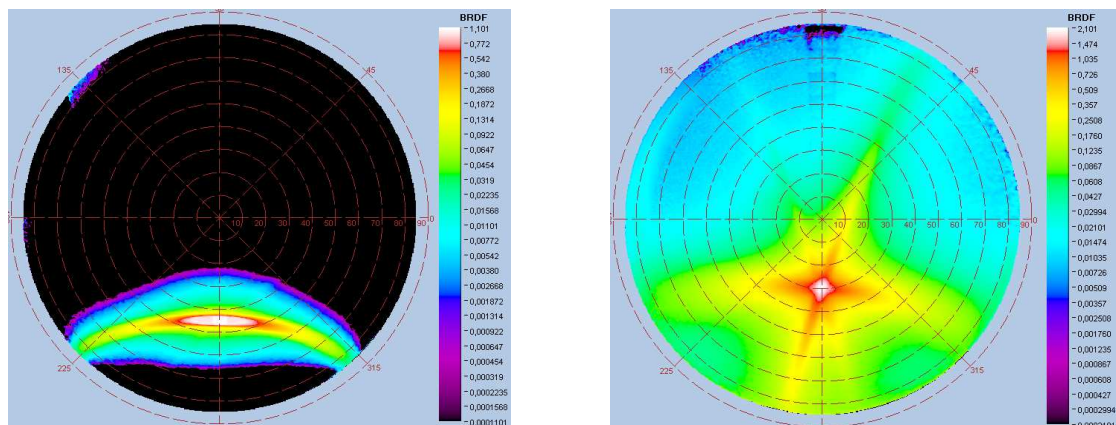
Nie osiągnięto dostatecznie małego poziomu rozrzutu wyników pomiarów, stąd próg $C_g < 1,33$ [1] wymagany dla walidacji procesu, uniemożliwił akceptację metody pomiarowej.

Opis powierzchni za pomocą parametrów inżynierii warstwy wierzchniej tj. chropowatości i falistości, dla systemów optycznych jest niedostateczny, dlatego dla optycznej „charakteryzacji wyglądu” powierzchni najczęściej stosuje się funkcję BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Function), definiowaną jako:

$$BRDF(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o, u, v) \quad (2)$$

Jej wartość, dla wybranej długości fali λ , zależy od kąta padania światła θ_i, ϕ_i i kąta obserwacji θ_o, ϕ_o , określanych we współrzędnych sferycznych, a ponadto jest ona zależna od współrzędnych badanego punktu powierzchni u, v [9].

BRDF definiuje zależność między radiacją punktu z danego kierunku a irradycją pod zadanym kątem. Modele BRDF pozyskiwane są za pomocą skaterometrów goniometrycznych lub obrazujących. Dla zadanego kąta (azymut i elewacja) wiązki światła padającego rejestrowana jest bryła fotometryczna światła odbitego (rozproszonego). Zgodnie z modelem rozpraszalności dla powierzchni lustrzanych dominujące jest odbicie zwierciadlane, dla powierzchni dyfuzyjnych zaś rozpraszanie lambertowskie.



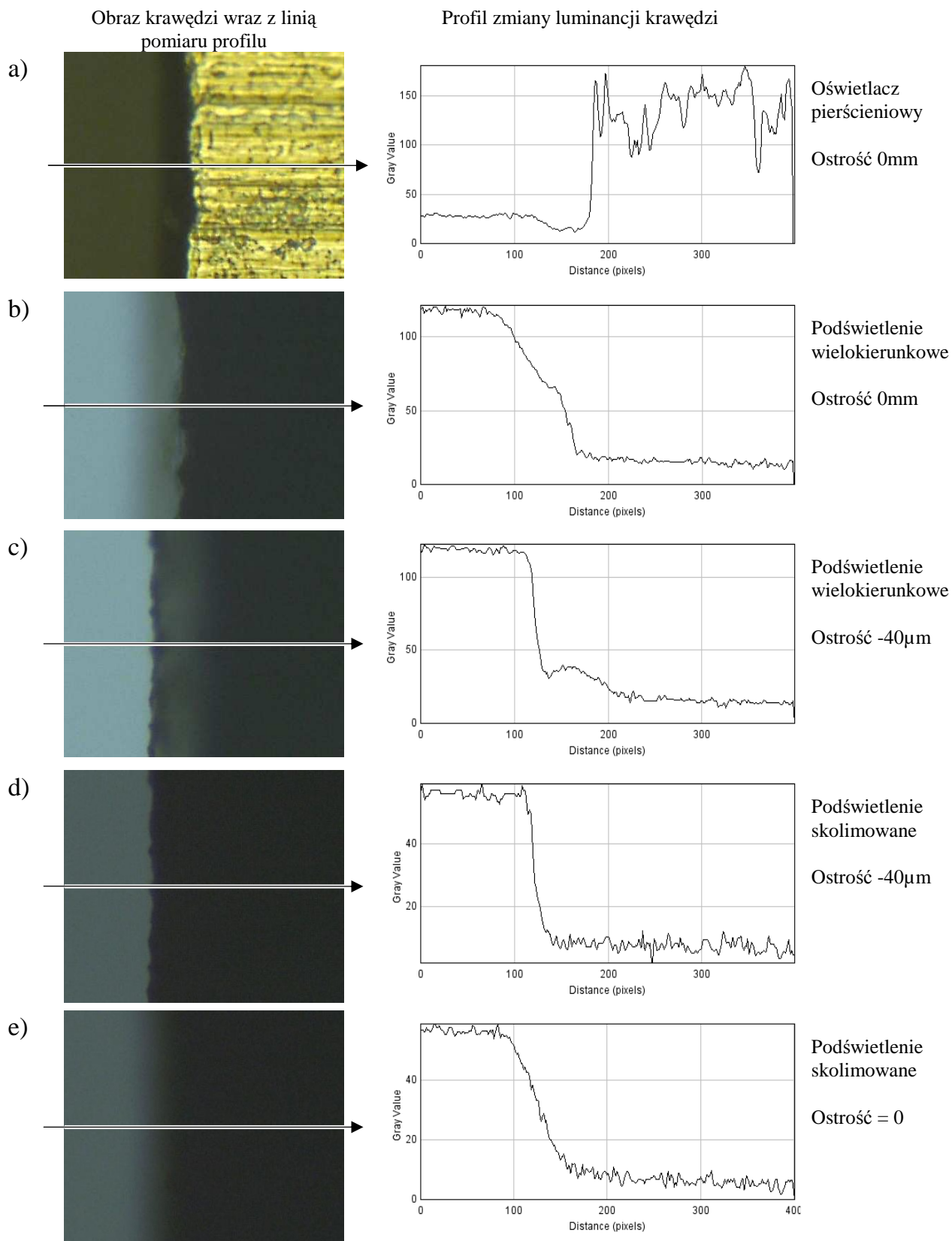
Rys. 4. Przykłady zmierzonych charakterystyk rozpraszalności BRDF dla różnych powierzchni metalowych, przy oświetleniu pod kątem 30stopni

Fig. 4. Examples of measured scattering function for two different metal surfaces at 30Deg illumination angle

Przedstawione charakterystyki rozpraszalności powierzchni (rys.4) zarejestrowano z wykorzystaniem sfery obrazującej firmy Radiant Imaging. Powyższe modele BRDF wykorzystywane są do symulacyjnego prototypowania systemów wizyjnych [7].

2.3. SPOSÓB REJESTROWANIA OBRAZÓW

Typowe konfiguracje akwizycji obrazów bazują na rejestracji światła odbitego od powierzchni lub bezpośrednio docierającego do źródła tj. światła nieprzesłoniętego.



Rys. 5. Obrazy krawędzi i odpowiadające im profile luminancji
Fig. 5. Images of edge with appropriate luminance profiles

W przypadku światła odbitego stosuje się różne układy kształtujące rozkład strumienia świetlnego oznaczając je jako: ciemne tło (ang. *dark field*), rozproszone dookólnie (ang. *dome*), rozproszone współosiowo (ang. *coaxial diffused*), kierunkowe (ang. *directional*), etc.

Największy kontrast między obiektem a tłem, jak również nachylenie krawędzi granicznej na profilu luminancji, osiągnięto przy zastosowaniu oświetlacza pierścieniowego od strony obiektywu, co pokazano na rys. 5a. Niestety, luminancja sąsiednich poziomów nie jest równomierna. W górnej części przebiegu profilu luminancji obserwowany jest wpływ chropowatości, zaś w dolnej, wyraźnie widać cień powodowany brakiem prostopadłości krawędzi. W takiej sytuacji wynik wyznaczenia odległości będzie błędny. Problem ten wystąpi również na profilach uzyskanych przy podświetlaniu światłem wielokierunkowym (rys. 5b i 5c). Przebieg profilu luminancji w tym przypadku jest bardzo zależny od kształtu krawędzi i jednocześnie wysokości na jakiej ustawiono ostrość podczas pomiaru.

Najbardziej odporne na powyższe parametry jest obrazowanie z zastosowaniem światła skolimowanego tj. równoległego (rys. 5d i 5e). W powyższym przypadku mierzona jest wartość maksymalna, która ma zwykle najistotniejsze znaczenie funkcjonalne.

Dla uniknięcia błędów perspektywy, tym większych im większy kąt widzenia obiektywu, konieczne jest stosowanie obiektywów telecentrycznych. Zapobiegają one zmiennemu powiększeniu (p) w wyniku zmiennej odległości obiektu od detektora.

$$p = \frac{y}{x} \quad (3)$$

gdzie, p – powiększenie, y – odległość detektora od soczewki (stała), x – odległość obiektu od soczewki. Należy jednak zwrócić uwagę, że zakres telecentryczny jest zwykle powiązany ze średnicą soczewek, im większe średnice – tym zakres większy, ale mówimy tu o pojedynczych mm.

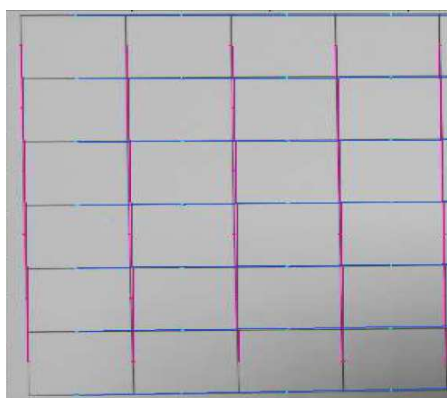
2.4. PARAMETRY TORU OPTYCZNEGO

Pierwszoplanowo, dla ilościowej charakterystyki parametrów akwizycji wymienia się rozdzielczość wyrażaną jako liczba pikseli detektora przypadająca na jednostkę długości. Parametr ten niestety zaniedbuje ograniczenia toru optycznego, co wraz ze wzrostem rozdzielczości prowadzi do coraz większych błędów projektowych. Do istotnych parametrów optycznych należą również aberracje, w tym dystorsja, ale również charakterystyki dynamiczne wyrażane jako funkcja transferu modulacji (MTF ang. *modulation transfer function*). Do wyznaczania powyższych parametrów dwóch przykładowych obiektywów MV (*Machine Vision*) wykorzystano oprogramowanie Imatest ver3.6 [2] oraz tablice wzorcowe.

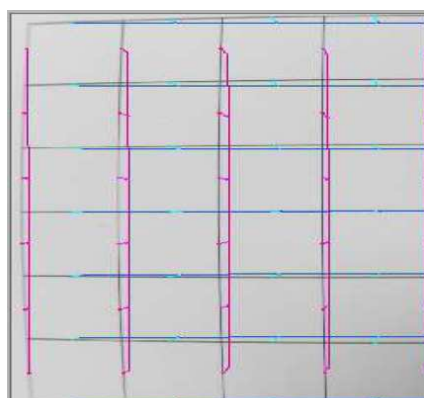
Dla mierzonych obiektywów zarejestrowano dystorsję typu beczka (ang. *barrel*), o maksymalnych wartościach: dla obiektywu A= -0,839% oraz dla obiektywu B = -5,12% (rys.6). W przypadku korekcji dystorsji wyznacza się macierz korekcji nieliniowej [8]. Łatwym do usunięcia błędem obiektywu jest również winietowanie, widoczne na rys. 6.

Funkcja transferu modulacji MTF opisuje ilościowo jakość jak i ostrość obrazu, przy której kontrast spada do 50% początkowej częstotliwości, dążącej do zera. MTF jest definiowana jako:

$$C(f) = \frac{V_{White}(f) - V_{Black}(f)}{V_{White}(f) + V_{Black}(f)} \quad (4)$$



Obiektyw A

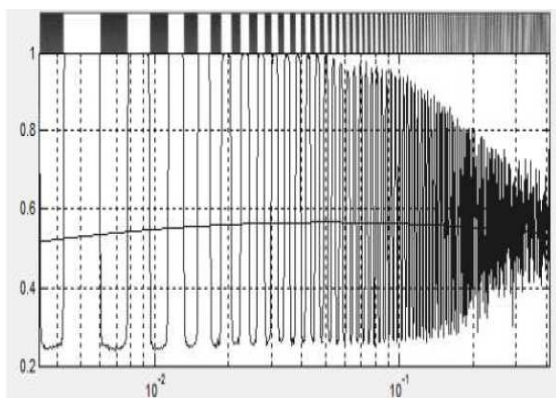


Obiektyw B

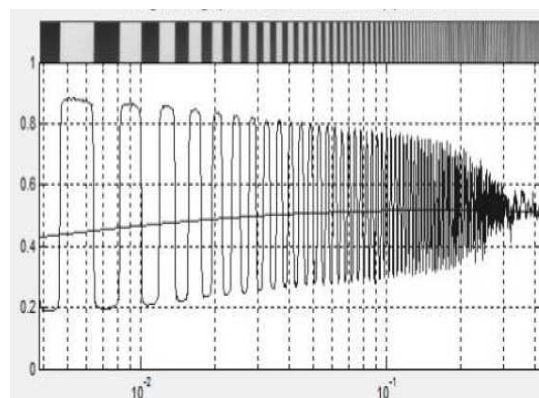
Rys. 6. Wyniki pomiarów dystorsji dwóch obiektywów o ogniskowej 12mm – odchyłki dla lewej strony obrazu
Fig. 6. Distortion measurements results of two lenses with 12mm focal length – deviation for left part of image

$$MTF(f) = \frac{C(f)}{C(0)} * 100\% \quad (5)$$

gdzie: częstotliwość przestrzenna wyrażana jest w cyklach na piksel lub jako gęstość par linii na milimetr. Ocena jakości układu optycznego prowadzona jest z zastosowaniem wzorców przebiegu sinusoidalnego lub prostokątnego.

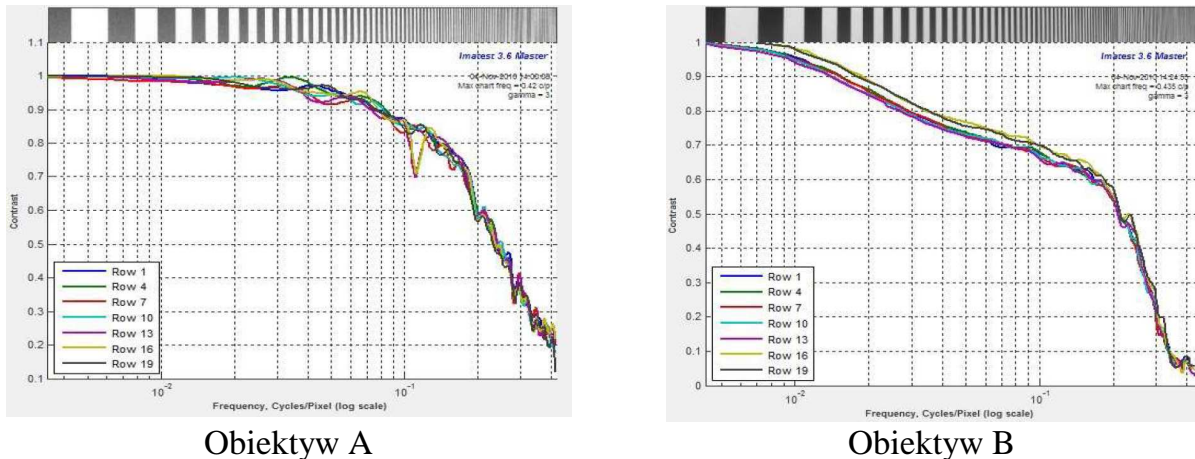


Obiektyw A



Obiektyw B

Rys. 7. Zmierzone profile luminancji dla wzorca o wzrastającej częstotliwości przestrzennej dla obiekt. A i B
Fig. 7. Measured luminance profiles for pattern with increasing spatial frequency for lenses A and B



Rys. 8. Zmierzone charakterystyki MTF dla dwóch badanych obiektywów A i B
 Fig. 8. Measured MTF characteristics for two examined lenses A and B

Dla dwóch podobnych obiektywów A i B, o jednakowej ogniskowej =12mm, tego samego producenta przeprowadzono testy porównawcze.

Już wizualna ocena porównawcza jakości zdjęć plansz wzorcowych (rys. 7) wskazuje na istotne różnice między układami optycznymi. Obiektiw B, mimo jednakowej średnicy i liczby soczewek (oczywiście jednakowej apertury) jest ciemniejszy. Ponadto analiza ilościowa wskazuje wyraźnie mniejszy zakres równomierności charakterystyki dynamicznej (rys. 8), szczególnie dla niskich częstotliwości do ok. 0,1 cykli/piksel, choć maksymalne pasmo przenoszenia dla obydwu obiektywów przy MTF50 różni się bardzo nieznacznie.

2.5. ZAKŁÓCENIA

Do istotnych zakłóceń metod optycznych pomiarów zaliczyć należy: zabrudzenia powierzchni badanej i toru optycznego, światło zewnętrzne, drgania zewnętrzne oraz zmiany temperatury. Najczęstszą przyczyną zakłóceń w systemach wizyjnych są zabrudzenia powierzchni badanej lub elementów toru optycznego. Szczególnie krytyczna sytuacja występuje w przypadku procesowej kontroli optycznej, tj. na linii produkcyjnej, gdzie używane jest chłodziwo. Krople cieczy stają się soczewkami, które rozogniskowują obszary obrazu, co skutkuje silnym lokalnym rozmyciem i zaciemnieniem.

3. PODSUMOWANIE

Zastosowanie kamer o wyższych rozdzielczościach oraz większych wymiarach przetworników nie zapewnia jednak automatycznie wyższej dokładności systemu pomiarowego. Dla optymalnego zaprojektowania systemu wizyjnego lub optycznego, wg. kryterium dokładności, potrzebna jest coraz bardziej specjalistyczna wiedza optyczna

o obiektywach (dystorsje, aberracje, MTF), o oświetleniu (bryła fotometryczna, polaryzacja, efekt plamkowania, front falowy), o parametrach powierzchni (BRDF) oraz o zakłóceniach.

W artykule pokazano przykładowe wyniki przeprowadzonych pomiarów porównawczych. Wyniki należy traktować jedynie porównawczo, gdyż wykorzystywana kamera nie pracowała w trybie RAW, co oznacza, że algorytmy polepszania obrazów były aktywne. Nieporuszone zagadnieniem wpływającym na dokładność pomiarów optycznych są również algorytmy przetwarzania obrazów. Algorytmy subpikselowe detekcji krawędzi bazujące na gradientowych metodach detekcji pozwalają uzyskać rozdzielczość 1/4-1/10 rozdzielczości przetwornika.

Praca badawcza dofinansowana ze środków NCBiR, w ramach realizacji projektu rozwojowego Nr NR03004306/2009

LITERATURA

- [1] DIETRICH E., SCHULZE A., Guidelines for the Evaluation of Measurement System and Processes. Acceptance for Production Facilities, Hanser Verlag, 2003.
- [2] <http://www.imatest.com>, 10.2010.
- [3] FDA, Process Validation in Medical Device Quality System, FDA QSR 820.75.
- [4] Quality Management Standard for Medical Devices. ISO 13485 7.5.2, 2003.
- [5] HUMIENNY Z. et al., Specyfikacje geometrii wyrobów. WNT, 2004.
- [6] PFEIFER, Fertigungsmesstechnik (2nd ed.). R. Oldenbourg Verlag, Munich, Germany, 2001.
- [7] REINER J., Rendering for Machine Vision Prototyping. SPIE Europe Optical System Design, Optical Design and Engineering, 7100A-8, Glasgow, Scotland, UK, September 2008.
- [8] REINER J., STANKIEWICZ M., Eliminacja zniekształceń geometrycznych obrazu w metodzie triangulacji laserowej. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 56/1, 2010, 54-57.
- [9] WYN Ch., An Introduction to BRDF-Based Lighting. NVIDIA Corporation, www.nvidia.com, 2000.

ACCURACY IMPROVEMENT OF MACHINE VISION METHODS FOR MANUFACTURING QUALITY IMPROVEMENT

The paper discusses factors influencing the accuracy and precision of optical measurements realized by machine vision. The attention was turned to the quality of examined surface, resulting from defects on tool edge. The importance of telecentric lenses and collimated illumination for minimizing incorrect edge detection was stressed. The possibilities of optical elements characteristics measurement was presented e.g. distortion, and modulation transfer function MTF.