

Wojciech KAPŁONEK, Czesław ŁUKIANOWICZ

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI, ZAKŁAD METROLOGII I JAKOŚCI

Analiza zakresu dynamicznego sygnału zawartego w obrazach skaterometrycznych przetworzonych metodą nakładania obrazów

Mgr inż. Wojciech KAPŁONEK

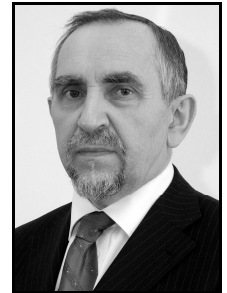
Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (2003 r.). W latach 2003-2007 był słuchaczem studiów doktoranckich, a od 2007 r. jest pracownikiem Zakładu Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół zagadnień związanych z pomiarami struktury geometrycznej powierzchni metodami optycznymi oraz wykorzystaniem technik przetwarzania i analizy obrazu.



e-mail: wojciech.kaplonek@tu.koszalin.pl

Dr hab. inż. Czesław ŁUKIANOWICZ

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Od 2001 r. kieruje Zakładem Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji. Specjalizuje się w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni metodami stykowymi i optycznymi. Opublikował z tego zakresu ponad 100 artykułów i referatów naukowych.



e-mail: czeslaw.lukianowicz@tu.koszalin.pl

Streszczenie

W artykule przeanalizowano jedną z cech obrazów wynikowych uzyskanych metodą nakładania obrazów. Wykorzystano obrazy skaterometryczne rejestrowane w postaci sekwencji video podczas ruchu badanych powierzchni, oświetlanych światłem laserowym o długości fali $\lambda = 635$ nm skierowanym pod kątem padania równym 50° . Sekwencje przetwarzano za pomocą specjalistycznego oprogramowania o nazwie RegiStax 4.0, w celu uzyskania pojedynczych obrazów wynikowych o uśrednionej wartości luminacji. Dla różnej liczby nakładanych klatek obserwowano wzrost zakresu dynamicznego sygnału zawartego w obrazie. Cechę tę analizowano na podstawie wyznaczanych histogramów luminacji dla każdego z ocenianych obrazów.

Słowa kluczowe: przetwarzanie i analiza obrazu, metoda nakładania obrazów, obraz skaterometryczny, zakres dynamiczny sygnału, chropowata powierzchnia.

Analysis of the dynamic range of the signal content in images of scattered light processed by image stacking

Abstract

In the paper the theoretical bases of image stacking and the analysis of one of the features of output images obtained by this technique are presented. The authors used the images of scattered light in the form of video sequences acquired during the movement of the tested surfaces which were illuminated by a laser light beam (wavelength $\lambda = 635$ nm, incidence angle: 50 degree). The video sequences were processed by RegiStax 4.0 software. The software extracted automatically single frames from a sequence, aligned them and, then, stacked the images to produce an average value of the luminance. In the result of all these operations a single output image was created. For different numbers of the stacking frames there was observed the increase in the dynamic range of the signal content in output images. This feature was analysed on the basis of assessment of the luminance histograms by ImageJ 1.41 software. The increase in the dynamic range of the signal content in images of the scattered light can make it possible to obtain better information on the surface condition and, the same, correct metrological assessment of this surface. The presented method can be applied to in-process inspection of surface parameters and detection of surface defects of machine parts.

Keywords: image processing and analysis, image stacking, image of scattered light, dynamic range of signal, surface roughness.

1. Wstęp

Wysokie wymogi jakościowe stawiane współcześnie produkowanym częściom maszyn i urządzeń wymuszają na producentach stosowanie nowoczesnych metod kontroli parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) [1]. Od wielu lat powszechnie w przemyśle stosuje się tzw. kontrolę aktywną [2]. Jest ona realizowana już nie tylko po zakończeniu procesu obróbkowego, ale także przed i w trakcie jego trwania, co pozwala na uzyskanie wysokiej jakości i powtarzalności wytwarzanych elementów.

Ważnym czynnikiem występującym podczas takiej kontroli jest ruch badanej powierzchni [3, 4]. Stosowanie konwencjonalnych metod stykowych pomiaru nierówności powierzchni [5] jest w tym przypadku ograniczone ze względu na szereg czynników zakłócających proces pomiarowy. Aktywna kontrola może być natomiast realizowana przez systemy pomiarowe wykorzystujące inne metody. Dobrą alternatywą dla metod stykowych są metody optyczne [6], wspomaganą w wielu przypadkach technikami przetwarzania i analizy obrazu [7]. Nośnikiem informacji jest tu obraz powierzchni rzeczywistej badanej próbki lub, jak ma to np. miejsce w przypadku metod skaterometrycznych [8], obraz światła rozproszonego przez taką powierzchnię. Ocena obrazu dokonywana jest w sposób pośredni za pomocą odpowiedniego oprogramowania komputerowego. Polega ona na analizowaniu pewnych parametrów, charakterystycznych zarejestrowany obraz. Rezultaty analiz mogą posłużyć do wnioskowania o parametrach SGP, a w niektórych przypadkach do korelacji parametrów obrazu z wybranymi parametrami SGP.

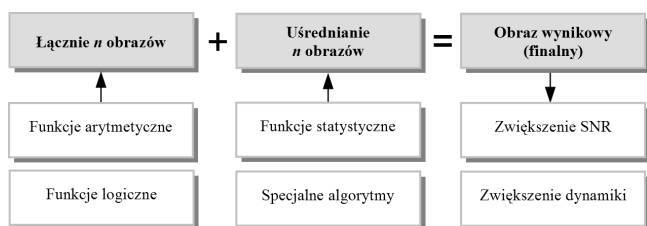
W Zakładzie Metrologii i Jakości Politechniki Koszalińskiej od wielu lat prowadzi się badania nad zastosowaniem metod optycznych wykorzystujących zjawisko rozpraszania światła [8] do oceny parametrów SGP. Obecnie prowadzone prace skupiają się na określeniu możliwości pomiarów mikronierówności powierzchni elementów znajdujących się w ruchu. Stosuje się tu połączenie metody skaterometrii laserowej [9] i metody przetwarzania obrazów ruchomych [10]. Jak wskazują rezultaty wcześniej prowadzonych badań [11, 12, 13] integracja ww. metod może pozwolić na poprawną ocenę metrologiczną stanu badanej powierzchni na podstawie uśredniania w czasie ruchomych obrazów skaterometrycznych.

W niniejszym artykule przedstawiono krótki opis metody nakładania obrazów oraz pokazano wyniki badań prowadzonych na przetworzonych obrazach skaterometrycznych. Analizowano w nich wpływ nakładania różnej liczby obrazów na wzrost zakresu dynamicznego sygnału zawartego w obrazie wynikowym, który przetwarzano i analizowano za pomocą specjalistycznego oprogramowania komputerowego RegiStax 4.0 i ImageJ 1.41.

2. Metoda nakładania obrazów

Metoda nakładania obrazów (ang. *Image Stacking*) [14] jest jedną z metod przetwarzania obrazów ruchomych, z którą wiąże się obecnie pewne nadzieje na zastosowanie jej w optycznej ocenie parametrów SGP. Z racji dużej użyteczności i uniwersalności metodę tą wykorzystuje się m.in. w takich dziedzinach jak: astrofizyka [15], medycyna [16], kartografia [17], geofizyka [18], tektonika [19], grafika komputerowa [20].

Podstawowa idea tej metody polega na nałożeniu na siebie wielu pojedynczych klatek wydzielonych z sekwencji video w celu uzyskania obrazu wynikowego o uśrednionej wartości luminacji. Strukturę procesu przetwarzania obrazów realizowaną za pomocą omawianej metody pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura przetwarzania obrazów za pomocą metody nakładania obrazów
Fig. 1. The structure of image processing realised by image stacking

Obraz wynikowy stanowiący złożenie n obrazów źródłowych uzyskuje się przez liniową kombinację obrazów (tzw. mieszanie obrazów). Jest to specjalny sposób dodawania n obrazów, w którym poziom szarości lub nasycenia barwy każdego punktu obrazu wynikowego tworzy się jako sumę wagową poziomów szarości lub nasycenia barw nakładanych n obrazów. Liniową kombinację n obrazów można zapisać w postaci:

$$L(x, y) = k L_n(x, y) + (1 - k) L_{n+1}(x, y), \quad (1)$$

gdzie: k – współczynnik zawartości obrazu $L_n(x, y)$ w obrazie wynikowym $L(x, y)$, x, y – współrzędne odpowiadających sobie elementów obrazów: (x – numer wiersza, y – numer kolumny).

Do uśredniania wartości luminacji łączonych obrazów stosowane są parametry statystyczne lub specjalne algorytmy. Tradycyjnym podejściem jest stosowanie: średniej arytmetycznej lub mediany. Uśrednianie takimi metodami realizowane jest przez większość dostępnego na rynku oprogramowania komputerowego realizującego proces nakładania obrazów [14]. W innych bardziej złożonych przypadkach, stosuje się zaawansowane sposoby uśredniania oparte na specjalnych algorytmach. Do tej grupy należą m.in. takie metody jak: obcinanie obrazu Kappa-Sigma (ang. *Kappa-Sigma Clipping*) [21], auto-adaptacyjna średnia ważona (ang. *Auto Adaptive Weighted Average*) [22], entropijna średnia ważona (ang. *Entropy Weighted Average*) [23].

Rezultatem procesu nakładania n obrazów jest uzyskany obraz wynikowy. Charakteryzuje się on zwiększoną wartością stosunku sygnału do szumu (ang. *SNR – Signal-to-Noise-Ratio*) [24] oraz zwiększonym zakresem dynamicznym sygnału zawartego w obrazie. Oznacza to, iż wzmocnieniu ulega ta część sygnału (obrazu), która przynosi użyteczną informację, przy jednoczesnym słabieniu wszelkiego rodzaju niepożądanych zakłóceń w postaci szumów. Wzrost wartości SNR pociąga za sobą również wzrost zakresu dynamicznego sygnału zawartego w obrazie (wzrost rozpiętości tonalnej). Jest to korzystne, gdyż pozwala z jednej strony na poprawne odwzorowanie szerokiego zakresu intensywności oświetlenia, od głębokich cieni, do jasnego światła, a z drugiej strony pozwala na większą niż w przypadku pojedynczego obrazu możliwość regulacji wartości tonalnych.

Zastosowanie metody nakładania obrazów do przetwarzania obrazów skaterometrycznych umożliwia uzyskanie zwiększonego zakresu wartości tonalnych, a co za tym idzie bardziej precyzyjnego odwzorowania badanej powierzchni. Pozwala to na poprawną ocenę metrologiczną takiej powierzchni pod względem m.in. mikronierówności, jednorodności, a także umożliwia wykrywanie różnego rodzaju wad, defektów i zniekształceń.

3. Badania doświadczalne

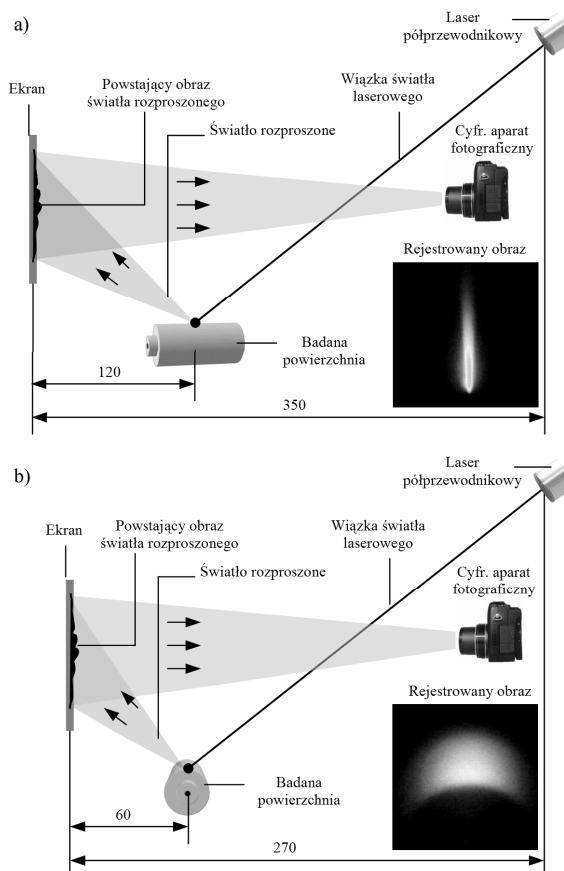
Głównym celem badań było stwierdzenie, jak liczba łączonych pojedynczych klatek wydzielonych z sekwencji video wpływa na uzyskiwany zakres dynamiczny sygnału zawartego w przetworzonym, wynikowym obrazie skaterometrycznym.

Do badań przeznaczono obrazy światła rozproszone zarejestrowane dla pięciu zewnętrznych powierzchni wałków obrabianych przez: toczenie, szlifowanie, mikrowygładzanie i polerowanie. Charakterystykę i parametry obróbki badanych powierzchni przedstawiono w tabelicy 1.

Tab. 1. Parametry powierzchni, których obrazy przetwarzane były w czasie badań
Tab. 1. Parameters of surfaces whose images were processed in tests

Nr próbki	Materiał	Twardość w skali Rockwella HRC	Rodzaj obróbki powierzchni	Chropowatość powierzchni		
				Ra [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]
1	Stal EN C45	40	Toczenie	1,17	6,53	4,36
2	Stal EN C45	40	Szlifowanie	0,25	2,54	3,82
3	Stal EN C45	44	Szlifowanie	0,75	4,32	3,04
4	Stal EN C45	40	Mikrowygładzanie	0,20	1,56	2,72
5	Stal EN C45	36	Polerowanie	0,04	0,41	3,85

Akwizycji ruchomych obrazów skaterometrycznych dokonano korzystając ze stanowiska badawczego zbudowanego na bazie małej tokarki stołowej SK-1. Stanowisko to bardziej szczegółowo opisano w pracy [12]. Badane powierzchnie znajdujące się w ruchu (prędkość obrotowa $n_w = 2740$ obr./min.) oświetlano wiązką światła o długości fali $\lambda = 635$ nm, generowaną przez laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs, Inc. (moc lasera - 1 mW, średnica plamki na badanej powierzchni - 1 mm). Wiązka skierowana była pod kątem padania równym 50° . Wykonano dwie serie pomiarów. W pierwszej serii płaszczyzna padania była prostopadła, a w drugiej zaś równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki. Światło rozproszone obserwowane było na matowym ekranie, z naniesioną podziałką służącą do wstępnego szacowania wymiarów powstającego obrazu. Na rysunku 2 przedstawiono schematy pokazujące ustawienia powierzchni podczas akwizycji obrazów skaterometrycznych.



Rys. 2. Ustawienia badanej powierzchni podczas rejestracji obrazów skaterometrycznych w ruchu, gdy płaszczyzna padania była: a) prostopadła do osi próbek oraz śladów obróbki, b) równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki

Fig. 2. Settings of the tested surface during acquisition of images of scattered light in movement when the plane of incidence was: a) perpendicular to the axis of sample and machined grooves, b) parallel to the axis of sample and machined grooves

Sekwencje video rejestrowano w postaci pliku zapisanego w formacie *.mov (rozdzielczość obrazu 640×480 pikseli, czas trwania 45 s). Ogólna liczba sekwencji wynosiła 10 (5 dla oświetlenia prostopadłego oraz 5 dla oświetlenia równoległego). Do rejestracji wykorzystano cyfrowy aparat fotograficzny Camedia C-5060WZ firmy Olympus. Aparat wyposażony był w zintegrowany obiektyw zmiennoogniskowy 5,7 – 22,9 mm (odpowiednik obiektywu 27 – 110 mm w aparacie małoobrazkowym), umożliwiającą uzyskanie 4-krotnego zbliżenia. Elementem detekcyjnym była matryca CCD o wymiarach $7,18 \text{ mm} \times 5,32 \text{ mm}$ i efektywnej liczbie 5,10 miliona pikseli.

4. Przetwarzanie i analiza obrazów

Zarejestrowane sekwencje video po przesłaniu z aparatu cyfrowego na dysk twardy komputera przetwarzano i analizowano korzystając z oprogramowania przedstawionego w tablicy 2.

Tab. 2. Oprogramowanie komputerowe służące do przetwarzania i analizy obrazów skaterometrycznych wykorzystywane w badaniach

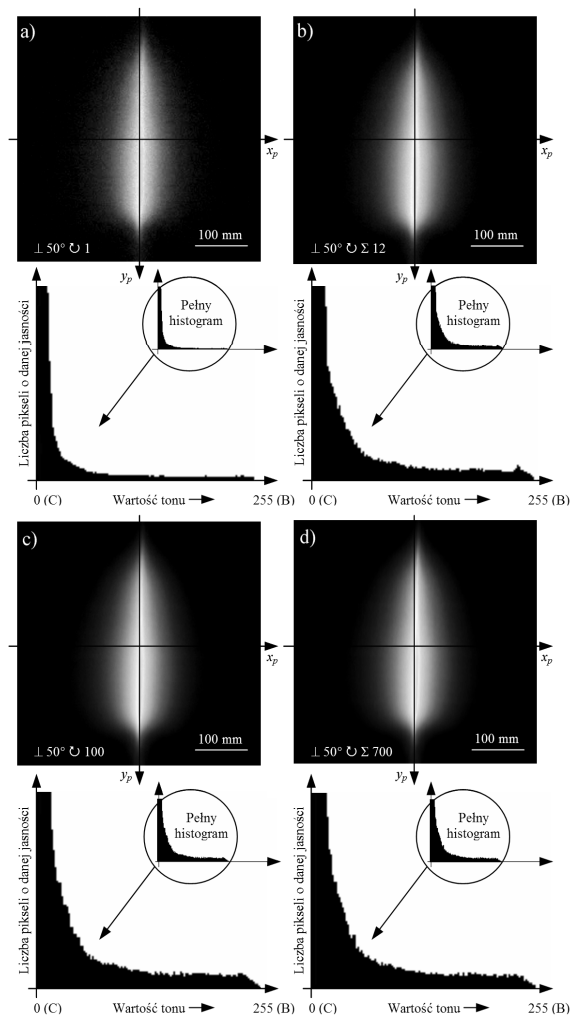
Tab. 2. Computer software for processing and analysis of images of scattered light

Lp.	Nazwa	Producent	Prowadzone operacje
1	VideoStudio™7 SE DVD	Ulead Systems, Inc. http://www.ulead.com	Rozdzielenie pliku wejściowego 700 klatek, na pliki zawierające 500, 375, 200, 100, 50, 25 i 12 klatek, konwersja pliku *.mov na *.avi
2	RAD Video Tools 1.8	RAD Game Tools, Inc., http://www.radgametools.com/default.htm	Wydzielenie z sekwencji video pojedynczych klatek
3	RegiStax 4.0	Cor Berrevoets www.astronomie.be/registax/	Przetwarzanie obrazów (pozycjonowanie, nakładanie, uśrednianie)
4	ImageJ 1.41	Wayne Rasband, NIOH http://rsb.info.nih.gov/ij	Analiza obrazów, wyznaczenie histogramów luminacji i pola powierzchni histogramów

Oprogramowanie 1 i 2 posłużyło do wstępnego przygotowania sekwencji video. Za pomocą programu VideoStudio™7 SE DVD rozdzielono plik wejściowy zawierający 700 klatek, (co odpowiadało czasowi zapisu około 45 s) na 7 plików o mniejszej ilości klatek – 500, 375, 200, 100, 50, 25, 12 (odpowiednio około 32 s, 24 s, 12 s, 6 s, 3 s, 1,6 s i 0,7 s). Dokonano także konwersji wszystkich plików zapisanych w formacie *.mov na format *.avi. Następnie za pomocą programu RAD Video Tools 1.8 wydzieleno pojedyncze klatki z każdej z sekwencji video. Kolejne dwa programy (poz. 3 i 4 w tab. 2) posłużyły do przetwarzania i analizy przygotowanego wcześniej materiału. Oprogramowanie RegiStax 4.0 realizowało proces nakładania obrazów. Po wczytaniu serii pojedynczych klatek i wybraniu klatki referencyjnej (stanowiącej obraz odniesienia do wyrównania pozostałych klatek), program automatycznie dokonywał ich wyrównania. Proces ten polegał na porównaniu obrazu referencyjnego z kolejnym obrazem i minimalizowaniu różnic między nimi metodą kolejnych przybliżeń. Po wyrównaniu klatek program dokonywał selekcji klatek wejściowych, odrzucając te o gorszej jakości. Tak wyselekcjonowane klatki zostały nałożone w kolejności odpowiadającej jakości obrazu (od najlepszej do najgorszej). W wyniku tej operacji powstał pojedynczy obraz wynikowy o uśrednionej wartości luminacji.

Uzyskane obrazy wynikowe poddano analizie za pomocą oprogramowania ImageJ 1.41. Dla każdego z nich wyznaczono histogram luminacji przedstawiający rozkład jasności poszczególnych obszarów obrazu oraz obliczono wartości pola powierzchni dla wszystkich rozpatrywanych histogramów.

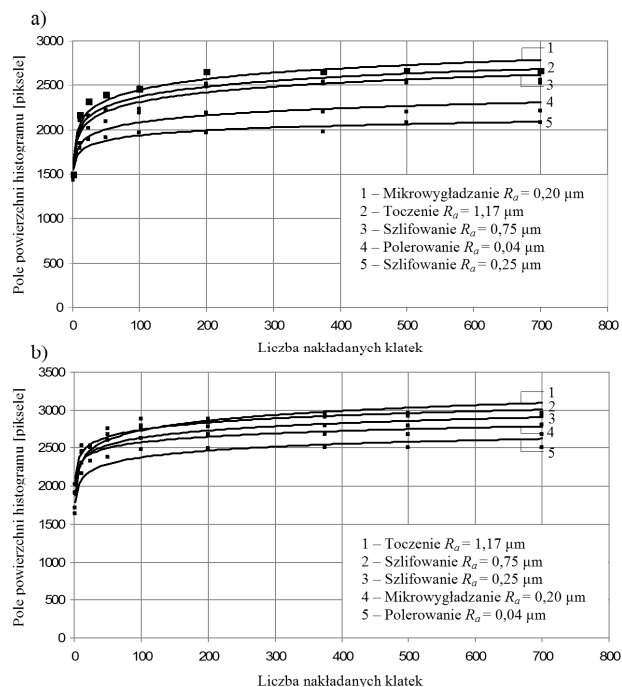
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki badań prowadzonych dla powierzchni toczonej o chropowatości $Ra = 1,17 \mu\text{m}$, znajdującej się w ruchu (prędkość obrotowa $n_w = 2740 \text{ obr./min.}$). Powierzchnię oświetlano wiązką światła laserowego o długości fali $\lambda = 635 \text{ nm}$. Płaszczyzna padania była prostopadła do osi próbek oraz śladów obróbki. Wynikowe obrazy skaterometryczne uzyskano za pomocą oprogramowania RegiStax 4.0 przez nałożenie i uśrednienie 12, 100 i 700 pojedynczych klatek wydzielonych z sekwencji video. Dla porównania pokazano dodatkowo obraz pojedynczej klatki. Wszystkie obrazy przedstawiono wraz z odpowiadającymi im histogramami luminacji uzyskanymi za pomocą oprogramowania ImageJ 1.41. Pokazują one rozkład jasności poszczególnych obszarów obrazu.



Rys. 3. Wynikowe obrazy skaterometryczne powstałe przez nałożenie i uśrednienie b) 12, c) 100, d) 700 pojedynczych klatek wydzielonych z sekwencji video (dla porównania przedstawiono dodatkowo pojedynczą klatkę video – rysunek 3a) oraz odpowiadające im histogramy luminacji pokazujące rozkład jasności poszczególnych obszarów obrazu

Fig. 3. Output images of scattered light obtained by stacking and averaging of: b) 12, c) 100, d) 700 single frames from a video sequence (for comparison a single video frame is additionally presented in Fig. 3a) as well as the corresponding luminance histograms showing distribution of the luminance for separate image areas

Wyliczone wartości pola powierzchni dla każdego z histogramów posłużyły do wyznaczenia zależności pola powierzchni histogramu od liczby nakładanych klatek w przypadku, gdy płaszczyzna padania była prostopadła, oraz równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki. Zależności te w postaci krzywych aproksymowanych funkcją logarytmiczną pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Wykresy zależności pola powierzchni histogramu luminacji wynikowego obrazu skaterometrycznego od liczby nakładanych klatek dla obrazów rejestrowanych podczas oświetlenia badanej powierzchni wiązką światła laserowego o długości fali $\lambda = 635$ nm, gdy płaszczyzna padania była: a) prostopadła do osi próbek oraz śladów obróbki, b) równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki

Fig. 4. Dependence of the luminance histogram area of the output image of scattered light on the number of stacked frames for images acquired during illumination of the tested surfaces by laser light beam $\lambda = 635$ nm, when the plane of incidence was: a) perpendicular to the axis of sample and machined grooves, b) parallel to the axis of sample and machined grooves

5. Wnioski

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zakresy dynamiczne sygnałów zawartych w wynikowych obrazach skaterometrycznych są proporcjonalne do pól powierzchni histogramów luminacji. Wartości tych pól rosną wraz z liczbą nakładanych klatek. Największy wzrost obserwuje się dla małej liczby klatek (w danym przypadku zawierających się w przedziale 12 – 100 klatek). Jeśli liczba nakładanych klatek jest większa niż 100, wartości pól powierzchni histogramów luminacji również rosną, lecz wzrost ten jest mniejszy.
2. Oceniając jakość odwzorowania obrazu skaterometrycznego (a tym samym jakość pozyskiwanej informacji o stanie badanej powierzchni) należałoby zadać pytanie: ile klatek należy połączyć, aby uzyskać bardziej precyzyjną informację o takiej powierzchni? Odpowiedź na to pytanie jest trudna. Należałoby przeprowadzić badania dla różnych typów powierzchni i wyznaczyć optymalną liczbę klatek, wystarczającą do uzyskania takiego obrazu, który gwarantowałby otrzymanie dostatecznie dokładnej informacji o stanie badanej powierzchni.
3. Zakładając wykorzystanie metody nakładania obrazów w systemie optycznym pracującym w ramach kontroli aktywnej, wyznaczenie optymalnej liczby klatek niezbędnej do uzyskania pełniejszej informacji o stanie badanej powierzchni byłoby niezwykle ważne. Pozwoliłoby to z jednej strony na zautomatyzowanie kontroli części maszyn wykonanych z danego materiału, obrabianych w ten sam sposób i charakteryzujących się podobną SGP. Z drugiej strony stworzone zostałyby podstawy do bardziej skomplikowanych operacji kontroli powierzchni elementów maszynowych, mianowicie takich, które pozwalałyby kontrolować części wykonane różnymi technikami obróbkowymi z różnych materiałów i charakteryzujące się zróżnicowaną SGP.

6. Literatura

- [1] K. E. Ocoś, V. Lubimov: Struktura geometryczna powierzchni – podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2003.
- [2] K. Vacharanukul, S. Mekid: In-Process Dimensional Inspection Sensors. Measurement, Vol. 38, 2005, 204–218.
- [3] W. Wang, P. L. Wong, J. B. Luo, Z. A. Zhang: New Optical Technique for Roughness Measurement on Moving Surface. Tribology International, Vol. 31, No. 5, 1998, 281.
- [4] P. L. Wong, K. Y. Lee: In-Process Roughness Measurement on Moving Surfaces. Optics & Laser Technology, Vol. 31, 1999, 543–548.
- [5] M. Wieczorowski, A. Cellary, J. Chajda: Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni, czyli o chropowatości i nie tylko. Oficyna Wydawnicza Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2003.
- [6] P. Pawlus: Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [7] S. E. Umbaugh: Computer Imaging: Digital Image Analysis and Processing. CRC Press, London, 2005.
- [8] Cz. Łukianowicz: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
- [9] B. C. Rao, B. Raj: Study of Engineering Surfaces Using Laser-Scattering Techniques. Sādhanā, Vol. 28, Parts 3 & 4, June/August 2003, 739–761.
- [10] T. R. Reed (ed.): Digital Image Sequence Processing, Compression, and Analysis, CRC Press, New York, 2005.
- [11] W. Kapłonek, Cz. Łukianowicz: Zastosowanie skaterometrii laserowej i komputerowej analizy obrazu do oceny mikronierówności powierzchni będących w ruchu. Przegląd Mechaniczny Nr. 9S, 2007, 119–124.
- [12] W. Kapłonek: Zastosowanie metody nakładania obrazów do oceny mikronierówności powierzchni w ruchu. Advances in Materials Science, Vol. 8, No. 2(16), 2008, 20–27.
- [13] W. Kapłonek, Cz. Łukianowicz: Ocena mikronierówności powierzchni w ruchu z zastosowaniem skaterometrii laserowej i metody nakładania obrazów. Przegląd Elektrotechniczny, R. 84, Nr 5, 2008, 155–160.
- [14] G. Privett: Creating and Enhancing Digital Astro Images (Patrick Moore's Practical Astronomy Series), Springer, 2007.
- [15] S. Zibetti, B. Ménard, D. B. Nestor, A. M. Quider, S. M. Rao, D. A. Tumshek: Optical Properties and Spatial Distribution of MGII Absorbers from SDSS Image Stacking. The Astrophysical Journal, Vol. 658, 2007, 161–184.
- [16] P. Gut, L. Chmielewski, P.F. Kukulowicz, A. Dąbrowski: Nakładanie obrazów – precyzyjna ocena jakości radioterapii bez określania odpowiedniości punktów na obrazie symulacyjnym i portalowym. Materiały IV Sympozjum Naukowego Techniki Przetwarzania Obrazu (TPO 2003) – Referaty i komunikaty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003, 154–161.
- [17] K. L. Chinh: Least Squares Multi-Point Matching for DEM with Consideration of Correlated Neighbouring Pixels and Terrain Height Differences. Geodezja i Kartografia, Nr. 50, Z. 1, 2001, 45–56.
- [18] P. Rabinowitz, C. Sun: High Resolution Image Stacking in Geophysical Seismic Data Processing. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 2007.
- [19] D. Ozisk: Post-earthquake Damage Assessment Using Satellite and Aerial Video Imagery. MSc Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, Netherland, 2004.
- [20] P. Shikvakumara, K. G. Hemantha, D. S. Guru, P. Nagabhushan: Sliding Window Based Approach for Document Image Mosaicing. Image and Vision Computing, Vol. 24, 2006, 94–100.
- [21] G. Lehmann: Kappa Sigma Clipping. The Insight Journal, July-December, 2006. [online] <http://insight-journal.org>.
- [22] P. B. Stetson: The Techniques of Least Squares and Stellar Photometry with CCDs. Proceeding of the V Advanced School of Astrophysics, University of São Paulo, 1989.
- [23] A. German, M. R. Jenkin, Y. Lesperance: Entropy-based Image Merging. Proceedings of the 2nd Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV'05), 2005, 81–86. [online] <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/CRV.2005.38>.
- [24] S. W. Smith: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, 2003.