



Dorota Zawieska, Piotr Podlasiak

ANALIZA CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW SYSTEMEM MORY PROJEKCYJNEJ

THE ANALYSIS OF THE FACTORS AFFECTING PRECISION OF MEASUREMENT BY PROJECTION MOIRÉ SYSTEM

*Politechnika Warszawska, Instytut Fotogrametrii i Kartografii
Warsaw University of Technology, Institute of Photogrammetry and Cartography*

STRESZCZENIE: System mory projekcyjnej jest metodą optyczną, gdzie zasada tworzenia prążków realizowana jest na zasadzie wykorzystania interferencji struktury dwóch rastrów. Przedstawiony system mory projekcyjnej prezentuje analityczną analizę obrazu prążkowego. Kodowanie i modyfikacja informacji fazowej realizowana jest na drodze optycznej poprzez analizę obrazu prążkowego, a odpowiednie skalowanie wyników przeprowadzone jest numerycznie.

W niniejszym artykule przedstawiono praktyczną weryfikację czynników, które w sposób zasadniczy mogą wpłynąć na dokładność uzyskanych wyników. Przedstawione są empiryczne wyniki uzyskane przy testowaniu systemu mory projekcyjnej. Przeanalizowano takie czynniki jak: wpływ oświetlenia i kontrastu, niedokładność przesunięcia rastra, niedokładność ustawienia ostrości obrazu prążkowego. Ponadto określono wpływ wielkości punktów sygnalizowanych na błędy odtworzenia fazy.

SŁOWA KLUCZOWE: technika mory, obrazy mory, dyskretna zmiana fazy, diagnostyka ortopedyczna

1. WPROWADZENIE

System mory projekcyjnej jest metodą optyczną, gdzie zasada tworzenia prążków realizowana jest na zasadzie wykorzystania interferencji struktury dwóch rastrów. Efekt interferencji uwidacznia się najczęściej w postaci nowego układu prążków – obrazu mory. Prezentowany system mory został zaprojektowany dla potrzeb diagnostyki ortopedycznej. Odpowiednio skonstruowane urządzenie opto-mechaniczne oraz geometria rejestracji obrazu mory pozwalają wykorzystać efekt mory jako narzędzie pomiarowe. Prążki mory, podobnie jak warstwice na mapach opisują rzeczywisty kształt obiektu, przez co mogą być wykorzystywane do wyznaczenia jego wymiarów.

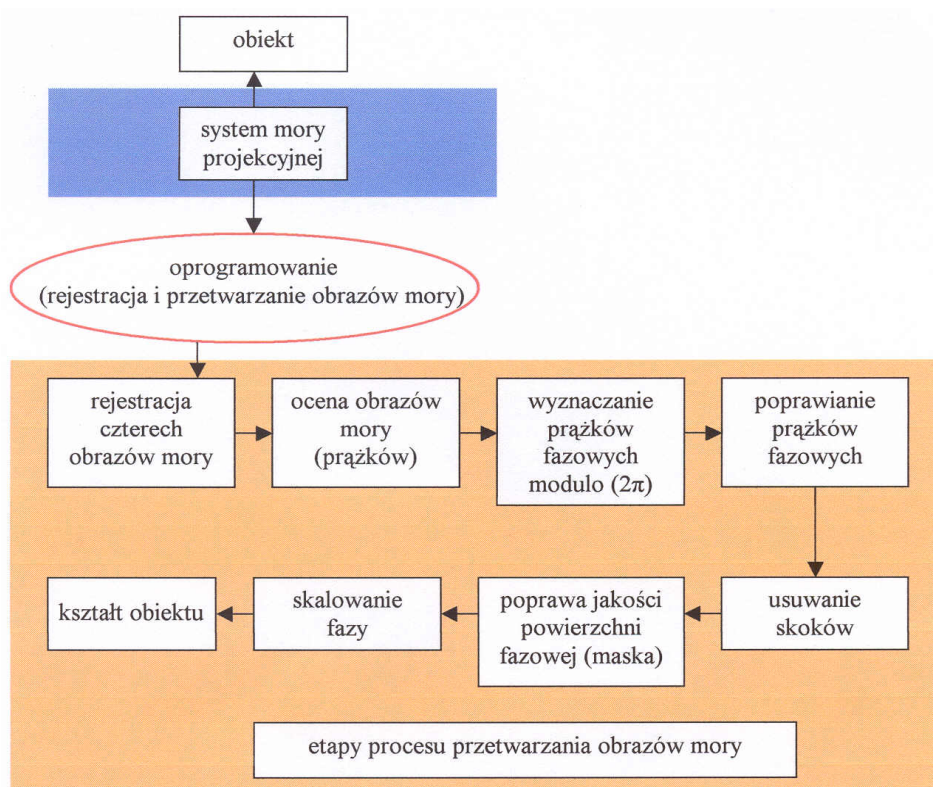
Automatyczna analiza obrazów mory realizowana jest metodą dyskretnej zmiany fazy czterech obrazów mory. Przyjęty algorytm analizy obrazów prążkowych oraz

rozwiązania konstrukcyjne mechaniczno-optyczne systemu stawiają pewne wymagania dotyczące zarówno jakości uzyskiwanych prążków jak i precyzji realizacji przesunięcia fazowego (Zawieska, 2003).

1.1. Schemat i zasada działania systemu mory projekcyjnej

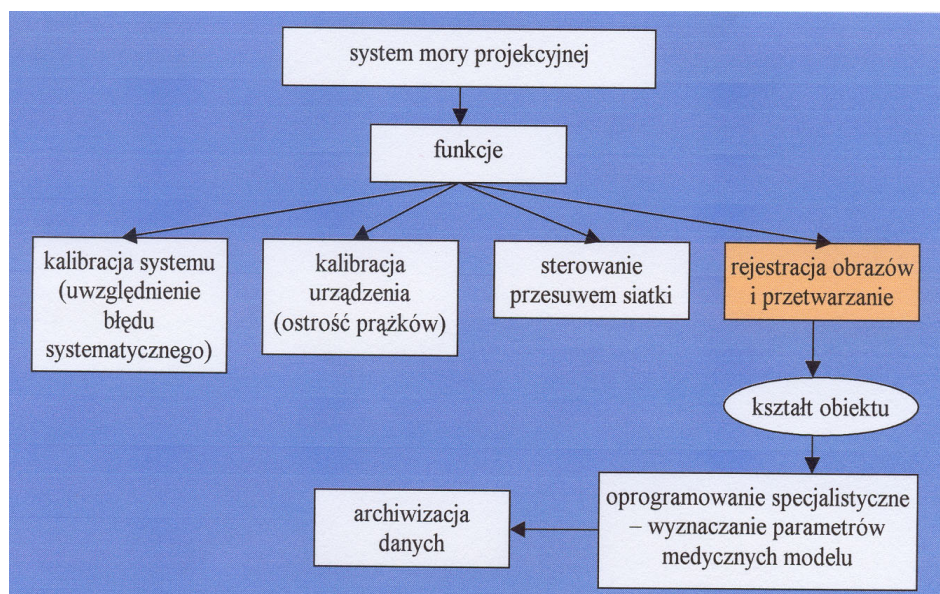
Zasada działania systemu mory polega wykorzystaniu metody automatycznej analizy obrazów mory metodą dyskretnej zmiany fazy. Zadaniem oprogramowania systemu jest rejestracja czterech obrazów mory i przetworzenie wyników do postaci niezbędnej dla programu analizy medycznej. Wynikiem obliczeń jest tzw. powierzchnia fazowa będąca dwuwymiarową tablicą zawierającą informacje przestrzenne dotyczące zmierzonego obiektu (Zawieska, 2003).

Schemat blokowy etapów przetwarzania obrazów mory przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat blokowy procesu przetwarzania obrazu mory

Prezentowany system mory składa się z wielu funkcji, których zawodność działania w sposób decydujący może wpłynąć na dokładność uzyskanych wyników (rys. 2).



Rys. 2. Ogólny schemat funkcji systemu

2. GŁÓWNE CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA DOKŁADNOŚĆ UZYSKANYCH WYNIKÓW

2.1. Wpływ błędów systematycznych urządzenia projekcyjno-odbiorczego mory

Teoretycznie układ urządzenia projekcyjno-odbiorczego prążków mory przy badaniu obiektu płaskiego powinien generować pole jednorodne lub prostoliniowe prążki mory (w przypadku przeogniskowania siatki detekcyjnej lub wzajemnego obrotu siatek). W praktyce analiza obiektu płaskiego wykazała pojawienie się ok. jednego prążka mory przy obserwacji w polu jednorodnym lub wyraźnie zniekształconych prążków zwłaszcza na brzegu obszaru analizowanego dla obserwacji przy przeogniskowaniu obiektu w gałęzi detekcyjnej (odbiorczej) urządzenia.

Zbadano, że główną przyczyną zniekształcenia prążków mory są aberracje kondensora w gałęzi odbiorczej. Kondensator w części projekcyjnej odwzorowuje źródło światła w źrenicy obiektu, a siatka odwzorowana jest wyłącznie przez obiektu. W części odbiorczej obraz zdeformowanej siatki odwzorowany jest przez obiektu, a prążki mory przez kondensator i obiektu kamery. Duże aberracje kondensora (sferyczna i dystorsja) powodują zniekształcenia obrazu mory.

Usuwanie błędów systematycznych polegało na wykonaniu pomiaru płaskiej powierzchni dla ustalonej odległości projektora prążków mory do obiektu (Zawieska, Podlasiak, 2002).

W tabeli 1 i 2 przedstawiono wyniki pomiarów, gdzie błąd średni określa średnią wartość odchylenia od płaskiej powierzchni a błąd (97%) określa procentowy udział punktów badanej powierzchni o błędach poniżej podanej wartości.

Tabela 1.

Odtworzenie płaskiej powierzchni (bez uwzględnienia błędów systematycznych)

Obiekt	Odległość kalibracji [mm]	Błąd średni [mm]	Błąd 97% [mm]
Powierzchnia prostopadła do osi układu	3000	1.15	2.8
	3500	2.07	4.4
	4000	1.30	2.6
Ukośna (kąt ~ 38°)	3000		
	3500	1.30	2.9
	4000		
Ukośna (kąt ~ 20°)	3000		
	3500	1.45	3.7
	4000		

Tabela 2.

Odtworzenie płaskiej powierzchni (po korekcie błędów systematycznych)

Obiekt	Odległość kalibracji [mm]	Błąd średni [mm]	Błąd 97% [mm]
Powierzchnia prostopadła do osi układu	3000	0.31	0.7
	3500	0.41	0.9
	4000	0.65	1.4
Ukośna (kąt ~ 38°)	3000		
	3500	0.51	1.2
	4000		
Ukośna (kąt ~ 20°)	3000		
	3500	0.59	1.2
	4000		

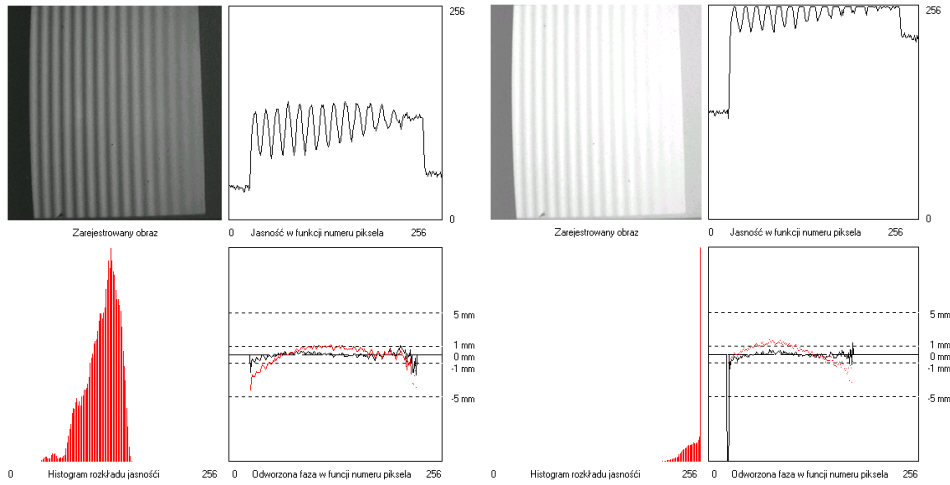
2.2. Inne czynniki wpływające na dokładność pomiaru

Istnieje wiele innych czynników, które w sposób zasadniczy mogą wpłynąć na dokładność uzyskanych wyników. Z uwagi na specyfikę tworzenia prążków mory i przyjęty algorytm analizy obrazów mory, zasadniczy wpływ na dokładność pomiaru mają takie czynniki jak: wpływ oświetlenia i kontrastu, niedokładność przesunięcia siatki, niedokładność ustawienia ostrości obrazu prążkowego.

2.2.1. Wpływ oświetlenia i kontrastu

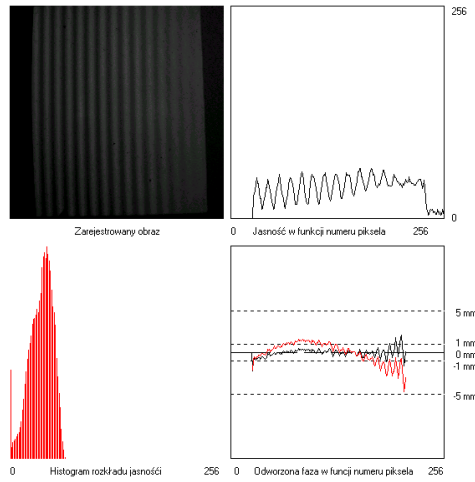
Wpływ oświetlenia na wyniki pomiaru odtworzonej fazy przedstawiono na rysunku 3. (obraz wzorcowy), rysunku 4. (obraz zbyt jasny) i rysunku 5 (obraz zbyt ciemny).

Czerwony kolor odtworzonej fazy oznacza odtworzoną powierzchnię fazową przed kompensacją błędu systematycznego, *czarny* po kompensacji błędu systematycznego.



Rys. 3. Wpływ oświetlenia – obraz wzorcowy

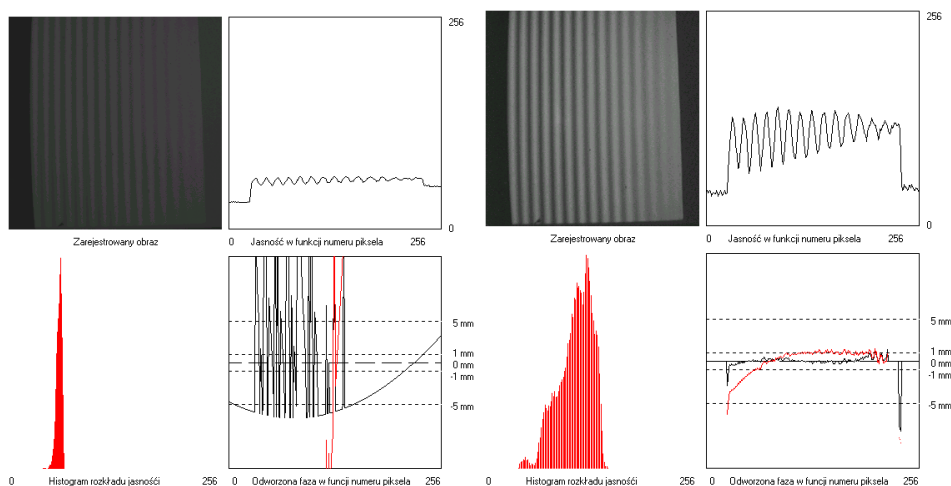
Rys. 4. Wpływ oświetlenia – obraz zbyt jasny



Rys. 5. Wpływ oświetlenia – obraz zbyt ciemny

Analizując przedstawione wykresy z obrazem wzorcowym można stwierdzić, że w przypadku zbyt jasnego obrazu występuje obcięcie sygnału i problemy z odtworzeniem fazy w prawej części obrazu. Natomiast dla obrazu zbyt ciemnego występują wyraźne szumy po prawej stronie obrazu, które nie zmniejszają się po kompensacji błędu systematycznego.

Wpływ kontrastu na wyniki pomiaru odtworzonej fazy przedstawiono na rysunku 6 (zbyt niski kontrast) i rysunku 7 (duży kontrast).



Rys. 6. Zbyt niski kontrast

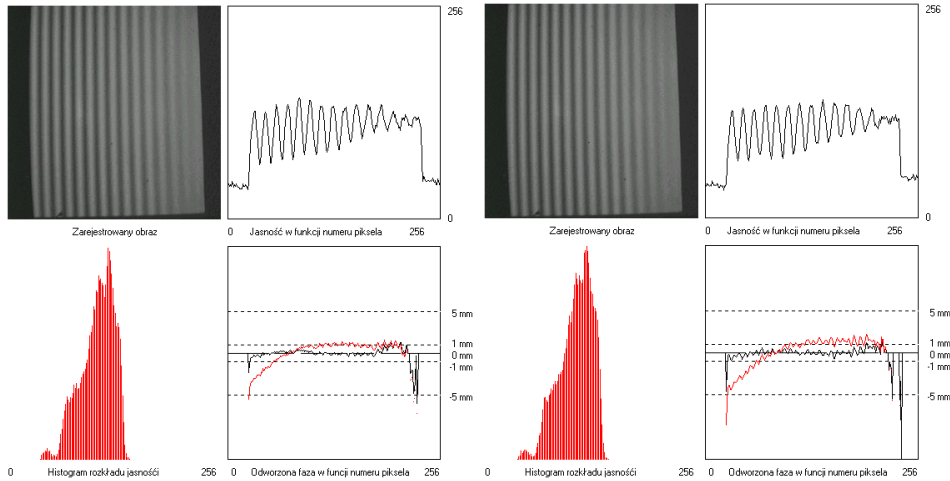
Rys. 7. Duży kontrast

2.2.2. Wpływ błędu przesunięcia siatki

Zgodnie z przyjętą zasadą automatycznej analizy obrazów mory względny numer prążka mory N_x jest wyznaczany metodą dyskretnej zmiany fazy (DZF). W układzie pobierane jest k obrazów prążków mory różniących się o stałą wartość fazy δ_1 (Zawieska, 2003).

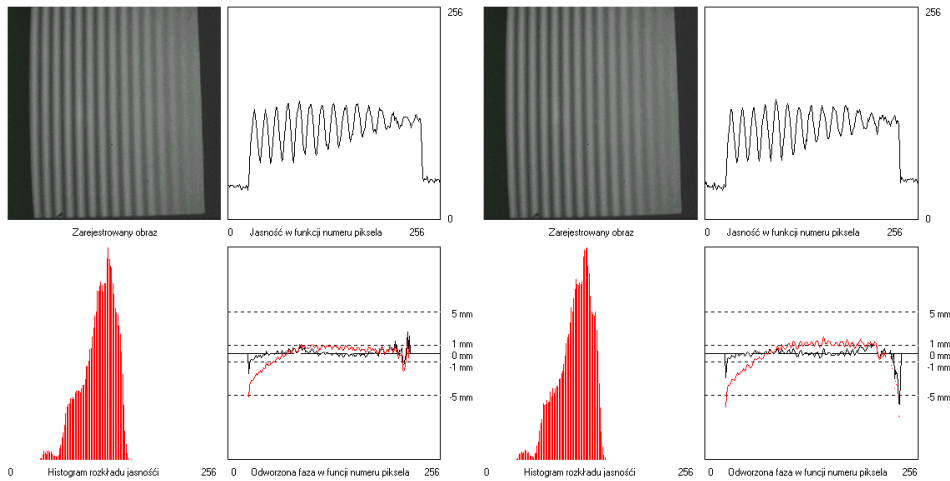
Zmiana fazy jest realizowana przez poprzeczne przesunięcie siatki odbiorczej w urządzenie projekcji prążków mory. Przesunięcie siatki realizowane jest przy wykorzystaniu silnika krokowego, liczba kroków jest ściśle określona i zależy od gęstości wykorzystywanej siatki (rastra).

Na rysunku 8 przedstawiono obraz wzorcowy uzyskany przy kroku silnika 0.17 mm. Na rysunku 9 pokazano wykres odtworzonej fazy przy pierwszym kroku równym 0.14 mm, w wyniku czego widoczne są małe fale na całym analizowanym obszarze, które się zmniejszają nieco, ale nadal występują, kiedy pierwszy krok wynosi 0.21 mm (rys. 10.). Zniekształcenia odtworzonej powierzchni fazowej występują nadal w postaci małych fal i przekraczają 1 mm, przy wszystkich krokach o wartości 0.21 mm (rys. 11). Wynika stąd, że dokładność przesuwu siatki i odpowiednia liczba kroków przesuwu silnika ma zasadniczy wpływ na dokładność odtworzenia fazy.



Rys. 8. Obraz wzorcowy – wszystkie kroki 0.17 mm

Rys. 9. Pierwszy krok 0.14 mm



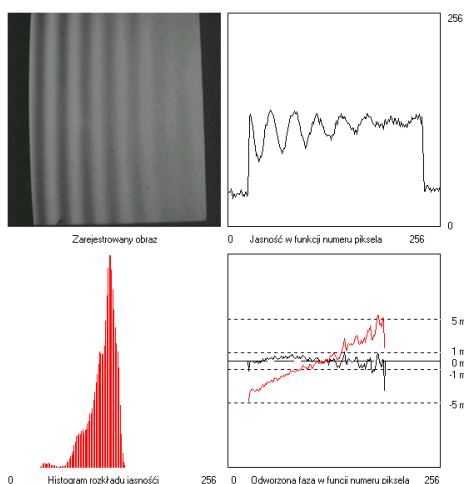
Rys. 10. Pierwszy krok 0.21 mm

Rys. 11. Wszystkie kroki 0.21 mm

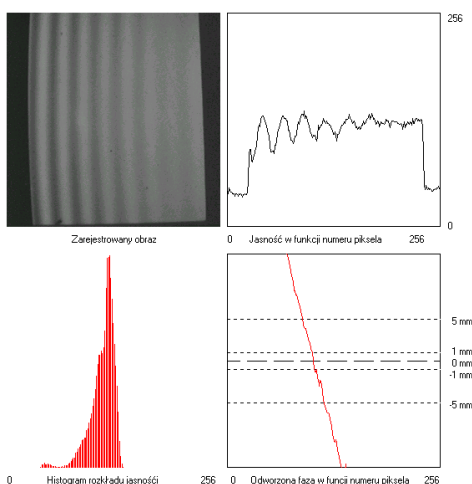
2.2.3. Wpływ błędu kalibracji ostrości prążków

Wykorzystując funkcje oprogramowania systemu mory istnieje możliwość automatycznego ustawienia ostrości rzutowanych prążków rastra na obiekt oraz odpowiedniej ostrości prążków mory. W metryce oprogramowania zapamiętane są parametry sterujące dla uzyskania właściwych ostrości w części projekcyjnej i odbiorczej dla wybranych odległości.

Wykresy przedstawione na rysunkach 12 i 13 pokazują wpływ nieostryści ustawienia prążków dla wybranego przypadku nieostryści w części projekcyjnej oraz błędnie ustawionej odległości rejestracji obrazu.



Rys. 12. Odstrojenie układu projekcyjnego dla 4000 mm



Rys. 13. Obraz zarejestrowany przy błędnej odległości dla 4000 mm

Tabela 3.

Zestawienie wyników dotyczących wpływu błędu kalibracji ostrości prążków

Rodzaj zakłócenia	Błąd wyznaczenia kąta [stopni]	Bez kompensacji		Z kompensacją nieliniowości	
		Błąd średni [mm]	Błąd 97% [mm]	Błąd średni [mm]	Błąd 97% [mm]
Poprawne dane	0.0	1.4	3.6	0.50	1.2
Kalibracja na 3000	-5.7	1.0	2.2	0.50	1.0
Kalibracja na 4000	+6.9	1.9	4.6	0.65	1.5
Odstrojenie toru projekcyjnego +	+1.0	1.5	3.8	0.53	1.0
Odstrojenie toru projekcyjnego -	-1.1	1.1	3.0	0.51	1.3
Odstrojenie toru odbiorczego +	-2.3	1.2	2.9	0.73	1.6
Odstrojenie toru odbiorczego -	+2.9	1.9	4.5	0.72	1.6

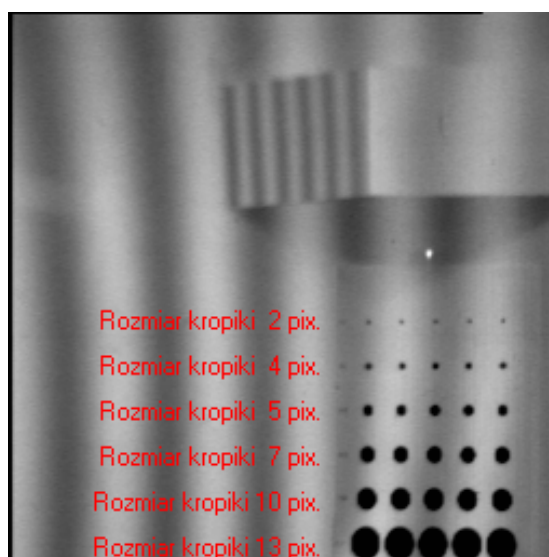
Analizując wykresy i zestawienie wyników (tab. 3) można zauważyć, że dokładność ustawienia ostrości prążków zarówno w układzie projekcyjnym, jak odbiorczym, oraz dokładne ustawienie ostrości w obu układach ma decydujący wpływ na dokładność uzyskanych wyników. Niejednokrotnie bywa tak, że faza jest obliczona, ale obarczona

jest dużym błędem (rys. 12, rys. 13). Jest to szczególnie niebezpieczne wtedy, kiedy nie są kontrolowane wyniki pomiaru, a faza jest zapisywana automatycznie do dalszego przetwarzania danych. Wpływ nieostrości prążków jest równie groźny dla dokładności obliczeń, jak niedokładność przesuwu rastra przy rejestracji czterech obrazów mory.

2.2.4. Wpływ wielkości punktów sygnalizowanych na błędy odtworzenia fazy

System mory projekcyjnej został zaprojektowany dla potrzeb diagnostyki ortopedycznej, dlatego też konieczne jest zaznaczanie pewnych punktów antropometrycznych na plecach pacjenta (Zawieska, 2003). Przeanalizowano także wpływ wielkości znaczków sygnalizowanych na powierzchni pleców na dokładność uzyskanych wyników.

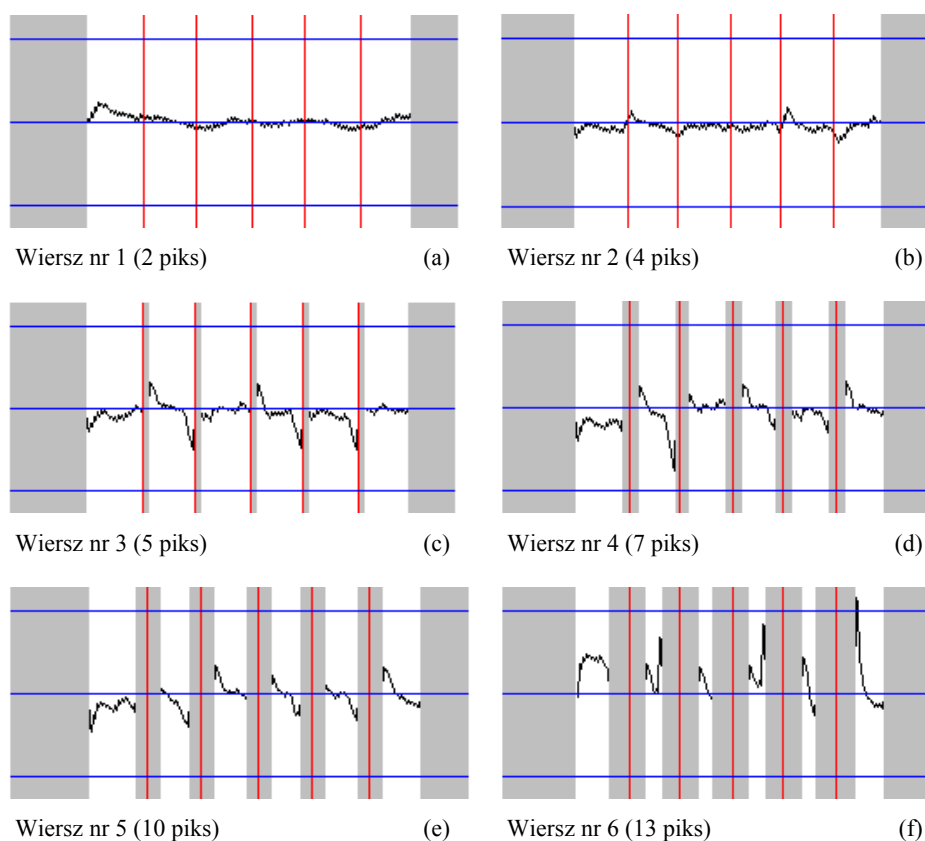
Punkty charakterystyczne ciała oznaczane są zwykle kropkami zaznaczonymi czarnym pisakiem na ciele pacjenta. W celu wyznaczenia zakłóceń wprowadzanych przez te oznaczenia przygotowano testową planszę zawierającą kropki o różnych średnicach. Eksperymenty pokazały, że decydujące znaczenie ma wielkość obrazu kropek w pikselach ekranu, niezależnie od odległości. Na rysunku 14 przedstawiono przykładowe pole wzorcowe z określonymi wymiarami punktów sygnalizowanych.



Rys. 14. Przykładowe pole wzorcowe

Rysunki 15(a)–15(f) pokazują przekroje wyznaczonej fazy na różnych poziomach, odpowiadających różnym średnicom kropek. Wyznaczona faza rysowana jest kolorem czarnym, poziome niebieskie linie określają odchylenie od płaszczyzny wzorcowej o 5 mm, pionowe czerwone linie pokazują położenie środków kropek.

Obszary zaznaczone kolorem szarym odpowiadają miejscom, w których faza nie została wyznaczona np. z powodu zbyt małego kontrastu.



Rys. 15. Przekroje poziome fazy dla różnej średnicy kropek

Z analizy tych przekrojów można wysnuć następujące wnioski (tab. 4):

- kropki o rozmiarach do 4 pikseli nie zakłócają procesu wyznaczania fazy,
- kropki nieco większe (5 pikseli) powodują powstanie „martwych pól”, ale faza jest odtworzona w miarę poprawnie,
- kropki o rozmiarze powyżej 7 zakłócają fazę nie tylko w miejscu w którym się znajdują, ale także w sąsiadujących obszarach.

Tabela 4.

Wpływ rozmiaru znaczka na odtworzenie fazy

Wiersz (na rysunku)	Rozmiar kropki [piksele]	Rozmiar kropki [mm]	Zakłócenie fazy
1	2	5.4	brak
2	4	10.8	brak
3	5	13.5	niewielkie
4	7	18.9	poważne
5	10	27.0	poważne
6	13	35.1	poważne

3. PODSUMOWANIE

Analizując przedstawione czynniki wpływające na dokładność uzyskanych wyników pomiarów systemem mory projekcyjnej można stwierdzić, że zarówno oświetlenie, kontrast oraz ostrość rzutowanych prążków ma zasadniczy wpływ na dokładność uzyskanych wyników. Z uwagi na przyjęty algorytm analizy obrazów prążkowych precyzja przesuwu siatki ma decydujący wpływ na dokładność uzyskanych wyników.

Oddzielnym problemem jest przyjęcie odpowiedniego algorytmu odwijania fazy (unwrapping) (Ghiglia, Pritt, 1998), nie analizowanym w tym artykule, a mającym również wpływ na uzyskiwane wyniki.

W niniejszym artykule zostały przeanalizowane tzw. czynniki zewnętrzne dotyczące parametrów optycznych urządzenia projekcyjno-odbiorczego mory, warunków projekcji i rejestracji obrazów mory i realizacji metody dyskretnej zmiany fazy.

BIBLIOGRAFIA

- GHIGLIA D.C., PRITT M.D. (1998): „Two-dimensional phase unwrapping”, Wiley & Sons, INC.
- ZAWIESKA D, PODLASIAK P. (2002): „System automatycznej analizy prążków mory projekcyjnej”, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 12b, str. 376–387, Warszawa.
- ZAWIESKA D. (2003): „Badanie przydatności techniki mory projekcyjnej w fotogrametrycznych pomiarach deformacji kręgosłupa”. Rozprawa doktorska PW, 2003.

THE ANALYSIS OF THE FACTORS AFFECTING PRECISION OF MEASUREMENT BY PROJECTION MOIRÉ SYSTEM

S u m m a r y

The moiré projection is a powerful tool in displaying and measuring the shape or deformation of objects in three dimensions. The presented moiré system is used in orthopedical diagnosis. On the basis of computer aided moiré fringe analysis it is possible to determine the metric values of the spinal deformities and curvatures in three planes.

The object shape information is encoded in moiré fringe, which provides the contour lines on the object. Two main approaches are accepted to obtain the information encoded the intensity tracking method and phase measuring method including temporal and spatial techniques. The phase measuring approaches proved advantages over the intensity tracking such as the reduced sensitivity to the background and contrast variations in the moiré pattern.

In this paper the following factors were analyzed: influence of illumination and contrast, inaccuracy of raster's shift, inexactness of positioning the sharpness of moiré images and size of sign signalized on the back of human body.

KEY WORDS: moiré projection, fringe pattern analysis, phase stepping method, orthopedical diagnosis

Recenzent: prof. dr hab. inż. Aleksandra Bujakiewicz, Politechnika Warszawska