

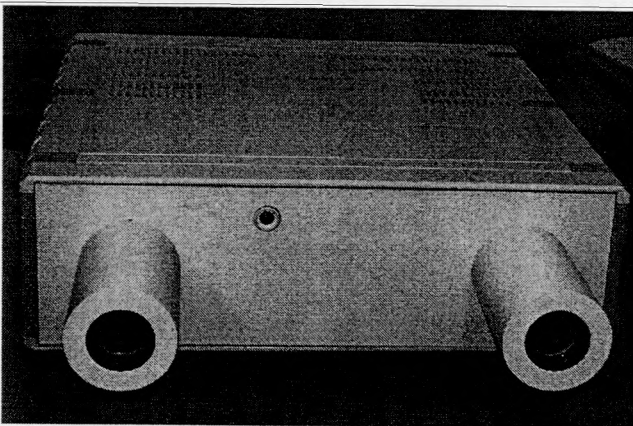
SYSTEMY AUTOMATYCZNEJ ANALIZY PRAŻKÓW MORY PROJEKCYJNEJ

Streszczenie: W referacie przedstawiono doświadczenia autorów związane z odtwarzaniem kształtu powierzchni na podstawie analizy obrazów prążków mory dla metody czterech intensywności. Do tych analiz zostało wykorzystane komputerowe stanowisko pomiarowe zaprojektowane dla potrzeb diagnostyki medycznej. Wyznaczenie błędu systematycznego systemu zrealizowano poprzez pomiar płaskiej powierzchni.

Prezentowano wybraną metodę odtworzenia informacji fazowej na podstawie zarejestrowanych obrazów mory. Analiza prążków odbywa się w dwu etapach. Pierwszy związany jest z rejestracją kilku obrazów i jego celem jest wyznaczenie fazy prążka na podstawie jego jasności. Drugi etap ma na celu pozbycie się nieciągłości fazy, czyli wyznaczenia numeru prążka („phase unwrapping”).

1. Wstęp

W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój metod optycznych wyznaczania kształtu obiektów trójwymiarowych. Związane jest to ze wzrostem takich elementów elektronicznych jak kamery CCD, szybkie modulatory, skanery, światłowody, lasery półprzewodnikowe, a także sprzętu komputerowego realizującego automatyczną analizę wyników. Wydaje się, że w obecnym stuleciu foton w znacznym stopniu zastąpi elektron przy przetwarzaniu i przesyłaniu informacji [Jóźwicki, 1994].

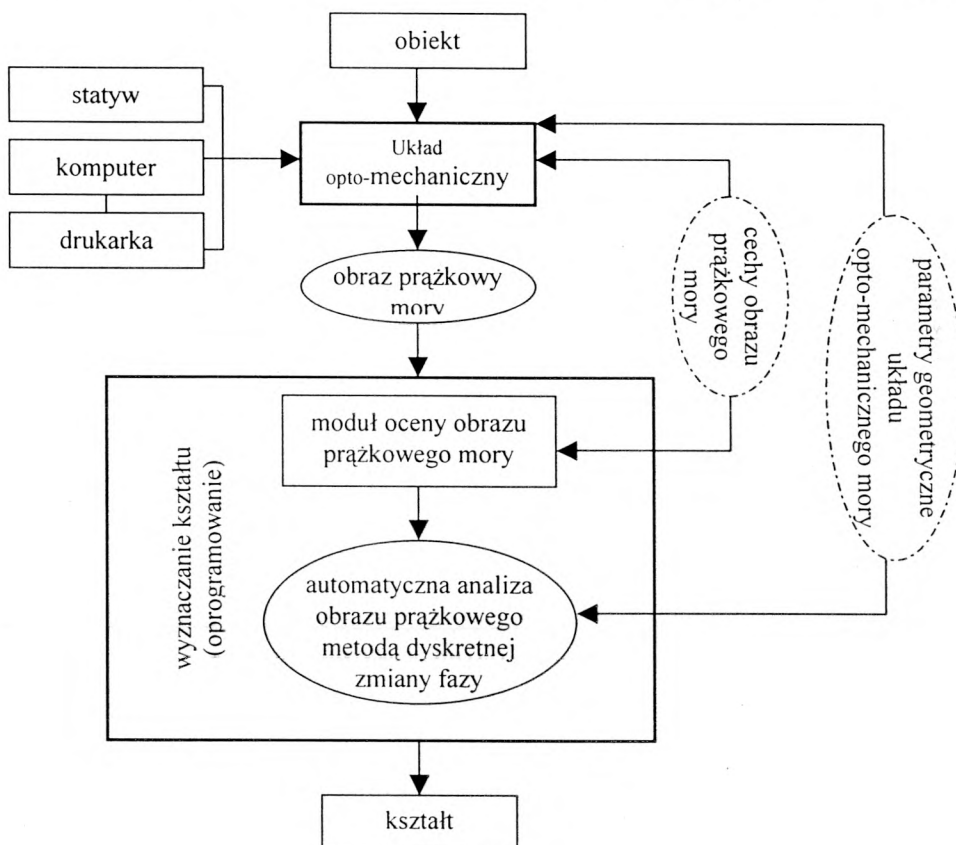


Rys.1 Widok ogólny urządzenia opto-mechanicznego systemu mory projekcyjnej

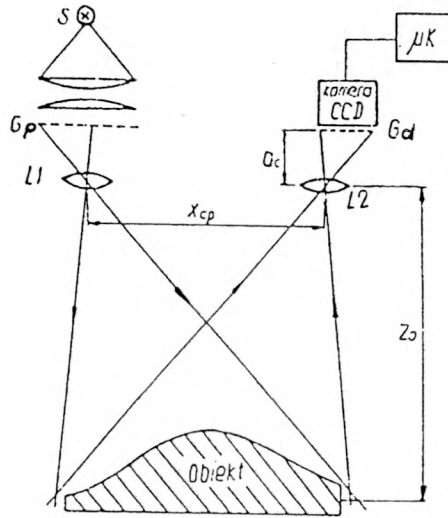
Kluczowym problemem do rozwiązania jest metoda wykorzystania specyficznych własności fotonu. Z powodzeniem realizowana telekomunikacja światłowodowa jest niczym innym, jak tylko kontynuacją idei realizowanych w elektronice, gdyż światłowód pełni rolę przewodu, a informacja przesyłana jest sekwencyjnie w czasie przez zmodulowaną wiązkę światła. Jednak falowa natura fotonu i krótka długość fali w porównaniu np. z mikrofalami pozwalają realizować, poza czasową, również modulację przestrzenną i przesłać tak zakodowaną informację w wolnej przestrzeni, lub przetwarzać przez odpowiednio skonfigurowany system optyczny (rys.1).

2. Opis stanowiska pomiarowego

System składa się z następujących elementów: urządzenia projekcyjno-odbiorczego, statywu z regulowaną wysokością, komputera typu Pentium z kartą multimedialną, drukarką laserową oraz specjalistycznego oprogramowania (rys.2).



Rys 2. Schemat blokowy systemu mory projekcyjnej



Rys.3. Schemat urządzenia projekcyjno-odbiorczego.

S–źródło światła, Gp–siatka projekcyjna, Gd–siatka odbiorcza

Parametry techniczne urządzenia (rys.3): format siatki projekcyjnej i odbiorczej 60x60 mm, częstość linii siatki 6 l/mm, bazowe rozsuniecie osi układu projekcji i analizy 350mm, źródło światła – żarówka halogenowa 150W, obiektyw projekcyjny i odbiorczy 210/4.5 o rozdzielczości 40 l/mm, format obrazu na badanym obiekcie 1000x650 mm.

Ze względu na specyfikę metody obliczeniowej (dyskretna zmiana fazy) układ odbiorczy wyposażony jest w silnik krokowy 200 kroków/obrót. Obraz rejestrowany jest czarno – biała kamerą z matrycą CCD 500x582 elementy i sygnał video analizowany jest z maksymalną rozdzielczością 512x512 (8 bitów) przy wykorzystaniu karty multimedialnej.

3. Zasada działania systemu

Podstawowym warunkiem sukcesu aplikacyjnego nowoczesnych metod optycznych jest realizacja automatycznej analizy wyników zakodowanych w obrazie prążkowym. Analiza obrazu prążkowego rozumiana jest jako technika konwersji sinusoidalnych zmian sygnału w przestrzeni w celu wyznaczenia fazy tego sygnału [Pirga, 1997]. Określenie „faza” używana jest dla oznaczenia informacji zakodowanej w obrazie prążkowym przed jej przeskalowaniem na rzeczywistą wartość. Kodowanie informacji fazowej może odbywać się w systemie koherentnym jak i niekoherentnym.

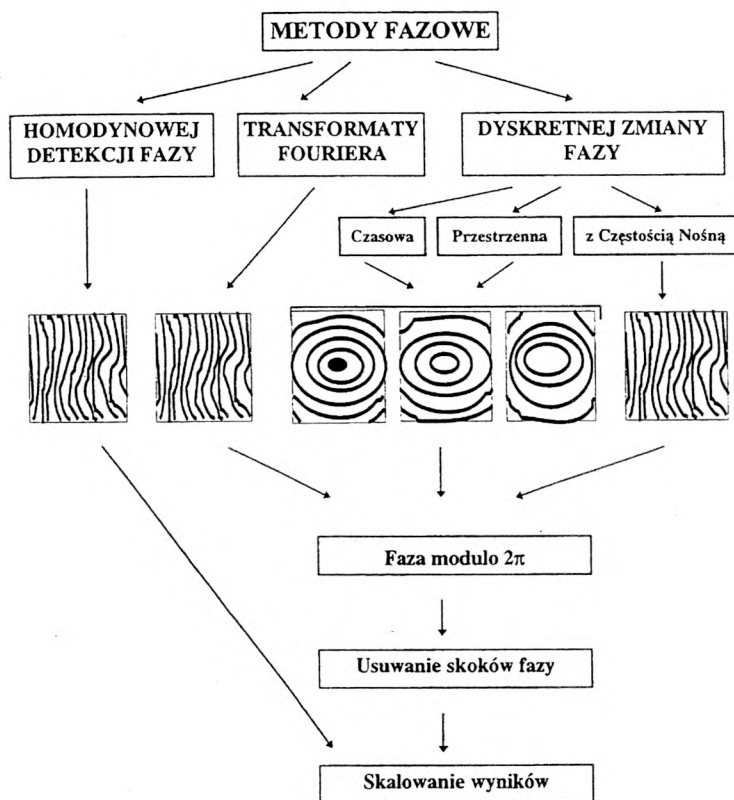
W prezentowanym systemie mory zaprojektowany jest układ odwzorowania niekoherentnego. Dekodowanie sygnału odbywa się z wykorzystaniem kamery CCD jako elementu pośredniego pomiędzy optyczną i numeryczną częścią systemu.

3.1 Wyznaczanie powierzchni metodą dyskretnej zmiany fazy

Techniki wyznaczania fazy z obrazu prążkowego można podzielić na dwie kategorie: elektroniczną i analityczną.[Jóźwicki, Kujawińska, 1996] Obecnie dzięki szybkiemu rozwojowi systemów rejestracji rozkładów intensywności, techniki analityczne częściej są stosowane niż techniki elektroniczne.

Przedstawiony system mory projekcyjnej na rys.2. prezentuje analityczną analizę obrazu prążkowego mory. Kodowanie i modyfikacja informacji fazowej realizowana jest na drodze optycznej, poprzez analizę obrazu prążkowego, a odpowiednie skalowanie wyników przeprowadzone jest numerycznie.

W procesie analizy można wydzielić cztery etapy: generowanie obrazu prążkowego, obliczenie fazy modulo (2π) , usunięcie skoków fazy i proces skalowania wyników (rys.4).



Rys.4. Schemat analitycznych metod analizy obrazów prążkowych [Patorski,1993]

Trójwymiarowe współrzędne (X, Y, Z) badanej powierzchni (rys.3) mogą być uzyskane z płaskiego obrazu prążkowego, uzyskiwanego w płaszczyźnie siatki G_d o współrzędnych x, y i względnego numeru prążka mory N_x zgodnie z równaniami:

$$Z = a_c X_{cp} / (N_o + N_z)d \quad (1.1)$$

$$X = Z_x / a_c \quad (1.2)$$

$$Y = Z_y / a_c \quad (1.3)$$

w których: d jest stałą siatek G_p i G_d ; N_o jest początkową wartością rzędu prążków związanych z odległością płaszczyzny odniesienia (projekcji) tj. płaszczyzną optycznie sprzężoną z płaszczyzną siatek: projektowanej G_p i odbiorczej G_d ; zależność pomiędzy Z_o i a_c odległością płaszczyzny obrazu od środka rzutów kamery jest opisana:

$$Z_o = a_c X_{cp} / N_o d \quad (2)$$

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_i . Rozkład intensywności w i -tym obrazie prążków mory $I(x, y)$ jest opisany wzorem:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\Phi(x, y) + \delta_i] \quad \text{gdzie} \quad i = 1, \dots, k \quad (3)$$

przy czym: $a(x, y)$, $b(x, y)$ są funkcjami tła i kontrastu; $\delta_i = i 2\pi/k$ – założone przesunięcie fazowe; $\Phi(x, y)$ – rozkład fazy.

Zmiana fazy jest realizowana przez poprzeczne przesunięcie siatki odbiorczej G_d . Jeżeli stała siatki wynosi d i siatka zostanie przesunięta o odcinek d/k , to faza w obrazie prążków mory zmieni się o $2\pi/k$.

Względny numer prążka mory wyznaczany jest z czterech obrazów: (metoda czterech intensywności)

$$N_x = \text{arctg} (I_2 - I_4) / (I_1 - I_3) \quad (4)$$

Po wyznaczeniu wartości N_x zgodnie z równaniem (4) usuwane są skoki fazy i wyznaczana jest ciągła funkcja numeru prążka N_x . Analiza kształtu wymaga wyznaczenia wysokości badanej powierzchni zgodnie z zależnością:

$$\Delta Z = Z_o - Z \quad (5)$$

Wykorzystując wzory (1.1) i (2) oraz zależność na odległość płaszczyzny obrazu od środka rzutów kamery

$$a_c = Z_o f / (Z_o - f) \quad (6)$$

w której f jest ogniskową obiektywu w gałęzi odbiorczej; równanie (5) przyjmie postać:

$$Z = [Z_0(Z_0 - f) d N_x] / [X_{cp} f + (Z_0 - f) d N_x] \quad (7)$$

Gęstość warstwicowania prążkami mory ΔZ_1 , zależy od parametrów optycznych i geometrycznych układu projekcyjno – odbiorczego (Z_0 , f , X_{cp}) oraz stałej siatek zastosowanych w układzie.

Zauważmy jednak, że funkcje trygonometryczne są funkcjami okresowymi i w związku z powyższym nie ma możliwości jednoznacznego odtworzenia wartości Z .

Można by tak dobrać parametry siatek, aby badany obiekt mieścił się w zakresie połowy pojedynczej fali (gdzie nie występuje niejednoznaczność funkcji tg) jednak dokładność takiego pomiaru byłaby niedostateczna – poziom szumów typowej kamery wynosi kilka procent, co powoduje że jest ona zdolna do rozróżnienia około 100 poziomów szarości, a więc tyle różnych wartości „ z ” można by wyznaczyć.

Aby zwiększyć dokładność przyjęto, że głębokość obiektu może obejmować więcej niż jedną długość wytworzonej fali. Pierwszy etap analizy powoduje tylko wyznaczenie wstępnej wartości Z a właściwie wartości fazy, którą należy poprawić dodając pewne stałe wartości (długości fal) [Zawieska, Podlasiak ,2000].

4. Ocena działania algorytmu obliczania powierzchni fazowej

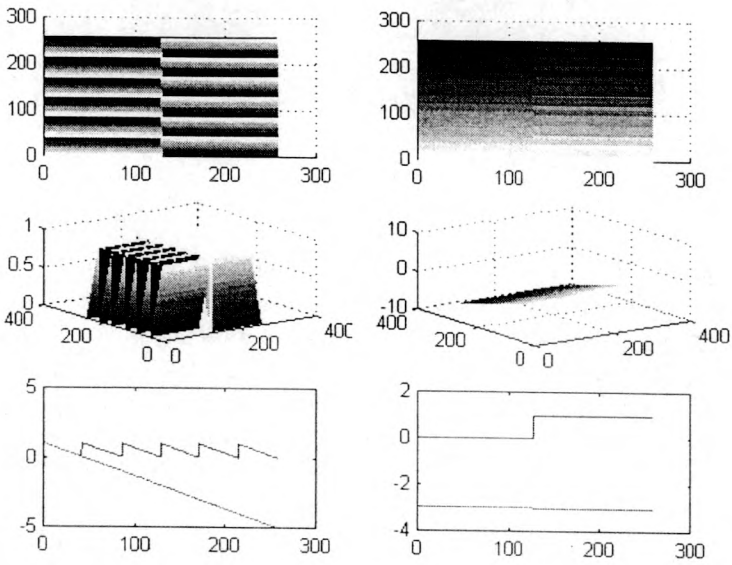
Na podstawie czterech obrazów wyznaczane są parametry fazowe. W pierwotnej formie obliczona jest powierzchnia fazowa poprzez obliczenia fazy a następnie jej odwinięcie (rozwiniecie) (ang. unwrapping) [Ghilia D.C, Pritt M.D., 1998].

Problem rozwijania powierzchni fazowej dla stosunkowo prostej powierzchni zbudowanej z dwóch przystających czworoboków ilustruje rys.5.

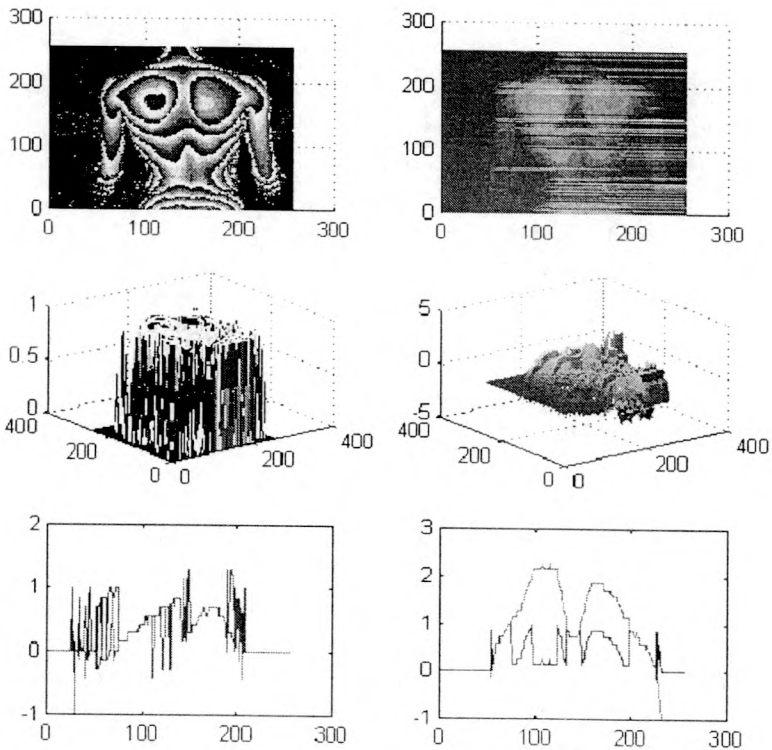
W pierwszym wierszu przedstawiono dwuwymiarową reprezentację powierzchni fazowej przed (lewy rysunek) i po (prawy rysunek) operacji rozwijania. W drugim wierszu przedstawiono analogiczne wykresy w formie trójwymiarowej. W trzecim wierszu pokazano przekroje pionowe (lewy rysunek) i poziome (prawy rysunek) powierzchni fazowej.

Jak widać wzdłuż krawędzi złożenia prostokątów występują punkty osobliwe, które zakłócają proces rozwijania powierzchni fazowej. Z tego powodu rozwinięcie powierzchni fazowej lewego prostokąta przebiega prawidłowo, zaś prawego obarczone jest błędami (obliczenia symulacyjne wykonane zostały poczynając od lewej strony powierzchni fazowej). Istnienie punktów osobliwych jest przyczyną, że postać rozwiniętej powierzchni fazowej zależy od punktu, w którym rozpoczynamy obliczenia. Gdyby obliczenia w omawianym przykładzie rozpocząć od prawej strony obrazu, prawidłowo rozwinięta zostanie powierzchnia prawego prostokąta.

W warunkach rzeczywistych pomiarów mamy do czynienia ze znacznie bardziej złożonymi postaciami powierzchni fazowych. Rozkład punktów osobliwych jest nieregularny i niemożliwy do przewidzenia.



Rys.5. Symulacja rozwijania powierzchni fazowej metodą bezpośrednią dla dwóch prostokątów.



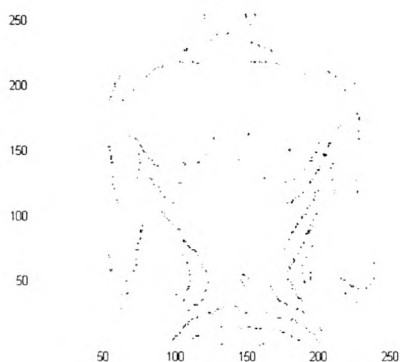
Rys.6. Rozwijanie zmierzonej powierzchni fazowej metodą bezpośrednią

Na rys.6 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń wykonanych na powierzchni fazowej uzyskanej w wyniku pomiaru przy wykorzystaniu prezentowanego stanowiska pomiarowego.

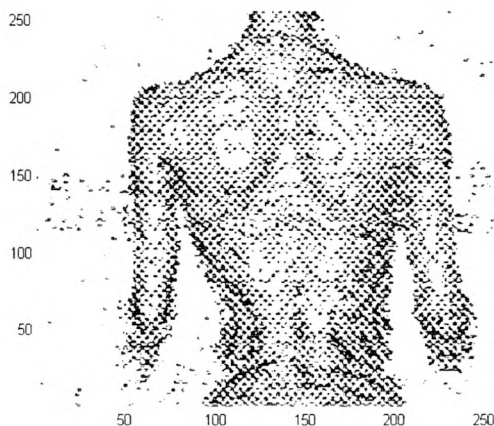
Na rys.7 i rys.8 przedstawiono wyniki obliczeń wyznaczających punkty osobliwe oraz lokalny gradient powierzchni fazowej. Rysunki wyjaśniają przyczynę nieprawidłowego rozwinięcia powierzchni fazowej metodą bezpośrednią.

Porównanie wyników obliczeń przedstawionych na rys.6 z rozkładem punktów osobliwych na rys.7 i lokalnym gradientem powierzchni fazowej na rys.8 pokazuje bezpośredni związek punktów osobliwych z błędami jej rozwijania.

Procedura rozwijania wykonywana jest wierszami poczynając od pierwszego punktu umieszczonego w lewym górnym fragmencie obrazu. Obliczenia dla każdej linii obrazu przebiegają prawidłowo do momentu napotkania na punkt osobliwy. Od tego punktu do końca linii analizowanego obrazu powierzchnia jest rozwijana nieprawidłowo. Brak punktów osobliwych na linii łopatek pozwala na prawidłowe rozwinięcie powierzchni co ilustruje prawy obraz w pierwszym wierszu na rys.6.



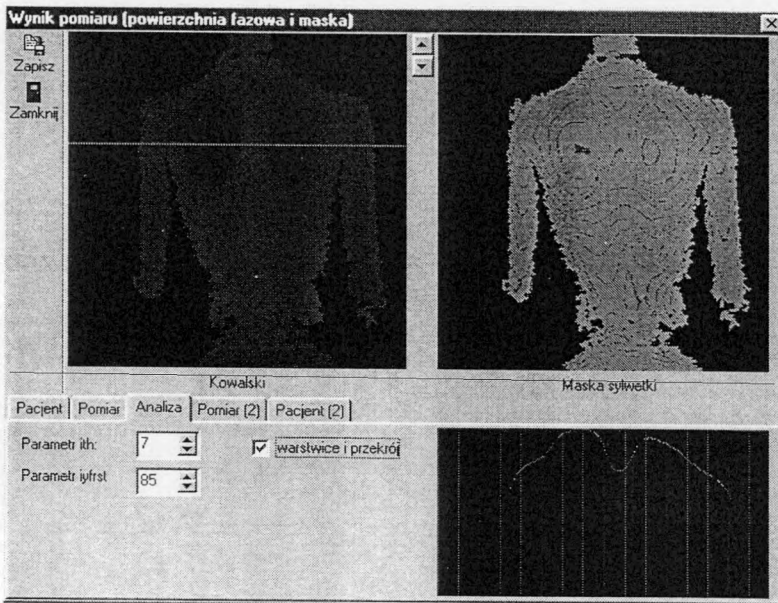
Rys.7. Punkty osobliwe powierzchni fazowej



Rys.8. Lokalny gradient powierzchni fazowej

Przedstawione przykłady pokazują, że chcąc uzyskać prawidłową postać rozwinięcia powierzchni fazowej niezbędne jest zastosowanie dodatkowych procedur obliczeniowych umożliwiających detekcję punktów osobliwych i eliminację ich wpływu na wyniki obliczeń.

W zrealizowanym oprogramowaniu zastosowano metodę „omijania” punktów osobliwych w procesie rozwijania powierzchni fazowej. Przed rozpoczęciem właściwych obliczeń obrazy poddane są operacjom filtracji cyfrowej w celu wyeliminowania szumów. Dodatkowym elementem wspomagającym uzyskanie prawidłowego obrazu jest zastosowanie tzw. maski, czyli dodatkowego obrazu ilustrującego punkty powierzchni fazowej spełniające kryteria „dopuszczenia” do obliczeń rozwijania fazy (rys.9).



Rys.9. Wyniki pomiaru analizowanej powierzchni: powierzchnia fazowa i maska

5. Ocena dokładności systemu mory projekcyjnej

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 około 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.

Kalibrację układu urządzenia wykonano testując płaską powierzchnię ustawioną prostopadle do osi optycznych układu urządzenia.

5.1 Wyniki kalibracji

W celu sprawdzenia powtarzalności wyników wykonano kilkakrotny pomiar płaskiej powierzchni, odchylając ją o pewien kąt. W tabeli 1 i 2 przedstawiono wyniki, gdzie błąd określa ile procent punktów mieści się w tej wartości, błąd średni określa wartość błędu każdego piksela na całej płaszczyźnie. Rysunki 9 i 10 prezentują wybraną prezentację graficzną wyników kalibracji.

Tabela 1

Odtworzenie płaskiej powierzchni bez uwzględnienia błędu systematycznego systemu

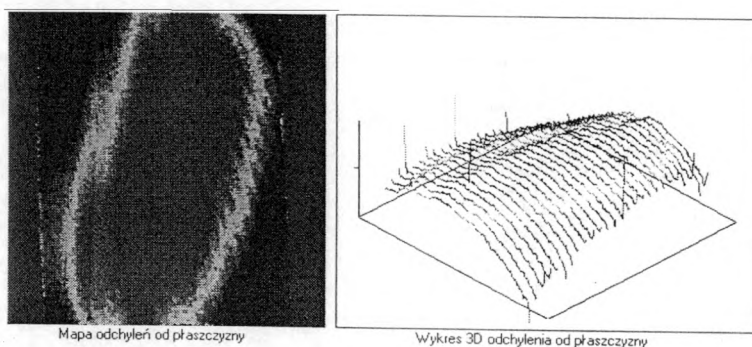
Obiekt	Odległość kalibracji [mm]	Liczba pomiarów	Błąd średni [mm]	Błąd 97 % [mm]
Powierzchnia prostopadła do osi układu	3000	5	1.15	2.8
	3500	5	2.07	4.4
	4000	2	1.30	2.6
Ukośna (kąt $\sim 38^{\circ}$)	3000			
	3500	3	1.30	2.9
	4000			
Ukośna (kąt $\sim 20^{\circ}$)	3000			
	3500	4	1.45	3.7
	4000			

Tabela 2

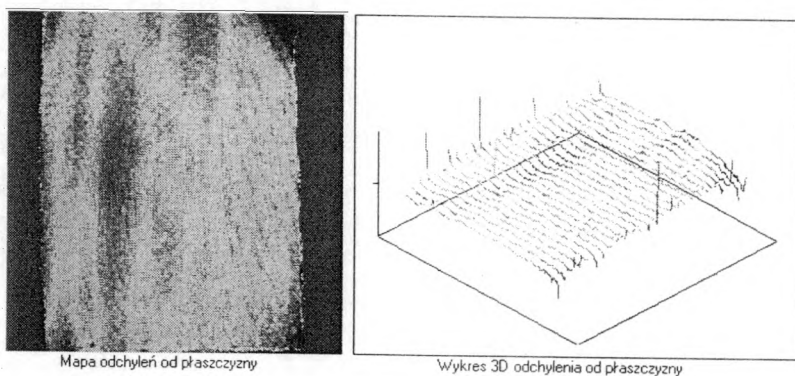
Odtworzenie płaskiej powierzchni z uwzględnieniem błędu systematycznego systemu

Obiekt	Odległość Kalibracji [mm]	Liczba pomiarów	Błąd średni [mm]	Błąd 97 % [mm]
Powierzchnia prostopadła do osi układu	3000	5	0.31	0.7
	3500	5	0.41	0.9
	4000	2	0.65	1.4
Ukośna (kąt $\sim 38^{\circ}$)	3000			
	3500	3	0.51	1.2
	4000			
Ukośna (kąt $\sim 20^{\circ}$)	3000			
	3500	4	0.59	1.2
	4000			

Paleta obrazująca odchyłki (błąd) odtworzenia płaszczyzny: kolor zielony przedstawia punkty leżące w 1/16 przedziału maksymalnego błędu.



Rys.9. Graficzna prezentacja wyników dla $l = 3000$ mm bez uwzględnienia błędu systematycznego



Rys. 10. Graficzna prezentacja wyników dla $l = 3000$ mm z uwzględnieniem błędu systematycznego

6. Wnioski

Wyniki badań testowych aparatury potwierdzają jej wysoką jakość oraz skuteczność zastosowanych metod analizy obrazów prążkowych. Uzyskane dokładności wykazały, że proponowana aparatura może być pomocna w diagnostyce ortopedycznej, rehabilitacji, oceny skutków ćwiczeń rehabilitacyjnych. Zaletą

systemu mory projekcyjnej jest nieinwazyjność metody, nieszkodliwość dla zdrowia, niewielka czasochłonność rejestracji i analizy obrazów.

Literatura:

- Ghiglia D.C, Pritt M.D., Wiley, 1998 "Two-Dimensional Phase Unwrapping"
- Jóźwicki R., Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1994 „Fotonika – przyszłość techniki informatycznej”. Prace naukowe. Konferencje z.3
- Jóźwicki R, Kujawińska M., 1996 Numeryczno – optyczne układy przetwarzania informacji fazowej .Materiały z konferencji „ Fotonika w przetwarzaniu infromacji „,Ustronie
- Patorski K., Elsevier, 1993 „Handbook of the Moire’ Fringe Technique” Science Publising, Amsterdam
- Pirga M., Praca doktorska PW,1997, „Metody pomiarów fazowych a adaptacyjnym systemie wyznaczania kształtu obiektów rozpraszających metodą projekcji rastra”.
- Zawieska D., Podlasiak P.,Kraków 2000, „ Automatyczna analiza prążków mory”. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol.10

Recenzowała: prof. dr hab. Aleksandra Bujakiewicz