

Dorota Zawieska  
Piotr Podlasiak

## AUTOMATYCZNA ANALIZA PRAŻKÓW MORY

### Streszczenie

W referacie przedstawiono doświadczenia autorów związane z odtwarzaniem kształtu powierzchni na podstawie analizy obrazów prążków mory. Do tych analiz zostało wykorzystane komputerowe stanowisko pomiarowe zaprojektowane dla potrzeb diagnostyki medycznej.

Przeanalizowano dobór parametrów systemu optycznego generującego obraz mory oraz przedstawiono także wybrane metody odtworzenie informacji o analizowanej powierzchni na podstawie zarejestrowanego obrazu.

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”). W niniejszym referacie omówiono także zjawiska pojawiające się, gdy powstający obraz prążków odbiega od teoretycznego modelu oraz próby wykorzystania analogii do obrazów radarowych SAR.

### 1. Wstęp

W referacie przedstawiono doświadczenia autorów związane z odtwarzaniem kształtu powierzchni na podstawie analizy obrazów prążków mory. Do tych analiz zostało wykorzystane komputerowe stanowisko pomiarowe zaprojektowane dla potrzeb diagnostyki medycznej.

Rutynowe badania prowadzone są oddzielnie dla każdej płaszczyzny w pozycji stojącej. W płaszczyźnie strzałkowej wyznaczane są najpierw ogólne parametry: Długość kręgosłupa, kąty nachylenia ciała i tułowia, łączne wielkości krzywizn i współczynnik kąтового zrównoważenia w płaszczyźnie. Następnie system analizuje krzywizny z punktu widzenia ich długości, głębokości, wartości kątowych i wzajemnych stosunków.

W płaszczyźnie czołowej jako pierwsze wyznaczane są również dane ogólne. Zawierają one np. kąty nachylenia ciała i tułowia w tej płaszczyźnie, oraz usytuowanie barków, łopatek. Następna analiza dotyczy samego kręgosłupa. Jeśli występuje skrzywienie boczne kręgosłupa określa jego lokalizację i kierunek wygięcia oraz oblicza się jego wartości liniowe i kątowe. Ta sama procedura dotyczy możliwych skrzywień wtórnych.

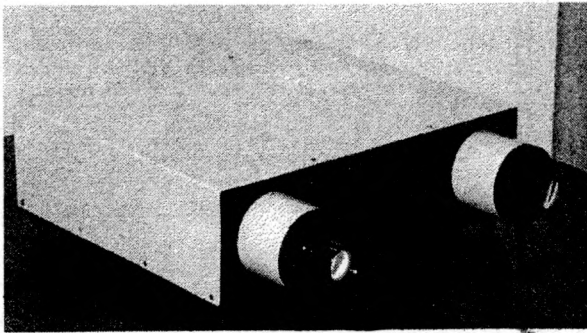
W płaszczyźnie poprzecznej analiza sylwetki jest prowadzona na określonych poziomach (dotyczy to np. szczytów poszczególnych krzywizn w płaszczyźnie strzałkowej lub szczytu skrzywienia bocznego). Badana jest symetria postawy. Umożliwia to określenie

składowej rotacji wady postawy oraz lokalizacji wielkości deformacji tułowia (np. garbu zębego)

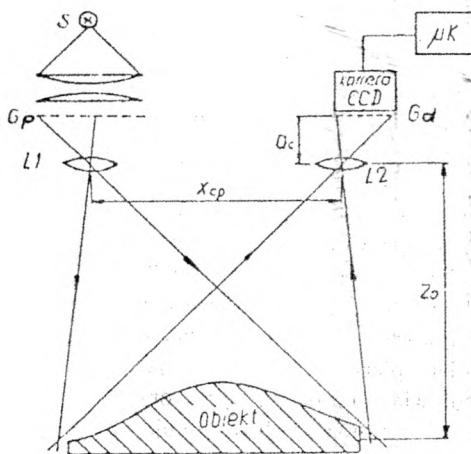
## 2. Opis stanowiska pomiarowego

Przy projektowaniu stanowiska pomiarowego dokonano optymalizacji jakości odwzorowania w optycznym układzie projekcji mory dla potrzeb diagnostyki ortopedycznej i rehabilitacyjnej [Będziński R, 1997].

System składa się z następujących elementów: urządzenia projekcyjno-odbiorczego, statywu z regulowaną wysokością, komputera typu Pentium z kartą multimedialną, drukarką laserową.



Rys. 1. Urządzenie projekcyjno – odbiorcze



Rys.2. Schemat urządzenia projekcyjno-odbiorczego. S – źródło światła, Gp – siatka projekcyjna, Gd – siatka odbiorcza.

Parametry techniczne urządzenia: 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 1000 x 650 mm.

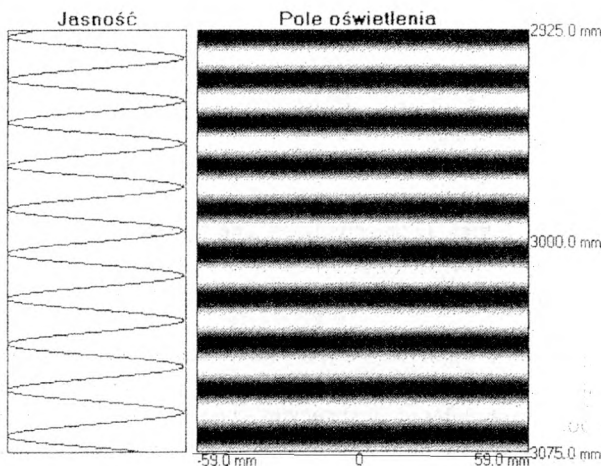
Ze względu na specyfikę metody obliczeniowej (dyskretna zmiana fazy) układ odbiorczy wyposażony jest w silnik krokowy 200 kroków/obróć. Obraz rejestrowany jest czarno – biała kamerą z matrycą CCD 500 x 582 elementy i sygnał video analizowany jest z maksymalną rozdzielczością 512 x 512 (8 bitów) przy wykorzystaniu karty multimedialnej.

### 3.Zasada działania

Typowe metody fotogrametryczne stosowane do uzyskiwania informacji o położeniu w przestrzeni 3D wymagają wykorzystania co najmniej dwu zdjęć wykonanych z różnych punktów przestrzeni. Prezentowany system wykorzystujący metodę mory pozwala na uzyskanie informacji o przestrzennym obiekcie (jakim jest ciało człowieka) na podstawie obserwacji z jednego punktu. Poniżej przedstawione będą podstawowe zasady działania urządzenia. Pojawiające się w tekście wartości liczbowe będą dotyczyły istniejącego systemu.

#### 3.1. Wyznaczanie fazy

Dla celu rozważań teoretycznych wygodniej jest przyjąć, że w obu gałęziach urządzenia są umieszczone źródła światła. Wtedy system dwu rzutników z siatkami powoduje wytworzenie pola oświetlenia w postaci jasnych i ciemnych pasów jak na rysunku nr 3. Długość wytworzonych fal nieco zależy od odległości od urządzenia - w centrum obszaru pomiarowego wynosiła ona 20 mm. Obraz ten został wygenerowany komputerowo i jest efektem przyjęcia pewnych uproszczeń ułatwiających analizę problemu. Odstępstwa od tego stanu istniejące w rzeczywistym urządzeniu będą omówione później.



Rys.3. Teoretyczny rozkład jasności.

Rozkład jasności przedstawiony jest wzorem:

$$I = I_0 + I_a \sin(C/z + \varphi_0) \quad (1)$$

gdzie:

$I$  - intensywność oświetlenia punktu;

$I_0$  - oświetlenie ogólne (otaczające);

$I_a$  - amplituda oświetlenia wytwarzanego przez urządzenie;

$C$  - stała zależna od parametrów urządzenia;

$z$  - odległość od płaszczyzny obiektywów;

$\varphi_0$  - stała zależna od wzajemnego położenia siatek.

Jeżeli w tak utworzonym „polu” umieścimy dowolny obiekt to na jego powierzchni zobaczymy jasne i ciemne pasy opowiadające warstwicom na mapie, przy czym należy pamiętać, że informacja o położeniu (głębokości) zawarta jest także między warstwicami. Znając poziom oświetlenia w danym punkcie, możemy wyznaczyć wartość wyrażenia w nawiasie, a więc także współrzędną  $z$ . W praktyce nie znamy wartości oświetlenia zewnętrznego ( $I_0$ ) ani amplitudy oświetlenia ( $I_a$ ). W celu wyznaczenia tych niewiadomych konieczne jest wykonanie trzech pomiarów jasności każdego z punktów czyli rejestracja trzech obrazów. System umożliwi sterowane przez komputer przesuwanie siatek czyli zmianę stałej  $\varphi_0$  we wzorze (1). Tak więc jeżeli zarejestrujemy trzy obrazy:

$$\begin{aligned} I_1 & \text{ dla } \varphi_0=0; \\ I_2 & \text{ dla } \varphi_0=\pi/2 \\ I_3 & \text{ dla } \varphi_0=\pi \end{aligned} \quad (2)$$

to możemy wyznaczyć

$$\begin{aligned} I_0 &= (I_1 + I_2) / 2 \\ C/z &= \text{atan}((I_1 - I_0) / (I_2 - I_0)) \end{aligned} \quad (3)$$

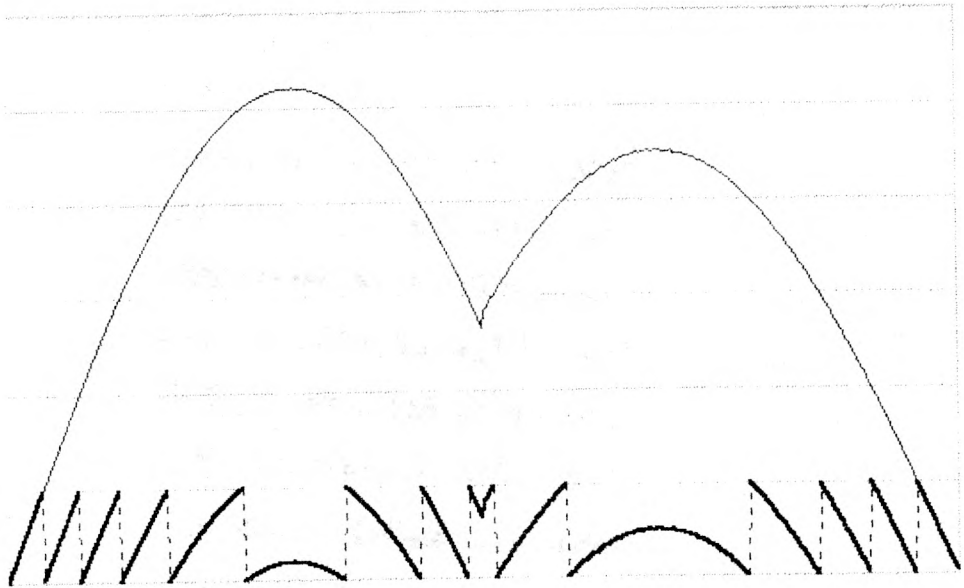
Zauważmy jednak, że funkcje trygonometryczne są funkcjami okresowymi i w związku z powyższym nie ma możliwości jednoznacznego odtworzenia wartości  $z$ . Łatwo zauważyć, że podobne wzory pojawiają się przy wykorzystywaniu obrazów radarowych SAR (z radarów o syntetycznej aperturze).

Można by tak dobrać parametry siatek, aby badany obiekt mieścił się w zakresie połowy pojedynczej fali (gdzie nie występuje niejednoznaczność funkcji  $\text{tg}$ ) 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).

### 3.2. Poprawianie fazy

Okresowość funkcji trygonometrycznych powoduje, że wyznaczona w poprzednim etapie wartość fazy mieści się w przedziale  $0-2\pi$ . Rysunek nr 4 pokazuje jaki wynik uzyskamy po zarejestrowaniu kształtu rzeczywistego - linia pogrubiona. Prawidłowy kształt jaki powinno się uzyskać jest zaznaczony cienką linią.



Rys. 4. Odtwarzanie fazy.

Jak widać, w celu uzyskania prawidłowego kształtu należy krzywą podzielić na segmenty (wykrywając miejsca dużych zmian fazy - zaznaczone na rysunku cienką przerywaną linią) i dla każdego z segmentów określić stałą wartość  $n \cdot 2\pi$  którą należy dodać do kąta  $\phi$  segmentu. Zadanie proste w wyidealizowanym przypadku staje się skomplikowanym problemem gdy pojawiają się bardziej i mniej przypadkowe zakłócenia. Wiele algorytmów (opracowanych dla celów przetwarzania obrazów SAR) przedstawiono w pracy *J.D.C. Ghilie, 1999*. W prezentowanym systemie autorzy zastosowali tu dość prosty algorytm przeglądania obrazów wzdłuż linii i porównywania z sąsiednimi liniami, opracowany w erze komputerów z procesorami 386 66 MHz.

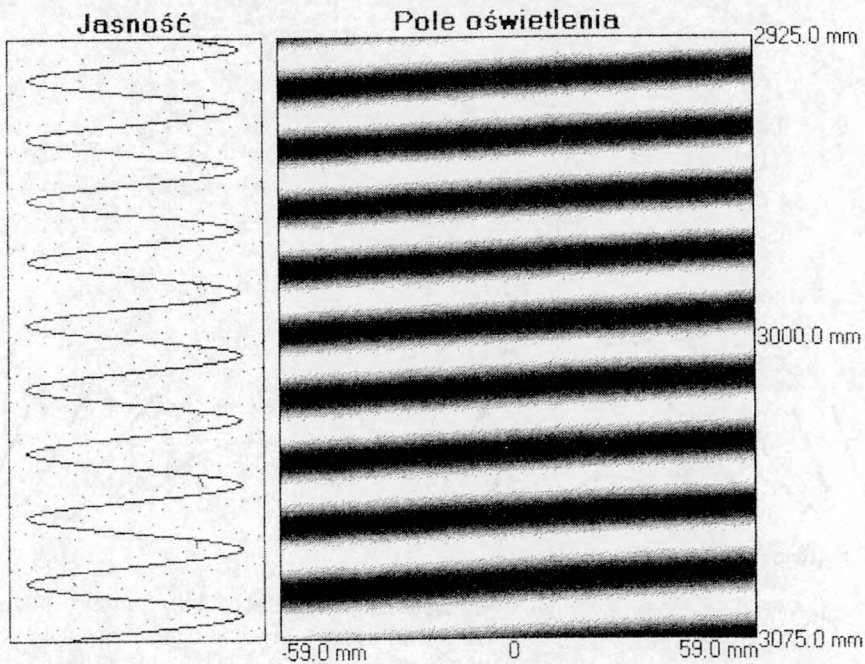
### 3.3. Szczegółowa analiza praktycznych rozwiązań

Wcześniej przedstawiono wyidealizowany obraz metody efektów działania urządzenia. W praktyce okazuje się, że po uwzględnieniu szczegółów technicznych, zagadnienie staje się

o wiele bardziej skomplikowane. Poniżej przedstawiono kilka zagadnień nie uwzględnionych we wcześniejszej analizie.

### Asymetria układu optycznego

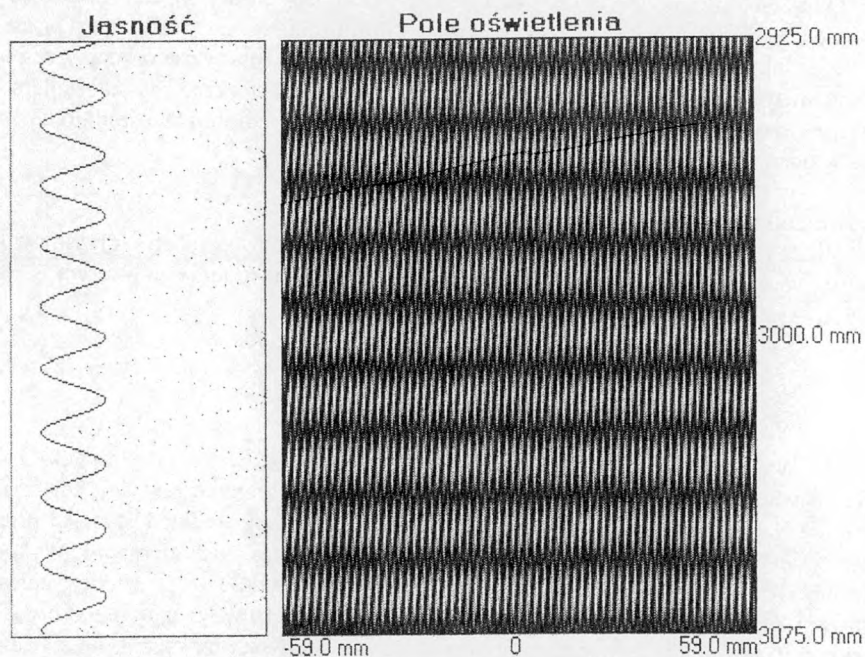
Rysunek nr 5 przedstawia układ prążków pojawiający się gdy jeden z obiektywów został przesunięty wzdłuż osi o 1 mm (przy  $ck = 200$  mm) na skutek niejednakowe ustawienie ostrości w kanałach optycznych). Jak widać układ prążków uległ skręceniu o kąt około 4 stopnie (zmiana głębokości o 6.7 mm przy przesunięciu bocznym 100 mm). Co gorsze prążki przestały być równoległe do siebie i jasność prążka jest funkcją wartości  $z$  i  $x$ . Zjawisko takie jest prawie nie do wykrycia w czasie obserwacji rzeczywistych obiektów i powoduje zniekształcenia wyników pomiaru.



Rys. 5. Rozkład jasności w przypadku asymetrii układu optycznego.

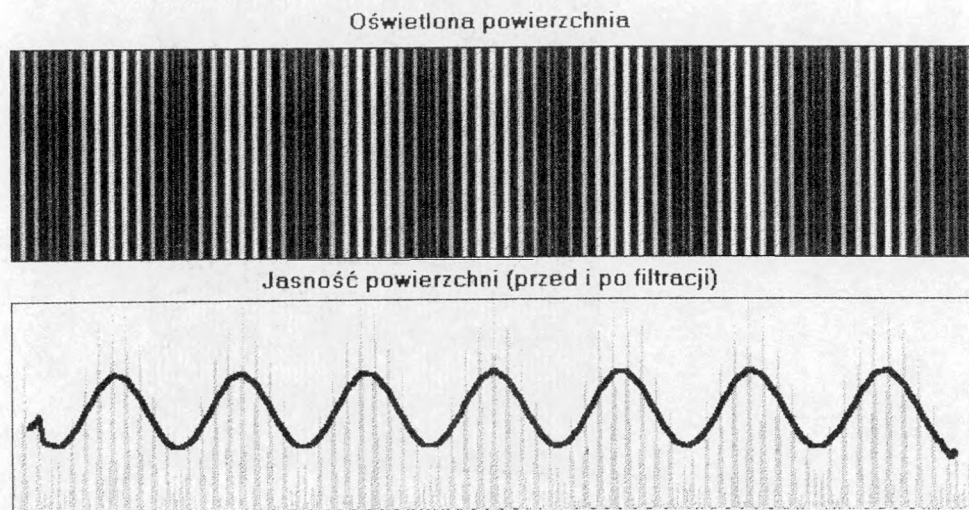
### Skończone wartości skoku siatek

W rzeczywistości siatki częściowo zasłaniają pole oświetlenia i dokładna analiza pokazuje że obraz pola oświetlenia wygląda jak na rys. 6 - na przekroju widać że teoretyczny rozkład jasności w niektórych obszarach zostaje zakłócony - pojawiają się fragment w ogóle nie oświetlone.



Rys. 6. Rzeczywisty rozkład jasności uwzględniający siatki.

Rysunek nr 7 przedstawia rozkład oświetlenia na powierzchni nachylonej do osi układu optycznego. Widać że na wzorcowy przebieg sinusoidalny nałożony jest przebieg o wyższej częstotliwości wynikający z istnienia siatek.



Rys. 7. Rozkład jasności na powierzchni obiektu siatka sin (gruba linia - sygnał po filtracji)

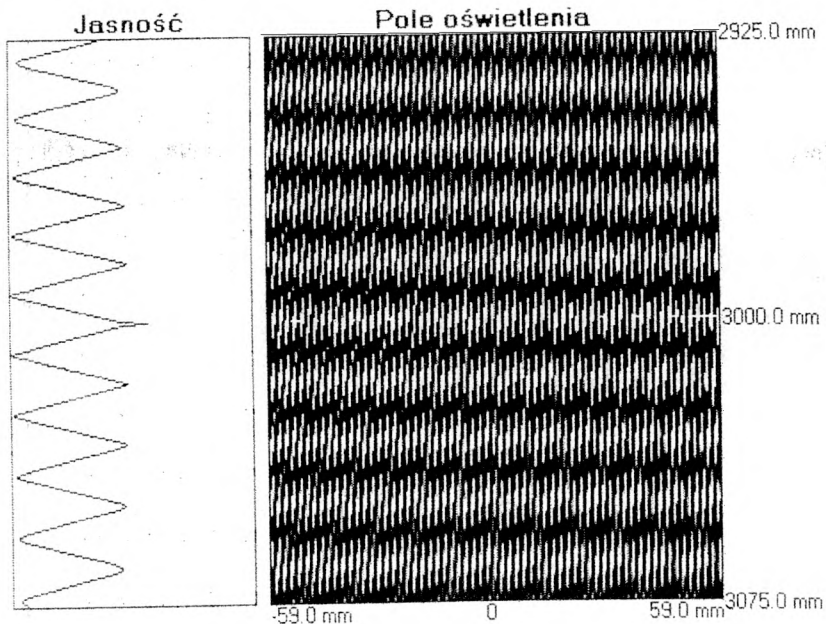
Odpowiednie metody obliczeniowe muszą dokonać filtracji w celu usunięcia sygnału o wysokich częstotliwościach. Część takiego filtrowania wykonywana jest przez układy optyczne i elektroniczne kamer (skończona rozdzielczość i pasmo przenoszenia), resztę należy wykonać metodami matematycznymi, po rejestracji obrazu i przed wyznaczeniem fazy na podstawie wzorów (3). Niestety, jak widać na rys. 6 i 7 amplituda uśrednionej sinusoidy maleje w porównaniu do krzywej teoretycznej.

### Skokowa zmiana gęstości optycznej

We wszystkich przedstawionych wcześniej rozważaniach przyjmowano dla uproszczenia obliczeń, że gęstość optyczna siatek zmienia się zgodnie ze wzorem:

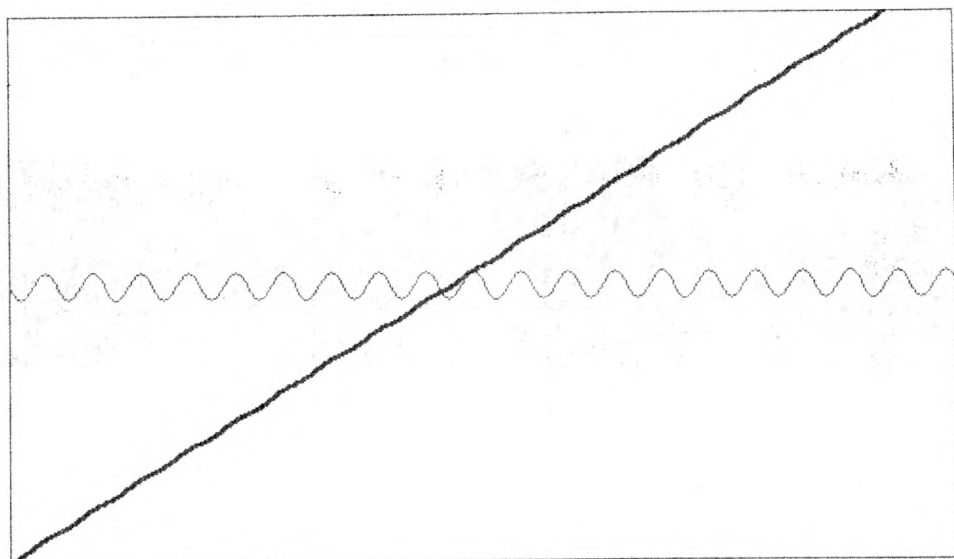
$$t = (\sin(a)+1)/2 \quad (4)$$

Ze względów technicznych nie ma możliwości wykonania siatek o płynnie zmieniających się gęstościach. Stosuje się siatki 0/1 o ostrej zmianie gęstości. Dla takich siatek otrzymujemy obraz jak na rysunku nr 8. Widać że uśredniony rozkład jasności przestał być sinusoidą i stał się krzywą piłokształtną (długość fali pozostaje niezmienną). Wykorzystanie wzorów (3) do odtworzenia fazy z przebiegu piłokształtnego powoduje nałożenie na odtwarzany przebieg błędu systematycznego. Przykładowy charakter tego błędu przedstawiony jest na rys. 9, gdzie linia cienka przedstawia poprawnie odtworzony kształt, linia gruba błędnie wyznaczony kształt na podstawie przebiegu piłokształtnego.



Rys. 8 Rzeczywisty rozkład jasności uwzględniający siatki o skokowej (0/1) zmianie jasności.

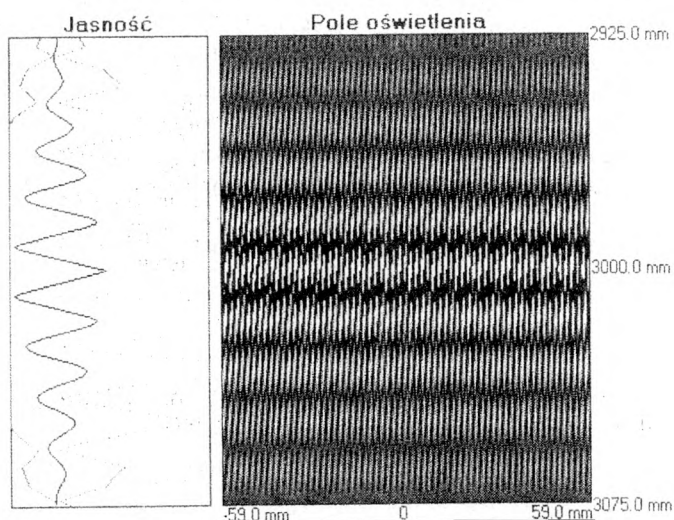




Rys. 9. Błąd odtworzenia kształtu związany ze siatką o skokowej zmianie jasności.  
(linia pogrubiona przedstawia odtworzony kształt, cienka powiększony 10-krotnie błąd)

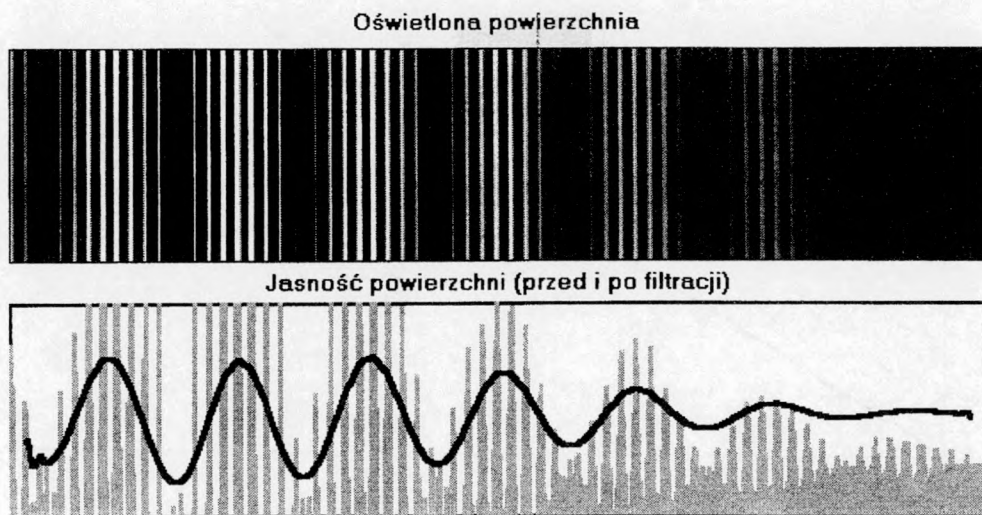
#### Skończona głębia ostrości

Rzeczywiste obiektywy mają określoną głębię ostrości, w której prążki są poprawnie odtwarzane. Rysunek nr 10 przedstawia taką sytuację, gdy w symulacji komputerowej uwzględniono fakt skończonej średnicy obiektywu.



Rys. 10. Rzeczywisty rozkład jasności przy małej głębi ostrości (siatki 0/1).

Jak można zaobserwować, pojawiły się niespodziewane efekty - z jednej strony w obszarze nieostrości zmalała amplituda przebiegu, ale jednocześnie kształt przebiegu zbliżył się do sinusoidy. Rysunek 11 pokazuje że odpowiednie filtrowanie sygnału powoduje, że jego kształt zbliża się do sinusoidy.



Rys. 11. Rozkład jasności na powierzchni obiektu: siatka 0/1, ograniczona głębia ostrości (gruba linia - sygnał po filtracji)

#### 4. Wnioski

Przedstawione rozwiązanie umożliwi automatyczną, szybką i precyzyjną analizę wad postawy. Wyniki badań testowych aparatury potwierdzają jej wysoką jakość oraz skuteczność zastosowanych metod analizy obrazów prążkowych. Proponowana aparatura może być pomocna w diagnostyce ortopedycznej, rehabilitacji, oceny skutków ćwiczeń rehabilitacyjnych. Zaletą komputerowego systemu badania wad postawy jest nieinwazyjność metody, nieszkodliwość dla zdrowia, niewielka czasochłonność rejestracji i analizy obrazów. Wieloletnia eksploatacja około dziesięciu urządzeń pozwala na stwierdzenie iż system spełnia swe zadanie. Z pomocą systemu eksploatowanego na warszawskim Mokotowie przebadano kilkanaście tysięcy dzieci ze szkół podstawowych. Wyniki badań przesiewowych były podstawą do skierowania na ćwiczenia korekcyjne i gimnastykę.

#### Literatura

1. Będziński R., 1997, *Biomechanika inżynierska*. Ofic. Wyd. Politechniki Wrocławskiej,
2. Ghiglia D.C., Pritt M.D., *Two-Dimensional Phase Unwrapping*., Wiley, 1998

Recenzowała: dr inż. Regina Tokarczyk