

Józef Jachimski  
Sławomir Mikrut

## **PRÓBA SUBPIKSELOWEJ LOKALIZACJI LINII KONTUROWYCH Z WYKORZYSTANIEM DRUGIEJ POCHODNEJ OBRAZU CYFROWEGO**

### **Wstęp**

Człowiek postrzega otaczający go świat z wykorzystaniem zmysłu wzroku. Obraz utworzony na siatkówce oka pada na czopki i pręciki, które są naturalnymi sensorami, mierzącymi natężenie światła w przedziałach swojej barwoczułości. Rozdzielczość postrzeganych w ten sposób obrazów pikselowych uwarunkowana jest gęstością rozmieszczenia i wymiarami naturalnych sensorów w oku ludzkim. Znane jest pojęcie dokładności widzenia. Dokładność widzenia monokularnego pierwszego rzędu odnosi się do możliwości rozróżnienia dwóch blisko siebie położonych punktów, które widzimy oddzielnie gdy rejestrowane są przez pobudzenie dwu sensorów rozdzielonych jednym nie pobudzonym sensorem. Dokładność widzenia monokularnego drugiego rzędu dotyczy możliwości postrzegania obrazów obiektów wydłużonych, o szerokości znacznie mniejszej niż wymiar pojedynczego sensora. Wiemy z doświadczenia, że kontrastowy obraz włosa, który jest postrzegany przez pobudzenie ciągu sąsiadujących ze sobą sensorów, jest postrzegany pomimo swej niezwykłej cienkości. Dzieje się tak dla tego, że fizjologiczny analizator obrazów łączy informacje punktowe w logiczny ciąg interpretowany jako obraz obiektu wydłużonego.

Podobną logikę analizy można zastosować w odniesieniu do linii rejestrowanych na obrazach cyfrowych. Można automatycznie wyszukiwać i określać położenie linii zarejestrowanych na kontrastowym tle, lub linii konturowych, rozgraniczających powierzchnie obrazu różniące się jasnością (lub barwą).

Doświadczenia prowadzone od lat w różnych ośrodkach naukowych doprowadziły w pierwszej fazie rozwoju do powstania algorytmów opartych o analizę zmian jasności pikseli wzdłuż przekrojów obrazu cyfrowego [*Streilein, 1991; Jachimski, Trocha, 1992*]. Analiza obrazu prowadzona w szeregu sąsiadujących ze sobą przekrojach pozwala na subpikselowe zlokalizowanie punktów, w których badany kontur przecinany jest osiami przekrojów. Punkty te aproksymowane są następnie matematycznym równaniem krzywej, która wpasowywana jest z zachowaniem reguł najmniejszej sumy kwadratów odchyłek. Położenie takiej krzywej aproksymującej kontur obrazu cyfrowego określane jest z dokładnością subpikselową. Badania testowe polegające na lokalizacji krzyży na obrazie testu rejestrowanym kamerą CCD, które przeprowadzono w laboratorium Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH, wykazały dokładność lokalizacji rzędu jednej dziesiątej do jednej dwudziestej średnicy piksela analizowanego obrazu [*Jachimski, Trocha 1992; Trocha 1993*], co w owym czasie stanowiło bardzo dobry wynik.

Z czasem powstała możliwość osiągania lepszych dokładności z wykorzystaniem drugiej pochodnej obrazu cyfrowego, czyli z wykorzystaniem obrazów przefiltrowanych z użyciem operatora Laplace'a.

### **Definicja drugiej pochodnej obrazu cyfrowego**

Przekrój obrazu cyfrowego jest krzywą obrazującą wielkość jasności pikseli sąsiadujących ze sobą wzdłuż wybranego kierunku.

W miejscu, w którym oś przekroju przecina krzywą konturu rozgraniczającego na obrazie cyfrowym dwie powierzchnie o różnej jasności, występuje punkt przegięcia krzywej przekrojowej (rys. 1). W punkcie przegięcia wartość drugiej pochodnej funkcji zmienia znak, a zatem równa jest zero.

**Rys.1: Krzywa przekroju mikrodensytometrycznego obrazu cyfrowego (a), oraz krzywe odpowiadające pierwszej (b) i drugiej pochodnej (c) krzywej przekrojowej. W miejscu, w którym oś przekroju przecina krzywą konturu rozgraniczającego na obrazie cyfrowym dwie powierzchnie o różnej jasności, występuje punkt przegięcia krzywej przekrojowej. W punkcie przegięcia wartość drugiej pochodnej funkcji zmienia znak, a zatem równa jest zero.**

Lokalizację krzywych konturowych na obrazie cyfrowym można zatem sprowadzić do wyszukiwania miejsc zerowych, w których zmienia ona znak. Interpolacja takich miejsc prowadzona może być pomiędzy sąsiadującymi pikselami obrazu cyfrowego będącego drugą pochodną obrazu oryginalnego.

Ponieważ obraz cyfrowy podaje wartości krzywej przekrojowej w sposób skwantowany, w regularnych odstępach (piksele), więc pierwszą pochodną obrazu wzdłuż wiersza lub kolumny pikseli można zdefiniować jako macierz przedstawiającą przyrosty

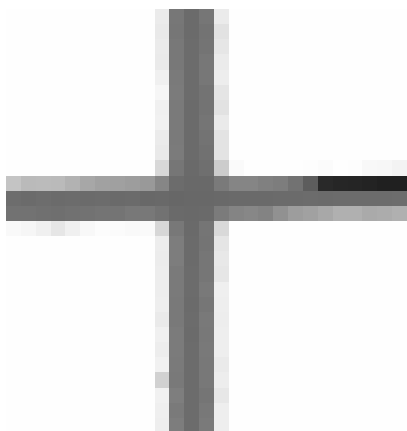
jasności sąsiadujących ze sobą pikseli (np. jasność rozpatrywanego piksela minus jasność poprzedniego). Drugą pochodną otrzymać można w podobny sposób z macierzy przedstawiającej pierwszą pochodną. Dodając do siebie dwie macierze przedstawiające drugą pochodną obrazu cyfrowego liczoną wzdłuż wierszy i wzdłuż kolumn, otrzymuje się macierz, którą nazywamy drugą pochodną obrazu cyfrowego [Kraus 1993].

Drugą pochodną obrazu cyfrowego otrzymuje się filtrując obraz oryginalny operatorem filtrującym Laplace'a, który ma postać :

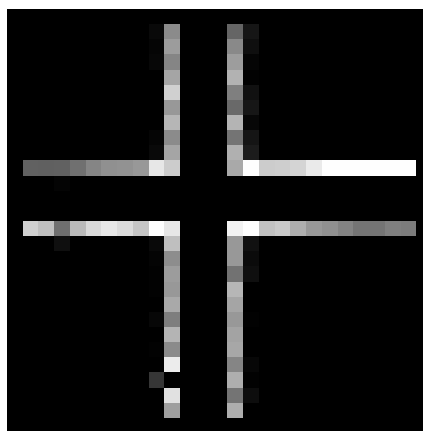
0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Na rysunku 2 pokazano wizualizację prostej linii konturowej zarejestrowanej na obrazie cyfrowym, oraz wizualizację drugiej pochodnej tego obrazu. W braku możliwości użycia kolorów, obszary wartości dodatniej i ujemnej drugiej pochodnej trudno jest rozróżnić w niniejszej publikacji (dodatkowo je oznaczono), natomiast dobrze widoczna jest linia konturu. Na rys.3 pokazano macierze obrazowe, których wizualizację podaje rys.2. Łatwo zauważyć zakreślone na rys 3b szeregi sąsiadujących ze sobą pikseli dodatnich i ujemnych, pomiędzy którymi należy przeprowadzić interpolację punktów zerowania się drugiej pochodnej. Znaczny skok wartości drugiej pochodnej w tych miejscach gwarantuje dużą, subpikselową dokładność interpolacji, a co za tym idzie, dużą dokładność lokalizacji linii konturowych na obrazie cyfrowym.

a)



b)



**Rys.2.** Wizualizacja prostej linii konturowej zarejestrowanej na obrazie cyfrowym (a), oraz wizualizacja drugiej pochodnej tego obrazu (b).

a)

252	250	251	216	121	107
255	255	255	238	126	108
255	255	255	237	126	108
255	255	255	238	123	109
255	255	255	238	123	109
255	255	255	239	122	108
255	255	255	235	122	109
255	255	255	241	124	108
255	255	255	238	124	109
255	255	255	242	123	109
255	255	255	210	122	109
255	255	255	242	127	109
255	255	255	240	123	109

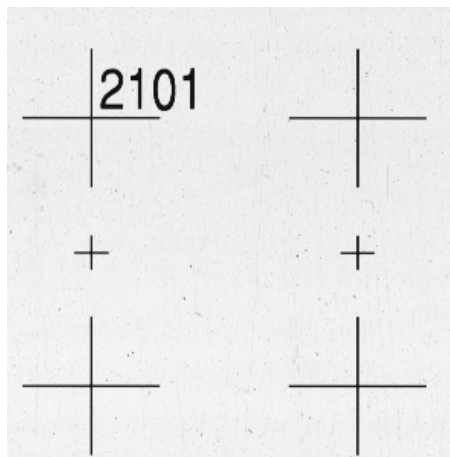
b)

-58	-67	-59	-69	-35	-11
-126	-129	-112	-108	-90	-18
139	133	121	162	139	-72
2	3	5	21	118	-89
0	0	0	18	91	-90
0	0	0	17	99	-104
0	0	0	17	97	-100
0	0	0	16	106	-104
0	0	0	20	83	-102
0	0	0	14	112	-99
0	0	0	17	90	-98
0	0	0	13	142	-105
0	0	0	45	-21	-81

Rys.3: Fragment macierzy obrazowej obrazu oryginalnego (a), na którym zarejestrowano linie konturową zwizualizowaną na rys. 2a, oraz fragment macierzy obrazowej drugiej pochodnej tego obrazu, która zwizualizowana jest na rys 2b.

### Testowa ocena dokładności lokalizacji obrazów punktów siatki reseau na macierzy drugiej pochodnej obrazu cyfrowego

Ocenę dokładności automatycznego lokalizowania linii konturowych przeprowadzono na obrazie siatki reseau (rys. 4). Płytkę z naniesioną siatką kilkakrotnie zeskanowano skanerem fotogrametrycznym Zeiss-Intergraph przy różnych, skreślonych względem siebie ułożeniach płytki w skanerze. Każdy z analizowanych krzyży zlokalizowano w ten sposób, że zarówno dla poziomego jaki dla pionowego ramienia krzyża określono po dwie krawędzie linii wyznaczających krzyż. Punkt przecięcia linii symetrycznych pionowych i poziomych krawędzi ramion krzyża uznano za poszukiwany środek krzyża.



Rys.4: Fragment obrazu cyfrowego siatki reseau wykorzystywanej w badaniach testowych

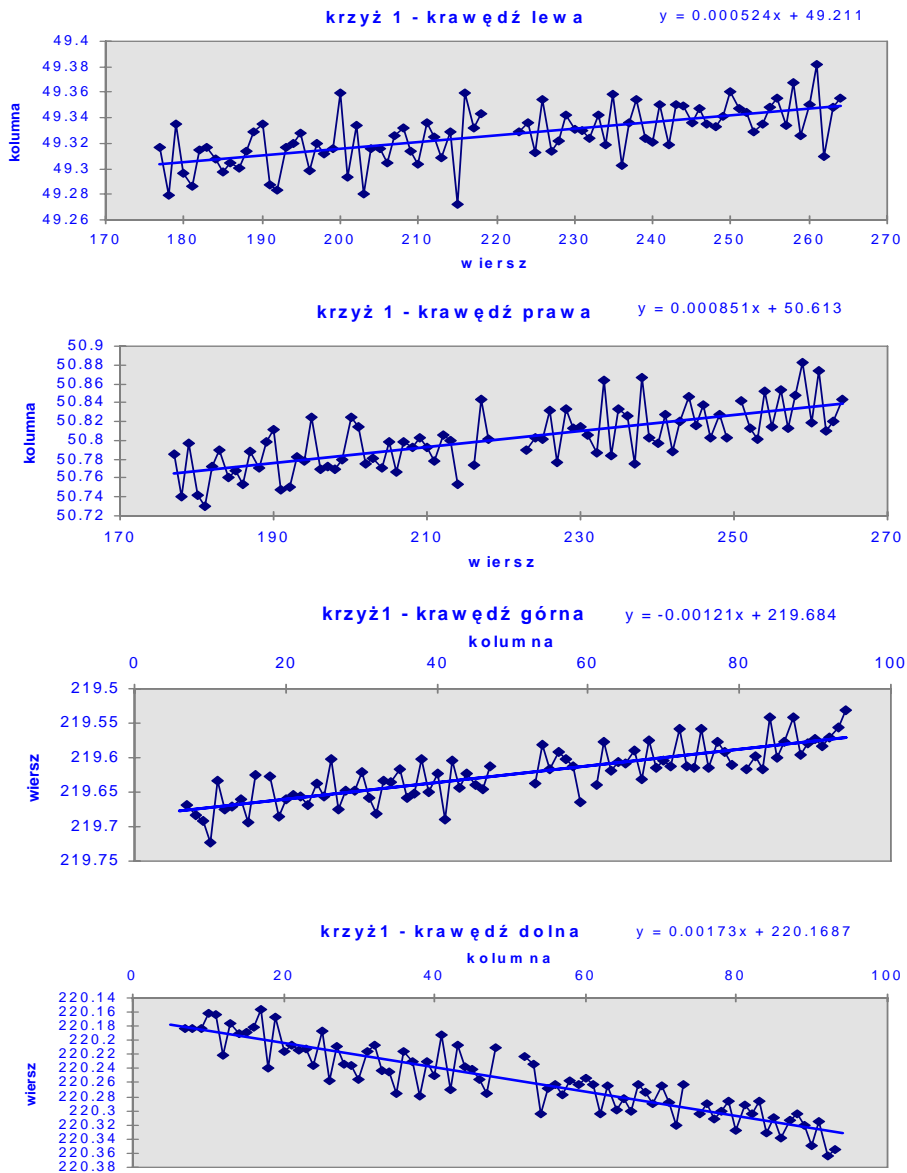
Na rys. 5 pokazano usytuowanie punktów wyinterpolowanych w przecięciu osi przekrojów mikrodensytometrycznych z krawędziami (liniami konturowymi) ramion obrazu przykładowego krzyża. Dzięki znacznej długości ramion krzyża, obrazowanych około 100 pikselami w poziomie lub w pionie, linie proste aproksymujące krawędzie ramion są określone z dużą pewnością. Konieczność wstępnej eliminacji pojedynczych punktów znacznie odbiegających od przebiegu krawędzi w niewielkim tylko stopniu zmniejszała cały aproksymowany zbiór punktów i była zaniebdywalna ze statystycznego punktu widzenia.

Badania wykonano przy rozdzielczości skanowania równej  $54\mu\text{m}$  (ok.470 dpi). Wyniki lokalizacji krzyży na testach skanowanych przy różnych ułożeniach płytki reseau w skanerze porównano pomiędzy sobą poprzez transformację wszystkich krzyży określonych w jednym położeniu płytki, na wszystkie krzyże określone innym, wybranym położeniu płytki, które uznano za wyjściowe. Wyniki wszystkich transformacji uśredniono, i tak uzyskane współrzędne uznano za wzorcowe. Porównanie wyników lokalizacji środków krzyży na obrazach cyfrowych pozyskanych przy różnych ułożeniach płytki reseau w skanerze podaje tabela 1.

Odchyłki na krzyżach	
$V_x$	$V_y$
trans. 1 ( krzyż 1 na 3 )	
0.020	0.012
-0.032	0.007
0.013	-0.020
trans. 2 (krzyż 1 na 2 )	
0.028	0.017
-0.046	0.011
0.017	-0.028
trans. 3 (krzyż 2 na 3 )	
-0.005	-0.002
0.014	-0.002
0.001	-0.006
-0.009	0.011
wszystkie wartości w pikselach	

**Tabela 1: Zestawienie odchyłek automatycznej lokalizacji środków krzyży na obrazach cyfrowych siatki reseau pozyskanych przy różnych ułożeniach płytki reseau w skanerze.**

Uzyskane dokładności lokalizacji środków krzyży w testowych warunkach laboratoryjnych, które mieszczą się w granicach około 1/50 piksela, świadczą zarówno o bardzo dużej precyzji użytego skanera, jak i o tym, że precyzja obrazów cyfrowych znacznie przewyższa ich rozdzielczość, określoną wymiarami pikseli.



Rys.5. Zbiory punktów wyinterpolowanych z subpikselową dokładnością w przecięciu osi poszczególnych przekrojów z krawędziami (liniami konturowymi) ramion obrazu przykładowego krzyża. Pokazano również linie proste aproksymujące punkty położone na krawędziach obrazów ramion krzyża. Ta aproksymacja jest drugim krokiem obliczeniowym zwiększającym pewność lokalizacji środka krzyża w układzie współrzędnych pikselowych.

## Wnioski

Testowe badania laboratoryjne potwierdziły wysoką dokładność lokalizacji linii konturowych na podstawie drugiej pochodnej obrazu cyfrowego. Dokładność ta sięga 1/50 wymiaru piksela.

Przeprowadzenia wymagają doświadczenia z lokalizacją linii konturowych na obrazach rzeczywistych obiektów i urządzeń.

Można przewidywać, że analizowana metoda pozwoli wykorzystywać do precyzyjnych prac pomiarowych również obrazy cyfrowe o małej rozdzielczości, m.in. obrazy pozyskane kamerami cyfrowymi CCD. Ważnym zastosowaniem metody może być też subpikselowa lokalizacja punktów przejściowych bloku terratriangulacji, zdefiniowanych w przecięciach prosiytych linii konturowych na fasadach budowli.

## Literatura

1. Streilein A., Bayer H.A., 1991, *Development of a digital system for architectural photogrammetry*, Materiały XVI Sympozjum International Committee for Architectural Photogrammetry, 2-5 October 1991, Delphi, Grecja;
2. Jachimski J., Trocha W., 1992, *Determination of the position of crosses with the subpixel accuracy on the image taken with the CCD camera*, International Archives of Photogrammetry and remote Sensing, vol.17-B5, s.391, Washington;
3. Kraus K., 1993, *Photogrammetry*, Dummler, Bonn;
4. Trocha W., 1993, *Automatyzacja pomiaru wzorców reseau na zdjęciach fotogrametrycznych z wykorzystaniem kamery CCD i autografu analitycznego*, Maszynopis rozprawy doktorskiej, Biblioteka AGH, Kraków;
5. Streilein A., 1996, *Utilisation of CAD models for the object oriented measurement of industrial and architectural objects*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.31-B5, s. 548, Wiedeń.

Recenzował: dr inż. Krystian Pyka

