



**Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej**



**Piotr M. Szczypiński**

**Modele deformowalne  
do ilościowej analizy  
i rozpoznawania obiektów  
w obrazach cyfrowych**

**Promotor: prof. dr hab. Andrzej Materka**

# Cel pracy

- Opracowanie efektywnych metod analizy obrazów z wykorzystaniem deformowalnych modeli,
- Porównanie tradycyjnych metod analizy obrazów i metod wykorzystujących deformowalne modele.

# Tezy pracy

- Modele deformowalne pozwalają na prawidłowe rozpoznawanie obiektów zniekształconych oraz na określanie stopnia tego zniekształcenia,
- Modele deformowalne stosowane do śledzenia poruszających się obiektów przedstawionych w sekwencji obrazów cyfrowych pozwalają na określanie ich położenia, orientacji i odległości od obserwatora,
- Rozpoznawanie i określanie położenia obiektów w obrazie cyfrowym za pomocą modeli deformowalnych, przy użyciu procesorów sekwencyjnych wymaga krótszego czasu przetwarzania w porównaniu do metod tradycyjnych.

# Metody badawcze

- Analiza matematyczna,
- Symulacja komputerowa,
- Weryfikacja eksperymentalna.

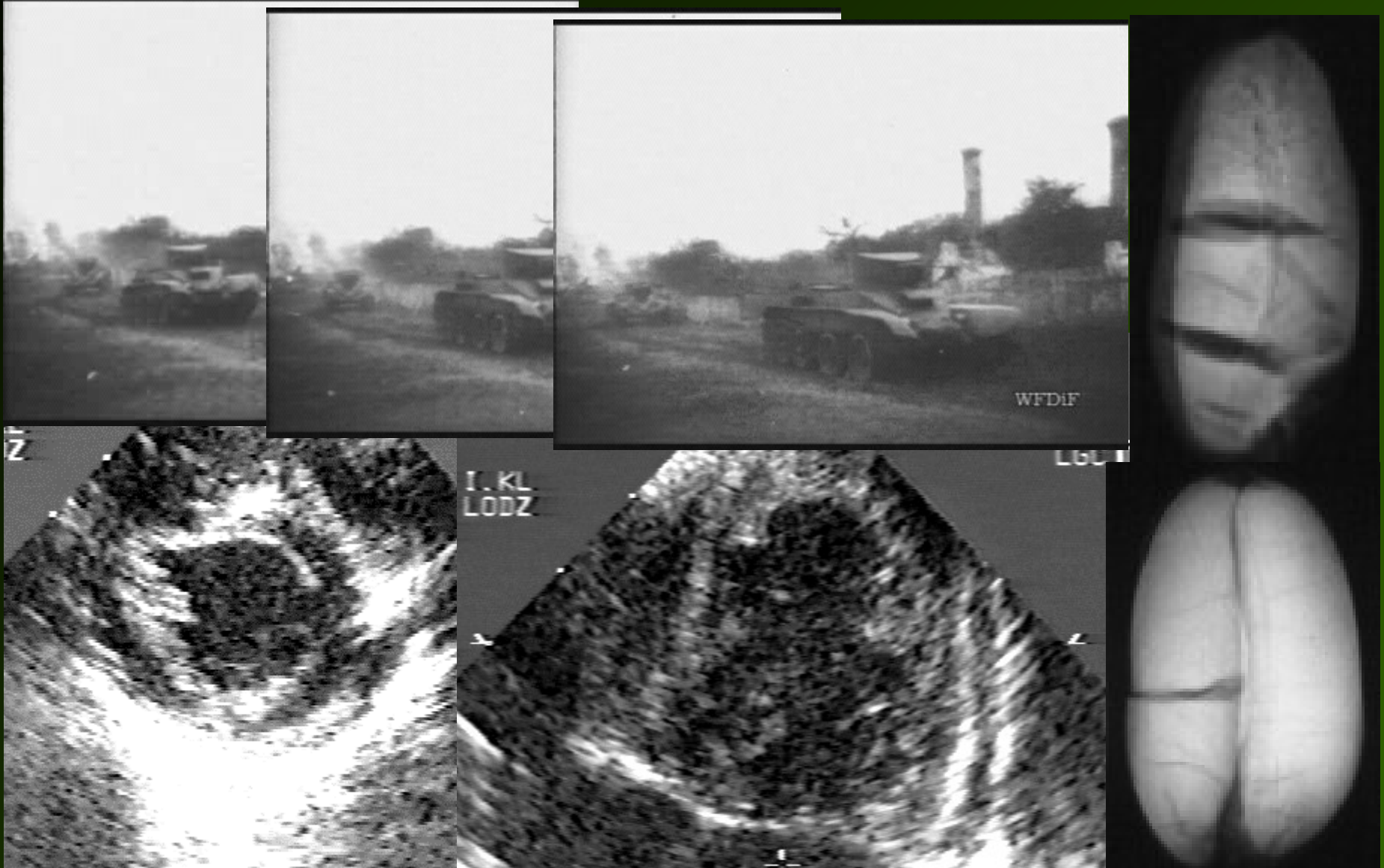
# Narzędzia badawcze

- Programy analizy obrazów metodami tradycyjnymi:
  - ◆ komercyjne,
  - ◆ opracowane samodzielnie,
- *Siatki* - program analizy obrazów za pomocą modeli deformowalnych.

# Pochodzenie badanych obrazów

- Obrazy ultrasonograficzne serca – CZMP w Łodzi, dr E. Makowiecka,
- Obrazy rentgenowskie ziaren – Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie, dr J. Niewczas, projekt badawczy 5P06F01209 “Fizyczne i biologiczne skutki suszenia mikrofalowego ziaren pszenicy” ,
- Obrazy MRI serca – Aarhus University Hospital, dr H. Stødkilde-Jørgensen, program badawczy EC COST B11 “Quantitation of Magnetic Resonance Image Texture”,
- Serie obrazów przedstawiających rzeczywiste obiekty w ruchu – *Encyklopedia Multimediálna PWN - “Historia”*, Wydawnictwa Naukowe PWN S.A., Warszawa 1999,
- Obrazy utworzone sztucznie.

# Przykłady analizowanych obrazów



# Tradycyjne metody analizy obrazów

- Przetwarzanie wstępne,
  - ◆ usuwanie zakłóceń,
- Segmentacja
  - ◆ progowanie jasności obrazu,
  - ◆ przekształcenia gradientowe,
  - ◆ przekształcenia morfologiczne,
  - ◆ aproksymacja konturu równaniem krzywej,
- Określanie cech obiektów
  - ◆ korelacja obrazu i maski wzorca,
  - ◆ obliczanie cech geometrycznych obiektu,
- Klasyfikacja.

# Wady tradycyjnych metod analizy obrazów

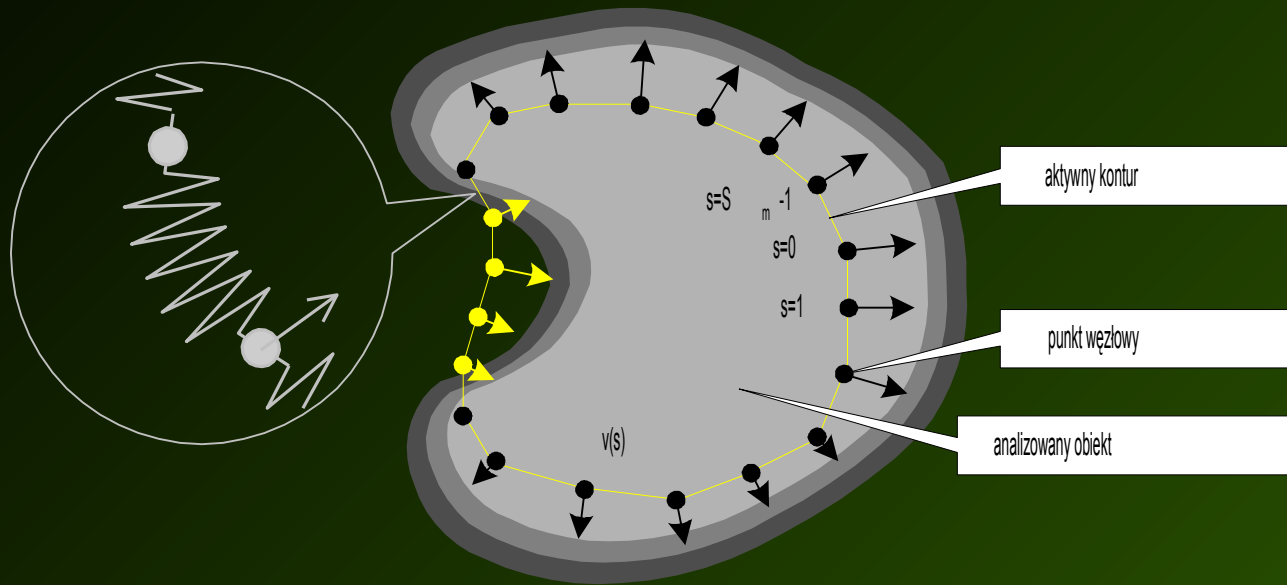
- Wieloetapowość analizy,
- Strata części istotnych informacji w poszczególnych etapach,
- Długi czas analizy.



# Deformowalne modele w analizie obrazów cyfrowych

- **Deformowalna krzywa (*aktywny kontur*):**
  - **wyznaczanie konturu obiektu,**
    - M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos, *Snakes: Active Contour Models*, 1988
    - W. Neuenschwander, P. Fua, O. Kuebler, *From Ziplock Snakes to Velcro Surfaces*, 1995
- **Deformowalny wzorzec (*siatka*):**
  - **rozpoznawanie obiektu**
  - **określanie stopnia zniekształcenia obiektu.**
    - L. Wiskott, J-M. Fellous, N. Kruger, C. Malsburg, *Face Recognition by Elastic Bunch Graph Matching*, 1997
    - X. Wu, B. Bhanu, *Gabor Wavelet Representation for 3-D Object Recognition*, 1997

# Idea aktywnego konturu



- Budowa aktywnego konturu,
- Oddziaływanie obrazu na strukturę,
- Modelowanie sprężystości krzywej.

# Przykład dopasowania aktywnego konturu



# Równania opisujące aktywny kontur

$$E_S = \int_0^{S_m} \left[ E_i(\mathbf{v}(s)) + E_e(\mathbf{v}(s)) + E_p(\mathbf{v}(s)) \right] ds$$

$$E_i(\mathbf{v}(s)) = \tau \left| \frac{d\mathbf{v}(s)}{ds} \right|^2 + \rho \left| \frac{d^2\mathbf{v}(s)}{ds^2} \right|^2$$

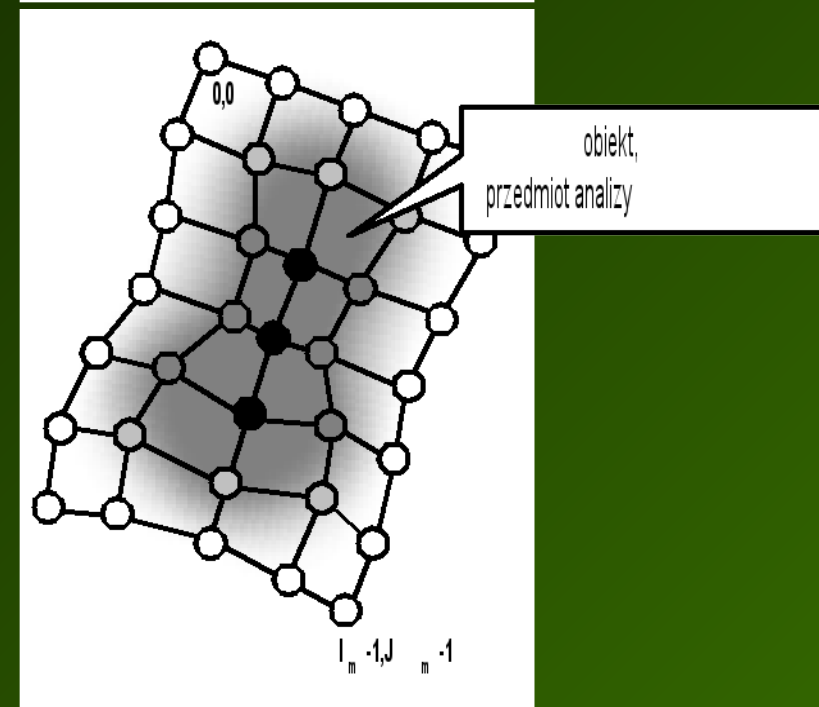
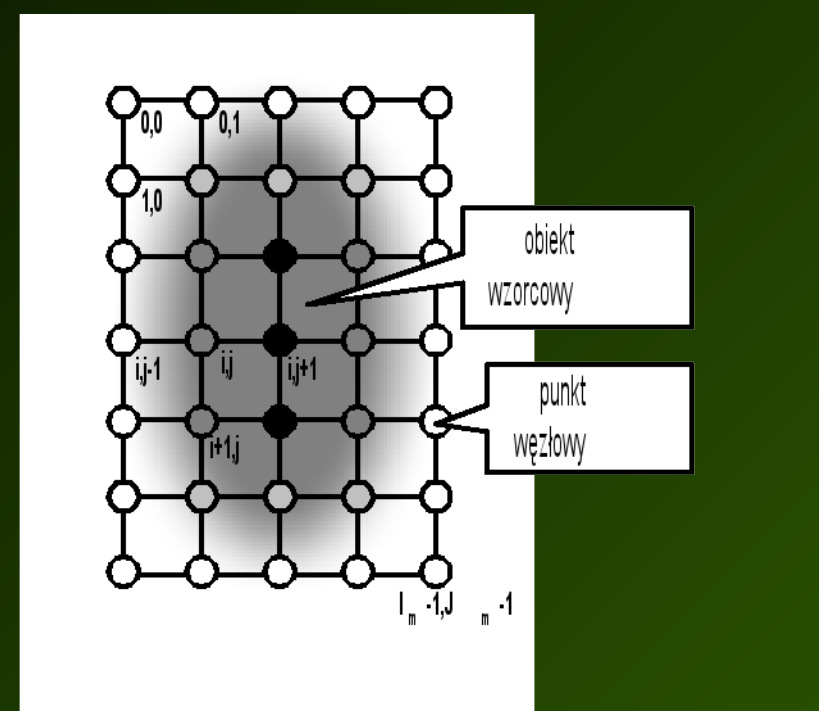
$$\mathbf{F}(s) = -\nabla E_S(s)$$

$$m \frac{\partial^2 \mathbf{v}(s,t)}{\partial t^2} + l \frac{\partial \mathbf{v}(s,t)}{\partial t} = \mathbf{F}(s,t)$$

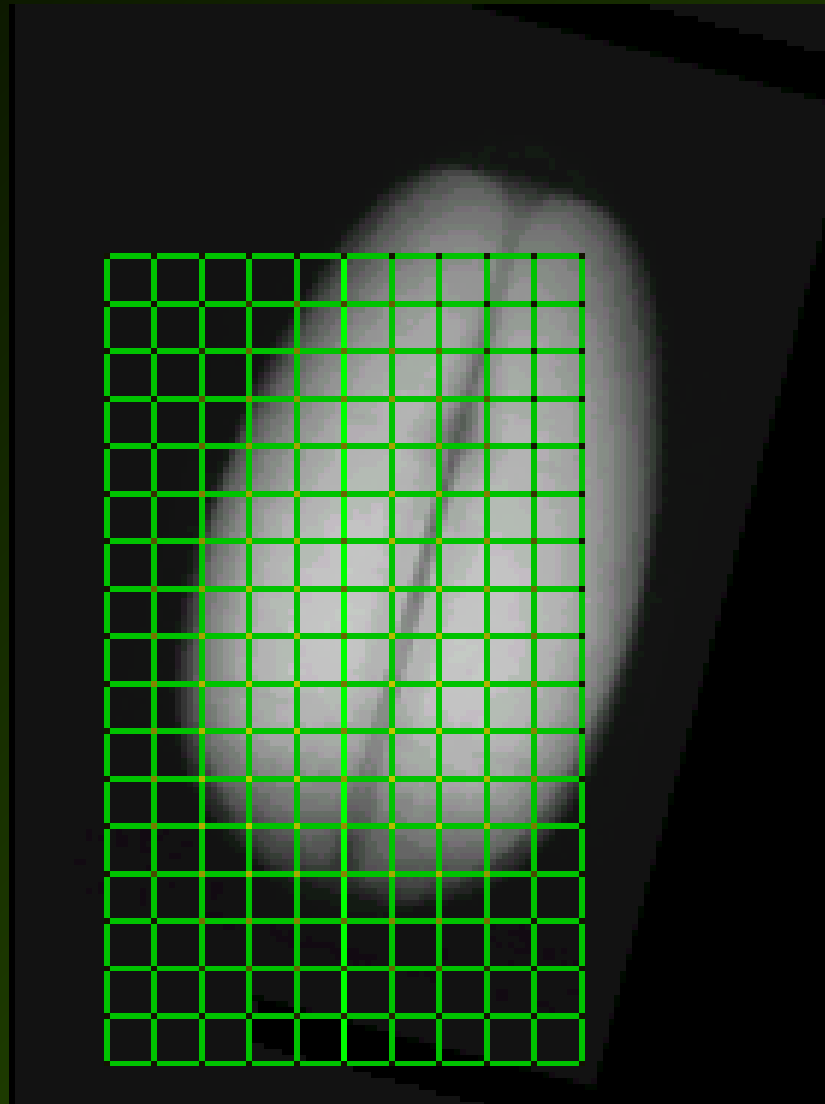
- Wewnętrzne naprężenia krzywej konturu,
- Składowa oddziaływania obrazu,
- Dodatkowa składowa oddziaływań zewnętrznych,
- Równanie ruchu punktów węzłowych.

# Idea deformowalnego wzorca (siatki)

- Budowa siatki,
- Zapis cech obrazu wzorcowego w punktach węzłowych,
- Proces dopasowania modelu do obiektu.



# Przykład dopasowania deformowalnego wzorca



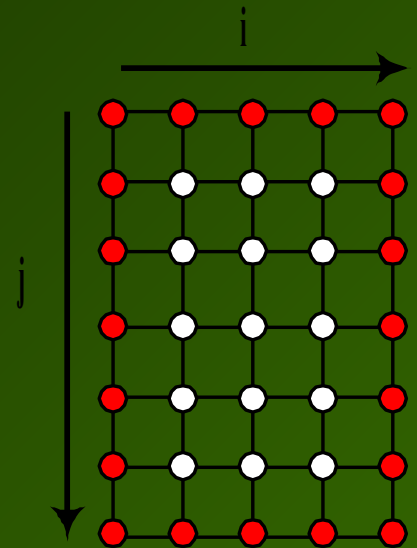
# Energia deformowalnego wzorca

$$E_S = \iint_{\Omega} \left[ E_i(\mathbf{v}(\mathbf{s})) + E_e(\mathbf{v}(\mathbf{s})) + E_p(\mathbf{v}(\mathbf{s})) \right] ds$$

- Modelowanie wewnętrznych naprężeń,
- Oddziaływanie obrazu na siatkę,
- Dopasowanie siatki do obiektu.

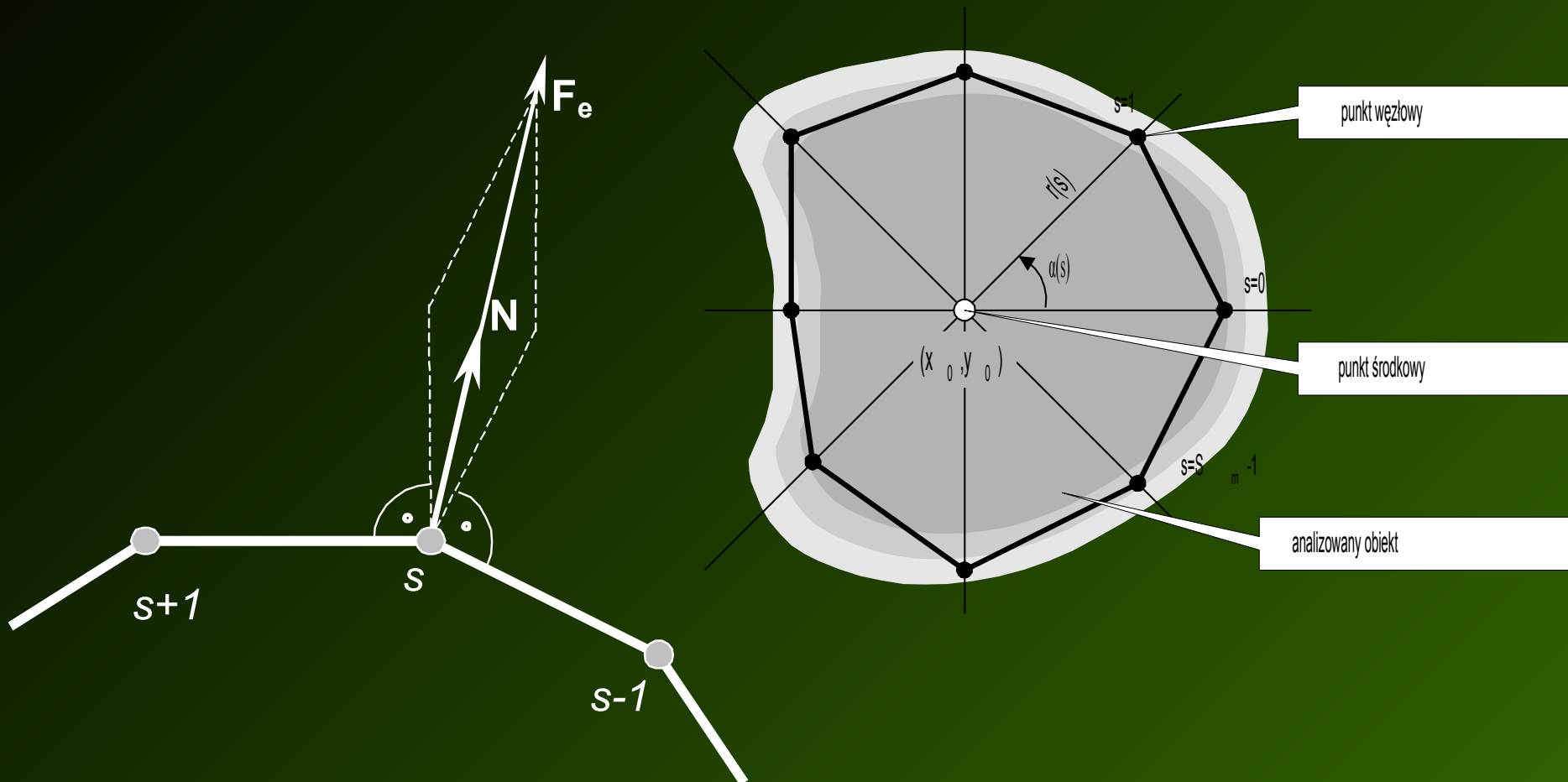
$$E_i = \tau \left[ \left| \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial i} \right|^2 + \left| \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial j} \right|^2 \right] + \rho \left[ \left| \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial i^2} \right|^2 + 2 \left| \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial i \partial j} \right|^2 + \left| \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial j^2} \right|^2 \right]$$

- Problem z modelowaniem naprężeń dla punktów węzłowych na brzegu siatki



# Modyfikacje modelu aktywnego konturu

- Model z punktem środkowym



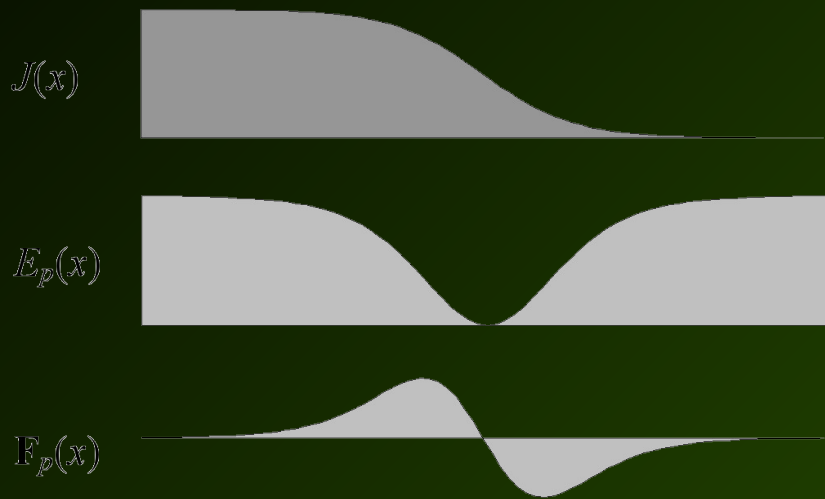
- Model ciśnieniowy (*balonowy*)



# Oddziaływania sił obrazu

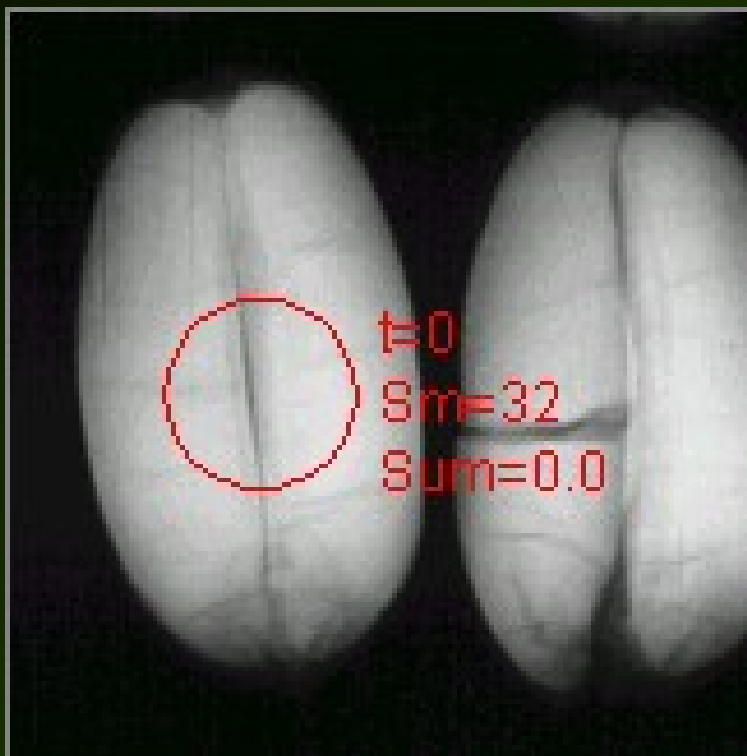
■ Gradient jasności obrazu

■ Progowanie jasności

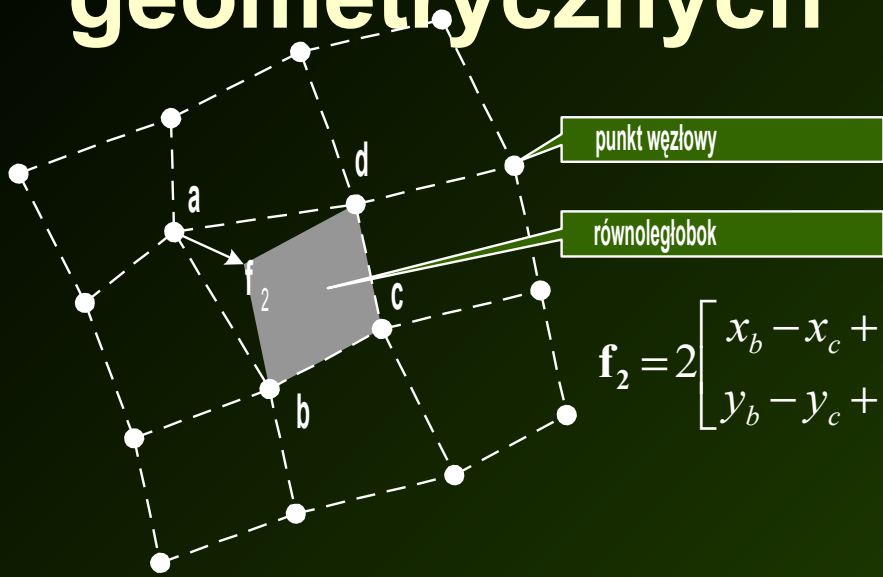


# Przykłady dopasowania zmodyfikowanych modeli aktywnego konturu

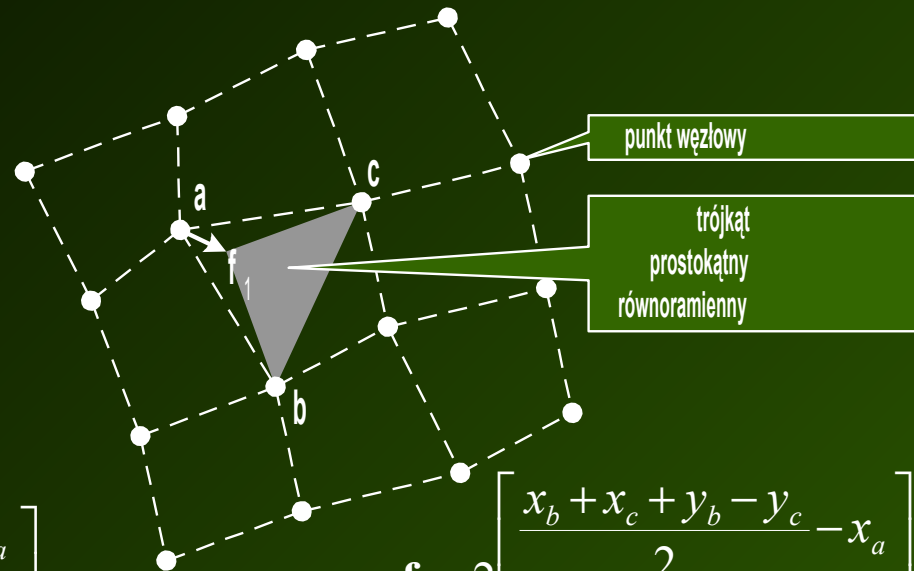
- Model ciśnieniowy (*balonowy*)
- Model z punktem środkowym



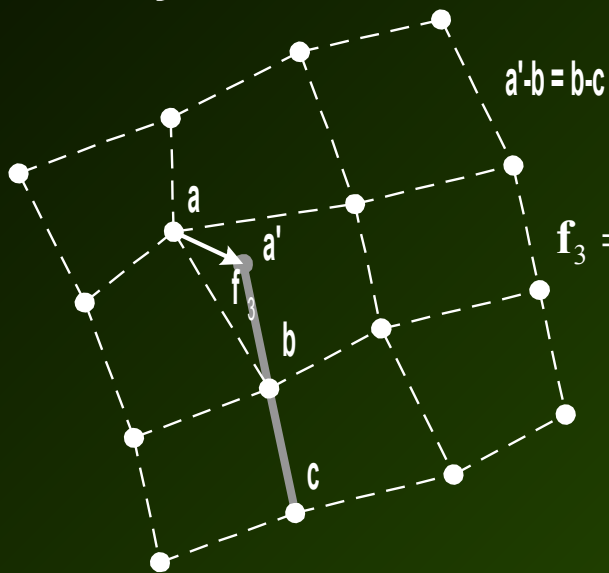
# Obliczanie naprężeń metodą szablonów geometrycznych



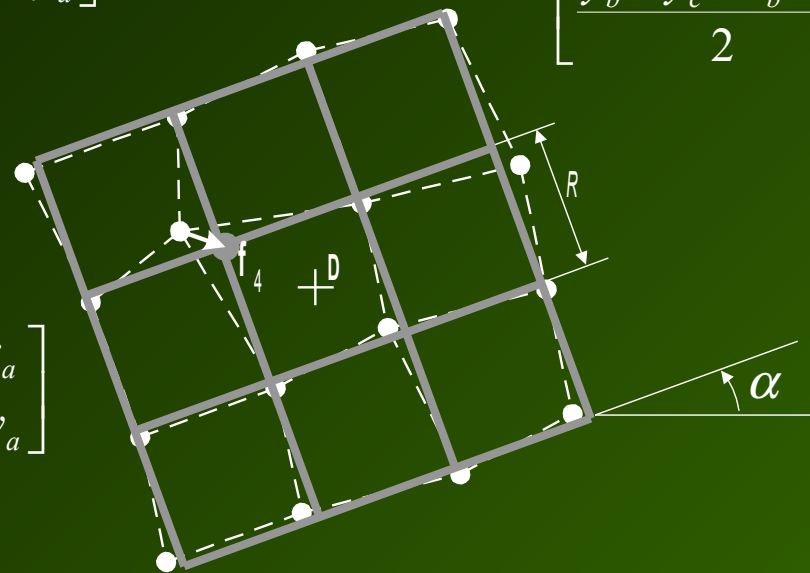
$$\mathbf{f}_2 = 2 \begin{bmatrix} x_b - x_c + x_d - x_a \\ y_b - y_c + y_d - y_a \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{f}_1 = 2 \begin{bmatrix} \frac{x_b + x_c + y_b - y_c - x_a}{2} \\ \frac{y_b + y_c - x_b + x_c - y_a}{2} \end{bmatrix}$$

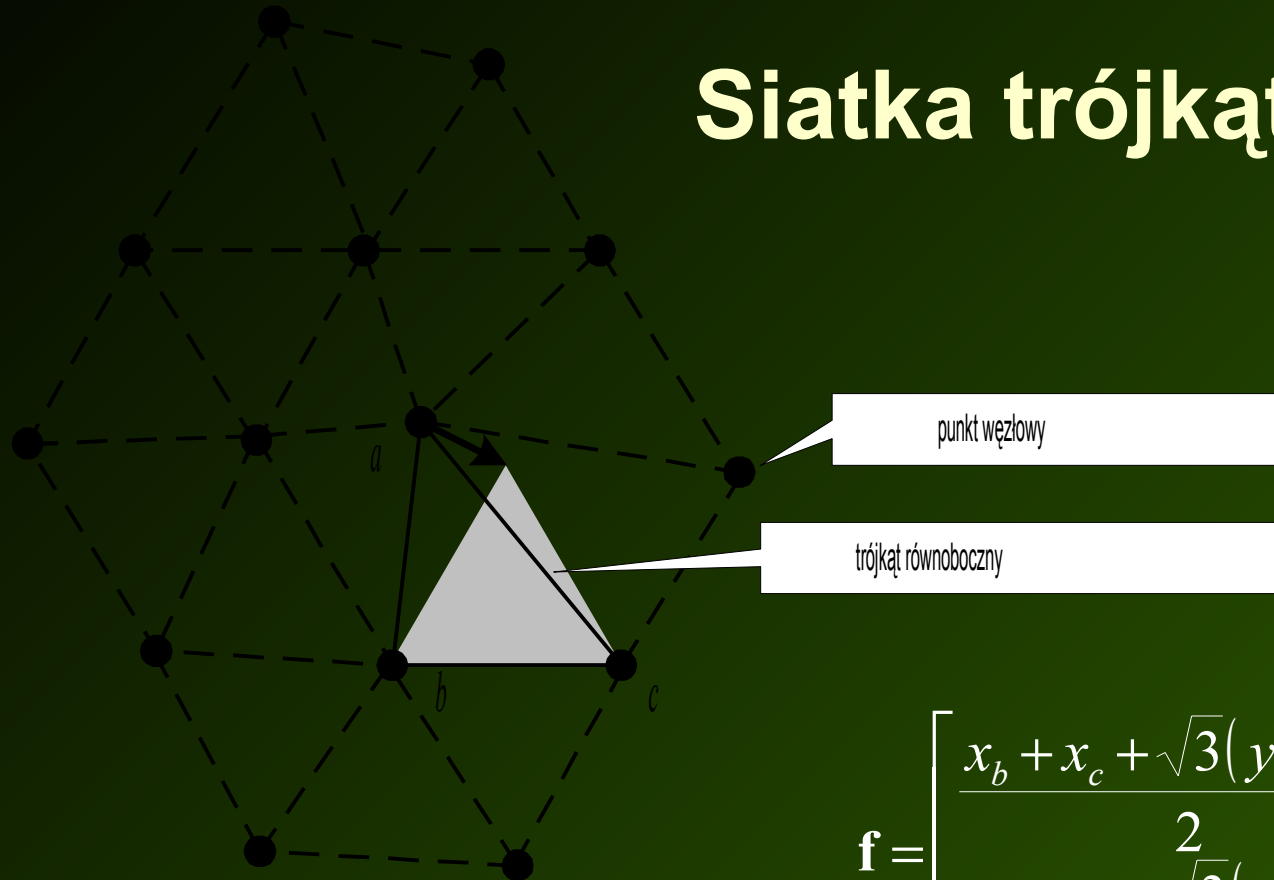


$$\mathbf{f}_3 = 2 \begin{bmatrix} (2x_b - x_c) - x_a \\ (2y_b - y_c) - y_a \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{f}_4 = \mathbf{D} + \begin{bmatrix} R \cos(\alpha) \left(i - \frac{I_m}{2}\right) + R \sin(\alpha) \left(j - \frac{J_m}{2}\right) \\ R \cos(\alpha) \left(j - \frac{J_m}{2}\right) - R \sin(\alpha) \left(i - \frac{I_m}{2}\right) \end{bmatrix} - \mathbf{v}_a$$

# Siatka trójkątna



$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{x_b + x_c + \sqrt{3}(y_c + y_b)}{2} - x_a \\ \frac{y_b + y_c + \sqrt{3}(x_b + x_c)}{2} - y_a \end{bmatrix}$$

# Siatka o ograniczonej elastyczności

- Ograniczenie „deformacji” siatki do jej:

- ◆ przesuwania

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{D}(t-1) + \frac{d}{\text{card}\Omega} \sum_{(i,j) \in \Omega} \mathbf{F}_p(i, j, t-1)$$

- ◆ rozciągania

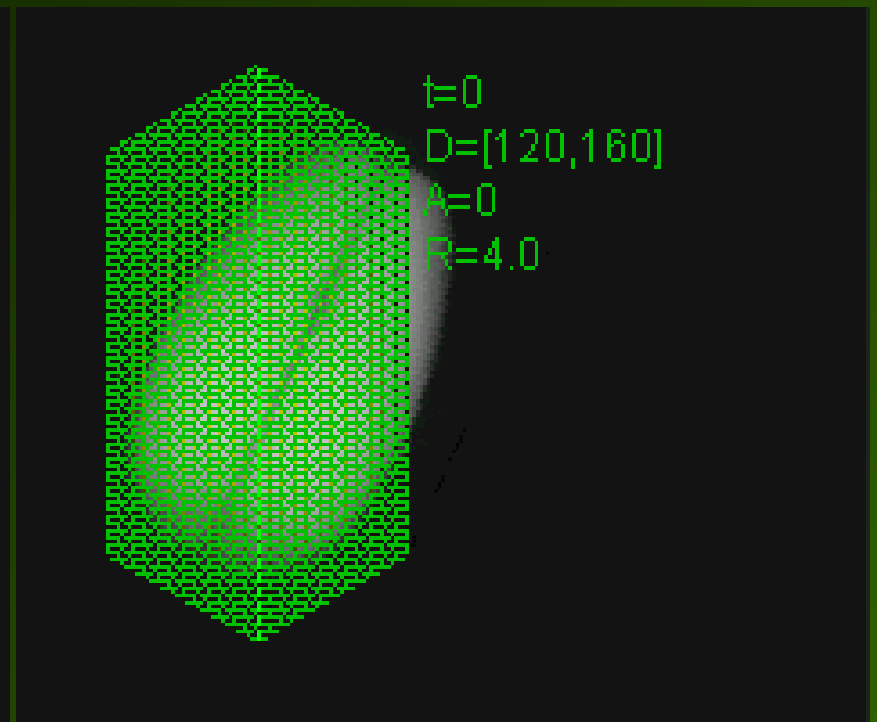
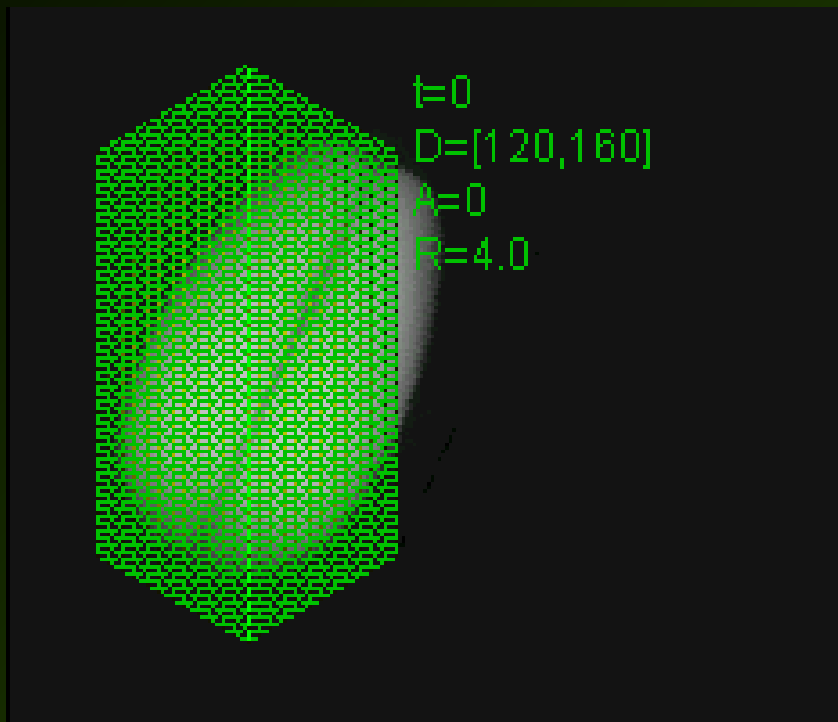
$$R(t) = R(t-1) \left( 1 + r \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} \mathbf{F}_p(i, j, t-1) (\mathbf{v}(i, j, t-1) - \mathbf{D}(t-1))}{\sum_{(i,j) \in \Omega} |\mathbf{v}(i, j, t-1) - \mathbf{D}(t-1)|} \right)$$

- ◆ obrotu

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + a \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} \mathbf{F}_p(i, j, t-1) \begin{bmatrix} -1_y (\mathbf{v}(i, j, t-1) - \mathbf{D}(t-1)) \\ 1_x (\mathbf{v}(i, j, t-1) - \mathbf{D}(t-1)) \end{bmatrix}}{\sum_{(i,j) \in \Omega} |\mathbf{v}(i, j, t-1) - \mathbf{D}(t-1)|}$$

# Sekwencyjne użycie modeli

- Przyspieszenie procesu dopasowania,
- Dokładność dopasowania do obiektu.

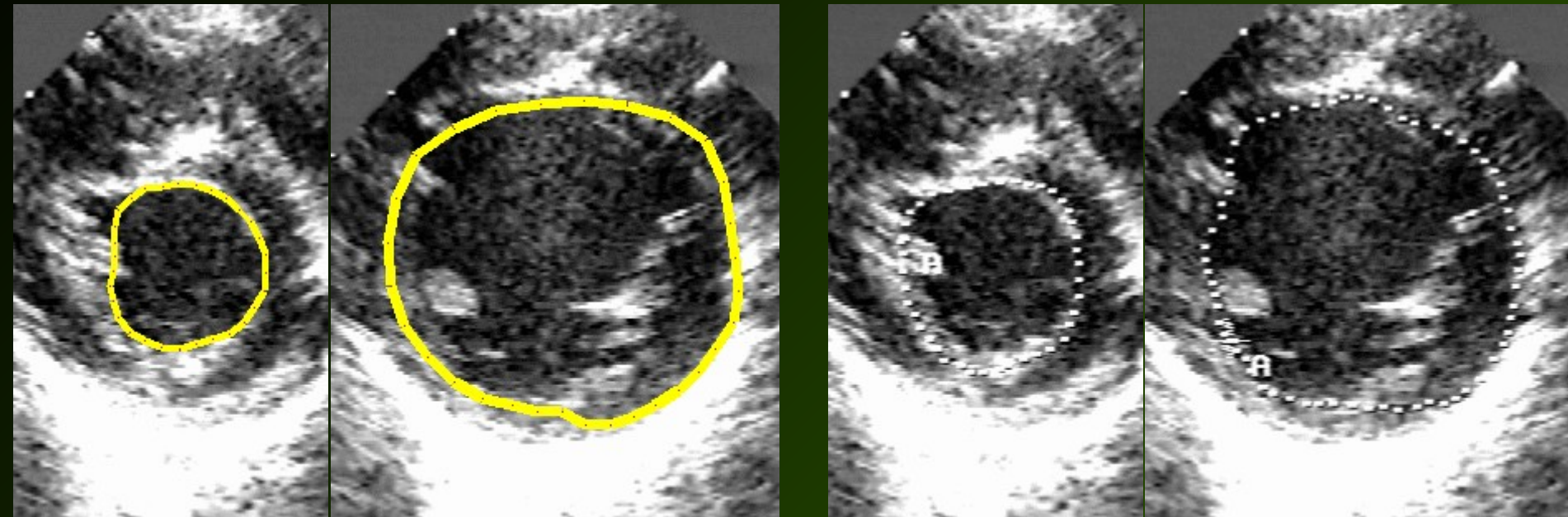


# Oryginalne osiągnięcia

- Modyfikacja funkcji oddziaływania obrazu,
- Nowe modele aktywnego konturu:
  - ◆ model z punktem środkowym,
  - ◆ zmodyfikowany model ciśnieniowy,
- Oryginalna metoda obliczania naprężeń w siatce deformowalnego wzorca,
- metoda dopasowania siatki o trójkątnej strukturze połączeń,
- Siatka o ograniczonej elastyczności,
- Sekwencyjne zastosowanie:
  - ◆ modelu o ograniczonej elastyczności,
  - ◆ modelu w pełni deformowalnego.



# Zastosowanie aktywnego konturu (1)

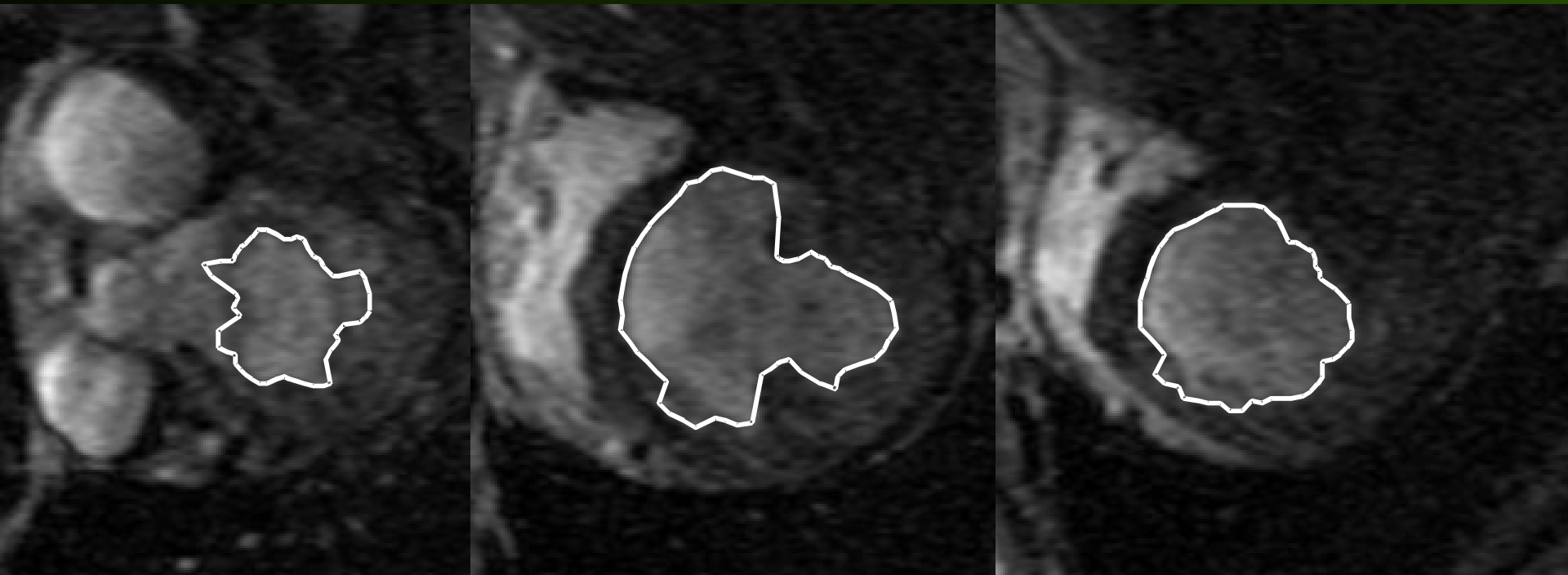


(a) (b)

- Wyznaczanie obrysu lewej komory serca na obrazach ultrasonograficznych.  
Porównanie wyników uzyskanych za pomocą aktywnego konturu (a) i obrysów zaznaczonych przez kardiologa (b).

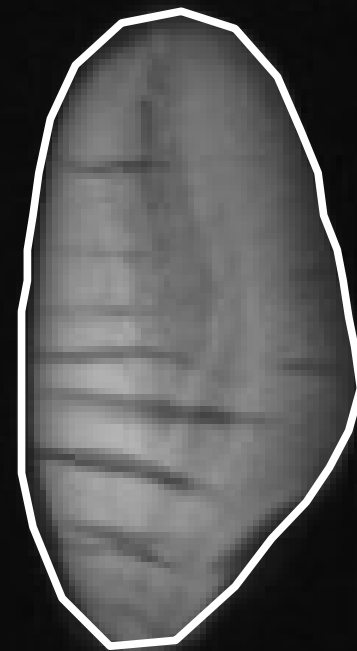
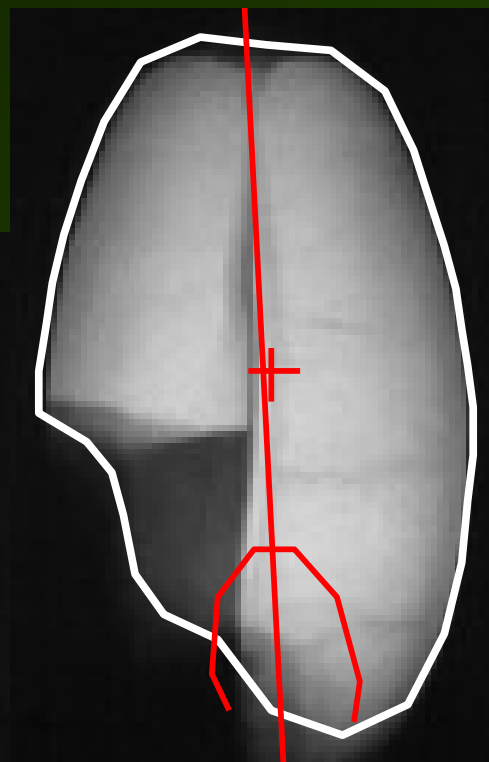
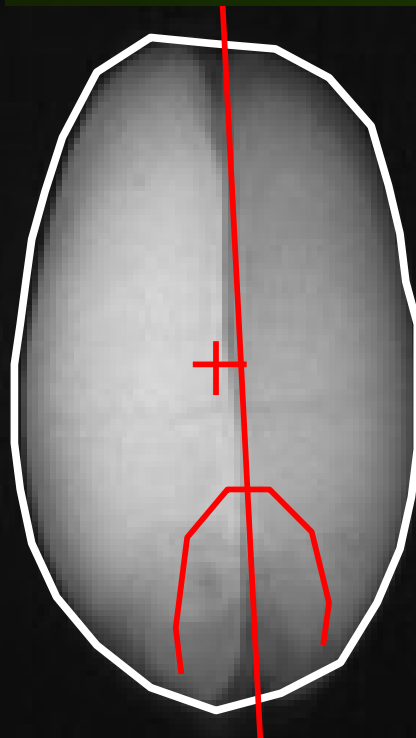
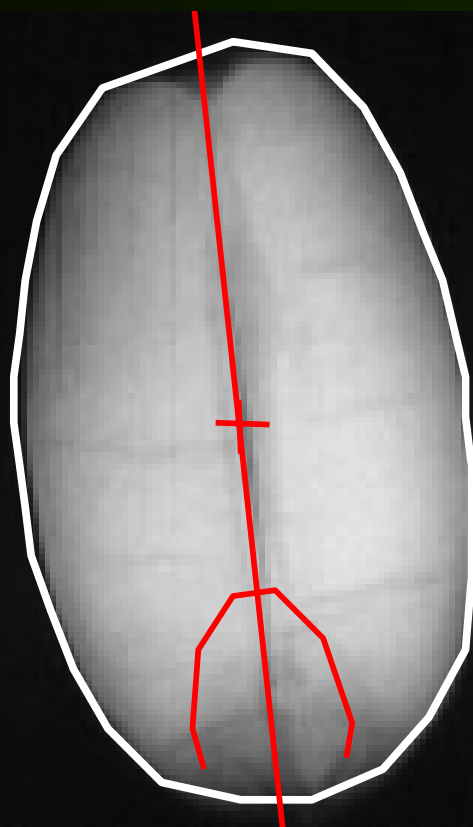


## Zastosowanie aktywnego konturu (2)

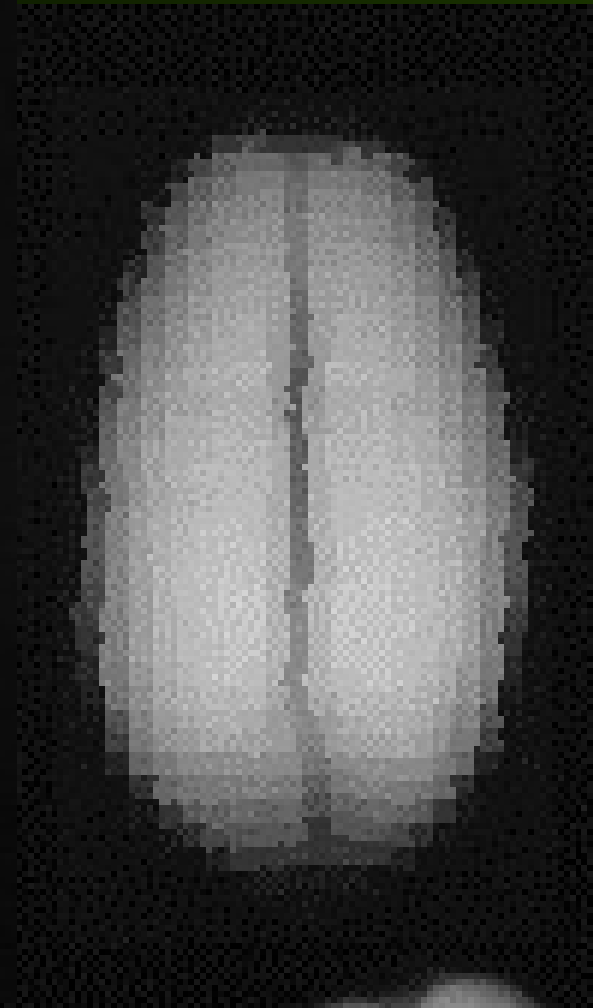
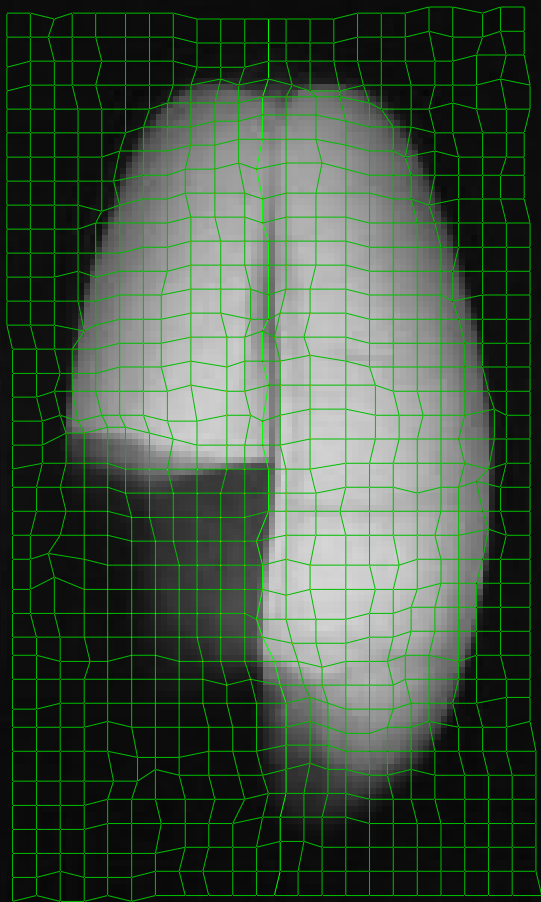


- Wyznaczanie obrysu lewej komory serca na obrazach MRI  
(pokazano wybrane przekroje serca w tej samej fazie pracy).

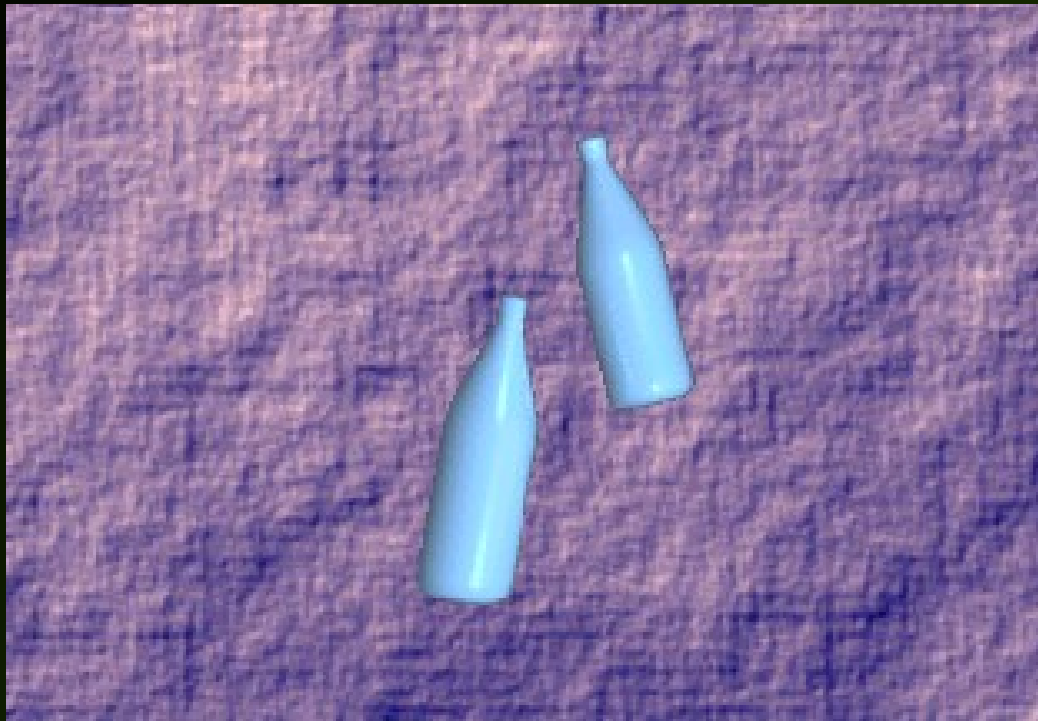
# Wyznaczanie konturu, bruzdki i położenia zarodka ziarna pszenicy



# Dopasowanie siatki i aktywnego konturu do uszkodzonego obiektu



# Śledzenie poruszających się obiektów



# Odporność metod analizy obrazów na dodane zakłócenia losowe

Odchylenie standardowe dodanych  
zakłóceń losowych

0

20

50

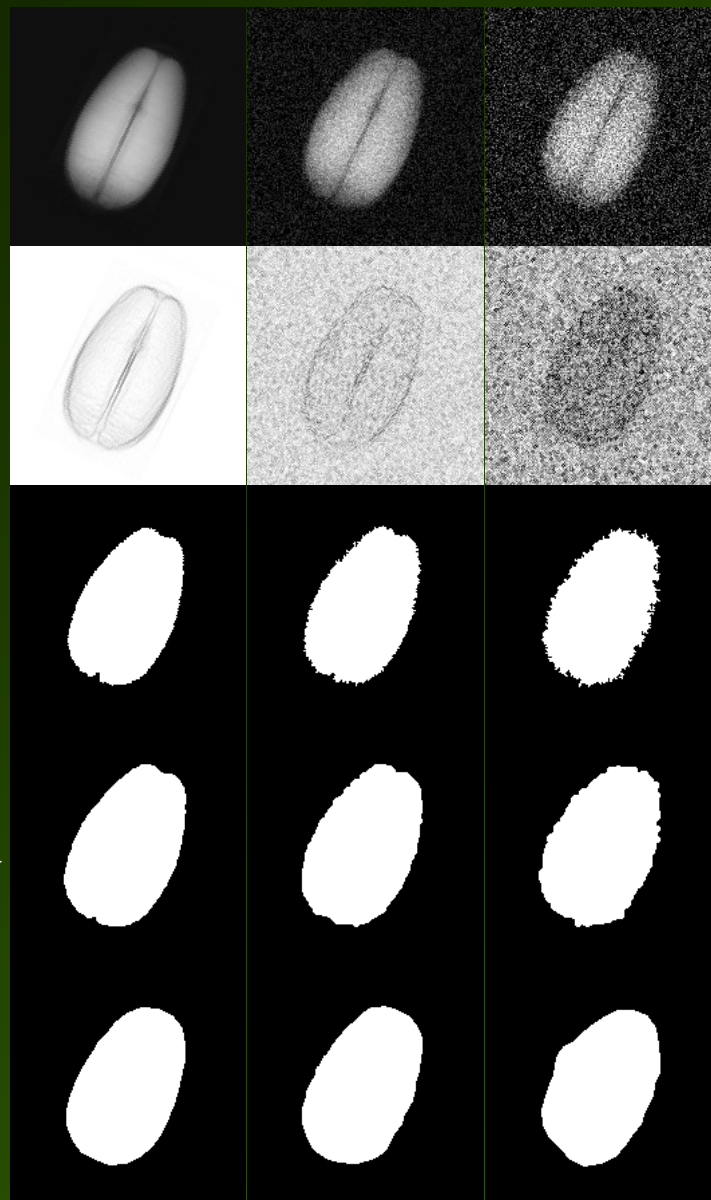
Obraz  
poddawany  
analizie

Wartość  
bezwzględna  
gradientu

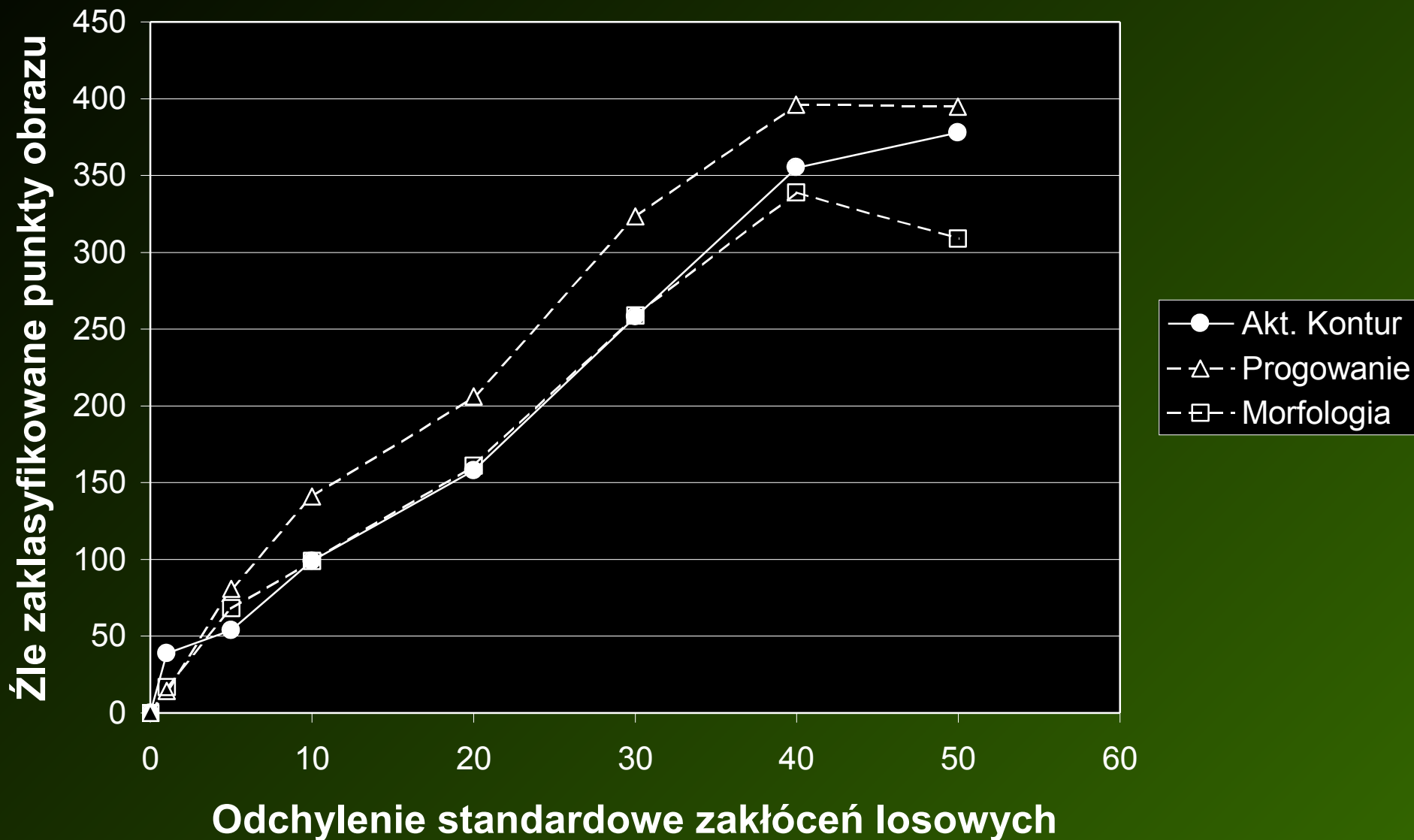
Segmentacja  
przez  
progowanie

Progowanie i  
przekształcenia  
morfologiczne

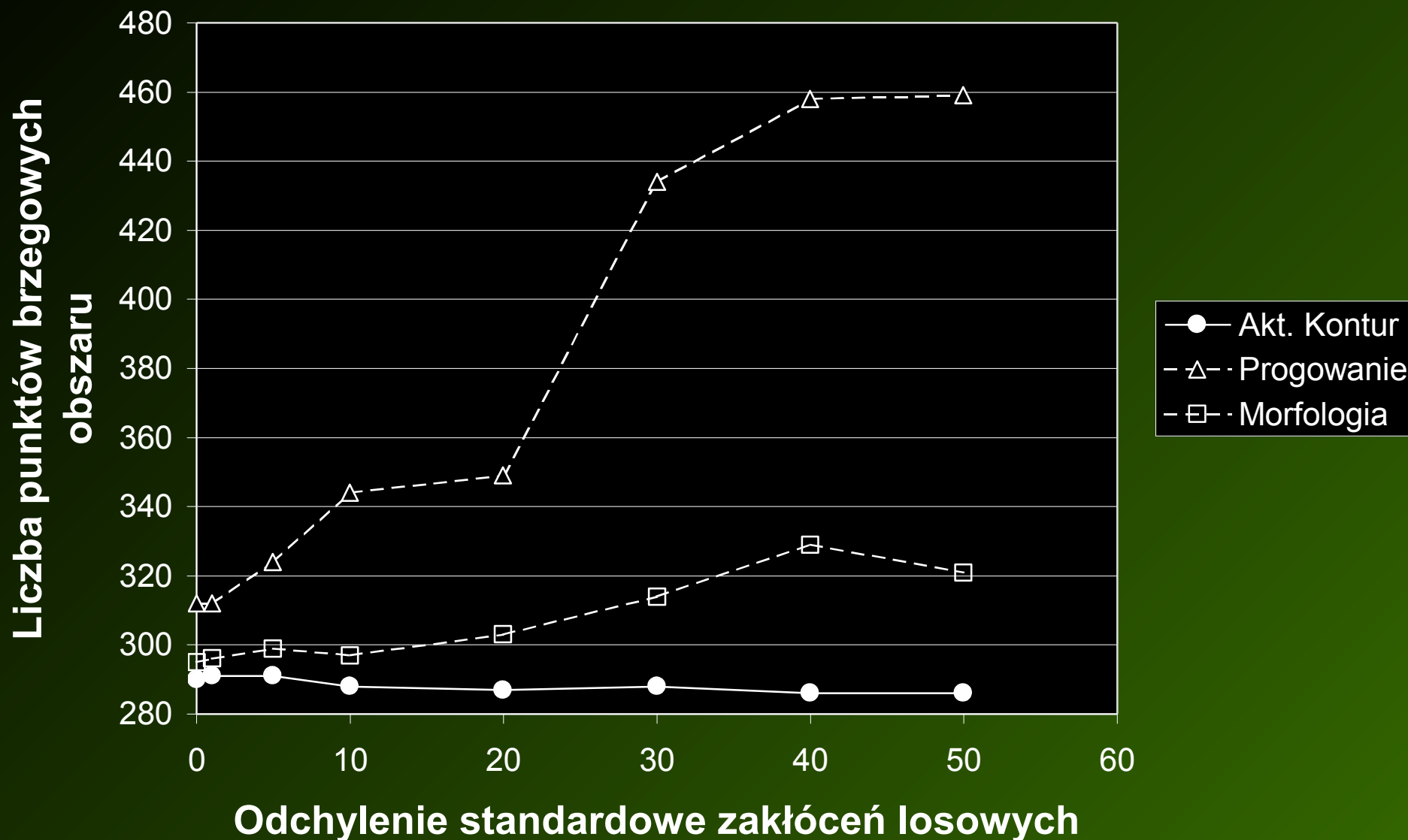
Segmentacja z  
zastosowaniem  
aktywnego  
konturu



# Odporność metod analizy obrazów na dodane zakłócenia losowe

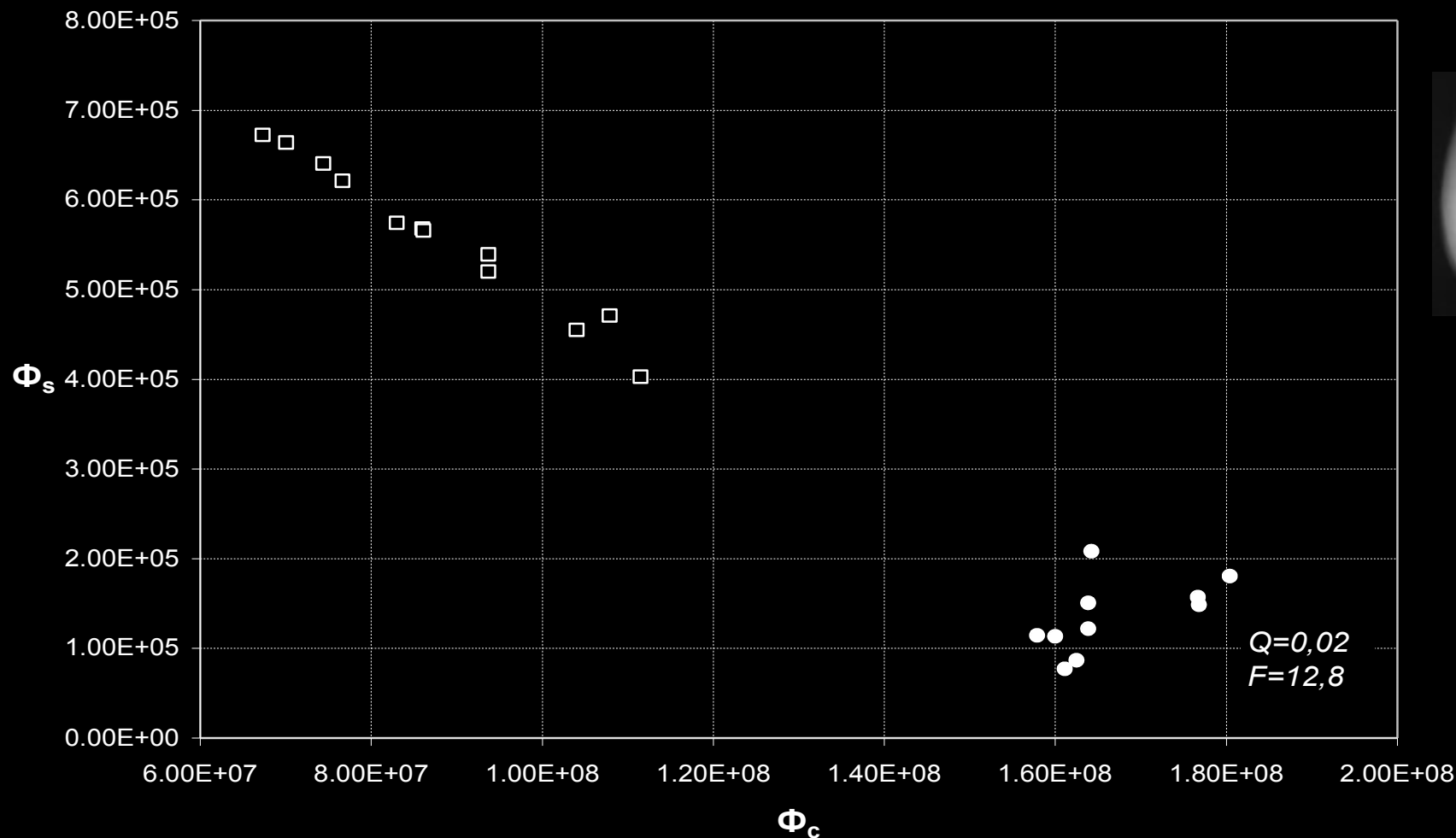


# Odporność metod analizy obrazów na dodane zakłócenia losowe



# Stopień rozróżnienia obiektów należących do różnych klas

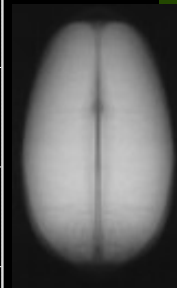
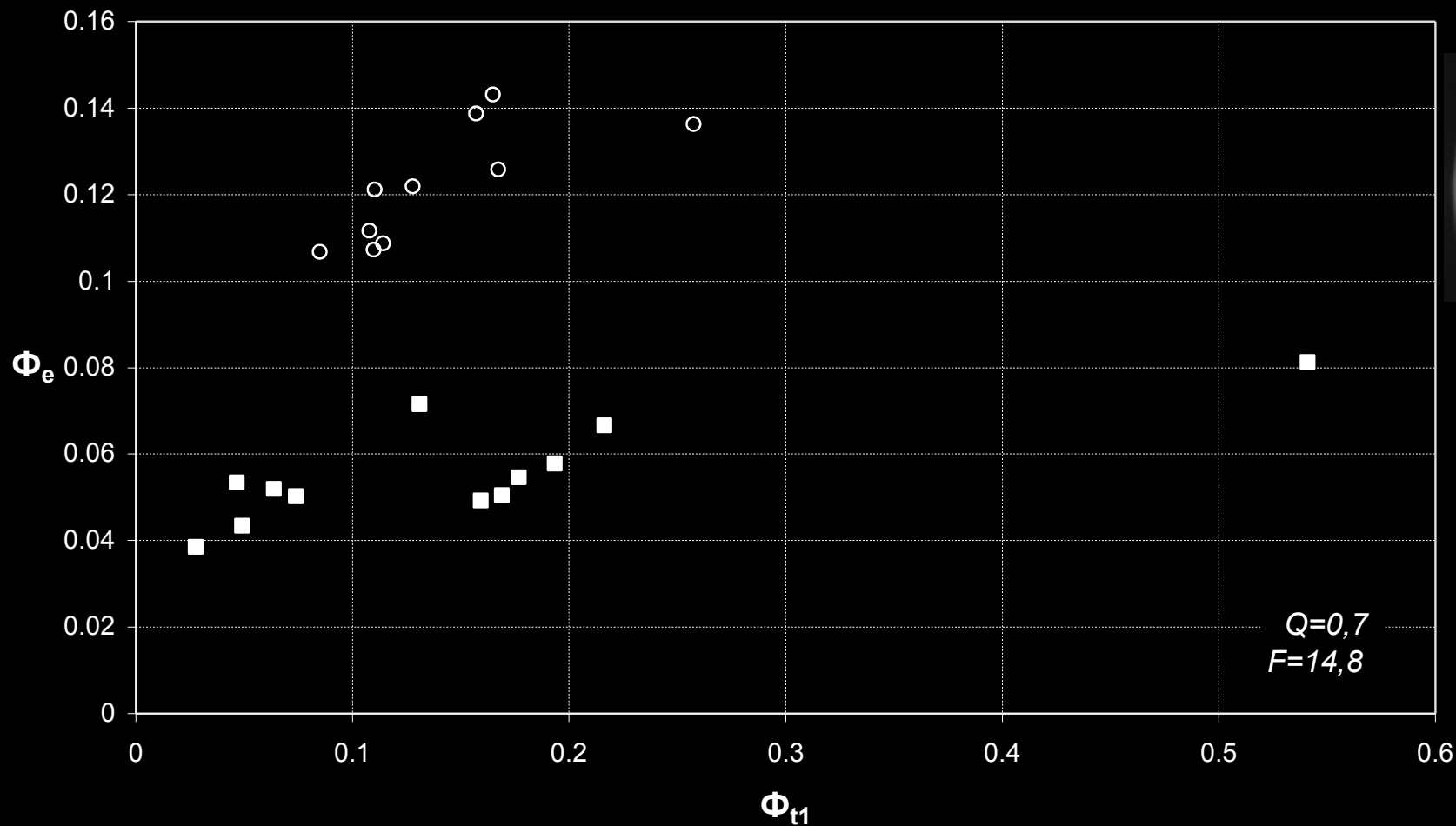
Współczynniki deformacji siatki prostokątnej





# Stopień rozróżnienia obiektów należących do różnych klas

Współczynniki deformacji siatki prostokątnej



○ ZA4  
■ ZB



# Stopień rozróżnienia obiektów należących do różnych klas

## Współczynnik Fishera rozdzielenia klas

	współczynniki deformacji deformowalnego wzorca	maksimum funkcji korelacji i minimum funkcji sumy kwadratów różnic jasności punktów obrazu i maski wzorca
rozpoznawanie rzutu ziarna	14.8	12.8
rozpoznawanie orientacji ziarna	7.1	4.9

# Czas wymagany do wykonania analizy obrazu

Rodzaj analizy	Czas wykonania analizy [ms]	
	Pentium 120MHz	Celeron 400MHz
Aktywny kontur z punktem środkowym	6.8 – 14.7*	1.9 – 3.9*
Aktywny kontur standardowy	9.5 – 17.3*	2.8 – 4.5*
Wyznaczanie konturu przez progowanie	12	5
Wyznaczanie konturu przez progowanie wraz z zamknięciem morfologicznym	42	9
Wyznaczanie konturu przez progowanie wraz z zamknięciem i otwarciem	65	12
Deformowalny wzorzec z siatką trójkątną	1025	210
Deformowalny wzorzec z siatką prostokątną	876	180
Wyznaczanie maksimum funkcji korelacji	53560	8840
Wyznaczanie maksimum funkcji korelacji i minimum funkcji sumy różnicy kwadratów	64480	9880

\* czas analizy zależy od wyzerowania lub nie parametru  $\xi_2$  modelu

# Zastosowania deformowalnych modeli

- Diagnostyka medyczna:
  - ◆ analiza obrazów ultrasonograficznych serca,
  - ◆ analiza obrazów serca z tomografu MRI,
- Analiza obrazów rentgenowskich ziaren pszenicy:
  - ◆ rozpoznawanie rzutu i orientacji obiektu,
  - ◆ wyznaczanie obrysu (segmentacja),
  - ◆ przybliżone wyznaczanie bruzdki i zarodka,
- Śledzenie poruszających się obiektów w sekwencji obrazów cyfrowych.

# Podsumowanie

- Opracowano metody analizy obrazów za pomocą modeli deformowalnych umożliwiające:
  - ◆ segmentację, określanie położenia, orientacji, stopnia zniekształcenia i klasyfikację obiektów (teza 1),
  - ◆ śledzenie poruszających się obiektów, określania ich położenia, orientacji i odległości od obserwatora (teza 2),
- Wykazano, że analiza obrazów z wybranej klasy za pomocą deformowalnych modeli jest szybsza od analizy za pomocą metod tradycyjnych (teza 3),
- Wykazano praktyczną użyteczność deformowalnych modeli,
- Opracowano założenia implementacji modeli deformowalnych w cyfrowym układzie elektronicznym.

# Publikacje (1)

1. P. Strumiłło, **P. Szczypiński**, *Automatic Extraction of Fuzzy and Broaken Image Edges using Active Contour Model*, XVIII KKTOiUE, 1995
2. **P. Szczypiński**, P. Strumiłło, *Application of an Active Contour Model for Extraction of Fuzzy and Broken Image Edges*, Machine GRAPHICS & VISION, Vol.5, No.4, 1996, pp. 579-594
3. P. Strumiłło, **P. Szczypiński**, P. Makowski, *Dokumentacja skomputeryzowanego stanowiska badawczego do analizy obrazów rentgenowskich ziaren pszenicy*, Instytut Elektroniki, Politechnika Łódzka, 1996
4. P. Strumiłło, **P. Szczypiński**, P. Makowski, J. Niewczas, *Program do Komputerowej Analizy Obrazów Rentgenowskich Ziaren Pszenicy*, WEE PŁ Elektronika-Prace naukowe, Łódź 1997, Zeszyt nr 2, pp.101-111
5. **P. Szczypiński**, A. Materka, *Variable-Flexibility Elastic Model for Digital Image Analysis*, XXI KKTOiUE, Kiekrz, 1998 (wyróżnienie)
6. P. Strumiłło, J. Niewczas, **P. Szczypiński**, P. Makowski, W. Woźniak, *Computer System for Analysis of X-Ray Images of Wheat Grains*, Int. Agrophysics, 1999, 13, pp. 133-140

# Publikacje (2)

7. **P. Szczypiński**, A. Materka, *Variable-Flexibility Elastic Model for Digital Image Analysis*, XXI KKTOiUE, Kiekrz, 1998
8. **P. Szczypiński**, A. Materka, *Variable-Flexibility Elastic Model for Digital Image Analysis*, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol.47, No.3, 1999, pp. 263-269
9. **P. Szczypiński**, A. Materka, *Program do analizy obrazów za pomocą deformowalnych modeli*, *Elektronika-Prace naukowe*, Łódź 2000, Zeszyt nr 5, pp.33-51
10. M. Kociołek, A. Materka, M. Strzelecki, **P. Szczypiński**, *Badanie wpływu liczby poziomów jasności obrazu na zdolność dyskryminacji tekstur przy użyciu macierzy zdarzeń*, *Elektronika-Prace naukowe*, Łódź 2000, Zeszyt nr 5, pp.21-33
11. **P. Szczypiński**, A. Materka, *Object Tracking and Recognition Using Deformable Grid with Geometrical Templates*, *International Conference on Signals and Electronic Systems*, Ustroń-Poland 2000, pp.169-174
12. M. Kociołek, A. Materka, M. Strzelecki, **P. Szczypiński**, *Investigation of Wordlength Effect on Discriminative Power of Co-occurrence Matrix – Derived Features for Digital Image Texture Analysis*, *International Conference on Signals and Electronic Systems*, Ustroń-Poland 2000, pp.163-168

# Udział w projektach badawczych (związanych z tematyką pracy)

- ✓ KBN 5P06F01209  
– *Fizyczne i biologiczne skutki suszenia mikrofalowego ziaren pszenicy*
- ✓ COST B11  
– *Quantitation of Magnetic Resonance Image Texture*
- ✓ KBN 8T11C02017  
– *Identyfikacja obiektów w obrazach cyfrowych z zastosowaniem elastycznego modelu*