

PROGRAM DO ANALIZY OBRAZÓW ZA POMOCĄ DEFORMOWALNYCH MODELI

***Streszczenie:** W artykule przedstawiono techniki analizy obrazów z zastosowaniem deformowalnych modeli. Przedstawiono model aktywnego konturu służący do wyznaczania linii brzegowych oraz segmentacji obrazu oraz deformowalny wzorzec, model służący do wyznaczania położenia i rozpoznawania obiektów przedstawionych w obrazie cyfrowym. Omówiono również oryginalne modyfikacje modeli wprowadzone przez autora. W dalszej części przedstawiono oryginalny program komputerowy „Siatki”. Program ten jest narzędziem analizy obrazów wykorzystującym modele aktywnego konturu i deformowalnego wzorca. Opisano jak obsługiwać program oraz jak prowadzić analizy obrazów z jego wykorzystaniem.*

Prace nad deformowalnymi modelami są wspomagane przez KBN – projekt nr 8T11C02017.

1. WPROWADZENIE

Pierwsze informacje o metodzie analizy obrazów z zastosowaniem deformowalnych modeli pojawiły się w referacie [1]. Przedstawiono w nim rozwiązanie problemu wyznaczania nieciągłego i zniekształconego konturu obiektu uwidocznionego w obrazie cyfrowym. Zaproponowano metodę aktywnego konturu (tzw. ang. snake). W metodzie tej, w procesie analizy wykorzystywany jest matematyczny model elastycznej (sprężystej) krzywej, która umieszczona jest w przestrzeni obrazu. Przemieszcza się ona pod wpływem właściwości obrazu w taki sposób, aby dopasować swój kształt do kształtu konturu obiektu. Sprężystość modelu ma duże znaczenie w przypadku, w którym widoczny w obrazie kontur jest postrzępiony lub nieciągły. Pozwala ona wówczas na wygładzenie postrzępienia lub odtworzenie konturu w miejscach nieciągłości.

Innym modelem wykorzystywanym w analizie płaskich obrazów cyfrowych jest deformowalny wzorzec (np. [4]). Jest to model, który zawiera w sobie informację o pewnym wzorcowym obiekcie odniesienia. Przez obiekt rozumiany jest tu wizerunek przedmiotu lub obszar zainteresowania w obrazie cyfrowym.

Deformowalny wzorec umieszczony na powierzchni analizowanego obrazu zmienia swoje położenie i kształt tak aby zawarty w nim obiekt odniesienia dopasować do obiektu znajdującego się w tym obrazie. Informacja o położeniu i orientacji deformowalnego wzorca po jego dopasowaniu pozwala wyciągnąć wnioski na temat położenia i orientacji obiektu przedstawionego w analizowanym obrazie. Dodatkowo, stopień deformacji modelu, pozwala sądzić w jakim stopniu obiekt w analizowanym obrazie jest podobny do obiektu odniesienia.

Analiza obrazu za pomocą deformowalnych modeli jest procesem ewolucyjnym. W ciągu tego procesu, zwanego dalej procesem dopasowania, kształt modelu się zmienia. Rywalizują ze sobą dwa rodzaje oddziaływań: oddziaływanie obrazu, przesuujące i deformujące model, oraz oddziaływanie wewnętrznej sprężystości zapobiegające nadmiernej deformacji. Proces dopasowania powinien trwać, dopóki oddziaływania te się nie zrównoważą.

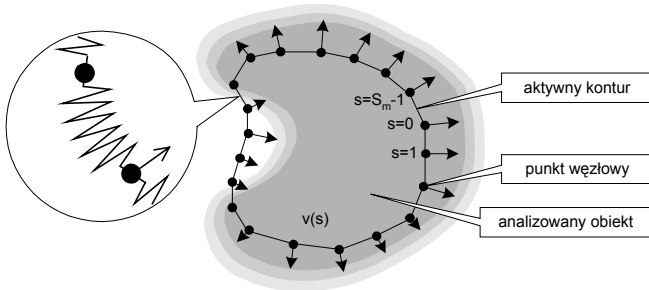
Jak dotąd nie są dostępne komercyjne programy umożliwiające analizę obrazów z zastosowaniem deformowalnych modeli. Stąd, aby możliwe było prowadzenie prac badawczych w tej dziedzinie, konieczne stało się opracowanie odpowiedniego programu komputerowego. W wyniku prac badawczych powstał program „Siatki”, w którym zaimplementowano algorytmy modeli aktywnego konturu oraz deformowalnego wzorca. Program umożliwia załadowanie obrazu, wybór odpowiedniego modelu, dobór parametrów opisujących dany model, przeprowadzenie analizy oraz zapis (lub przeniesienie do innej aplikacji) wyników analizy wraz z informacją o zastosowanym modelu i jego parametrach. Program napisany został w języku C++ i działa w środowisku Windows.

2. AKTYWNY KONTUR

Aktywny kontur jest matematycznym modelem deformowalnej krzywej, wykonanej z abstrakcyjnego, elastycznego materiału, który reaguje na odkształcenia jednocześnie jak guma i stalowy, sprężysty drut. Krzywa znajduje się w dwuwymiarowym środowisku zewnętrznego pola tworzonego przez lokalne właściwości obrazu. W implementacji komputerowej wykorzystuje się dyskretny model aktywnego konturu, w którym składa się on z połączonych kolejno punktów węzłowych s tworzących łamaną (rys.1). Dopasowanie modelu jest procesem iteracyjnym (kolejne iteracje oznaczono przez t). Według [1] proces ten polega na zmianie położenia \mathbf{v} (1) punktów węzłowych, powodującej minimalizację tzw. energii wewnętrznej modelu (2). Składnikami tej energii są energie cząstkowe oddziaływania obrazu E_p , sprężystości E_i oraz składnik E_e pozwalający uwzględnić pewną wiedzę a-priori o kształcie poszukiwanej linii brzegowej.

$$\mathbf{v}(s,t) = (x(s,t), y(s,t)) \quad (1)$$

$$E_S = \sum_{s=0}^{S_m} [E_i(\mathbf{v}(s)) + E_e(\mathbf{v}(s)) + E_p(\mathbf{v}(s))] \quad (2)$$



Rys.1. Ilustracja koncepcji metody aktywnego konturu zastosowanej do detekcji granicy obiektu.

Składnik E_i zdefiniowany jest równaniem membrany (3), które dla celów dyskretnego modelu aktywnego konturu można zapisać w postaci (4).

$$E_i(\mathbf{v}(s)) = \tau \left| \frac{d\mathbf{v}(s)}{ds} \right|^2 + \rho \left| \frac{d^2\mathbf{v}(s)}{ds^2} \right|^2 \quad (3)$$

$$E_i(\mathbf{v}(s)) = \tau [\mathbf{v}(s+1) - \mathbf{v}(s)]^2 + \rho [\mathbf{v}(s+1) - 2\mathbf{v}(s) + \mathbf{v}(s-1)]^2 \quad (4)$$

W programie komputerowym „Siatki” przyjęto metodę minimalizacji energii E_S z wykorzystaniem równania ruchu (5) [2,3,4], które poddano dyskretyzacji w dziedzinie czasu i przetworzono do postaci (6). W tej metodzie, poszczególnym punktom węzłowym przyporządkowana jest masa m . W ciągu procesu dopasowania punkty węzłowe poruszają się pod wpływem wektora tzw. siły \mathbf{F} , wytracając energię kinetyczną w abstrakcyjnym środowisku o lepkości określonej parametrem l . Siłę \mathbf{F} dla pojedynczego punktu węzłowego można wyznaczyć jako zanegowaną wartość gradientu energii E_S obliczanego w przestrzeni obrazu (7).

$$m \frac{\partial^2 \mathbf{v}(s,t)}{\partial t^2} + l \frac{\partial \mathbf{v}(s,t)}{\partial t} = \mathbf{F}(s,t) \quad (5)$$

$$\mathbf{v}(s,t) = \frac{\mathbf{F}(s,t-1) + m(2\mathbf{v}(s,t-1) - \mathbf{v}(s,t-2)) + l\mathbf{v}(s,t-1)}{m+l} \quad (6)$$

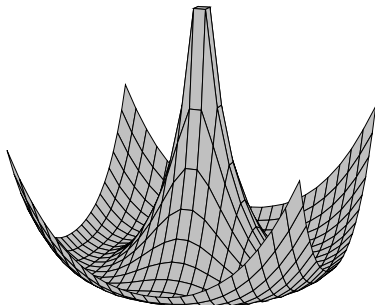
$$\mathbf{F}(s) = -\nabla E_S(s) \quad (7)$$

Wektor siły \mathbf{F} można przedstawić jako sumę składowych \mathbf{F}_p , \mathbf{F}_i oraz \mathbf{F}_e , które funkcjonalnie odpowiadają zanegowanym gradientom sum składowych energii, odpowiednio E_p , E_i oraz E_e .

Składową \mathbf{F}_p zdefiniowano jako ważoną sumę dwóch składników [3,4]. Pierwszy składnik z wagą ζ_l zależny jest od wartości J określającej jasność obrazu w miejscu, w którym znajduje się punkt węzłowy. Parametr J_T jest wartością progową jasności, natomiast \mathbf{k} jest znormalizowanym wektorem

wyznaczającym kierunek działania siły. Drugi składnik z wagą ξ_2 jest dyskretną postacią gradientu bezwzględnej wartości gradientu jasności obrazu (gradient obrazu wyznaczany jest za pomocą pary masek Sobela).

$$\mathbf{F}_p = \frac{\xi_1}{2}(J(\mathbf{v}) - J_T)\mathbf{k}(s) + \xi_2 \nabla |\nabla J(\mathbf{v})| \quad (8)$$



Rys. 2. Wykres energii E_e w postaci przyjętej w programie „Siatki”.

Składowa \mathbf{F}_i wyznaczana jest na podstawie składowej energii E_S , wynikającej z sumowania energii cząstkowej E_i (4) [3]. Składową \mathbf{F}_e zdefiniowano przy założeniu, że kształt wyznaczanego konturu jest w przybliżeniu okręgiem. Przyjęto, że energia E_e jest dana funkcją radialną (rys.2), która osiąga minimum w pewnej określonej odległości od arbitralnie wybranego punktu \mathbf{v}_0 . Składową \mathbf{F}_e zdefiniowano więc równaniem (9). Parametry β_1 i β_2 pozwalają dobrać stopień z jakim siła oddziałuje na punkty węzłowe oraz odległość od punktu \mathbf{v}_0 , w jakiej występuje minimum odpowiadającej jej energii E_e .

$$\mathbf{F}_e = - \left(\beta_1 |\mathbf{v}(s) - \mathbf{v}_0|^2 + \beta_2 \frac{1}{|\mathbf{v}(s) - \mathbf{v}_0|} \right) \mathbf{k}(s) \quad (9)$$

W programie „Siatki” zaimplementowano cztery modele aktywnego konturu różniące się między sobą. Są to: kontur z punktem środkowym (oryginalne rozwiązanie autora programu [3,4]), kontur standardowy, ciśnieniowy (tzw. ang. balloon) [3] oraz kontur otwarty. W trzech pierwszych przypadkach krzywa konturu jest zamkniętą łamaną, w czwartym modelu krzywa ta jest zamknięta.

W pierwszym z modeli, z punktem środkowym, ograniczono stopień swobody ruchu punktów węzłowych do półprostych biorących swój początek w punkcie \mathbf{v}_0 , rozłożonych promieniście w równych odstępach kątowych. Wartości wszystkich sił oddziałujących na punkty węzłowe są rzutowane na odpowiednie kierunki wyznaczone przez półproste. W równaniach w których występuje

wektor \mathbf{k} , przybiera on kierunek zgodny z kierunkiem półprostych i zwrot od punktu \mathbf{v}_0 .

W modelu standardowym poszczególne punkty węzłowe nie są ograniczone tak jak w modelu z punktem środkowym. Mogą się one poruszać w dowolnych kierunkach powierzchni obrazu. Kierunek wektora \mathbf{k} jest zgodny z kierunkiem wyznaczonym przez punkty węzłowy oraz \mathbf{v}_0 .

W modelu ciśnieniowym nie definiuje się punktu \mathbf{v}_0 a punkty węzłowe mogą się poruszać w dowolnych kierunkach powierzchni obrazu. W modelu tym nie jest uwzględniana siła \mathbf{F}_e . Wektor \mathbf{k} w równaniu (8) przybiera kierunek w przybliżeniu prostopadły do krzywej aktywnego konturu w punkcie węzłowym, skierowany on jest na zewnątrz ograniczanego przez krzywą obszaru.

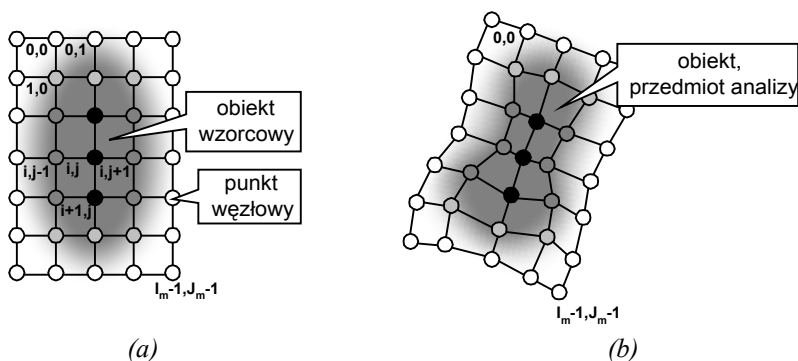
Model otwarty jest modyfikacją modelu konturu ciśnieniowego. W modelu tym występują punkty węzłowe brzegowe, na początku i końcu krzywej. Położenie tych punktów jest ustalone, tzn. nie zmienia się w ciągu procesu dopasowania.

3. DEFORMOWALNY WZORZEC

W programie „Siatki” zaimplementowano również model deformowalnego wzorca (zwany też siatką). Należy on do grupy metod analizy obrazu (*ang. model-based object recognition*) działających na zasadzie porównywania pewnego obrazu wzorcowego (modelu odniesienia) z fragmentem analizowanego obrazu [5,6,7]. Można go stosować do rozpoznawania obiektów przedstawionych na obrazach cyfrowych oraz określania ich położenia.

Deformowalny wzorzec tworzą punkty węzłowe (i, j) , połączone ze sobą odcinkami tworzącymi graf planarny zwany dalej deformowalną siatką. Każdemu punktowi węzłowemu przyporządkowuje się lokalną cechę lub wektor lokalnych cech w punkcie obrazu wzorcowego – modelu odniesienia (rys.3.a). (W programie Siatki wykorzystano dwie cechy: jasność oraz bezwzględną wartość gradientu jasności obrazu.) W ten sposób cała siatka stanowi rodzaj maski zawierającej informację o modelu odniesienia. Tak zdefiniowany deformowalny wzorzec umieszczany jest w płaszczyźnie obrazu poddawanego analizie, poczym jest przeprowadzany iteracyjny proces dopasowania (rys.3.b).

W procesie dopasowania deformowalnego wzorca również wykorzystano równanie ruchu w postaci (6). Wektor siły \mathbf{F} jest w tym przypadku sumą dwu składowych \mathbf{F}_p i \mathbf{F}_i modelujących odpowiednio oddziaływanie obrazu oraz wewnętrzną sprężystość modelu.



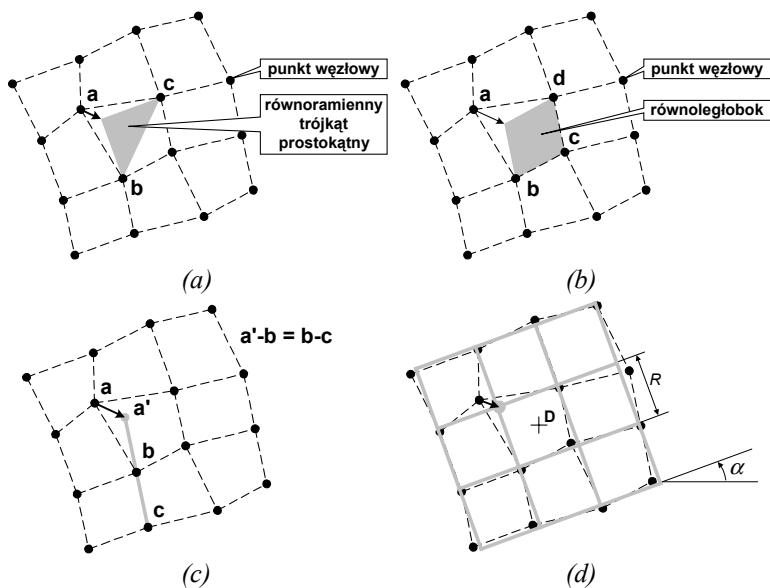
Rys. 3. Idea działania deformowalnego wzorca: definiowanie cech na podstawie obrazu wzorcowego (a), dopasowanie modelu do obrazu analizowanego (b).

Wektor siły oddziaływania obrazu na punkt węzłowy deformowalnej siatki powoduje jego przesunięcie w rejon gdzie lokalne właściwości obrazu są zbliżone do zapamiętanych właściwości wzorca. Niech $\mathbf{W}(i, j)=[w_1(i, j), w_2(i, j), \dots, w_K(i, j)]^T$ będzie wektorem zapamiętanych cech wzorca w punkcie węzłowym (i, j) , $\mathbf{U}(i, j)=[u_1(i, j), u_2(i, j), \dots, u_K(i, j)]^T$ będzie wektorem cech obrazu w tym punkcie. K jest tu liczbą cech w wektorze. Przybliżony gradient \mathbf{G}_k k -tej cechy obrazu można wyznaczyć na podstawie równania (10). W programie „Siatki” przyjęto, że wektor siły oddziaływania obrazu na punkt węzłowy dla k -tej cechy jest obliczany na podstawie równania (11), w którym Z_k jest nieliniową funkcją nieparzystą (12), a parametry T_k i ξ_k są odpowiednio wartością progową oraz wagą określającą wpływ k -tej cechy na punkt węzłowy siatki.

$$\mathbf{G}_k(\mathbf{v}(i, j)) = \frac{(u_k(i+1, j) - u_k(i, j))(\mathbf{v}(i+1, j) - \mathbf{v}(i, j))}{|\mathbf{v}(i+1, j) - \mathbf{v}(i, j)|^2} + \frac{(u_k(i-1, j) - u_k(i, j))(\mathbf{v}(i-1, j) - \mathbf{v}(i, j))}{|\mathbf{v}(i-1, j) - \mathbf{v}(i, j)|^2} + \frac{(u_k(i, j+1) - u_k(i, j))(\mathbf{v}(i, j+1) - \mathbf{v}(i, j))}{|\mathbf{v}(i, j+1) - \mathbf{v}(i, j)|^2} + \frac{(u_k(i, j-1) - u_k(i, j))(\mathbf{v}(i, j-1) - \mathbf{v}(i, j))}{|\mathbf{v}(i, j-1) - \mathbf{v}(i, j)|^2} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_p(i, j) = \sum_{k=1}^K Z_k(u_k(i, j) - w_k(i, j)) \frac{\mathbf{G}_k(\mathbf{v}(i, j))}{|\mathbf{G}_k(\mathbf{v}(i, j))|} \quad (11)$$

$$Z_k(z) = \begin{cases} 0 & \text{gdyn } z < -T_k \text{ lub } z > T_k \\ \xi_k z & \text{gdyn } -T_k < z < T_k \end{cases} \quad (12)$$



Rys.4. Szablony geometryczne.

Wektor siły naprężeń obliczany jest na podstawie współrzędnych wybranego punktu węzłowego oraz współrzędnych punktów sąsiednich. Idea zastosowanej metody [6,7] jest obliczenie na podstawie współrzędnych punktów sąsiednich, współrzędnych jakie „powinien” mieć wybrany punkt węzłowy gdyby siatka była niezniekształcona. Przyjęto cztery rodzaje tzw. szablonów geometrycznych; są to: trójkąt prostokątny równoramienny (rys.4.a), równoległobok (rys.4.b), odcinek (rys.4.c) oraz niezdeformowana siatka regularna (rys.4.d).

W przypadku szablonu pierwszego rodzaju (rys.4.a), trójkąt umieszczany jest tak aby dwa punkty węzłowe **b** i **c** wyznaczały jego przeciwprostokątną. Składowe wektora siły jest proporcjonalny do wektora o początku w punkcie węzłowym **a** i końcu w wierzchołku przyprostokątnym trójkąta. Sposób umieszczania szablonów równoległoboku i odcinka przedstawiono na rys.4.b i c. W przypadku odcinka dwa punkty węzłowe określają współrzędne końca i środka odcinka. Dla każdego z punktów węzłowych leżących w głębi siatki, tworzone są po cztery różne szablony trójkąta, równoległoboku i odcinka, w czterech możliwych ustawieniach. W przypadku punktów węzłowych leżących na brzegu lub w wierzchołku siatki wykorzystywana jest odpowiednio mniejsza liczba szablonów.

Czwarty szablon, niezdeformowana siatka regularna, zdefiniowany jest przez trzy uśrednione parametry deformowalnej siatki: współrzędne jej środka **D**,

uśredniony rozmiar R i kąt nachylenia α . Składnik siły oddziaływania sprężystości, ze względu na ten szablon, jest proporcjonalny do wektora o początku w punkcie węzłowym siatki i końcu w odpowiadającym mu punkcie niezdeformowanej siatki regularnej.

Równania (13), (14), (15) i (16) definiują składniki siły sprężystości obliczane odpowiednio na podstawie szablonu trójkąta, równoległoboku, odcinka i niezdeformowanej siatki regularnej. Parametry τ , ρ_1 , ρ_2 i β są wagami określającymi stopień oddziaływania poszczególnych szablonów.

$$\mathbf{f}_1 = \tau \begin{bmatrix} x_a - \frac{x_b + x_c + y_b - y_c}{2} \\ y_a - \frac{y_b + y_c - x_b + x_c}{2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{f}_2 = \rho_1 \begin{bmatrix} x_a - x_b + x_c - x_d \\ y_a - y_b + y_c - y_d \end{bmatrix} \quad (14)$$

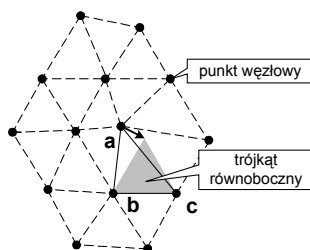
$$\mathbf{f}_3 = \rho_2 \begin{bmatrix} x_a - (2x_b - x_c) \\ y_a - (2y_b + y_c) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{f}_4 = \beta \left(\mathbf{v}_a - \mathbf{D} - \begin{bmatrix} R \cos(\alpha) \left(i - \frac{I_m}{2} \right) + R \sin(\alpha) \left(j - \frac{J_m}{2} \right) \\ R \cos(\alpha) \left(j - \frac{J_m}{2} \right) - R \sin(\alpha) \left(i - \frac{I_m}{2} \right) \end{bmatrix} \right) \quad (16)$$

W programie „Siatki” zaimplementowano również uproszczony model deformowalnego wzorca, model quasi-elastyczny [6]. W siatce modelu quasi-elastycznego nie występują lokalne deformacje, może ona jedynie przemieszczać się po powierzchni obrazu, zmieniać kąt nachylenia oraz rozmiar. Siatka taka jest scharakteryzowana tymi samymi wielkościami (\mathbf{D} , R , α), które definiują szablon niezdeformowanej siatki regularnej. Zaletą tego modelu jest krótki czas dopasowania, wynikający z mniejszej liczby operacji arytmetycznych wykonywanych w pojedynczej iteracji oraz mniejszej liczby iteracji potrzebnych do jego dopasowania. W programie umożliwiono analizę obrazu z sekwencyjnym wykorzystaniem modelu quasi-elastycznego (do szybkiego, zgrubnego dopasowania siatki) oraz modelu o pełnej elastyczności, inicjowanego w położeniu wyznaczonym przez model quasi-elastyczny (do dokładnego dopasowania).

Dodatkową opcją programu jest możliwość zmiany konfiguracji połączeń punktów węzłowych, z siatki prostokątnej na trójkątną (o heksagonalnej strukturze połączeń pomiędzy węzłami). W przypadku siatki trójkątnej, przy obliczaniu wewnętrznych naprężeń, zamiast szablonu trójkąta prostokątnego wykorzystywany jest trójkąt równoboczny (rys.5). W siatce takiej zwiększa się liczba szablonów używanych do wyznaczenia siły \mathbf{F}_i . Np. dla punktów leżących w głębi siatki, wykorzystuje się po sześć szablonów trójkąta, równoległoboku i

odcinaka zamiast po cztery. Odpowiednio zmodyfikowane jest również równanie (10) i (16).

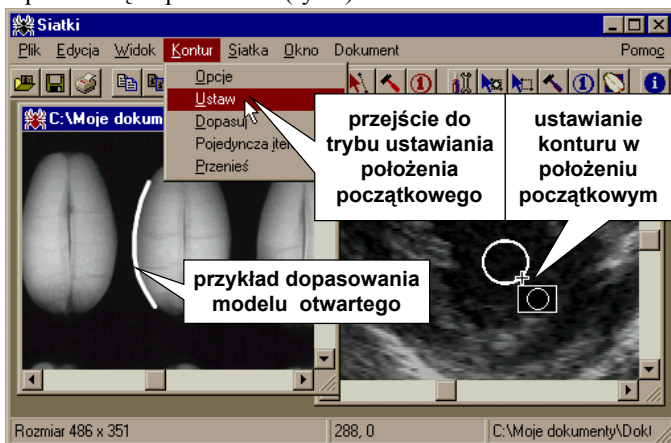


Rys.5. Zmodyfikowany szablon trójkątnej w siatce trójkątnej.

Metoda obliczania naprężeń za pomocą szablonów geometrycznych [6,7] oraz metoda sekwencyjnego zastosowania modelu quasi-elastycznego i modelu o pełnej elastyczności [6] są oryginalnymi rozwiązaniami autora programu.

4. WYZNACZANIE KONTURU

W celu wyznaczenia konturu za pomocą programu „Siatki”, należy dokonać wyboru odpowiedniego modelu aktywnego konturu, dobrać parametry w zależności od analizowanego obrazu, ustawić kontur w położeniu początkowym i uruchomić procedurę dopasowania (rys.6).



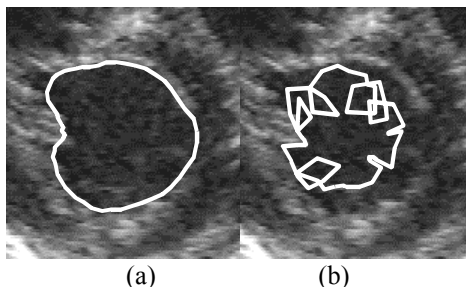
Rys.6. Okno programu „Siatki” – analiza obrazu z zastosowaniem modelu aktywnego konturu.

Określenie jaki model aktywnego konturu należy wybrać do przeprowadzenia analizy nie jest zagadnieniem trywialnym. Przykładowo, w modelu z punktem środkowym jest łatwiej dobrać odpowiednie parametry niż w

przypadku pozostałych modeli. Ograniczenie swobody ruchu punktów węzłowych powoduje, że proces dopasowania przebiega stabilnie dla stosunkowo szerokiego zakresu wartości parametrów. Wadą tego modelu jest możliwość wyznaczania konturu obszaru o nieskomplikowanej linii brzegowej. Większa komplikacja modelu pozwala na wyznaczenie konturów o skomplikowanych kształtach, jednak wymaga większej uwagi jeśli chodzi o dobór parametrów. Rys.7 przedstawia przykład zastosowania aktywnego konturu do wyznaczenia brzegu obiektu o skomplikowanym kształcie (obiekt zwinięty spiralnie). W tym przypadku konieczne jest zastosowanie modelu ciśnieniowego. Zastosowanie prostszego modelu nie pozwala uzyskać prawidłowego kształtu konturu. Rys.8 przedstawia natomiast przykład wyznaczenia obrysu lewej komory serca w obrazie ultrasonograficznym. Ponieważ kształt komory serca jest owalny, sprawdza się w tym przypadku model z punktem środkowym. Model ciśnieniowy ulega nieprawidłowemu zniekształceniu wynikającemu z oddziaływania zakłóceń obrazu na punkty węzłowe konturu.



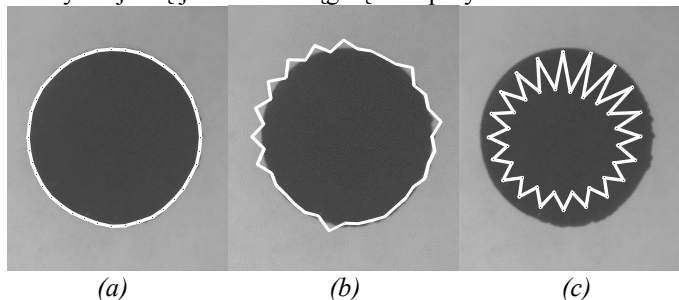
Rys.7. Przykład zastosowania aktywnego konturu do wyznaczania brzegu obiektu o złożonym kształcie: model z punktem środkowym (a) oraz model ciśnieniowy (b).



Rys.8. Przykład zastosowania aktywnego konturu do wyznaczania konturów lewej komory serca w obrazie ultrasonograficznym: model z punktem środkowym (a) oraz model ciśnieniowy(b).

Wzajemna zależność ruchu punktów węzłowych oraz to, że na ich ruch ma wpływ obraz o niezaplanowanym rozkładzie jasności, często zakłócony, nie

pozwała w praktyce na przeprowadzenie analitycznego rozważania na temat optymalnego doboru wartości parametrów. Najlepsza okazuje się metoda prób i błędów, w której dla obrazów określonej klasy dobiera się wartości parametrów, sprawdza zachowanie aktywnego konturu podczas procesu dopasowania, a następnie modyfikuje się je w celu osiągnięcia lepszych efektów.

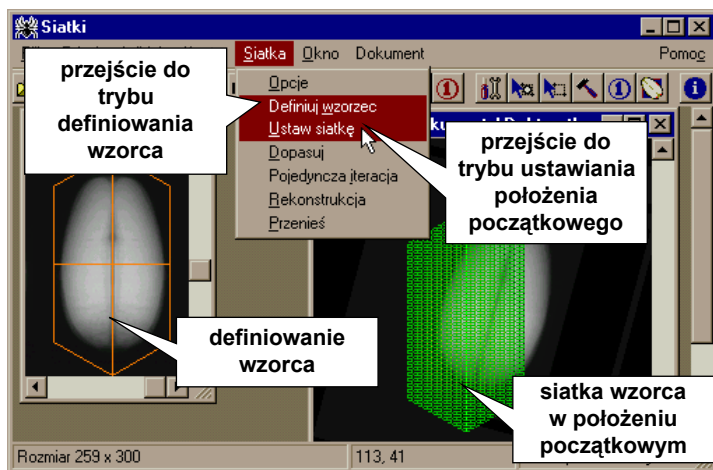


Rys.9. Dopasowanie prawidłowe (a), efekt oscylacji spowodowany przez wpływ obrazu (b) oraz zbyt dużą wartość parametrów sprężystości (c).

Należy też zwrócić uwagę, że wymogi dotyczące szybkości oraz dokładności procesu dopasowania aktywnego konturu zazwyczaj są przeciwstawne. Czas konieczny do przeprowadzenia procesu dopasowania można zmniejszyć poprzez zwiększenie sił oddziaływania obrazu na punkty węzłowe (zwiększenie wartości parametrów ξ) lub zmniejszenie wartości lepkości środowiska l . Przekroczenie jednak pewnych granicznych wartości może spowodować niepożądane zjawiska. Nadmierne zmniejszenie parametru l powoduje, że poszczególne punkty wpadają w oscylacje i proces dopasowania przestaje być stabilny. Podobny efekt ma nadmierne zwiększanie wpływu sił oddziaływania obrazu lub parametrów sprężystości (rys.9). Należy też zwrócić uwagę, że przyspieszenie procesu dopasowania jest jednoznaczne ze zwiększeniem drogi jaką pokonują punkty węzłowe w poszczególnych iteracjach. Może to spowodować „przeskoczenie” przez nie tych miejsc w obrazie, które niosą istotną informację.

5. ROZPOZNAWANIE OBIEKTU

Aby dokonać rozpoznania obiektu w obrazie należy dokonać wyboru odpowiedniego modelu deformowalnego wzorca, dobrać jego parametry oraz zdefiniować cechy obrazu wzorcowego w węzłach siatki. Aby zdefiniować cechy wystarczy załadować do programu obraz wzorcowy i, w trybie definiowania wzorca, za pomocą kursora wskazać położenie obiektu odniesienia. W drugim etapie, w trybie ustawiania siatki, należy wskazać przybliżone położenie obiektu poddawanego analizie i uruchomić procedurę dopasowania (rys.10).

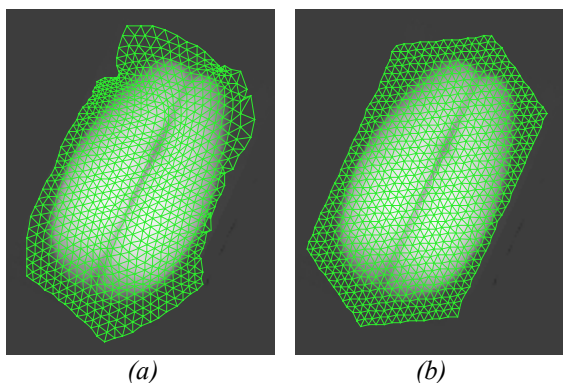


Rys.10. Okno programu „Siatki” – analiza obrazu z zastosowaniem modelu deformowalnego wzorca.

W przypadku deformowalnego wzorca, doboru parametrów modelu, podobnie jak w przypadku aktywnego konturu, należy dokonać metodą prób i błędów. Model połączeń punktów węzłowych siatki należy dobrać w zależności od wielkości i kształtu wzorca. Siatka trójkątna może okazać się wygodniejsza do odwzorowania obiektów o owalnym kształcie. Siatka prostokątna natomiast, o mniejszej liczbie połączeń pomiędzy węzłami, może szybciej dopasowywać się do obiektów poddawanych analizie. Siatka musi mieć wystarczająco duże rozmiary a punkty węzłowe powinny być rozmieszczone na tyle gęsto, aby cały obiekt wzorcowy został w wystarczającym stopniu odwzorowany w węzłach siatki.

Parametry związane z siłą oddziaływania obrazu należy dobrać w zależności od rozkładu jasności analizowanych obrazów. W przypadku obrazów bardzo kontrastowych należy zmniejszyć siłę oddziaływania obrazu poprzez zmniejszenie wartości parametrów ζ we wzorze (11). Gdy parametry ζ mają zbyt duże wartości wówczas punkty węzłowe będą wpadać w oscylacje w miejscach, w których na obrazie występuje skok jasności.

Parametry τ , ρ_1 , ρ_2 i β związane z siłami sprężystości należy dobrać obserwując zachowanie punktów węzłowych w kolejnych iteracjach procesu dopasowania. Wartości te powinny być na tyle duże, by zapobiegać nadmiernym odchyleniom pojedynczych punktów węzłowych względem ich najbliższych sąsiadów i na tyle małe, by nie powodować niestabilności numerycznej, nieprawidłowych wahań lub oscylacji węzłów.

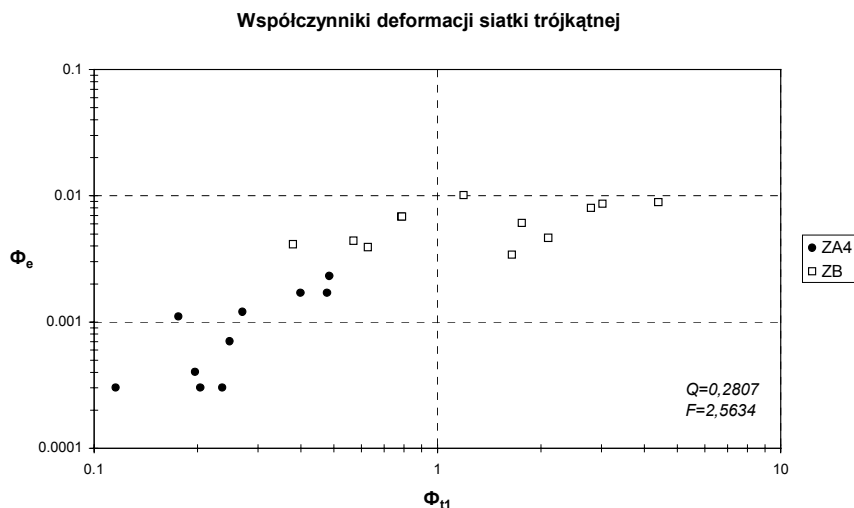


Rys.11. Dopasowanie siatki bez uwzględnienia (a) oraz z uwzględnieniem globalnej sztywności (b)

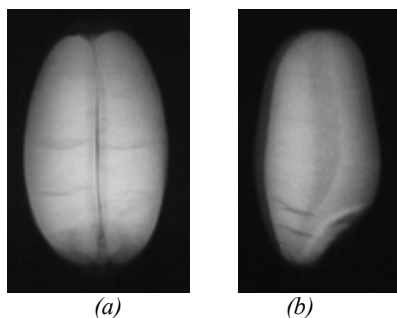
Parametr β określający globalną sztywność siatki (związany z szablonem niezdeformowanej siatki regularnej) powinien być na tyle mały, by zapobiegać jedynie deformacjom, które nie są prawidłowo korygowane przez siły o zasięgu lokalnym. Na rys.11 zaprezentowano dwa przypadki, w których do analizy obiektu wykorzystano siatkę o pełnej elastyczności. Za wyjątkiem parametru β , w obu przypadkach, wszystkie parametry siatki oraz jej miejsce inicjalizacji były identyczne. W przykładzie tym siatka, w której nie uwzględniono globalnej sztywności dopasowała się nieprawidłowo do analizowanego obrazu.

Model deformowalnego wzorca można wykorzystać do rozpoznawania obiektów. Na podstawie stopnia deformacji siatki, po jej dopasowaniu, można określić czy i w jakim stopniu analizowany obiekt jest podobny do obiektu wzorcowego. Odpowiednie współczynniki deformacji zdefiniowano jako sumy kwadratów wartości bezwzględnych sił naprężeń w poszczególnych węzłach siatki. Mniejsza wartość takiego współczynnika świadczy o większym podobieństwie.

Na rys.12 przedstawiono wykres współczynników deformacji deformowalnego wzorca obliczanych dla szablonu trójkąta równobocznego (Φ_{t1}) oraz szablonu niezdeformowanej siatki regularnej (Φ_e). Analizie poddano serie obrazów rentgenowskich przedstawiających ziarna pszenicy w rzucie na wprost (seria ZA4, przykład na rys.13.a) oraz w rzucie bocznym (seria ZB, przykład na rys.13.b). Modelem odniesienia deformowalnej siatki było wybrane ziarno przedstawione w rzucie bocznym. Uzyskane wyniki pozwalają na prawidłową klasyfikację wszystkich analizowanych w tych seriach obrazów.



Rys.12. Wyniki analizy obrazu polegającej na rozpoznawaniu rzutu ziarna pszenicy.

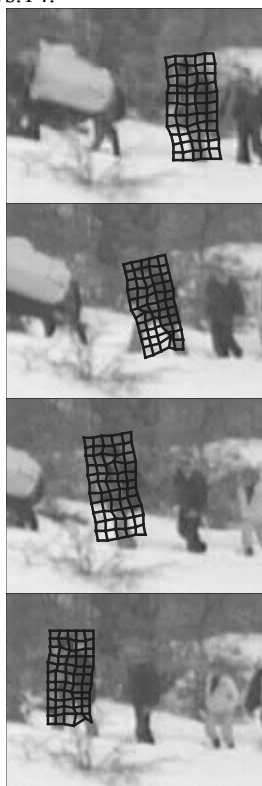


Rys.13. Wyniki analizy obrazu polegającej na rozpoznawaniu rzutu ziarna pszenicy.

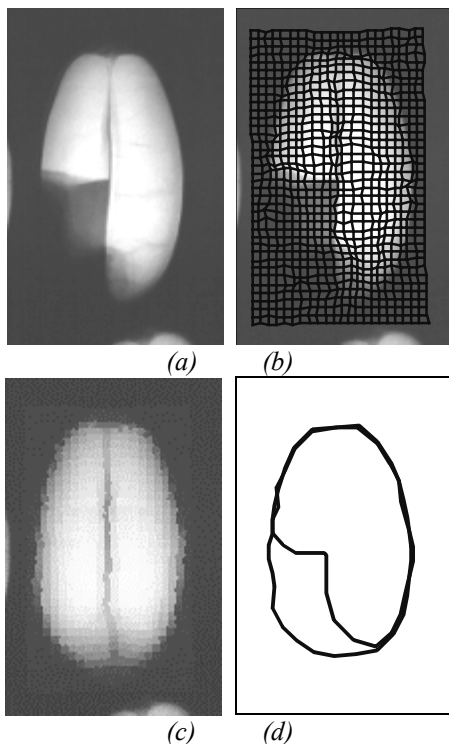
6. DODATKOWE OPCJE ANALIZY

Program „Siatki” pozwala na przeniesienie deformowalnego modelu z jednego obrazu na inny obraz cyfrowy. Opcja ta umożliwia np. analizę serii obrazów przedstawiających poruszający się obiekt. Wykorzystując model deformowalnego wzorca, można przeprowadzić proces dopasowania dla pierwszego obrazu z serii, przenieść siatkę wzorca na następny obraz z serii,

ponownie dokonać dopasowania, itd. Przykład takiej analizy przedstawiono na rys.14.



Rys.14. Śledzenie poruszającego się obiektu w serii obrazów cyfrowych (przedstawiono wybrane klatki filmu).



Rys.15. Wyznaczenie ubytku ziarna: obraz oryginalny(a), deformowalny wzorec po dopasowaniu do obrazu (b), obraz po rekonstrukcji (c), porównanie wyników segmentacji za pomocą aktywnego konturu dla obrazu oryginalnego i po rekonstrukcji (d).

Inną opcją programu jest tzw. rekonstrukcja obiektu. Polega ona na przetworzeniu analizowanego obrazu. Po dopasowaniu deformowalnego wzorca, informacje o jasności modelu odniesienia zawarte w węzłach siatki są przenoszone na powierzchnię obrazu poddanego analizie. Procedura rekonstrukcji pozwala na odtworzenie obiektu, który jest częściowo przesłonięty lub niekompletny. Na rys.15 przedstawiono wynik analizy stopnia uszkodzenia (zdekompletowania) ziarna z wykorzystaniem opcji rekonstrukcji.

W programie siatki umożliwiono zapis i odczyt kompletu danych o deformowalnych modelach, w tym parametrów modelu aktywnego konturu i

deformowalnej siatki, cech obrazu wzorcowego w węzłach siatki oraz współrzędnych punktów węzłowych modeli. Zastosowano tekstowy format zapisu tych danych co pozwala na ich łatwą analizę, np. za pomocą programów typu arkusz kalkulacyjny. Program umożliwi również zapis do pliku oraz przenoszenie do innych programów poprzez schowek obrazów w postaci map bitowych (*.bmp) lub metaplików (*.emf). Możliwy jest zapis całego obrazu lub jego fragmentu wraz z umieszczonym na nim modelem.

7. PODSUMOWANIE

Program „Siatki” jest wygodnym narzędziem analizy obrazów. Służył on dotychczas do prowadzenia badań porównawczych metod analizy obrazów wykorzystujących deformowalne modele i metod konwencjonalnych. Zawarte w programie algorytmy były optymalizowane ze względu na efektywność wykonania analizy. Ich przydatność została sprawdzona dla kilku różnych klas obrazów, takich jak: obrazy ultrasonograficzne i MRI serca (zastosowanie w diagnostyce medycznej), rentgenowskie obrazy ziaren zbóż (zastosowanie do analizy jakości w rolnictwie), serie obrazów przedstawiających obiekty w ruchu (zastosowanie w służbach ochrony) i obrazy testowe.

Program może zostać udostępniony do prac badawczych i dydaktycznych za zgodą jego autora.

LITERATURA

- [1] M. Kass, A. Witkin, D. Terazopoulos, *Snakes: Active Contour Models*, Proc. First International Conference on Computer Vision, June 8-11, 1987, pp. 259-263.
- [2] F. Leymarie, M. D. Levine, *Simulating the Grassfire Transform using an Active Contour Model*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 1, January 1992, pp. 56-75.
- [3] 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.
- [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] X. Wu, B. Bhanu, *Gabor Wavelet Representation for 3-D Object Recognition*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 6, no. 1, January 1997, pp. 47-64.
- [6] P. Szczypiński, A. Materka, *Variable-Flexibility Elastic Model for Digital Image Analysis*, XXI KKTOiUE, Kiekrz, 1998.
- [7] P. Szczypiński, A. Materka, *Zastosowanie deformowalnych struktur w analizie obrazów*, WEE PŁ Elektronika-Prace Naukowe, Łódź 1998, Zeszyt nr 3, pp.37-49.

Piotr Szczypiński urodził się w 1971r. W roku 1995 ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Od 1995r jest słuchaczem Studium Doktoranckiego przy ww. wydziale. Zajmuje się problemami analizy obrazów cyfrowych.

Andrzej Materka - notka biograficzna zamieszczona w poprzednim numerze Zeszytów Naukowych ELEKTRONIKA

A COMPUTER PROGRAM FOR IMAGE ANALYSIS WITH DEFORMABLE MODELS

Abstract: *This article presents techniques for image analysis with deformable models. The active contour model for image edges detection and image segmentation is presented. Also, a deformable grid is introduced, a model for finding object position within the image and for object recognition. Furthermore, author's original modifications to these models are presented. Finally, an original computer program "Siatki" is introduced. "Siatki" is a tool for digital image analysis with active contour model and deformable grid. It is described how to operate and how to perform an image analysis with the program.*

Research into deformable models is supported by the grant KBN no. 8T11C02017.

Piotr Szczypiński, Andrzej Materka

Institute of Electronics, Technical University of Łódź,

18 Stefanowskiego, 90-924 Łódź, Poland

e-mail: pms@ck-sg.p.lodz.pl , materka@ck-sg.p.lodz.pl