

Leszek Luchowski

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Progowanie obrazów płaskich scen binarnych

Streszczenie. W artykule opisano niektóre problemy związane z segmentacją obrazów przez progowanie, zwłaszcza w warunkach nierównomiernego oświetlenia. Zdefiniowano pojęcie płaskiej sceny binarnej. Zestawiono metody spotykane w dostępnej literaturze, kierując się klasycznym podziałem na progowanie globalne, lokalne i dynamiczne. Przedstawiono kilka szczególnych przypadków, jak lokalna weryfikacja progów i progowanie wielostopniowe. Opisano sposoby oceny warunków lokalnego oświetlenia, wykorzystywane w progowaniu dynamicznym, oraz stosowane metody interpolacji i aproksymacji. We wnioskach wskazano na potrzebę stworzenia ogólnego modelu problemu i kryteriów porównania poszczególnych rozwiązań.

THRESHOLDING IMAGES OF FLAT BINARY SCENES

Summary. The paper presents some problems related to image segmentation by thresholding, in particular under uneven lighting conditions. The notion of flat binary scene is introduced. Methods found in literature are reviewed, following the classical division into global, local and dynamic thresholding. Special cases are presented, like local threshold verification and multiple thresholding. Methods of local lighting estimation, used in dynamic thresholding, are described, as well as the relevant interpolation and approximation methods. Conclusions point to the need to create a general model of the problem and criteria to compare the individual methods.

SEUILLAGE D'IMAGES DES SCENES BINAIRES PLATES

Résumé. L'article présente quelques problèmes de la segmentation d'images par seuillage en niveaux de gris, surtout dans des conditions d'éclairage non-homogène. La notion de scène binaire plate est introduite. Les méthodes trouvées dans la littérature sont revues selon le classement classique en seuillage global, local et dynamique. Des cas particuliers sont présentés, comme la vérification locale du seuil et le seuillage multiple. Les méthodes d'estimation de l'éclairage local, appliquées dans le seuillage dynamique, sont revues, de même que les méthodes d'interpolation et d'approximation utilisées. Les conclusions indiquent le besoin de créer un modèle général et des critères pour comparer des solutions particuliers.

1. Wprowadzenie

Kluczowym etapem analizy obrazu jest jego segmentacja, tj. wyróżnienie w obrazie obszarów istotnych z punktu widzenia analizowanej treści. Wynikiem segmentacji jest opis obiektów w kategoriach geometrycznych, np. kontur każdego obszaru opisany ciągiem wektorów. W ten sposób następuje przejście od obrazu jako prostokątnej tablicy pikseli do struktury danych logicznie (choć na niskim poziomie abstrakcji) związanej z przedstawionym na obrazie fragmentem rzeczywistości. Równocześnie następuje zazwyczaj radykalne zmniejszenie objętości przetwarzanych danych (o jeden do kilku rzędów wielkości). Dalsze przetwarzanie może się odbywać np. metodami syntaktycznymi lub geometrii obliczeniowej.

1.1. Pojęcie płaskiej sceny binarnej

Ważną kategorię obrazów stanowią obrazy płaskich scen binarnych. Scenę, czyli przedstawiony na obrazie fragment rzeczywistości, nazywamy płaską, jeżeli z punktu widzenia danego zastosowania istotne są tylko jej cechy dwuwymiarowe. Scenę płaską nazywamy binarną, jeżeli występują w niej dwie kategorie obszarów, różniące się jasnością. Za płaskie sceny binarne można na przykład uważać:

- teksty (pisane lub drukowane jednobarwnie),
- rysunki techniczne,
- jednobarwne, płaskie części mechaniczne, leżące na jednorodnym tle,
- symbole graficzne, ideogramy,
- niektóre próbki mikroskopowe,
- wyświetlacze LCD i LED,
- tarcze niektórych przyrządów wskazówkowych (zegarów, mierników).

Należy zaznaczyć, że pojęcie sceny „binarnej” jest względne i zależy od wymaganego poziomu szczegółowości. W każdym z wymienionych przykładów zarówno obiekty, jak i tło przy dokładniejszej analizie wykażą bardziej złożoną strukturę (włókna papieru, mikrorysy na próbce, wewnętrzna budowa krwinek itd.). To samo dotyczy określenia „płaska”.

1.2. Scena a obraz

Scena jest dostępna analizie cyfrowej jedynie poprzez swój obraz cyfrowy $I(x, y)$. Odwzorowanie sceny w obrazie obciążone jest szeregiem niedoskonałości:

- nierównomierne oświetlenie sceny,
- zniekształcenia toru optycznego (mikroskopu, obiektywu) i kamery:
 - geometryczne,
 - zmiany jasności w funkcji odległości od osi układu optycznego,
 - nierównomierna czułość czujnika obrazu (vidiconu, płytki CCD...),
- skończona rozdzielczość próbkowania i kwantowania,
- szумы.

2. Segmentacja przez progowanie a inne metody segmentacji

Segmentacji obrazów płaskich scen binarnych często dokonuje się przez progowanie obrazu, a następnie znajdowanie obszarów spójnych w obrazie binarnym.

85	74	74	82	87	85	76	72	85	100
74	75	83	91	97	92	81	74	77	93
70	82	93	99	102	101	87	74	77	91
80	91	100	103	106	104	92	78	79	90
93	100	103	105	106	104	93	78	80	91
97	97	97	98	97	92	82	72	74	86
93	88	84	83	79	78	71	70	75	80
o	o	o	o	o	o	o	o	o	1
o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
o	o	o	o	1	1	o	o	o	o
o	o	1	1	1	1	o	o	o	o
o	1	1	1	1	1	o	o	o	o
o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
o	o	o	o	o	o	o	o	o	o

Rys. 1. Przykład: fragment obrazu surowego i po progowaniu stałym progiem 100
 Fig. 1. Example: raw image fragment and same fragment thresholded with fixed threshold 100

2.1. Segmentacja przez progowanie

Progowaniem nazywamy klasyfikowanie punktów obrazu ze względu na ich jasność. Wynikiem progowania jest obraz binarny, tj. mający w każdym punkcie wartość 1 (punkt zaliczony do obiektu/obiektów) lub 0 (punkt zaliczony do tła). Rys. 1 przedstawia przykładowy fragment obrazu przed i po progowaniu. Uzyskany obraz binarny można poddać obróbce (filtracji) metodami morfologii matematycznej. Znalezienie obszarów spójnych w obrazie binarnym kończy segmentację.

2.1.1. Uwagi implementacyjne

Obraz binarny tworzony w wyniku progowania nie musi powstać w postaci jawnej, jako macierz zer i jedynek. Aby nie zajmować nadmiernie pamięci, a równocześnie nie tracić półtonów obrazu wyjściowego, często stosuje się następujące rozwiązania:

- Przy progowaniu globalnym oblicza się tylko próg, sam obraz pozostawiając bez zmian. Porównanie poszczególnych punktów z progiem następuje przy ich odczycie (np. przez procedurę śledzenia konturów), co jest równoważne z odczytem obrazu binarnego.
- Przy progowaniu lokalnym lub dynamicznym tworzy się obraz ze skorygowanym oświetleniem:

$$I_{corr}(x, y) = I(x, y) - T(x, y, N(x, y)) + c,$$

gdzie

$T(x, y, N(x, y))$ – próg,

c – stała normalizująca

2.2. Segmentacja przez detekcję konturów

Często stosowaną metodą segmentacji jest detekcja konturów za pomocą operatorów o charakterze różniczkującym (np. znajdowanie miejsc o wysokiej pierwszej pochodnej funkcji $I(x, y)$). Podejście takie wymaga jednak skomplikowanego przetwarzania uzyskanych konturów w celu ich domknięcia, zwłaszcza w obrazach o słabym kontraście (przykład - rys. 2). Kontury uzyskane w wyniku progowania są zawsze domknięte [4].

2.3. Segmentacja metodami dzielenia i łączenia

Ważną klasę metod stanowią algorytmy dzielenia i łączenia (ang. split-and-merge techniques). Działanie ich rozpoczyna się od arbitralnego podziału obrazu na obszary, zwykle siatką kwadratową. Wielkość tego pierwotnego podziału bywa różna, od siatki „atomowej” (każdy piksel obszarem dla siebie) do sytuacji, kiedy cały obraz jest traktowany jako jeden obszar.

92	40	56	84	84	68	48	24	108	120
48	28	60	68	60	56	76	8	80	120
32	72	60	48	40	60	96	36	64	108
84	72	44	24	16	56	104	48	52	88
72	40	20	20	32	52	96	44	52	68
28	40	72	88	100	100	76	40	48	44
76	68	92	104	96	72	28	16	36	12
1	o	o	1	1	1	o	o	1	1
o	o	1	1	1	o	1	o	1	1
o	1	1	o	o	1	1	o	1	1
1	1	o	o	o	o	1	o	o	1
1	o	o	o	o	o	1	o	o	1
o	o	1	1	1	1	1	o	o	o
1	1	1	1	1	1	o	o	o	o

Rys. 2. Ten sam fragment po detekcji konturów (op. Sobela) i progowaniu stałym progiem 60
 Fig. 2. Same fragment after (Sobel) contour detection and thresholding with fixed threshold 60

Ten wstępny podział jest następnie modyfikowany według dwóch zasad:

1. Jeżeli pewien obszar jest niejednorodny (według pewnego przyjętego kryterium jednorodności), należy go podzielić na dwa mniejsze;
2. Jeżeli suma dwu sąsiadujących ze sobą obszarów jest jednorodna (według tegoż kryterium), należy je połączyć w jeden obszar.

Spotyka się również rozwiązania stosujące tylko łączenie obszarów; punktem wyjścia jest wtedy siatka „atomowa”. W piśmiennictwie anglojęzycznym takie metody określa się jako „region growing”. W języku polskim można zaproponować termin „narastanie obszarów”.

Metody dzielenia i łączenia wymagają rozbudowanych struktur danych, obejmujących cały obraz. Autor nie zajmował się nimi praktycznie ze względu na ograniczenia sprzętowe. Szerszy przegląd metod segmentacji podaje Fu [4].

3. Klasyfikacja metod progowania

W jednym z klasycznych opracowań ([5]) podzielono metody progowania obrazu na trzy kategorie:

- progowanie globalne:

$$B(x, y) = F(I(x, y))$$
- progowanie lokalne:

$$B(x, y) = F(I(x, y), N(x, y))$$

- progowanie dynamiczne:

$$B(x, y) = F(I(x, y), N(x, y), x, y)$$

gdzie:

$B(x, y)$ - wartość obrazu binarnego w punkcie (x, y) ;

$I(x, y)$ - wartość obrazu w stopniach szarości w punkcie (x, y) ;

$N(x, y)$ - lokalna własność obrazu w stopniach szarości w pewnym sąsiedztwie punktu (x, y) ;

$F(\dots)$ - funkcja opisująca progowanie.

Poniżej zajmiemy się - w każdej z tych klas - jedynie progowaniem jednym progiem, tj. sytuacją, kiedy obiekty można utożsamiać ze zbiorem punktów „jasnych”, a tło - ze zbiorem punktów „ciemnych” (lub odwrotnie, co pominiemy dla ustalenia uwagi). Innymi słowy, rozpatrywane funkcje $F(I(x, y), \dots)$ będą postaci $F(I(x, y), \dots) = 1(I(x, y) - T(\dots))$. Funkcję (w najprostszym przypadku stałą) T nazywamy progiem.

Bardziej złożoną sytuacją, kiedy obiekt może być zarówno ciemniejszy, jak i jaśniejszy od tła, opisuje np. Mardia i Hainsworth [12]. Założono tam, że stopnie szarości pikseli należą do dwu populacji, z których każda ma normalny rozkład prawdopodobieństwa. Następnie zastosowano klasyfikację na zasadzie maksymalnego prawdopodobieństwa a posteriori. Jeżeli wartości średnie obu rozkładów są zbliżone, a ich wariancje znacznie się różnią, to klasyfikacja bayesowska może podzielić zakres jasności na trzy odcinki.

4. Progowanie globalne - metody doboru progu

Progowanie globalne jednym progiem polega na wyznaczeniu stałego progu T i przyurządzeniu:

$$B(x, y) = 1 \Leftrightarrow I(x, y) \geq T$$

$$B(x, y) = 0 \Leftrightarrow I(x, y) < T$$

Piśmiennictwo pomija zwykle kwestię punktów o jasności dokładnie równej progowi. Autor przyjął zasadę zaliczania ich do jaśniejszej części obrazu. Formalnie najwłaściwszym rozwiązaniem byłby wybór progu *między* stopniami szarości, a więc typu $T = m + 0.5, m \in N$.

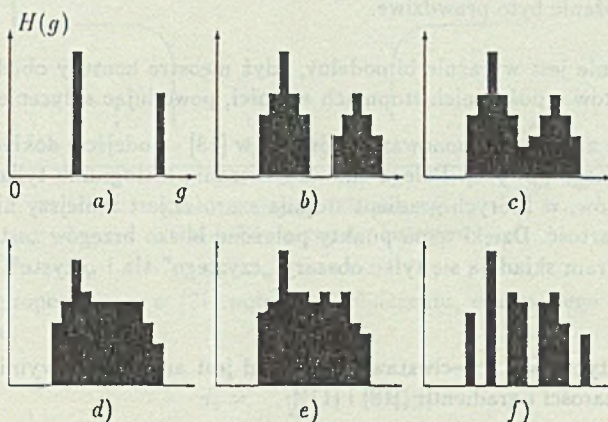
Metody wyznaczania progu opisane w tym rozdziale wykorzystywane są również w progowaniu lokalnym i dynamicznym.

Podstawą do wyznaczenia progu jest zwykle histogram $H(g)$ stopni szarości badanego obrazu:

$$H(g) = |\{(x, y) : I(x, y) = g\}|$$

gdzie:

$$|A| - \text{liczba elementów zbioru } A.$$



Rys. 3. Histogramy obrazów scen binarnych
 Fig. 3. Histograms of binary scene images

W przypadku idealnego obrazu sceny binarnej (bez zaburzeń jasności) histogram ma wartość niezerową tylko dla dwu stopni szarości (rys. 3 a).

W jednym z pierwszych podejść do tego zagadnienia [6] zaproponował wyznaczanie progu w określonym kwantylu histogramu. Jest to równoznaczne z założeniem, że z góry znamy udział jasnych punktów w powierzchni obrazu. Takie podejście jest uzasadnione np. w przypadku analizy równomiernie wypełnionych stron druku lub maszynopisu.

W przypadku histogramu bimodalnego, jak na rys. 3 a - c, autorzy opracowania [22] proponują określenie progu w najgłębszej dolinie histogramu. Prawidłowe wyznaczenie tej doliny bywa utrudnione przez „nieładny” kształt histogramu:

- w histogramie pojawiają się nierówności (często w postaci wąskich, głębokich dolin), wynikające z kwantowania i przypadkowego rozkładu stopni szarości.

Jako rozwiązanie zaproponowano wygładzające filtrowanie histogramu, np. metodą średniej bieżącej.

- histogram nie jest wyraźnie bimodalny, gdyż jedna z części obrazu (obiekty albo tło) zajmuje powierzchnię o wiele większą niż druga.

Jednym z możliwych rozwiązań jest - zaproponowane w [18] - obliczanie histogramu tylko na podstawie tych punktów, w których gradient stopnia szarości jest większy niż pewna minimalna wartość. Są to - z pewnym przybliżeniem - punkty położone blisko brzegów, a zatem rozległe wewnątrz jednych lub drugich obszarów nie dominuje w tak obliczonym histogramie.

Jeżeli przyjęte minimum gradientu jest wysokie, otrzymany histogram może być unimodalny. Próg wyznacza się wtedy w maksimum histogramu, przyjmując założenie, że stopień szarości punktów brzegowych jest pośredni między obiektami a tłem. Autorzy metody proponują wstępne wygładzenie obrazu (z rozmyciem konturów), aby to założenie było prawdziwe.

- histogram nie jest wyraźnie bimodalny, gdyż nieostre kontury obiektów zawierają dużo punktów o pośrednich stopniach szarości, powodując spływanie doliny.

W związku z tym zaproponowano - również w [18] - podejście dokładnie przeciwne do omówionego powyżej. Polega ono na obliczaniu histogramu tylko na podstawie tych punktów, w których gradient stopnia szarości jest mniejszy niż pewna maksymalna wartość. Dzięki temu punkty położone blisko brzegów zostają odrzucone, a na histogram składają się tylko obszary „czystego” tła i „czyste” wnętrza obiektów.

Połączeniem tych dwu przeciwstawnych metod jest analiza dwuwymiarowego histogramu stopnia szarości i gradientu ([18] i [17]):

$$H(g, g') = | \{ (x, y) : I(x, y) = g \wedge I'(x, y) = g' \} |$$

gdzie:

$I'(x, y)$ - gradient obrazu w punkcie (x, y) ,

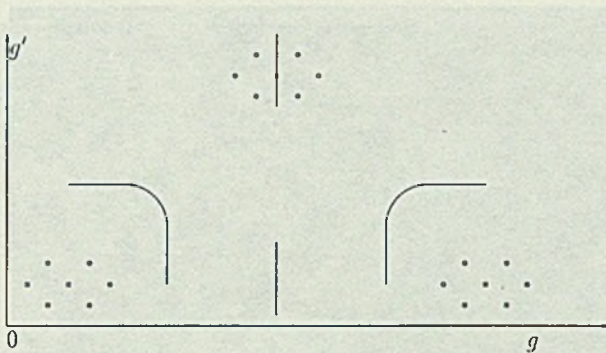
$| A |$ - liczba elementów zbioru A.

Taki histogram często - dla omawianego tu typu obrazów - wykazuje trzy skupienia punktów:

lp.	wartość g	wartość g'	interpretacja
1	niska	niska	obszary ciemne
2	średnia	wysoka	granice
3	wysoka	niska	obszary jasne.

Rysunek 4 przedstawia taki histogram (silnie wyidealizowany). Dwie krótkie, pionowe linie na tym rysunku przedstawiają progowanie według histogramu punktów o wysokim gradiencie (linia górna) lub o niskim gradiencie (linia dolna).

Analizując skupiska (ang. clusters) w histogramie dwu parametrów można klasyfikować piksele w sposób bardziej elastyczny. W zależności od potrzeb można punkty brzegowe zaliczyć do ciemnej lub do jasnej części obrazu (na rysunku przedstawiono to dwoma lukami).



Rys. 4. Histogram dwu parametrów

Fig. 4. Two-parameter histogram

Metoda zaproponowana w [21] polega na obliczeniu, dla każdego stopnia szarości, sumy gradientu:

$$d_z = \sum_{x,y:I(x,y)=z} I'(x,y)$$

gdzie:

$I'(x,y)$ - gradient obrazu w punkcie (x,y) ,

i przyjęciu progu

$$T : d_T = \max_z(d_z) .$$

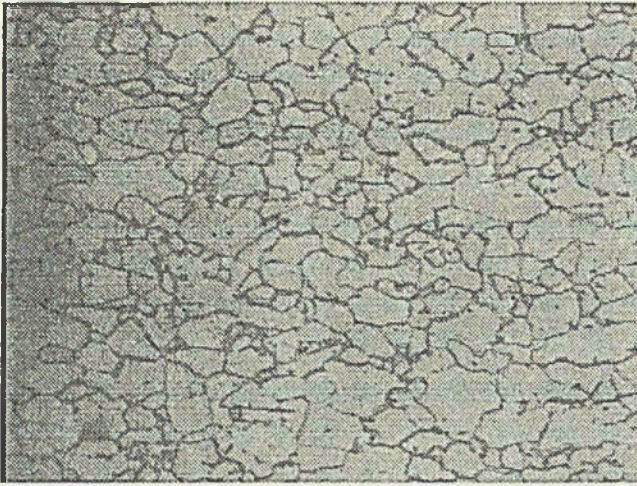
W ten sposób progowanie dzieli obraz wzdłuż prawdopodobnych granic obiektów.

Stosuje się również badanie zależności pewnych cech sprogowanego obrazu od stosowanego progu, by następnie wybrać ten próg, dla którego badany parametr osiąga ekstremum lub określoną wartość pochodnej. W ten sposób [13] bada globalny estymator współczynnika kształtu. Podobnie [20] badają stabilność obwodu obiektu w funkcji progu.

5. Progowanie w warunkach nierównomiernego oświetlenia

W wielu przypadkach nie istnieje taka wartość progu, która dałaby zadowalające wyniki na całej powierzchni obrazu. Przykładem może służyć mikroskopowy obraz struktury stali nierdzewnej [13], przedstawiony na rys. 5, oraz fotografia zegara (rys. 6), wykonana celowo przy nierównomiernym oświetleniu.

Rysunki 7 i 8 przedstawiają próby globalnego sprogowania tych obrazów.



Rys. 5. Mikroskopowy obraz stali nierdzewnej
Fig. 5. Microscopic image of stainless steel sample

5.1. Progowanie lokalne

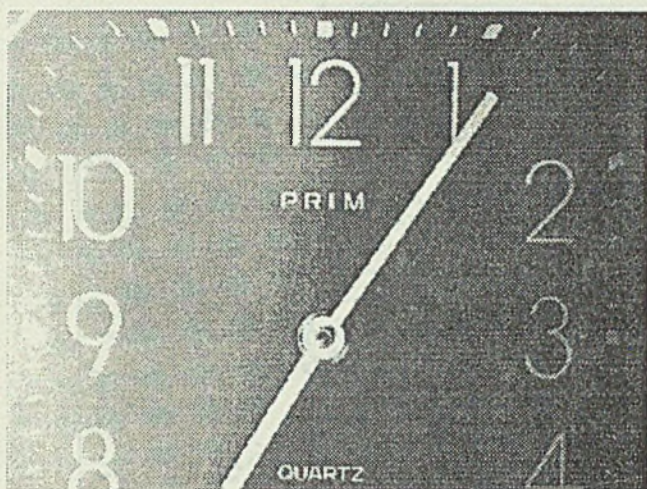
Progowanie lokalne operuje, oprócz stopnia szarości, pewnymi lokalnymi charakterystykami obrazu, jak np.:

- średni stopień szarości w pewnym sąsiedztwie,
- parametry lokalnego histogramu:
 - mediana (lub inny kwantyl),
 - odchylenie średniokwadratowe, momenty bezwładności lub inne funkcjonały wykorzystywane do sprawdzenia, czy histogram jest bimodalny,
- operatory różniczkujące (gradient, laplasjan, operator Sobela, Robertsa itp.).

Segmentacja obrazu przez progowanie lokalne może przebiegać dwoma sposobami:

- progowanie w oknach
 1. Podzielić obraz na pewną ilość okien (zwykle prostokątnych),
 2. W każdym z nich z osobna wyznaczyć próg,
 3. Utworzyć obraz binarny jak przy progowaniu globalnym.

Okna mogą na siebie zachodzić; w skrajnym przypadku wyznacza się osobny próg dla każdego punktu na podstawie właściwości jego otoczenia.



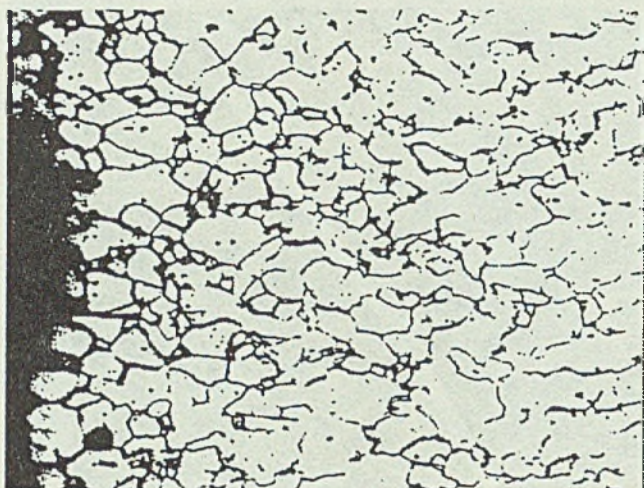
Rys. 6. Przykład sceny binarnej nierównomiernie oświetlonej
Fig. 6. Example of unevenly illuminated binary scene

- śledzenie konturu według lokalnego progu
 1. Analizuj obraz linia po linii (lub rzadziej, dla zaoszczędzenia czasu) w poszukiwaniu miejsca, gdzie lokalne charakterystyki pozwolą przypuszczać, że natrafiono na krawędź obiektu,
 2. Na podstawie tych charakterystyk wyznacz próg,
 3. Śledź granicę między obszarem jaśniejszym od progu a ciemniejszym, aż do uzyskania linii zamkniętej,
 4. Obszar położony wewnątrz tej linii zarejestruj jako obiekt (lub jako fragment tła widoczny przez otwór w obiekcie),
 5. Kontynuuj przeszukiwanie obrazu (punkt 1), pomijając kontury już wyznaczone, aby uniknąć wielokrotnego śledzenia tego samego konturu.

Śledzenie według lokalnego progu łączy w jednym procesie progowanie i wyszukiwanie obszarów spójnych, dlatego w tym wypadku nie powstaje obraz binarny (choć porównanie stopnia szarości z progiem podczas śledzenia konturu można *de facto* uważać za odczyt poszczególnych bitów lokalnego obrazu binarnego).

Algorytmy wyznaczania progu lokalnego nie różnią się zasadniczo od algorytmów wyznaczania progu globalnego. Wyznaczanie progu dla małych fragmentów obrazu (okien) wprowadza jedynie pewną specyfikę:

- w małym wycinku obrazu w mniejszym stopniu jest odczuwalna nierównomierność oświetlenia;



Rys. 7. Próba sprogowania obrazu z rys. 5
Fig. 7. Attempt to threshold the image from Fig. 5

- okno leżące na granicy obiektu i tła może zawierać znaczący procent punktów obu klas (plus punkty brzegowe), nawet jeśli w całym obrazie jedna z klas stanowi znikomy ułamek powierzchni;
- praktycznie zawsze trzeba przewidzieć, że niektóre okna będą zawierać tylko punkty obiektu lub tylko punkty tła;
- algorytm wyboru progu lokalnego musi być wykonany wielokrotnie dla danego obrazu, stąd ograniczenia czasowe są znacznie ostrzejsze.

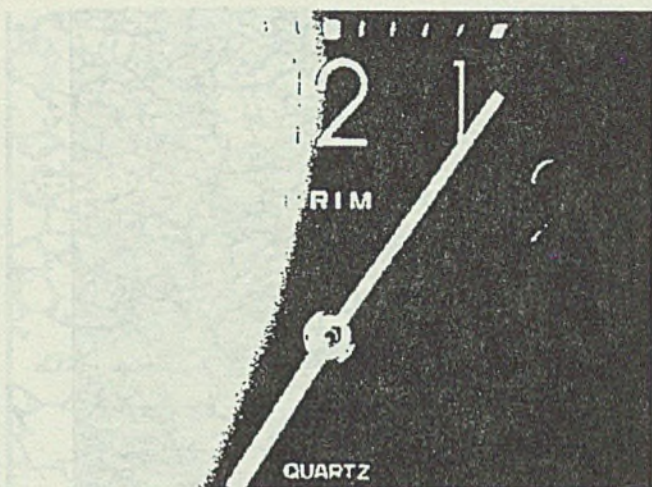
Dlatego w progowaniu lokalnym często stosuje się najprostsze metody wyznaczania progu, przy czym użyta procedura musi - oprócz samego progu - dostarczać informacji o tym, czy próg udało się wyznaczyć.

5.1.1. Lokalna weryfikacja progu

Dość logicznym, choć czasochłonnym sposobem segmentacji obrazu przez progowanie jest wielokrotne progowanie (w skrajnym przypadku - wszystkimi progami możliwymi w danej skali szarości) połączone z procedurą weryfikacji uzyskanych wyników. Kryterium weryfikacji może być geometria znalezionych obiektów (kształt, obwód, pole itp.) lub ostrość ich konturów (mierzona np. sumą gradientu na obwodzie).

5.1.2. Progowanie wielostopniowe

Progowanie wielostopniowe stosuje się, jeżeli poszukiwane w obrazie obiekty mają strukturę złożoną z elementów o różnym stopniu szarości. Np. w obrazach cytologicznych globalne progowanie wykrywa cytoplazmę, a w obrębie tak wykrytej komórki progowanie lokalne wykrywa jądro komórkowe ([16]).

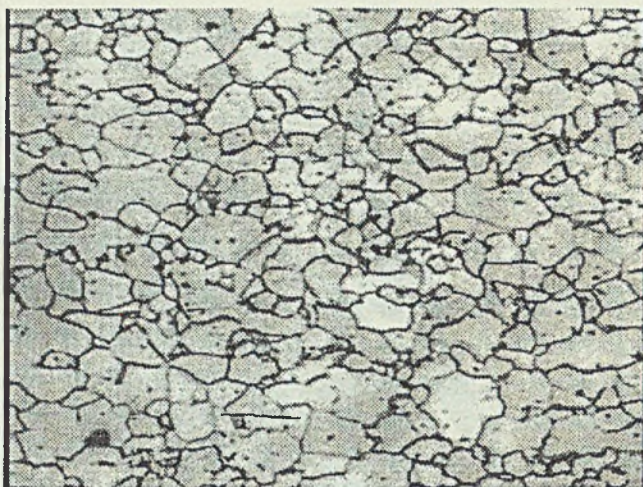


Rys. 8. Próba sprogowania obrazu z rys. 6
 Fig. 8. Attempt to threshold the image from Fig. 6

5.2. Progowanie dynamiczne

W progowaniu dynamicznym próg zależy od współrzędnych przestrzennych X, Y . Zmiana progu w funkcji położenia ma sens wtedy, kiedy dysponujemy danymi o rozkładzie oświetlenia w obrazie. Takie informacje można wydobyć z samego obrazu, np.

- poddając obraz bardzo silnej filtracji dolnoprzepustowej (np. uśrednianie w sąsiedztwie 25×25); można przy tym zastosować rozrzedzone próbkowanie obrazu w wymiarach x, y w celu zmniejszenia objętości danych. Wadą takiego podejścia jest silna wrażliwość na nierównomierne wypełnienie obrazu obiektami.
- wykonując operacje morfologiczne w celu usunięcia jednej ze składowych obrazu (obiektów lub tła); składową jasną usuwa operacja erozji, a składową ciemną - operacja poszerzenia. W każdym przypadku wymiary elementu strukturującego muszą być większe od największej szerokości elementu usuwanej składowej obrazu. System IBAS 2000 [19] stosuje dwie odmiany erozji do usuwania obiektów.
- dzieląc obraz na okna (zwykle prostokątne) i wyznaczając w każdym z nich próg jedną z metod stosowanych przy progowaniu lokalnym. Na ogół wyznaczenie progu jest możliwe tylko w niektórych oknach (tych, które mają znaczący udział zarówno obiektów, jak i tła). Wyznaczone progi przypisuje się centralnym punktom poszczególnych okien, a progi dla pozostałych punktów wyznacza się metodą interpolacji lub aproksymacji.



Rys. 9. Obraz z rys. 5 po wyrównaniu oświetlenia
Fig. 9. The image from Fig. 5 after lighting correction

Odmianą tego ostatniego podejścia jest metoda opisana w [9]. Obraz (ludzkiego chromosomu) o wymiarach 256×256 był tam reprezentowany tzw. piramidą gaussowską, czyli zbiorem obrazów o coraz mniejszej rozdzielczości, uzyskanych z oryginału przez filtrację i próbkowanie. Poczynając od obrazu 32×32 i schodząc w miarę potrzeb ku podstawie piramidy (256×256), odnajdywano fragmenty obrazu zawierające kontury. Za kryterium obecności konturów przyjęto duże odchylenie standardowe stopni szarości. Następnie wyznaczano lokalne progi dla tych fragmentów. Dla pozostałych części obrazu próg wyznaczano przez interpolację.

Często spotykaną metodą interpolacji jest interpolacja liniowa ([5], [8]), stosowana zwłaszcza dla progów wyznaczonych w regularnie rozmieszczonych punktach. Kilka bardziej wyszukanych metod interpolacji i aproksymacji opisano w pracy [10]:

- interpolacja polem potencjału polega na znalezieniu funkcji $T(x, y)$ przyjmującej zadane wartości w zadanych punktach i spełniającej warunek zerowania laplasjanu:

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0,$$

co zapewnia rozsądnie gładką powierzchnię progową;

- interpolacja minimalną powierzchnią („metoda błony mydlanej”); idea atrakcyjna przez swą elegancję pojęciową, niestety czasochłonna w realizacji, gdyż wyraża się nieliniowym równaniem różniczkowym cząstkowym;



Rys. 10. Obraz z rys. 9 po progowaniu
 Fig. 10. The image from Fig. 9 after thresholding

- aproksymacja średnią ważoną o wadze zależnej od odległości:

$$P(x, y) = \frac{\sum_i W_i(x, y) P_i}{\sum_i W_j(x, y)}$$

gdzie:

$$W_j(x, y) = \frac{1}{\Phi(d((x, y), (x_j, y_j)))}$$

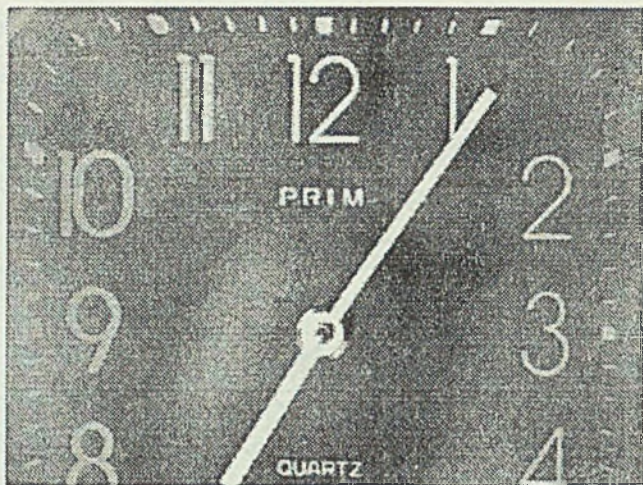
$d((x, y), (x_j, y_j))$ - odległość (x, y) od j -tego punktu o znanej wartości,

$\Phi(d)$ - nieujemna funkcja rosnąca.

Przyjmując $\Phi(0) = 0$ (i traktując wyrażenia typu $(a/0)/(b/0)$ jako wartości graniczne, czyli a/b), otrzymujemy interpolację.

Metoda użyta do przetworzenia załączonych przykładów polegała na wyznaczeniu progów lokalnych w oknach, przy czym każdemu progowi odpowiadał pewien stopień wiarygodności (związany z miarą bimodalności lokalnego histogramu). Następnie interpolowano progi z wagą zależną od odległości (funkcja o kształcie rozkładu Gaussa) i proporcjonalną do wiarygodności poszczególnych progów [13].

Istnieją dwa równoważne sposoby wykorzystania informacji o rozkładzie oświetlenia: można progować obraz zmiennym progiem albo wykorzystać dane o oświetleniu do korekcji obrazu (patrz 5.3.), by następnie poprawiony obraz progować globalnie. Rysunki 9 - 12 przedstawiają przykładowe wyniki korekcji i progowania.



Rys. 11. Obraz z rys. 6 po wyrównaniu oświetlenia
Fig. 11. The image from Fig. 6 after lighting correction

5.3. Korekcja oświetlenia za pomocą fizycznego obrazu odniesienia

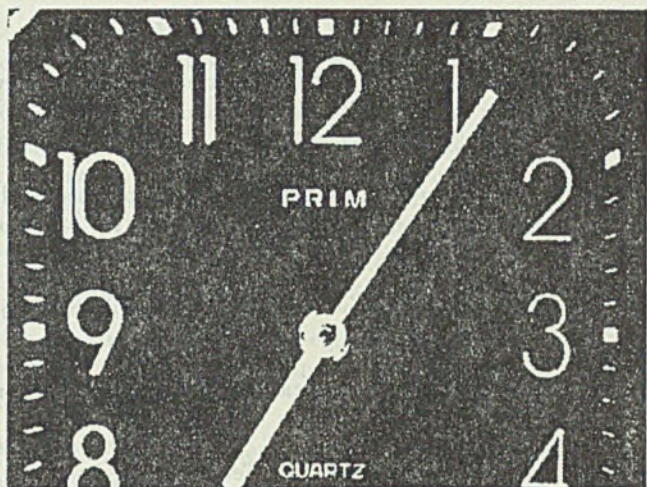
Informacje o rozkładzie oświetlenia można również uzyskać wzorcując tor optyczny, np. podkładając w miejsce fotografowanego obiektu jednolicie białą płaszczyznę. Uzyskany obraz odniesienia odejmuje się od obrazu analizowanego, dodając pewną stałą normalizującą, aby nie przekroczyć zakresu stopni szarości. Zwykle przyjmuje się $c = 128$ (środek typowej skali 0 – 255). Ponieważ słabe oświetlenie zmniejsza również kontrast, w ciemniejszych miejscach można dodatkowo wzmocnić dynamikę stopni szarości.

Tego rodzaju wzorcowanie toru optycznego nie zawsze jest możliwe, gdyż warunki oświetlenia mogą być zmienne od zdjęcia do zdjęcia. Sama „jednolicie biała płaszczyzna” może również być trudna do uzyskania np. w zdjęciach mikroskopowych o dużym powiększeniu (kiedy większość materiałów ujawnia swoją mikrostrukturę) lub, przeciwnie, przy zdjęciach dużych obszarów (zjęcia lotnicze, a tym bardziej satelitarne).

6. Wnioski końcowe

W dostępnej literaturze, podobnie jak w praktyce autora, progowanie obrazów płaskich scen binarnych rzadko prowadzi bezpośrednio do prawidłowej segmentacji ([11], [13]). Całkowicie poprawny wynik udaje się osiągnąć jedynie w bardzo korzystnych warunkach. Przykładem może być rys. 6 (wynik - rys. 12), gdzie fotografowana scena wykazuje silny kontrast, a rozmiary i kształt obiektów pozwalają tolerować błędy rzędu pojedynczych pikseli.

W trudniejszych warunkach, jak na rys. 5, dochodzi zwykle do zafalszowania subtel-



Rys. 12. Obraz z rys. 11 po sprogowaniu
 Fig. 12. The image from Fig. 11 after thresholding

niejszych szczegółów. Widoczne na rys. 10 „posklejanie” niektórych obiektów (zatarcie wąskich przesmyków osnowy między ziarnami stali) wynikało przede wszystkim ze słabego lokalnego kontrastu. Pewną rolę odegrał też fakt, że - wbrew założeniu o binarności sceny - niektóre ziarna w strukturze stali są jaśniejsze od innych. W niektórych miejscach ta różnica między obiektami była wyraźniejsza od różnicy między obiektami a tłem, co powodowało zawyżenie lokalnego progu.

Traconą w ten sposób informację odtwarza się wykorzystując relacje geometryczne w obrazie. W systemie IBAS 2000 [19] służą do tego celu procedury tzw. rekonstrukcji granic ziarn, oparte na morfologicznej operacji domknięcia. Parametry operacji dobierane są ręcznie przez operatora, zależnie od charakteru obrazu i jego zniekształceń.

Szczególnie rozbudowany sposób korekcji progowania przedstawiono w pracy [8]. Zastosowana przez jej autorów metoda progowania dynamicznego obliczona jest na wykrycie tylko tych pikseli, które na pewno należą do obiektów. Pozostałe piksele poddawane są następnie szeregowi testów (opartych na liczbie i stopniach szarości „uznanych” sąsiadów) i zależnie od ich wyniku mogą również być zaliczone do obiektów. Niektóre z tych testów określono jako opcjonalne, co sugeruje konieczność ręcznego sterowania (na podstawie wzrokowej kontroli wyników), w celu dobrania wersji algorytmu do charakteru obrazu. Parker [8] przyjmuje, że punkty obiektów mają wysoką wartość gradientu, co również świadczy o wybiórczej stosowalności opisanych procedur.

Liczba i charakter metod opisanych w [11] również pozwalają wyciągnąć wniosek, że problem progowania obrazów scen binarnych nie został jeszcze całkowicie rozwiązany.

Obecny stan sztuki w dziedzinie progowania można określić jako zbiór metod tworzonych *ad hoc* z myślą o konkretnych zastosowaniach. W celu uporządkowania tej dziedziny przetwarzania obrazów celowe byłoby opracowanie mniej lub bardziej ogólnego modelu matematycznego, z którego wynikną obiektywne kryteria porównania jakości metod.

LITERATURA

- [1] S.U.Lee, S.Y.Chung, R.H.Park „A Comparative Performance Study of Several Global Thresholding Techniques for Segmentation”. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* Vol. 52, No. 2, 1990, 171-190 .
- [2] P.K.Sahoo, S.Soltani, A.K.C.Wong, Y.C.Chen „A survey of thresholding techniques”, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* Vol. 41, No 1, 1988, 233-260 .
- [3] K.Wojciechowski „Rozpoznawanie obrazów”, Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1304, Gliwice 1987.
- [4] K.S.Fu, J.K.Mui „A Survey on Image Segmentation”, *Pattern Recognition* Vol. 13, 1981, 3-16.
- [5] Joan S. Weszka „A Survey of Threshold Selection Techniques”, *Computer Graphics and Image Processing* 7, 1978, 259 - 265 .
- [6] W. Doyle „Operations useful for similarity-invariant pattern recognition”, *J. Assoc. Comp. Mach.* 9, 1962, 259-267.
- [7] R.J.Whatmough „Automatic Threshold Selection from a Histogram Using the -Exponential Hull-”, *CVGIP:Graphical Models and Image Processing* Vol. 53, No. 6, 1991, 592-600.
- [8] J. R. Parker „Gray Level Thresholding in Badly Illuminated Images”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 8, 1991, 813-819 .
- [9] S.Song, M.Liao, J.Qin „Multiresolution Image Dynamic Thresholding”, *Machine Vision and Applications* (1990), Vol. 3, No. 1, 1990, 13-16.
- [10] S.D.Yanowitz, A.M.Bruckstein „A new method for image segmentation”, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* Vol. 46, No 1, 1989, 82-95 .
- [11] Torfinn Taxt, Patrick J. Flynn, Anil K. Jain „Segmentation of Document Images”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, No. 12, 1989, 1322-1329 .
- [12] K.V.Mardia, T.J.Hainsworth „A Spatial Thresholding Method for Image Segmentation”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 6, 1988, 919-927.
- [13] L. Luchowski „Adaptive image thresholding based on criteria of compactness”, *Podstawy Sterowania* 18, 3-4 (1988) 167-174 .
- [14] B.Chanda, B.B.Chaudhuri, D.D.Majumder „A modified scheme for segmenting the noisy image”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 18, No. 3, 1988, 458-466 .

- [15] S.Boukharouba, J.M.Reborado, P.L.Wendel „An amplitude segmentation method based on the distribution function of an image”, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* Vol. 29, No 1, 1985, 47-59.
- [16] J.F.Brenner, J.M.Lester, W.D.Selles „Scene segmentation in automated histopathology: techniques evolved from cytology automation”, *Pattern Recognition* Vol. 13, 1981, 65-77.
- [17] D.L.Milgram, M.Herman „Clustering Edge Values for Threshold Selection”, *Computer Graphics, and Image Processing* Vol. 10, 1979, 272-280 .
- [18] D.P.Panda, A.Rosenfeld „Image Segmentation by Pixel Classification in (Gray Level, Edge Value) Space”. *IEEE Transactions on Computers*. Vol. C-27, No. 9, 1978, 875-879 .
- [19] „IBAS 2000 - Automatic Measurement Program Description” - dokumentacja firmy KONTRON, 1986.
- [20] R.L.Cahn, R.S.Poulsen, G.Toussaint. „Segmentation of cervical cell images”, *J. Histochem. Cytochem.* Vol. 25, 1977, 681-688 .
- [21] Watanabe and the CYBEST group „An automated apparatus for cancer prescreening: CYBEST”. *Computer Graphics and Image Processing* 3, 1974, 350 - 358 .
- [22] J.M.S.Prewitt, M.L.Mendelsohn „The analysis of cell images”, *Ann. N.Y.Acad.Sci.*128, 1966, 1035-1053.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Grzywak

Wpłynęło do Redakcji dnia 31.08.92

Abstract

The notion of a flat binary scene is defined. Segmentation by thresholding is compared to other segmentation methods. Figs. 1 and 2 demonstrate in what way thresholding is preferable to edge detection, thresholding always leading to closed contours. The description of thresholding algorithms follows the classical division into global, local, and dynamic methods. In the chapter on global thresholding, several threshold selection methods are presented. One way of thresholding an image locally is to take one of the global thresholding methods and apply it in windows. The section on local thresholding also describes local threshold verification, wherein a local threshold is adjusted until the local segmentation results match some criterion. Multiple thresholding is mentioned, applying a local threshold to find internal details of objects extracted by global thresholding. Dynamic thresholding by interpolated or approximated local thresholds is described, with several methods of approximation/interpolation. Figs. 5 - 12 show two sample images,

each of them in four forms: raw image, raw image globally thresholded, with the uneven lighting compensated, and compensated image globally thresholded (this last case is equivalent to dynamic thresholding). The final conclusion is that while many methods exist which can be successfully used in particular applications, a general theory of image thresholding remains to be created.