

Algorytm Canny'ego detekcji krawędzi w procesie segmentacji obrazów medycznych.

Rafał Ludwiczuk

*Pracownia Technologii Informatycznych
Instytut Fizyki
Uniwersytet Marii Curie - Skłodowskiej w Lublinie*

Streszczenie

Jedną z metod realizacji segmentacji obrazów są techniki wykrywania krawędzi. Ten artykuł koncentruje się na algorytmie Canny'ego wykrywania krawędzi oraz jego rozbudowie i automatyzacji.

Abstract

Edge detection techniques are one of possible approaches to image segmentation. The article is concentrated on Canny's algorithm, its extensions and automation.

1. Algorytm Canny'ego. Kryteria Canny'ego.

Algorytm Canny'ego jest jednym z niewielu filtrów wykrywania krawędzi zaprojektowanym w oparciu o czysto analityczne podejście do konstrukcji filtrów tego typu. Projekt Canny'ego bazuje na jednowymiarowym modelu krawędzi skokowej w ciągłej dziedzinie o amplitudzie h_E z dodatkowym, tzw. białym szumem Gaussa o standardowym odchyleniu σ [2]. Proces detekcji krawędzi Canny sprowadził do złożenia w ciągłej dziedzinie i jednowymiarowej przestrzeni sygnału krawędzi zakłóconej szumem $f(x)$ z antysymetrycznym impulsem $h(x)$ o amplitudzie równej zero poza przedziałem $(-W, W)$. Krawędź zaznaczona jest w punkcie lokalnego maksimum gradientu złożenia funkcji $f(x)$ i $h(x)$. Dla wyboru odpowiedniego impulsu filtrującego $h(x)$ Canny opracował trzy kryteria:

- kryterium dobrej detekcji;
- kryterium dobrej lokalizacji;
- kryterium pojedynczej odpowiedzi.

W kryterium dobrej detekcji analizujemy amplitudę stosunku sygnał - szum gradientu (snr). Celem jest maksymalizacja snr dla uzyskania małego prawdopodobieństwa błędnych zaznaczeń punktów rzeczywistej krawędzi oraz małego prawdopodobieństwa fałszywych zaznaczeń punktów, które nie tworzą krawędzi. W modelu Canny'ego snr wyraża się wzorem:

$$snr = \frac{h_E}{\sigma} S(h) \quad (1.1)$$

gdzie:

$$S(h) = \frac{\int_{-W}^0 h(x) dx}{\int_{-W}^0 [h(x)]^2 dx} \quad (1.2)$$

Kryterium dobrej lokalizacji mówi, że punkty zaznaczone przez operator Canny'ego powinny znajdować się możliwie blisko centrum krawędzi. Współczynnik lokalizacji jest zdefiniowany w następujący sposób:

$$LOC = \frac{h_E}{\sigma} L(h) \quad (1.3)$$

gdzie:

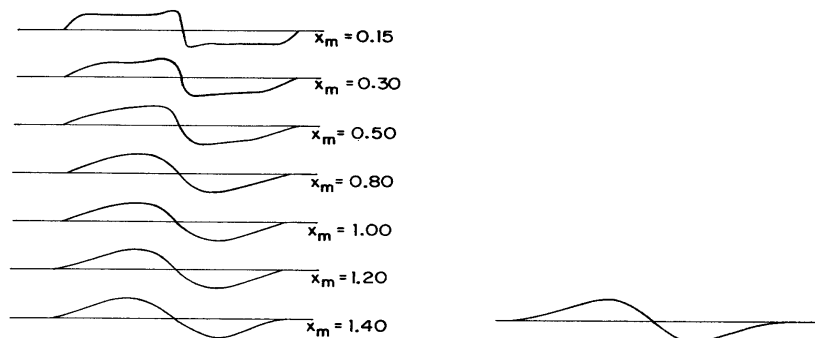
$$L(h) = \frac{h'(0)}{\int_{-W}^0 [h'(x)]^2 dx} \quad (1.4)$$

Przy czym $h'(x)$ w równaniu 1.4 jest pierwszą pochodną impulsu filtrującego $h(x)$.

Sens *kryterium pojedynczej odpowiedzi* kryje się w nazwie. Wg niego powinniśmy otrzymać pojedynczą odpowiedź dla prawdziwej krawędzi. Odległość pomiędzy wierzchołkami gradientu w przypadku reprezentacji samego szumu, oznaczona jako x_m , jest proporcjonalna do szerokości okna operatora W . Współczynnikiem proporcjonalności jest k :

$$x_m = k \cdot W \quad (1.5)$$

Rozważania analityczne prowadzone przez Canny'ego doprowadziły go do impulsu



Rysunek 1.1. Analiza Canny'ego i jej porównanie z pierwszą pochodną rozkładu Gaussa.

a) Impuls filtrujący Canny'ego $h(x)$. b) Pierwsza pochodna rozkładu Gaussa.

filtrującego $h(x)$ o kształcie zbliżonym do pierwszej pochodnej rozkładu Gaussa [2]. Analizę ilustruje rysunek 1.1.

2. Etapy detekcji krawędzi w algorytmie Canny'ego.

W związku z widoczną zbieżnością analizy Canny'ego do pierwszej pochodnej rozkładu Gaussa, implementacja algorytmu opiera się właśnie na filtrach Gaussa oraz filtrach różnicowych [2]. Dzięki zastosowaniu takich operacji otrzymamy obraz z zaakcentowanymi konturami. Kolejne etapy algorytmu mają na celu selekcję istotnych krawędzi, ich domknięcie oraz lokalizację konkretnej krawędzi w jednym pikselu.

2.1 Rozmycie obrazu wejściowego filtrem Gaussa.

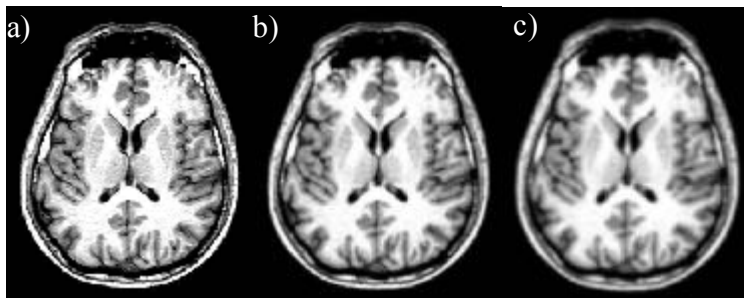
Pierwszym etapem w implementacji algorytmu Canny'ego jest operacja splotu [1] obrazu wejściowego z filtrem Gaussa. Ma to na celu wyeliminowanie szumów występujących w obrazie przed jego dalszym przetwarzaniem. W tym miejscu algorytmu podajemy pierwszy jego parametr – odchylenie standardowe σ charakteryzujące rozkład Gaussa. Maskę filtru [1] jest generowana dynamicznie w czasie działania programu, gdyż jej rozmiar oraz wartości elementów są zależne od parametru σ . Okazuje się, iż maski filtrów Gaussa mają dość spore rozmiary. Wynika to z żądanej dokładności odwzorowania krzywej Gaussa w dyskretnej masce. Czas obliczeń potrzebny na wykonanie operacji splotu jest proporcjonalny do kwadratu rozmiaru maski, dlatego stosuję w programie MEzop tzw. splot dwuwymiarowy [3]. Sama nazwa jest nieco myląca, optymalizacja polega na zastosowaniu jednowymiarowej maski filtru o nieparzystej liczbie elementów do operacji splotu z wierszami obrazu a następnie z kolumnami obrazu. Uzyskujemy w ten sposób liniową zależność czasu obliczeń od rozmiaru maski filtru, a dzięki symetryczności filtru Gaussa uzyskujemy poprawne wyniki. Do generowania rozmiaru maski filtru ws w programie MEzop wykorzystuję następujący wzór:

$$ws = 1 + 2 \cdot \lceil 2.5 \cdot \sigma \rceil \quad (2.1)$$

natomiast obliczam elementy maski korzystając ze wzoru:

$$g_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.2)$$

przy czym $x_i = -\frac{ws}{2} + 1, -\frac{ws}{2} + 2, \dots, -\frac{ws}{2} + ws = \frac{ws}{2}$.

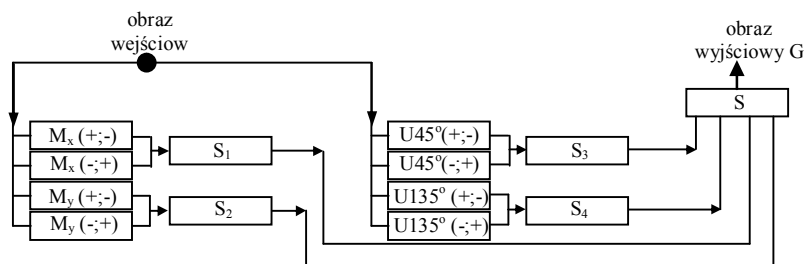


Rysunek 2. 1. Rozmycie filtrem Gaussa ; a) obraz oryginalny; b) obraz rozmyty z odchyleniem standardowym $\sigma = 0,77$; c) obraz rozmyty z odchyleniem standardowym $\sigma = 1,3$

Rysunek 2.1 prezentuje obraz uzyskany w wyniku operacji splotu dwuwymiarowego z filtrem Gaussa o odchyleniu standardowym $\sigma = 0,77$ oraz $\sigma = 1,3$.

2.2 Przetwarzanie operatorem gradientu kierunkowego.

Obraz uzyskany w wyniku operacji splotu z filtrem Gaussa jest obrazem wejściowym w następnym etapie realizacji algorytmu Canny'ego. W tym kroku rozpoczynamy analizę obrazu pod kątem zmienności funkcji $g(j, k)$ opisującej obraz wejściowy. W programie MEzop do tego celu jest wykorzystany konturowy filtr Sobela z rotacją maski filtru [2], która niweluje, oczywiście do pewnego stopnia, czułość kierunkową tego filtru. W masce filtru mamy 4



Rysunek 2. 2. Schemat algorytmu przetwarzania operatorem gradientu.

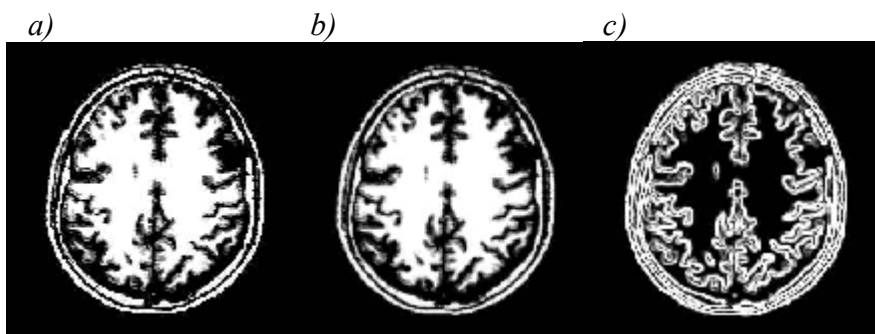
wyróżnione kierunki, uwzględniając ich zwroty otrzymujemy 8 operacji splotu. Rysunek 2.2 przedstawia schemat tego algorytmu. Oznaczenia M_i określają obrazy uzyskane w operacji splotu z maską w kierunku wierszy oraz kolumn natomiast oznaczenia U_{45} i U_{135} oznaczają obrazy uzyskane w operacji splotu z maską o rotacji odpowiednio z kątem 45° i 135° w stosunku do wierszy. Oznaczenia typu (+;-) określają zwroty. Dla przykładu podaję maski dla operacji splotu $M_x(+;-)$ oraz $M_x(-;+)$:

$$M_x(+;-): \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad M_x(-;+): \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

S_i są to tablice średnich geometrycznych odpowiednich natężeń pikseli. Np. S_1 jest to tablica zawierająca średnie geometryczne odpowiednich wartości pikseli po operacji splotu $M_x(+;-)$ i $M_y(-;+)$ – jest to tablica gradientu obrazu w kierunku wierszy:

$$S_1(j,k) = \sqrt{[M_{(+;-)}(j,k)]^2 + [M_{(-;+)}(j,k)]^2} \quad (2.4)$$

Rysunek 2.3 prezentuje wyniki działania programu MEzop w zastosowaniu do obrazów medycznych typu MRI.



Rysunek 2.3. Wynik działania wielokierunkowego operatora detekcji konturu; c) obraz wejściowy; b) obraz rozmyty; c) obraz konturowy.

2.3 Ustalenie orientacji krawędzi w płaszczyźnie obrazu. Mapa kierunków.

Konieczne jest w algorytmie Canny'ego określenie orientacji krawędzi w płaszczyźnie obrazu [5]. W tym celu wykorzystujemy tablice utworzone w poprzednim etapie, są to tablice S_1 oraz S_2 . Tablice te zawierają wartości gradientów obrazu w kierunku wierszy $-S_1$, oraz w kierunku kolumn $-S_2$, czyli w kierunkach ortogonalnych wzajemnie, zatem są to tablice zawierające składowe wektorów gradientu obrazu. Wektor gradientu dla piksela (j,k) ma składowe $S_1(j,k)$ oraz $S_2(j,k)$. Dla każdego piksela wyznaczamy kąt, jaki tworzy wektor gradientu z kierunkiem wierszy - OX:

$$\theta(j,k) = \arctg \frac{S_2(j,k)}{S_1(j,k)} \quad (2.5)$$

W wyniku otrzymujemy tablicę, której elementami są wartości kątów dla kolejnych pikseli. W programie MEzop tablicę tą nazywam mapą kierunków, jest ona cennym źródłem informacji przy procesie konstrukcji krawędzi o szerokości jednego piksela, właśnie to jest celem tego algorytmu.

2.4 Eliminacja pikseli o nie maksymalnej jasności (NMS).

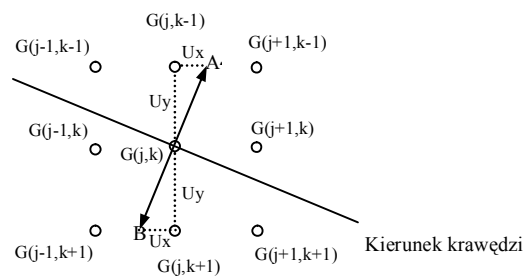
W dotychczasowych etapach przetwarzania obrazu w algorytmie Canny'ego uzyskaliśmy tablicę wartości gradientów – obraz konturów, oraz mapę kierunków. Uzyskane kontury cechuje pewna szerokość i nie jest to szerokość jednego piksela. Następny etap nazywa się eliminacją nie maksymalnych wartości natężenia pikseli (*ang. Non Maxima Suppression*) [5]. Analizie podlegają piksele tworzące prostopadły przekrój konturu, gasimy te, które nie mają maksymalnej wartości natężenia.

Realizację tego etapu w programie MEzop wyjaśnię posługując się rysunkiem 2.4. Do analizy piksela (j,k) włączamy jego 8-mio elementowe otoczenie (z pikselem analizowanym mamy 9 elementów). Znamy wartość gradientu piksela (j,k) oraz orientację krawędzi, której prawdopodobnie jest elementem. Musimy wyznaczyć wartości gradientu po lewej i prawej stronie krawędzi. Okazuje się, że wystarczy interpolować tę wartość na podstawie dwóch pikseli z otoczenia, które są wybierane w zależności od orientacji krzywej. Tymi pikselami są piksele

najbliższe punktu A po prawej stronie krawędzi oraz punktu B po lewej stronie krawędzi na rysunku 2.4. Zależności interpolacyjne przedstawiają się następująco:

$$G_A = \frac{U_x}{U_y} G(j+1, k-1) + \frac{U_y - U_x}{U_y} G(j, k-1) \quad (2.6)$$

$$G_B = \frac{U_x}{U_y} G(j-1, k+1) + \frac{U_y - U_x}{U_y} G(j, k+1) \quad (2.7)$$



Rysunek 2.4. Ilustracja algorytmu NMS w programie MEzop.

Jeśli natężenie piksela $G(j, k)$ jest większe od natężenia po lewej G_B oraz prawej G_A stronie patrząc na rysunek 2.4, wtedy piksel pozostaje zapalony, w przeciwnym wypadku piksel gasimy. W programie MEzop jest tworzona specjalna tablica NMS, w której każdy piksel o maksymalnej wartości jest oznaczony wartością 128. Jest to mapa prawdopodobnych krawędzi.

2.5 Konstrukcja krawędzi. Progowanie histogramu.

W tym kroku budujemy histogram dla obrazu konturu – obraz c z rysunku 2.3. Również na tym etapie algorytmu podajemy kolejne dwa parametry charakteryzujące filtr Canny'ego: próg wysoki HT (*ang. high threshold*) oraz próg niski LT (*ang. low threshold*) [4]. Analizie podlegają piksele zaznaczone w mapie prawdopodobnych krawędzi, celem procesu jest podjęcie decyzji o istnieniu krawędzi w danym pikselu. Sprawdzamy wartość gradientu $G(j, k)$ w obrazie konturu odpowiadającą danemu pikselowi i rozpatrujemy następujące przypadki:

- ⇒ Jeśli $G(j, k) > HT$ wtedy stwierdzamy, że piksel należy do krawędzi i przypisujemy mu maksymalną jasność, czyli 0.
- ⇒ Jeśli $G(j, k) \in \langle LT, HT \rangle$, wtedy badamy otoczenie danego piksela. Jeśli wypadkowy gradient otoczenia jest większy od LT stwierdzamy, że w danym pikselu jest zlokalizowana krawędź – wykorzystujemy w tym etapie mapy spójności.
- ⇒ Jeśli $G(j, k) < LT$, oznacza to, że piksel nie jest częścią jakiegokolwiek krawędzi, przypisujemy mu wartość 255.

Po zlokalizowaniu punktów krawędzi badamy ich otoczenie. Kryje się w tym miejscu algorytm domykania krawędzi, poruszę dwie metody jego realizacji algorytm sekwencyjny oraz rekurencyjny. W oby przypadkach definiujemy trzy mapy spójności:

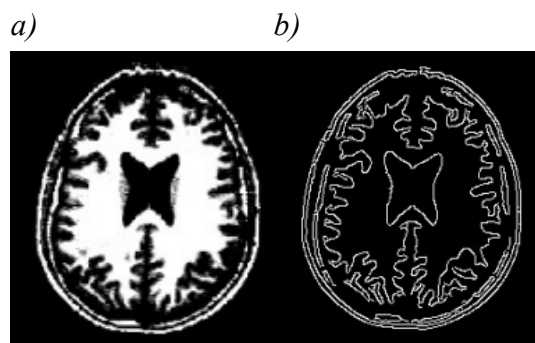
$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} 0 & 4 & 0 \\ 4 & (j,k) & 4 \\ 0 & 4 & 0 \end{bmatrix} &
 \begin{bmatrix} 8 & 8 & 8 \\ 8 & (j,k) & 8 \\ 8 & 8 & 8 \end{bmatrix} &
 \begin{bmatrix} 6 & 6 & 0 \\ 6 & (j,k) & 6 \\ 0 & 6 & 6 \end{bmatrix} \\
 \text{Spójność 4-tego rzędu} &
 \text{Spójność 8-tego rzędu} &
 \text{Spójność 6-tego rzędu}
 \end{array}$$

Skupię się na algorytmie rekurencyjnym, gdyż jest on zaimplementowany w programie MEzop. Na potrzeby lepszej przejrzystości założmy, że piksele, w których zlokalizowaliśmy krawędzie mają etykiety '1' i tworzą tablicę *edge_map*, tworzymy również nową tablicę etykiet *labels*.

Algorytm rekurencyjny:

- ⇒ Sprawdzamy kolejne piksele tablicy *edge_map*.
- ⇒ Jeśli znajdujemy piksel oznaczony przez '1' w tablicy *edge_map* i z zerową etykietą w tablicy *labels*, przypisujemy mu nową etykietę w *labels*.
- ⇒ Rekurencyjnie sprawdzamy otoczenie piksela z poprzedniego kroku. Jeśli trafimy na piksel z etykietą '1' w *edge_map* oraz z zerową etykietą w *labels* przypisujemy mu tę samą etykietę, co poprzedniemu pikselowi w tablicy *labels*.
- ⇒ Kończymy algorytm, kiedy wszystkie piksele oznaczone przez '1' w *edge_map* będą miały swoje etykiety w tablicy *labels*.

Rysunek 2.5 prezentuje efekty działania pełnego algorytmu Canny'ego detekcji krawędzi zaimplementowanego w programie MEzop, na obrazie medycznym typu MRI.

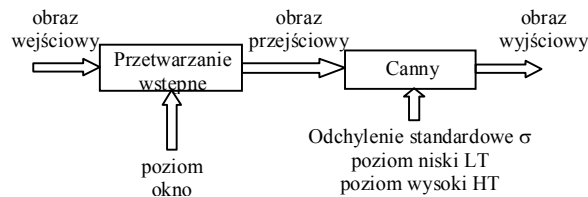


Rysunek 2.5. Wyniki działania algorytmu Canny'ego na obrazach medycznych typu MRI uzyskane programem MEzop. a) obraz wejściowy; b) obraz wyjściowy.

3. Program MEzop - etapy procesu przetwarzania obrazu i ich automatyzacja.

W programie MEzop, oprócz rozbudowy kolejnych etapów algorytmu Canny'ego, wprowadzam wstępne przetwarzanie obrazu wejściowego techniką progowania [2] – rysunek 3.1. Ma to na

celu delikatne wskazanie lub inaczej ukierunkowanie samego algorytmu Canny'ego na określone obiekty obrazu, a w przypadku obrazów medycznych na określone struktury tkanek.



Rysunek 3.1. Schemat przetwarzania obrazu w programie MEzop.

Oczywiście, za cel obrałem doprowadzenie do pełnej automatyzacji całego procesu przetwarzania obrazu w programie MEzop, innymi słowy, celem jest automatyczna segmentacja mózgu z obrazów MRI. Zatem, automatycznie muszę znaleźć 5 optymalnych parametrów wejściowych, dla przetwarzania wstępnego: poziom, okno; dla algorytmu Canny'ego: σ , LT, HT – rysunek 3.1.

3.1 Przetwarzanie wstępne - algorytm Levenberga-Marquardta.

Określenie okna oraz poziomu w przetwarzaniu wstępnym realizuje się w oparciu o algorytm Levenberga – Marquardta [6]. Algorytm ten dopasowuje kilka rozkładów Gaussa w histogram obrazu. Wiadomo, który Gauss reprezentuje substancję białą, a który szarą – rozpatrując oczywiście obraz MRI. Rola użytkownika ogranicza się do wyboru tkanki, którą chcemy segmentować. Poziom określa maksimum rozkładu natomiast okno jego szerokość.

3.2 Funkcje oceny.

Więcej problemów napotykałyśmy przy określaniu parametrów σ , HT oraz LT. W chwili pisania tego artykułu trwają eksperymenty mające na celu konstrukcję funkcji oceny. Muszą istnieć takowe funkcje jako pewne kryteria dla algorytmu. Oczekujemy, iż dobrymi parametrami tych funkcji będą:

- ⇒ średnia długość domkniętych krawędzi;
- ⇒ stosunek liczby wszystkich krawędzi zlokalizowanych w obrazie do liczby krawędzi domkniętych.

Poszukujemy odpowiednich postaci tych funkcji w oparciu o powyższe parametry na drodze eksperymentu. Jest powszechnie wiadome, że taki proces jest czasochłonny oraz pracochłonny a czasami wręcz zaskakujący. Jednak po odpowiedniej konstrukcji funkcji oceny mamy już proste metody ich minimalizacji w celu określenia najlepszych parametrów filtru Canny'ego.

5. Podsumowanie.

Segmentacja jest jedną z ważniejszych metod przetwarzania obrazów cyfrowych a jej zastosowanie w dziedzinie informatyki medycznej ma niebagatelne znaczenie. Algorytmy segmentacji struktur biologicznych są kluczowym elementem systemów eksperckich analizy obrazów MRI lub CT. Segmentacja tych obrazów otwiera ogromne możliwości wizualizacji konkretnych struktur biologicznych.

Literatura

- [1] Christopher D. Watkins, Alberto Sadun, Stephen Marenka, „Nowoczesne metody przetwarzania obrazu”
- [2] William K. Pratt, „Digital image processing”
- [3] Jan-Mark Geusebroek, Arnold W. M. Smeulders, Joost van de Weijer, “Fast Anisotropic Gauss Filtering”, Intelligent Sensory Information System, Department of Computer Science, University of Amsterdam, Kruislaan 403, 1098 SJ Amsterdam, The Netherlands
- [4] Declan Murphy, “An Improved Edge Detection and Ranking Technique”, Computer Science Dept, Copenhagen University
- [5] Brendan McCane, “Edge Detection”, Department of Computer Science University of Otago, Dunedin, New Zealand
- [6] Lukas Finschi, “An Implementation of the Levenberg-Marquardt Algorithm”, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Operations Research, Clausiusstrasse 45, CH-8092 Zürich, April 16, 1996