ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 19, 2007

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 681.3.07

СУБПІКСЕЛНЕ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕГМЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ

Й.Й. Білинський

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. (8-067)9332538, e-mail: bilynsky@svitonline.com

Предложен метод определения геометрических параметров сегментных элементов изображения путем локализации края на приграничной кривой в результате использования единичных масок низкочастотных гауссовых фильтров соответствующей ориентации. Это позволило получить характерные точки пересечения приграничных кривых до и после фильтрации. Получены формулы для определения края объекта на изображении, максимума яркости пятна, а также координаты линии. Предложен способ выделения контура изображения, основным преимуществом которого является утонченный контур. Разработанные методы были использованы для измерения геометрических параметров и выделения контура лежащей капли.

A method of image segment geometrics determining is proposed basing on localization of luminance profile using unit masks of Gauss low-passfilters with corresponding orientation. It enables getting the characteristic points of luminance profiles intersection before and after filtering. As the result the formulas to determine the boundary of the luminance profiles, the mass center of the light spot and the coordinates of line are derived. An algorithm of image edge detection is proposed, its main advantage is the thinned edge. Developed methods were used for measurement of geometric parameters and for edge detection of lying drop.

Задача вимірювання на зображеннях полягає в оцінюванні геометричних параметрів сегментних елементів зображення, які базуються на основі різких змін сигналу. До таких змін відносяться перепади яскравості, точки та лінії. Дані елементи відрізняються розподіленням інтенсивності, а також різною геометрією, але спільною особливістю їх є наявність примежових кривих [1].

В основних методах визначення краю об'єктів край модулюється як різка зміна яскравості. Суть такого підходу полягає в пошуку точок, в яких градієнт досягає екстремуму. Дану умову повністю задовольняє Лапласіан двовимірної функції, але недоліком його є неможливість визначення координати краю з похибкою менше, ніж 0,5 піксела [2]. У зв'язку з цим у методі, що пропонується, запропоновано використовувати градієнт тільки для визначення області найбільш різкої зміни яскравості, де знаходиться край зображення, а також для визначення орієнтації краю.

Модуль градієнта ∇f зображення f(x, y) в точці (x, y) можна визначити так [3]:

$$\nabla f = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

а напрям вектора градієнта, тобто кут $\alpha(x, y)$ між напрямом вектора ∇f в точці (x, y) і віссю x визначається так:

$$\alpha(x, y) = arctg\left(G_y / G_x\right). \quad (2)$$

Таким чином визначають можливу орієнтацію градієнта, яка може бути розбита на чотири сектори: горизонтальний, вертикальний та два під кутом у різні напрямки.

У лінійних оптичних системах оптичну передавальну функцію, як правило,

апроксимують функцією Гаусса. Похідна від яскравості світла *I(x)* на межі зображення (у точці x_0) описується наступним чином [4]:

$$\frac{dI(x)}{dx} = A \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (3)$$

де A - константа, що характеризує максимальне значення перепаду яскравості відбитого світла; σ - середньоквадратичний розподіл перепаду яскравості відбитого світла на межі; x_0 - координата межі.

З іншої сторони зображення на практиці, як правило, згладжується гауссовим фільтром. Гауссіан не є єдиним ядром розмивання, але має ряд важливих особливостей. По-перше, ядра гауссіана є розділяючими, тобто згортка з ядром фільтра еквівалентна згортці з двома одновимірними ядрами – за напрямком x та за напрямком y. Отже гауссіан можна факторизувати, отримавши добуток двох одновимірних гауссіанів. По-друге, виконуючи згортку гауссіана з гауссіаном, можна отримати ще один гауссіан. Тобто, можна отримати дуже згладжене зображення, повторно згладивши вже згладжене зображення. І по-третє, в результаті згладжування зображення можна отримати спільні точки перетину примежових кривих вхідного та фільтрованого зображення.

Тоді функція розсіювання за законом Гаусса для такої примежової кривої буде мати вигляд:

$$G(x) = \frac{\Delta I}{(I_{\max} - I_{\min})\Delta x} \exp\left(-\frac{x^2 \pi \Delta I^2}{(I_{\max} - I_{\min})^2 \Delta x^2} \right), \qquad (4)$$

де $I_{\max}$ – максимальне значення яскравості примежової кривої; $I_{\min}$ – мінімальне значення яскравості примежової кривої; ΔI – максимальна зміна яскравості на примежовій кривій між двома сусідніми пікселами фотоприймального пристрою, відстань між якими $\Delta x = 1$.

Формула (4) дозволяє розрахувати функцію розсіювання для будь-якої примежової кривої, а сама примежова крива буде визначатися так:

$$H^*(x) = \frac{\Delta I}{(I_{\max} - I_{\min})\Delta x} \int_{-\infty}^{x} \exp\left(-\frac{x^2 \pi \Delta I^2}{(I_{\max} - I_{\min})^2 \Delta x^2} \right) dx. \qquad (5)$$

Відповідно функції розсіювання гауссове ядро дискретного гауссіана може бути подано у вигляді маски розмірністю 3 × 3, 5×5 і т. д., що володіє згладжувальними властивостями з невід'ємними коефіцієнтами та є фільтром низьких частот. Загальна формула такого фільтра для фільтрації цифрового зображення розмірністю $m \times n$ задається виразом:

$$g(x,y) = \frac{\sum_{s=-a}^{a} \sum_{t=-b}^{b} w(s,t) f(x+s, y+t)}{\sum_{s=-a}^{a} \sum_{t=-b}^{b} w(s,t)}, \qquad (6)$$

де $a = (m-1)/2$ та $b = (n-1)/2$; $w(x,y)$ - коефіцієнти маски з відносними значеннями координат.

Для зменшення впливу сусідніх пікселів, що не мають відношення до даної примежової кривої, в результаті проведеного аналізу було запропоновано використовувати одиничні однонаправлені маски на основі гауссової функції, що мають можливість проводити згладження за чотирма напрямками згідно зі значенням напрямку вектора градієнта.

Використання направлених гауссових масок дало змогу отримати характерні точки перетину межових кривих до та після фільтрації зображення краю об'єкта на рівні 0,5 амплітуди перепаду, точок перетину межових кривих світлової плями або лінії в поперечному перерізі. На рис.1 наведені осцилограми межової кривої та піку лінії в поперечному перерізі до та після фільтрації з використанням гауссових масок в одновимірному просторі.

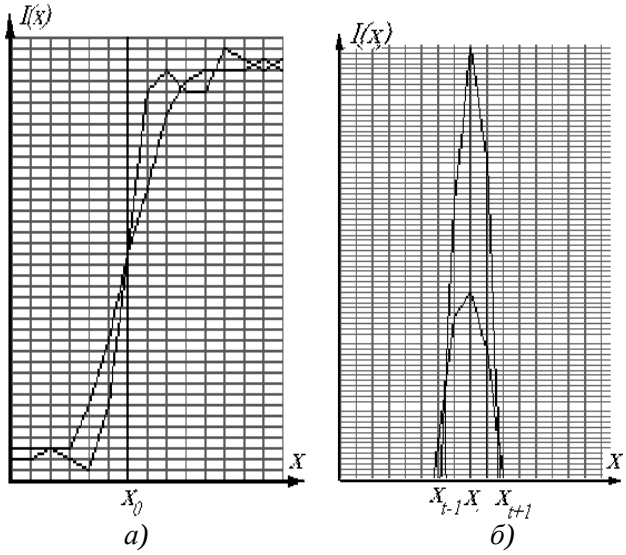


Рисунок 1 – Осцилограма примежової кривої та піку лінії в поперечному перерізі до (*а*) та після (*б*) фільтрації

Спільна точка примежових кривих до та після згладжування, як правило, знаходиться в області міжпікселного простору, тобто в

області, що відповідає відстані між центрами двох сусідніх пікселів, для яких виконується умова $I_N < I_N^1$, $I_{N+1} > I_{N+1}^1$, де I_N, I_N^1 і I_{N+1}, I_{N+1}^1 – яскравість *N*-го та *N*+1 піксела до та після фільтрації відповідно. Координати характерної точки перетину з урахуванням номера піксела визначають таким чином:

$$X_0 = Nd + \frac{(I_N^1 - I_N)d}{(I_{N+1} - I_N) - (I_{N+1}^1 - I_N^1)}, \quad (7)$$

де *d* – відстань між пікселами.

Аналогічним чином можуть бути визначені характерні точки примежових кривих світлової плями або лінії в поперечному перерізі *f* (*t*-1) і *f*(*t*+1). Максимум яскравості світлової плями залежить від нахилу кривої функції розподілення й може бути визначений за допомогою яскравості сусідніх пікселів *f(x), f(x-1)* і *f(x+1)*. При цьому справжній максимум *x*+δ знаходиться в районі даних пікселів, де δ – зміщення центра піка відносно піксела з максимальною яскравістю, якому відповідає координата *x*.

Координата максимуму яскравості світлової плями або лінії може бути визначена за допомогою такої залежності:

$$X_\delta = \frac{I(x-1) - I(x+1) + b_1 \cdot (x-1) - b_2 \cdot (x+1)}{b_1 - b_2}, \quad (8)$$

де b_1, b_2 – коефіцієнти нахилу кривої розподілення яскравості справа і зліва від піка відповідно; X_δ – координата центра в одновимірному просторі; X_{t-1}, X_{t+1} –координати характерних точок перетину вхідної і фільтрованої кривої зліва та справа від піка; x_{-1}, x_{+1} – номер піксела зліва та справавід піка плями; $I(t-1)$, $I(x-1)$, $I(x+1)$, $I(t+1)$ – значення яскравості у відповідних координатах.

Коефіцієнти нахилу кривої функції розподілення зліва та справа від максимуму яскравості визначаються наступним чином:

$$\begin{cases} b_1 = \dfrac{I(t-1) - I(x-1)}{x_{-1} - x_{t-1}}; \\ b_2 = \dfrac{I(x-1) - I(x+1)}{x_{+1} - x_{t+1}}. \end{cases} \quad (9)$$

Таким чином, запропонований метод для визначення геометричних параметрів сегментних елементів зображення на основі низькочастотної фільтрації передбачає такі кроки:

- реєстрацію зображення;
- відображення на екрані монітора;
- побудову безперервної функції інтенсивності світлового сигналу.
- визначення зони на примежовій кривій, яка має максимальне значення градієнта;
- виконання низькочастотної фільтрації за допомогою відповідної маски;
- визначення координати спільної точки межових кривих;
- визначення координат відповідних сегментних елементів.

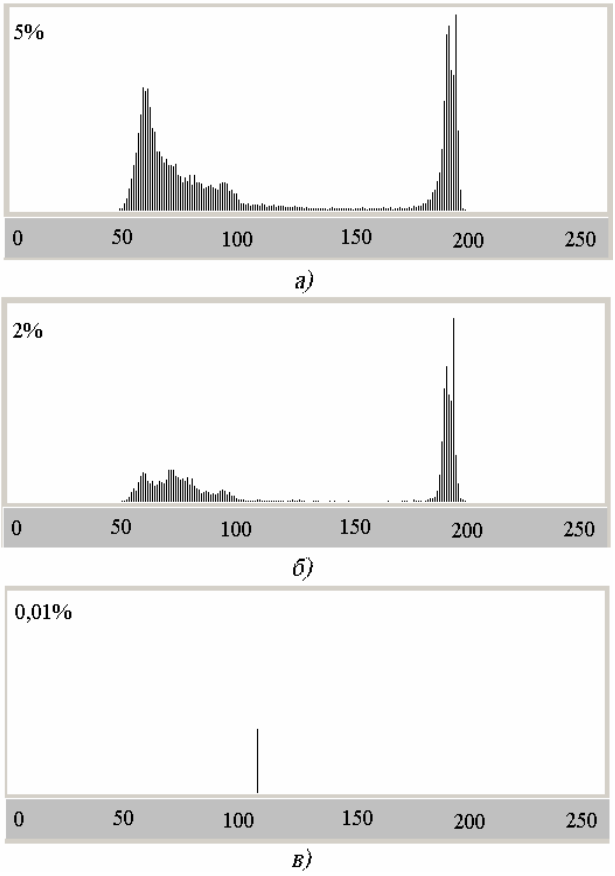
Метод досліджувався експериментально шляхом проведення напівнатурного моделювання. Зображення з монітора записувалося на відеокамеру і піддавалося багатократному зміщенню на один піксел монітора. Відстань між монітором і відеокамерою була відомою, що дозволило визначити відношення розміру піксела монітора та відеокамери. В результаті отриманих даних будувалася характеристика координат зображення отриманого на відеокамері від координат цього ж об'єкта на моніторі. На підставі проведених досліджень встановлено, що дана характеристика має лінійний характер, а відносна похибка складає менше 10% ширини піксела.

Запропонований метод визначення геометричних параметрів зображень на основі низькочастотної фільтрації дозволив розробити спосіб виділення контуру зображення для зображень із стаціонарним фоном, оскільки найбільш інформативними є характеристики саме контурів об'єктів. Задача виділення контуру полягає в побудові бінарного зображення в результаті порогової обробки, яка передбачає розділення усіх відліків зображення на два класи за ознакою яскравості: об'єкт і фон [3]. Основною проблемою тут є вибір порога.

Для автоматичного вибору порога запропоновано використовувати спеціальну гістограму, яка представляє собою густини розподілення ймовірностей яскравостей спільних точок примежових кривих фільтрованих зображень. Оскільки в крайових точках, що є спільними точками примежових кривих фільтрованих зображень, градієнт має найбільше значення, то даний параметр можна використовувати як порогове значення для отримання гістограми з абсолютно іншими характеристиками. На рис. 2,*а* наведена гістограма зображення краплі зі стандартними піками фона та об'єкта. На рис. 2, *б* – гістограма спільних точок двох фільтрованих зображень, що мають набагато менші значення густини розподілення ймовірності яскравості, але форма гістограми при цьому залишається незмінною.

На рис. 2, *в* наведена гістограма спільних точок двох фільтрованих зображень з урахуванням значення порога градієнта, яка має єдиний пік, величина яскравості якого оцінюється автоматично. Таким чином, в результаті оцінки параметрів діаграми можна вибрати поріг l_0, що відповідає максимуму густини розподілення ймовірності яскравості та отримати зображення шляхом поелементного перетворення згідно з формулою:

$$g(x,y) = \frac{f^2(x,y)}{l_0}. \qquad (10)$$

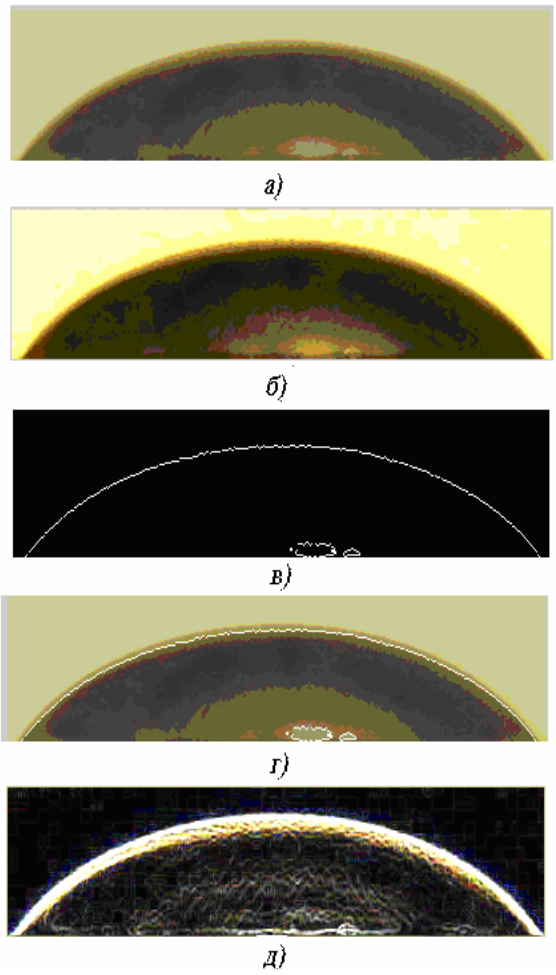


а) вхідного зображення; б) спільних точок двох фільтрованих зображень; в) спільних точок двох фільтрованих зображень з урахуванням значення порога градієнта

Рисунок 2 – Гістограми зображення краплі

Виділення краю зображення виконувалося шляхом знаходження точок перетину вхідного зображення та зображення, що було отримане в результаті поелементного перетворення вигляду:

$$h(x,y) = \begin{cases} 1 \ при \ g(x,y) = f(x,y); \\ 0 \ при \ g(x,y) \neq f(x,y). \end{cases} \qquad (11)$$



а) - вхідне; б) - зображення в результаті перетворення; в) - виділення контуру; г) - оконтурювання; д) - оператором Собела

Рисунок 3 – Виділення контуру зображення краплі

Таким чином запропонований метод виділення контуру передбачає такі кроки:

- реєстрацію зображення;
- виконання низькочастотної фільтрації за допомогою відповідної маски;
- побудову гістограми густини розподілення ймовірності яскравостей точок перетину вхідного та фільтрованого зображення з урахуванням градієнта;
- автоматичне визначення порогу;
- поелементне перетворення вхідного зображення;
- виділення контуру зображення шляхом знаходження точок перетину вхідного

зображення та зображення, отриманого в результаті перетворення;

- оконтурювання зображення.

Для ілюстрації роботи запропонованого способу використовувалося зображення лежачої краплі, поверхневий натяг рідини якої визначався через її геометричні параметри. На рис. 3 наведені зображення краплі та проілюстровані кроки отримання контуру, а також для порівняння виділений контур даної краплі оператором Собела. Зображення краплі, виділене оператором Собела, має широкий контур у декілька пікселів і не може бути використаний для точного визначення координат контуру. Слід відмітити, що застосування будь-яких градієнтних операторів дає подібні результати. Контур краплі, отриманий на основі запропонованого способу (рис. 3, *в*), має неперервну тонку лінію, точки якого знаходяться в центрі примежової кривої, що є його основною перевагою.

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– запропонований метод визначення геометричних параметрів сегментних елементів зображення на основі використання низькочастотного гауссового фільтра відповідної орієнтації;

– застосування спеціальних низько-частотних гауссових фільтрів дало змогу отримати характерні спільні точки примежових кривих до та після фільтрації;

– отримані формули для знаходження краю зображення, визначення максимуму яскравості плями розсіювання, а також координати лінії;

– відносна похибка методу визначення геометричних параметрів зображень складає менше 10% ширини піксела, що дозволяє підвищити точність вимірювання краю зображення;

– на основі наведеного методу запропонований спосіб виділення контуру зображення, основною перевагою якого є стоншений контур у вигляді неперервної лінії одиничної ширини з координатами точок, що відповідають середині примежової кривої.

Література

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. Fisher R. B., Naidu D. K. A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection //Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision. –Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. – P. 205 – 229.

3. Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.

4. Кононов В.И. и др. Оптические системы построения изображений. – К.: Техніка, 1981. – 133с.