

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.7

Й. Й. Білинський, к. т. н., доц.;

В. В. Мотигін к. т. н., доц.

МЕТОД СУБПІКСЕЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КРАЮ ОБ'ЄКТА НА ЗОБРАЖЕННІ НА ОСНОВІ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Запропоновано метод знаходження краю зображення об'єкта на основі низькочастотної фільтрації шляхом використання поліноміальної інтерполяції, що дозволяє отримати координати крайової точки з субпіксельною точністю.

Вступ

Алгоритми субпіксельного вимірювання краю зображення об'єкта стають популярнішими, оскільки їх мета — забезпечити надроздільну здатність. Багато дослідників розвинуло різні методи для виявлення контуру з точністю до субпікселя [1]. Але не дивлячись на велику кількість публікацій, тема субпіксельного вимірювання на сьогодні не розкрита з точки зору універсальної кількісної оцінки, оскільки будь-яке зображення піддається дискретизації, а також впливу шумів, які завжди присутні у фізичних вимірюваннях і навіть невелика помилка у вхідних даних може призвести до неправильного рішення.

Край об'єкта на зображенні можна розглядати як перепади одно- або двовимірного сигналу, що мають форму сходинки. Тоді фрагмент реального зображення можна апроксимувати ідеальним перепадом. Вважається, що перепад існує, якщо середньоквадратична похибка апроксимації нижча деякого граничного рівня. У випадку одновимірного краю зображення об'єкта перепад апроксимується східчастою функцією вигляду

$$S(x) = \begin{cases} b, & x < x_0; \\ b + h, & x \geq x_0, \end{cases}$$

де x — поточна координата, x_0 — координата крайової точки, b — приріст функції, h — полярні координати точки перепаду, найближчої до центра досліджуваної колової області [4].

Аналіз попередніх досліджень

Край реального об'єкта на зображенні можна визначити як через максимуми похідної першого порядку, так і через нулі похідної другого порядку [1—3]. Методи на основі похідної першого порядку дають можливість швидко й ефективно знаходити краї, які є непаралельними осям сітки, використовуючи величину і напрямок градієнта з похибкою, не меншою 0,5 міжпіксельної ширини. Методи, які ґрунтуються на перетині нульового рівня (похідної другого порядку), також використовуються для вимірювання краю завдяки їх пониженій чутливості до шуму та потенційній стійкості в роботі.

Оскільки похідні дуже чутливі до шуму, то для знаходження субпіксельної координати краю шляхом числового диференціювання необхідно регуляризувати. Це можна зробити декількома способами: першим — фільтрацією даних за допомогою відповідних похідних тихоновських фільтрів; другим — інтерполяцією дискретних даних сплайнами з наступним визначенням аналітичної похідної. Ці дві процедури регуляризації еквівалентні, але не дозволяють уникнути похибки дискретизації зображення. [5].

Реалізація та дослідження методу

В роботі запропоновано метод крайового детектування, який не використовує процедури чис-

лового диференціювання й дозволяє мінімізувати похибку дискретизації та отримати субпіксельні координати крайової точки об'єкта на зображенні. Даний метод оснований на знаходженні спільної точки перетину двох примежових кривих, отриманих в результаті низькочастотної фільтрації. Низькочастотна фільтрація виконується за допомогою гауссового фільтра зі спеціально підібраними ваговими коефіцієнтами.

Суть методу полягає в тому, що із вхідної і фільтрованої примежової кривої вибирається k точок, за допомогою яких будуються інтерполяційні поліноми. З цією метою задаються вузли інтерполяції у вигляді таких векторів:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} n - \Delta \\ n \\ n + \Delta \\ n + 2\Delta \\ \dots \\ n + j\Delta \end{pmatrix}; \quad \mathbf{I}_1 = \begin{pmatrix} I_{1,-1} \\ I_{1,0} \\ I_{1,1} \\ I_{1,2} \\ \dots \\ I_{1,j} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{I}_2 = \begin{pmatrix} I_{2,-1} \\ I_{2,0} \\ I_{2,1} \\ I_{2,2} \\ \dots \\ I_{2,j} \end{pmatrix},$$

де \mathbf{N} — вектор координат точок зображення примежової кривої; Δ — міжпіксельний інтервал; \mathbf{I}_1 — вектор яскравості вхідної примежової кривої; \mathbf{I}_2 — вектор яскравості фільтрованої примежової кривої; $j + 2 = k$ — кількість пікселів, що аналізуються.

Для визначення коефіцієнтів інтерполяційного полінома формується матриця $\mathbf{N}_{j,i}$ за умови, що $\mathbf{N}_{j,i} = 1$

$$\mathbf{N}_{j,i} = (n_j)^i = \begin{pmatrix} 1 & n - \Delta & (n - \Delta)^2 & \dots & (n - \Delta)^{j+2} \\ 1 & n & n^2 & \dots & n^{j+2} \\ 1 & n + \Delta & (n + \Delta)^2 & \dots & (n + \Delta)^{j+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & n + j\Delta & (n + j\Delta)^2 & \dots & (n + j\Delta)^{j+2} \end{pmatrix}.$$

Коефіцієнти поліномів обчислюються за формулами

$$a_j(\mathbf{N}, \mathbf{I}_1) = \mathbf{N}_{j,i}^{-1} \mathbf{I}_1; \tag{1}$$

$$b_j(\mathbf{N}, \mathbf{I}_2) = \mathbf{N}_{j,i}^{-1} \mathbf{I}_2, \tag{2}$$

де a_j і b_j — коефіцієнти інтерполяційних поліномів для вхідної та фільтрованої примежових кривих відповідно.

В такому випадку примежові криві, тобто залежність яскравості від номера пікселя можна описати виразами

$$I_1(n) = \sum_{i=0}^{j+1} a_j n^i = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + \dots + a_{j+1} n^{j+1} = f_1(n, I_1); \tag{3}$$

$$I_2(n) = \sum_{i=0}^{j+1} b_j n^i = b_0 + b_1 n + b_2 n^2 + \dots + b_{j+1} n^{j+1} = f_2(n, I_1). \tag{4}$$

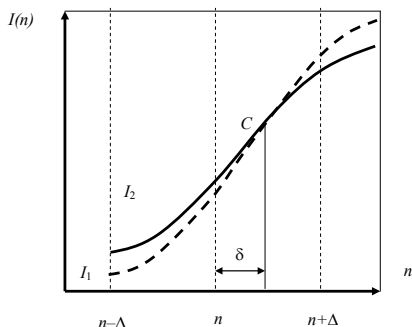


Рис. 1. Поліноміальні примежові криві в результаті фільтрації та їх спільна точка

Крайова точка зображення об'єкта знаходиться на перетині двох поліноміальних кривих (3) і (4), як показано на рис. 1.

Поліноми $I_1(n)$ і $I_2(n)$ примежових кривих перетинаються в точці C з координатами $(I_C, n + \delta)$, яка знаходиться в міжпіксельному просторі і для цього необхідно визначити величину зміщення δ , що відповідає точці перетину двох поліномів, тобто краю зображення об'єкта на примежовій кривій.

Для знаходження субпіксельної координати необхідне виконання умови:

$$I_1(n + \delta) = I_2(n + \delta),$$

з якої стає очевидним, що $\delta = f(n, I \{I_1 = I_2\})$ є розв'язком такої системи:

$$\begin{cases} f_1(n, I_1) = I_C|_{n+\delta} \\ f_2(n, I_2) = I_C|_{n+\delta} \end{cases} \quad (5)$$

Розв'яжемо систему (5), використовуючи метод Ньютона для розв'язування системи нелінійних рівнянь [6].

Проаналізуємо матрицю Якобі

$$J(n, I) = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1(n, I_1)}{\partial n} & \frac{\partial f_1(n, I_1)}{\partial I} \\ \frac{\partial f_2(n, I_2)}{\partial n} & \frac{\partial f_2(n, I_2)}{\partial I} \end{vmatrix}.$$

Якщо матриця Якобі не вироджена, то розв'язок системи рівнянь (5) знайдемо з рекурентного виразу

$$(n + \delta)_i|_{(n, I_C \{I_1=I_2\})} = (n + \delta)_{i-1}|_{(n, I_C \{I_1 \neq I_2\})} - J^{-1}(n, I) \times \begin{vmatrix} f_1(n, I_1) \\ f_2(n, I_2) \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Ітераційний процес здійснюється допоки не буде виконана умова

$$\left| (n + \delta)_i|_{(n, I_C \{I_1=I_2\})} - (n + \delta)_{i-1}|_{(n, I_C \{I_1 \neq I_2\})} \right| \leq \varepsilon,$$

де ε — похибка вимірювання.

Виконаємо розрахунок координати крайової точки, використовуючи математичну модель дискретної примежової кривої, для одновимірного простору, яка розглянута в [7]

$$H^{**}(n) = \frac{\Delta I}{(I_{\max} - I_{\min})} \sum_{k=0}^K \exp\left(-\frac{\pi((n-k) - 0,5 - \delta)^2 \Delta I^2}{(I_{\max} - I_{\min})^2}\right), \quad (7)$$

де δ — зміщення краю примежової кривої відносно центра піксела. Для проведення досліджень скористасмося примежовими кривими з координатою крайової точки $\delta = 0,1$, що мають різні ступені розмиття σ : 1; 1,25; 2, які відповідають максимальним перепадам яскравості на кривій Δ : 0,4; 0,35; 0,2 [6]. При цьому застосуємо інтерполяційний поліном третього степеня, що дозволяє використати чотири вузлові точки, в околі яких знаходиться край.

Визначимо вектори

$$\mathbf{N} = \begin{vmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{I}_1 = \begin{vmatrix} 0,0055 \\ 0,113 \\ 0,554 \\ 0,931 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{I}_2 = \begin{vmatrix} 0,04 \\ 0,204 \\ 0,537 \\ 0,845 \end{vmatrix}.$$

В результаті отримаємо матрицю вигляду $\mathbf{N}_{4,4}$

$$\mathbf{N}_{4,4} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \end{vmatrix}.$$

За формулами (3) і (4) розрахуємо коефіцієнти й отримаємо такі поліноми:

$$I_1(n) = 0,113 + 0,341n + 0,167n^2 - 0,066n^3; \quad I_2(n) = 0,204 + 0,281n + 0,085n^2 - 0,032n^3.$$

На підставі використання дискретної моделі примежової кривої проведено моделювання та отримані результати субпіксельної координати. Це дало змогу виконати порівняльний аналіз запропонованого та відомого методу перетину нульового рівня.

Розраховане значення координати крайової точки

Ступінь розмиття	$\sigma = 1 (\Delta=0,4)$		$\sigma = 1,25 (\Delta = 0,35)$		$\sigma = 2 (\Delta = 0,2)$	
	Інтерполяційний перетин	Перетин нульового рівня	Інтерполяційний перетин	Перетин нульового рівня	Інтерполяційний перетин	Перетин нульового рівня
Зсув краю δ	0	0	0	0	0	0
0,1	0,107	0,138	0,108	0,128	0,106	0,112
0,2	0,217	0,246	0,217	0,236	0,208	0,209
0,3	0,321	0,34	0,316	0,335	0,311	0,318
0,4	0,415	0,415	0,41	0,419	0,4	0,401
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,6	0,588	0,577	0,63	0,661	0,601	0,595
0,7	0,671	0,66	0,681	0,671	0,702	0,69
0,8	0,769	0,752	0,783	0,764	0,791	0,793
0,9	0,878	0,862	0,893	0,872	0,895	0,892

В таблиці показані субпіксельні координати крайової точки на основі використання моделі прилежної кривої з різними ступенями розмиття, які отримані даними методами.

Дослідження показали, що субпіксельні координати, отримані для прилежних кривих зі ступенем розмиття $1 < \sigma < 2$ та протяжністю від 5 до 20 пікселів запропонованим методом, мають вищу точність в порівнянні з методом нульового рівня. Для прилежних кривих великої протяжності зі ступенем розмиття $\sigma > 2$ результати знаходження субпіксельної координати крайової точки практично збігаються.

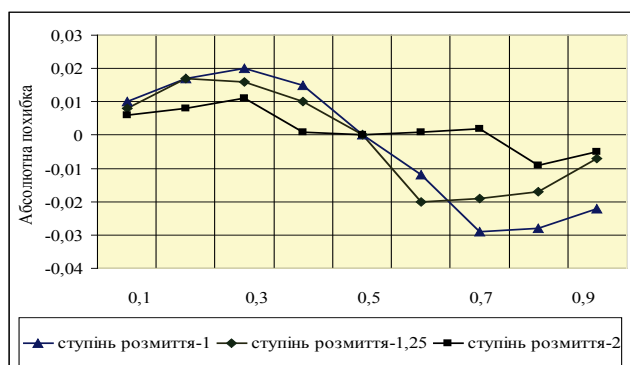


Рис. 2. Залежність значення абсолютної похибки визначення крайової точки

На рис. 2. показана залежність абсолютної похибки знаходження краю для декількох прилежних кривих з різним ступенем розмиття.

З графіка видно, що величина похибки для будь-яких прилежних кривих дорівнює нулю, коли зсув крайової точки в міжпіксельному просторі становить 0 або 0,5 та відмінна від нуля у всіх інших випадках. Максимальна відносна похибка для $\sigma = 1$ не перевищує 7%.

Висновки

Запропоновано метод крайового детектування на основі низькочастотної фільтрації, який використовує для відтворення неперервної прилежної кривої поліноміальну інтерполяцію, що дозволяє отримати субпіксельну координату крайової точки об'єкта на зображенні.

Проведені дослідження підтвердили адекватність запропонованого методу. Похибка отриманих результатів визначення краю в міжпіксельному просторі є меншою в порівнянні з результатами, отриманими методом перетину нульового рівня.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / [Фурман Я. А., Кривецкий А. В., Передреев А. К. и др.]; под ред. Я. А. Фурмана.—2-е изд., испр.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.—592 с.
2. Русин Б. П. Системы синтеза, обработки та розпізнавання складноструктурованих зображень / Б. П. Русин — Львів: Вертикаль, 1997. — 264 с.
3. Абду И. Э. Количественный расчет детекторов контуров, основанных на подчеркивании перепадов яркости с последующим пороговым ограничением / И. Э. Абду, У. К. Прэтт // ТИИЭР. — 1979. — Т. 67, № 5. — С. 59—70.
4. D. Marr, E. Hildret. Theory of edge detection // Proc. Roy. Soc. London B-207. — 1980, P. 187—217.
5. Бертеро М. Некорректные задачи в предварительной обработке визуальной информации / М. Бертеро, Т. А. Поджо // ТИИЭР. — 1988. — Т.76, № 8. — С. 17—39.
6. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика / В. П. Дьяконов. — М.: «Нолидж», 2001 — 1296 с.
7. Білінський Й. Й. Математична модель локалізації краю зображення об'єкта/ Й. Й. Білінський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2007. — № 3(10). — С. 73—79.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 24.04.08
Рекомендована до друку 16.05.08

Білінський Йосип Йосипович — доцент, **Мотизін Володимир В'ячеславович** — доцент.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет