

УДК 621.391

Р. Я. Косаревич, М. І. Кобасяр, Б. П. Русин

ВИЗНАЧЕННЯ ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ ЗА МІНІМАЛЬНИМ ПЕРЕРІЗОМ ГРАФА

This paper focuses on weight costs construction for graph-cuts application in image segmentation task. We propose condition for graph's edge weight determination which allows more accurate segmentation of objects presented in image.

Розглянуто проблему формування вагових коефіцієнтів під час сегментації зображень за допомогою знаходження мінімального перерізу графа, який відповідає зображенню. Запропоновано спосіб формування ваг, який ґрунтується на узагальненні характеристик вершин графа у деякому околі, що дає змогу детальніше сегментувати зображення.

Сегментація – одне з найголовніших завдань аналізу зображення, метою якого є отримання інформації, що містить зображення. Її важливість зумовлена тим, що це фактично один з перших етапів дослідження зображення, який спотворює зображення. Тому його результати мають визначальне значення для всіх наступних етапів. Очевидно, формування ознак об'єктів, їх розпізнавання значною мірою залежать від сегментації зображення.

Одним з декількох головних напрямків у задачі сегментації зображення є використання графа як моделі зображення. Перші спроби такого застосування були у 70-х роках ХХ століття [16, 17]. Підхід, запропонований у [16], полягав у виявленні на зображенні кластерів за допомогою пошуку в графі мінімального остова. Фактично цей підхід більше застосовували у задачах кластеризації, оскільки менш-більш прийнятні результати можна було отримати лише для простих синтезованих зображень. Сучасна література виділяє два основних методи сегментації зображень на основі перерізів графів: пошук мінімального нормованого перерізу графа [11, 13–15] та мінімізацію енергії на основі пошуку в графі максимального потоку між двома фіксованими вершинами [1, 2, 9, 10].

З погляду мінімізації енергії сегментація зображень вимагає побудови деякої функції енергії, означеної на елементах зображення та вибору алгоритму її мінімізації. Функція енергії відображає як властивості кожного з елементів зображення так і локальний зв'язок між ними. Ці локальні зв'язки відображаються за допомогою вагових функцій. В основі цих функцій лежить загальне правило: чим подібніші значення характеристик, тим більше значення цієї функції, і навпаки. Вони можуть базуватися на різниці яскравостей, локальній оцінці градієнту яскравості, його напрямку, властивостях вибраної метрики, текстурних ознаках, ознаках сформованих фільтрами Габора та ін. [1, 2, 4, 8, 10, 12, 14]. Така різноманітність може означати, що загального правила для вибору функції формування вагових коефіцієнтів не існує. Тому для формування ваг елементів зображення певного типу потрібно проводити дослідження різних функцій.

У роботі розглядаємо задачу вибору вагової функції для знаходження мінімального перерізу графа у задачі сегментації зображень структури матеріалів. Метою досліджень є вибір виду компонентів вагової функції, що описують співвідношення між точками на краях об'єкта. Точне виділення країв дасть змогу побудувати більш достовірні кількісні характеристики зображених об'єктів.

Представлення зображення у вигляді зваженого графа. Пошук мінімального перерізу в графі полягає у побудові зваженого графа, що відповідає досліджу-

© Р. Я. Косаревич, М. І. Кобасяр, Б. П. Русин, 2009

ваному зображенню та знаходженню такої послідовності ребер графу, відкидання якої розділяє граф на окремі зв'язні компоненти. Сьогодні найбільш повно досліджені методи, при яких граф ділиться на дві зв'язні компоненти. Отримана при цьому сегментація є бінарizaцією зображення [2, 4, 6, 10, 12].

Граф $G = (U, V)$ можна поставити у відповідність зображенню, якщо множина вершин U відповідатиме точкам зображення, а множина ребер V – зв'язкам між сусідніми точками (рис. 1). Множина сусідніх точок визначається вибраним типом зв'язності (4, 8, 16...) елементів зображення.

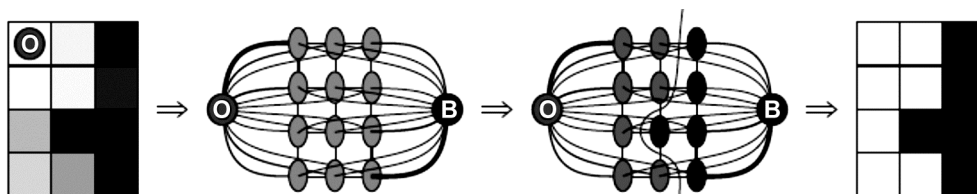


Рис. 1. Формування графа зв'язків, знаходження мінімального перерізу та сегментація на прикладі синтезованого зображення.

Множина U доповнюється двома, так званими, термінальними вершинами, які уособлюють об'єкт та фон. Кожна з цих двох вершин з'єднана ребром з кожною вершиною графа. Вершини ж графа, що належать множині U , з'єднані між собою ребрами відповідно до вибраного типу зв'язності. Кожному ребру $v \in V$ приписується деяке число – вага ребра. Знаходження мінімального перерізу графа означає таку послідовність його ребер, вилучення якої з множини V робило б термінальні вершини повністю відокремленими, тобто між ними не існувало б шляху. Крім того, сума ваг ребер, які становлять цей переріз, має бути мінімальною серед інших можливих перерізів. Знаходження мінімального перерізу означатиме розділення фрагментів зображення, які менше всього між собою пов'язані, як то об'єкт і фон.

Вибір вагових функцій. Зосередимо увагу на виборі функцій, які визначають ваги для нетермінальних вершин графа. Як зазначали, для задачі сегментації зображення, ці функції повинні відображати взаємний зв'язок між точками зображення. Коли точки зображення мають подібні характеристики, функція повинна формувати велику вагу для ребра, що їх з'єднує, і навпаки, коли характеристики значно різняться, вага повинна бути малою. За таких умов переріз графу із мінімальною вагою якраз проходить по границі між об'єктом та фоном. Тому добрий вибір функцій побудови ваг дасть змогу точніше відслідкувати цю границю, отже точніше виділити об'єкт на зображенні.

Традиційно цю функцію вибирають у такому вигляді [1]:

$$u(p, q) = \lambda_I \exp\left(-\frac{(I_p - I_q)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \frac{1}{\text{dist}(p, q)}, \quad (1)$$

де I_p, I_q – яскравості у точках p, q відповідно, коефіцієнт σ вибирається на основі експериментів і, як правило, залежить від властивостей зображення, наприклад, контрасту, λ_I – коефіцієнт, що визначає важливість ваг для нетермінальних вершин. Деякі інші відомі вагові функції наведені у табл. 1.

Відомі роботи, в яких подальші вдосконалення вагових функцій полягають у збільшенні виду зв'язності між пікселами з 4-х або 8-ми до 16-ти і більше, а також переходу від Евклідової метрики до метрики Рімана або Фінслера [4, 10]. Це, в окремих випадках, дає можливість отримати кращі результати сегментації [4], але при цьому збільшує кількість необхідних обчислень. Тому метою досліджень

була така модифікація виразу (1), яка б давала змогу детальніше провести сегментацію об'єкта, але незначно збільшувала обчислювальні затрати.

Таблиця 1. Вид окремих вагових функцій

Функція	Параметри	Джерело
$u(p, q) = - I_p - I_q $	I_p, I_q – яскравості у точках p, q	[14]
Вираз (1) $\times (I_p - I_q)$	I_p, I_q – яскравості у точках p, q	[1]
$u(p, q) = \max \left(\frac{2^{M- I_p-I_q }}{2^{d(p,q)}}, 1 \right)$	I_p, I_q – яскравості в точках p, q ; $d(p, q)$ – відстань між p та q	[13]
$u(p, q) = \left[\begin{array}{c} \vec{\text{grad}}(p, q), \vec{e}(p, q) \end{array} \right]$	$\text{grad}(p, q)$ – вектор градієнта яскравості між p та q ; $e(p, q)$ – вектор між p та q	[8]
$u(p, q) = \frac{\partial^2 e ^2 \Delta \phi \det D(p, q)}{2(e^T D(p, q) e)^{3/2}}$ $D(p, q) = g(\nabla I)I + (1 - g(\nabla I))vv^T$, $v = \frac{\nabla I}{ \nabla I }$	$\delta, e, \Delta \phi$ – параметри метрики, g – функція виду (1).	[12]

Для зображень макроструктури матеріалів характерною є мала величина контрасту та нерівномірна освітленість, що зумовлено способом їх отримання. Тому для ділянок, які відповідають краям об'єктів, характерна невелика зміна яскравості. Також рівень яскравості точок на краю і всередині об'єкта може значно відрізнитись. Тому формування ваг ребер графа на основі виразу (1) може не відобразити ці зміни. Отже, потрібно перетворити цей вираз так, щоб враховувались сусідні точки зображення, але не змінювався вид суміжності точок.

Областю детальнішої уваги є частина зображення, яскравість у точках якої розташована між апріорно заданими зразками яскравостей об'єкта та фону. Саме таким точкам характерні, зазначені вище, зміни. Більш точніше її можна виділити, скориставшись тим, що в кожній точці цієї області для деякого околу виконуються одночасно такі умови:

$$\begin{aligned} \text{median}(N_p) &> \text{mean}(N_p) \\ I_p &> \text{mean}(N_p) \end{aligned} \quad (2)$$

де I_p – яскравість у точці p ; N_p – окіл точки p ; $\text{median}(\cdot)$, $\text{mean}(\cdot)$ – медіана та середнє значення яскравостей в околі N_p .

Використання медіани у виразі (2) дає змогу оцінити точки, з якими яскравостями переважають в околі точки p . Якщо медіана більша за середнє значення, то переважають точки із більшою за середнє значення яскравістю, і навпаки. Така ситуація якраз властива для точок, які розташовані на краю об'єкта. При невеликому контрасті це дає можливість додатково оцінити яскравості точок. Друга умова у виразі (2) є обмежувачем для точок з малою яскравістю. У такий спосіб ми відкидаємо точки, які не належать об'єкту.

Щоб не втратити точки, які належать об'єкту, потрібно присвоїти великі ваги тим ребрам, що їх поєднують. У цьому випадку доцільно присвоїти точкам p та q у виразі (1) однакове значення яскравості, наприклад, у точці p . Це дає можливість “зберегти” точки об'єкта, яскравість котрих відрізняється від середньої.

Результати експериментів. Для знаходження мінімального перерізу графа використаний алгоритм, наведений в [3]. У програмному кодї використано бібліотеку функцій для середовища Matlab, розміщену за адресом [7].

Щоб порівняти результати роботи методу сегментації на основі пошуку мінімального перерізу графа, з використанням запропонованої вагової функції, вибрано фрагмент зображення структури матеріалу, який наведено на рис. 2а. За точку відліку вибрано сегментацію на основі встановлення порогу, проведену спеціалістом матеріалознавцем (рис. 2б). З метою оцінки вибраного порогу сегментації на рис. 2в наведено результат накладання контуру (рис. 2в) сегментованого зображення (рис. 2б) на вихідне зображення (рис. 2а). На рис. 2г і д наведено результати сегментації з використанням вагових функцій у вигляді (1), а на рис. 2е і є із використанням вагових функцій за умови (2). В обох випадках вибрана 4-х зв'язна система сусідства, $\sigma=10$, $dist(p, q) = |p_x - q_x| + |p_y - q_y|$.



Рис. 2. Вихідне зображення (а) та результати сегментації. б, в – встановлення порогу; г, д – на основі виразу (1); е, з – на основі виразу (2).

Таблиця 2. Порівняння кількісних характеристик сегментованих зображень

Метод / Характеристики	Площа, піксели	Відносна похибка, %	Периметр, піксели	Відносна похибка, %	Час роботи, сек
“Встановлення порогу”	795	0	117	0	–
Вираз (1)	782	1,64	115	1,71	0,4109
Вираз (2)	792	0,38	116	0,85	0,6547

З даних, наведених у табл. 2, видно різницю у кількісних характеристиках об'єкта, сегментованого з використанням виразу (1) та застосування умови (2). Приклади детальнішого виділення краю об'єкта зображено на рис. 3. Приклади застосування умови (2) для інших зображень наведено на рис. 4.

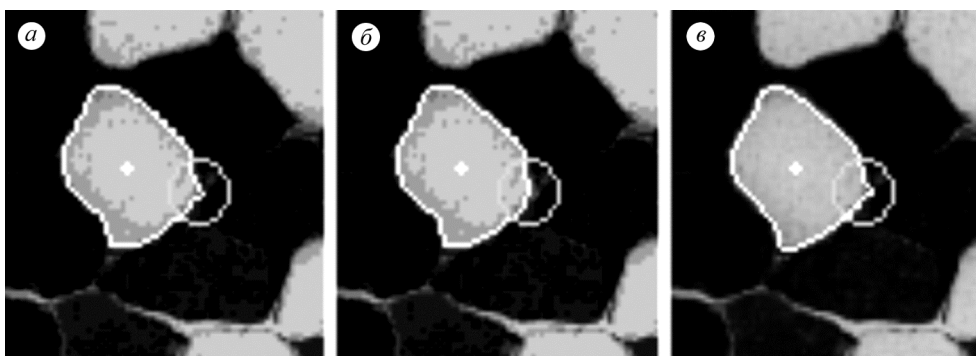


Рис. 3. Приклад детальності сегментації зображення.

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження функції формування ваг ребер графа у задачі пошуку мінімального перерізу для сегментації зображень структури матеріалів. З'ясовано умову для визначення областей зображення із неоднорідною яскравістю. Запропоновану модифікацію відомої функції формування ваг, використання якої у таких областях для сегментації зображень структури матеріалів дає змогу детальніше сегментувати об'єкт досліджень, незважаючи на незначне зростання часу роботи.

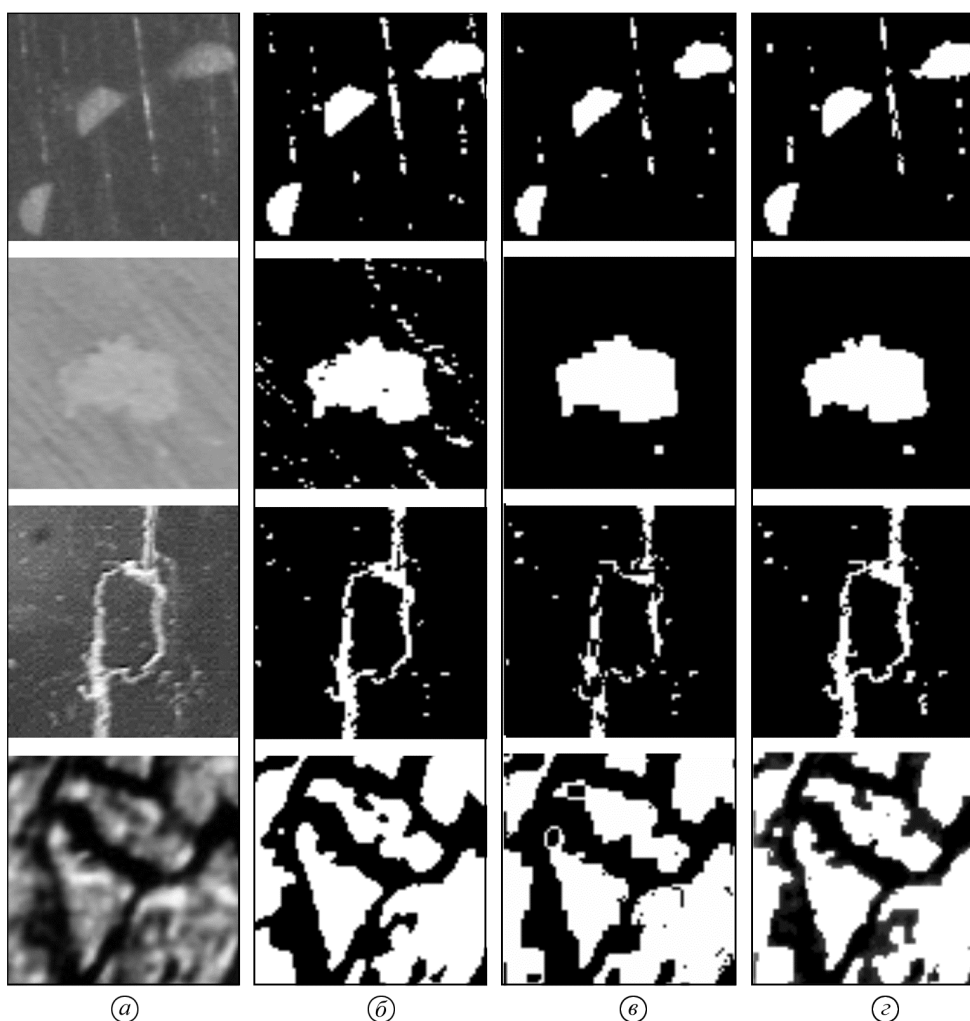


Рис. 4. Порівняння результатів сегментації зображень без використання та з використанням умови (2); *a* – вихідні зображення, *б* – сегментація встановленням порогу, *в* – на основі виразу (1); *г* – з використанням умови (2).

Робота виконувалась в рамках теми “Розроблення автоматизованих методів кількісного оцінювання розподілу структурних складових та встановлення їх зв’язку з механічними властивостями для оццанологованих теплостійких сталей”.

1. Boykov Y., Funka-Lea G. Graph cuts and efficient N-D image segmentation // Int. J. of Computer Vision. – 2006. – 70, № 2. – P. 109–131.
2. Boykov Y., Jolly M.-P. Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in N-D images // 8th Int. Conf. on Computer Vision (ICCV-01), (Vancouver, British Columbia, Canada, July 7–14, 2001). – IEEE Computer Society. – 2001. – P. 105–112.
3. Boykov Y., Kolmogorov V. An Experimental Comparison of Min-Cut/Max-Flow Algorithms for Energy Minimization in Vision // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2004. – 26, № 9. – P. 1124–1137.
4. Boykov Y., Kolmogorov V. Computing geodesics and minimal surfaces via graph cuts // 9th IEEE Int. Conf. on Computer Vision (Nice, France, October, 14–17, 2003). – IEEE Computer Society. – 2003. – P. 26–33.
5. Gdalyahu Y., Weinshall D., Werman M. Stochastic image segmentation by typical cuts // 1999 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (Ft. Collins, CO, USA, June, 23–25, 1999). – IEEE Computer Society. – 1999. – P. 596–601.

6. Greig D., Porteous B., Seheult A. Exact maximum a posteriori estimation for binary images // J. of the Royal Statistical Society. – 1989. – **51**, № 2. – P. 271–279.
7. <http://www.csd.uwo.ca/faculty/yuri/Implementations/maxflow-v3.0.src.tar.gz>
8. Jermyn I. H., Ishikawa H. Globally optimal regions and boundaries as minimum ratio weight cycles // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2001. – **23**, № 10. – P. 1075–1088.
9. Kolmogorov V., Zabih, R. What energy functions can be minimized via graph cuts? // 7th European Conf. on Computer Vision (Copenhagen, Denmark, May 28–31, 2002). – Springer. – 2002. – P. 65–81.
10. Kolmogorov V., Boykov Y. What metrics can be approximated by geo-cuts, or global optimization of length/area and flux // 10th IEEE Int. Conf. on Computer Vision (Beijing, China, October, 17–20, 2005). – IEEE Computer Society. – 2005. – P. 564–571.
11. Shi J., Malik J. Normalized cuts and image segmentation // 1997 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (San Juan, Puerto Rico, June, 17–19, 1997). – IEEE Computer Society. – 1997. – P. 731–737.
12. Vasilevskiy A., Siddiqi K. Flux maximizing geometric flows // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2002. – **24**, № 12. – P. 1565–1578.
13. Veksler O. Image segmentation by nested cuts // 2001 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (Kauai, HI, USA, December, 8–14, 2001). – IEEE Computer Society. – 2001. – P. 339–344.
14. Wang, S., Siskind, J. M. Image segmentation with ratio cut // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2003. – **25**, № 6. – P. 675–690.
15. Wu Z., Leahy R. An optimal graph theoretic approach to data clustering: theory and its application to image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1993. – **15**, № 11. – P. 1101–1113.
16. Zahn C. T. Graph-theoretic methods for detecting and describing gestalt clusters // IEEE Transactions on Computing. – 1971. – **20**, № 1. – P. 68–86.
17. Zhang Yu–Jin. Advances in image and video segmentation. – London: IRM Press, 2006. – 457 p.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
НАН України, Львів

Одержано
27.01.2009