

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МОРФОЛОГІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ У КОМП'ЮТЕРНОМУ СТЕРЕОЗОРИ

*Анотація. Представлено інформаційну технологію підвищення змістовності мап диспаратності на базі апарату методів математичної морфології. В основу даної технології покладено комбінації морфологічних операцій ерозії та дилатації, що дозволяє усувати типові проблеми розривів монотонних областей та помилкових значень на мапах диспаратності, які інтерпретовані півтоновим зображенням. Запропонований підхід дозволяє редукувати вплив поширених проблем, які виникають під час роботи алгоритмів пошуку стереовідповідності, а також підвищити загальну інформативність мап диспаратності для зображень реальних об'єктів за умови часткової або повної відсутності початкових даних про характеристики сцени, що спостерігається.*

*Ключові слова: морфологічне оброблення, комп'ютерний стереозір, мапа диспаратності, ерозія, дилатація.*

**Вступ.** Зростання складності та розмаїтості аналізованої візуальної інформації обумовлює необхідність неперервного поліпшення відомих та пошуку нових підходів у методах комп'ютерного зору. Комп'ютерні засоби обробки інформації активно укорінюються в якості неодмінного елемента роботи в широкому спектрі галузей людської діяльності. Зокрема, зростає число прикладних завдань, пов'язаних з необхідністю обробки зображень об'єктів реального світу комп'ютеризованими інструментами та подальшим використанням отриманої описової інформації в різноманітних інтерактивних та автоматизованих системах прийняття рішень [1]. Подібний опис є можливим з різним ступенем складності, наприклад, він може включати інформацію про структурні елементи об'єктів, їхнє взаємне розташування в просторі, розмірні та кольорові характеристики тощо, або передбачати лише однобічну, недеталізовану характеристику об'єкта.

**Постановка задачі та мета досліджень.** Постановка задачі полягає в розробці підходу до покращення якості та деталізації метричної інформації морфологічними методами обробки у завданнях реконструкції тривимірних

сцен засобами комп'ютерного стереозору. Метою дослідження є отримання технології покращення мап диспаратності, спотворених численними розривами суцільних областей та випадковими значеннями.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує ряд підходів до отримання цифрового представлення тривимірних сцен реального світу [1]. В залежності від складності описуваної сцени та зовнішніх умов, можуть бути застосовані як активні підходи вирішення даного завдання (наприклад, є наявним додаткове джерело випромінювання із синхронізованим приймачем), так і пасивні підходи (наприклад, додаткове джерело випромінювання є відсутнім або не є синхронізованим з приймачем) [1]. Серед низки розроблених рішень перспективними і широкоживаними є методи стереозору, що полягають в отриманні зображень сцени двома (або більше) камерами із заздалегідь визначеними конфігураціями розміщення та обробкою пар зображень з метою обчислення далекомірної інформації до кожної з видимих точок сцени [2]. Важливим проміжним етапом алгоритмів стереозору перед безпосереднім обчисленням значень відстані до точок сцени є відновлення паралельності епіполярних ліній ректифікацією початкових пар зображень та отримання мап диспаратності шляхом встановлення відповідності проєкцій точок об'єкта на зображенні з першої камери з координатами  $(x_i, y_i)$  до проєкцій точок на зображенні з другої камери  $(x_i - d, y_i)$ , де  $d$  - значення диспаратності. Отримана матриця чисел містить інформацію про відносне розміщення точок сцени на різних зображеннях стереопари і може бути представлена у вигляді зображення, де інтенсивність пікселя відображає ступінь диспаратності точок. Отримання якісної і деталізованої мапи диспаратності є необхідною умовою наступного відновлення даних щодо тривимірного простору сцени, що спостерігається.

Загальним підходом для обчислення значень відстані до окремих точок сцени та її тривимірної реконструкції є триангуляція. Триангуляція передбачає розрахунок тривимірних координат точок сцени в просторі за інформацією про координати її проєкцій на зображеннях з різних камер системи, що міститься в мапі диспаратності. Результатом таких обчислень є мапа глибини (depth map), яка є матрицею, що містить відстані від точок, спроеційованих на зображенні до площини камери.

Для пошуку відповідності пікселів на зображеннях стереоскопічної системи камер було розроблено ряд алгоритмів та їх модифікацій, серед яких широким є алгоритм блокового узгодження Block matching та його модифікація [3]. Загальна робота алгоритму Block matching полягає у визначенні відпові-

дностей між проєкціями точок у просторі на отриманих зображеннях стереопари шляхом рішення задачі мінімізації середньоквадратичної помилки між невеликими блоками зображень за параметром зсуву  $\Delta$  вздовж осі  $x$ :

$$D = \min\{MSE(x, y, \Delta)\}, |\Delta| \leq d_{\max}, \quad (1)$$

де середньоквадратична помилка визначається між зображеннями лівої та правої камер:

$$MSE(x, y, \Delta) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k (|G_L(x+i, y+j) - G_R(x+i+\Delta, y+j)|^2). \quad (2)$$

Відповідно до (1) та (2), узгодження взаєморозташування проєкцій точки простору на двох зображеннях стереопари та визначення міри диспаратності між ними виконується шляхом обчислення такої горизонтальної відстані між блоками обох зображень, яка надає мінімальне значення середньоквадратичної помилки. Зауважимо, що для задачі узгодження зображень використання критерію мінімуму середньоквадратичної помилки не є найкращим підходом, оскільки наявність хоча б одного грубого відхилення від очікуваної яскравості пікселя на якомусь з зображень може призвести до втрати узгодженості. Тому для задачі узгодження є доцільним використання критеріїв, заснованих на квазінормованих ненормованих просторах [4]. Такі критерії надають значні переваги у порівнянні з критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки [5].

Через наявність зворотної залежності для значень мапи глибини та значень мапи диспаратності, ефективна роздільна здатність систем стереозору зберігається на близьких відстанях та знижується зі зростанням відстані до цільової точки простору. Залежно від змісту сцени, що спостерігається, частина значень у мапі диспаратності може бути відразу віднесена до фонових значень за певною ознакою, або утворювати «природній» фон, для якого характерна втрата інформативності даних через неприйнятне значення похибки наступних результуючих значень відстані. Обчислена мапа диспаратності будь-якого алгоритму може містити ряд недоліків у вигляді розривів суцільних інформативних областей, спричинених складністю умов зйомки, впливом шуму різної природи, недосконалістю апаратної частини тощо. Також значний вплив на інформативність та якість мапи мають особливості сцени, що спостерігається, наприклад, відсутність окремих об'єктів чи їх частин на різних ракурсах зйомки, різна освітленість, текстурованість чи однорідність областей зображень. Але швидкість обчислень та простота реалізації дає змогу використовувати ал-

горитм Block matching для різноманітних систем, де деталізація мапи диспаратності дозволяє наявність незначних помилок.

**Основна частина.** Підходом до послаблення небажаного впливу типових негативних факторів на результуючу мапу диспаратності може виступати використання операцій математичної морфології для процесингу мап диспаратності на етапі післяобробки.

Базовими операціями алгоритмів морфологічної обробки зображень є операція дилатації (розширення) та двоїста до неї операція ерозії (стискання) [6]. Для бінарного зображення застосування дилатації призводить до «розширення» зображених об'єктів. Результуючий ступінь і форма такого «розширення» залежить від форми і розмірів примітиву (структурного елемента), що використовується.

Для бінарного зображення операція дилатації множини  $A$  множиною  $B$  із простору  $Z^2$  зображення формалізована наступним виразом:

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\}, \quad (3)$$

де  $z$ - зміщення, при якому множини  $\hat{B}$  і  $A$  збігаються не менш ніж в одному елементі, а результатом операції вважається множина таких зміщень  $z$ . Операція ерозії множини  $A$  множиною  $B$  визначає множину таких точок  $z$ , зсув до яких передбачає, що множина  $B$  повністю міститься в множині  $A$ . Морфологічна операція ерозії, за аналогією до (3), може бути описана наступним виразом:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\}. \quad (4)$$

У випадку бінарних зображень множина  $A$  інтерпретується інформативною областю, а множина  $B$  - невеликим елементарним зображенням (примітивом), форма і зміст якого залежать від досліджуваних властивостей зображення, яке розглядається.

Оскільки мапа диспаратності може бути представлена у вигляді півтонового зображення, то має місце проведення морфологічних операцій дилатації та ерозії для відповідного типу зображень.

Дилатація для півтонового зображення пласким (однотонним) примітивом описується наступним виразом:

$$(f \oplus b)(x, y) = \max_{(s,t) \in b} \{f(x-s, y-t)\}, \quad (5)$$

де  $f$  - зображення, що обробляється примітивом  $b$ , ширина і висота якого визначаються значенням  $s$  і  $t$  в довільній точці з координатами  $(x, y)$ .

Аналогічним чином, операція ерозії для півтонового зображення описується наступним виразом:

$$(f \ominus b)(x, y) = \min_{(s,t) \in b} \{f(x + s, y + t)\}. \quad (6)$$

Отже, дилатація для деякого півтонового зображення в довільних координатах  $f(x, y)$  визначається за пласким примітивом  $b$  як максимальне значення  $f$  в околі  $b$ ; ерозія для деякого півтонового зображення  $f$  в точці  $(x, y)$  за однотонним примітивом  $b$  є мінімальним значенням  $f$  в околі  $b$ .

Послідовне чергування операцій дилатації (розширення деталей) та ерозії (звуження деталей) утворює дві важливі операції морфологічної обробки: розмикання, або заповнення (opening - ерозія з наступною дилатацією), та замикання, або поповнення (closing - дилатація з наступною ерозією) [6]. Розмикання дозволяє частково згладити контури об'єктів, видаляє вузькі з'єднання та ліквідує виступи, які співставні за розмірами з примітивом. Операція замикання також призводить до часткового згладжування ділянок контурів об'єктів та в загальному випадку «заливає» вузькі проміжки й довгі заглиблення, а також заповнює невеликі «дірки» та розриви контуру значеннями на основі інформативних ділянок об'єкта, що знаходяться поруч.

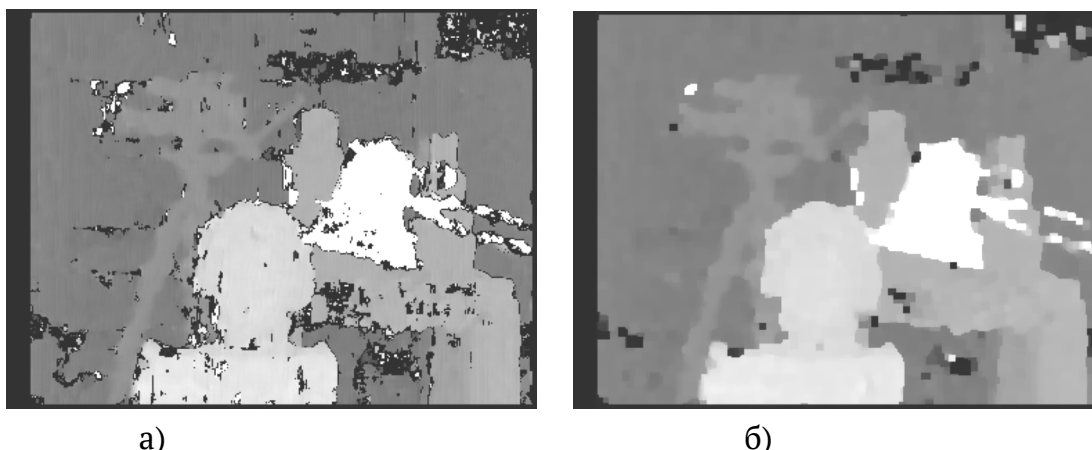
Використовуючи вирази (5) та (6), операція розмикання може бути записана наступним чином:

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b; \quad (7)$$

операції замикання інтерпретується відповідно до (5) та (6) виразом:

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b \quad (8)$$

Для ілюстрації ефективності застосування даного підходу було використано початкову мапу диспаратності шириною 384 та висотою 288 пікселів з набору даних Tsukuba, отриману за допомогою алгоритму Block matching (рис. 1а). Цю мапу, яка мала ряд типових спотворень, було послідовно оброблено морфологічним оператором (8) та оператором (7) пласким круглим примітивом радіусом 5 пікселів. Оброблена мапа диспаратності (рис. 1б) демонструє значне скорочення кількості розривів інформативних областей (чорний колір) та помилкових значень (поодинокі світлі ділянки), а також зменшення великих прогалів (наприклад, правий верхній кут).



а)

б)

Рисунок 1 - Мапа диспаратності: а) початкова мапа; б) мапа, оброблена морфологічними методами

Іншим прикладом використання морфологічних операцій є обробка мапи диспаратності, обчисленої за допомогою алгоритму Block matching з використанням пари зображень реальних об'єктів на однотонному фоні. В даному випадку суттєвим є негативний вплив помилкових спрацювань алгоритму Block matching для однотонних областей. Початкова інвертована мапа диспаратності (рис. 2а), де темніший колір вказує на наближеність об'єкту, окрім типових спотворень містить логічні помилки, пов'язані із «розширенням» об'єктів відносно їх реальних меж на початковому зображенні через вплив помилкових спрацювань пошуку відповідності блоків у алгоритмі Block matching. Ці помилкові спрацювання відбувалися на межі фону та інформативних областей об'єктів під час використання квадратного вікна пошуку зі стороною 21 піксель.

Для очищення фону від помилкових спрацювань до початкової мапи диспаратності було застосовано морфологічну операцію розмикання (7) із використанням плаского круглого примітиву радіусом 5 пікселів. Після цього послідовно було застосовано дилатацію (5) з пласким круглим примітивом радіусу 21 піксель та ерозію (6) з аналогічним примітивом з радіусом 31 піксель. При цьому різниця розмірів між примітивами дилатації та ерозії відповідала половині пошукового вікна алгоритму Block matching і була спрямована на усунення розширення інформативних областей об'єктів на мапі диспаратності, які можуть виникати під час роботи алгоритму Block matching на границях об'єктів і монотонного фону.

Результуюча мапа диспаратності (рис. 2б) містить чітко розділені фон та інформативні області об'єктів. Видалений з фону шум та помилкові спрацювання на границі об'єктів зображено на рис. 2в. Це дозволило виконати набли-

ження контурів інформативних областей мапи диспаратності до контурів об'єктів на зображенні. Інформативні області, що були додані за результатами морфологічної обробки, зображено на рис. 2г.

Застосування морфологічних операцій без попереднього аналізу об'єктів сцени також дозволило частково відновити ті значення інформативних областей у верхній частині лівого об'єкту, що були втрачені через монотонність даної області. Проте це призвело до частково включення в границі інформативних областей значень диспаратності, які пов'язані із тіннями об'єктів.

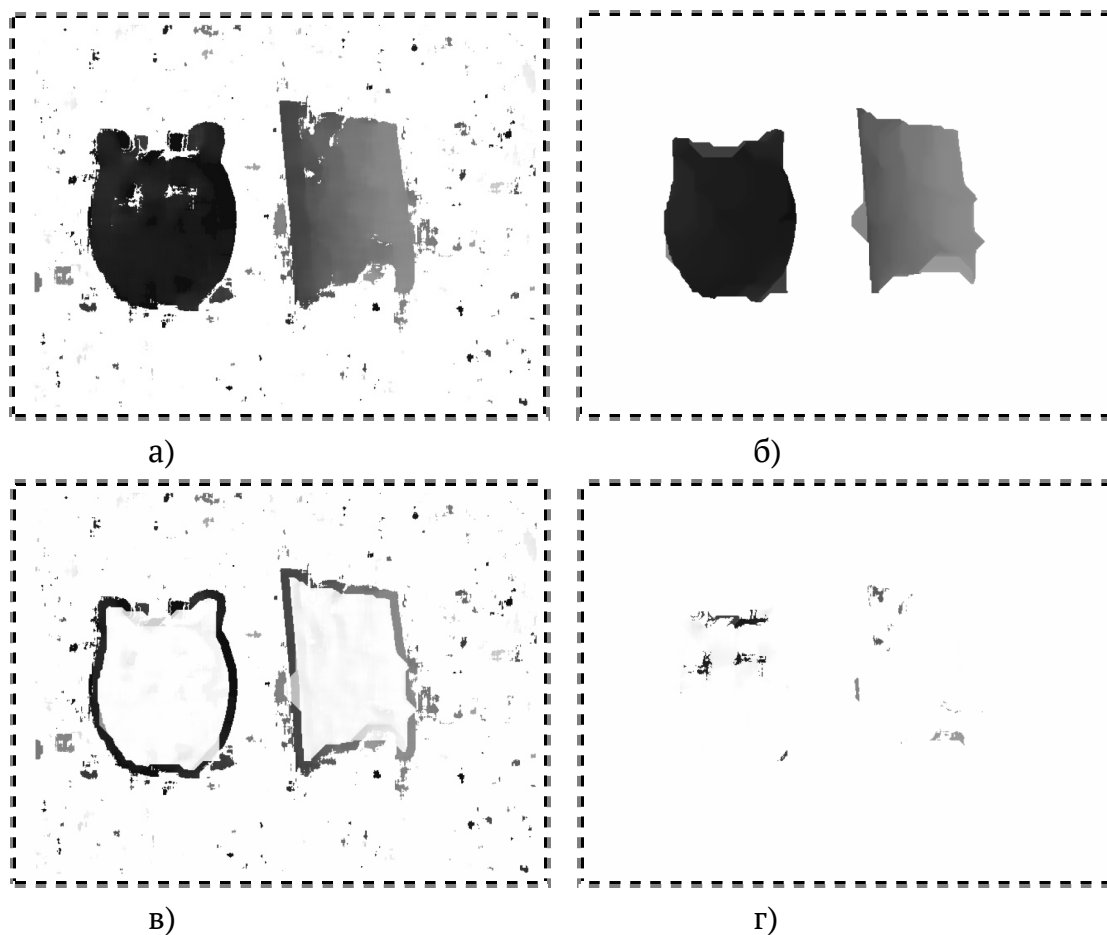


Рисунок 2 - Інвертована мапа диспаратності: а) початкова; б) оброблена морфологічними методами; в) видалені області; г) відновлені області

Аналіз рис.1 та рис.2 дозволяє зробити висновок про ефективність застосування методів математичної морфології для обробки мап диспаратності, що містять значні спотворення, з метою підвищення їх інформативності за наявності мінімального набору попередніх даних про зміст сцени. Проте слід вважати доцільним вдосконалення процесу узгодження зображень стереопари на основі критеріїв, що відповідають визначенню відстані за неквадратичними метриками.

**Висновки.** Представлено інформаційну технологію поліпшення інформативності мап диспаратності із застосуванням методів морфологічної обробки зображень. Результати тестування морфологічних операцій з мапами диспаратності для реальних об'єктів дозволяють зробити висновок про можливість часткового відновлення областей мап диспаратності з розривами суцільних інформативних ареалів, а також про зменшення впливу випадкових аномальних значень на загальний зміст мапи.

#### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Wöhler, C. 3D computer vision. Efficient methods and applications / C. Wöhler. - 2nd ed. -London: Springer-Verlag, 2013. -382 p.
2. Scharstein, D. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms / D. Scharstein, R. Szeliski // International Journal of Computer Vision. – 2002. – V. 47, N. 1. – P. 7-42.
3. Konolige K. Small vision systems: Hardware and implementation. Robotics research / K. Konolige. – London: Springer, 1998. - P. 203-212.
4. Vovk S. M. Statement of a problem of definition of linear signals parameters in quasinormed space / S. M. Vovk, V. F. Borulko // Radioelectronics and Communications Systems. – 2010. - V. 53, N. 7. – P. 367–375.
5. Вовк С. М. Оценивание параметра с несколькими значениями / С. М. Вовк, О. Н. Прокопчук // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2019. – N. 4. – С. 14–24. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-2.
6. Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. – Prentice Hall, 2002. – 793 p.

#### REFERENCES

1. Wöhler, C. 3D computer vision. Efficient methods and applications / C. Wöhler. - 2nd ed. -London: Springer-Verlag, 2013. -382 p.
2. Scharstein, D. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms / D. Scharstein, R. Szeliski // International Journal of Computer Vision. – 2002. – V. 47, N. 1. – P. 7-42.
3. Konolige K. Small vision systems: Hardware and implementation. Robotics research / K. Konolige. – London: Springer, 1998. - P. 203-212.
4. Vovk S. M. Statement of a problem of definition of linear signals parameters in quasinormed space / S. M. Vovk, V. F. Borulko // Radioelectronics and Communications Systems. – 2010. - V. 53, N. 7. – P. 367–375.



5. Vovk S. M. Otsenivanie parametra s neskol'kimi znacheniyami / S. M. Vovk, O. N. Prokopchuk // Radioelektronika, Informatika, upravlinnya. – 2019. – N. 4. – S. 14–24. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-2.
6. Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. – Prentice Hall, 2002. – 793 p.

Received 08.11.2020.

Accepted 10.11.2020.

### **Применение методов морфологической обработки в компьютерном стереозрении**

*Представлена информационная технология обработки карт диспаратности с использованием операций математической морфологии. Последовательное применение комбинаций операций эрозии и дилатации позволяет значительно повысить информативность карт диспаратности, уменьшить влияние распространенных негативных факторов, которые искажают результаты работы алгоритмов стереосопоставления. Применение алгоритмов морфологической обработки позволяет существенно улучшить качество карт диспаратности без предварительного анализа содержания наблюдаемой сцены.*

### **Application of morphological processing methods in computer stereo vision**

*Computer vision algorithms are important for many areas of human activity. In particular, the number of applications related to the need to process images of real-world objects with computerized tools and the subsequent use of descriptive information in a variety of interactive and automated decision-making systems is increased. An important tool for analyzing real-world scenes are approaches to the application of stereo vision algorithms. The important step of many stereo matching algorithms is a disparity map. Depending on the content of the observed scene, part of the values on the disparity map can be immediately attributed to background values on a certain basis, or form a "natural" background, which is characterized by loss of informative data due to unacceptable error of subsequent resultant distance values. The calculated disparity map of any algorithm may contain some shortcomings in the form of discontinuities of continuous information areas caused by the complexity of shooting conditions, the impact of noise of various natures, hardware imperfections, and so on. An approach to mitigating the undesirable influence of negative factors on the resulting disparity is the use of mathematical morphology operations to process disparity maps at the post-processing stage. This paper presents information technology for increasing the content of disparity maps based on the mathematical morphology methods. The technology is based on a combination of morphological operations of erosion and dilation, which eliminates the typical problems of discontinuities of monotone regions and erroneous values on disparity maps. The proposed approach allows reducing the impact of common problems that arise during the operation of stereo matching algorithms, as well as increase the overall informativeness of disparity maps for images of real objects in the absence of partial or complete initial data on the characteristics of the observed scene.*

*The results of testing morphological operations with disparity maps for real objects allow us to conclude about the possibility of partial restoration of areas of disparity maps with gaps in continuous information areas, as well as to reduce the impact of random anomalous values on the overall content of the disparity maps.*

**Прокопчук Олег Миколайович** - аспірант, Дніпровський національний університет, кафедра комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

**Вовк Сергій Михайлович** - к.ф.-м.н., доцент, Дніпровський національний університет, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

**Прокопчук Олег Николаевич** - аспирант, Днепровский национальный университет, кафедра компьютерных наук и информационных технологий.

**Вовк Сергей Михайлович** - к.ф.-м.н., доцент, Днепровский национальный университет, доцент кафедры компьютерных наук и информационных технологий.

**Prokopchuk Oleh Mykolaiovych** - Ph.D student, Oles Honchar Dnipro National University, Department of Computer Science and Information Technology.

**Vovk Serhii Mikhailovich** - Ph.D, Associate Professor, Oles Honchar Dnipro National University, Associate Professor of Department of Computer Science and Information Technology.