

АНОТАЦІЯ

Кондратьєв С.Б. Методи удосконалення карти глибин для систем технічного зору. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки. – Національний університет «Одеська політехніка», МОН України, Одеса, 2025.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, що пов'язана з розробкою методів удосконалення побудови карти глибин для систем технічного зору. Визначено об'єкт, предмет, мету, задачі та методи дослідження; наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; висвітлено особистий внесок здобувача, наведено основні дані щодо апробації роботи, публікацій, відомості про структуру та загальну характеристику дисертаційної роботи.

В **першому розділі** дисертаційної роботи проведено аналіз проблеми побудови карти глибин для систем технічного зору.

Проаналізовано основне призначення та принципи побудови систем технічного зору, розглянуті види систем та задачі, які вирішують такі системи. Визначено, що задача оцінки глибини сцени є ключовим компонентом систем технічного зору, що забезпечує тривимірне сприйняття навколишнього середовища. Це дозволяє стверджувати, що однією з перспективних тем досліджень в області побудови систем технічного зору є удосконалення методів побудови карти глибин.

Визначено, що методи побудови карти глибин можна розділити на активні та пасивні. Встановлені переваги та недоліки кожного типу методів, а також визначені прикладні ситуації, в яких доцільніше застосовувати ті чи інші методи побудови карт глибини.

Детальний аналіз пасивних методів дозволив визначити, що ці методи також поділяються на локальні та глобальні методи в залежності від принципів роботи алгоритму стерео зіставлення, на якому вони базуються. Найбільш

перспективним підходом пасивного отримання карти глибин вважаються локальні методи на основі адаптивної ваги. Незважаючи на відносно задовільні результати, які дають методи на основі адаптивної ваги, попіксельне обчислення ваги та оцінка глибини є дуже трудомісткими завданнями, тобто вони мають високу обчислювальну надмірність. Для усунення цього недоліка та підвищення швидкості побудови карти глибини було запропоновано пасивний локальний метод побудови карти глибини на основі адаптивної ваги з використанням процедури адаптивного зіставлення та афінно-інваріантних ознак.

Також подальший аналіз пасивних методів отримання карти глибини показав, що карти глибини для динамічної оцінки навколишнього середовища будуються покадрово, що призводить до появи артефактів, внаслідок того, що значення глибини статичних об'єктів повинні залишатися однаковими у сусідніх кадрах, але часто вони оцінюються як різні значення (ця проблема часто називається часовою неузгодженістю). Такі помилки значно погіршують візуальну якість синтезованого представлення, а також ефективність кодування послідовностей карт глибин. Для подолання цього недоліку було запропоновано метод покращення часової узгодженості для послідовностей карт глибини на базі показника надійності глибини та динамічних атрибутів регіонів.

Аналіз активних методів отримання карти глибин показав, що такі методи часто продукують карти глибин з низькою роздільною здатністю, зашумленими значеннями глибини та прогалинами на зображенні карти, тому отримані карти глибини покращуються за допомогою наявного вихідного кольорового зображення (такі методи покращення називаються керованими). Однак, існуючі керовані методи покращення карти глибини не оцінюють в явному вигляді неузгодженість країв між кольоровим зображенням і отриманою картою глибини, тому вони не можуть адаптивно керувати процесом зіставлення кольорового зображення під час покращення карти глибин. Це призводить до появи артефактів копіювання текстури та розмиття країв на карті глибини. Для подолання цього недоліку було запропоновано керовані методи покращення карти глибини на базі марковського випадкового поля, з використанням

процедури оцінки неузгодженості країв вихідного кольорового зображення та отриманої карти глибин з жорстким та м'яким прийняттям рішень.

Крім того аналіз керованих методів покращення карти глибини на базі кольорового зображення показав, що спорідненість країв кольорового зображення та карти глибин зазвичай обчислюється лише на основі різниці в кольорі та глибині між пікселем та його сусідніми пікселями на кольоровому зображенні та карті глибини, відповідно. Така схема обчислень ігнорує локальну структуру карти глибини. Тому, у випадку великого коефіцієнта дискретизації карти глибини, підсумкова карта буде мати надмірно згладжені краї глибин. Для подолання цього недоліку та збереження структури на картах глибин дуже низької якості було запропоновано керований метод покращення карти глибини низької якості на базі марковського випадкового поля, з використанням процедури оцінки неузгодженості країв з м'яким прийняттям рішень та представленням локальної структури карти глибин з використанням мінімального кістякового лісу.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету та завдання досліджень.

В **другому розділі** дисертаційної роботи запропоновані підходи до удосконалення пасивних методів побудови карт глибини.

Для підвищення швидкості пасивних методів побудови карти глибини за допомогою множини кольорових зображень було запропоновано пасивний локальний метод побудови карти глибини на основі адаптивної ваги з використанням процедури адаптивного зіставлення та афінно-інваріантних ознак.

Запропонований метод складається з двох етапів:

1. Початкова оцінка глибини. Для її отримання виконуються наступні кроки: агрегація витрат, яка виконується за допомогою запропонованої процедури адаптивного зіставлення; уточнення витрат для гладких регіонів; побудова карти глибини за допомогою підходу «переможець отримує все».

2. Уточнення карти глибини (корекція карти для гладких та негладких регіонів). Для корекції карти для гладких регіонів виконується пошук в околі кожної ненадійної гладкої області, а всі надійні гладкі області заносяться до списку кандидатів. Якщо середнє значення колірних каналів RGB області у списку значно відрізняється від середнього значення поточної ненадійної згладженої області, то область буде видалено зі списку. Далі відбувається оновлення глибини області у списку, колір якої є найближчим до неї. Для негладких регіонів, значення їхньої глибини уточняється за допомогою багатосторонньої фільтрації. У процесі фільтрації ваги пікселів, які належать до ненадійних згладжених областей та ненадійних пікселів у згладжених областях, прирівнюються до нуля.

Експериментальні дослідження на різних наборах даних показали зменшення часу на побудову карти глибини на 19,9% – 24,1% у порівнянні з методом-аналогом.

Сформульовано перший пункт наукової новизни: *удосконалено пасивний локальний метод побудови карти глибини за рахунок використання процедури адаптивного зіставлення та афінно-інваріантних ознак, що дозволило підвищити швидкість побудови карти глибини.*

Для зменшення кількості артефактів при побудові віртуального зображення з використанням послідовних карт глибини, було запропоновано метод покращення часової узгодженості для послідовностей карт глибини за рахунок впровадження показника надійності глибини та використання динамічних атрибутів регіонів.

Запропонований метод складається з двох етапів:

1. Оцінка вірогідності того, що певна область зображення належить до статичного регіону. Базуючись на спостереженні, що статичні області мають однаковий колір між сусідніми кадрами, для оцінки того, чи належать пікселі до статичних областей, використовується значення середнього абсолютного відхилення. Оцінювання виконується у межах локального вікна з центром у пікселі, який оцінюється.

2. Оцінка надійності значень глибини – через наявність шуму в оціночних картах глибин, достовірність значень глибин слід враховувати в явному вигляді, що дає більшу вагу більш достовірній глибині. Для кожного пікселя на карті глибини поточного ракурсу, надійність глибини можна оцінити через значення середнього абсолютного відхилення між локальними вікнами з центром у такій парі пікселів. Для врахування оклюзії оцінка виконується на сусідніх видах зліва та справа, при цьому вибирається менше значення середнього абсолютного відхилення.

Проведені експериментальні дослідження на різних наборах даних, які показали збільшення часової узгодженості на 10,3% – 44,75% та покращення ефективності кодування карти глибини на 13,3% – 51,6% у порівнянні з розглянутим методом-аналогом.

Сформульовано другий пункт наукової новизни: *удосконалено* метод покращення часової узгодженості для послідовностей карт глибини за рахунок урахування показника надійності глибини та використання динамічних атрибутів регіонів, що дозволило покращити часову узгодженість та покращити ефективність кодування карти глибини.

Для підвищення точності та зменшення обчислювальних витрат при побудові карти глибин запропоновано модифікований метод StereoBM-Mod з вейвлет-попередньою обробкою. Метод дозволяє локалізувати інформативні області та звужити зону пошуку відповідностей. Експериментально доведено, що StereoBM-Mod забезпечує вищу точність (на 1.5–2.4 дБ за PSNR) порівняно з класичним StereoBM, зберігаючи низьке енергоспоживання та придатність до роботи в реальному часі. Він перевершує складніші методи за балансом точності, швидкодії та енергоефективності. Метод рекомендовано для використання у вбудованих та мобільних системах технічного зору.

Сформульовано третій пункт наукової новизни: *набув подальший розвиток* метод локального стереозіставлення StereoBM шляхом інтеграції наближеного вейвлет-перетворення Гаара для попереднього виділення контурних ознак та локалізації екстремумів. Використання запропонованого

методу дозволило зменшити обчислювальну складність процесу побудови карти глибини, зберігаючи при цьому точність у слабо текстурованих зонах.

В третьому розділі дисертаційної роботи запропоновані підходи до удосконалення карт глибини, що отримані за допомогою активних методів.

Для покращення точності карти глибини, що побудована за допомогою керованих методів покращення карти глибини з використанням активних методів, запропоновано керований метод покращення точності карти глибини на базі марковського випадкового поля за рахунок впровадження процедури оцінки неузгодженості країв вихідного кольорового зображення та отриманої карти глибини з жорстким та м'яким прийняттям рішень.

У якості базового методу використовується метод покращення точності карти глибини на базі марковського випадкового поля, до якого додається процедура оцінки неузгодженості країв між кольоровим зображенням та отриманої активним методом карти глибини.

Неузгоджені краї можна розділити на два типи: перші одержані внаслідок грубої інтерполяції, але можуть бути уточнені за допомогою наведення на високоякісні кольорові границі, а другі – внаслідок неузгодженості країв. При використанні жорстоко прийняття рішення, відбувається класифікація цих двох випадків. Виходячи з того, що кількість помилок має бути меншою за можливості кодування з виправленням помилок, припускається, що глибинний край погіршується грубою інтерполяцією, коли зміщення між ним і найближчим кольоровим краєм є меншим за порогове значення. Інший випадок трактується як справжня неузгодженість країв.

Хоча підхід на базі жорсткого прийняття рішення дає задовільні результати для малих коефіцієнтів дискретизації, продуктивність методу суттєво погіршується для великих коефіцієнтів дискретизації. Причина полягає в тому, що вимірювання неузгодженості країв з жорсткою дискретизацією не може добре працювати, коли якість грубо інтерпольованої карти глибини дуже низька. Таким чином, пропонується підхід на базі м'якого прийняття рішень, який більш

точно вимірює ступінь неузгодженості, що виникає між глибинними краями та відповідними кольоровими краями у числовому вигляді.

Експериментальні дослідження запропонованого методу на різних наборах даних показали збільшення точності підсумкової карти глибини на 4,3% – 22,19% для коефіцієнтів інтерполяції 2 – 8 для підходу з жорстким прийняттям рішень, та збільшення точності підсумкової карти глибини на 5,4% – 7,7% для коефіцієнтів інтерполяції 8 – 16 для підходу з м'яким прийняттям рішень.

Сформульовано четвертий пункт наукової новизни: *удосконалено керований метод покращення точності карти глибини на базі марковського випадкового поля за рахунок впровадження процедури оцінки неузгодженості країв вихідного кольорового зображення та отриманої карти глибини з жорстким та м'яким прийняттям рішень, що дозволило покращити точність карти глибини.*

Для покращення точності карти глибини, побудованої за допомогою керованих методів покращення карти глибини, яка отримана активними методами, з великим коефіцієнтом дискретизації було запропоновано керований метод покращення точності карти глибини низької якості на базі марковського випадкового поля за рахунок впровадження процедури оцінки неузгодженості країв з м'яким прийняттям рішень та представленням локальної структури карти глибин з використанням мінімального кістякового лісу.

Запропонований метод використовує мінімальний кістяковий ліс у якості фільтру, який використовується для автоматичного видалення двох несхожих пікселів, які знаходяться близько один до одного в просторовій області, що робить відстань між деревами метрикою, яка враховує ребра. Для запобігання проблеми «протікання країв» запропонований метод буде мінімальний кістяковий ліс для кожного суперпікселя на кольоровому зображенні, згенерованому надмірною сегментацією.

Експериментальні дослідження запропонованого методу на різних наборах даних показали збільшення точності підсумкової карти глибини на 2,8% – 11,87% для коефіцієнтів інтерполяції 8 – 16 у порівнянні з найбільш

ефективними методами-аналогами, включаючи запропонований раніше метод з м'яким прийняттям рішень.

Сформульовано п'ятий пункт наукової новизни: *удосконалено* керований метод покращення точності карти глибини низької якості на базі марковського випадкового поля за рахунок впровадження процедури оцінки неузгодженості країв з м'яким прийняттям рішень та представленням локальної структури карти глибин з використанням мінімального кістякового лісу, що дозволило покращити точність карти глибини з великим коефіцієнтом дискретизації.

В четвертому розділі дисертаційної роботи проведено апробацію запропонованих методів побудови карти глибини у складі стереозорової підсистеми мобільної робототехнічної платформи. На основі розробленого експериментального стенду, що включає одноплатний комп'ютер, модуль камери та ToF-сенсор, вдалося реалізувати повний цикл глибинної реконструкції – від обробки вхідних зображень до отримання карти глибини в реальному часі. Це забезпечило можливість перевірити ефективність розроблених методів не лише в теоретичному чи лабораторному контексті, а й в умовах, наближених до практичного застосування в задачах автономної навігації.

Апробація проводилася на даних, отриманих як зі стандартних наборів, так і з реального сенсорного обладнання, що дало змогу оцінити роботу алгоритмів за критеріями точності, стабільності, енергоспоживання та обчислювальної складності. Усі методи були реалізовані з урахуванням обмежень вбудованих систем, зокрема щодо використання апаратних ресурсів, енергоефективності та вимог до обробки в реальному часі.

Загалом, результати апробації свідчать про практичну придатність запропонованих методів до впровадження в системи реального часу. Висновки, отримані на основі експериментальних вимірювань та порівнянь із базовими підходами, підтверджують доцільність їх використання в системах технічного зору.

Ключові слова: карти глибин, системи технічного зору, комп'ютерний зір, обробка зображень, просторовий аналіз, 3D-реконструкція, стереобачення, сенсори глибини, оцінка глибини, програмне забезпечення, представлення та аналіз сцен, покращення ефективності, позиціонування об'єктів, виділення контурів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Arsirii, O.O., Yadrova, M.V., Kondratyev, S.B., & Stelmakh, D.E. Development of the intelligent software and hardware subsystem for capturing an object by robot manipulator. Herald of Advanced Information Technology. 2020; Том 3(2) 42–51. doi.org/10.15276/hait.02.2020.4. *Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».*

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/35>

2. Кондратьєв С.Б., Костенко В.Л., Ядрова М.В. Метод контурів для позиціонування об'єктів в мобільних системах комп'ютерного зору. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2021. № 2(8). С. 62–69. doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.09. *Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».*

<https://repository.kpi.kharkov.ua/items/2e80004e-f419-4194-b71b-5d68aea4424a>

3. Antoshchuk, S.G., Kondratyev, S.B., Shcherbakova, G.Y., & Hodovychenko, M.A. Depth map generation for mobile navigation systems based on objects localization in images. Herald of Advanced Information Technology. 2022. Том 5(1). С. 11–18. doi.org/10.15276/hait.05.2022.1. *Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».*

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/128>

4. Kondratyev, S.B., Antoshchuk, S.G. & Hodovychenko, M.A. Methods for refining the depth map obtained from depth sensors. Applied Aspects of Information

Technology. 2024. № 7(4). С. 336–347. doi.org/10.15276/hait.05.2022.1. *Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».*

<https://aait.od.ua/index.php/journal/article/view/261>

5. *Кондратьєв С.Б.* Локальний метод побудови карти глибин на базі адаптивної схеми зіставлення та афінних інваріантних ознак. Наука і техніка сьогодні. 2024; № 12(40). С. 1245–1258. doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1245-1258. *Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».*

<http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/17042>

6. *Kondratyev, S.B., Antoshchuk, S.G., & Hodovychenko, M.A.* Robust depth map refining using color image. Herald of Advanced Information Technology. 2024; № 7(4): С. 361–370. doi.org/10.15276/hait.07.2024.25. *Видання включено до переліку наукових фахових видань України, категорія «Б».*

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/232>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. *Shcherbakova, G., Antoshchuk, S., Koshutina, D., Sakhno, K., Kondratiev, S.* (2025). Adaptive Clustering for Distribution Parameter Estimation in Technical Diagnostics. In: *Dovgyi, S., Siemens, E., Globa, L., Копііка, О., Stryzhak, O.* (eds) Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIIT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1338. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_19. *Видання проіндексовано у базі даних Scopus.*

https://icaiit.org/proceedings/12th_ICAIIT_1/2_8_ICAIIT_2024_Part_2_paper_6.pdf

8. *Antoshchuk S., Shcherbakova G., Kondratyev S., Koshutina, D., Usov O.* Wavelet transform based optimization method for Three-Dimensional computer vision // Proceedings of the 12th International Conference Information Control Systems & Technologies (ICST 2024), Odesa, Ukraine, September 23–25, 2024, pp. 471–482. *Видання проіндексовано у базі даних Scopus.*

<https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper41.pdf>

9. Kondratiev S., Koshutina D., Liubomska O., Baskov I. Research on Energy Efficiency of Wi-Fi IoT Systems on Renesas DA16200 Platform // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT, Koethen, Germany, March 7, 2024, 12(1), pp. 143–148. Видання проіндексовано у базі даних Scopus.

https://icaiit.org/proceedings/12th_ICAИT_1/2_11_ICAИT_2024_Part_2_paper_9.pdf

10. Антощук С.Г., Щербакова Г.Ю., Кондратьев С.Б., Кошутіна Д.В. Наближений метод оцінки глибини об'єктів на основі вейвлет-перетворення. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції Інформатика. Культура. Техніка. 2024 25–27 вересня 2024 р. м. Одеса (Україна). 2024; 1(1): 197–201.

<https://ics60.aait.od.ua/zbirnik2024.pdf>

11. Світлана Антощук, Галина Щербакова, Сергій Кондратьєв, Дар'я Кошутіна, Олександр Усов. Метод оптимізації на основі вейвлет-перетворення для наближених методів оцінки глибини // Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-Одеса-2024): Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції, 23–25 вересня 2024 р. м. Одеса (Україна). вип. ред. Вичужанін. – Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2024. – 334 с.123–127

<http://icst-conf.com/2024.pdf>

12. Антощук С.Г., Арсірій О.О., Кондратьєв С.Б. та ін. Гібридні моделі представлення та методи обробки зображень в просторі вейвлет-перетворення. 2020. 160 с.

<https://discovery.kpi.ua/Record/000634213>

13. Антощук С.Г., Арсірій О.О., Кондратьєв С.Б. та ін. Аналіз та розпізнавання зображень у просторі вейвлет-перетворення. 2022. 126 с.

<http://www.irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000823682>

ABSTRACT

Kondratiev S.B. Methods for improvement of depth map for technical vision systems. – Qualification scientific work in the form of manuscript.

Thesis for the PhD degree in specialty 122 Computer science. – Odessa Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The **introduction** shows the relevance of using a depth map for technical vision systems. Particular attention is paid to the process of building a depth map. The object, subject, tasks and methods of the study are defined; the scientific novelty and practical significance of the results are presented; the personal contribution of the applicant is highlighted.

The **first chapter** of the thesis analyzes the problem of building a depth map for technical vision systems.

The main purpose and principles of building technical vision systems are analyzed, the types of systems and tasks that such systems solve are considered. It is determined that the task of estimating the depth of a scene is a key component of technical vision systems that provides three-dimensional perception of the environment. This allows us to assert that one of the promising research topics in the field of building technical vision systems is the improvement of methods for building depth maps.

The task of constructing a depth map is analyzed. It is determined that depth mapping methods can be divided into active and passive methods. The advantages and disadvantages of each type of method are determined, and the situations in which it is more expedient to use certain methods of depth mapping are identified.

A detailed analysis of passive methods has made it possible to determine that these methods are also divided into local and global methods, depending on the principles of the stereo matching algorithm on which these methods are based. Local methods based on adaptive weight are considered to be the most promising approach to passively obtaining a depth map. Despite the relatively satisfactory results provided

by adaptive weight-based methods, pixel-by-pixel weight calculation and depth estimation are very time-consuming tasks. They have a high computational redundancy because depth maps are always smooth.

To overcome these shortcomings and increase the speed of depth map construction, a passive local method of depth map construction based on responsive weight using an ad hoc matching procedure and affiliative invertible features was proposed.

Further analysis of passive depth mapping methods has shown that depth maps are constructed frame by frame for dynamic environmental assessment. Frame-by-frame construction of depth maps often leads to artifacts, due to the fact that the depth values of static objects should remain the same in subsequent frames, but often they are valued as separate values (this problem is often called transient mismatch). Such errors significantly degrade the visual quality of the synthesized representation, as well as the efficiency of encoding depth map sequences.

To overcome this drawback, a method for improving temporary coherence for depth map sequences based on the depth accuracy index and dynamic features of districts was proposed.

An analysis of active depth mapping methods has shown that such methods often produce depth maps with low resolution, noisy depth values, and gaps in the map image, so the resulting depth maps are enhanced using the available source color image (such enhancement methods are called supervised methods). However, existing supervised depth map enhancement methods do not explicitly evaluate the edge mismatch between the color image and the resulting depth map, so they cannot adaptively control the color image matching process during depth map enhancement. This results in texture copying artifacts and edge blurring in the depth map.

To overcome this disadvantage, we propose controlled methods for improving the depth map based on a Markov random field, using a procedure for assessing the mismatch between the edges of the original color image and the resulting depth map with hard and soft problem solving.

A further analysis of supervised methods for color image-based depth map enhancement revealed that the edge similarity of a color image and depth map is usually calculated only based on the difference in color and depth between a pixel and its neighboring pixels in the color image and depth map, respectively. This calculation scheme ignores the local organization of the depth map. Therefore, in the case of a large depth map sampling ratio, the final map will have excessively smoothed depth edges.

To overcome this drawback and conserve the structure in very low quality depth maps, a supervised method for improving a low quality depth map based on a Markov random field, using an edge mismatch scoring procedure with soft solution and representation of the local organization of the depth map using a sparse skeleton forest, was proposed.

Based on the results of the analysis, the goal and objectives of the research are formulated.

The **second chapter** of the thesis proposes approaches to improving passive depth mapping methods.

To improve the speed of passive depth mapping methods using a set of color images, a passive local depth mapping method based on responsive weight using an ad hoc matching procedure and affiliative invertible attributes was proposed.

The proposed method consists of two stages:

1. Primary depth assessment – at this stage, the primary depth map is obtained. The first step of this stage is cost estimation, which is performed using the proposed predictive mapping scheme, followed by cost adjustment for smooth regions, and then depth map construction using the winner-take-all approach.

2. Correcting the depth map – at this stage, the map is corrected for smooth and non-smooth regions. To correct the map for smooth regions, a search is performed in the vicinity of each not reliable smooth region, and all trustworthy smooth regions are added to the candidate list. If the average value of the RGB color channels of a region in the list differs significantly from the average value of the current non-trusted smooth region, the region is removed from the list. The next step is to update the depth of the

region in the list with the color closest to it. For non-smooth regions, their depth is updated using multipath filtering. In the process of filtering, the weights of pixels assigned to non-reliable smoothed regions and non-reliable pixels in smoothed regions are set to zero.

Experimental studies on different datasets have shown a 19,9% to 24,1% reduction in the time required to build a depth map compared to the analog method.

The first point of scientific novelty is formulated: the passive local method of depth mapping *was improved* by using an adequate matching procedure and affiliative indifferent attributes. The use of the proposed method made it possible to increase the speed of depth map construction.

To decrease the number of artifacts in the construction of a virtual image using sequential depth maps, a method for improving transient stability for depth map sequences was proposed by introducing a stability measure and using a dynamic feature of areas. Using the proposed method allows to improve timing stability and improve the efficiency of depth map compression.

The proposed method consists of two stages:

1. Estimation of the probability that a certain segment of the image belongs to a stationary domain - based on the observation that stationary domains have the same color between neighboring frames, the average absolute difference is used to estimate whether pixels belong to stationary domains. The estimation is performed within a local window centered on the pixel being estimated;

2. Assessing the confidence of depth scores – due to the presence of noise in the estimated depth maps, the confidence of depth scores should be explicitly considered, giving more weight to more reliable depths. For each pixel in the depth map of the current view, the reliability of the depth can be estimated by the average of the absolute difference between the local windows centered on such a pair of pixels. To take into account occlusion, the assessment is performed on neighboring views to the left and right, and the smaller average value of the absolute difference is selected.

Experimental studies on different datasets have shown an increase in temporal consistency by 10.3% - 44.75% compared to the analog method and an improvement

in depth map encoding efficiency by 13.3% - 51.6% compared to the analog method under consideration.

The second point of scientific novelty is formulated: a method for improving timing coherence for depth map sequences *was improved* by introducing a measure of the depth confidence and using regional dynamic features. The use of the proposed method allowed to improve the time coherence and improve the efficiency of depth map compression.

To improve the accuracy and reduce computational costs of building a depth map, a modified StereoBM-Mod method with wavelet preprocessing is proposed. The method allows localizing informative areas and narrowing the search area for correspondences. It has been experimentally proven that StereoBM-Mod provides higher accuracy (by 1.5-2.4 dB in terms of PSNR) compared to the classical StereoBM, while maintaining low power consumption and suitability for real-time operation. It outperforms more complex methods in terms of the balance of accuracy, performance, and energy efficiency. The method is recommended for use in embedded and mobile vision systems.

The third point of scientific novelty was formulated: the method of local stereo matching StereoBM was further developed by integrating the approximate wavelet transform of Gaar for preliminary selection of contour features and localization of extremes. The use of the proposed method made it possible to reduce the computational complexity of the depth mapping process while maintaining accuracy in weakly textured areas.

In the **third chapter** of the thesis, approaches to improving depth maps obtained using active methods are proposed.

In order to improve the reliability of the depth map constructed using the supervised methods for improving the depth map obtained by active methods, a supervised method for improving the accuracy of the depth map based on the Markov random field was proposed by implementing a procedure for assessing the mismatch between the edges of the original color image and the resulting depth map with hard and soft problem solving.

As a basic method, we use a method for improving the accuracy of the depth map based on a Markov random field, to which we add a procedure for estimating the edge misalignment between the color image and the depth map obtained by the active method.

Unmatched borders can be divided into two types: the first is made worse by brute force interpolation but can be corrected by pointing to high quality color boundaries, and the second is edge inconsistency. When using a brute force decision, these two cases are classified. Based on the assumption that the number of errors should be less than the capabilities of error-corrected editing, it is assumed that a deep edge is worsened by brute-force interpolation when the offset between it and the nearest colored edge is less than a threshold value. Otherwise, it is interpreted as a true edge mismatch.

Although the tight decision approach produces favorable results for small sampling rates, the performance of the method suffers significantly for large sampling rates. The reason is that the hard-sampling edge disparity estimation cannot work well when the quality of the roughly interpolated depth map is very low. Thus, we propose a mild resolution approach that more precisely measures the degree of mismatch that occurs between depth edges and the corresponding color edges in quantitative terms.

Experimental studies of the proposed method on different data sets have shown an increase in the accuracy of the final depth map by 4.3% - 22.19% for interposition coefficients 2 - 8 for the hard decision-oriented method, and an increase in the accuracy of the final depth map by 5.4% - 7.7% for interposition coefficients 8 - 16 for the softer solution.

The fourth point of scientific novelty was formulated: a supervised method for enhancing the precision of a depth map based on a Markov random field *has been improved* by implementing a procedure for evaluating the mismatch between the boundaries of the original color image and the resulting depth map with rigid and flexible problem solving. Using the proposed method, we improved the accuracy of the depth map.

To improve the precision of a depth map constructed using supervised methods for enhancing a depth map with a coarse sampling ratio obtained by active methods, a supervised method for improving the prediction accuracy of a low-quality depth map based on a Markov random field was proposed by implementing an boundary misalignment assessment procedure with gentle decision making and representing the local structure of the depth map using a sparsity forest. Using the proposed method, we can improve the accuracy of the depth map with a large sampling rate.

The proposed method uses a minimal skeletal forest as a factor filter, which is used to automatically remove two unrelated pixels that are close to each other in the spatial domain, making the distance between trees an edge-aware metric. To prevent the «edge bleeding» problem, the proposed method builds a minimal spanning tree for each superpixel in the color image produced by the excessive segmentation.

Experimental studies of the proposed method on different datasets showed an increase in the accuracy of the final depth map by 2.8% – 11.87% for implication coefficients 8 – 16 compared to the most effective analogous methods, including the previously proposed method with mild problem solving..

The fifth point of scientific novelty was formulated: a controllable method for increasing the accuracy of a low-quality depth map using a Markov stochastic field *was improved* by introducing an boundary misalignment assessment procedure with mild problem solving and representing the regional structure of the depth map using a minimal skeletal forest. Using the proposed method, we improved the accuracy of the depth map with a large sampling rate

In the **fourth chapter** of the thesis, the proposed methods for constructing a depth map as part of the stereo vision subsystem of a mobile robotic platform were fully tested. Based on the developed experimental stand, which includes a single-board computer, a camera module, and a ToF sensor, it was possible to implement a full cycle of depth reconstruction - from processing input images to obtaining a depth map in real time. This made it possible to test the effectiveness of the developed methods not only

in a theoretical or laboratory context, but also in conditions close to practical application in autonomous navigation tasks.

The testing was carried out on data obtained from both standard sets and real sensor equipment, which made it possible to evaluate the performance of the algorithms in terms of accuracy, stability, power consumption, and computational complexity. All methods were implemented taking into account the limitations of embedded systems, in particular, the use of hardware resources, energy efficiency, and real-time processing requirements.

In general, the results of the testing indicate the practical applicability of the proposed methods for implementation in real-time systems. The conclusions drawn from experimental measurements and comparisons with basic approaches confirm the feasibility of their use in vision systems.

Keywords: depth maps, technical vision systems, computer vision, image processing, spatial analysis, 3D reconstruction, stereo vision, depth sensors, depth estimation.

List of publications of the applicant on the topic of the dissertation

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Arsirii, O.O., Yadrova, M.V., Kondratyev, S.B., & Stelmakh, D.E. Development of the intelligent software and hardware subsystem for capturing an object by robot manipulator. Herald of Advanced Information Technology. 2020; 3(2) 42–51. doi.org/10.15276/hait.02.2020.4. *The publication is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category "B".*

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/35>

2. Kondratiev S.B., Kostenko V.L., Yadrova M.V. Contour method for object positioning in mobile computer vision systems. Bulletin of the National Technical University "KhPI". 2021: 2(8): 62–69. doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.09.

The publication is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category "B".

https://www.researchgate.net/publication/352752306_CONTOUR_METHOD_FOR_POSITIONING_OBJECTS_IN_MOBILE_COMPUTER_VISION_SYSTEMS

3. Antoshchuk, S.G., Kondratyev, S.B., Shcherbakova, G.Y., & Hodovychenko, M.A. Depth map generation for mobile navigation systems based on objects localization in images. Herald of Advanced Information Technology. 2022. 5(1). C. 11–18. doi.org/10.15276/hait.05.2022.1. *The publication is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category "B".*

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/128>

4. Kondratyev, S.B., Antoshchuk, S.G. & Hodovychenko, M.A. Methods for refining the depth map obtained from depth sensors. Applied Aspects of Information Technology. 2024. № 7(4). C. 336–347. doi.org/10.15276/hait.05.2022.1. *The publication is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category "B".*

<https://aait.od.ua/index.php/journal/article/view/261>

5. Kondratiev S.B. A local method for constructing a depth map based on an adaptive matching scheme and affine invariant features. Science and technology today. 2024; 12(40): 1245–1258. doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1245-1258. *The publication is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category "B".*

<http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/17042>

6. Kondratyev, S.B., Antoshchuk, S.G., & Hodovychenko, M.A. Robust depth map refining using color image. Herald of Advanced Information Technology. 2024; № 7(4): P. 361–370. doi.org/10.15276/hait.07.2024.25. *The publication is included in the list of scientific professional publications of Ukraine, category "B".*

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/232>

Scientific papers certifying the approbation of the dissertation materials:

7. Shcherbakova, G., Antoshchuk, S., Koshutina, D., Sakhno, K., *Kondratiev, S.* (2025). Adaptive Clustering for Distribution Parameter Estimation in Technical Diagnostics. In: Dovgyi, S., Siemens, E., Globa, L., Kopiika, O., Stryzhak, O. (eds) Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIIT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1338. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_19. *The publication is indexed in the Scopus database.*

https://icaiit.org/proceedings/12th_ICAIIT_1/2_8_ICAIIT_2024_Part_2_paper_6.pdf

8. Antoshchuk S., Shcherbakova G., *Kondratyev S.*, Koshutina, D., Usov O. Wavelet transform based optimization method for Three-Dimensional computer vision // Proceedings of the 12th International Conference Information Control Systems & Technologies (ICST 2024), Odesa, Ukraine, September 23–25, 2024, pp. 471–482. *The publication is indexed in the Scopus database.*

<https://ceur-ws.org/Vol-3790/paper41.pdf>

9. *Kondratiev S.*, Koshutina D., Liubomska O., Baskov I. Research on Energy Efficiency of Wi-Fi IoT Systems on Renesas DA16200 Platform // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT, Koethen, Germany, March 7, 2024, 12(1), pp. 143–148. *The publication is indexed in the Scopus database.*

https://icaiit.org/proceedings/12th_ICAIIT_1/2_11_ICAIIT_2024_Part_2_paper_9.pdf

10. Antoshchuk S.G., Shcherbakova G.Yu., *Kondratiev S.V.*, Koshutina D.V. An approximate method for object depth estimation based on wavelet transform. Informatics. Culture. Technology. 2024; 1(1): 197–201.

<https://ics60.aait.od.ua/zbirnik2024.pdf>

11. Svitlana Antoshchuk, Halyna Shcherbakova, *Serhii Kondratiev*, Daria Koshutina, Oleksandr Usov. Optimization method based on wavelet transform for approximate depth estimation methods // Information control systems and technologies (ICST-Odesa-2024): Proceedings of the XII International Scientific and Practical

Conference, September 23-25, 2024, Odesa (Ukraine). ed: Helvetica Publishing House, 2024. p.123–127.

<http://icst-conf.com/2024.pdf>

12. Antoshchuk S.G., Arsirii O.O., *Kondratiev S.B.* et al. Hybrid representation models and methods of image processing in wavelet transform space. 2020. 160 p.

<https://discovery.kpi.ua/Record/000634213>

13. Antoshchuk S.G., Arsirii O.O., *Kondratiev S.B.* et al. Image analysis and recognition in the wavelet transform space. 2022. 126 p.

<http://www.irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000823682>