
МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 629.33: 004.946

А. А. СОКОЛОВ, О. Г. АВРУНІН

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ПРИ РОЗРОБЦІ ЗАСОБІВ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ НЕЗРЯЧИХ

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна,
andrii.sokolov@nure.ua, oleg.avrunin@nure.ua*

Анотація. У цій статті розглянуто концепцію побудови портативного навігаційного помічника для незрячих людей, а також перспективи використання сучасних технологій доповненої реальності. Висвітлені сучасні напрямки розвитку, та апаратні вимоги для використання фреймворку ARCore у смартфонах. Експериментально досліджено яку максимальну глибину можна отримати для різних видів перешкод.

Ключові слова: доповнена реальність, здоров'я людини, мапа глибини, просторова орієнтація незрячих, фреймворк ARCore.

Abstract. This article discusses the concept of building a portable navigation assistant for blind people, as well as the prospects for using modern technologies of augmented reality. Current directions of development and hardware requirements for using the ARCore framework in smartphones are highlighted. The maximum depth that can be obtained for various types of obstacles has been experimentally investigated.

Keywords: augmented reality, human health, depth map, spatial orientation of the blind, ARCore framework.

DOI: 10.31649/1681-7893-2023-46-2-55-63

1. ВСТУП

Доповнена реальність – це технологія, яка надає можливість використовувати комп'ютер для сприйняття елементів, які відсутні в природному сприйнятті людини. Цей тип задач спирається на різні алгоритми визначення положення пристрою та/або користувача в реконструкції тривимірної сцени, в яку необхідно додати віртуальні об'єкти. Фреймворк Google ARCore надає готові функції для таких алгоритмів, та дозволяють використовувати готовий API оцінки сцени

За даними ВООЗ, у світі налічується не менше 39 мільйонів незрячих людей. Офіційної статистики по Україні не існує, за приблизними оцінками близько 100 тисяч [1,2]. Такі люди сильно обмежені в мобільності. Мобільність слід розглядати як можливість вільного пересування, незалежно від сторонньої допомоги. Щоб її збільшити, потрібен портативний навігаційний помічник. Методи, що лежать в основі AR, і їх реалізація у фреймворках відкривають нові можливості для створення таких помічників.

Незважаючи на те, що після Другої світової війни було створено більше 40 різних систем, з яких лише 13 перейшли до стадії комерційного продукту [3,4]. В Україні про них мало що відомо. У слаборозвинених країнах ситуація ще гірша. Незрячі практично не отримують державної підтримки. Кінцевою метою є створення навігаційного помічника для незрячих на що є потреба у реалізації в Україні. Матеріальна забезпеченість цієї категорії населення вкрай низька, тому апарат не повинен коштувати дорого.

Ця стаття розглядає перспективу реалізації системи, в якій використовується смартфон для обчислень, та визначення відстані до перешкод.

2. ОСНОВНІ ВИДИ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Уся доповнена реальність базується на різних технологіях відстеження – відстеження положень об'єктів у реальному просторі. Це дозволяє пов'язувати графіку (2D зображення) з реальними об'єктами.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

На сьогоднішній день існує два типи технології: більш стара на основі маркерів і безмаркерна доповнена реальність. У контексті створення навігаційного помічника нас більше цікавить безмаркерний варіант. Розглянемо їх докладніше [5,6,7].

1. Технології доповненої реальності на основі маркерів: Перші спроби створення доповненої реальності працювали на основі маркерів. Додатковий контент завантажується поверх або біля маркерів. Маркер — це об'єкт, відомий програмі, наприклад зображення, логотип або звук. Найпоширеніший приклад - QR-код. Обмеження полягає в тому, що цей тип доповненої реальності можна використовувати лише зі смартфоном [7,8].

Маркерна доповнена реальність вирішує проблему Perspective -n- Point - відновлення точок у 3D просторі шляхом їх перспективної проекції на площину камери пристрою. Завдяки йому можна відновити положення телефону щодо картинки з камери.

Задача Perspective -n- Point розглядає відповідність між реальним світом і його проекцією на площину камери як 4-вимірний простір в однорідних координатах [9]. Однорідні системи координат використовуються таким чином, що взявши додаткове значення (наприклад, додавши третю двовимірну вісь і четверту тривимірну вісь), додатковим елементом може бути будь-яке значення, яке буде дільником інших компонентів які іноді використовуються. Обмежена форма однорідної координати також цінна в комп'ютерній графіці: вона вирішує задачі представлення та реалізації перетворень геометричних об'єктів. Більшість графічних зображень представлені матрицями та застосовуються до векторів у декартовій формі, беручи вектори як вектори-стовпці та множачи їх на матрицю перетворення. Модель формування зображення камери показана на рис. 1 [10,11,12].

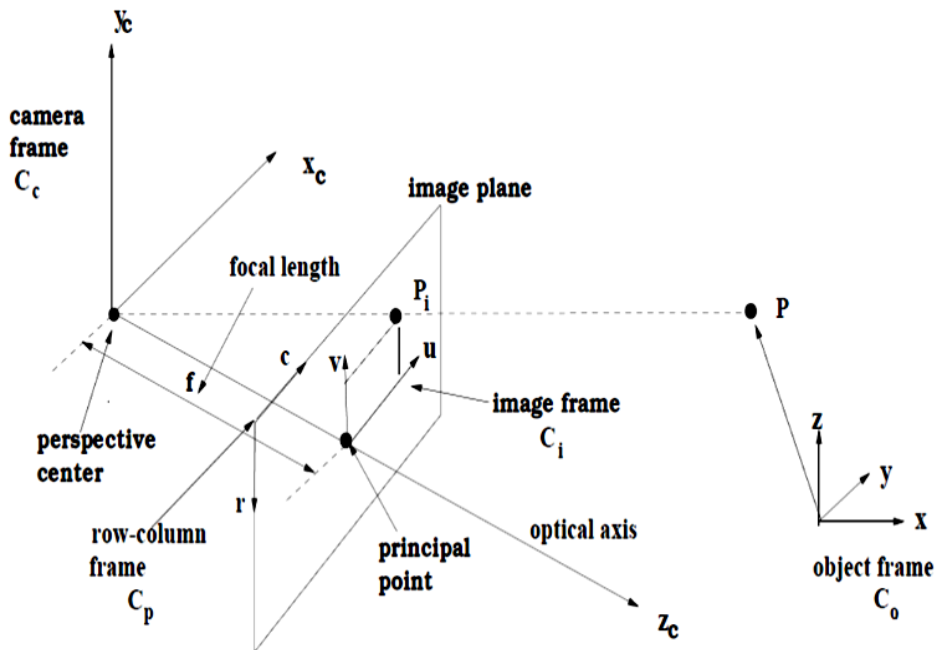


Рисунок 1 – Перспективна проекція камери

Тут $P = (x,y,z)^T$ — тривимірна точка або об'єкт у реальному світі, $U = (u, v)^T$ — відповідна точка в площині зображення до оцифрування, а $p = (cr)^T$ — координати точки на зображенні після оцифрування. У загальному вигляді етапи пошуку відповідності між реальною точкою та точкою на зображенні показані на рис. 2.

Площина камери C_c і площина об'єкта C_o пов'язані як (1)

$$X_c = RX + T \quad (1)$$

де X - 3-д координати точки P щодо кадру об'єкта. R – матриця обертання, а T – вектор переносу. R і T визначають орієнтацію та положення кадру об'єкта щодо кадру камери. Їх також називають позою об'єкту [13, 22, 23].

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

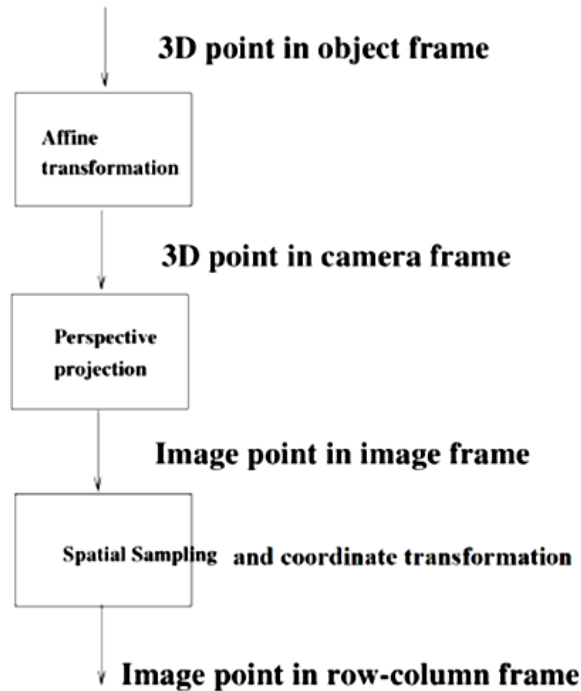


Рисунок 2 – Етапи формування зображення

У загальному вигляді співвідношення між реальним світом і його проекцією на площину камери виглядає так (2):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

де f - відношення фокусної відстані камери до розміру пікселя, c - координати головної точки.

Подальша реконструкція моделі 3D об'єкта базується на параметрах пози. Існують декілька методів, запропонованих дослідниками [13, 24, 25].

2. Без маркерні технології: Цей тип доповненої реальності використовує різні апаратні датчики для орієнтації, такі як камера, системи глобального позиціонування (GPS, ГЛОНАСС тощо), компас, гіроскоп, акселерометр або датчики глибини.

Смартфони зазвичай мають акселерометри та гіроскопи, які разом утворюють інерційну вимірювальну одиницю (IMU) із 6 ступенями свободи. Більш просунуті варіанти включають магнітометр.

Ступінь свободи (DOF) визначає кількість незалежних параметрів у системі. На ринку доступно багато датчиків IMU, які можуть вимірювати від двох до дев'яти ступенів свободи. Величина різниці DOF залежить від типу датчиків, включених до датчика IMU, і кількості осей, які вимірюватиме датчик. Залежно від використання та функцій, необхідних для додатку, загальна глибина різкості може відрізнятись. Що стосується відстеження положення, більшість додатків використовують 6 DOF для IMU з 2 датчиками або 9 DOF для IMU з 3 датчиками, причому кількість DOF є вимірюванням уздовж осей x , y та z для кожного датчика. Як правило, чим вище кількість ступенів свободи, тим точніше ми можемо отримати вибірку даних [14,15]. На практиці акселерометри являють собою емнісні датчики, рис. 3.

Таким чином, ця технологія здатна виявляти об'єкти або характерні точки в сцені без попереднього знання навколишнього середовища, наприклад, вона може ідентифікувати стіни або точки перетину. Це технологія, яка характеризується асоціацією з візуальним ефектом поєднання комп'ютерної графіки з зображеннями реального світу [26, 27].

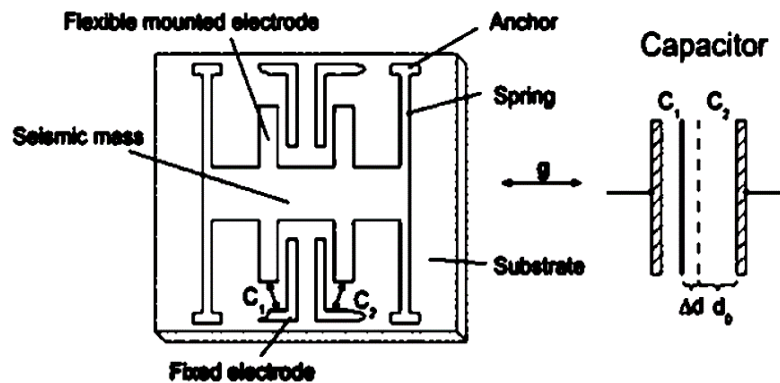


Рисунок 3 – Структура IMU датчика

Перші системи, які використовували цей тип AR, використовували локацію пристрою та апаратні служби для взаємодії з ресурсами, наданими програмним забезпеченням AR, таким чином, щоб визначати місцезнаходження користувача та його орієнтацію в просторі, в якому він знаходиться[15].

3. ОГЛЯД ARCORE FRAMEWORK ТА АПАРАТНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СУЧАСНИХ СМАРТФОНІВ

На даний момент існує два фреймворки, які дозволяють інтегрувати можливості AR в додаток. Це ARCore від Google і ARKit від Apple. ARCore тепер доступний для Android, Android NDK, Unity для Android, Unity для iOS, iOS, Unreal Engine.

Найцікавішими особливостями ARCore в контексті розробки портативних засобів навігації для незрячих є внутрішня реалізація алгоритмів SLAM, що дозволяє отримати карту глибини та геопросторової навігації, що дозволяє використовувати прив'язки з Google Map.

У версії 1.31+ (травень 2022 р.) була змінена API, яка тепер використовує 16 біт на піксель для представлення глибини, що збільшило максимальну глибину з 8 метрів до 65 метрів. Значення глибини вимірюється у міліметрах [16].

Геопросторові прив'язки можуть підвищити точність навігації в містах завдяки інтеграції з Google Street View. Вони були б цікаві для створення вдосконаленої навігації на основі GPS.

Слід розглянути апаратну частину. Не всі смартфони підтримують API необхідної глибини. Без них доступні основні функції, такі як виявлення поверхні, які не можуть забезпечити необхідну точність.

На жаль, пристрої останніх років не мають апаратного датчика глибини (ToF). Виробники були змушені відмовитися від їх використання через низький інтерес з боку користувачів. Камера із ToF датчиком доступна та підтримується в кількох моделях LG, Samsung і Sharp.

Підтримку API необхідно перевірити для кожної моделі згідно зі списком на офіційній сторінці ARCore. Він постійно розширюється та оновлюється [16].

4. ПЕРЕДБАЧУВАНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ

Пропонований алгоритм роботи пристрою наведено на рис. 4. Але при проектуванні персонального помічника слід пам'ятати кілька моментів.

По-перше, втрачаючи зір, людина більше покладається на інші органи чуття, а найбільше на слух. Пропонуючи пристрій, що використовує звукові оповіщення, велика ймовірність того, що користувачі зіткнуться з недовірою до технічних рішень. Тому перспективним напрямком є використання тактильного зворотного зв'язку для інформування користувача.

По-друге, біла тростина досі залишається головним помічником незрячих людей. Електронний помічник повинен дозволити їх спільне використання.

По-третє, враховуючи рівень матеріального забезпечення незрячих людей в Україні, апарат має бути доступним для самостійного придбання.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

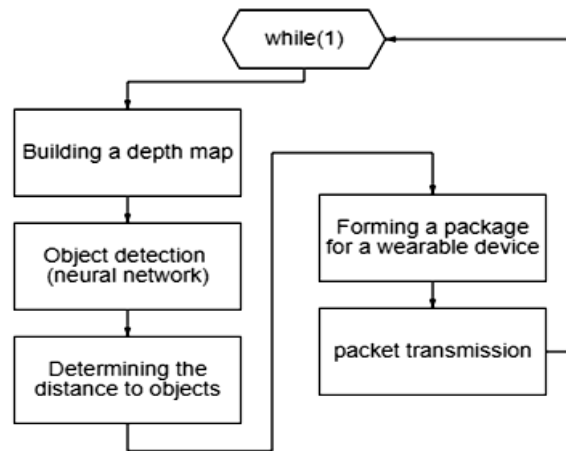


Рисунок 4 – Алгоритм роботи пристрою

Планується реалізувати переносний модуль зворотного зв'язку, який буде підключатися до смартфона за допомогою Bluetooth, а смартфон буде фіксуватися в нагрудній кишені користувача, що дозволить використовувати камеру смартфона, а рух користувача дозволить працювати алгоритмам ARCore.

Інформування користувача буде здійснюватися за допомогою спеціального пристрою у вигляді наручного пристрою з матрицею електродвигунів ERM, що забезпечує тактильну реакцію користувача. Вибір двигунів ERM заснований на більш простих вимогах до джерела живлення, без необхідності драйверів і використання змінного струму, на відміну від двигуна LRA[17].

Залежно від відстані до перешкод, з різними інтенсивністю та/або частотами вібрування пікселів, орієнтаційна матриця формує просторове уявлення про навколишнє середовище. Така конструкція допускає використовувати руку, щоб, наприклад, тримати білу тростину або нести речі.

5. ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ ARCORE ДЛЯ ПОБУДОВИ КАРТИ ГЛИБИНИ

Використано додаток ARCore Depth Lab з Play Market, щоб попередньо переглянути можливості ARCore на реальних вуличних сценах. Пам'ятаючи про те, що програма написана в єдиній формі, а останнє оновлення було 11 травня 2022 року, до введення 16-бітної глибини. Відповідно, максимальна глибина, яку може розрахувати додаток, становить приблизно 8 метрів. Приклади вуличних кадрів, рис. 5 та рис. 6 із використанням 16 бітної глибини. Використовуючи новішу версію бібліотеки, можна досягти більшої глибини [18,19].

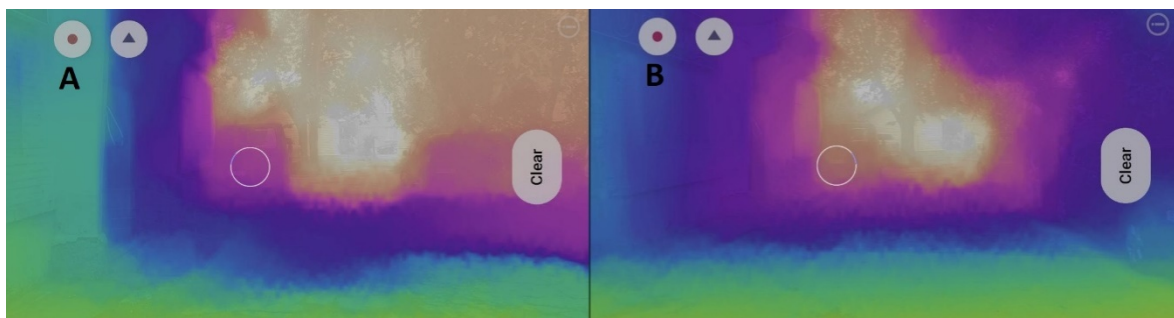


Рисунок 5 – Вуличний кадр з 13 бітною глибиною

На зображенні, рис. 5, А – це відстань 8 метрів до фургона з лівого боку (саме там, де видно елемент інтерфейсу), В – це відстань ± 10 метрів.

Використання 16-бітної глибини дозволить визначати більш віддалені об'єкти, а також підвищити точність побудованої карти глибини. На основі цих зображень можна зробити попередню оцінку [20,21].

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

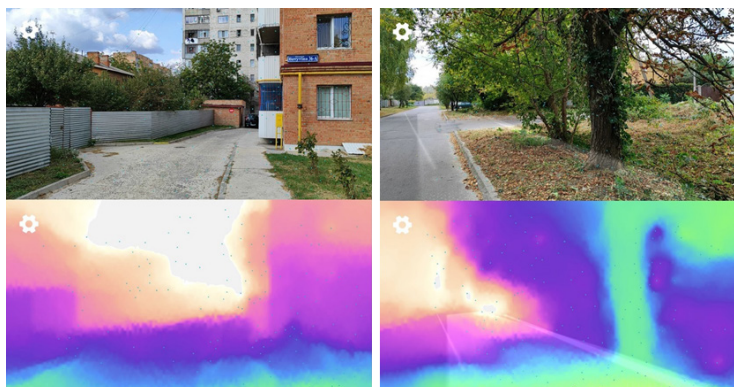


Рисунок 6 – Вуличні кадри з 16 бітною глибиною

На рис 6. показано будинок і машини ближче до камери, відстань до яких можна отримати програмно. Дерево і другий будинок знаходяться далеко, про них можна повідомити користувачеві пізніше, коли користувач підійде ближче. Використовуючи глибину 16 біт, ми можемо очікувати, що пристрій матиме ефективну відстань до 20-30 метрів, чого цілком достатньо для навігаційного помічника. Значення 20-30 метрів взято з документації ARCore; щоб отримати глибину 65 метрів, нам потрібно використовувати Geospatial Depth API[16].

Також була проведена серія експериментів із використанням застосунка з ARCore SDK 1.39, в яких ми вимірювали відстань до різних перешкод на вулиці. Ми визначали максимальну відстань на якій об'єкт потрапляє у кадр з визначеною глибиною. Нам не вдалося на практиці отримати глибину 20-30 метрів, а ефективність визначення глибини залежить від швидкості руху об'єктів та їх фізичних розмірів. Отримані результати, хоча і потребують уточнення представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінка ефективності визначення глибини в залежності від типу об'єктів

Вид об'єктів	Відстань, м
Великі статичні об'єкти (стіни, високі паркани, припарковані машини)	12-15
Об'єкти, що рухаються з рівномірною швидкістю (пішоходи)	8-9
Об'єкти що рухаються з нерівномірною швидкістю (пішоходи в натовпі)	5-6

Беручи до уваги отримані результати та особливості роботи фреймворку ARCore можна вважати, що система буде мати такі переваги та недоліки:

- Використання смартфона та вже існуюча реалізація алгоритмів SLAM для карти глибини спростить кінцевий пристрій;
- Інтеграція з сервісами Google Street View дозволить розширити можливості системи в майбутньому;
- Система працюватиме тільки в світлий час доби (або при гарному освітленні);
- Матиме високі апаратні вимоги до смартфона, субфлагман або вище, що частково компенсується вторинним ринком.

ВИСНОВКИ

Експериментально підтверджено можливість використання технологій доповненої реальності для створення навігаційних систем-помічників з ефективним радіусом не менше шести метрів. Виходячи з особистого досвіду спілкування з незрячими людьми, такого радіусу достатньо для того щоб система мала практичне значення. Але при розробці системи слід приділити увагу детектуванню ям на дорогах та бордюрів, що є одними з найскладніших перешкод для незрячих людей.

Приймаючи до уваги, що кінцевою метою є створення навігаційного помічника для незрячих [18], необхідно враховувати реалії України. Матеріальна забезпеченість цієї категорії населення вкрай низька, тому помічник не повинен коштувати дорого. Оскільки одним з головних елементів такої системи є смартфон з підтримкою API глибини, його можливо придбати необхідний смартфон на вторинному ринку, що збільшить кількість користувачів, які можуть дозволити собі такого помічника.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. World Health Organization: WHO. (2018, October 11). Blindness and vision impairment. Who.int; World Health Organization: WHO. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
2. Незрячі серед сліпих. (n.d.). Inc.kiev.ua. Retrieved November 30, 2023, from <https://inc.kiev.ua/index.php/statti/41-nezryachi-sered-slipikh>
3. Dunai, L., Peris-Fajarnés, G., Lluna, E., & Defez, B. (2013). Sensory Navigation Device for Blind People. *Journal of Navigation*, 66(3), 349–362. <https://doi.org/10.1017/s0373463312000574>
4. Аврунін, О., & Белянінова, Г. (2023). МІЩНЕ ЗДОРОВ'Я І БЛАГОПОЛУЧЧЯ – ПРІОРИТЕТ ХНУРЕ. *Grail of Science*, 28, 83–87. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.09.06.2023.11>
5. Kolisnyk, K., Deineko, D., Sokol, T., Kutsevlyak, S., & Avrunin, O. (2019, October 1). Application of Modern Internet Technologies in Telemedicine Screening of Patient Conditions. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061252>
6. Селиванова, К. Г., Maksym Tymkovych, & Maksym Tymkovych. (2021). Conception of a Mixed Reality Eyesight Training System Based on the Parallel Robot. <https://doi.org/10.1109/picst54195.2021.9772244>
7. Makarov, A. (n.d.). Augmented Reality Development: Technology, Tools, Devices. *MobiDev*. Retrieved November 30, 2023, from <https://mobidev.biz/blog/augmented-reality-development-guide>
8. AR-based Indoor Navigation. (2021, April 8). *Grid Dynamics Blog*. <https://blog.griddynamics.com/ar-based-indoor-navigation/>
9. OpenCV: Depth Map from Stereo Images. (n.d.). *Docs.opencv.org*. Retrieved November 30, 2023, from https://docs.opencv.org/3.1.0/dd/d53/tutorial_py_depthmap.html
10. Lepetit, V., Moreno-Noguer, F., & Fua, P. (2008). EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. *International Journal of Computer Vision*, 81(2), 155–166. <https://doi.org/10.1007/s11263-008-0152-6>
11. Xiao-Shan Gao, Xiao-Rong Hou, Jianliang Tang, & Hang-Fei Cheng. (2003). Complete solution classification for the perspective-three-point problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(8), 930–943. <https://doi.org/10.1109/tpami.2003.1217599>
12. Collins, T., & Bartoli, A. (2014). Infinitesimal Plane-Based Pose Estimation. *International Journal of Computer Vision*, 109(3), 252–286. <https://doi.org/10.1007/s11263-014-0725-5>
13. Szeliski, R. (2022). *Computer Vision: Algorithms and Applications*, 2nd ed. Szeliski.org. Retrieved November 30, 2023, from <https://szeliski.org/Book/>
14. Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., & Kasi, V. (2013). Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 256–262. <https://doi.org/10.12720/ijsp.1.2.256-262>
15. Accueil. (n.d.). *NOMADe*. Retrieved November 30, 2023, from <https://nomadeproject.eu/>
16. May 2022 (ARCore SDK version 1.31) changes to Depth. (n.d.). *Google for Developers*. <https://developers.google.com/ar/develop/depth/changes>
17. Motola-Barnes, M. (). Haptic Actuators: Comparing Piezo to ERM and LRA. *Blog.piezo.com*. <https://blog.piezo.com/haptic-actuators-comparing-piezo-erm-lra>
18. Sokolov, O. Avrunin and A. Sokolov, "Theoretical Foundations for Designing Portable Systems for Oriented Blind People," 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 379-382, doi: 10.1109/PICST57299.2022.10238588.
19. Zhang, X., Yao, X., Zhu, Y., & Hu, F. (2019). An ARCore Based User Centric Assistive Navigation System for Visually Impaired People. *Applied Sciences*, 9(5), 989. <https://doi.org/10.3390/app9050989>
20. Соколов А. А. Особливості просторового сприйняття в тренінгових системах / А. А. Соколов, О. Г. Аврунін // *Авіація, промисловість, суспільство : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Кременчук, 18 трав. 2023 р.) / МВС України, Харків. нац. ун-т внутр. справ, Кременчуц. льотний коледж., Наук.парк «Наука та безпека».* – Харків : ХНУВС, 2023. – С. 358-361.
21. Lu, F., Zhou, H., Guo, L., Chen, J., & Pei, L. (2021). An ARCore-Based Augmented Reality Campus Navigation System. *Applied Sciences*, 11(16), 7515. <https://doi.org/10.3390/app11167515>
22. Kukharchuk, Vasyly V., Sergii V. Pavlov, Volodymyr S. Holodiuk, Valery E. Kryvonosov, Krzysztof Skorupski, Assel Mussabekova, and Gaini Karnakova. 2022. "Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors" *Sensors* 22, no. 1: 271. <https://doi.org/10.3390/s22010271>

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

23. Sergey I. Vyatkin, Olexander N. Romanyuk, Sergii V. Pavlov, and etc. "A function-based approach to real-time visualization using graphics processing units", Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, 115810E (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580212>.
24. Leonid I. Timchenko, Natalia I. Kokriatskaia, Sergii V. Pavlov, and etc. "Q-processors for real-time image processing", Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, 115810F (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580230>.
25. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.
26. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages. <https://doi.org/10.1201/9781315098050>. eBook ISBN 9781315098050.
27. Pavlov Sergii, Avrunin Oleg, Hrushko Oleksandr, and etc. System of three-dimensional human face images formation for plastic and reconstructive medicine // Teaching and subjects on bio-medical engineering Approaches and experiences from the BIOART-project Peter Arras and David Luengo (Eds.), 2021, Corresponding authors, Peter Arras and David Luengo. Printed by Acco cv, Leuven (Belgium). - 22 P. ISBN: 978-94-641-4245-7.

REFERENCES

1. World Health Organization: WHO. (2018, October 11). Blindness and vision impairment. Who.int; World Health Organization: WHO. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
2. The blind among the blind. Inc.kiev.ua. Retrieved November 30, 2023, from <https://inc.kiev.ua/index.php/statti/41-nezryachi-sered-slipikh>
3. Dunai, L., Peris-Fajarnés, G., Lluna, E., & Defez, B. (2013). Sensory Navigation Device for Blind People. Journal of Navigation, 66(3), 349–362. <https://doi.org/10.1017/s0373463312000574>
4. Avrunin, O., & Bel'aninova, G. (2023). STRONG HEALTH and WELL-BEING are NURE'S PRIORITY. Grail of Science, 28, 83–87. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.09.06.2023.11>
5. Kolisnyk, K., Deineko, D., Sokol, T., Kutsevlyak, S., & Avrunin, O. (2019, October 1). Application of Modern Internet Technologies in Telemedicine Screening of Patient Conditions. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061252>
6. Селиванова, К. Г., Maksym Tymkovych, & Maksym Tymkovych. (2021). Conception of a Mixed Reality Eyesight Training System Based on the Parallel Robot. <https://doi.org/10.1109/picst54195.2021.9772244>
7. Makarov, A. (n.d.). Augmented Reality Development: Technology, Tools, Devices. MobiDev. Retrieved November 30, 2023, from <https://mobidev.biz/blog/augmented-reality-development-guide>
8. AR-based Indoor Navigation. (2021, April 8). Grid Dynamics Blog. <https://blog.griddynamics.com/ar-based-indoor-navigation/>
9. OpenCV: Depth Map from Stereo Images. (n.d.). Docs.opencv.org. Retrieved November 30, 2023, from https://docs.opencv.org/3.1.0/dd/d53/tutorial_py_depthmap.html
10. Lepetit, V., Moreno-Noguer, F., & Fua, P. (2008). EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. International Journal of Computer Vision, 81(2), 155–166. <https://doi.org/10.1007/s11263-008-0152-6>
11. Xiao-Shan Gao, Xiao-Rong Hou, Jianliang Tang, & Hang-Fei Cheng. (2003). Complete solution classification for the perspective-three-point problem. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25(8), 930–943. <https://doi.org/10.1109/tpami.2003.1217599>
12. Collins, T., & Bartoli, A. (2014). Infinitesimal Plane-Based Pose Estimation. International Journal of Computer Vision, 109(3), 252–286. <https://doi.org/10.1007/s11263-014-0725-5>
13. Szeliski, R. (2022). Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. Szeliski.org. Retrieved November 30, 2023, from <https://szeliski.org/Book/>
14. Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., & Kasi, V. (2013). Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. International Journal of Signal Processing Systems, 256–262. <https://doi.org/10.12720/ijsp.1.2.256-262>.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

15. Accueil. (n.d.). NOMADe. Retrieved November 30, 2023, from <https://nomadeproject.eu/>
16. May 2022 (ARCore SDK version 1.31) changes to Depth. (n.d.). Google for Developers. <https://developers.google.com/ar/develop/depth/changes>
17. Motola-Barnes, M. (). Haptic Actuators: Comparing Piezo to ERM and LRA. Blog.piezo.com. <https://blog.piezo.com/haptic-actuators-comparing-piezo-erm-lra>
18. A. Sokolov, O. Avrunin and A. Sokolov, "Theoretical Foundations for Designing Portable Systems for Oriented Blind People," 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 379-382, doi: 10.1109/PICST57299.2022.10238588.
19. Zhang, X., Yao, X., Zhu, Y., & Hu, F. (2019). An ARCore Based User Centric Assistive Navigation System for Visually Impaired People. Applied Sciences, 9(5), 989. <https://doi.org/10.3390/app9050989>
20. Sokolov A. A. Peculiarities of spatial perception in training systems / A. A. Sokolov, O. G. Avrunin // Aviation, industry, society: materials of the 4th International. science and practice conf. (Kremenchuk, May 18, 2023) / Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kharkiv National University of Internal Affairs affairs, Kremenchuts. Flight College, Science Park "Science and Safety". - Kharkiv: KhNURE, 2023. - P. 358-361.
21. Lu, F., Zhou, H., Guo, L., Chen, J., & Pei, L. (2021). An ARCore-Based Augmented Reality Campus Navigation System. Applied Sciences, 11(16), 7515. <https://doi.org/10.3390/app11167515>.
22. Kukharchuk, Vasyl V., Sergii V. Pavlov, Volodymyr S. Holodiuk, Valery E. Kryvonosov, Krzysztof Skorupski, Assel Mussabekova, and Gaini Karnakova. 2022. "Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors" *Sensors* 22, no. 1: 271. <https://doi.org/10.3390/s22010271>
23. Sergey I. Vyatkin, Olexander N. Romanyuk, Sergii V. Pavlov, and etc. "A function-based approach to real-time visualization using graphics processing units", Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, 115810E (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580212>.
24. Leonid I. Timchenko, Natalia I. Kokriatskaia, Sergii V. Pavlov, and etc. "Q-processors for real-time image processing", Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, 115810F (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580230>
25. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.
26. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages. <https://doi.org/10.1201/9781315098050>. eBook ISBN 9781315098050.
27. Pavlov Sergii, Avrunin Oleg, Hrushko Oleksandr, and etc. System of three-dimensional human face images formation for plastic and reconstructive medicine // Teaching and subjects on bio-medical engineering Approaches and experiences from the BIOART-project Peter Arras and David Luengo (Eds.), 2021, Corresponding authors, Peter Arras and David Luengo. Printed by Acco cv, Leuven (Belgium). - 22 P. ISBN: 978-94-641-4245-7.

Надійшла до редакції 20.11.2023р.

СОКОЛОВ АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, 61166, Україна, [e-mail: andrii.sokolov@nure.ua](mailto:andrii.sokolov@nure.ua)

АВРУНІН ОЛЕГ ГРИГОРОВИЧ - д.т.н., професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, 61166, Україна, [e-mail:oleh.avrunin@nure.ua](mailto:oleh.avrunin@nure.ua)

Andrii SOKOLOV, Oleg AVRUNIN

PROSPECTS OF USING AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF NAVIGATION TOOLS FOR THE BLIND

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 61166, Ukraine