

О. М. Маковейчук

Харківський національний університет радіоелектроніки Харків, Україна

НОВИЙ ТИП МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Анотація. Предметом вивчення в статті є маркери доповненої реальності. **Метою** є розробка нового типу маркерів доповненої реальності, що мають переваги більшості існуючих типів маркерів та вільні від їх недоліків. **Завдання:** аналіз переваг та недоліків існуючих маркерів доповненої реальності, формулювання основних вимог до перспективного маркера доповненої реальності, розробка основних етапів побудови нового маркеру доповненої реальності, практична перевірка відповідності нового маркеру доповненої реальності сформульованим вимогам. Використовуваними **методами** є: методи цифрової обробки зображень, теорії ймовірності, математичної статистики, криптографії та захисту інформації, математичний апарат теорії матриць. Отримані такі **результати**. Визначені переваги та недоліки основних існуючих типів маркерів доповненої реальності. Сформульовано п'ять вимог, яким повинен задовольняти нові маркери доповненої реальності. Запропоновано методик побудови нового маркеру доповненої реальності, що задовольняє сформульованим вимогам. Теоретично обґрунтовано точність розпізнавання маркера в залежності від співвідношення між його параметрами, знайдено мінімальне значення параметра, при якому забезпечується умова робастності. **Висновки.** Напрямами подальших досліджень є розробка методу визначення параметрів проєктивного перетворення, що необхідно для вирівнювання зображення і визначення положення камери; розробка методу знаходження правильного зміщення вирівняного зображення, що необхідно для правильного декодування перемутowanego зображення.

Ключові слова: маркер; код; доповнена реальність; зображення-контейнер; перемутowane зображення; робастність; правильне розпізнавання.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Доповнена реальність (в перекладі з англійської augmented reality або AR) – це доповнення фізичного світу за допомогою цифрових даних, яке забезпечується мобільними пристроями чи спеціальними пристроями (окулярами AR) в режимі реального часу [1].

Доповнена реальність, що базується на маркерах. Технологія використовує камеру та спеціальні пасивні візуальні маркери, наприклад QR-код (quick response code – код швидкого відгуку). Детектуючи маркери у відео-поточці, вдається вирізати віртуальні об'єкти з реального світу. При цьому суттєвим є визначення положення камери, яке визначається засобами комп'ютерного бачення [1].

Без маркерів доповнена реальність. Маркером є місцезнаходження камери, що визначається за допомогою системи глобального позиціонування (GPS – Global Positioning System); при цьому положення камери задається з використанням гіроскопу, акселерометру, цифрового компасу та інших сенсорів, якими обладнано мобільний пристрій [1].

Проаналізуємо основні галузі застосування. Згідно прогнозів (див., наприклад, звіт банку Goldman Sachs [2] та інші [3, 4] щодо розвитку ринку AR/VR), до 2025-го року за обсягом оборотів і прибутку ринок буде поділений на такі сегменти (в порядку спадання):

- ігри;
- медицина;
- освіта;
- військове застосування;
- виробництво і транспорт;
- кіно і телебачення;
- онлайн-трансляції;
- підготовка та навчання співробітників;

- маркетинг і реклама;
- роздріб/онлайн-комерція;
- торгівля нерухомістю;

Таким чином, з аналізу [2–4] видно, що в переважній більшості випадків будуть використовуватися маркерні системи доповненої реальності.

Існуючі маркери [2–4] мають певні недоліки та не завжди за допомогою їх можна вирішити нові завдання. Тому, актуальним є пошук нових маркерів доповненої реальності.

Мета статті – розробка нового типу маркерів доповненої реальності, що мають переваги більшості існуючих типів маркерів та вільні від їх недоліків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні існуючі типи AR-маркерів [5]:

– шаблонні (template markers) – чорно-білі маркери, які мають просте зображення всередині чорної рамки (рис. 1, а);

– 2D штрих-кодові (barcode markers) – маркери, що складаються з чорно-білих клітинок, які побітово кодують дані, і, іноді, рамки або області синхронізації. Найчастіше в якості штрих-кодових AR-маркерів використовують QR-коди (рис. 1, б);

– колові (circular markers) – аналогічно до штрих-кодових маркерів, тільки біти кодуються не прямокутними клітинками, а чорно-білими круговими секторами (рис. 1, в);

– зображення (image markers) – в якості маркерів використовуються звичайні кольорові зображення (рис. 1, г). Можуть містити рамку або інші орієнтири для виявлення та знаходження положення. Маркери-зображення зазвичай ідентифікуються за допомогою пошуку по шаблону або по особливостях зображення.

Аналізуючи типи AR-маркерів, можна зробити висновок, що кожен з них має свої переваги і недоліки:

– всі вони дозволяють визначати положення камери, але для цього використовуються різні методи:

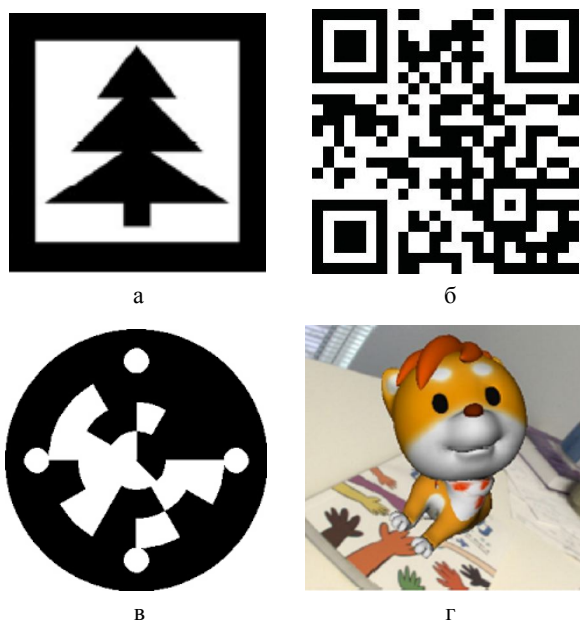


Рис. 1. Основні типи AR-маркерів [5]:
а – шаблонні; б – штрих-кодові; в – колові; г – зображення

- знаходження кутів зображення (шаблонні);
- знаходження спеціальних областей прив'язки (штрих-кодові і колові);
- знаходження особливих точок зображення і їх дескрипторів (зображення);
- частина з них (штрих-кодові і колові) містить додаткову інформацію (повідомлення), наприклад, посилання в інтернеті, що є однозначною перевагою, оскільки дозволяє розширити область застосування.

Знаходження кутів чи спеціальних областей прив'язки – швидкий метод, але вимагає однозначної детекції всіх 4 точок, знаходження особливих точок зображення і побудова їх дескрипторів (наприклад, SIFT, [6]) вимагає більше обчислювальних ресурсів, але є набагато стійкішим, частина зображення може бути закрита завадою, тим не менш цей метод дозволяє правильно визначати положення камери.

Основна частина

Отже, сформулюємо основні вимоги до перспективного AR-маркера:

- 1) легко і швидко знаходиться у відео-потіці;
- 2) використовується мінімальна кількість кольорів, ще краще – градації сірого;
- 3) містить додаткову інформацію (повідомлення);
- 4) дозволяє визначати положення камери;
- 5) пункти 3 і 4 виконуються при втраті до 50% інформації про маркер (наприклад, при закритті його завадою чи фізичній відсутності будь-якої частини маркера).

Очевидно, що жоден стандартний тип AR-маркера не буде відповідати вимогам 1–5 в повній мірі.

Найближчим відповідником є 2D штрих-кодові маркери (barcode markers), але вони не задовольняють вимогам робастності 5.

У роботах [7–11] було показано, що перматовані зображення, в яких псевдо-випадково переставлені їх пікселі, володіють так званих. голографічною властивістю – з будь-якої частини перматованого зображення можна (з певними втратами) відновити вихідне зображення. Зауважимо, що цитовані автори розглядали кольорові зображення і зображення в градаціях сірого, використання цього підходу для бінарних чорно-білих зображень (типу QR-кодів) автору у літературі не зустрічався.

Скористаємось цією властивістю, щоб задовільнити вимогу робастності. Будемо використовувати QR-код як зображення-повідомлення, він містить тільки 2 кольори і кодує в собі повідомлення (рис. 2, а). Далі пропонується наступне:

- кожен піксель зображення-повідомлення збільшуємо в k разів (тобто замінюємо матрицею $k \times k$, рис. 2, б);



Рис. 2. Основні етапи побудови пропонованого AR-маркера: а – зображення-повідомлення (QR-код розміром $N=21$, в якому закодовано повідомлення «Hello, world!»); б – попереднє зображення, збільшене в $k=3$ рази; в – перматоване зображення

- пікселі в отриманому зображенні переставляємо псевдо-випадковим чином (рис. 2, в);
- створюємо зображення-контейнер, що складається з клітинок, кожна з яких має колір перматованого зображення;
- для полегшення детектування цього зображення і розділення клітинок збільшимо кожну клітинку і вставимо в рамку з проміжним кольором – сірим; таким чином пропонується використовувати всього 3 кольори (градації сірого).

Отримане таким способом зображення-контейнер пропонується використовувати в якості AR-маркера (рис. 3).



Рис. 3. Зображення пропонуваного AR-маркера – контейнер, що містить отримане перматоване зображення, що показано на рис. 2в; кожна клітинка має розмір 8×8 пікселів, включаючи рамку товщиною в 1 піксель

Покажемо, що всі вимоги 1–5 задовольняються.

1. Для детекції AR-маркера у відео-поточі пропонується використовувати фільтр, що розраховує локальне стандартне відхилення по квадратному околу кожного пікселя вхідного зображення (рис. 4) [12]. При цьому відгук фільтра буде максимальним на границях між клітинками (оскільки маємо гарантований перепад по яскравості у половину динамічного діапазону) і мінімальним в середині клітинок (оскільки вони є однорідними областями) і в області фону (для реальних зображень перепад по яскравості між сусідніми пікселями є малим внаслідок їх сильної корельованості).

2. Як вже було вказано, використовується тільки 3 градації сірого, що спрощує виробництво маркера і робить його нечутливим до зміни освітленості.

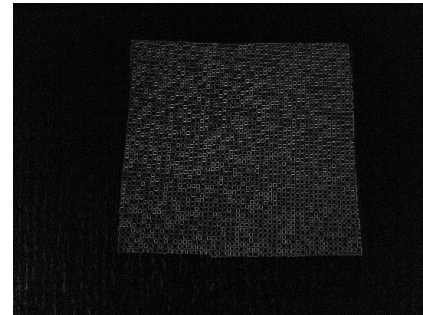
3. Повідомлення міститься у QR-кодї.

4. Для визначення положення камери (рис. 5) розроблено спеціальний алгоритм, що буде описано в окремій статті.

5. Умова робастності задовольняється внаслідок пост-обробки зворотно перматованого зображення (рис. 6) – колір кожної клітинки буде визначатися як мода кольорів, що найчастіше зустрічаються, при цьому ігноруються невизначені значення (що виникають внаслідок втрати інформації).

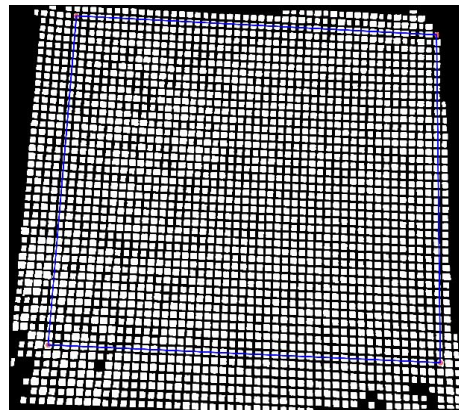


а

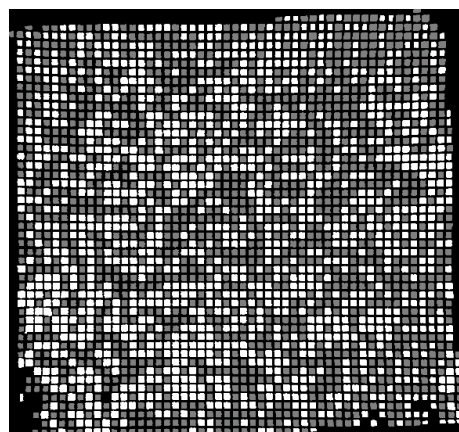


б

Рис. 4. Приклад детектування AR-маркера (зауважимо, що края маркера фізично обрізані): а – вихідне зображення; б – відгук фільтра, що розраховує локальне стандартне відхилення, розмір фільтра 3×3



а



б

Рис. 5. Приклад визначення положення камери: а – знаходження опорних точок, що необхідні для (маючи опорні точки, ми можемо розрахувати матрицю проєкційного перетворення H , яка в свою чергу факторизується на матрицю повороту камери R і вектор трансляції t [13, 14]); б – вирівнювання зображення з використанням $1/N$

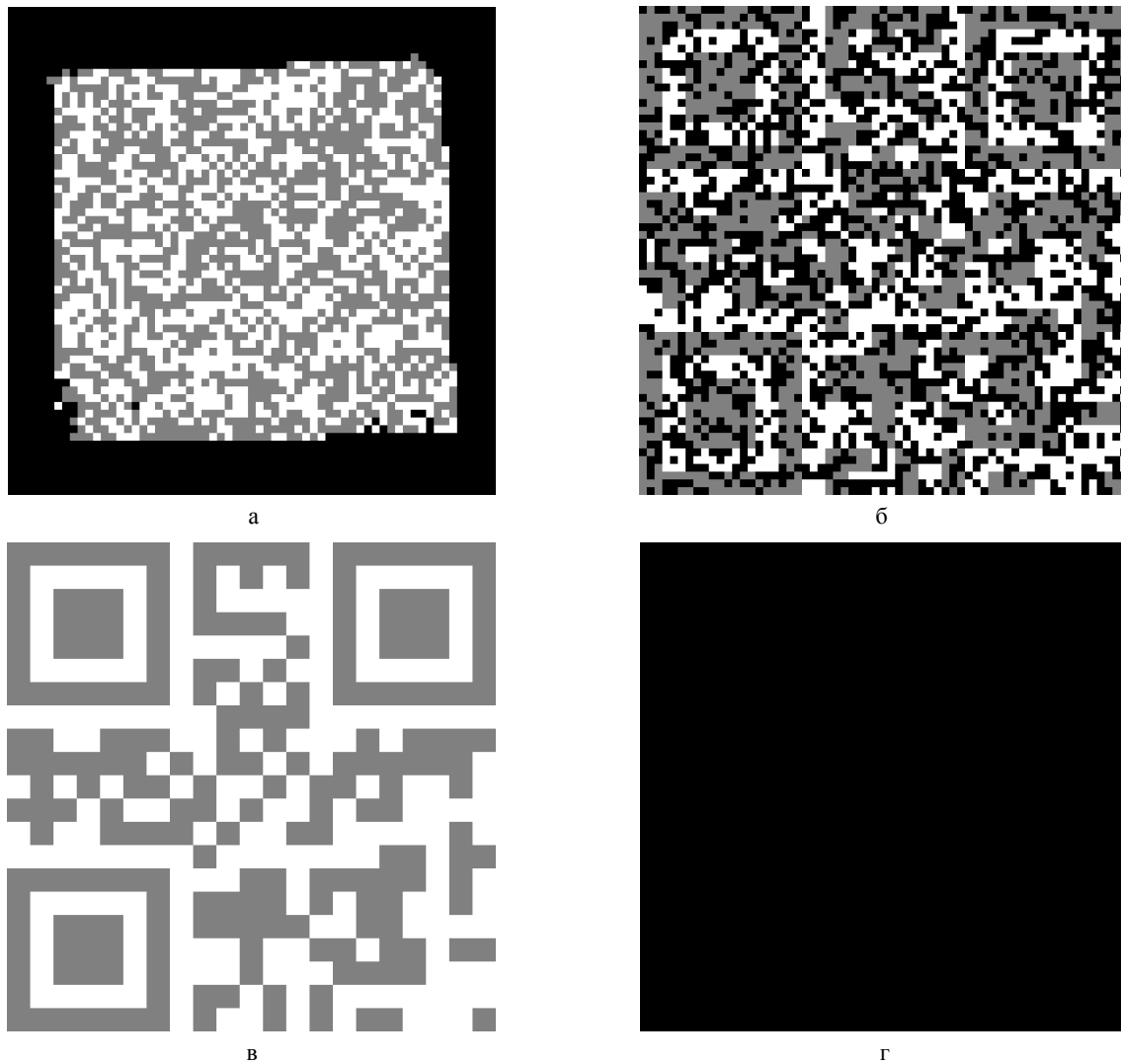


Рис. 6. Результати пост-обробки:

- а – пікселі біт-контейнера (рис. 5, б) вставлені з правильним зміщенням у матрицю $N \times N$, невизначені значення показані чорним кольором, значення зміщення знаходяться за допомогою окремого алгоритму, запропонованого автором і будуть описані в окремій статті;
 б – результат інверсної пермутації для попереднього зображення); в – результат пост-обробки;
 г – різниця між попереднім зображенням і оригінальним зображенням QR-кода, показаного на рис. 2, б

Знайдемо умову правильної відновлюваності зображення при втраті частини зображення, при цьому вважається, що всі розпізнані пікселі були розпізнані правильно, тобто похибка виникає тільки внаслідок втрати частини пікселів. Нехай частка втрачених пікселів є p , при цьому, як було вказано вище, кожен піксель ми дублювали k^2 разів (матрицею $k \times k$). Клітинка відновиться неправильно за умови, що в її межах не знайдеться жодного розпізнаного пікселя, імовірність такої події q легко розраховується:

$$q = (1 - p)^{k^2}. \quad (1)$$

Графіки емпіричної імовірності відновлення і теоретично розрахованої показано на рис. 7.

Якщо QR-код має розмір $N \times N$ клітинок, то математичне очікування m кількості невідновлених клітинок є:

$$m = qN^2. \quad (2)$$

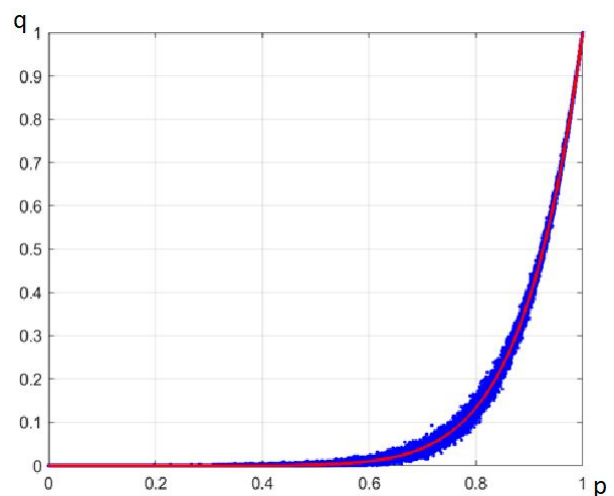


Рис. 7. Графіки емпірично вирахованої імовірності відновлення (розраховувалась усередненням по 10 експериментах, точки) і розрахованої теоретично по формулі (1) (середня лінія)

Умова правильного розпізнавання QR-коду:

$$m \leq 1 \quad (3)$$

(вважатимемо, що за рахунок певної надлишковості QR-коду, допускається 1 нерозпізнана клітинка, на практиці надлишковість забезпечується використанням кодів Ріда-Соломона [15] і він розпізнається правильно за відсутності більше ніж 1 клітинки).

Перепишемо рівність (1), використовуючи вирази (2) і (3):

$$(1-p)^{k^2} \cdot N^2 \leq 1, \quad (4)$$

звідки знаходиться умова для визначення k :

$$k > \sqrt{-2 \ln N / \ln(1-p)^r}, \quad (5)$$

(підкореневий вираз буде додатним, оскільки за визначенням $p < 1$, отже $\log(1-p) < 0$).

Для QR-коду мінімальне значення розміру $N = 21$ [15], отже при $p = 0,5$ (вимога 5), отримуємо за формулою (5), що мінімальне значення $k = 3$.

Висновки і напрямки подальших досліджень

В даній роботі зазначено, що на даний час найбільш перспективним є використання маркерних

технологій доповненої реальності і визначено переваги і недоліки основних типів AR-маркерів. На основі проведеного аналізу сформульовано 5 вимог, яким повинен задовольняти перспективний AR-маркер.

Запропоновано методику побудови AR-маркера, що на відміну від існуючих задовольняє всім вимогам.

Теоретично обґрунтовано точність розпізнавання AR-маркера в залежності від співвідношення між його параметрами (4). Знайдено мінімальне значення параметра $k=3$ таке, що забезпечується умова робастності (5).

У подальшому необхідно уточнити співвідношення (4), що задає точність розпізнавання AR-маркера з урахуванням того, що тільки частина пікселів розпізнається правильно.

Напрямами подальших досліджень є:

1) розробка методу визначення параметрів проєктивного перетворення, що необхідно для вирівнювання зображення і визначення положення камери;

2) розробка методу знаходження правильного зміщення вирівняного зображення у матриці $N \times N$, що необхідно для правильного декодування перматованого зображення (базується на результатах, отриманих в роботі [16]).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Доповнена реальність або AR-технології. URL: <http://thefuture.news/lessons/ua/ar>
2. Goldman S. Global Investment Research. URL: <http://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research>
3. Adobe Blog. The 10 VR Trends We'll See in 2018, 2019. URL: <https://theblog.adobe.com/10-vrtrends-well-see-2018>
4. Facebook Research. AR/VR-Facebook Research. 2019. URL: <http://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality>
5. Siltanen S. Theory and applications of marker-based augmented reality. Espoo 2012, 2012. 198 p.
6. Lowe David G. Object recognition from local scale-invariant features. Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2, 1999. P. 1150–1157.
7. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. Holographic representation of images. IEEE Transactions on Image Processing. 1998. N 7. P. 1583–1587.
8. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. Holographic image representations: the subsampling method. IEEE Int. Conference on Image Processing. Santa Barbara, California, USA, October. 1997. Vol. 1. P. 177–180.
9. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. US 6,091,394: "Technique for Holographic Representation of Images". July 18, 2000. 6 p.
10. Барінова Д. А. Разработка и исследование алгоритмов обработки цифровых изображений, представленных в псевдоголографических кодах / Д. А. Барінова // Компьютерная оптика. – 2005. – № 27. – С. 149–154.
11. Воронин, В. В. Голографическое представление в задачах обработки изображений / В. В. Воронин // Тезисы конференции РОАИ – 5. – 2000. – С. 237–241.
12. Mathworks. Select a Web Site. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/stdfilt.html>
13. Hartley R., Multiple View Geometry in Computer Vision / Hartley R., Zisserman S. // Cambridge University Press New York, NY, USA – 2003. – 655 p.
14. Форсайт А. Д., Компьютерное зрение. Современный подход / Форсайт А. Д., Понс Ж. – Москва, Издательский дом «Вильямс» 2004. – 928 с.
15. Reed–Solomon codes for coders. URL: https://en.wikiversity.org/wiki/Reed%E2%80%93Solomon_codes_for_coders
16. Маковейчук О. М., Рубан І. В., Худов Г. В. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава : ПНТУ, 2019. № 4 (56). С. 72-81.

REFERENCES

1. Augmented reality or AR technology (2019), available at: <http://thefuture.news/lessons/ua/ar>
2. Goldman, S. (2019), Global Investment Research, available at: <http://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research>
3. Adobe Blog (2019), The 10 VR Trends We'll See in 2018, 2019, available at: <https://theblog.adobe.com/10-vrtrends-well-see-2018>
4. Facebook Research. AR/VR-Facebook Research (2019), available at: <http://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality>
5. Siltanen, S. (2012), Theory and applications of marker-based augmented reality, Espoo 2012, 198 p.
6. Lowe, David G. (1999), "Object recognition from local scale-invariant features", Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2, pp. 1150–1157.

7. Bruckstein, A.M., Holt, R.J. and Netravali, A.N. (2000), "Holographic representation of images", *IEEE Transactions on Image Processing*, No. 7, pp. 1583–1587.
8. Bruckstein, A.M., Holt, R.J. and Netravali, A.N. (1997), Holographic image representations: the subsampling method, *IEEE Int. Conference on Image Processing*, Santa Barbara, California, USA, October, Vol. 1, pp. 177–180.
9. Bruckstein, A.M., Holt, R.J. and Netravali, A.N. (2000), *US 6,091,394: "Technique for Holographic Representation of Images"*. July 18, 6 p.
10. Barinova, D.A. (2005), Development and research of digital image processing algorithms represented in pseudo-holographic codes, *Computer Optics*, No. 27, pp. 149–154.
11. Voronin, V.V. (2000), "Holographic representation in image processing problems", *Abstracts of the ROAI conference*, 5, pp. 237–241.
12. Mathworks. Select a Web Site (2019), available at: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/stdfilt.html>
13. Hartley, R. and Zisserman, S. (2003), *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press New York, NY, USA, 655 p.
14. Forsyth, A.D. and Pons, J. (2004), *Computer Vision. Modern Campaign*, Williams Publishing House, Moscow, 928 p.
15. *Reed–Solomon codes for coders* (2019), available at: https://en.wikiversity.org/wiki/Reed%E2%80%93Solomon_codes_for_coders
16. Makoveychuk, O.M., Ruban, I.V. and Khudov G.V. (2019), "Using Genetic Algorithms for Finding Inverse Pseudo-Random Block Rearrangements", *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 4 (56), pp. 7281.

Received (Надійшла) 31.07.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.09.2019

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Маковейчук Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, докторант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Oleksandr Makoveychuk – Candidate of Technical Sciences, doctoral student of Electronic Computers Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: omakoveychuk@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4425-016X>

Новый тип маркеров дополненной реальности

О. М. Маковейчук

Аннотация. Предметом изучения в статье маркеры дополненной реальности. Целью является разработка нового типа маркеров дополненной реальности, которые имеют преимущества большинства существующих типов маркеров и свободны от их недостатков. **Задачи:** анализ преимуществ и недостатков существующих маркеров дополненной реальности, формулировка основных требований к перспективному маркера дополненной реальности, разработка основных этапов построения нового маркера дополненной реальности, практическая проверка соответствия нового маркера дополненной реальности сформулированным требованиям. Используемыми **методами** являются: методы цифровой обработки изображений, теории вероятности, математической статистики, криптографии и защиты информации, математический аппарат теории матриц. Получены следующие **результаты**. Определенные преимущества и недостатки основных существующих типов маркеров дополненной реальности. Сформулировано пять требований, которым должен удовлетворять новые маркеры дополненной реальности. Предложена методика построения нового маркера дополненной реальности, удовлетворяет сформулированным требованиям. Теоретически обосновано точность распознавания маркера в зависимости от соотношения между его параметрами, найдено минимальное значение параметра, при котором обеспечивается условие робастности. **Выводы.** Направлениями дальнейших исследований является разработка метода определения параметров проективного преобразования, что необходимо для выравнивания изображения и определения положения камеры; разработка метода нахождения правильного смещения выровненного изображения, что необходимо для правильного декодирования перемутowanego изображения.

Ключевые слова: код; дополненная реальность; изображение-контейнер; перемутowane изображения; робастность; правильное распознавание.

A new type of augmented reality markers

O. Makoveychuk

Abstract. The subject matter of the article is the augmented reality markers. The goal is to develop a new type of augmented reality tokens that has the advantages of most existing types of tokens and is free from their disadvantages. The tasks are: analysis of the advantages and disadvantages of existing augmented reality markers, formulation of the basic requirements for a Perspective augmented reality marker, development of the main stages of construction of a new augmented reality marker, practical verification of compliance of a new augmented reality marker with the formulated requirements. The methods used are methods of digital image processing, probability theory, mathematical statics, cryptography and information security, mathematical apparatus of matrix theory. The following results were obtained. The advantages and disadvantages of the main existing types of augmented reality markers are identified. The five requirements that new augmented reality tokens must satisfy are formulated. The technique of constructing a new marker of augmented reality is offered, which satisfies the formulated requirements. The accuracy of marker recognition depending on the correlation between its parameters is theoretically substantiated. **Conclusions.** The areas of further research are the development of a method for determining the parameters of projective transformation that is necessary to align the image and determine the position of the camera; development of a method of finding the correct offset of the aligned image, which is necessary for the correct decoding of the permuted image.

Keywords: marker; code; augmented reality; container image; permuted image; porosity; correct recognition.