

О. М. Маковейчук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СТІЙКИХ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Предметом вивчення в статті є маркери доповненої реальності. **Метою** є розробка науково-прикладних основ побудови стійких маркерів доповненої реальності на основі системи моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів. **Завдання:** аналіз переваг та недоліків існуючих маркерів доповненої реальності, формулювання основних вимог до маркера доповненої реальності, дослідження системи моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів. 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 вимоги, яким повинні задовольняти маркери доповненої реальності. Запропоновано система моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів. **Висновки.** Напрямами подальших досліджень є розробка методу формування стійкого маркера доповненої реальності; розробка методу виявлення стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності; розробка методу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності; розробка методу проектування віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності; розробка інформаційної технології використання мозаїчних стохастичних маркерів у системах доповненої реальності.

Ключові слова: маркер, код, доповнена реальність, віртуальна реальність, моделі, методи, вимоги, робастність, виявлення, декодування.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Згідно прогнозів банку Goldman Sachs [1] (рис. 1) щодо розвитку ринку систем віртуальної та доповненої реальності до 2025-го року за обсягом оборотів і прибутку ринок буде поділений на такі сегменти (в порядку спадання): ігри, медицина, освіта, військова сфера, виробництво і транспорт, кіно і телебачення, онлайн-трансляції, підготовка та навчання співробітників, маркетинг і реклама, роздріб/онлайн-комерція, торгівля нерухомістю. З рис. 1 видно, що ринок систем доповненої реальності наблизився до ринку поставки планшетів, але ще суттєво відстає від ринку поставки смартфонів.



Рис. 1. Прогноз банку Goldman Sachs щодо розвитку ринку систем віртуальної та доповненої реальності

Теоретично AR-маркером може бути будь-яка фігура (об'єкт), але на практиці вибір маркера обмежений роздільною здатністю камери, особливостями передачі кольору, освітлення і обчислювальною потужністю обладнання [2]. Тому для роботи у реальному часі вибирається зазвичай чорно-білий маркер простої форми. Як правило це прямокутник або квадрат з вписаним всередину образом-ідентифікатором [2].

Існуючі типи AR-маркерів мають певні переваги і недоліки, а саме [3]:

- всі вони дозволяють визначити положення камери, але для цього використовуються різні методи:
 - 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.

Мета статті – розробка науково-прикладних основ побудови стійких маркерів доповненої реальності на основі системи моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах зовнішніх впливів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Типова методика обробки шаблонного маркера складається з таких кроків (рис. 2) [4, 5]:

- перехід в градації сірого;
- визначення порогу і бінаризація зображення;
- знаходження замкнутих областей;
- виділення контурів;
- знаходження кутів маркера;
- знаходження параметрів проективного перетворення і перетворення координат.

Методика роботи з штрих-кодовими маркерами передбачає обов'язкове використання коду корекції помилок (у даному випадку – це коди Ріда-Соломона (рис. 3 [4, 5])).

Недоліком маркерів-зображень є неможливість закодувати в ньому додаткове повідомлення, що обмежує галузь їх застосування [6, 7]. Також методи їх обробки мають вищу обчислювальну складність.

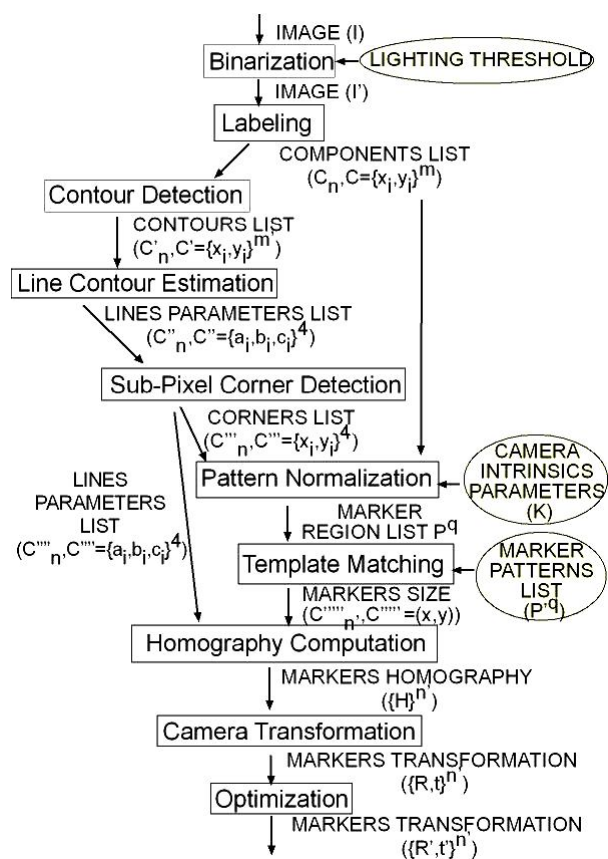


Рис. 2. Блок-схема типової методики обробки шаблонних маркерів [4, 5]

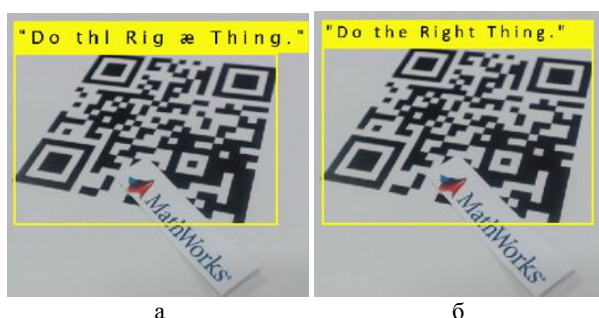


Рис. 3. Результат декодування QR-коду [4, 5]: а – без використання кодів Ріда-Соломона; б – з використанням кодів Ріда-Соломона

В [3] сформульовано основні вимоги до нового типу AR-маркера, а саме:

- 1) легко і швидко знаходиться у відео-потіці;
- 2) використовується мінімальна кількість кольорів, ще краще – градації сірого;
- 3) містить додаткову інформацію (повідомлення);
- 4) дозволяє визначити 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).

Основна частина

Для порівняння ефективності використання стійких мозаїчних маркерів із іншими типами візуальних маркерів доповненої реальності необхідно

кількісно оцінити наскільки кожен тип маркерів задовольняє основним функціональним вимогам.

У табл. 1 наведено запропоновані кількісні критерії для кожного функціонального показника.

Таблиця 1 – Критерії оцінки показників ефективності

Показник	Критерій оцінки
Помітність	Середній час детекції тестового AR-маркера в однакових умовах спостереження, сек.
Простота	Кількість кольорів (градацій сірого), число
Інформативність	Довжина повідомлення, що закодовано у маркері, біт
Орієнтованість	Можливість визначення положення камери, так/ні
Робастність	Кількість помилок декодування повідомлення (в залежності від типу і рівня помилок), число
Криптовійкість	Середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації, число
Універсальність	Кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера, число

Розглянемо в IDEF0-нотації основний процес застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності (рис. 4).

Вхід процесу – сцена доповненої реальності, що представляє собою область реального світу, де знаходиться користувач. Сцена містить в області прямої видимості мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності.

Управління представляє собою набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптовійкості та універсальності); специфікації смартфона; математичні і чисельні методи (методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації).

Механізмами є сам користувач, смартфон, система програмування MATLAB, що використовується для прототипування процесів, а також спеціалізовані модулі MATLAB, такі як Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Optimization Toolbox.

На виході маємо декодоване повідомлення, віртуальний 3d-об'єкт, що проектується на площину AR-маркера, процес рендерингу відео-потіку в області AR-маркера.

Декомпозиція основного процесу передбачає проведення двох підпроцесів першого рівня (рис. 5):

- 1) сфотографувати AR-маркер:
 - вхід – AR-сцена;
 - вихід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
 - управління – набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптовійкості та універсальності); специфікації смартфона;
 - механізми – користувач, смартфон;

2) використати AR-маркер:
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
 – вихід – декодоване повідомлення, віртуальний 3d-об’єкт, що проектується на площину AR-маркера, процес рендерингу відео-потoku в області AR-маркера;

– управління – набір вимог до візуальних AR-маркерів (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності); специфікації смартфона; математичні і чисельні методи (методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації);

– механізми – система програмування MATLAB, що використовується для прототипування, спеціалізовані модулі MATLAB (Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Optimization Toolbox).

Декомпозиція підпроцесу використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на три підпроцеси другого рівня (рис. 6):

1) декодувати повідомлення:
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;
 – вихід – повідомлення;
 – управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, робастності, універсальності; методи бінаризації, методи сегментації, методи оптимізації, дискретна математика, математична морфологія;

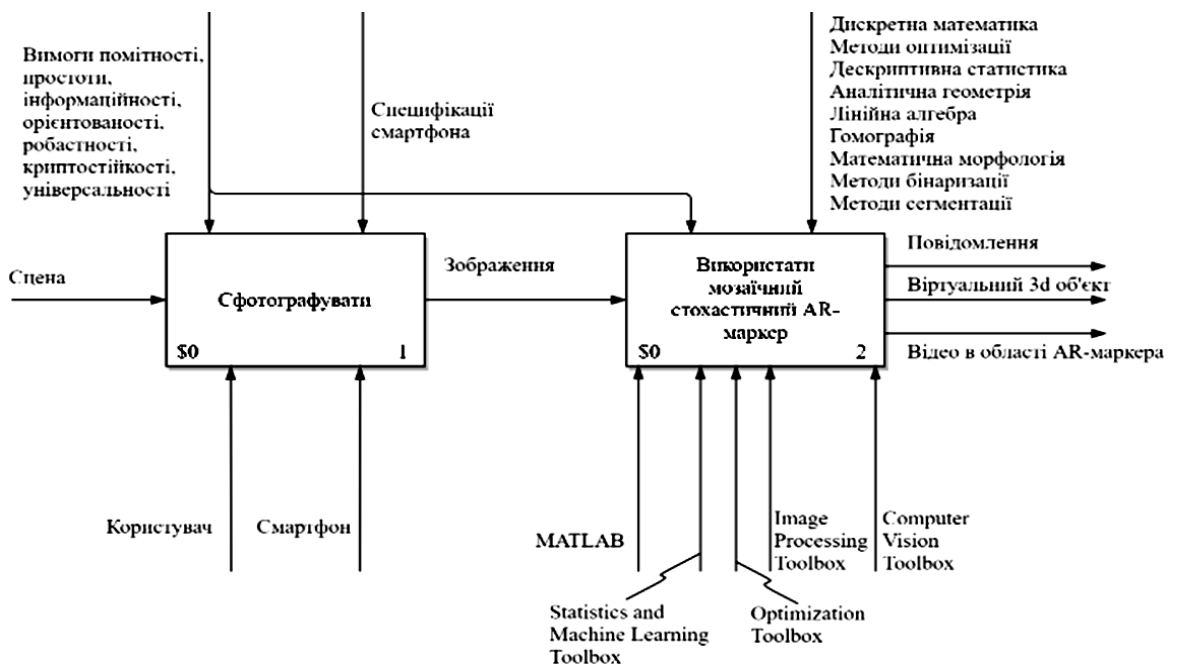


Рис. 4. Основний процес використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

– механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

2) побудувати віртуальний 3d-об’єкт:
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

– вихід – зображення віртуального 3d-об’єкта;
 – управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації;

Рис. 5. Декомпозиція основного процесу застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

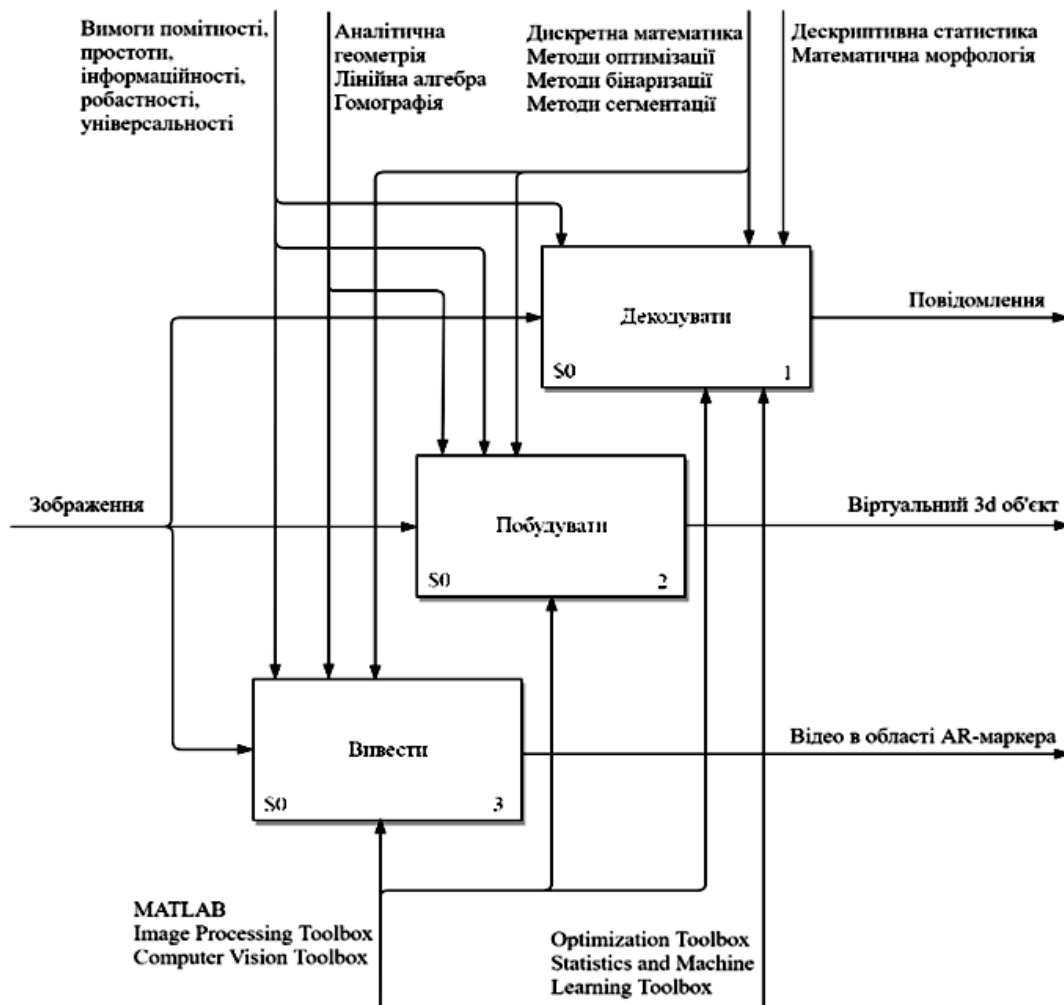


Рис. 6. Декомпозиція підпроцесу використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

3) вивести відео-потік в області AR-маркера:

– вхід – зображення мозаїчного AR-маркера;
– вихід – процес рендерингу відеопотоку в області AR-маркера;

– управління – вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності; методи дискретної математики, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінаризації, методи сегментації;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на три підпроцеси третього рівня (рис. 7):

1) детектувати AR-маркер:

– вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

– вихід – маска AR-маркера;

– управління – вимоги помітності, простоти, робастності, універсальності; методи дискретної математики, дескриптивна статистика, математична морфологія, методи бінаризації;

– механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

2) знайти біт-контейнери:

– вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера;

– вихід – об'єднання масок біт-контейнерів;

– управління – вимоги помітності, простоти, робастності, універсальності; методи дискретної математики, математична морфологія, методи сегментації;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

3) декодувати повідомлення:

– вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера, маски біт-контейнерів, об'єднання масок біт-контейнерів;

– вихід – повідомлення;

– управління – вимоги інформативності, робастності, криптостійкості та універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, дескриптивна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія;

– механізми – MATLAB; Optimization Toolbox, Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу детектування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на три підпроцеси четвертого рівня (рис. 8):

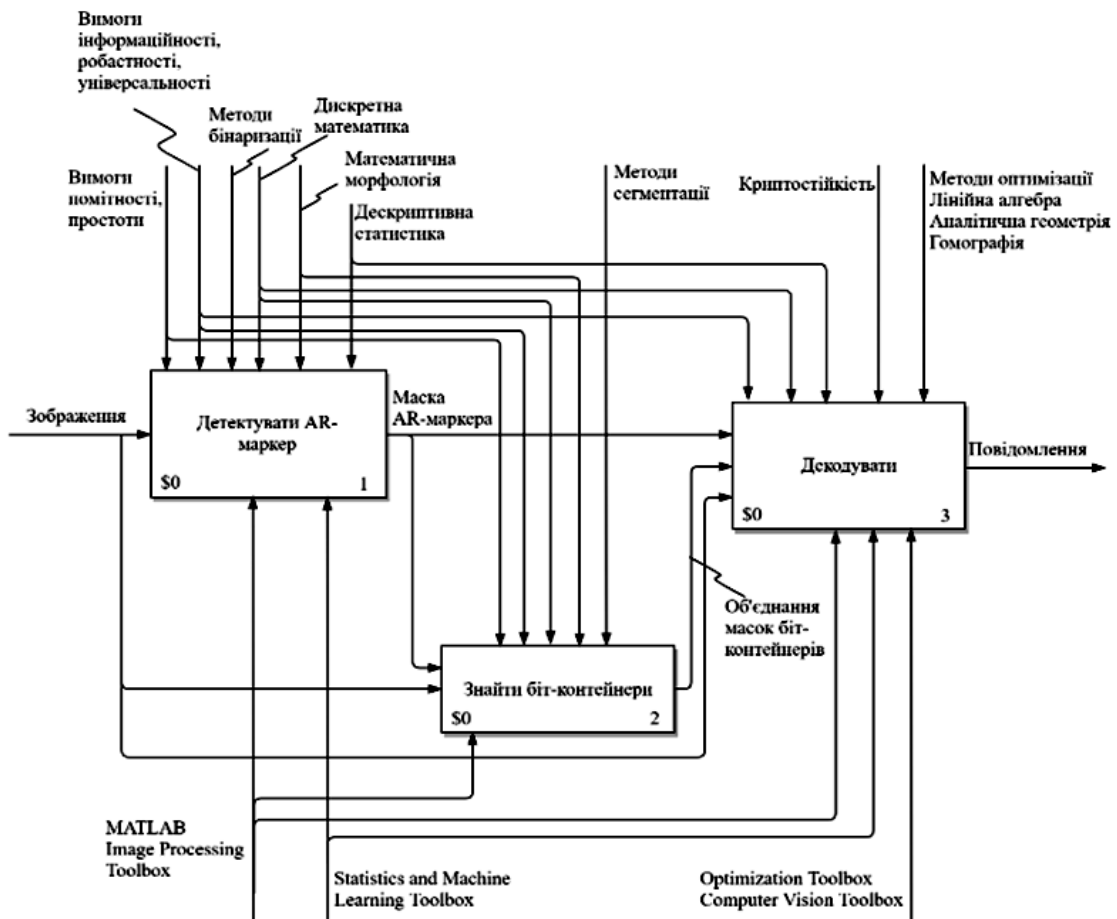


Рис. 7. Декомпозиція підпроцесу декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

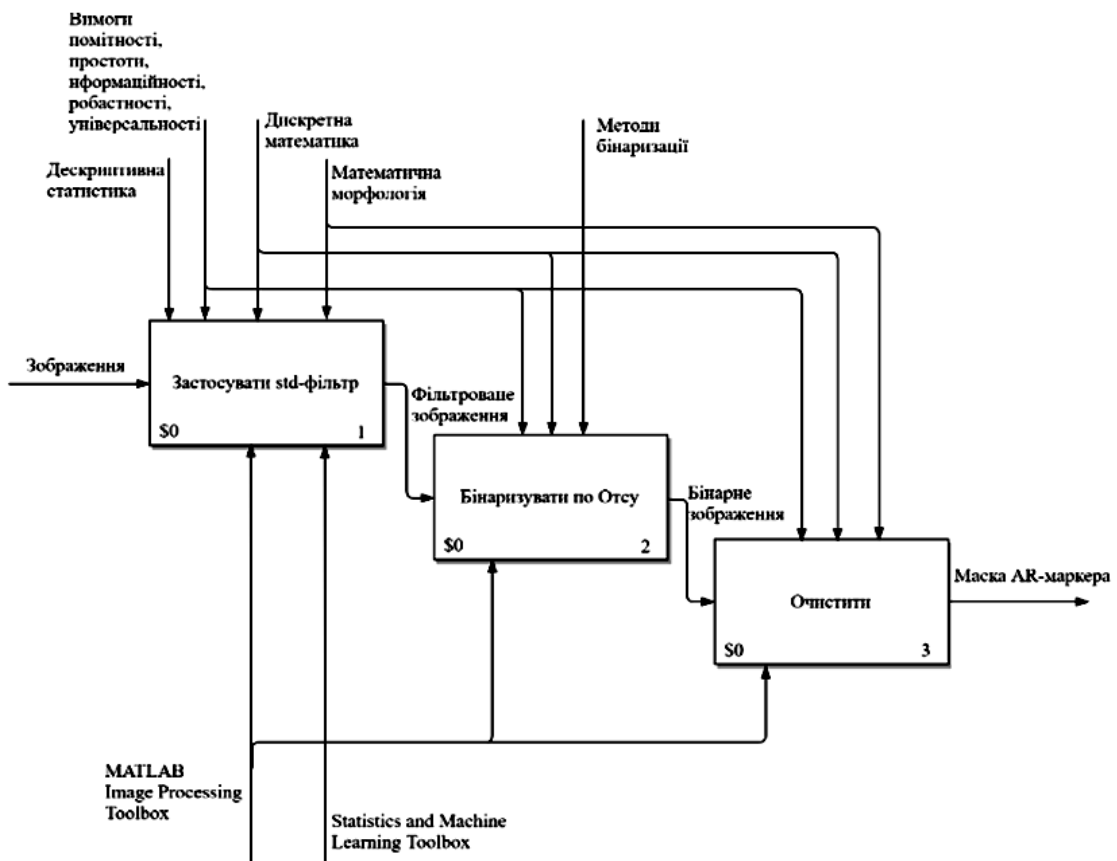


Рис. 8. Декомпозиція підпроцесу детектування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

1) застосувати std-фільтр:
 – вхід – зображення мозаїчного AR-маркера;
 – вихід – відфільтроване зображення;
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, описативна статистика, математична морфологія;
 – механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

2) бінаризувати по Отсу:
 – вхід – відфільтроване зображення;
 – вихід – бінарне зображення;
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, методи бінаризації;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

3) очистити зображення від шуму:
 – вхід – бінарне зображення;
 – вихід – маска AR-маркера;
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи дискретної математики, методи математичної морфології;
 – механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу знаходження біт-контейнерів мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності поділяється на два підпроцеси четвертого рівня (рис. 9):

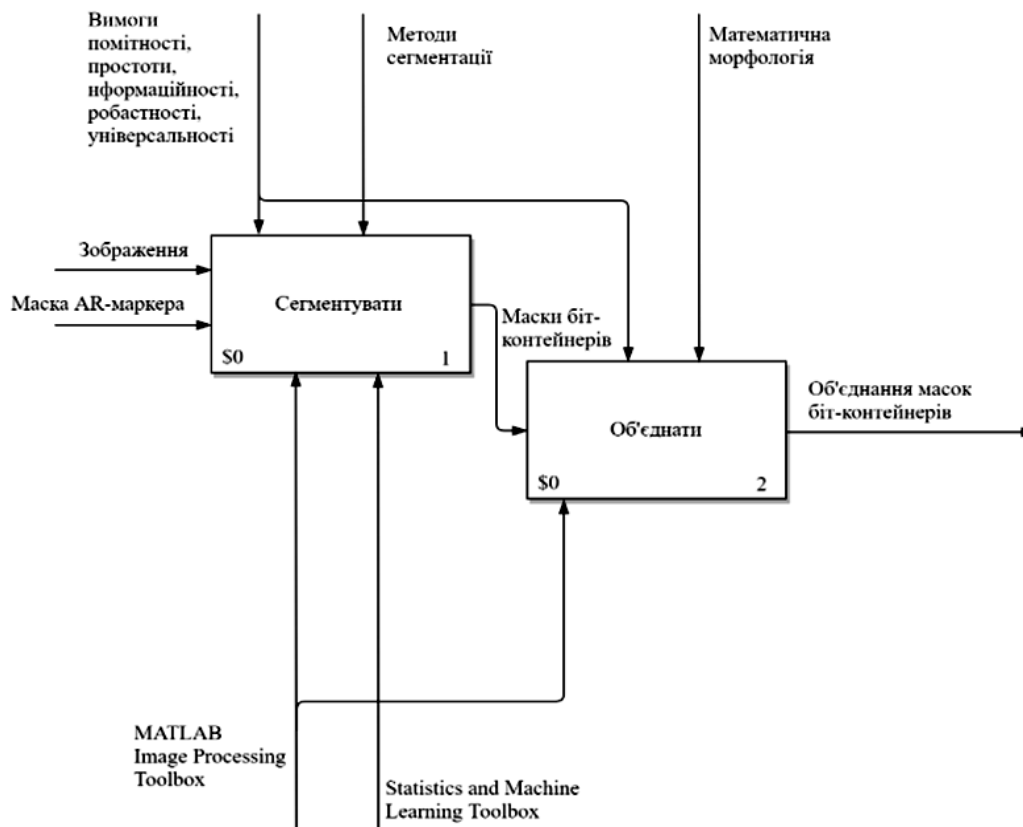


Рис. 9. Декомпозиція підпроцесу знаходження біт-контейнерів мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

1) сегментувати зображення:
 – вхід – зображення мозаїчного статистичного AR-маркера, маска AR-маркера;
 – вихід – маски біт-контейнерів;
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи сегментації;
 – механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox;

2) об'єднати маски:
 – вхід – маски біт-контейнерів;
 – вихід – об'єднання масок біт-контейнерів;
 – управління – вимоги помітності, простоти, універсальності; методи математичної морфології;
 – механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox.

Декомпозиція підпроцесу декодування повідомлення мозаїчного стохастичного маркера доповне-

ної реальності поділяється на дев'ять підпроцесів четвертого рівня (рис. 10):

1) знайти параметри проєктивного перетворення:
 – вхід – об'єднання масок біт-контейнерів;
 – вихід – матриця гомографії;
 – управління – вимоги робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія;
 – механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

2) застосувати проєктивне перетворення:
 – вхід – зображення AR-маркера, маски біт-контейнерів, об'єднання масок біт-контейнерів, матриця гомографії;
 – вихід – перетворене зображення AR-маркера; перетворені маски біт-контейнерів, перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;



Рис. 10. Декомпозиція підпроцесу декодування повідомлення мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

– управління – вимоги робастності, універсальності; методи дискретної математики, методи оптимізації, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox;

3) порахувати середні:

– вхід – перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;

– вихід – середні по рядках/стовпцях;

– управління – вимога універсальності; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

4) порахувати пороги:

– вхід – перетворене об'єднання масок біт-контейнерів;

– вихід – пороги;

– управління – вимога універсальності; методи дискретної математики, методи математичної морфології;

– механізми – MATLAB; Image Processing Toolbox;

5) порахувати кількість перетинів:

– вхід – середні по рядках/стовпцях, пороги;

– вихід – кількість стовпців/рядків;

– управління – вимога універсальності, робастності; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

6) побудувати матрицю бітів:

– вхід – перетворене зображення, перетворені маски біт-контейнерів, кількість стовпців/рядків;

– вихід – матриця бітів;

– управління – вимога універсальності, робастності; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

7) знайти зсув:

– вхід – матриця бітів;

– вихід – повна матриця бітів;

– управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики, методи оптимізації;

– механізми – MATLAB; Optimization Toolbox;

8) застосувати інверсну перестановку:

– вхід – повна матриця бітів;

– вихід – зашумлене повідомлення;

– управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики;

– механізми – MATLAB;

9) знайти моду:

– вхід – зашумлене повідомлення;

– вихід – повідомлення;

– управління – вимога інформативності, універсальності, робастності, криптостійкості; методи дискретної математики, декриптивна статистика;

– механізми – MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox.

Таким чином, вперше отримано науково-прикладні основи побудови маркерів доповненої реальності, що базуються на системі моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах несприятливих зовнішніх впливів.

Висновки і напрямки подальших досліджень

Встановлено, що на даний час найбільш перспективним є використання маркерних технологій доповненої реальності і визначено переваги і недоліки основних типів AR-маркерів. Сформульовано основні вимоги до AR-маркер

Вперше отримано науково-прикладні основи побудови маркерів доповненої реальності, що базуються на системі моделей та методів стійкого формування, виявлення та декодування даних, що забезпечує відновлення зображення в умовах несприятливих зовнішніх впливів.

Напрямами подальших досліджень є:

1) розробка методу формування стійкого маркеру доповненої реальності;

2) розробка методу виявлення стійкого мозаїчного стохастичного маркеру доповненої реальності;

3) розробка методу декодування мозаїчного стохастичного маркеру доповненої реальності;

4) розробка методу проектування віртуальних об'єктів на площину маркеру доповненої реальності;

5) розробка інформаційної технології використання мозаїчних стохастичних маркерів у системах доповненої реальності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Goldman, S. Global Investment Research, 2019 / [Electronic resource] – URL: <https://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research/>
2. Доповнена реальність або AR-технології // [Електронний ресурс] – URL: <http://thefuture.news/lessons/ua/ar>.
3. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності / О. М. Маковейчук // Сучасні інформаційні системи. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 43–48.
4. Adobe Blog. The 10 VR Trends We'll See in 2018, 2019 [Electronic resource] – URL: <https://theblog.adobe.com/10-vrtrends-well-see-2018/>
5. Facebook Research. AR/VR-Facebook Research. 2019 // [Electronic resource] – URL: <https://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality>
6. Siltanen, Theory and applications of marker-based augmented reality / S.Siltanen // Espoo 2012 – 2012. – 198 p.
7. Маковейчук О. М. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок / О. М. Маковейчук, І. В. Рубан, Г. В. Худов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019. – № 4 (56). – С. 72–81.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г. В. Худов,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 30.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2019

Научно-прикладные основы построения устойчивых маркеров дополненной реальности

А. Н. Маковейчук

Предметом изучения в статье являются маркеры дополненной реальности. **Целью** является разработка научно-прикладных основ построения устойчивых маркеров дополненной реальности на основе системы моделей и методов устойчивого формирования, обнаружения и декодирования данных, что обеспечивает восстановление изображения в условиях внешних воздействий. **Задачи:** анализ достоинств и недостатков существующих маркеров дополненной реальности, формулировка основных требований к маркеру дополненной реальности, исследование системы моделей и методов устойчивого формирования, обнаружения и декодирования данных, что обеспечивает восстановление изображения в условиях внешних воздействий. Используемыми **методами** являются: методы цифровой обработки изображений, теории вероятности, математической статистики, криптографии и защиты информации, математический аппарат теории матриц. Получены следующие **результаты**. Определены достоинства и недостатки основных существующих типов маркеров дополненной реальности. Сформулировано пять требований, которым должны удовлетворять маркеры дополненной реальности. Предложена система моделей и методов устойчивого формирования, обнаружения и декодирования данных, что обеспечивает восстановление изображения в условиях внешних воздействий. **Выводы.** Направлениями дальнейших исследований является разработка метода формирования устойчивого маркера дополненной реальности; разработка метода выявления устойчивого мозаичного стохастического маркера дополненной реальности; разработка метода декодирования мозаичного стохастического маркера дополненной реальности; разработка метода проектирования виртуальных объектов на плоскость маркера дополненной реальности; разработка информационной технологии использования мозаичных стохастических маркеров в системах дополненной реальности.

Ключевые слова: маркер, код, дополненная реальность, виртуальная реальность, модели, методы, требования, робастность, выявление, декодирование.

Scientific and applied fundamentals of building sustainable augmented reality markers

O. Makoveychuk

The **subject matter** of the article is augmented reality markers. The **goal** is the development of scientific and applied foundations for the construction of stable augmented reality markers based on a system of models and methods for the stable formation, detection and decoding of data, which ensures image restoration under external influences. The **tasks** are: analysis of the advantages and disadvantages of the existing augmented reality markers, the formulation of the basic requirements for the augmented reality marker, the study of a system of models and methods for the stable formation, detection and decoding of data, which ensures image restoration under external influences. The **methods** used are: methods of digital image processing, probability theory, mathematical statistics, cryptography and information protection, the mathematical apparatus of matrix theory. The following **results** are obtained. The advantages and disadvantages of the main existing types of markers of augmented reality are determined. Five requirements are formulated that augmented reality markers must satisfy. A system of models and methods for the stable formation, detection and decoding of data is proposed, which ensures image restoration under external influences. **Conclusions.** The directions of further research are the development of a method for the formation of a stable marker of augmented reality; development of a method for identifying a stable mosaic stochastic marker of augmented reality; development of a decoding method for a mosaic stochastic augmented reality marker; development of a method for designing virtual objects on the plane of the augmented reality marker; development of information technology for using mosaic stochastic markers in augmented reality systems.

Keywords: marker, code, augmented reality, virtual reality, models, methods, requirements, robustness, identification, decoding.