

УДК 004.932

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.055>

О. М. МАКОВЕЙЧУК

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІЗУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СТРУКТУР ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Предметом дослідження в статті є інформаційна технологія побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. **Мета** роботи – розробка інформаційної технології побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. В статті вирішуються наступні **завдання**: аналіз основних типів візуальних маркерів доповненої реальності (AR-маркерів); формулювання основних вимог до візуальних інформаційних структур доповненої реальності; розробка моделі візуальної інформаційної структури доповненої реальності; розробка моделі стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності; розробка інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності; аналіз результатів застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності; оцінка ефективності застосування основних типів візуальних маркерів доповненої реальності. Використовуються такі **методи**: методи цифрової обробки зображень, теорії ймовірності, математичної статистики, криптографії та захисту інформації, математичний апарат теорії матриць. Отримано наступні **результати**: проведено аналіз основних типів візуальних маркерів доповненої реальності; сформульовано основні вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності; розроблена модель візуальної інформаційної структури доповненої реальності, яка є результатом послідовного виконання таких операцій: введення надлишковості, проведення стохастичного перепорядкування даних, додавання мозаїчного біт-контейнера; розроблена модель стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності у вигляді таких процедур: оператор введення надлишковості реалізований у вигляді процедури масштабування бінарного зображення-повідомлення у задане число разів методом найближчого сусіда, оператор стохастичного перепорядкування даних реалізований у вигляді процедури перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки, оператор додавання мозаїчного біт-контейнера реалізований у вигляді процедури кодування кольором клітинок маркера, які розділяються рамкою з проміжним кольором; розроблена інформаційна технологія побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності; проведено аналіз результатів застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності та оцінка ефективності застосування основних типів візуальних маркерів доповненої реальності. **Висновки**: проведено опис інформаційної технології побудови та використання інформаційних структур доповненої реальності на основі систематизації її науково-прикладних основ. Показано її практичне функціонування на прикладі розробленого стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. Подальші дослідження рекомендовано продовжити у напрямку узагальнення розроблених моделей і методів побудови і використання мозаїчних стохастичних маркерів, в яких, на відміну від розглянутих бінарних, будуть використовуватися зображення-повідомлення у градаціях сірого та кольорові. Оскільки прототипування запропонованих алгоритмів проводилося в системі програмування MATLAB, то для побудови працюючого прототипу, пропонується у подальшому перейти до мови програмування C++, що дозволить імплементувати запропоновану інформаційну технологію у вигляді бібліотек для використання на мобільних платформах Android та iOS.

Ключові слова: інформаційна технологія; візуальна інформаційна структура; мозаїчний маркер; доповнена реальність.

Вступ

Згідно прогнозів банку Goldman Sachs [1] та інших (див., наприклад, [2]–[3]) 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.

Для отримання додаткової інформації про довільні об'єкти у переважній більшості випадків будуть використовуватися маркерні системи доповненої реальності.

Існуючі візуальні маркери доповненої реальності (окрім штрих-кодових маркерів) не містять в собі додаткового інформаційного повідомлення і використовуються тільки для визначення просторового положення камери, що суттєво зужує область їх застосування [4]–[5]. Тому є сенс ввести поняття візуальної інформаційної структури (BIC) доповненої реальності, що узагальнює поняття

AR-маркера і відрізняється від нього наявністю закодованого повідомлення.

Аналіз проблеми та існуючих методів

Основні типи візуальних маркерів доповненої реальності (AR-маркерів) описано у роботах [4]–[6]:

- шаблонні маркери (template markers) – чорно-білі маркери, які мають просте зображення всередині чорної рамки (рис. 1, а) [7];

- 2D штрих-кодові маркери (barcode markers) – маркери, що складаються з чорно-білих клітинок, які по-бітово кодують дані, і, іноді, рамки або області синхронізації. Найчастіше в якості штрих-кодових AR-маркерів використовують QR-коди (рис. 1, б) [8];

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

- маркери-зображення (image markers) – в якості маркерів використовуються звичайні зображення, як кольорові, так і зображення в градаціях сірого (рис. 1, г). Вони можуть містити рамку або інші орієнтири для виявлення та знаходження положення.

Такі маркери-зображення зазвичай ідентифікуються за допомогою пошуку по шаблону або по особливостях

зображення [9]–[11].



Рис. 1. Основні типи AR-маркерів: а) шаблонні маркери; б) штрих-кодові маркери; в) колові маркери; г) маркери-зображення

В роботі [12] запропоновано модель стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, що є частковим випадком ВІС і задовольняє всім вказаним вимогам (рис. 2), у [13] подано науково-прикладні основи побудови і використання таких маркерів.



Рис. 2. Стійкий мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності

Тим не менш, на даний момент немає систематизованого викладу інформаційної технології побудови та використання ВІС доповненої реальності.

Метою даної статті є розробка інформаційної технології побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності.

Вирішення завдання

В [13] розроблені науково-прикладні основи побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності на прикладі стійких маркерів доповненої реальності (рис. 3).

Сформулюємо основні вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності:

1) помітність: ВІС повинні легко і швидко знаходитися у відео-потоці; дана вимога дозволяє врахувати асинхронну багатозадачність – властивість операційної системи пристрою, на якому інстальовано додаток доповненої реальності, забезпечувати можливість паралельної (або псевдопаралельною) обробки декількох процесів; при цьому процес виявлення кандидатів ВІС виконується постійно, отже він повинен використовувати мінімальну кількість обчислювальних ресурсів і виконуватися з частотою, що співмірна частоті отримання кадрів відео-потoku (а в ідеалі дорівнює їй); вимога помітності мінімізує кількість помилок II роду – у даному випадку пропуск кадра, на якому присутні ВІС;

2) простота: ВІС повинні бути побудовані з використанням мінімальної кількості кольорів (або градацій сірого); дана вимога тісно пов'язана з вимогами помітності та універсальності (див. нижче), оскільки мінімальна кількість кольорів дозволяє спростити і уніфікувати алгоритми виявлення, при виконанні вимоги простоти ВІС буде суттєво відрізнятися від фону; окрім того, при створенні ВІС суттєво зменшуються вимоги по точності відтворення кольорів, що здешевлює процес;

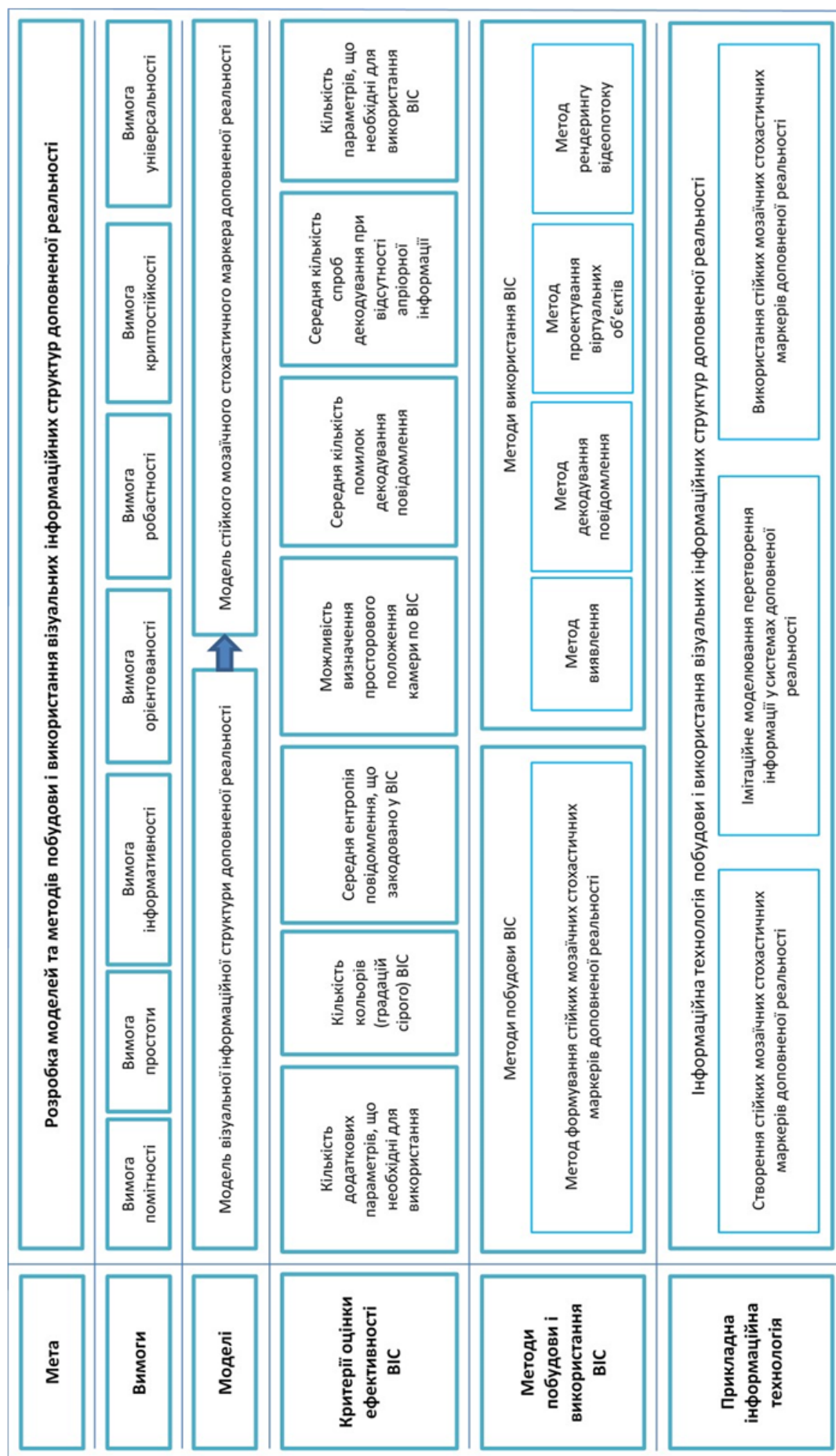


Рис. 3. Науково-прикладні основи побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності на прикладі стійких маркерів доповненої реальності

3) інформативність: ВІС повинні містити додаткову інформацію (повідомлення); дана вимога – основна, яка відрізняє ВІС від існуючих типів візуальних маркерів доповненої реальності; наявність додаткової інформації дозволяє суттєвим чином розширити сферу застосування ВІС, в першу чергу завдяки розширенню інтерактивності і універсальності застосувань; ВІС, будучи узагальненням і візуальних маркерів, і матричних кодів, можуть застосовуватися, як в системах доповненої реальності, так і в системах, де традиційно використовуються матричні коди (двовимірні штрих-коди або QR-коди), що призводить до повної інтеграції цих технологій;

4) орієнтованість: ВІС повинні дозволяти визначати положення камери в момент отримання кожного кадру, де виявлено ВІС; дана вимога є основою для тривимірного представлення об'єктів в процесі комбінування реального та віртуального світу, що є ключовими ознаками доповненої реальності; з урахуванням вимоги універсальності (див. нижче) поняття орієнтованості слід розуміти розширено – ВІС повинні дозволяти проводити внутрішнє калібрування камери по самому зображенню ВІС; таким чином, орієнтованість означає можливість визначення, як зовнішніх, так і внутрішніх параметрів калібрування; дана вимога дозволяє розширити можливу область застосування ВІС для їх використання як калібраційних маркерів; зауважимо, що традиційні візуальні маркери дозволяють визначати тільки матрицю зовнішнього калібрування (розташування камери у просторі), що призводить до використання спрощених алгоритмів тривимірного представлення об'єктів і це представлення не є фізично точним;

5) робастність: ВІС повинні задовольняти вимоги інформативності та робастності при втраті до 50% інформації про ВІС (наприклад, при закритті зображення ВІС завадою чи фізичній відсутності будь-якої частини ВІС); дана вимога дозволяє масово використовувати інформаційні технології на основі ВІС на практично всіх мобільних пристроях, що вийшли на ринок за останні 2-3 роки; дана вимога дозволяє з меншими затратами задовольнити вимогу помітності і проводити обробку ВІС, оскільки дозволяє спростити алгоритми обробки за рахунок втрати частини інформації;

6) криптостійкість: повідомлення, що закодоване у ВІС повинно бути стійким до криптоатак; дана вимога дозволяє ширше використовувати ВІС у військовій, медичній та інших галузях, де необхідно забезпечити конфіденційність даних; зауважимо, що для матричних кодів (двовимірних штрих-кодів або QR-кодів) дана вимога не висувається;

7) універсальність: технології обробки ВІС повинні використовувати мінімум апріорної інформації; дана вимога розуміється перш за все, як незалежність алгоритмів від даних – при переході до кожної конкретної реалізації ВІС (наприклад, у вигляді стійкого мозаїчного візуального маркера), реалізація основних методів виявлення ВІС, декодування повідомлення, тривимірного

представлення об'єктів та інших повинна залишатися без змін (з точністю до заміни набору констант).

Модель візуальної інформаційної структури може бути представлена як результат послідовного виконання таких операцій:

1) введення надлишковості:

$$f = \hat{S}f_0, \quad (1)$$

де f_0 – зображення-повідомлення; f – зображення із надлишковістю; $\hat{S}$ – оператор введення надлишковості;

2) проведення стохастичного перевпорядкування даних:

$$g = \hat{P}f, \quad (2)$$

де g – перевпорядковане зображення; $\hat{P}$ – оператор стохастичного перевпорядкування;

3) додавання мозаїчного біт-контейнера:

$$\gamma = \hat{B}g, \quad (3)$$

де γ – зображення мозаїчного стохастичного маркера; $\hat{B}$ – оператор контейнеризації даних.

Отже, в операторній формі у загальному вигляді дана модель може бути представлена як

$$\gamma = \hat{B}\hat{P}\hat{S}f_0, \quad (4)$$

де використано позначення, що введені вище.

Модель стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності (див. рис. 2) отримується як конкретна реалізація ВІС доповненої реальності, для чого в роботі [5] запропоновано реалізувати оператори (1)–(3) у вигляді таких процедур:

1. Оператор введення надлишковості $\hat{S}$ пропонується реалізувати у вигляді процедури масштабування бінарного зображення-повідомлення (рис. 4, а) у задане число разів k методом найближчого сусіда, що можна формалізувати у вигляді (рис. 4, б):

$$f^{(m,n)}(i,j) = f_0(m,n), \quad (5)$$

де, як і раніше, f_0 – зображення-повідомлення; f – блочно-збільшене зображення; (m,n) – координати пікселів у зображенні-повідомленні і, відповідно, блоків у збільшеному зображенні; $(i,j) = 0..k-1$ – координати пікселів в межах кожного блоку. Теоретична оцінка допустимого розміру блоку k отримується на основі аналізу умови робастності.

2. Оператор стохастичного перевпорядкування даних $\hat{P}$ пропонується реалізувати у вигляді процедури перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки p , що можна записати у вигляді (рис. 4, в):

$$g^{(m',n')} = f^{(m',n')}[p], \quad (6)$$

де g – блочно-пермutedоване зображення; індекси (m',n') , нумерують блоки.

Зауважимо, що розмір блоку перемішування b у загальному випадку не співпадає з k . Теоретична оцінка допустимого розміру блоку перемішування b отримується на основі аналізу умови криптостійкості.

$$\gamma^{(m'',n'')}(i,j) = \begin{cases} c_1 g(m'',n'') + c_0 (1 - g(m'',n'')), & a_1 < (i,j) < a_0 - a_1 \\ c_2, & (i,j) \leq a_1, (i,j) \geq a_0 - a_1 \end{cases}, \quad (7)$$

де (m'',n'') – координати пікселів у пермutedованому зображенні g і, відповідно, блоків у зображенні маркера γ ; $(i,j) = 0..a_0 - 1$ – координати пікселів в межах кожного блоку; a_0 – розмір клітинки; a_1 –

3. Оператор додавання мозаїчного біт-контейнера $\hat{B}$ пропонується реалізувати у вигляді процедури кодування кольором клітинок маркера, які розділяються рамкою з проміжним кольором. Зображення g є бінарним, кожен піксель його піксель приймає значення 0 і 1, які кодуються кольорами клітинок маркера c_0 і c_1 відповідно; клітинки розділяються рамкою з проміжним кольором c_2 , що можна записати у вигляді (рис. 4, г):

розмір рамки. Теоретична оцінка значень кольорів c отримується на основі аналізу умови простоти.

Основні критерії оцінки ефективності BIC доповненої реальності наведено у табл. 1.

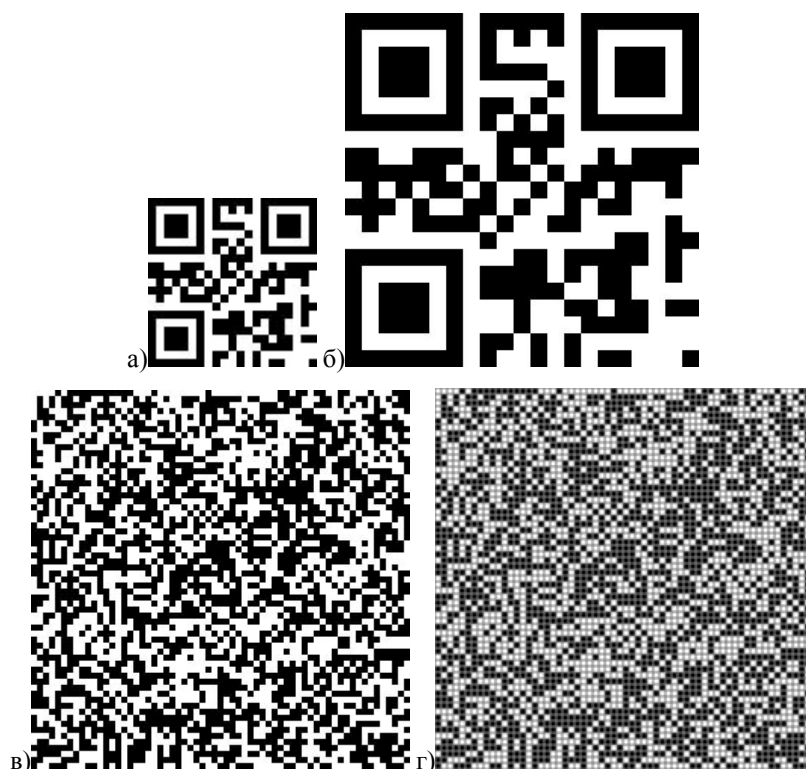


Рис. 4. Результати основних процедур методу формування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності: а) зображення-повідомлення (QR-код розміром $N = 21$, в якому закодовано повідомлення "Hello, world!"); б) попереднє зображення, збільшене в $k = 3$ рази; в) пермutedоване зображення; г) зображення AR-маркера

Таблиця 1. Критерії оцінки показників ефективності

Показник	Критерій оцінки
Помітність	Середній час детекції тестових BIC в однакових умовах спостереження, сек
Простота	Кількість кольорів (градацій сірого), число
Інформативність	Середня ентропія повідомлення, що закодовано у BIC, біт
Орієнтованість	Можливість визначення просторового положення камери, так/ні
Робастність	Середня кількість помилок декодування повідомлення (в залежності від типу і рівня помилок), число
Криптостійкість	Середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апіорної інформації, число
Універсальність	Кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання BIC, число

В IDEF0-нотації *основний процес методу формування BIC доповненої реальності* на вході має текстове повідомлення (зазвичай представляє собою url-посилання на інформаційний ресурс); управління представляє собою вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності; механізмами є сам користувач, генератор QR-кодів (або інший кодер, що перетворює повідомлення у зображення), система програмування MATLAB [14], що використовується

для прототипування функцій і процедур методу, а також спеціалізовані модулі MATLAB, такі як Statistics and Machine Learning Toolbox [15], Image Processing Toolbox [16], Computer Vision Toolbox [17]; на виході маємо зображення мозаїчного стохастичного AR-маркера.

Основний процес методу формування BIC (на прикладі формування мозаїчного стохастичного AR-маркера) наведено на рис. 5, декомпозиція основного процесу – на рис. 6.

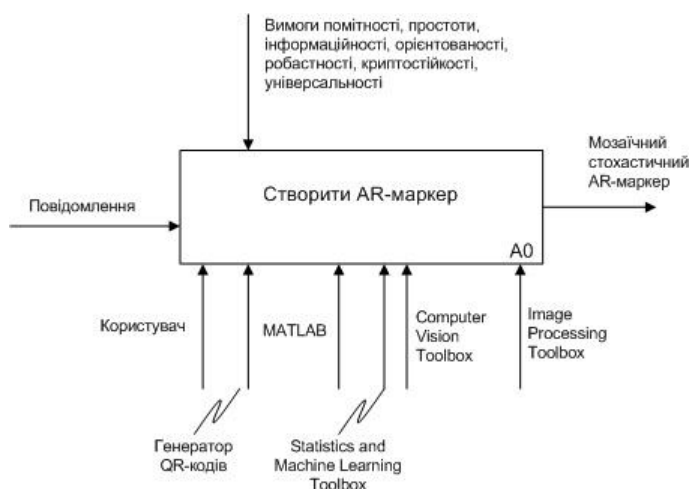


Рис. 5. Основний процес методу формування маркера

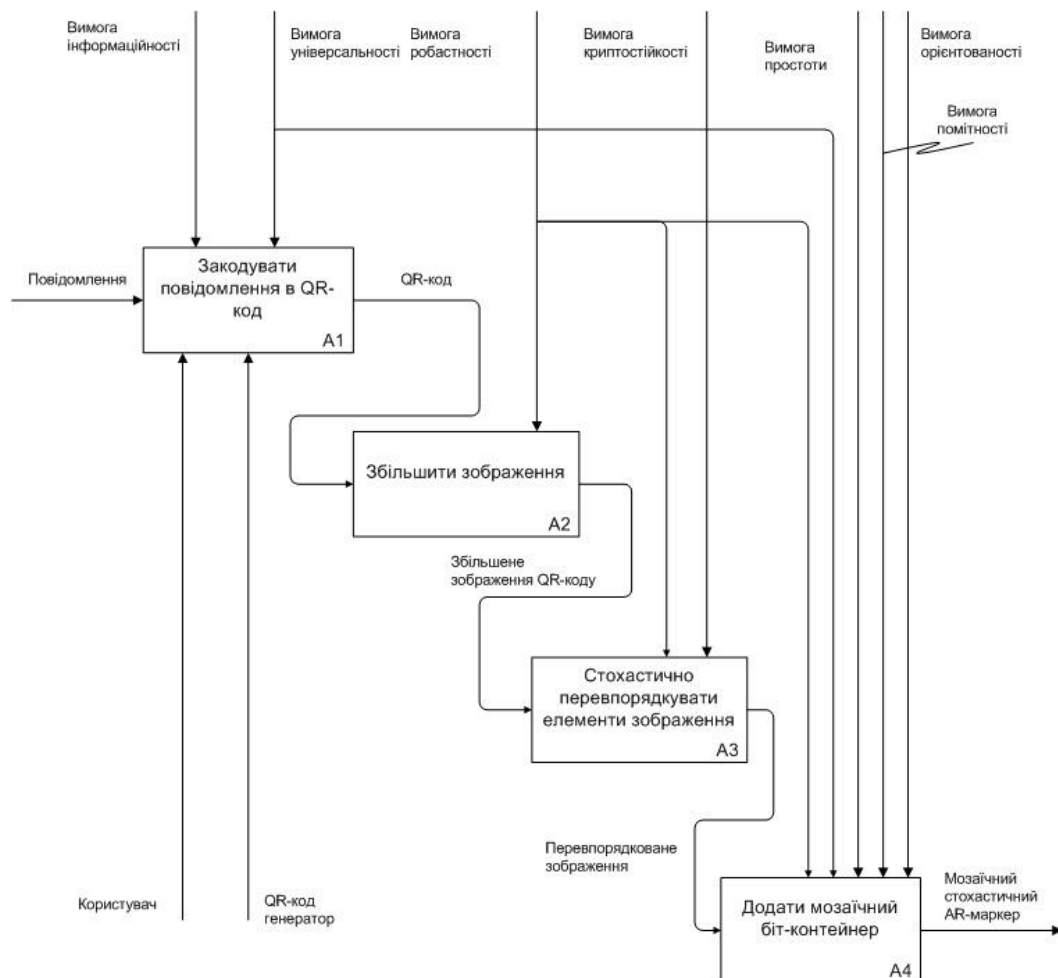


Рис. 6. Декомпозиція основного процесу методу формування маркера

Декомпозиція основного процесу проводиться на 4 підпроцеси:

1) закодувати повідомлення у QR-код:

- вхід – повідомлення;
- вихід – зображення-повідомлення (QR-код у даному випадку);

- управління – вимоги інформативності та робастності;

- механізми – користувач і генератор QR-кодів;

2) збільшити зображення:

- вхід – зображення-повідомлення;

- вихід – збільшене зображення;

- управління – вимога робастності;

- механізми – система програмування MATLAB, спеціалізований модуль Image Processing Toolbox;

3) стохастично перевпорядкувати елементи зображення:

- вхід – збільшене зображення;

- вихід – перевпорядковане зображення;

- управління – вимоги робастності та криптостійкості;

- механізми – система програмування MATLAB, спеціалізований модуль Statistics and Machine Learning Toolbox;

4) додати мозаїчний біт-контейнер:

- вхід – перевпорядковане зображення;

- вихід – зображення мозаїчного стохастичного AR-маркера;

- управління – вимоги помітності, простоти, орієнтованості, робастності та універсальності;

- механізми – система програмування MATLAB, спеціалізовані модулі Image Processing Toolbox та Computer Vision Toolbox.

Розглянемо в IDEF0-нотації основний процес використання BIC (на прикладі мозаїчного стохастичного візуального маркера) доповненої реальності (рис. 7).

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.



Рис. 7. Основний процес використання мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

Управління представляє собою набір вимог до BIC (вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності); специфікації смартфона; математичні і чисельні методи (методи дискретної математики, методи оптимізації, описативна статистика, аналітична геометрія, лінійна алгебра, гомографія, математична морфологія, методи бінарзації, методи сегментації).

Механізмами є сам користувач, смартфон (чи будь-яка інша система, що дозволяє отримати фото), 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 проєктується на площину AR-маркера, процес рендерингу відео-потoku в області AR-маркера.

Декомпозиція основного процесу використання проводиться на 2 підпроцеси 1 рівня (рис. 8):

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,

крипостійкості 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 проєктується 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).

Результати застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності наведено на рис. 9.

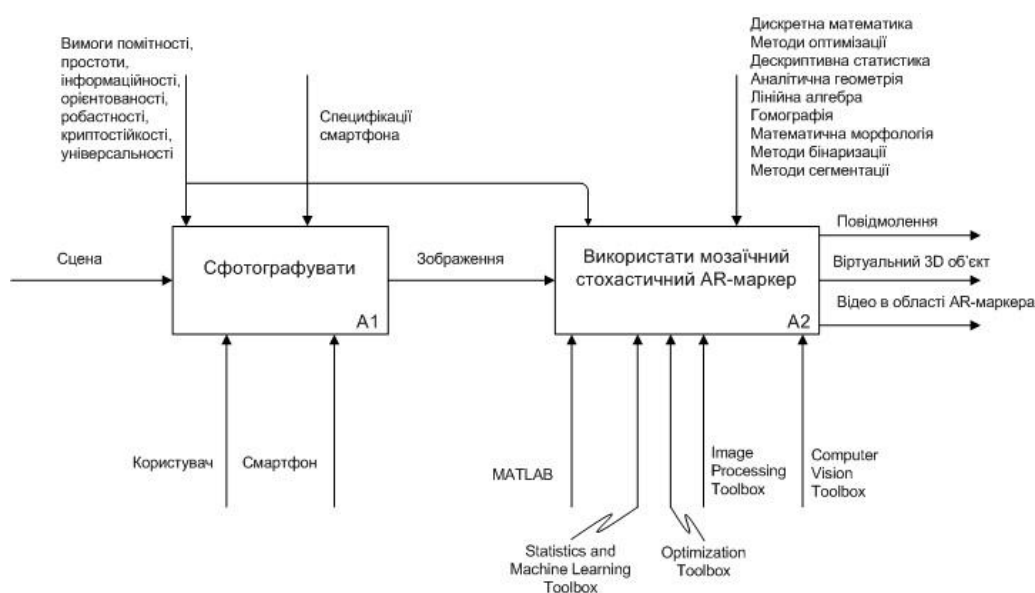


Рис. 8. Декомпозиція основного процесу застосування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

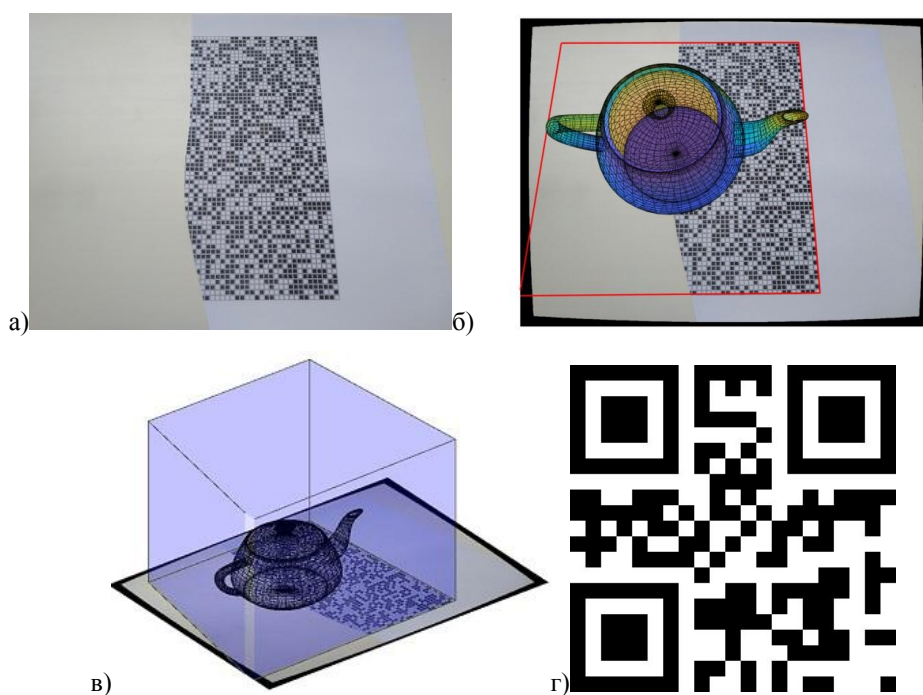


Рис. 9. Приклад використання мозаїчного стохастичного AR-маркера: а) вихідне зображення; б) точний метод проєктування віртуального 3d об'єкту в область маркера; в) спрощений метод проєктування віртуального 3d об'єкту в область маркера; г) декодоване зображення-повідомлення

В якості критерію оцінки такого показника, як робастність, запропоновано використовувати кількість помилково декодованих бітів повідомлення n_e .

Порахуємо спочатку імовірність правильної відновлюваності повідомлення при неправильному розпізнаванні (інверсії) частини бітів. Нехай імовірність інверсії бітів є q . Як було вказано вище, кожен біт дублюється k^2 разів (матрицею $k \times k$). Клітинка відновиться правильно за умови, що кількість правильно розпізнаних бітів є більшою за

кількість інвертованих. Імовірність такої події $p_1(q)$ задається кумулятивним біноміальним розподілом:

$$p_1(q) = 1 - \sum_{i=0}^{\frac{k^2}{2}} \binom{k^2}{i} q^i (1-q)^{k^2-i}. \quad (8)$$

Графік теоретично розрахованої імовірності відновлення даних в залежності від імовірності інверсії бітів показано на рис. 10.

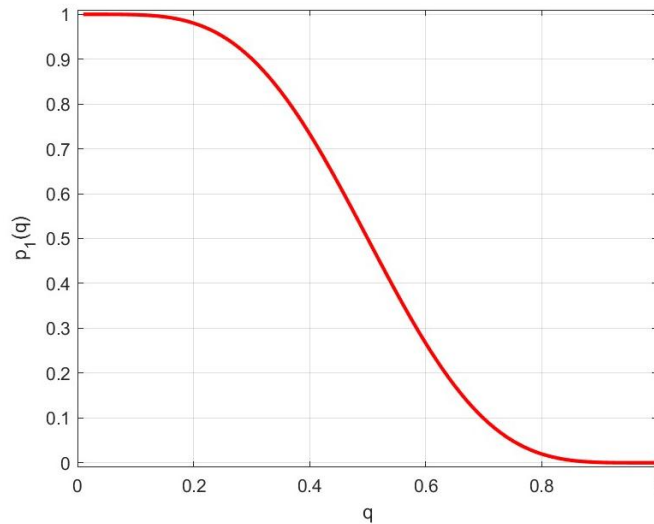


Рис. 10. Графік теоретично розрахованої за виразом (8) імовірності відновлення даних в залежності від імовірності інверсії бітів

Знайдемо тепер умову правильної відновлюваності повідомлення при втраті частини зображення, при цьому вважається, що всі розпізнані біти були розпізнані правильно, тобто похибка виникає тільки внаслідок втрати частини бітів. Нехай імовірність втрати біта є q , при цьому, як було вказано вище, кожен піксель ми дублювали k^2 разів. Клітинка відновиться правильно за умови, що в її межах знайдеться хоча б один правильно знайдений

біт, імовірність такої події $p_2(q)$ легко розраховується:

$$p_2(q) = 1 - q^{k^2}. \quad (9)$$

Графік теоретично розрахованої імовірності відновлення даних в залежності від імовірності пропуску бітів показано рис. 11.

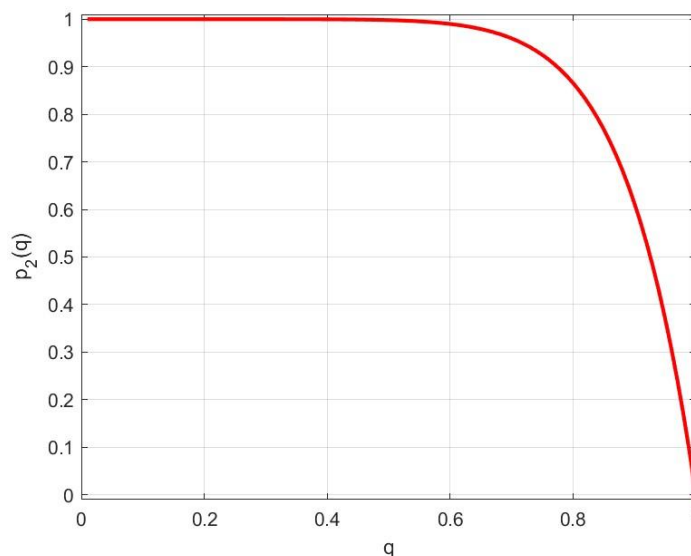


Рис. 11. Графік теоретично розрахованої за виразом (9) імовірності пропуску даних в залежності від імовірності інверсії бітів

Оскільки обидві події (інверсія біта чи його втрата) є незалежними, то загальна імовірність правильного розпізнавання p буде даватися добутком

$$p(q_1, q_2) = p_1(q_1) \cdot p_2(q_2). \quad (10)$$

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

$$n_e = (1-p)N^2, \quad (11)$$

а умова правильного розпізнавання QR-коду запишеться як

$$n_e \leq 1 \quad (12)$$

(вважатимемо, що за рахунок певної надлишковості QR-коду, допускається 1 нерозпізнана клітинка, на практиці надлишковість забезпечується використанням кодів Ріда-Соломона [18] і він розпізнається правильно за відсутності більше ніж 1 клітинки).

Таким чином, отримуємо умову правильного розпізнавання:

$$p > 1 - \frac{1}{N^2}. \quad (13)$$

На рис. 12 зображено область допустимих значень імовірностей q_1 і q_2 при яких виконується умова (13).

Якщо враховувати тільки помилки, що виникають внаслідок втрати бітів, то нерівність (13), можна записати як

$$(1-q)^{k^2} N^2 \leq 1, \quad (14)$$

звідки знаходимо умову для визначення k :

$$k > \sqrt{-\frac{2 \ln N}{\ln(1-q)}} \quad (15)$$

(зауважимо при цьому, що підкореневий вираз буде додатнім, оскільки за визначенням $q < 1$, отже $\ln(1-q) < 0$).

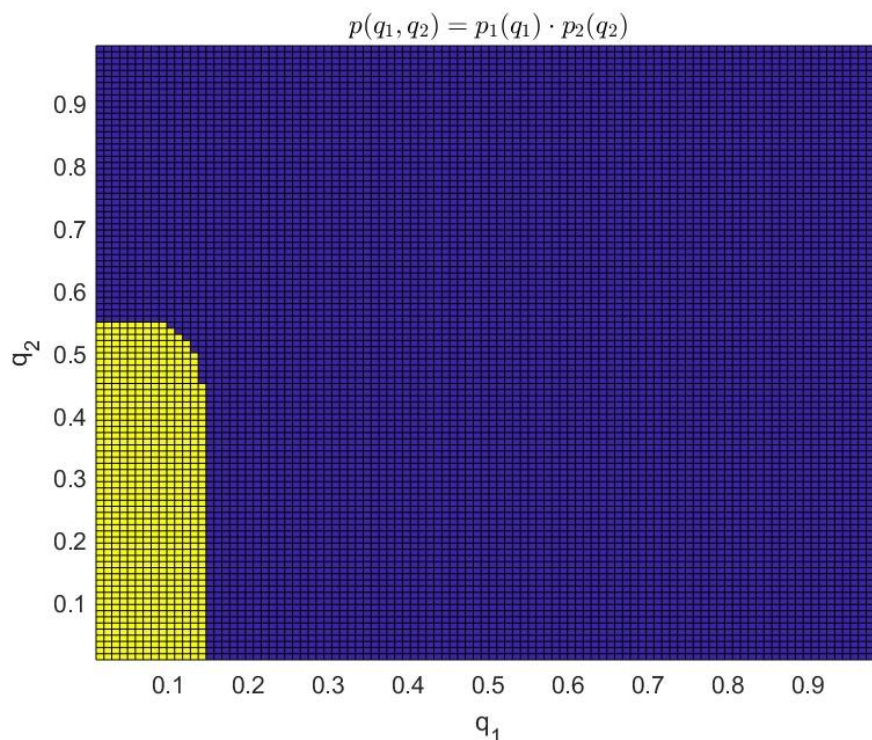


Рис. 12. Область допустимих значень імовірностей q_1 і q_2

Для QR-коду, як вже було вказано, мінімальне значення розміру $N = 21$ [18], при $q = 1/2$ (вимога робастності), отримуємо за формулою (2.16), що $k > 2.96$, отже мінімальне значення $k = 3$.

Таким чином, для запропонованої моделі мозаїчного стохастичного маркера теоретична оцінка кількості помилково декодованих бітів повідомлення $n_e < 1$ при імовірності втрати бітів повідомлення

$q \leq 1/2$ (значення коефіцієнта дублювання при цьому $k^2 = 9$).

Порівняльні оцінки показників ефективності для основних типів візуальних AR-маркерів – розробленого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, а також шаблонного, колового, штрих-кодового (QR-код) маркерів і маркера-зображення, зведено у табл. 2.

Таблиця 2. Порівняльні оцінки показників ефективності

Показник	Теоретична оцінка	Експериментальна оцінка				
		мозаїчний стохастичний AR-маркер	шаблонний AR-маркер	коловий AR-маркер	штрих-кодовий AR-маркер	AR-маркер-зображення
Помітність, τ_D	<1/30 сек	<1/30 сек	<1/30 сек	<1/30 сек	<3/30 сек	<5/30 сек
Простота, n_c	3 бінарне з проміжним кольором	3 бінарне з проміжним кольором	2 бінарне	2 бінарне	2 бінарне	3x256 кольорове
Інформативність, e_m	$1/k^2$	1/9	0	~0	~1/2	0
Орієнтованість	+	+	+	+	+	+
Робастність, n_e	$n_e < 1$	~0	-	-	~2-3	-
Криптостійкість, n_p	$n_p = (b^2)!$	$n_p \sim 64!$	-	-	-	-
Універсальність	~1	~1	~1	~1	~10	~100

Примітка 1. Оцінка помітності (як середній час детектування тестових ВІС в однакових умовах спостереження, сек) знаходилася для смартфона Nokia 6 Plus (операційна система Android 9), при створенні тестової аплікації використовувалась бібліотека обробки зображень OpenCV 4.1.1 [19].

Примітка 2. Оцінка інформативності QR-коду залежить від заданого рівня надлишковості, що використовується при його створенні і площі синхронізаційних областей, які не використовуються при кодуванні повідомлення.

Примітка 3. Всі оцінки інформативності і робастності розраховувались для значення коефіцієнта масштабування $k=3$, при якому, як показано в [13], для мозаїчних стохастичних AR-маркерів повідомлення гарантовано відновлюється при втраті до 1/2 площі маркера.

Примітка 4. Оцінка криптостійкості для розміру блоку пермутації b буде $n_p = (b^2)!$, якщо виконується умова [20]:

$$b > r_p = \frac{D(f)}{\frac{1}{4}|\nabla f|^2}, \quad (16)$$

де введено пермутаційний радіус r_p ; $D(f)$ – дисперсія зображення f ; ∇f – градієнт зображення f . Якщо умова (16) не виконується, то $n_p \sim \log(b^2)!$. Для типових бінарних зображень значення $r_p \sim 1$, а процедура масштабування методом найближчого сусіда збільшує пермутаційний радіус у k разів (див. [20], [21]), отже $r_p \sim k$. Для значення $k=3$ і типового

значення розміру блоку пермутації $b=8$ умова (16) очевидно виконується.

Таким чином, основними складовими інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності є методи створення і використання стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності та методи імітаційного моделювання перетворення інформації у системах доповненої реальності.

Висновки

У роботі проведено опис інформаційної технології побудови та використання інформаційних структур доповненої реальності на основі систематизації її науково-прикладних основ. Показано її практичне функціонування на прикладі розробленого стійкого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності.

Подальші дослідження рекомендовано продовжити у напрямку узагальнення розроблених моделей і методів побудови і використання мозаїчних стохастичних маркерів, в яких, на відміну від розглянутих бінарних, будуть використовуватися зображення-повідомлення у градієнтах сірого та кольорові.

Оскільки прототипування запропонованих алгоритмів проводилося в системі програмування MATLAB, то для побудови працюючого прототипу, пропонується у подальшому перейти до мови програмування C++, що дозволить імплементувати запропоновану інформаційну технологію у вигляді бібліотек для використання на мобільних платформах Android та iOS.

Список літератури

1. Goldman Sachs. Global Investment Research, 2019 : Веб-сайт. URL: <https://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research/> (дата звернення: 30.11.2019).

2. Top VR Trends in 2019 : Веб-сайт. URL: <https://xd.adobe.com/ideas/principles/emerging-technology/10-vr-trends-well-see-2019/> (дата звернення: 25.10.2019).
3. Facebook Research. AR/VR-Facebook Research. 2019 : Веб-сайт. URL: <https://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality> (дата звернення: 25.11.2019).
4. Siltanen S. Theory and applications of marker-based augmented reality. VTT Science 3. Espoo, 2012. 198 p. + app. 43 p.
5. Лямов Ю. О. Технология дополненной реальности. *Современная техника и технологии*. 2014. № 9 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/09/4567> (дата обращения: 07.02.2019).
6. AR–Дополненная Реальность (статья плюс ролик) : Веб-сайт. URL: <https://habr.com/ru/post/419437/> (дата звернення: 25.11.2019).
7. Xiang Zhang, Stephan Fronz, Nassir Navab. Visual Marker Detection and Decoding in AR Systems: A Comparative Study. Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality. 2002. P. 1–7.
8. Kei Otsuka (2019). QR Code reader example. MATLAB Central File Exchange : Веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71090-qr-code-reader-example> (дата звернення: 13.09.2019)
9. Object Detection in a Cluttered Scene Using Point Feature Matching : Веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/examples/object-detection-in-a-cluttered-scene-using-point-feature-matching.html> (дата звернення: 25.11.2019).
10. Bolohova N., Ruban I. Image processing models and methods research and ways of improving marker recognition technologies in added reality systems. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. No.1 (7). P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.025>
11. Daniel J. Thomas Augmented reality in surgery: The Computer-Aided Medicine revolution. *International Journal of Surgery*. 36 (Pt A): 25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2016.10.003>. ISSN 1743-9159. PMID 27741424
12. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3. № 3. С. 43–48.
13. Маковейчук О. М. Науково-прикладні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 6 (44). С. 133–137.
14. MATLAB : Веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата звернення: 25.11.2019).
15. Statistics and Machine Learning Toolbox : Веб-сайт. URL : <https://www.mathworks.com/products/statistics.html> (дата звернення: 25.11.2019).
16. Image Processing Toolbox : Веб-сайт. URL : <https://www.mathworks.com/products/image.html> (дата звернення: 25.11.2019).
17. Computer Vision Toolbox : Веб-сайт. URL : <https://www.mathworks.com/products/computer-vision.html> (дата звернення: 25.11.2019).
18. QR Code features. Denso-Wave. Archived from the original on 29 January 2013. : Веб-сайт. URL : <https://web.archive.org/web/20130129064920/http://www.qrcode.com/en/qrfeature.html> (дата звернення: 25.11.2019).
19. OpenCV 4.1.1 : Веб-сайт. URL : <https://opencv.org/opencv-4-1-1/> (дата звернення: 25.11.2019).
20. Маковейчук О. М., Рубан І. В., Худов Г. В. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56). С. 72–81.
21. Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. (ред.). Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М. : Физматлит, 2009. 556 с. ISBN: 978-5-9221-1168-3.

References

1. Goldman Sachs, "Global Investment Research", available at : <https://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research/> (last accessed 30.11.2019).
2. "Top VR Trends in 2019", available at : <https://xd.adobe.com/ideas/principles/emerging-technology/10-vr-trends-well-see-2019/> (last accessed 25.10.2019).
3. "Facebook Research. AR/VR-Facebook Research", available at : <https://research.fb.com/category/augmented-reality-virtual-reality> (last accessed 25.11.2019).
4. Siltanen, S. (2012), *Theory and applications of marker-based augmented reality*, VTT Science 3, Espoo, 198 p. + app. 43 p.
5. Lyamov, Yu. O. (2014), "Augmented Reality Technology" ["Tehnologiya dopolnennoj realnosti"], *Sovremennaya tehnika i tehnologii*, No. 9, available at : <http://technology.snauka.ru/2014/09/4567> (last accessed 07.02.2019).
6. "AR–Dopolennaya Realnost", available at : <https://habr.com/ru/post/419437/> (last accessed 25.11.2019).
7. Zhang, X., Fronz, S., Navab, N. (2002), "Visual Marker Detection and Decoding in AR Systems: A Comparative Study", *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, P. 1–7.
8. Otsuka, K., "QR Code reader example. MATLAB Central File Exchange", available at : <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71090-qr-code-reader-example> (last accessed 13.09.2019).
9. "Object Detection in a Cluttered Scene Using Point Feature Matching", available at : <https://www.mathworks.com/help/vision/examples/object-detection-in-a-cluttered-scene-using-point-feature-matching.html> (last accessed 25.11.2019).
10. Bolohova N., Ruban I. (2019), "Image processing models and methods research and ways of improving marker recognition technologies in added reality systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No.1 (7), P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.025>
11. Thomas, Daniel J. (2016), "Augmented reality in surgery: The Computer-Aided Medicine revolution", *International Journal of Surgery*, 36 (Pt A): 25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2016.10.003>
12. Makoveychuk, O. (2019), "A new type of augmented reality markers" ["Novij tip markeriv dopovnenoyi realnosti"], *Advanced Information Systems*, No. 3 (3), P. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.06>
13. Makoveychuk, O. (2019), "Scientific and applied basics of building sustainable augmented reality markers" ["Naukovo-prikladni osnovi pobudovi stijkih markeriv dopovnenoyi realnosti"], *Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku*, No. 6 (44), P. 133–137.
14. "MATLAB", available at : <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (last accessed 25.11.2019).
15. "Statistics and Machine Learning Toolbox", available at : <https://www.mathworks.com/products/statistics.html> (last accessed 25.11.2019).

16. "Image Processing Toolbox", available at : <https://www.mathworks.com/products/image.html> (last accessed 25.11.2019).
17. "Computer Vision Toolbox", available at : <https://www.mathworks.com/products/computer-vision.html> (last accessed 25.11.2019).
18. "OpenCV 4.1.1", available at : <https://opencv.org/opencv-4-1-1/> (last accessed 25.11.2019).
19. "QR Code features". Denso-Wave. Archived from the original on 29 January 2013. available at : <https://web.archive.org/web/20130129064920/http://www.qrfeature.com/en/qrfeature.html> (last accessed 25.11.2019).
20. Makovychuk, O., Ruban, I., Hudov, G. (2019), "Using genetic algorithms to find inverse pseudo-random block permutations" ["Vikoristannya genetichnih algoritmov dlya znahodzhennya inversnih psevdovipadkovih blochnih perestanovok"], *Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku*, No. 4 (56), P. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.4.072>
21. Krasilshikov, M. N., Sebyakov, G. G. (2009), *Modern information technologies in the problems of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft* [Sovremennye informacionnye tehnologii v zadachah navigacii i navedeniya bespilotnyh manevrennyh letatelnyh apparatov], Fizmatlit, Moscow, 556 p.

Надійшла (Received) 30.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Маковейчук Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, докторант кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; email: omakovychuk@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4425-016X>.

Маковейчук Александр Николаевич – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, докторант кафедры электронных вычислительных машин, Харьков, Украина.

Makoveichuk Oleksandr – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Doctoral Student of Electronic Computers Department, Kharkiv, Ukraine.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИЗУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Предметом исследования в статье является информационная технология построения и использования визуальных информационных структур дополненной реальности. **Цель** работы – создание информационной технологии построения и использования визуальных информационных структур дополненной реальности. В статье решаются следующие **задачи**: анализ основных типов визуальных маркеров дополненной реальности (AR-маркеров); формулирование основных требований к визуальным информационным структурам дополненной реальности; разработка модели визуальной информационной структуры дополненной реальности; разработка модели устойчивого мозаичного стохастического маркера дополненной реальности; разработка информационной технологии построения и использования визуальных информационных структур дополненной реальности; анализ результатов применения мозаичного стохастического маркера дополненной реальности; оценка эффективности применения основных типов визуальных маркеров дополненной реальности. Используются следующие **методы**: методы цифровой обработки изображений, теории вероятности, математической статистики, криптографии и защиты информации, математический аппарат теории матриц. Получены следующие **результаты**: проведен анализ основных типов визуальных маркеров дополненной реальности; сформулированы основные требования к визуальным информационным структурам дополненной реальности; разработана модель визуальной информационной структуры дополненной реальности, которая является результатом последовательного выполнения следующих операций: введение избыточности, проведение стохастической реорганизации данных, добавление мозаичного бит-контейнера; разработана модель устойчивого мозаичного стохастического маркера дополненной реальности в виде следующих процедур: оператор ввода избыточности реализован в виде процедуры масштабирования бинарного изображения-сообщения в заданное число раз методом ближайшего соседа, оператор стохастического перепорядочивания данных реализован в виде процедуры перемешивания пикселей с помощью известной псевдослучайной перестановки, оператор добавления мозаичного бит-контейнера реализован в виде процедуры кодирования цвета клеток маркера, которые разделяются рамкой с промежуточным цветом; разработана информационная технология построения и использования визуальных информационных структур дополненной реальности; проведен анализ результатов применения мозаичного стохастического маркера дополненной реальности и оценка эффективности применения основных типов визуальных маркеров дополненной реальности. **Выводы**: проведено описание информационной технологии построения и использования информационных структур дополненной реальности на основе систематизации ее научно-прикладных основ. Показано ее практическое функционирование на примере разработанного устойчивого мозаичного стохастического маркера дополненной реальности. Дальнейшие исследования рекомендовано продолжить в направлении обобщения разработанных моделей и методов построения и использования мозаичных стохастических маркеров, в которых, в отличие от рассмотренных бинарных, будут использоваться изображения-сообщения в градациях серого и цветные. Поскольку прототипирование предложенных алгоритмов проводилось в системе программирования MATLAB, то для построения работающего прототипа, предлагается в дальнейшем перейти к языку программирования C ++, что позволит имплементировать предложенную информационную технологию в виде библиотек для использования на мобильных платформах Android и iOS.

Ключевые слова: информационная технология; визуальная информационная структура; мозаичный маркер; дополненная реальность.

THE INFORMATIONAL TECHNOLOGY OF DESIGNING AND EMPLOYING VISUAL INFORMATION STRUCTURES OF AUGMENTED REALITY

The **subject** matter of the article is the informational technology of designing and using of augmented reality visual information structures. The **goal** of the study is to develop the informational technology of designing and using of augmented reality visual information structures. The following **tasks** were solved in the article: analysis of the main types of visual markers of augmented reality (AR-markers); formulation of the basic requirements for visual information structures of augmented reality; development of a model of the visual information structure of augmented reality; development of a model of a stable mosaic stochastic marker of augmented reality; development of information technology for the construction and use of visual information structures of augmented reality; analysis of the results of employing a mosaic stochastic marker of augmented reality; assessment of the effectiveness of the employing of the main types of visual markers of augmented reality. The following **methods** are used: methods of digital image processing, probability theory, mathematical statistics, cryptography and information protection, mathematical apparatus of matrix theory. The following **results** were obtained: the main types of visual markers of augmented reality were analyzed; the basic requirements for visual information structures of augmented reality are formulated; a model of the visual information structure of augmented reality was developed, the model is the result of the following operations: introducing redundancy, stochastic data reordering, adding a mosaic bit container; the model of a stable mosaic stochastic augmented reality marker has been developed, herewith the redundancy operator is implemented as a resizing message image using the nearest neighbor method, the stochastic data reordering operator is implemented as a pseudo-random pixel permutation, the operator of adding a mosaic bit-container is implemented as a procedure for bit coding by the color of marker cells, which are separated by a frame with an intermediate color; developed informational technology for the designing and employing of visual information structures of augmented reality; the results of employing a mosaic stochastic marker in comparison with other types of visual augmented reality markers were obtained. **Conclusions:** The description of information technology of construction and use of information structures of augmented reality is carried out on the basis of systematization of its scientific and applied bases. The practical functioning is shown on the example of the developed stable mosaic stochastic marker of augmented reality. Further study is recommended to be continued in the direction of generalization of the developed models and methods of construction and use of mosaic stochastic markers, which, unlike the binaries considered, will use image messages in grayscale and color. Since the prototyping of the proposed algorithms was carried out in the MATLAB programming system, it is proposed to move to the C ++ programming language to build a working prototype, which will allow the implementation of the proposed information technology in the form of libraries for use on Android and iOS mobile platforms.

Keywords: information technology; visual information structure; mosaic marker; augmented reality.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Маковейчук О. М. Інформаційна технологія побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 4 (10). С. 55–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.055>.

Makoveichuk, O. (2019), "The informational technology of designing and using of augmented reality visual information structures", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 55–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.055>.