

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

О.С. БЕЗПАЛЬКО

Анотація. Існують різні способи реалізації доповненої реальності. Найнадійнішим і найстабільнішим залишається маркерний спосіб. Зроблено спробу з'ясувати, яка з існуючих маркерних систем краща, точніша, надійніша, зручніша. Виконано порівняння існуючих маркерних систем, у яких використовуються візуальні маркери, що шифруються за допомогою площинних квадратів. Оцінку проведено на основі таких критеріїв, як зручність, ефективність, точність та надійність. Методики, які застосовувалися під час експериментів: визначення часу оброблення для виявлення та декодування маркера, точність визначення особливих точок, розпізнавання маркера у випадку проєктивних спотворень, розпізнавання декількох маркерів, розпізнавання з малою ділянкою маркера на зображенні, розпізнавання в умовах поганого фокуса зображення. Для порівняння використано чотири системи розпізнавання маркерів. Подано результати оцінювання як якісного, так і кількісного щодо зручності використання, ефективності, точності та надійності таких систем. Це забезпечує аналіз переваг та недоліків різних аспектів систем відстеження маркерів.

Ключові слова: доповнена реальність, маркери, швидкість розпізнавання.

ВСТУП

Мета дослідження — порівняння декількох маркерних систем, у яких використовуються візуальні маркери, що кодуються площинними квадратами. У роботі наводяться основні результати роботи, підсумовуються і викладаються передумови для майбутніх досліджень.

Візуальні маркери широко застосовують у додатках доповненої реальності (augmented reality, AR) [1–3]. У більшості таких додатків продуктивність системи AR залежить від системи відстеження для виявлення візуального маркера та оцінювання розташування. Натепер доступно більше ніж одна система відстеження на основі маркерів. Таким чином, користувачу бажано знати, яка система відстеження маркерів, імовірно, найкраща для конкретної програми AR.

Основні завдання, які були поставлені, полягають у поданні якісних і кількісних результатів оцінювання для таких властивостей, як зручність, ефективність, точність та надійність. Для конкретної програми AR існують різні вимоги до виявлення та відстеження маркерів. Тому метою цієї роботи є не тестування конкретної існуючої маркерної системи (як це, наприклад, показано у праці [4]), а намагання проаналізувати силу та слабкість різних аспектів різних систем відстеження маркерів та надати розробникам додатків AR цю інформацію.

Технологія доповненої реальності (AR) поєднує в собі віртуальний та реальний світи разом, щоб забезпечити глядачам розширений погляд на

навколишнє середовище. Завдяки прогресу досліджень, пов'язаних з AR, в останнє десятиліття, разом з прогресом комп'ютерного обладнання та програмного забезпечення, системам AR приділяють дедалі більше уваги в таких галузях, як промисловість, медицина, військова та розважальна сфери (наприклад, [1, 5]). Типова система AR містить дисплей та відстежувач (трекер) руху з відповідним програмним забезпеченням. Програмне забезпечення зчитує події відстеження для знаходження положення дисплея і надсилає віртуальний об'єкт. Щоб візуалізувати правильно, потрібно правильно розмежувати віртуальні об'єкти та реальний світ. Це розмежування передбачає, що положення віртуальної камери, де відбувається доповнення реальності, відоме стосовно реального світу.

Візуальні маркери широко використовуються в існуючих системах AR, наприклад, ArToolKit [1], CyberCode [6], ArLoc [7] та ін. Усі вони використовують системи, засновані на візуальних маркерах, для відстеження руху та оцінювання позиції. Продуктивність таких систем AR істотно залежить від продуктивності виявлення, декодування та оцінювання маркерів. Натепер є декілька систем відстеження маркерів. Залежно від конкретної програми існують різні функції відстеження та оцінювання. Наприклад, 3D-графічні об'єкти часто потрібно накладати в хорошому співвідношенні з реальним світом. Це потребує від трекера забезпечення дуже точного оцінювання позиції. У випадку, коли відображається лише текстова інформація, вимоги до точності виявлення не такі високі. У простих програмах кількох маркерів достатньо. У великих промислових програмах можуть бути потрібними сотні або тисячі однозначно кодованих маркерів. Бажано дозволити розробнику програми AR визначати маркерну систему найбільш доцільну для неї.

Попри те, що існують дослідження щодо відходу від маркерної технології (наприклад, [8], [9]), точність у цих дослідженнях є сумнівною, і тому сьогодні маркерна система залишається найбільш надійною.

У програмах AR найчастіше використовуються маркери зору квадратної форми імовірно тому, що квадратна форма передбачає щонайменше чотири компланарні точки для можливості калібрування камери з одним маркером на сцені. Круговий маркер, навпаки, може надати лише одну точкову відповідність, тобто центр, якщо тільки не використовується саме коло. Якщо використовується центр, щонайменше три кругові маркери з відомими тривимірними положеннями мають бути виконані в одному зображенні для оцінювання позиції відносно камери [10]. У цій роботі оцінна робота зосереджена на системах відстеження маркерів плоских візуальних маркерів квадратної форми. Системи відстеження маркерів, які використовуються в цьому порівняльному дослідженні:

1. ArToolKit (ATK) [11];
2. Institut Graphische Datenverarbeitung (IGD) [12];
3. Siemens Corporate Research (SCR);
4. Hoffman Marker System (HOM), яка використовується SCR і Framatome ANP.

Ці маркерні системи вибрано тільки тому, що теорія фактично використовується в додатках AR і доступна для аналізу. Крім того, усі ці системи маркерів дозволяють користувачам створювати декілька кодів і надто схожі та порівнянні між собою у багатьох аспектах. Поки не вдалося протестувати

всі існуючі системи для цієї оцінки, тому використовується репрезентативний набір систем на основі маркерів.

Оцінювалися системи відстеження маркерів за такими властивостями, як зручність, ефективність, точність та надійність. Ці чотири основні властивості описують ефективність, переваги та недоліки цих систем відстеження маркерів. Зручність системи полягає в тому, чи легко користувачам інтегрувати систему в свої програми AR, враховується сумісність системи з іншими комп'ютерними платформами, що працюють у системах. Зручність можна порівняти лише якісно. Ефективність системи відстеження маркерів можна оцінити, обчисливши ефективність часу відстеження. Цю властивість можна оцінити за необхідним часом роботи для виявлення та декодування маркерів або частотою кадрів під час відстеження руху маркерів у відеороликах у режимі реального часу. Точність визначається щодо помилок у вилученні функцій із 2D-зображень. Не враховувалися похибки в оцінці позиції або проекції назад, оскільки вони залежать від внутрішніх параметрів камери та алгоритмів калібрування. Незважаючи на те, що технології мають відмінності, використовувався відхід, відповідно до якого оцінка проводилася за спільними ознаками функціонування і на основі яких обчислювалися середні похибки та стандартні відхилення відповідних функцій. Надійність описує можливість системи виявляти та відслідковувати маркер у неідеальних умовах. Наприклад, виявлення маркерів у відео, знятих погано сфокусованою камерою або з великим проективним викривленням. Також оцінюється здатність системи виявляти та правильно декодувати маркери в малих регіонах, які нас цікавлять.

У роботі наведено чотири маркерні системи виявлення та декодування, подано кількісні результати порівняльних досліджень з подальшим якісним оцінюванням зручності використання та масштабованості цих систем, а також підбито підсумки та надано деякі підказки щодо вибору системи відстеження маркерів на основі додатків. Маркери ATK поставляються з ArToolKit.

МАРКЕРНІ СИСТЕМИ

Маркер ATK показано на рис. 1. Маркер кодується із зображенням усередині внутрішнього квадрата маркера.



Розшифрування маркера ґрунтується на дуже спрощеному алгоритмі відповідності шаблону, який порівнює три інваріанти геометрії маркерової ділянки з тими шаблонами, які попередньо зареєстровані

Рис. 1. Маркер для ArToolKit в системі.

Вихідні коди ArToolKit як для Unix, так і для систем Windows доступні в Інтернеті безкоштовно [11] разом з документами, зразковими програмами та іншими утилітами для калібрування камери, накладання віртуальних об'єктів тощо. Виявлено, що пакет ATK добре задокументований і дуже простий у використанні. Система маркерів ATK широко використовується для прототипування додатків AR [1].

Система маркування НОМ (рис. 2) була спочатку розроблена К. Хоманом у 1994 р. у компанії Siemens AG для фотограмметрії. Пізніше ця систе-

ма використовувалася у промисловій документації та технічному обслуговуванні. Окрім головної площі, є бічна смужка, яка забезпечує 6 біт кодування для підвищення надійності розпізнавання маркера. Ця маркерна система використовувалася для 3D реконструкції та AR документації на основі зображень високої роздільної здатності (наприклад, 3000×2000 пікселів). Ці маркери використовували Siemens і Framatome ANP для калібрування камери та реконструкції в багатьох електростанціях, хімічних заводів та нафтових платформ.

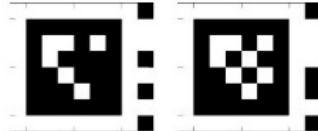


Рис. 2. Зразки маркерів, розроблені компанією Siemens AG (НОМ)

В оригінальній версії системи НОМ є лише виконуваний файл для оброблення статичних зображень. Siemens Corporate Research (SCR) розробили бібліотеку програмного забезпечення, яка може бути використана для оброблення послідовностей відео в режимі реального часу.

Систему маркерів IGD реалізовано в IGD, який є партнером ARVIKA [12].

ARVIKA — це дослідницький проект, який підтримує уряд Німеччини з розроблення програм, пов'язаних з AR. Багато програм, пов'язаних з ARVIKA, розроблено за допомогою системи маркерів IGD. На рис. 3 показано два маркери IGD. Маркер IGD — це квадрат, розділений на 6×6 квадратних плиток однакового розміру. Внутрішня плитка розміром 4×4 використовується для визначення орієнтації та коду маркера. Попередньо складені бібліотеки системи маркерів IGD доступні для учасників ARVIKA.



Рис. 3. Маркери, розроблені в IGD

Систему маркерів SCR розроблено в корпорації Siemens Corporate Research (SCR) для локалізації та відстеження [5] у різних додатках AR (рис. 4) [4].

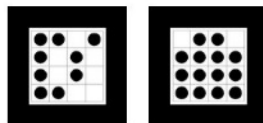


Рис. 4. Зразки маркерів, розроблені компанією SCR

Ця система використовується деякими партнерами ARVIKA. Маркери SCR кодуються із внутрішньою матрицею. Кожен маркер SCR пропонує вісім відповідних точок функції.

ДОСЛІДЖЕННЯ

Умови проведення експериментів

Параметри комп'ютера:

- процесор — Intel(R) Core(TM) i7-9700K CPU @ 3.60GHz;

- оперативна пам'ять — 32 ГБ;
- тип системи — Windows 10 Pro.

Параметри камери:

- розширення матриці — 12 Мп + 12 Мп;
- діафрагма — $f/1.8 + f/2.4$;
- запис відео — Full HD (1920×1080);
- оптична стабілізація — наявна;
- кількість осей стабілізації — 4;
- фокусування — фазова (PDAF);
- друга камера — 5 Мп, $f/2.0$.

Відео. Оцінювання проводилось шляхом оброблення відеопослідовностей на сотню кадрів. Усі послідовності відео в одному наборі для порівняння записуються в абсолютно однакових умовах. Процедура знімання набору відеопослідовностей для порівняння:

1. Зачинається вікно, умикається світло в кімнаті, камера фіксується на штативі.
2. Маркери закріплюються на тлі, призначеному для оцінювання.
3. Зберігається відеопослідовність певної довжини з певною швидкістю, наприклад, 45 с за 10 кадрів/с.
4. Під час відеознімання здійснюється повільний рух камери для розрізнення зображень від кадру до кадру.
5. Маркери замінюються на одному й тому ж тлі, відео знімається однакової довжини з однаковою швидкістю для всіх наборів маркерів.
6. Використовується відеоредактор: вирізаються перші 30–80 кадрів кожної послідовності відео для збереження решти відеокадрів стабільної інтенсивності від першого до останнього. Усі маркери друкуються на папері однакового розміру.

Визначення часу оброблення для виявлення та декодування маркера

Середній час для відстеження маркера, який включає необхідне оброблення зображення, виявлення та декодування маркерів, визначення особливих функцій усіх розпізнаних маркерів, наведено в табл. 1, у якій розмір відеозображення у пікселях; ROM (region of marker) /MPF (number of markers perframe) — ділянка маркерів (найменша прямокутна ділянка, яка містить усі маркери на зображенні) та кількість маркерів на кадр.

Таблиця 1. Середній час оброблення для розпізнавання маркера (мс/кадр)

Розширення	ROM/MPF	ATK	ROM	IGD	SCR	ScrT
2160 × 1080	68 × 68/1	4,0	5,0	6,0	11,4	3,6
	60 × 70/1	4,1	4,8	6,5	12,0	3,0
	190 × 150/3	7,0	10,1	—	15,0	—
	256 × 206/10	24,0	35,3	—	20,0	—

Для кожної системи, крім ROM, визначався маркер 20 разів для кожного кадру. Час оброблення осереднюється під час оброблення відеопослідовностей на сотню кадрів. Навіть за допомогою DidierStriker в IGD не вдалося виявити кілька маркерів на одному зображенні за допомогою системи IGD. Тому відповідні комірки табл. 1 не заповнені для маркерів IGD.

Як бачимо з табл. 1, вищі показники часу роботи для виявлення та декодування одного маркера отримує АТК. Час оброблення як систем АТК, так і НОМ-маркерів дуже залежить від кількості маркерів на зображенні. Система SCR працює найгірше. Однак вона менше залежить від кількості маркерів.

Показник ScrT — час оброблення з увімкненою функцією відстеження маркерної системи SCR. Якщо функцію відстеження ввімкнено, система маркерів відстежує один маркер на основі особливостей маркера, витягнутих з попереднього зображення. Продуктивність цієї системи в цьому випадку різко зростає. Поточні версії інших систем не мають подібних механізмів.

Точність визначення особливих точок

Оскільки маркерні системи різні і алгоритми визначення також різні, можна порівняти лише за спільними особливостями цих алгоритмів, а саме, кути, вилучені за допомогою чітко встановленого алгоритму виявлення кутів. Під час оцінювання кути виявляються за допомогою бібліотеки OpenCV (OCV) [13] для обчислення відповідності. Перший критерій, який використовується для оцінювання, отримується таким чином:

- використовуються крайові точки, виявлені навколо кожного кута маркера, для розміщення двох прямих у цій невеликій ділянці;
- обчислюється перетин двох прямих як точки для порівняння.

Причиною для введення другого критерію для порівняння є те, що процес виявлення ребер найменшої квадратної лінії та перетину (LIT, line of intersection) може діяти як фільтр для усунення деяких шумів зображення та отримання кращих точок функції.

Усі відео, що використовуються в цьому оцінюванні, мають розширення 2160×1080 з високим фокусом та одним маркером розміром 70×70 пікселів, що міститься в центрі зображень. При цьому вплив радіального викривлення зводиться до мінімуму. Таким чином, справжні точки характеристики повинні бути дуже близькими до точок LIT або OCV. Середня відстань та стандартне відхилення наведено в табл. 2. Кут — кут огляду камери.

Таблиця 2. Похибки, пов'язані з точками LIT (середня відстань) / (стандартне відхилення) (у пікселях)

Кут, °	АТК	НОМ	IGD	SCR
90	1,42/0,56	0,97/0,47	0,85/0,30	0,47/0,26
75	1,42/0,50	0,85/0,44	0,85/0,31	0,59/0,35
60	1,28/0,44	0,88/0,35	0,83/0,32	0,60/0,33
45	1,60/0,44	0,93/0,47	0,98/0,43	0,63/0,40
30	1,26/0,39	0,91/0,36	0,95/0,39	0,62/0,31
Середнє значення	1,40/0,46	0,91/0,42	0,89/0,35	0,58/0,33

Результати визначення похибок, пов'язаних з точками OCV, середня відстань і стандартне відхилення наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Похибки, пов'язані з точками OCV (середня відстань) / (стандартне відхилення) (у пікселях)

Кут, °	АТК	НОМ	IGD	SCR
90	1,54/0,31	1,23/0,15	0,16/0,09	0,59/0,41
75	1,44/0,07	1,11/0,04	0,21/0,10	0,58/0,08
60	1,41/0,11	1,16/0,04	0,37/0,13	0,77/0,23
45	1,51/0,22	1,06/0,14	0,40/0,12	0,54/0,13
30	1,24/0,19	1,16/0,06	0,45/0,25	0,72/0,18
Середнє значення	1,43/0,18	1,14/0,09	0,32/0,14	0,64/0,15

З обох порівнянь з результатами LIT та OCV спостерігаємо, що похибка вилучення функцій вища для системи АТК. Причина полягає в тому, що система АТК безпосередньо витягує функції з двійкових зображень. Цей метод економить обчислювально-електронні ресурси, але залишає більшу похибку з вилученням функції. Решта систем маркерів з цим дослідженням упорались досить добре, якщо порівнювати результати LIT та OCV.

Розпізнавання маркера

Розпізнаваність маркера оцінює здатність системи маркерів надійно виявляти і декодувати маркер у різних недружніх умовах. У цій роботі перевіряються розпізнавання невеликої ділянки з маркером (ROM), швидкість розпізнавання маркера у випадку проєктивних спотворень та швидкість розпізнавання маркерів із відео, записаного не добре сфокусованими камерами.

Розпізнавання у випадку проєктивних спотворень. Рівень проєктивних спотворень подано кутами огляду 90° – 15°. Результати порівняння наведено в табл. 4. Ті ж відео були використані для оцінювання точності вилучення ознак маркерних систем.

Таблиця 4. Розпізнавання маркера у випадку проєктивних спотворень (%)

Кут, °	АТК	НОМ	IGD	SCR
90	100	100	100	100
75	100	100	100	100
60	100	100	100	100
45	100	100	100	97
30	100	100	100	94
15	70/(cf ≥ 0,50) 17/(cf ≥ 0,67) 9/(cf ≥ 0,75)	100	0	8

Система АТК пов'язує кожен вилучений маркер зі значенням степеня довіри cf (confidence) до розпізнавання для декодування маркера. Якщо $cf \geq 0,50$, система АТК вважає маркер розпізнаваним. У системі НОМ порядок розпізнавання маркерів оцінюється за допомогою 7 рівнів, позначених від 0 до 6, причому 0 є найвищим, а 6 – найнижчим. Коли значення степеня довіри близьке до 1, маркер розпізнається з дуже високою вірогідністю. Тільки коли маркер виявляється та декодується з високою вірогідністю, сис-

тема SCR вважає маркер розпізнаваним, інакше нічого не повідомлятиметься. Ця функція знижує помилкове розпізнавання, але може призвести до відносно нижчого показника розпізнавання.

Розпізнавання відео з декількома маркерами. Показник розпізнавання маркерів для відео, на якому знято кілька маркерів, наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Розпізнавання маркера за їх великої кількості (%)

Розширення	ROM/MPF	АТК/cf	НОМ	SCR
2160 × 1080	(516 × 416) / 10	89/(cf ≥ 0,50) 60/(cf ≥ 0,67) 47/(cf ≥ 0,75)	100	82
	(260 × 220) / 10	82/(cf ≥ 0,50) 39/(cf ≥ 0,67) 30/(cf ≥ 0,75)	100	71

Зареєстровано 21 маркер до системи АТК для перевірки здатності системи розрізняти маркери, які мають схожі зразки. Виявлено деякі проблеми з розпізнаванням маркерів. Наприклад, маркер із зображенням числа «3» розпізнається як маркер із зображенням «2» з високим значенням степеня довіри (cf = 0,85) системою АТК.

Розпізнавання з малою ділянкою маркера на зображенні. Оцінимо продуктивність цих систем, коли розмір зображення (піксела) маркера невеликий. Під час записування відео змінюємо лише масштабування камери так, щоб маркер спочатку був великим, а потім плавно зменшуємо його до дуже малого розміру. Зберігаємо всі інші фактори, такі як глибина від камери до маркера та фізичний розмір маркерів, які впливають на розмір зображення маркера (у пікселях), який не змінюється. Високошвидкісна функція автофокусування тримає камеру добре сфокусованою від початку до кінця.

Результати показують, що система АТК показала найкращі результати в цьому експерименті. Він може виявити і декодувати маркер розміром 14×14 пікселів з 320×240 пікселів. Цей показник для НОМ становить 19×21, для SCR 21×21 і для IGD 44×44.

Розпізнавання з поганим фокусом. Спочатку вручну налаштовується фокус камери до найкращого рівня, а потім записується відео для кожної системи маркерів. Далі погіршуємо фокусування камери приблизно на 20% кожен крок, щоб вивести його із фокуса. Результати розпізнавання маркерів наведено в табл. 6. Інтригує, що значення рівня довіри (cf), надане системою АТК для найгіршого сфокусованого відео, вище, ніж у деяких із краще сфокусованим відео. Це свідчить про те, що значення рівня довіри, отримане системою АТК, може бути не надто надійним.

Таблиця 6. Розпізнавання з погіршеним фокусом (%)

Фокус	АТК	НОМ	IGD	SCR
Ідеальний	100 (cf = 0,78)	100	100	100
Гарний	100 (cf = 0,82)	100	100	100
Поганий	100 (cf = 0,63)	100	28	97
Гірший	100 (cf = 0,55)	0	12	0
Найгірший	100 (cf = 0,73)	0	0	0

ДИСКУСІЯ ТА ПІДСУМКИ

Система маркерів АТК сумісна з більшістю комп'ютерних систем. Маркер АТК добре документований і простий у використанні. Виявлення та декодування маркерів АТК швидке і стабільне. Він мав найкращі результати в декількох аспектах, таких як швидкість оброблення одного маркера та розпізнавання невеликою ділянкою, у тестах, наведених у цій роботі. Придатний для складання прототипів і широко застосовується в різних програмах AR. Проте для додатків, які потребують сотень чи тисяч різних маркерів, таких як обслуговування та локалізація у великих промислових умовах або інших будівлях, досить затратно реєструвати кожен маркер, а потім змінювати реєстрацію маркера вручну, як цього вимагає система. Система АТК використовує дуже спрощений алгоритм відстеження шаблонів для декодування маркера. Алгоритм порівнює кілька інваріантів маркера, виявленого на зображенні, із шаблонами, зареєстрованими в системі. Перевага такого підходу — висока швидкість оброблення. Утім таке спрощення також зумовлює проблеми з розпізнавання помилкових маркерів. Для усунення проблеми помилкового розпізнавання потрібен жорсткий алгоритм відповідності шаблонів, який може бути затратним для обчислень, особливо за великої кількості попередньо зареєстрованих маркерів. Система АТК безпосередньо використовує двійкове зображення, яке створює маркерне виявлення для вилучення точок зображення. Оскільки положення ребер маркера залежать від порога бінарного зображення, це може спричинити системні похибки в точності вилучених точок функції.

Система маркування НОМ працює в багатьох аспектах. Маркер розроблено із систематичним кодуванням, як і маркери IGD і SCR. Крім того, на кожному маркері є додаткова візуальна структура, що підвищує надійність декодування. Привабливою особливістю, що надається системою маркування НОМ, є те, що вона забезпечує 7 рівнів довіри (від 0 до 6), що вказують на достовірність результатів виявлення та декодування маркера для кожного виявленого маркера. Коли рівень довіри становить менше ніж 2, маркер розпізнається з високою надійністю. Якщо рівень конфіденційності становить більше за 5, результати декодування маркера зазвичай не є надто надійними. Із проведеного тестування та реального застосування в галузях бачимо, що рівень довіри НОМ надійний і відповідає якості зображення маркерів. Це дуже відрізняється від того, що спостерігалось для рівня довіри системи АТК, який не є настільки надійним та послідовним у деяких випадках.

Система маркерів SCR надто повільна для виявлення та вилучення особливостей на одному кадрі. Однак вона використовує інформацію про тимчасове відстеження для швидшого виконання на відміну від інших систем, і продуктивність знижується мінімально, у випадку коли кількість маркерів на кадр збільшується. Добре працює в інших аспектах, таких як точність вилучення точок функції та надійність виявлення і декодування. Систематичне кодування не потребує жодної попередньої реєстрації на використання маркерів SCR. Це стосується і маркерів НОМ та IGD. Із матрицею кодування 4×4 може бути більше 10 000 унікальних кодів. Кожен маркер SCR пропонує 8 характеристичних точок для оцінювання пози, що забезпечує кращу оцінку позицій.

Систему маркерів IGD широко використовують у багатьох проектах ARVIKA. Як і маркери HOM і SCR, маркери IGD також систематично кодуються. Вилучення функції маркера є точним, а швидкість оброблення — прийнятною. Незважаючи на те, що не вдалося виявити кілька маркерів з одного і того ж зображення за допомогою цієї системи, проте подібний функціонал міг бути реалізований, але не знайдений через недостатній досвід роботи із системою IGD.

ВИСНОВКИ

Візуальні маркери широко використовуються в існуючих додатках доповненої реальності (AR). У цій роботі порівнювались системи ATK ARtoolkit, IGD, HOM та SCR. Подано результати оцінки як якісно, так і кількісно щодо зручності використання, ефективності, точності та надійності цих систем. Це забезпечує аналіз переваг та недоліків різних аспектів систем відстеження маркерів. Для конкретної програми AR є різні вимоги до виявлення та відстеження маркерів. Результати оцінювання, продемонстровані в цій роботі, можуть спрямовувати читачів на вибір правильної системи відстеження маркерів для їх конкретного застосування. Оцінка маркерних систем зі спотвореннями камер за різних умов освітлення та зі складними множинними конфігураціями маркерів у 3D-просторі ще не проводились, що може бути підґрунтям для майбутніх досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Y. Ham and M. Golparvar-Fard, "EPAR: Energy Performance Augmented Reality models for identification of building energy performance deviations between actual measurements and simulation results", *Energy and Buildings*, vol. 63, pp. 15–28, 2013.
2. J. Scholz and K. Duffy, "We ARe at home: How augmented reality reshapes mobile marketing and consumer-brand relationships", *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 44, pp. 11–23, 2018.
3. S.M. C. Loureiro, J. Guerreiro and F. Ali, "20 years of research on virtual reality and augmented reality in tourism context: A text-mining approach", *Tourism Management*, vol. 77, pp. 104028, 2020.
4. P.V. Esch, D. Arli, M. H. Gheshlaghi, V. Andonopoulos, T. V. D. Heidt, and G. Northey, "Anthropomorphism and augmented reality in the retail environment", *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 49, pp. 35–42, 2019.
5. C. Goebert and G. P. Greenhalgh, "A new reality: Fan perceptions of augmented reality readiness in sport marketing", *Computers in Human Behavior*, vol. 106, pp. 106231, 2020.
6. T. Liao, "Future directions for mobile augmented reality research: Understanding relationships between augmented reality user's nonusers content devices and industry", *Mobile Media & Communication*, vol. 7, no. 1, pp. 131–149, 2018.
7. M. S. Sidhu, "Evaluation Study Outcome of Augmented Reality Technology for Solving Engineering Problems in UNITEN", *International Journal of Information and Communication Technology Education*, vol. 15, no. 2, pp. 69–84, 2019.
8. Y. Zhang, D. Guo, D. Yao, and P. Xu, "The extension of multivariate synchronization index method for ssvp-based bci", *Neurocomputing*, vol. 269, pp. 226–231, 2017.

9. S. Kishore et al., “Comparison of ssepbc and eye tracking for controlling a humanoid robot in a social environment”, *Presence-Teleoper. Virtual Env.*, vol. 23, no. 3, pp. 242–252, 2014.
10. P. Achlioptas, O. Diamanti, I. Mitliagkas, and L. J. Guibas, “Learning representations and generative models for 3d point clouds”, in *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning ICML 2018*, pp. 40–49, 2018.
11. ArToolKit [Online]. Available: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/> (accessed on: 10.05.2020).
12. ARVIKA [Online]. Available: <http://www.arvika.de/www/index.htm> (accessed on: 05.05.2020).
13. *Open source computer vision library* [Online]. Available: <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/> (accessed on: 07.05.2020).

Надійшла 21.06.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

O.S. Bezpalko, ORCID: 0000-0001-7595-6179, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: bos0x0mail@gmail.com.

RESEARCH OF AUGMENTED REALITY MARKER RECOGNITION SYSTEMS / O.S. Bezpalko

Abstract. There are different ways to implement augmented reality. The marker method remains the most reliable and stable. An attempt has been made to determine which of the existing marker systems is better, more accurate, more reliable, and more convenient. A comparison of existing marker systems using visual markers encrypted using planar squares was made. The assessment was made based on criteria such as convenience, efficiency, accuracy, and reliability. Techniques used during the experiments: determination of processing time for detection and decoding of the marker, accuracy of determination of special points, recognition of the marker in case of projective distortions, recognition of several markers, recognition with a small area of the marker in the image, recognition in poor image focus. Four marker recognition systems were used for comparison. The evaluation results of both qualitative and quantitative in terms of ease of use, efficiency, accuracy, and reliability of such systems are presented. This provides an analysis of the advantages and disadvantages of various aspects of marker tracking systems.

Keywords: augmented reality, markers, recognition speed.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ МАРКЕРОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ / А.С. Беспалько

Аннотация. Существуют различные способы реализации дополненной реальности. Наиболее надежным и стабильным остается маркерный способ. В работе выяснено какая с маркерных систем лучшая, точнее, надежнее, удобнее. Выполнено сравнение существующих маркерных систем, в которых используются визуальные маркеры, шифруются с помощью плоскостных квадратов. Оценку проведено на основе таких критериев, как удобство, эффективность, точность и надежность. Методики, которые применялись во время экспериментов: определение времени обработки для выявления и декодирования маркера, точность определения особых точек, распознавание маркера при проективных искажениях, распознавание нескольких маркеров, распознавания с малой областью маркера на изображении, распознавания в условиях плохого фокуса изображения. Для сравнения использованы четыре системы распознавания маркеров. Были представлены результаты оценки как качественно, так и количественно с точки зрения удобства использования, эффективности, точности и надежности этих систем. Это обеспечивает анализ преимуществ и недостатков различных аспектов систем отслеживания маркеров.

Ключевые слова: дополненная реальность, маркеры, скорость распознавания.

REFERENCES

1. Y. Ham and M. Golparvar-Fard, "EPAR: Energy Performance Augmented Reality models for identification of building energy performance deviations between actual measurements and simulation results", *Energy and Buildings*, vol. 63, pp. 15–28, 2013.
2. J. Scholz and K. Duffy, "We ARe at home: How augmented reality reshapes mobile marketing and consumer-brand relationships", *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 44, pp. 11–23, 2018.
3. S.M.C. Loureiro, J. Guerreiro and F. Ali, "20 years of research on virtual reality and augmented reality in tourism context: A text-mining approach", *Tourism Management*, vol. 77, pp. 104028, 2020.
4. P.V. Esch, D. Arli, M.H. Gheshlaghi, V. Andonopoulos, T.V.D. Heidt, and G. Northey, "Anthropomorphism and augmented reality in the retail environment", *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 49, pp. 35–42, 2019.
5. C. Goebert and G.P. Greenhalgh, "A new reality: Fan perceptions of augmented reality readiness in sport marketing", *Computers in Human Behavior*, vol. 106, pp. 106231, 2020.
6. T. Liao, "Future directions for mobile augmented reality research: Understanding relationships between augmented reality user's nonusers content devices and industry", *Mobile Media & Communication*, vol. 7, no. 1, pp. 131–149, 2018.
7. M.S. Sidhu, "Evaluation Study Outcome of Augmented Reality Technology for Solving Engineering Problems in UNITEN", *International Journal of Information and Communication Technology Education*, vol. 15, no. 2, pp. 69–84, 2019.
8. Y. Zhang, D. Guo, D. Yao, and P. Xu, "The extension of multivariate synchronization index method for ssvp-based bci", *Neurocomputing*, vol. 269, pp. 226–231, 2017.
9. S. Kishore et al., "Comparison of ssvp-bci and eye tracking for controlling a humanoid robot in a social environment", *Presence-Teleoper. Virtual Env.*, vol. 23, no. 3, pp. 242–252, 2014.
10. P. Achlioptas, O. Diamanti, I. Mitliagkas, and L. J. Guibas, "Learning representations and generative models for 3d point clouds", in *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning ICML 2018*, pp. 40–49, 2018.
11. *ArToolKit* [Online]. Available: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/> (accessed on: 10.05.2020).
12. *ARVIKA* [Online]. Available: <http://www.arvika.de/www/index.htm> (accessed on: 05.05.2020).
13. *Open source computer vision library* [Online]. Available: <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/> (accessed on: 07.05.2020).