



Ілона Ревенчук¹, Єгор Агарков²

¹ХНУРЕ, м. Харків, Україна, ilona.revenchuk@nure.ua, ORCID: 0000-0002-5188-9538

²ХНУРЕ, м. Харків, Україна, yehor.aharkov@nure.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ НА ОСНОВІ МАРКЕРІВ

Доповнена реальність — це велика кількість можливостей для комерційного застосування, нові горизонти в освіті, промисловості, медицині, будівництві, торгівлі, навчанні і навіть туризмі. Комерційне зростання використання технологій доповненої реальності дуже стрімке. Їй, на відміну від віртуальної реальності, необов'язково спиратися на спеціалізоване залізо і громіздкі пристрої. Технологія працює на мобільних пристроях — смартфонах, планшетах. Саме взаємодія обчислювальних пристроїв з зображенням реального світу відрізняє доповнену реальність від віртуальної. Доповнена реальність має потенціал зробити відносини людини з інформацією більш ергономічними. Дані будуть автоматично доставлятися користувачам у необхідному контексті для різних ситуацій в повсякденному житті, таким чином, технологія підніме взаємодію людини з інформацією на принципово інший рівень. При моделюванні доповненої реальності особливу увагу приділяють методам та алгоритмам моделювання віртуального простору.

ДОПОВНЕННА РЕАЛЬНОСТІ, МАРКЕРИ, АФІННІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ВІРТУАЛЬНА ЛАБОРАТОРІЯ.

Ревенчук І.А., Агарков Е.С. Моделирование дополненной реальности на основе маркеров. Дополненная реальность — это большое количество возможностей для коммерческого применения, новые горизонты в образовании, промышленности, медицине, строительстве, торговле, учебе и даже туризме. Коммерческий, стремительный рост использования технологий дополненной реальности позволяет, ей в отличие от виртуальной реальности, не использовать специализированное железо и громоздкие устройства. Технология работает на мобильных устройствах — смартфонах, планшетах. Именно взаимодействие вычислительных устройств с изображением реального мира отличает дополненную реальность от виртуальной. Дополненная реальность имеет потенциал сделать отношения человека с информацией более эргономичными. Данные будут автоматически доставляться пользователям в необходимом контексте для различных ситуаций в повседневной жизни, таким образом, технология поднимет взаимодействие человека с информацией на принципиально иной уровень. При моделировании дополненной реальности особое внимание уделяется методам и алгоритмам моделирования виртуального пространства.

ДОПОЛНЕНИЕ РЕАЛЬНОСТЬ, МАРКЕРЫ, АФФИННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ, ВІРТУАЛЬНА ЛАБОРАТОРІЯ.

Revenchuk I., Agarkov E. Marker-based Augmented Reality Modeling. Augmented reality is a lot of opportunities for commercial use, new implementation in education, industry, medicine, construction, trade, education and even tourism. The commercial, rapid growth in the use of augmented reality technologies allows it, unlike virtual reality, not to use specialized hardware and bulky devices. The technology works on mobile devices — smartphones, tablets. The difference between augmented reality and virtual reality is interaction of computing devices with the image of the real world. Augmented reality has the potential to make human relationships with information more ergonomic. Data will be automatically delivered to users in the necessary context for various situations in everyday life, thus, the technology will raise the interaction of a person with information to a fundamentally different level. Methods and algorithms for modeling virtual space is an important in modeling augmented reality.

AUGMENTED REALITY, MARKERS, AFFINITY CONVERSION, VIRTUAL LABORATORY

Вступ

Однією з головних тенденцій, що виділяються експертами на ІТ-ринку, є розвиток технологій доповненої і віртуальної реальності, що стимулюють зростання популярності мобільних пристроїв, особливо в сегменті смартфонів. Технології доповненої і віртуальної реальності, які нещодавно фігурували тільки у фантастичній літературі, вже зараз представляють компаніям можливість для перетворення робочих процесів, зміни підходу до роботи зі своїми клієнтами. Доповнена реальність (Augmented reality, AR) — це технологія, яка дозволяє накладати інформацію в формі тексту, графіки, аудіо та інших віртуальних об'єктів на реальні об'єкти в режимі реального часу.

Визначення доповненої реальності було введено недавно. Спочатку цей термін був запропонований

дослідником Томом Коделом в 1990 році, який в той час працював в компанії Boeing. У 1997 році, Рональд Т. Азума в своєму дослідженні, присвяченому різним способам використання доповненої реальності, дав їй досить просте визначення — це система, яка:

- поєднує віртуальне і реальне;
- взаємодіє в реальному часі;
- розташовується в тривимірному просторі.

Доповнена реальність, за Азумом, є різновидом віртуальної реальності, але з одним застереженням: доповнена реальність інтегрується і доповнює справжній світ замість того, щоб повністю його замінити, як це робить віртуальна реальність.

Багато аналітичних компаній прогнозують зростання популярності технологій доповненої і віртуальної реальності в сучасній культурі. Дані прогнози

цілком виправдані, тому що вже зараз лідери серед ІТ-компаній готові вкладати величезні кошти в розвиток доповненої і віртуальної реальності. Підвищення інтересу до технологій доповненої і віртуальної реальності спостерігається також серед споживачів. Даний факт можна простежити по динаміці пошукових запитів за допомогою сервісу Google Trends.

Зростання популярності даних технологій пов'язаний з ривком в їх розвитку, які досягли такого рівня, коли уявлення про дані технології стали відповідати очікуванням. Зокрема, Tom's Hardware, широко відоме інтернет-видання, присвячене комп'ютерним технологіям, опублікувало статтю, у котрій був зроблений огляд найбільш явних переваг доповненої і віртуальної реальності на даний момент, в порівнянні з минулими розробками [1].

1. Основні теоретичні відомості моделювання віртуального простору

Віртуальний простір моделюється з використанням афінних перетворень [1, 2], це коли вершина для відображення її на екрані перетворюється з тривимірних координат в двовимірні. Вхідними даними є координати, а вихідними — зображення. При побудові доповненої реальності — накладання віртуальних об'єктів на зображення, що фіксується веб-камерою [3-5], — необхідно вирішити інше завдання, де вхідними даними буде зображення, а вихідними — координати. Подібні перетворення використовуються в фотограмметрії для визначення розмірів об'єктів. Основна проблема при побудові доповненої реальності полягає у визначенні відносних систем координат сцени (зображення) і відеокамери, тобто в локалізації веб-камери. Це завдання складається ще з декількох завдань: скласти нерухому систему координат зі сценою; вибрати еквівалент віртуальної камери і встановити її положення, при цьому положення камери визначається її обертанням і зміщенням відносно центру координат, так щоб проекції зображень, що фіксуються веб-камерою і віртуальною камерою, збігалися.

Як відомо [5], віртуальну камеру можна задати двома 4×4 -матрицями:

$$A = \begin{bmatrix} a & 0 & f & 0 \\ 0 & b & g & 0 \\ 0 & 0 & c & d \\ 0 & 0 & e & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} RY_x & RY_y & RY_z & T_x \\ RP_x & RP_y & RP_z & T_y \\ RR_x & RR_y & RP_z & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Коефіцієнти a, b, c, d, e, f, g матриці A (1) утворюють фростум [1] — пірамідальну видиму область, обмежену шістьма площинами, які будуються виходячи

зі значень кута зору камери, відносини висоти віртуального вікна до його ширини і значення глибини Z -буфера.

Матриця B (2) складається з 3×3 -матриці R обертання навколо трьох осей (RY — yaw, вісь спрямована вгору; RP — pitch, вісь спрямована вправо; RR — roll, вісь напрямки) і вектора зміщення T уздовж осей x, y, z відповідно.

Проекція вершини на ближню площину екрану будується відповідно до формули

$$\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & f & 0 \\ 0 & b & g & 0 \\ 0 & 0 & c & d \\ 0 & 0 & e & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} RY_x & RY_y & RY_z & T_x \\ RP_x & RP_y & RP_z & T_y \\ RR_x & RR_y & RP_z & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

яка перетворює тривимірний вектор $[V_x, V_y, V_z, 1]^T$ іртуального простору в двовимірний вектор $[S_x, S_y]^T$ екранного простору. При вирішенні задачі локалізації камери 3D-вектори і 2D-вектори у формулі (3) відомі, а матриці A і B , що складаються із зовнішніх і внутрішніх параметрів веб-камери, невідомі, ці параметри і необхідно знайти.

Матриця B містить зовнішні параметри (Extrinsic Parameters) камери: кут її повороту й зміщення відносно центру сцени. Завдання знаходження матриці B зводиться до порівняння проекцій, що фіксуються реальною і віртуальною камерами [6, 7]. Як тільки матриця B стає відомою, завдання локалізації камери можна вважати вирішеним.

2. Проблеми реалізації моделі доповненої реальності

Технічні проблеми реалізації пов'язані не тільки з продуктивністю комп'ютера, на якому виконується програма, а й з технічними показниками використовуваної камери, такими як розмір одержуваного зображення і його якість. Мінімальні вимоги до обчислювальної системи невисокі, програма може бути реалізована на мобільних комп'ютерах або навіть на сучасних смартфонах після відповідної компіляції для обраної системи. Стосовно вимог до камери, слід враховувати, що чим більше і чіткіше область фіксованого зображення, тим вище точність розрахунків. Крім якості зображення, необхідно щоб швидкість його фіксування була не менше 30 кадрів / с, так як від цього залежить максимальна швидкість роботи програми в цілому.

Деякі недоліки камери можна компенсувати, на відміну від розміру отриманого зображення і швидкості роботи використовуваної камери, які змінити неможливо. Наприклад, такий недолік, як дисторсія (рис. 1), виникає в оптичних системах, де використовуються опуклі лінзи, можна компенсувати перерахунком координат зображення.

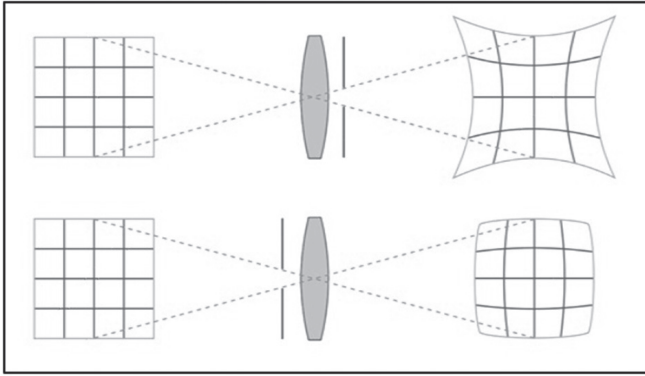


Рис. 1. Схематичне зображення дисторсії

Для цього необхідно знайти координати центру дисторсії і її значення; ці дані, називаються внутрішніми параметрами камери (Intrinsic Parameters), визначає ставлення ідеальних і реальних параметрів веб-камери і віртуальної камери:

$$\begin{cases} d^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2; \\ p = (1 - fd^2); \\ x_d = p(x_i - x_0) + x_0, y_d = p(y_i - y_0) + y_0, \end{cases} \quad (4)$$

тут f значення дисторсії; (x_d, y_d) координати центру дисторсії; $(x_0, y_0), (x_i, y_i)$ оординати точок зображення, що фіксується веб-камерою. При перекладі зображення з реального в ідеальне необхідно врахувати, що внаслідок компенсації дисторсії зображення виходить не прямокутним (рис. 2), і по його краях з'являються незаповнені області (які можуть негативно впливати на знаходження маркера).

Щоб усунути ці області, необхідно змінити масштаб зображення, використовуючи коефіцієнт масштабу (s). Тоді система рівнянь (4) перетворюється до наступного вигляду:

$$\begin{cases} x = s(x_i - x_0), y = s(y_i - y_0); \\ d^2 = x^2 + y^2; \\ p = (1 - fd^2); \\ x_d = px + x_0, y_d = py + y_0. \end{cases} \quad (5)$$

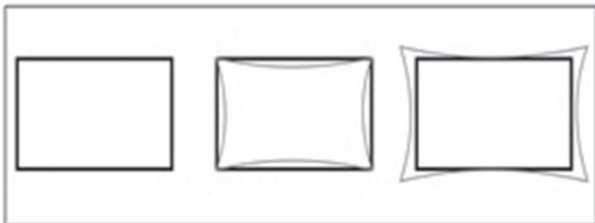


Рис. 2. Схематичне зображення результату компенсації дисторсії

Внутрішні параметри камери (або калібрування) визначаються один раз і використовуються як константа, тоді як зовнішні параметри змінюються при кожному кадрі в залежності від положення і орієнтації камери.

3. Алгоритмічні проблеми

Головна проблема при моделюванні доповненої реальності полягає в отриманні невідомої інформації про простір. Проблему відсутності інформації можна вирішити різними способами, наприклад додаванням об'єкта, параметри якого заздалегідь відомі. Зіставлення фіксуємі веб-камерою і віртуальною камерою зображень найкраще робити за спеціальними областями, відповідність між якими відомо, такі області називаються «feature» — особливість, риса, особлива точка. Як правило, це області найбільшого перепаду освітленості, кути об'єктів або спеціально приготовлені маркери. Знаходження відповідностей за маркерами дає деякі переваги, наприклад: відомо кількість особливих точок і орієнтація маркера, також відомо, що всі особливі точки компланарні (в ідеалі). Маркер зазвичай складається з чотирьох особливих точок, які розташовані в яскраво виражених кутах (наприклад, кути білого квадрата, зображеного на чорному квадраті більшого розміру).

Процес зображення для автоматичного виявлення маркера зображено на рис. 3 [8], де:

- (а) — початкове зображення,
- (б) — результат застосування локального порогового значення,
- (в) — виявлення контуру,
- (г) — полігональна апроксимація і видалення непотрібних контурів,
- (д) — приклад маркера після перетворення перспективи,
- (е) — призначення бітів для кожного осередку.

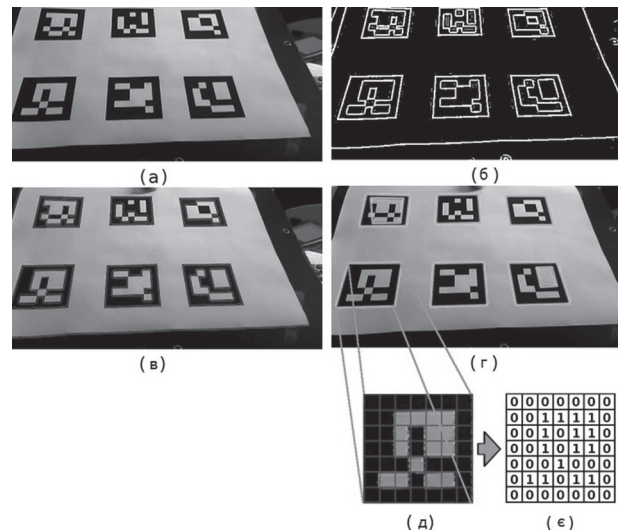


Рис. 3. Процес зображення для автоматичного виявлення маркера

Для розрахунку системи просторових координат сцени по довільному набору точок слід розрахунки проводити в динамічній системі (а не в статичі) з використанням алгоритму розпізнавання особливих точок, де аналіз ряду зображень і характеру руху веб-камери дасть відсутню інформацію про сцену.

4. Реалізація доповненої реальності на основі маркерів

Ключовою особливістю AR у порівнянні з іншими інструментами обробки зображень є те, що віртуальні об'єкти переміщуються та обертаються у 3D-координатах замість 2D-координат зображення.

Основними цілями AR є аналіз змін у захоплених кадрах камери та правильне вирівнювання віртуальних даних у сцені камери на основі результатів відстеження. У свою чергу, підхід, заснований на маркерах, забезпечує точне відстеження за допомогою візуальних маркерів, наприклад, двійкових маркерів (ARUCO, METAIO тощо) або з фотографією реальних площинних об'єктів у кадрі камери. Спрощена схема AR системи представлена на рис. 4.

Давайте детально розглянемо блок-схему AR-системи.

Спочатку нам потрібно мати маркерне зображення та витягти послідовні кадри камери. Модуль відстеження на блок-схемі (рис. 4) є ядром системи доповненої реальності. Він обчислює відносну позицію (pose) камери на основі правильно виявленого та розпізнаного маркера в сцені.



Рис. 4. Спрощена схема AR системи

Термін «pose» означає позицію шести ступенів свободи (DOF), тобто 3D-розташування та 3D-орієнтацію об'єкта. Модуль відстеження дозволяє системі додавати віртуальні компоненти як

частину реальної сцени. Оскільки ми маємо справу з кадрами камери в 2D-системі координат, необхідно використовувати проєктивну геометрію для віртуального збільшення об'єктів 3D.

Виявлення та розпізнавання. У разі відстеження за допомогою двійкового маркера першим необхідним є надрукувати потрібний маркер і поставити його перед камерою. Ця вимога є очевидним недоліком алгоритму відстеження.

Алгоритм виявлення дуже простий і базується на природі маркера:

- застосування адаптивного порогового значення для вилучення країв;
- вилучення замкнених контурів з двійкового зображення;
- фільтрація контурів;
- наближення контурів та виявлення контурів чотиригранної форми.

Після вищевказаних кроків кандидати на маркери зберігаються для подальшого розпізнавання маркера.

Кожен кандидат перекошений у фронтальний вид і розділений на блоки. Завдання алгоритму розпізнавання — витягти двійковий код у кандидата на маркер та порівняти його з кодом справжнього маркера. Найбільш схожий кандидат розглядається як відповідний маркер.

На рис. 5 представлений приклад сцени та те, як здійснюється виявлення та розпізнавання двійкового маркера.

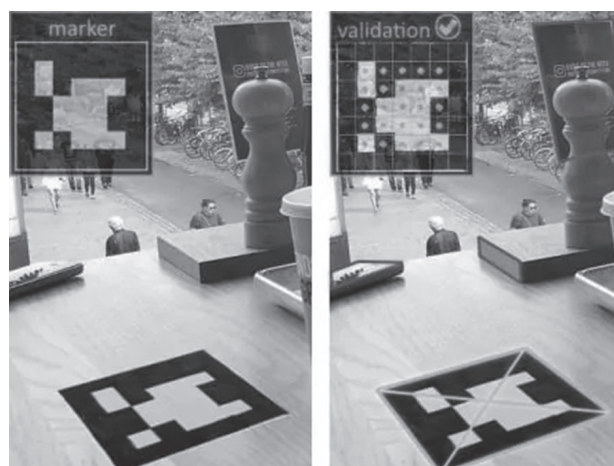


Рис. 5. Сцена з двійковим маркером (ліворуч) та виявленим маркером (праворуч)

Досконаліший алгоритм відстеження за допомогою фотомаркера дозволяє позбутися розміщення синтетичних двійкових маркерів на сцені. Досить просто сфотографувати площинний об'єкт у реальній сцені та використовувати його як маркер.

Методи, засновані на локальних особливостях, є найбільш загальними для цього завдання. Хорошими кандидатами для таких завдань є надійні дескриптори SURF [9] або один із двійкових дескрипторів: ORB [10], FREAK [11], BRIEF [12], BRISK [13] або

LATCH [14]. Зіставлення локальних дескрипторів, як правило, здійснюється за допомогою звичайного збігу Brute Force або з більш ефективним алгоритмом FLANN. Як результат, після узгодження даних може бути здійснено збільшення даних. Схема такого рівня наведена на рис. 6.



Рис. 6. Алгоритм відстеження на основі зображень

Цей спосіб також має деякі недоліки. Це дійсно ресурсомістка велика кількість обчислень на етапах виявлення ознак, обчислення дескрипторів та відповідності ознак.

Приклад збільшення віртуального об'єкта за допомогою реального плоского маркера в сцені представлений на рис. 7

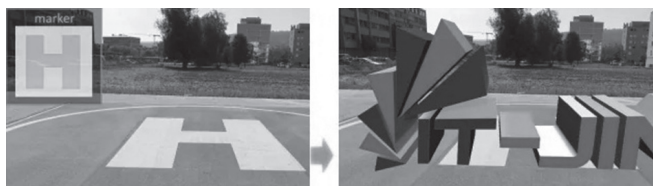


Рис. 7. Приклад збільшення віртуального об'єкта за допомогою реального плоского маркера

Практична реалізація доповненої реальності при проектуванні віртуальних лабораторій

Віртуальні та цифрові лабораторії є дуже цінним середовищем для залучення учнів до науки. Це особливо важливо для отримання лабораторного досвіду майбутніми інженерами в галузі науки, техніки, техніки та математики [15]. Віртуальна лабораторія містить віртуальні лабораторні роботи (VLW). У більшості випадків VLW — це спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє користувачам експериментувати з віртуальними пристроями.

Інтерактивний дизайн віртуальних пристроїв був описаний у VLW, що передбачає математичне моделювання, можна вважати віртуальним симулятором. Машинне забезпечення педагогічного процесу дає можливість для самостійного досвіду тих, хто навчається, та їх виконання в класах та лабораторіях [16, 17].

Віртуальна лабораторія електронної мікроскопії для вимірювань представлена на рис. 8.



Рис. 8. Вид віртуальної лабораторії

Студент також має можливість не лише взаємодіяти з пристроями, а й пересуватися по віртуальній лабораторії. Панелі інструментів та кнопки виділяються, коли учні, які наводять курсор на них, наводять курсор, що забезпечує інтерактивну поведінку програми. Основним двигуном Unity 3D був обраний для розвитку віртуальної лабораторії [18]. Він досить доступний для того, щоб стати чудовим місцем для початку розробки вмісту VR, але це професійний механізм, що використовується великою частиною студій VR, який може досягти багатьох найвищих графічних ефектів. Веб-сайт Unity дозволяє завантажувати єдність (особисте видання безкоштовне). У цій лабораторній роботі студент має справу з установкою віртуального електронного мікроскопа. Всі прилади, що працюють у віртуальній лабораторії, за дизайном схожі на реальне обладнання. Перед виконанням лабораторних робіт необхідно передати контрольний список на віртуальному планшеті. Панель управління відеооператора показана на рис. 9 [19-20].

Зображення поверхні, отримане електронним мікроскопом, відображається на відеоекрані. Подібно до реального пристрою, віртуальний відеооператор може працювати із зображенням.

Керуючись завданням, студент робить необхідні процедури із зображенням. Здійснено інтерактивну зміну масштабу, яскравості та контрастності зразкового зображення. У VLW використовуються зображення реальних поверхонь зразків. Процес віртуальних вимірювань довжини піраміди на поверхні зразка кремнієвих сонячних елементів представлений на рис. 9.

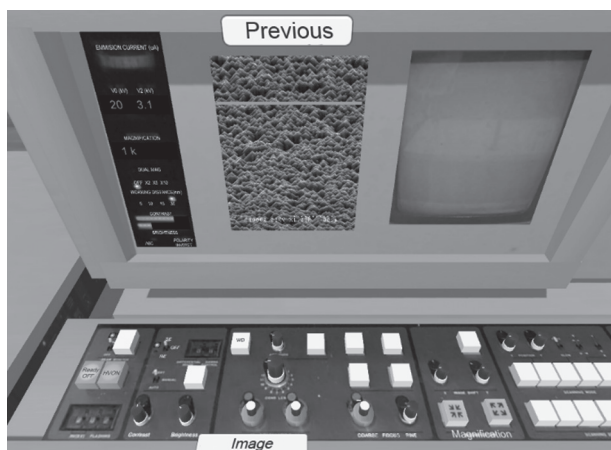


Рис. 9. Панель управління відеооператора

Оскільки масштаб зображення та кут нахилу зразка пластини добре відомі, поверхню можна точно дослідити. Ці операції дуже важливі, оскільки вони в основному використовуються в промисловості для контролю якості зразків.

Відповідно, за допомогою цього програмного забезпечення користувач може модифікувати та вдосконалити продукт, або навіть використовувати існуючі елементи, спеціально розроблені для цієї роботи, та створити нові лабораторні роботи.

Висновки

Зростання популярності технологій доповненої реальності пов'язане з ривком в їх розвитку. Завдяки перевагам сучасних технологій доповненої реальності можна по-новому отримувати візуальну інформацію, що може вирішити безліч пов'язаних з візуалізацією інформації проблем в різноманітних індустріях.

За останні 2 роки ми перебуваємо в розпалі глобальної пандемії. В умовах карантину університети повинні тимчасово закрити навчальні лабораторії та відкласти практичні роботи зі складним обладнанням. Особливо важливо для студентів природничих дисциплін продовжувати проводити експериментальні дослідження, але безпека студентів та інженерів-лабораторії під пріоритетом. У звичайних умовах студенти проводять кілька годин на тиждень у лабораторіях, відповідно, навчання поза лабораторією не дає студентам можливості набутти практичних навичок, що призводить до зниження якості освіти. Візуалізація лабораторних робіт знімає низку проблем університетів, які забезпечують якісну освіту та забезпечують віддалену практичну лабораторну роботу.

Список літератури:

[1] Augmented Reality Tool Kit URL: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>.

[2] Доповнена реальність або AR-технології. URL: <http://thefuture.news/lessons/ua/ar>

[3] Goldman S. Global Investment Research. URL: <http://www.goldmansachs.com/careers/divisions/global-investment-research>

- [4] Ларин М. С. Работа с пакетом программ Open Computer Vision // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2008. Вып. 48. С. 95.
- [5] Roger Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision // Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami Beach, FL, 1986. P. 364–37.
- [6] OpenGL Projection Matrix URL: http://www.songho.ca/opengl/gl_projectionmatrix.html.
- [7] Roger Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses // IEEE J. of Robotics and Automation. 1987. Vol. RA-3, N 4. P. 323–344.
- [8] Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion URL: https://www.researchgate.net/publication/260251570_Automatic_generation_and_detection_of_highly_reliable_fiducial_markers_under_occlusion
- [9] Bay, H., A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool. “SURF: Speeded Up Robust Features.” Computer Vision and Image Understanding (CVIU). Vol. 110, No. 3, pp. 346–359, 2008.
- [10] Rublee, Ethan, et al. “ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF.” Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011.
- [11] Alahi, Alexandre, Raphael Ortiz, and Pierre Vanderghyest. “Freak: Fast retina keypoint.” Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012.
- [12] Calonder, Michael, et al. “Brief: Binary robust independent elementary features.” Computer Vision—ECCV 2010. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 778–792.
- [13] Leutenegger, Stefan, Margarita Chli, and Roland Y. Siegwart. “BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints.” Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011.
- [14] Gil Levi and Tal Hassner, LATCH: Learned Arrangements of Three Patch Codes, IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Lake Placid, NY, USA, March, 2016.
- [15] Sus, B., Tmienova, N., Revenchuk, I., Vialkova, V. Development of virtual laboratory works for technical and computer sciences. -Communications in Computer and Information Science, 2019, 1078 CCIS, pp. 383–394.
- [16] Julie Jebeile. Explaining with Simulations: Why Visual Representations Matter, 2018-Perspectives on Science 26 (2): 213-238.
- [17] Chodos, D., Stroulia, E., & King, S. (2011). Developing a virtual-world simulation. In Proceedings of the 3rd Workshop on Software Engineering in Health Care (pp. 71–78). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1987993.1988007.
- [18] U. Technologies, “Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D VR & AR Visualizations.” <https://unity.com/>, last accessed 2020/01/28
- [19] Sus, B., Revenchuk, I., Tmienova, N., Bauzha, O., Chaikivskiy, T. Software System for Virtual Laboratory Works.- 2020 IEEE 15th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2020 — Proceedings, 2020, 1, pp. 396–399.
- [20] Sus, B., Revenchuk, I., Bauzha, O., Zagorodnyuk, S. Virtual laboratory as custom e-learning implementation and design solution.- CEUR Workshop Proceedings, 2021, 2833, pp. 177–187.