

УДК 004.93.12

С.В. Яременко, Ю.В. Крак

ПРО ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ МІЖ ПІКСЕЛЯМИ КАМЕРИ ТА ПРОЄКТОРА У МУЛЬТИМЕДІЙНОМУ ТИРІ

Яременко Сергій Володимирович

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
yaserg555@gmail.com

Крак Юрій Васильович

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Інсти-
тут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,
yuri.krak@gmail.com

Предметом вивчення в статті є геометричні перетворення у системі «проектор–екран–камера» для визначення відповідності між пікселями камери і проектора у мультимедійному тирі. Метою є розробка математичної моделі та алгоритму визначення відповідності між пікселями камери і проектора. Це потрібно для співставлення положення центроїда лазерної плями від пострілу в матриці камери і мішені, що генерується у матриці проектора. Завдання: формалізувати задачу виникнення геометричних спотворень у системі «проектор–екран–камера»; розробити математичну модель визначення відповідності між пікселями камери і проектора; вибрати ефективний алгоритм її вирішення. Використовуваними методами є: математична модель вирівнювання зображення на основі гомографії, метод бінаризації з вибором значення порога методом Оцу; метод Дугласа–Пекера, який зменшує кількість точок, що апроксимують криву. Отримано такі результати. Згідно аналізу геометричних спотворень у системі «проектор–екран–камера» сформульовано задачу розробки моделі для вирівнювання зображення з метою визначення відповідності між пікселями камери і проектора. Розроблено математичну модель і алгоритм вирівнювання точок зображення мішені у матриці камери з точками зображення мішені у матриці проектора. Розроблено і програмно реалізовано алгоритм визначення відповідності між пікселями камери і проектора. Математичні залежності для визначення відповідності між пікселями камери і проектора встановлено на основі матриці гомографії. Коефіцієнти матриці обчислюються за відповідними кутовими точками прямокутника матриці проектора і його спотвореного трапецеїдального зображення на матриці камери. Розроблено алгоритм автоматичного визначення вершин трапеції та встановлення відповідності між пікселями камери і проектора. Проведено аналіз та експериментальні дослідження факторів, що впливають на точність алгоритму: точність визначення вершин

трапеції, за якими знаходяться коефіцієнти матриці гомографії; ступінь заповнення області огляду камери зображенням із проєктора; відповідність роздільної здатності камери і проєктора. Дано рекомендації щодо зменшення їхнього впливу. Зроблено такі висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: розроблено і експериментально досліджено математичну модель визначення відповідності між пікселями камери і проєктора у мультимедійному тирі через вирівнювання зображення, що відображається з екрана проєктора у камері, на основі гомографії. До цього для вирівнювання зображень у мультимедійному тирі використовувалась модель на основі 2D-перетворень, у якій взаємне положення у просторі проєктора, екрана і камери не враховується. Оскільки у гомографії враховуються тільки лінійні перетворення, у подальшому планується удосконалити модель — врахувати нелінійні спотворення, що виникають у об'єктивах камери і проєктора.

Ключові слова: перетворення, піксель, проєктор, гомографія, мультимедійний тир, вирівнювання зображення.

Вступ

Модель системи «проєктор–екран–камера» знаходить широке практичне застосування [1–3]. Один із прикладів використання такої системи — мультимедійний тир (рис. 1), принцип роботи якого полягає у наступному [4, 5].

- Комп'ютерна програма через проєктор генерує на демонстраційному екрані мішені.
- Стрільць робить постріл у мішень зі зброї, яка обладнана лазером.
- Пляма від лазерного променя відображається у площині фотосенсора.
- Програма визначає координати центроїда плями у СК камери і перетворює їх на СК проєктора.
- Програма визначає точність пострілу, зіставляючи координати центроїда плями і мішені.
- При попаданні у ціль програма генерує ефект від пострілу (вибух).

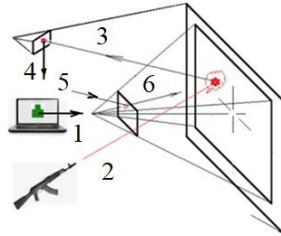


Рис. 1

Основна проблема при моделюванні системи «проєктор–екран–камера» — визначення відповідності між точками матриць камери і проєктора (рис. 2).

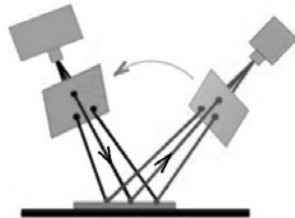


Рис. 2

Ефективне розв'язання цієї проблеми ускладнюється вибором взаємного розташування проектора, екрана і камери. Ідеальним вважається таке розташування, за якого центральні осі проектора і камери збігаються і перпендикулярні до площини екрана. Однак забезпечити таке розташування практично дуже складно. У результаті на матриці камери отримується зображення із так званими трапецеїдальними спотвореннями (рис. 3). Воно вирівнюється перед зіставленням із зображенням, що є на матриці проектора, через використання методів 2D-перетворень [6, 7].



Рис. 3

Постановка задачі

У даній роботі поставлено задачу більш ефективного визначення відповідності між пікселями камери і проектора у мультимедійному тирі через вирівнювання зображення із використанням методів 3D-перетворень. Мета роботи — розробка математичної моделі й алгоритму визначення відповідності між пікселями камери і проектора на основі гомографії [8].

Математична модель системи «проектор–екран–камера» на основі гомографії

Гомографія — це окремий випадок моделі фундаментальних проєктивних перетворень, коли об'єкти сцени знаходяться у площинах і важливі застосування гомографії (вирівнювання зображень, двокамерне зіставлення зображень тощо).

Розглянемо ці застосування гомографії у контексті вирішення поставленої задачі. Геометрична модель проектора побудована на тих самих фізичних принципах, що і камера (модель камери-обскури), тому схематично систему «проектор–екран–камера» можна подати наступним чином (рис. 4).

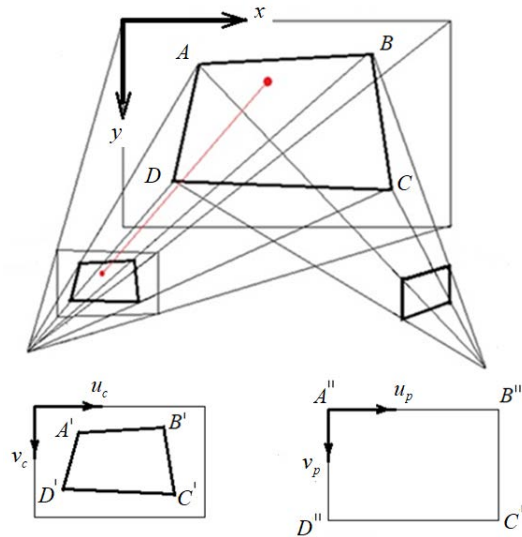


Рис. 4

Спочатку визначимо відповідність між точками у площинах:

- матриць проєктора та екрана;
- матриць камери та екрана.

У обох випадках відповідність визначається аналогічними залежностями через матрицю гомографії H із вісьмома параметрами:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При відображенні у зворотному напрямку, тобто від координат екрана до координат камери (або проєктора), використовується обернена матриця гомографії:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Прирівняємо відповідні проєкції точок на екран, отримані від проєктора і камери, використовуючи залежність (2). Це дозволяє вилучити координати (x, y) і отримати залежності безпосередньо між координатами проєктора (u_p, v_p) і камери (u_c, v_c) через матриці гомографії H_p і H_c :

$$H_p^{-1} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = H_c^{-1} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

У рівнянні (3) виразимо явно координати u_p, v_p щодо координат u_c, v_c , враховуючи, що обернена матриця ортогональна, тому

$$HH^{-1} = H^{-1}H = E, \quad (4)$$

де E — одинична матриця.

Звідси (4) запишемо остаточний вираз (5) для перетворення координат точок із площини камери у площину проектора:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = H_{cp} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де матриця $H_{cp} = H_p H_c^{-1}$ така сама за структурою матриця із вісьмома параметрами, як і матриця гомографії H у виразі (1).

Коефіцієнти матриці гомографії H_{cp} можна визначити за проєкціями чотирьох відповідних точок (див. рис. 4) на площину камери (A', B', C', D') та проектора (A'', B'', C'', D'') (рис. 5, інтерфейс програми «Визначення гомографії за чотирма точками»).

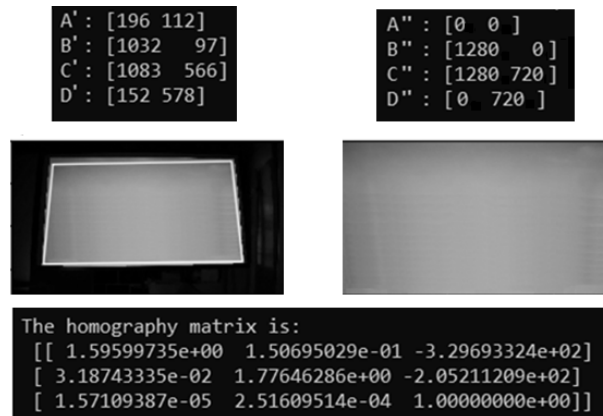


Рис. 5

Як відповідні точки використовуються вершини трапеції на площині матриці камери і прямокутника, розміри якого дорівнюють розмірам матриці проектора.

Алгоритм вирівнювання зображення

Алгоритм обробки зображення для встановлення відповідності між пікселями камери і проектора складається з таких кроків.

- Фільтрація зображення (реалізується OpenCV-функцією `cv2.GaussianBlur`).
- Бінаризація зображення із вибором порога за методом Оцу (`otsu's thresholding`) [9]. Метод Оцу реалізується функцією `cv2.threshold`, у якій `cv2.THRESH_OTSU` передається як параметр-прапорець.
- Апроксимація зовнішніх контурів (`cv2.findContours`).
- Знаходження кутових точок найбільшого контуру (`cv2.approxPolyDP`).
- Сортування кутових точок контуру — встановлення порядку обходу вершин контуру (A, B, C, D).
- Визначення матриці гомографії (`cv2.findHomography`) за чотирма відповідними точками (див. рис. 5) та вирівнювання зображення (`cv2.warpPerspective`).

Розглянемо більш детально описані етапи роботи алгоритму.

Щоб позбавитись шумів, використовується (6) оператор згладжування Гауса:

$$G = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}. \quad (6)$$

При згладжуванні усуваються шуми, проте округляються кути контуру (рис. 6, визначення порогу бінаризації методом Оцу), що призводить до наближеного визначення вершин трапеції.

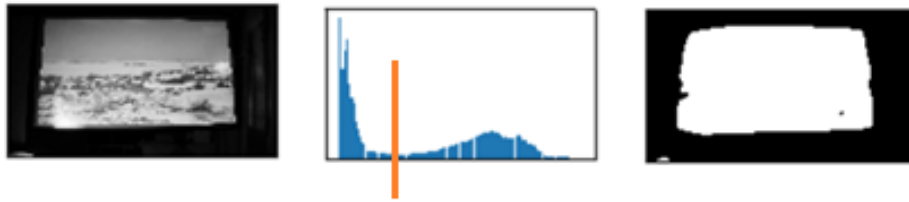


Рис. 6

Відзначимо, що точність вирівнювання зображення істотно залежить від точності визначення вершин трапеції, тому необхідно робити оптимальний вибір величини параметра σ (приймаємо $\sigma = 1$).

Бінаризація зображення (thresholding) проводиться із автоматичним вибором значення порога бінаризації (див. рис. 6) методом Оцу [9].

За довільного встановлення порога вибране значення може підійти для одного зображення і бути неоптимальним для іншого. На відміну від цього метод Оцу автоматично знаходить значення порога посередині між двома піковими значеннями гістограми зображення. Алгоритмом знаходження порога бінаризації за цим методом передбачається, що зображення містить два класи пікселів із бімодальною гістограмою (коли є тільки пікселі переднього плану та пікселі фону). Таке припущення не завжди виконується, тому для ефективного реалізації методу Оцу потрібні рівномірне освітлення і відсутність відблисків на зображенні.

Апроксимація контурів. Контур визначається точками між двома областями з відносно різним рівнем інтенсивності кольору. Контурів на зображенні може бути отримано декілька. У OpenCV функція `cv2.findContours` зберігає всі контури у вигляді масивів. Функція `sorted(contours, key = cv2.contourArea, reverse = True)` [0] відсортовує контури в ієрархії за розміром площини і вибирає контур із найбільшою площею за індексом 0.

Знаходження кутових точок контуру. Функція `cv2.approxPolyDP(cnt, epsilon, True)` реалізує алгоритм Дугласа–Пекера [10], який зменшує число точок, що апроксимують криву, — у залежності від зазначеної величини параметра ϵ (рис. 7).

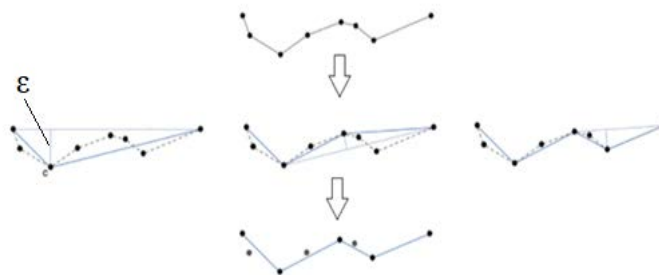


Рис. 7

Вхід до алгоритму — це координати всіх точок між першою і останньою (разом із ними), а також значення параметра ϵ . За допомогою алгоритму знаходиться точка, яка найбільш віддалена від відрізка, що з'єднує першу та останню точки. Якщо ця точка знаходиться на меншій відстані, ніж ϵ , то всі точки, які є на зазначеному проміжку, видаляються із набору точок. Якщо ця відстань більша, ніж па-

раметр ϵ , то ця точка запам'ятовується. Потім функція, що реалізує алгоритм, рекурсивно викликає себе для вибірок із двома іншими парами точок — початковою і тією, що була знайдена, а також кінцевою і тією, що була знайдена. Після всіх рекурсивних викликів вихідна ламана будується тільки із тих точок, які були збережені. При відповідному виборі величини параметра ϵ залишаються тільки кутові точки. Щоб отримати необхідний результат, потрібно зробити правильний вибір величини параметра ϵ . Рекомендується вибирати параметр ϵ пропорційно до периметра контуру.

Оцінка факторів, що впливають на точність алгоритму

Серед факторів, що впливають на точність алгоритму визначення відповідності між пікселями камери і проектора, виділимо наступні.

- Точність визначення кутових точок контуру трапеції.
- Ступінь заповнення області огляду камери.
- Відповідність дозволів камери і проектора.

Для оцінки залежності точності алгоритму від точності визначення кутових точок контуру трапеції був проведений наступний експеримент. На основі матриці гомографії вирівняли трапецієподібне зображення шахівниці за чотирма вершинами контуру (рис. 8) і визначили після цього координати декількох точок (чотири точки по діагоналі шахівниці, позначені на рис. 8 колами).

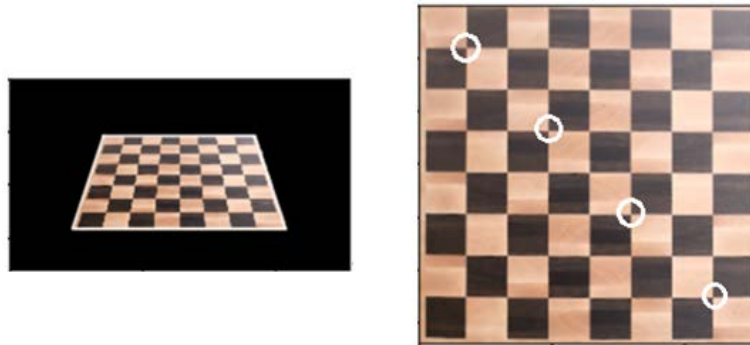


Рис. 8

Далі для отримання матриці гомографії використовувались трапеції зі зсувами однієї з вершин від контуру шахівниці на відстань d (рис. 9).

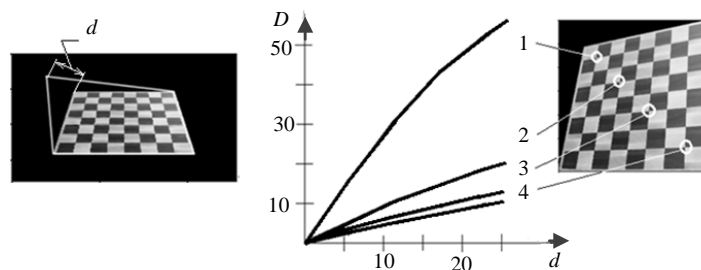


Рис. 9

У результаті такої обробки зображення шахівниці на виході не вирівнюється належним чином, оскільки матриця гомографії визначається некоректно. Знаходимо на вихідному зображенні шахівниці координати чотирьох діагональних то-

чок і визначаємо відстань D до їхнього ідеального положення (див. рис. 8). На рис. 9 наводяться графічні залежності, які показують, як впливає похибка визначення кутової точки на точність визначення інших точок. Для точки 1, яка знаходиться поблизу некоректно заданої вершини трапеції, похибка відповідає похибці визначення самої вершини. Похибки інших точок зменшуються, коли збільшується відстань до вершини, що була задана некоректно.

Таким чином, точність вирівнювання зображення істотно залежить від точності визначення вершин трапеції, за якими обчислюється матриця гомографії. Зі свого боку на точність визначення вершин у великій мірі впливає ступінь згладжування зображення. При згладжуванні усуваються шуми, проте округляються кути контуру, що призводить до наближеного визначення вершин трапеції. Тому при визначенні матриці гомографії необхідно використовувати яскраві однотонні зображення трапеції, що чітко виділяються на загальному тлі [11]. Це дозволить зменшити ступінь згладжування зображення, а отже, підвищити точність визначення коефіцієнтів матриці гомографії.

Дослідимо вплив на точність алгоритму рівня заповненості області огляду камери. Для цього спочатку зменшуємо масштаб шахівниці на оригінальному зображенні ($M = 100\%$) до $M = 50\%$ і $M = 25\%$. Потім визначаємо середню арифметичну похибку D (у пікселях) точок шахівниці (одна з точок позначена на малюнку колом) у порівнянні з вихідним зображенням ($M = 100\%$). Коли шахівниця була зменшена на зображенні до $M = 50\%$, похибка $D = 9$, коли $M = 25\%$, похибка $D = 15$. Як бачимо, точність визначення відповідності між точками оригінального зображення і зображення, що вирівнюється, при зменшенні заповненості області огляду камери істотно знижується. Це викликано, перш за все, зменшенням розмірів трапеції, а отже, і точності визначення її вершин. Зі свого боку це призводить до некоректності визначення коефіцієнтів матриці гомографії.

Перейдемо до аналізу впливу на точність алгоритму роздільної здатності камери і проєктора. Гомографія визначається тільки із точністю до масштабного коефіцієнта. Якщо роздільна здатність проєктора і камери однакові, то $M = 1$. Якщо роздільні здатності камери і проєктора не співпадають, то це можна програмно врахувати і конвертувати, наприклад, вхідне зображення $1024 * 768$ на матриці камери у $800 * 600$ -піксельне зображення на матриці проєктора.

Конвертація реалізується через інтерполяцію — створення нових точок у діапазоні дискретного набору відомих точок [12, 13]. Від якості інтерполяції може залежати точність визначення контуру трапеції, а отже, і точність визначення коефіцієнтів матриці гомографії. Відзначимо важливість якісного виділення контурів при вирішенні різних графічних задач [14–17]. Інтерполяція зображення відноситься до прогнозування значень інтенсивності нових точок і усереднення інтенсивності, де кількість точок надмірна. Очевидно, що усереднення є більш точним у порівнянні з прогнозуванням.

Слід зауважити, що при вирівнюванні трапеції завжди інтерполюються нові точки, оскільки трапеція перетворюється на прямокутник. Якщо трапеція в повному обсязі з надлишком перекривається роздільною здатністю камери, то рекомендується використовувати камеру більш високої роздільної здатності у порівнянні з роздільною здатністю проєктора. Також для зменшення впливу інтерполяції на точність визначення відповідності точок проєктора і камери рекомендується за можливості прагнути до ідеального розташування проєктора, камери і екрана — коли центральні осі проєктора і камери збігаються і спрямовані перпендикулярно до площини демонстраційного екрана. Результати стрільб з бойової зброї після навчання на тренажері можуть бути наведені в таблиці як на екрані ноутбука, так і за допомогою вебдодатка для тренування [18].

Висновок

Розроблено модель системи «проектор–екран–камера» для визначення відповідності між точками зображень у матрицях камери і проектора на основі гомографії. Ця модель використана в алгоритмі автоматичного визначення відповідності між точками зображень камери і проектора. Проведено аналіз і експериментальні дослідження факторів, що впливають на точність алгоритму, і надано відповідні рекомендації.

У подальших роботах необхідно досліджувати можливості підвищення точності визначення відповідності між точками зображень у матрицях камери і проектора за рахунок їх спільного калібрування.

S. Yaremenko, Yu. Krak

ABOUT THE APPROACH TO DETERMINING ON THE BASIS OF HOMOGRAPHY THE CORRESPONDENCE BETWEEN THE PIXELS OF THE CAMERA AND THE PROJECTOR IN A MULTIMEDIA SHOOTING GALLERY

Serhii Yaremenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
yaserg555@gmail.com

Yurii Krak

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine, Kyiv,
yuri.krak@gmail.com

The subject of the article is geometric transformations in the system «projector–screen–camera» to solve the problem of determining the correspondence between the pixels of the camera and the projector in the multimedia shooting range. The aim is to develop a mathematical model and algorithm for determining the correspondence between the pixels of the camera and the projector. This is required to compare the position of the centroid of the laser spot from the shot in the matrix of the camera and the target generated in the matrix of the projector. Tasks: to formalize the problem of geometric distortions in the system «projector–screen–camera»; develop a mathematical model for determining the correspondence between the pixels of the camera and the projector; choose an effective algorithm for its solution. The methods used are: mathematical model of image alignment based on homography, binarization method with the choice of the threshold value by the Otsu method; the Douglas–Packer method, which reduces the number of points that approximate the curve. The following results were obtained. According to the analysis of geometric distortions in the «projector–screen–camera» system, the task of developing a model for image alignment in order to determine the correspondence between the pixels of the camera and the projector is formulated. A mathematical model and algorithm for aligning the target image points in the camera matrix with the target image points in the projector matrix have been developed. An algorithm for determining

the correspondence between the pixels of the camera and the projector has been developed and software implemented. Mathematical dependences to determine the correspondence between the pixels of the camera and the projector are set on the basis of the homography matrix. The matrix coefficients are calculated from the corresponding angular points of the rectangle of the projector matrix and its distorted trapezoidal image on the camera matrix. An algorithm for automatically determining the vertices of a trapezoid and matching the pixels of the camera and projector has been developed. The analysis and experimental researches of the factors influencing accuracy of algorithm are carried out: accuracy of definition of vertices of a trapezoid on which there are coefficients of a matrix of a homography; the degree to which the viewing area of the camera is filled with images from the projector; matching the resolution of the camera and projector. Recommendations for reducing their impact are given. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results is as follows: we developed and experimentally investigated a mathematical model for determining the correspondence between the pixels of the camera and the projector in the multimedia dash by aligning the image displayed from the projector screen in the camera, based on homography. Previously, a 2D-based model was used to align images in the multimedia dash, which does not take into account the relative position in the space of the projector, screen and camera. Since homography takes into account only linear transformations, it is planned to further improve the model — to take into account nonlinear distortions that occur in the lenses of the camera and projector.

Keywords: transform, pixel, projector, homography, multimedia shooting gallery, image alignment.

1. Алексеев В.Ю., Бобарчук О.А., Соловйова Н.А., Яременко В.А., Яременко С.В. Тренажер інтерактивний лазерний для тренування стрільби зі стрілецької зброї: пат. 126776 Україна : МПК F41G 3/26 ; заявл. 15.03.2018 ; опубл. 10.07.2018, Бюл. № 9/2018. 38 с.
2. Абрамов С.К., Абрамова В.В., Абрамов К.Д., Лукин В.В., Бондарь В.В., Калужин И.В. Методика определения поля обнаружения беспилотных летательных аппаратов наземным наблюдателем. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 3. С. 36–42. DOI: 10.32620/reks.2020.3.04.
3. Sumit A. Guthe, Prof. P.M. Soni. Target shooting training and instructive system model using Python. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2016. Vol. 5, № 5. P. 594–597. DOI: 10.17577/ijertv5is050902.
4. Świdorski W., Głogowski T., Hłosta P., Stepniak S. IR detection of impact places of projectiles in the training system «Śnieżnik». *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*. 2018. Vol. 9, № 2. P. 99–110. DOI: 10.5604/01.3001.0012.1104.
5. Тулякова Н.О., Трофимчук А.Н. Локально-адаптивная фильтрация нестационарного шума в длительных электрокардиографических сигналах. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 4. С. 16–33. DOI: 10.32620/reks.2020.4.02.
6. Li Z. Wong K.-H., Gong Y., Chang M.-Y. An effective method for movable projector keystone correction. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2011. Vol. 13, № 1. P. 155–160. DOI: 10.1109/tmm.2010.2092421.
7. Xu W., Wang Y., Liu Y., Weng D., Tan M., Salzmann M. Real-time keystone correction for hand-held projectors with an RGBD camera. *2013 20th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. (September 15–18, 2013, Melbourne). Melbourne : IEEE, 2013. P. 3142–3146. DOI: 10.1109/icip.2013.6738647.
8. Hamel T., Mahony R., Trumpf J., Hua M.-D., Morin P. Homography estimation on the Special linear group based on direct point correspondence. *2011 50th IEEE Conference on Decision and*

- Control and European Control Conference (CDC-ECC 2011)*. (December 12–15, 2011, Orlando). Orlando : IEEE, 2011. P. 7902–7908. DOI: 10.1109/cdc.2011.6160724.
9. Feng Y., Zhao H., Li X., Zhang X., Li H. A multi-scale 3D Otsu thresholding algorithm for medical image segmentation. *Digital Signal Processing*. 2017. Vol. 60. C. 186–199. DOI: 10.1016/j.dsp.2016.08.003.
 10. Douglas D.H., Peucker T.K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. 1973. Vol. 10, № 2. C. 112–122. DOI: 10.3138/fm57-6770-u75u-7727.
 11. Tlebaldinova A.S., Krak Y.V., Barmak A.V., Denisova N.F. Localization and recognition of vehicle number plates by means of the method of support vector machine and histograms of oriented gradients. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2015. Vol. 47, № 10. C. 24–31. DOI: 10.1615/jautomatinfscien.v47.i10.30.
 12. Yaremenko S., Krak I. Determination of the position of the laser spot in the plane of the photo sensor of the multimedia shooting gallery. *IEEE EUROCON 2021 — 19th International Conference on Smart Technologies*. (July 6–8, 2021, Lviv). Lviv : IEEE, 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/eurocon52738.2021.9535549.
 13. Freedman G., Fattal R. Image and video upscaling from local self-examples. *ACM Transactions on Graphics*. 2011. Vol. 30, № 2. P. 1–11. DOI: 10.1145/1944846.1944852.
 14. Науменко В.В., Тоцький О.В., Коваленко Б.В., Анісін Є.М. Оцінка ефективності виявлення неоднорідностей на зображенні за допомогою максимуму біамплітуди. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 3. С. 27–35. DOI: 10.32620/reks.2020.3.03.
 15. Єремєєв О.І., Лукін В.В., Окарма К. Комбінована метрика візуальної якості зображень дистанційного зондування на основі нейронної мережі. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 4. С. 4–15. DOI: 10.32620/reks.2020.4.01.
 16. Meteshkin K.O., Morozova O.I., Pomortseva O.Ye. The results of department educational processes reengineering in dual and digital education concepts. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2021. № 1. С. 92–100. DOI: 10.32620/reks.2021.1.08.
 17. Абрамов С.К., Абрамова В.В., Кривенко С.С., Лукін В.В. Анализ и прогнозирование эффективности фильтрации одномерных сигналов на основе дискретного косинусного преобразования. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2019. № 3. С. 19–29. DOI: 10.32620/reks.2019.3.02.
 18. Лещенко О.Б., Хлюпіна А.С., Богдан Д.О. Веб-додаток для ведення щоденника харчування та тренування: вимоги, розроблення і впровадження. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2018. № 3. С. 49–62. DOI: 10.32620/reks.2018.3.06.

Отримано 10.08.2022