

Компьютерное моделирование изображений кодовых маркеров для оценки точности определения положения объекта в пространстве

Н.Ю. Сивов¹, А.Ю. Поройков¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Красноказарменная улица, д. 14, Москва, 111250, Россия

Аннотация

Кодовые маркеры (англ. fiducial markers) широко используются в системах технического зрения. Одним из основных способов их применения является оценка относительного положения камеры и маркера в пространстве. Последние представляют собой визуальные искусственные объекты, которые предназначены для их робастного обнаружения среди других объектов окружения на изображениях. Примеры оценки точности кодовых маркеров встречаются во многих исследованиях. Обычно такие исследования проводятся для одной или двух-трех систем кодовых маркеров. А оценки точности приводятся только для конкретных параметров системы технического зрения, которая проектируется авторами работы. Такой подход не является универсальным, и для других параметров необходимо проводить оценку погрешности заново. В работе представлен подход к определению погрешности для сравнения большего количества систем кодовых маркеров между собой с помощью более универсальных метрик. Для этого было проведено компьютерное моделирование изображений кодовых маркеров для пяти различных систем с различной пространственной ориентацией. Изображения были обработаны с помощью алгоритмов детектирования, предлагаемых авторами систем маркеров. Результаты обработки сравнивались с заданными параметрами при моделировании. Были получены оценки относительной погрешности для пяти различных систем кодовых маркеров.

Ключевые слова

Кодовые маркеры, оценка погрешности, ориентация в пространстве, компьютерное моделирование, ARToolKitPlus, ArUco, ChiliTag, STag, AprilTag.

Computer Modeling of Fiducial Markers Images to Estimate the Accuracy of Object Positioning in Space

N.Yu. Sivov¹, A.Yu. Poroykov¹

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, Moscow, 111250, Russia

Abstract

Fiducial markers are widely used in machine vision systems. One of the main ways of their application is to estimate the relative position of the camera and marker in space. The latter are visual artificial objects, which are designed for their robust detection among other objects in the environment of the images. Examples of fiducial marker accuracy estimation are found in many studies. Usually such studies are conducted for one or two or three code marker systems. And accuracy estimates are given only for specific parameters of the machine vision system, which is designed by the authors of the work. This approach is not universal, and for other parameters it is necessary to carry out the error estimation again. This paper presents an approach to determining

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: nikita.sivov@mail.ru (Н.Ю. Сивов); poroykovay@gmail.com (А.Ю. Поройков)

ORCID: 0000-0002-3120-7325 (Н.Ю. Сивов); 0000-0002-9284-1397 (А.Ю. Поройков)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

the error for comparing more fiducial marker systems with each other using more universal metrics. For this purpose, computer simulations of marker images were performed for five different systems with different spatial orientations. The images were processed using detection algorithms proposed by the authors of the marker systems. The processing results were compared with the specified parameters in the simulations. Relative error estimates were obtained for the five different code marker systems.

Keywords

Fiducial markers, error estimation, orientation in space, computer simulation, ARToolKitPlus, ArUco, ChiliTag, STag, AprilTag.

1. Введение

Кодовые маркеры или метки (англ. fiducial markers) представляют собой набор визуальных искусственных объектов, предназначенных для робастного обнаружения их среди других объектов окружения на изображениях. Они используются для широкого круга задач: компьютерное зрение, дополненная реальность (AR) [1], робототехника [2], калибровка камер [3] и во многих других областях.

Кодовые маркеры являются доступным и точным способом определения трехмерного положения камеры относительно самого маркера. Они могут применяться как внутри помещений, так и на открытом пространстве. Системы кодовых маркеров обычно состоят из самих меток, алгоритма их обнаружения и кодовой базы, которые вместе обеспечивают робастное нахождение меток в пространстве. Для оценки положения во всех системах используются геометрические особенности меток, которые позволяют найти их среди других объектов и определить их положение относительно камеры. Следовательно, точность обнаружения связана с точностью локализации специфичных элементов метки. Конечная точность работы систем кодовых маркеров также зависит от качества используемых при получении изображений цифровых камер.

Вопросам оценки погрешности определения положения маркеров посвящено ряд работ. В работе [4], одной из наиболее ранних и содержательных работ, проведено сравнение нескольких типов меток. Однако они рассматриваются с точки зрения применения в технологии дополненной реальности, так как их применение для определения положения в пространстве для робототехнических систем еще не было широко развито. Примерно в это же время похожие результаты были получены в [5-9]. Отдельно стоит отметить работу [10], где было проведено исследование погрешности определения маркеров для подводного применения.

Одной из наиболее современных работ является [11]. В ней проведено физическое моделирование для определения положения четырех систем кодовых маркеров относительно камеры. В работе представлено большое количество результатов, но они были получены для конкретных параметров, и поэтому не могут быть использованы на практике для других случаев. Несмотря на обилие работ по оценке точности нахождения пространственного положения кодовых меток в пространстве, вопрос определения погрешности для сравнения систем кодовых маркеров между собой с помощью универсальных метрик остается открытым. Эта работа является продолжением исследований, описанных в [12].

2. Моделирование кодовых маркеров и обработка результатов

В нашей работе для оценки погрешности систем кодовых маркеров было проведено компьютерное моделирование их изображений в программном обеспечении Unity 3D [13]. Были созданы компьютерные модели для пяти различных систем кодовых маркеров: ARToolKitPlus [14], ArUco [15], ChiliTag [16], STag [17] и AprilTag [18, 19]. На рисунке 1 представлены примеры смоделированных изображений для этих систем. Для каждой системы были получены наборы изображений с маркерами в различных положениях относительно камеры. Далее наборы были обработаны с помощью алгоритмов детектирования, предлагаемых авторами этих систем. Точки меток, найденные в предыдущем этапе, были использованы для

решения задачи перспективной проекции для N точек (PnP-задача) совместно с известными линейными размерами меток. Решение задачи выполнялось с помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV [20]. Для работы с ней использовалась библиотека OpenCVSharp [21], которая является оберткой для .NET Core. Координаты точек, полученные при решении PnP-задачи, сравнивались с заданными положениями маркеров при моделировании. На основе этого сравнения были построены зависимости, позволяющие оценить, как ошибку отдельной системы, так провести сравнение этих систем между собой.

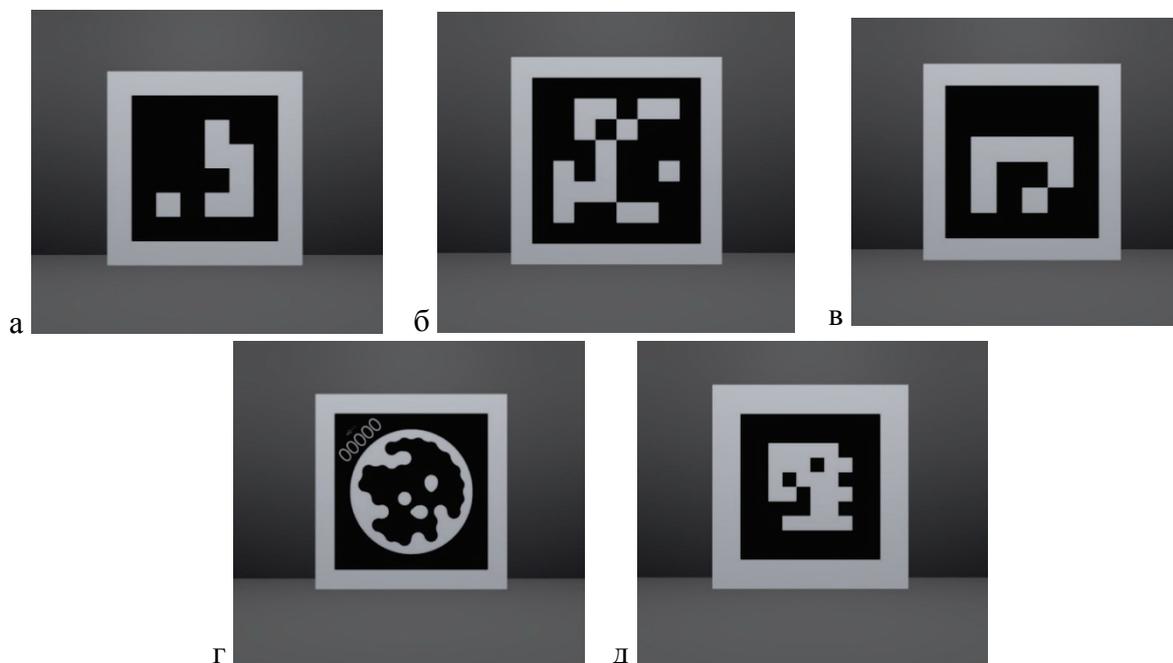


Рисунок 1 – Компьютерные модели маркеров: AprilTag (а), ARToolKitPlus (б), ArUco (в), Stag (г) и ChiliTag (д)

Алгоритм оценки точности определения положения объекта с использованием смоделированных изображений кодовых маркеров состоит из следующих этапов:

1. Получение смоделированных изображений кодовых маркеров с заданными положениями в пространстве.
2. Обработка изображений с помощью алгоритма детектирования соответствующей системы кодовых маркеров.
3. Решение задачи перспективного преобразования с использованием полученных в предыдущем шаге координат вершин маркера на изображении и параметров камеры, заданных при моделировании, для получения матрицы вращения и вектора смещения.
4. Расчет погрешности в определении положения маркера на изображении и в трехмерном пространстве.

3. Результаты моделирования

Компьютерное моделирование проводилось при использовании следующих параметров. Фокусное расстояние объектива равно 19 мм, разрешение матрицы камеры 1920×1080 пикселей. Габариты маркера были равны 0,5×0,5 м. Далее все зависимости представлены для одного номера маркера. В ходе моделирования значительного влияния номера маркера на представленные ниже результаты выявлено не было.

На рисунке 2 представлен график зависимости максимального угла поворота вокруг оси Y при увеличении расстояния между камерой и маркером. Можно заметить, что с увеличением расстояния между камерой и маркером, значение максимального угла поворота, при котором маркер может быть распознан, снижается. Для наглядного представления этой закономерности

были построены линии тренда. Такой характер зависимости связан с тем, что с увеличением расстояния между камерой и маркером, размер маркера на изображении уменьшается. Также стоит учитывать тот факт, что при повороте маркера эффективный размер маркера на изображении также уменьшается, что создает трудности при его детектировании с помощью алгоритма обнаружения. Для вращения маркера вокруг оси X результаты выглядят аналогичным образом.

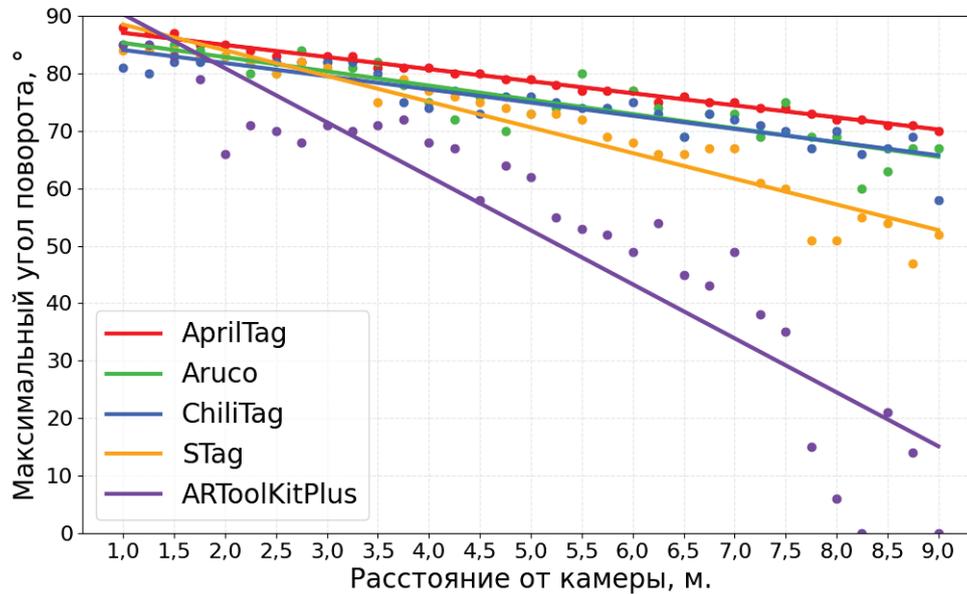


Рисунок 2 – Зависимость угла обнаружения вокруг оси Y от смещения вдоль оси Z

Из представленной зависимости можно увидеть, что для маркеров ARToolKitPlus значение максимального детектируемого угла поворота уменьшается быстрее, чем для других систем. Для систем кодовых маркеров ArUco и ChiliTag снижение значения максимального детектируемого угла поворота составил примерно 25° на моделируемом диапазоне расстояний. Система кодовых маркеров STag продемонстрировала снижения значения максимального угла детектирования вдоль оси Y в 30° , что несколько выше, чем для систем кодовых ArUco и ChiliTag. И самые лучшие результаты показала система маркеров AprilTag со снижением примерно 15° . Представленный результат говорит о том, что система AprilTag наиболее устойчива к увеличению расстояния между камерой и маркером при различных углах поворота из всех рассматриваемых систем.

На рисунке 3 представлена зависимость ошибки репроекции от вращения маркера вокруг оси Y. Ошибка репроекции рассчитывается с помощью следующей формулы

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{d^2(\mathbf{p}_d, \mathbf{p}_r)}{N}}, \quad (1)$$

где $d^2(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ – это квадрат расстояния Евклида между точками двумерных векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} ; \mathbf{p}_d – вектор приведенных в метрическую систему координат вершин маркера на изображении, полученные с помощью алгоритма детектирования; \mathbf{p}_r – вектор трехмерных координат вершин маркера спроецированных на двухмерную систему координат камеры; N – количество проецируемых точек.

Рассчитанное значение ошибки репроекции показывает, насколько проекция для найденных вершин маркера в трехмерном пространстве соответствует координатам маркера на изображении, полученных с помощью алгоритма детектирования системы кодовых маркеров. Подход с расчетом ошибки репроекции позволяет оценить работу алгоритма в реальных условиях, когда нет точной информации о координатах вершин маркера в пространстве. Из графика зависимости, представленного на рисунке 3, видно, что величина ошибки репроекции в

целом увеличивается при увеличении угла поворота вокруг оси Y. Также из данного графика можно определить, что максимальная ошибка репроекции имеет значение около 0,6 пикселя.

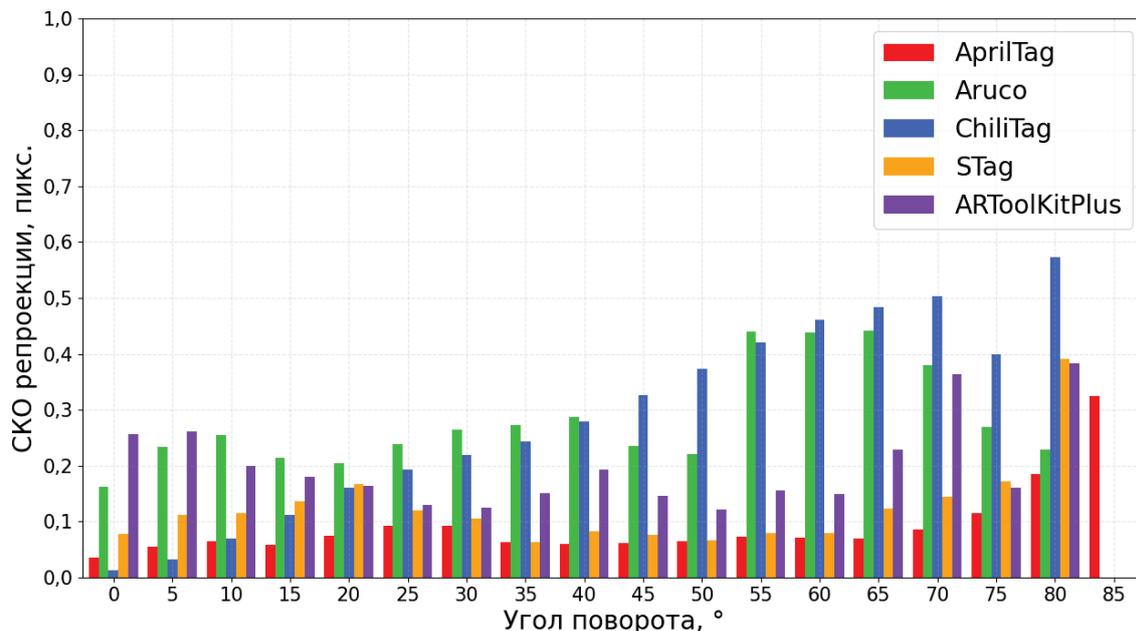


Рисунок 3 – Зависимость СКО репроекции от вращения маркера вокруг оси Y

Использование компьютерного моделирования позволяет оценить не только ошибку репроекции. Так как заданное положение маркера в пространстве относительно маркера известно, то становится возможным оценить среднеквадратичное отклонение (СКО) определяемых координат в пространстве при решении PnP задачи от заданных координат при моделировании. На рисунке 4 представлено сравнение ошибки репроекции с СКО проекции трехмерных координат, заданных при моделировании.

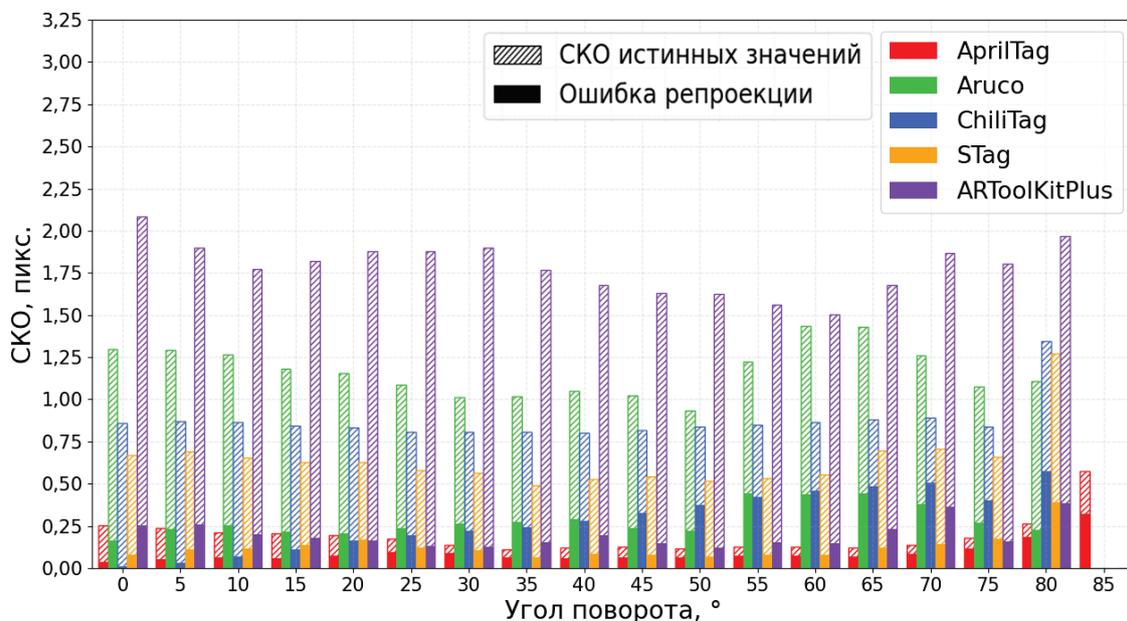


Рисунок 4 – График сравнения ошибки репроекции с СКО координат маркеров при его вращении вокруг оси Y

Из зависимости, представленной на рисунке 4, можно увидеть, что СКО проекции трехмерных координат, найденных алгоритмами, значительно выше, чем ошибка репроекции.

Это объясняется тем, что определяемые трехмерные координаты маркеров отличаются от истинных, и ошибка репроекции не учитывает этого. Максимальное значение для СКО координат маркеров достигает 2 пикселей, что в 4 раза больше, чем ошибка репроекции.

Стоит отметить, что в отличие от результатов на рисунке 3, соотношение величин между различными системами остается одинаковым для практически всех положений, кроме больших углов поворота более 75° . При этом соотношение ошибки репроекции и СКО координат маркеров между различными системами далеко не всегда совпадает. Исходя из этого, можно сделать вывод, что расчет ошибки репроекции хоть и является единственным источником оценки погрешности в реальном эксперименте, однако он не является надежным источником такой информации.

Из графика на рисунке 4 также можно увидеть, что система маркеров ARToolKitPlus имеет самые высокие значения СКО для истинных значений, а также достаточно высокие величины ошибки репроекции. Системы маркеров STag, ArUco и ChiliTag имеют схожие результаты как в СКО для истинных значений, так и для ошибки репроекции. Схожесть результатов для ArUco и ChiliTag может быть связана с тем, что система ChiliTag является улучшенной версией ArUco [16], но может содержать некоторые общие элементы, используемые в алгоритме детектирования. Система маркеров AprilTag обладают наименьшими значениями СКО и ошибки репроекции из уже рассмотренных систем.

С практической точки зрения важно, как соотносятся ошибка репроекции и величина ошибки в определении положения объекта в трехмерном пространстве. Использование такой зависимости существенно бы упростило сравнение кодовых маркеров между собой, а также определение точности локализации без использования точной информации о положении маркера в пространстве. На рисунке 5 представлен график зависимости абсолютной ошибки при вращении маркера вокруг оси Y от ошибки репроекции.

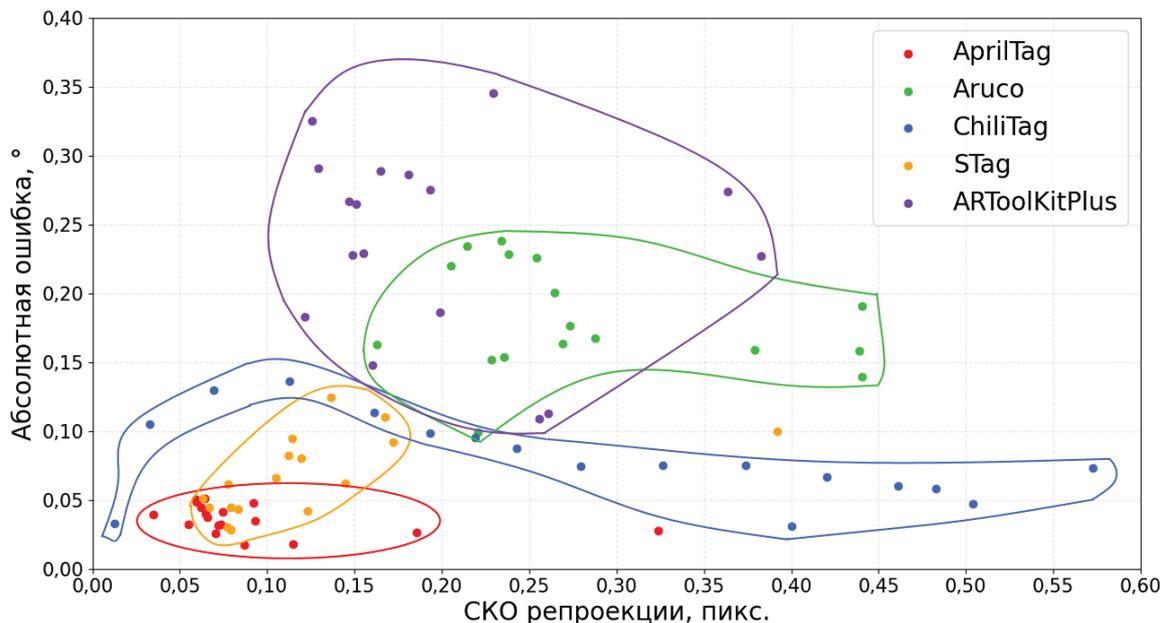


Рисунок 5 – Зависимость абсолютной ошибки в определении положения маркера от ошибки репроекции при повороте вокруг оси Y

Из приведенной зависимости видно, что существует кластеризация данных для различных библиотек кодовых маркеров. В целом можно заметить, что данные для систем кодовых маркеров ARToolKitPlus и ArUco обособленно расположены в середине представленных графиков. В свою очередь маркеры AprilTag и STag расположены в левом нижнем углу графика, что определяется их низкими значениями ошибки репроекции. Для системы кодовых маркеров ChiliTag нет однозначной зависимости величины абсолютной ошибки от ошибки репроекции.

4. Заключение

В данной статье был представлен подход к компьютерному моделированию изображений кодовых маркеров для оценки точности определения положения объекта в пространстве. Для моделирования изображений было использовано программное обеспечение Unity3D. Для определения трехмерных координат маркеров и оценки погрешности была использована библиотека компьютерного зрения OpenCV. Моделирование было проведено для пяти различных систем кодовых маркеров: ARToolKitPlus, ArUco, ChiliTag, STag и AprilTag.

После обработки результатов можно сделать вывод, что:

1. система кодовых маркеров AprilTag обладает наименьшей величиной ошибки среди всех тестируемых систем;
2. системы кодовых маркеров ChiliTag и STag также показали неплохие результаты, но каждая из них имеет свои недостатки;
3. система маркеров ArUco продемонстрировала более высокие значения для всех способов расчета ошибки, чем уже рассмотренные системы;
4. наихудшие результаты в определении положения камеры были получены для системы кодовых маркеров ARToolKitPlus.

В целом, по представленным результатам можно заключить, что точность определения положения с использованием кодовых маркеров связана с точностью локализации отличительных элементов маркера. Для верификации результатов моделирования в будущем планируется провести физическое моделирование с использованием точных устройств для смещения и поворота маркеров на заданные величины.

5. Список источников

- [1] State of the art and future developments of the Augmented Reality for measurement applications / P. Daponte, L. De Vito, F. Picariello, M. Riccio // *Measurement*. 2014. Vol. 57. P. 53–70. DOI:10.1016/j.measurement.2014.07.009.
- [2] Robotic Insertion of Timber Joints using Visual Detection of Fiducial Markers / N. Rogeau, V. Tiberghien, P. Latteur, Yv. Weinand // *Conference: Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2020. P. 491–498. DOI:10.22260/ISARC2020/0068.
- [3] Autonomous Wheels and Camera Calibration in Duckietown Project / K. Krinkin, K. Chayka, A. Filatov, A. Filatov // *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 186. P. 169–176. DOI: 10.1016/j.procs.2021.04.135.
- [4] Zhang X., Fronz S., Navab N. Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study // *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 2002. P. 97–106. DOI:10.1109/ISMAR.2002.1115078.
- [5] Malbezin P., Piekarski W., Thomas B.H. Measuring ARToolKit accuracy in long distance tracking experiments // *The First IEEE International Workshop Augmented Reality Toolkit*. 2002. 2 p.
- [6] Abawi D.F., Bienwald J., Dorner R. Accuracy in Optical Tracking with Fiducial Markers: An Accuracy Function for ARToolKit // *Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. USA: IEEE Computer Society. 2004. P. 260–261. DOI:10.1109/ISMAR.2004.8.
- [7] Pentenrieder K., Meier P., Klinker G. Analysis of Tracking Accuracy for Single-Camera Square-Marker-Based Tracking // *In: Proc. Dritter Workshop Virtuelle und Erweiterte Realitt der GIFachgruppe VR/AR, Koblenz, Germany*. 2006. 15 p.
- [8] Zhenglong G., Qiang F., Quan Q. Pose Estimation for Multicopters Based on Monocular Vision and AprilTag // *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*. 2018. P. 4717–4722.
- [9] López-Cerón A., Canas J.M. Accuracy Analysis of Marker-Based 3D Visual Localization // *In: XXXVII Jornadas de Automatica Workshop*. 2016. 8 p.
- [10] An Evaluation of Artificial Fiducial Markers in Underwater Environments / D.B. dos Santos Cesar [et al.] // *OCEANS 2015 – Genova*. 2015. P. 1–6. DOI:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271491.

- [11] Experimental Comparison of Fiducial Markers for Pose Estimation / M. Kalaitzakis [et al.] // 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2020. P. 781–789. DOI:10.1109/ICUAS48674.2020.9213977.
- [12] Modeling ArUco markers images for accuracy analysis of their 3D pose estimation / Poroykov A., Kalugin P., Shitov S., Lapitskaya I. // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2744. 7 p. (short14) DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-14.
- [13] Unity3D: Unity3D documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (Дата доступа: 23.11.2021).
- [14] Wagner D. Artoolkitplus for pose tracking on mobile devices / In Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop (CVWW'07), February. 2007. P. 139-146.
- [15] Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion / S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, M.J. Marin-Jimenez // Pattern Recognition. 2014. Vol. 47, № 6. P. 2280–2292.
- [16] Chilitags: Robust Fiducial Markers for Augmented Reality. Q. Bonnard, S. Lemaignan, G. Zufferey, A. Mazzei, S. Cuendet, N. Li, P. Dillenbourg. CHILI, EPFL, Switzerland. 2013.
- [17] STag: A Stable Fiducial Marker System/ B. Benligiray; C. Topal; C. Akinlar // Image and Vision Computing. 2017. 28 p.
- [18] Olson E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011. P. 3400–3407. DOI:10.1109/ICRA.2011.5979561.
- [19] Wang J., Olson E. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 4193–4198. DOI:10.1109/IROS.2016.7759617.
- [20] OpenCV: OpenCV documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.opencv.org/4.x/> (Дата доступа: 26.01.2022).
- [21] OpenCVSharp: OpenCVSharp documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://shimat.github.io/opencvsharp_docs/html/d69c29a1-7fb1-4f78-82e9-79be971c3d03.htm (Дата доступа: 22.01.2022).