

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-71-79

УДК 004.94

Компьютерное моделирование влияния параметров оптической системы на погрешность определения ориентации и положения кодового маркера

ЕКАТЕРИНА ВИКТОРОВНА ШМАТКО^{1✉}, НИКИТА ЮРЬЕВИЧ СИВОВ²,
ДАНИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ ЕРЕМИН³, АНТОН ЮРЬЕВИЧ ПОРОЙКОВ⁴

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

¹shmatkoyv@mpei.ru <https://orcid.org/0000-0003-3565-9502>

²sivovny@mpei.ru <https://orcid.org/0000-0002-3120-7325>

³yeremindv@mpei.ru <https://orcid.org/0009-0007-9241-2000>

⁴poroykovay@mpei.ru <https://orcid.org/0000-0002-9284-1397>

Аннотация

Предмет исследования. Влияние параметров оптической системы на погрешность определения ориентации и положения кодовых маркеров. **Цель работы.** Получение зависимостей абсолютной погрешности положения и ориентации маркера от различных факторов. **Метод.** Подход к оценке погрешности системы машинного зрения на основе кодовых маркеров с применением компьютерного моделирования изображений в графической системе Unity 3D. **Основные результаты.** В ходе моделирования синтезировано и обработано более 100 000 изображений кодовых маркеров AprilTag в различных положениях и ориентациях. После обработки результатов моделирования получены зависимости абсолютной погрешности положения и ориентации от расстояния между камерой и маркером, от угла поворота маркера и от фокусных расстояний объектива камеры. **Практическая значимость.** Полученные результаты будут использованы для оптимизации расположения маркеров на платформе, подбора положения видеокамер и фокусных расстояний их объективов, а также внесения изменений в алгоритм обработки изображений в целях повышения точности проводимых измерений на системе обработки алгоритмов ориентации микроспутников.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, кодовый маркер, ориентация и положение объекта в пространстве

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00469.

Ссылка для цитирования: Шматко Е.В., Сивов Н.Ю., Еремин Д.В., Поройков А.Ю. Компьютерное моделирование влияния параметров оптической системы на погрешность определения ориентации и положения кодового маркера // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 71–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-71-79>

Коды OCIS: 120.0120, 100.2000, 100.4145

Computer simulation of the influence of optical system parameters on the error in determining the orientation and position of a fiducial marker

ЕКАТЕРИНА В. ШМАТКО^{1✉}, НИКИТА Ю. СИВОВ², ДАНИЛ В. ЕРЕМИН³, АНТОН Ю. ПОРОЙКОВ⁴

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

¹shmatkoyv@mpei.ru <https://orcid.org/0000-0003-3565-9502>

²sivovny@mpei.ru <https://orcid.org/0000-0002-3120-7325>

³yeremindv@mpei.ru <https://orcid.org/0009-0007-9241-2000>

⁴poroykovay@mpei.ru <https://orcid.org/0000-0002-9284-1397>

Abstract

Subject of study. Influence of optical system parameters on the error of determining the orientation and position of fiducial markers. **Aim of study.** Obtaining the dependences of the absolute error of position and orientation on various factors. **Method.** An approach to assessing the error of a machine vision system based on fiducial markers using computer image modeling in the Unity 3D graphics system. **Main results.** During the simulation, more than 100,000 images of AprilTag markers in different positions and orientations were synthesized and processed. After processing the simulation results, the dependences of absolute position and orientation error on the distance between the camera and the marker, on the marker rotation angle and on the camera focal lengths were obtained. **Practical significance.** The obtained results will be used to optimize the location of markers on the platform, to select the position of video cameras and focal lengths of their lenses, as well as to make changes in the image processing algorithm to improve the accuracy of measurements on the system for the development of microsatellite orientation algorithms.

Keywords: computer simulation, fiducial marker, orientation and position of the object in space

Acknowledgment: this research was funded by the Russian Science Foundation project № 24-21-00469.

For citation: Shmatko E.V., Sivov N.Yu., Eremin D.V., Poroykov A.Yu. Computer simulation of the influence of optical system parameters on the error in determining the orientation and position of a fiducial marker [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 7. P. 71–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-71-79>

OCIS codes: 120.0120, 100.2000, 100.4145

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения положения объекта в пространстве встречается практически во всех областях науки и техники: авиации, космонавтике, медицине, робототехнике, машиностроении и др. Для ее решения применяют различные методы. Самыми перспективными методами определения положения и ориентации объекта являются оптические и инерциальные. Главным недостатком последних является накопление погрешности позиционирования во времени [1]. С помощью оптического метода фотограмметрии можно получать трехмерное положение объекта в пространстве

по его двумерным изображениям. Основными преимуществами являются высокая точность измерений, бесконтактность и скорость измерений [2, 3]. Фотограмметрия используется для определения положения и ориентации, формы поверхности и деформации объектов в задачах, где важна бесконтактность измерений.

В методе фотограмметрии часто применяются две цифровые видеокамеры (бинокулярный подход, или стереозрение) для проведения измерений. Например, в работе [2] пара синхронизированных цифровых высокоскоростных камер применялась для измерения

трехмерного движения модели лопасти ветряной турбины. Но не всегда есть возможность применения стереосистемы камер. Ее применение может быть ограничено различными факторами, например, габаритами измерительной системы или ограниченным оптическим доступом.

Другим широко распространенным методом определения ориентации и положения объектов, но с помощью одной камеры (монокулярный подход) является применение кодовых маркеров (или меток), которые представляют собой несложную геометрическую фигуру (прямоугольник, эллипс) с зашифрованным внутри рисунком (идентификатором). Простая фигура позволяет быстро обнаруживать маркер на изображении, а идентификатор — отличать их друг от друга. Такие метки используются в широком круге задач: компьютерное зрение и дополненная реальность [4], робототехника [5], аэрокосмическая отрасль [6], медицина [7] и др. Кодовые маркеры обладают оптимальным соотношением стоимости системы к точности измерений и часто применяются для задач навигации в робототехнике. Существует множество систем кодовых маркеров, например, AprilTag [8, 9], ArUco [10], CCTag [11]. Они отличаются структурой меток и алгоритмами их поиска на изображениях, соответственно, и точность определения также будет различаться.

Принцип определения положения маркера в пространстве по его изображению основан на решении задачи Perspective-n-Point (PnP) [12]. В ней рассматривается поиск положения камеры относительно объекта с несколькими точками с известными трехмерными координатами в пространстве и соответствующими двумерными координатами на изображении. Наиболее распространенная модель формирования изображения описывается формулой

$$s \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{pmatrix} = A(R | \mathbf{t}) \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix},$$

где x_w, y_w, z_w — координаты точки в мировой системе координат, x_c, y_c — координаты проекции этой точки в пикселах, R — матрица поворота, а r_{11}, \dots, r_{33} — ее коэффициенты, \mathbf{t} — вектор переноса, а t_x, t_y и t_z — его коэффициенты, c_x, c_y — координаты точки пересечения оптической оси и плоскости светочувствительной матрицы, A — матрица камеры, описывающая процесс формирования изображения на матрице, s — масштабный коэффициент, возникающий из-за использования однородных координат. В работе для задания матрицы A используется наиболее широко распространенная модель для описания формирования изображения — модель камеры-обскуры [13]. Коэффициенты этой матрицы определяются с помощью процедуры калибровки видеокamеры и считаются известными в задаче PnP. Также известными считаются координаты (x_w, y_w, z_w) и (x_c, y_c) в нескольких точках объекта. Для этих точек составляется система уравнений, которая решается относительно R и \mathbf{t} . В случае маркеров используются его известные физические размеры и найденные при обработке координаты его внешнего рисунка, например, для маркеров ArUco это будут четыре вершины черного квадрата. Таким образом, используя априорную информацию о размерах маркера, становится возможным определить взаимное расположение маркера и камеры при использовании монокулярного подхода.

Практическим примером использования такого подхода для определения ориентации объекта в пространстве может служить система для отработки алгоритмов ориентации микроспутников формата кубсат (Cubesat) с применением свободновращающейся платформы размером 650×650 мм на основе аэро-статического подшипника [14, 15]. По краям платформы нанесены 16 меток (маркеров) ArUco с известным положением относительно центра платформы. Четыре цифровых видеокamеры расположены вокруг платформы. Они регистрируют изображения синхронно и позволяют оценить ориентацию и скорость вращения платформы по трем осям с погрешностями не более 0,5° и 0,5 град/с соответственно. Исследования, описанные в данной статье, проведены для этой системы.

Одним из основных факторов, интересующих разработчиков оптических систем, явля-

ется погрешность измерений. Это относится и к системам машинного зрения на основе кодовых маркеров. В статьях [16–20] авторами была проведена серия экспериментов в реальных условиях для определения точности позиционирования объекта в пространстве с помощью различных систем кодовых маркеров — ArTag, AprilTag, ArUco, STag. Экспериментально определено, что увеличение расстояния между маркером и камерой, а также уровень освещенности и поворот маркера влияют на точность определения положения маркера. Во всех тестированиях маркеры AprilTag, ArUco, STag обладают высоким показателем обнаружения, который практически всегда превышает 90%.

Характер влияния расположения маркеров на отслеживаемом объекте на измерение положения и ориентации объекта в реальном времени исследовался в работе [20]. Авторы экспериментально выяснили, что изменение расстояния от измерительной системы до объекта с маркерами влияет на результаты определения его положения. Также при некоторых углах поворота положение и ориентация объекта не были распознаны системой верно.

Несмотря на обилие работ по оценке погрешности определения положений кодовых маркеров, подавляющая часть работ оценивает погрешность конкретных измерительных систем с определенными характеристиками, и применить их напрямую для оценки погрешности другой системы нельзя. Поэтому в случае описанной выше системы для отработки алгоритмов ориентации спутников требуется проведение аналогичных исследований.

Для оценки влияния параметров оптической системы на погрешность определения ориентации платформы было решено применить метод компьютерного моделирования. В предыдущей работе уже было проведено компьютерное моделирование для оценки погрешности положения объекта для рассматриваемой системы [21]. В ней моделировалось изображение всей платформы, когда в поле зрения камер попадает сразу несколько маркеров. В данной работе исследуется вклад в погрешность отдельного маркера.

Целью настоящей работы является получение зависимостей абсолютной погрешности положения и ориентации маркера от различных факторов.

1. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КОДОВЫМИ МАРКЕРАМИ

Для анализа воздействия различных факторов на точность определения положения и ориентации маркера было проведено компьютерное моделирование. Схема моделирования представлена на рис. 1. Суть моделирования заключается в изучении зависимостей погрешности определения положения и ориентации от различных факторов. Для этого создается набор данных, в которых определяется положение и ориентация маркера согласно заданному алгоритму в зависимости от цели моделирования. Эти данные затем используются в виртуальной среде Unity3D для получения синтезированных изображений маркера в заданных ориентации и положении (рис. 2).

Полученные смоделированные изображения затем обрабатываются в разработанном программном обеспечении MotionVision. Результатом его работы является набор данных в виде векторов смещения и матриц поворота для каждого изображения. Сравнение этих данных с заданными значениями при моделировании позволяет оценить погрешность их определения.

Для моделирования был выбран словарь 16h5 семейства кодовых маркеров AprilTag [8], содержащий 30 различных маркеров. Для оценки погрешности измерения ориентации использованы углы между заданным углом наклона относительно конкретной оси с измеренным углом наклона относительно этой оси при обработке смоделированного изображения. Для оценки погрешности определения положения маркера использовано евклидово расстояние между заданным положением и определенным при обработке положением маркера.

Дополнительной величиной для оценки погрешности измерений положения или ориентации объекта является погрешность репроекции. Она определяется расстоянием между найденными координатами объекта на изображении и координатами объекта, полученными путем перепроецирования рассчитанных трехмерных координат в двухмерные координаты на изображении. Погрешность репроекции является мерой точности восстановления трехмерной геометрии объекта. Но она не является точной мерой, так как зависит от модели камеры, калибровочных параметров и параметров съемки. Возможен вариант, когда

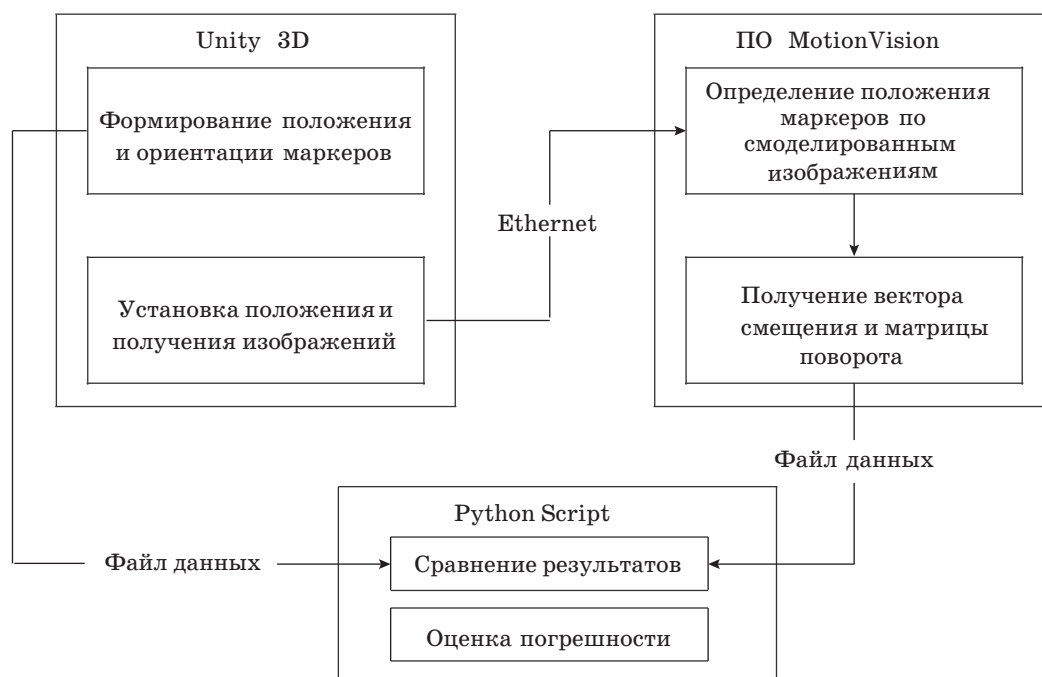


Рис. 1. Схема оценки погрешности на основе моделирования изображений маркеров
Fig 1. Scheme of error estimation based on simulation of marker images



Рис. 2. Примеры смоделированных изображений
Fig. 2. Examples of simulated images

ее малое значение будет соответствовать высокому уровню погрешности измерений [22]. Использование погрешности репроекции объясняется тем, что в реальном эксперименте при проведении измерений есть возможность рассчитать только ее, а сама погрешность измерений является неизвестной величиной.

При моделировании были исследованы следующие факторы, влияющие на погрешность определения положения и ориентации маркера: расстояние от камеры до маркера, ориентация (углы наклона) маркера относительно камеры и фокусное расстояние объектива камеры.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки влияния расстояния между камерой и маркером (по оси Z) на погрешность определения положения расстояние варьировалось от 0,3 до 3,5 м с шагом в 0,1 м. Размер маркера составлял 10×10 см. Фокусное расстояние объектива 8 мм. Чтобы увеличить число измерений на каждом расстоянии, моделировались 32 изображения с небольшим случайным разбросом положения маркера по осям, расположенным параллельно плоскости изображения. Всего было смоделировано

31 680 изображений. Полученная зависимость абсолютной погрешности от расстояния по оси Z представлена на рис. 3.

Из представленного графика видно, что с увеличением расстояния от камеры также возрастает погрешность. Такой результат является ожидаемым, так как при удалении маркера от камеры уменьшается его размер на изображении, что создает трудности его обнаружения алгоритмом детектирования. Также видно, что разброс значений абсолютной погрешности растет с увеличением расстояния. Это говорит о возрастающей неопределенности в точности оценки положения объекта с помощью кодовых маркеров на больших расстояниях. Полученная зависимость хорошо совпадает с аналогичными исследованиями [16–20], хотя и была получена на расстояниях, характерных для рассматриваемой системы.

Оценка влияния ориентации маркера на точность определения положения была проведена при двух углах поворота вокруг осей X и Y . Вращение маркера именно вокруг этих осей наибольшим образом влияет на размер эффективной площади маркера на изображении, которая используется для его идентификации. В моделировании угол поворота маркера вокруг двух осей варьировался от 0 до 90° с шагом 1° на расстояниях от камеры от $0,5$ до $3,5$ м с шагом $0,05$ м. Для каждого расстояния моделировалась 91 ориентация маркера с вращением вокруг осей X и Y от 0 до 90° с шагом 1° и небольшим случайным разбро-

сом положения для увеличения числа измерений. Для вращения вокруг одной оси были смоделированы $19\,111$ изображений. На рис. 4 представлены результаты обработки смоделированных изображений.

Из представленных графиков на рис. 4а видно, что с увеличением угла поворота маркера вокруг осей X и Y абсолютная погрешность имеет тенденцию к увеличению. При углах поворота более 70° измерения становятся более зашумленными. Минимальное значение погрешности находится на уровне $0,06$ м, что объясняется усреднением этого значения при каждом угле поворота по всем расстояниям, используемым в моделировании.

Из рис. 4б видно, что погрешность определения угла имеет максимум при положении маркера перпендикулярно оптической оси камеры. Это можно объяснить наличием неопределенности при решении задачи RnP в случае угла поворота, близкого к нулю. Минимальное значение погрешности имеет в диапазоне углов от 15 до 25° . На рис. 4в видно, что погрешность репроекции слабо возрастает до значения угла поворота 40° , после него происходит более быстрый рост, а результаты измерений становятся более зашумленными.

Далее было проведено моделирование влияния фокусного расстояния объектива камеры на точность определения положения маркера. Моделирование происходило для четырех вариантов стандартного ряда фокусных расстояний: 8 , 12 , 16 и 25 мм. Расстояние от маркера до камеры варьировалось от $0,9$ до $3,5$ м с шагом $0,1$ м. Для каждого расстояния моделировалось 10 положений с небольшим случайным разбросом для увеличения числа измерений. Всего для четырех фокусных расстояний было смоделировано и обработано $32\,400$ изображений. На рис. 5 представлен полученный по результатам моделирования график зависимостей абсолютной погрешности от расстояния по оси Z при различных фокусных расстояниях камеры. Из рисунка видно, что чем больше фокусное расстояние, тем меньше погрешность определения маркера при больших расстояниях. На меньших расстояниях погрешность определения маркера незначительно отличается. Стоит отметить, что моделирование маркеров было начато с расстояния от камеры $0,9$ м, так как при большом фокусном расстоянии узкое поле зрения.

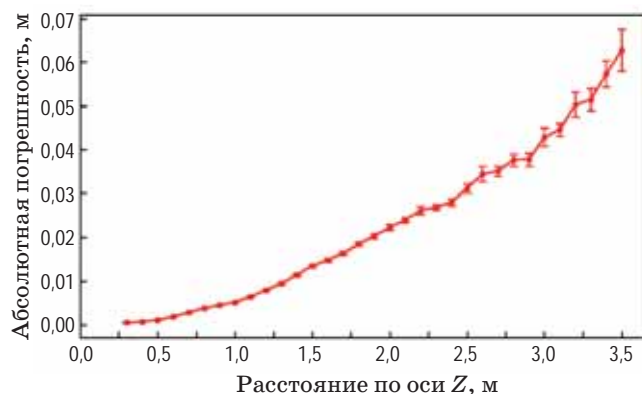


Рис. 3. Зависимость абсолютной погрешности определения положения маркера от расстояния между маркером и камерой

Fig. 3. Dependence of the absolute error of marker position determination on the distance between the marker and the camera

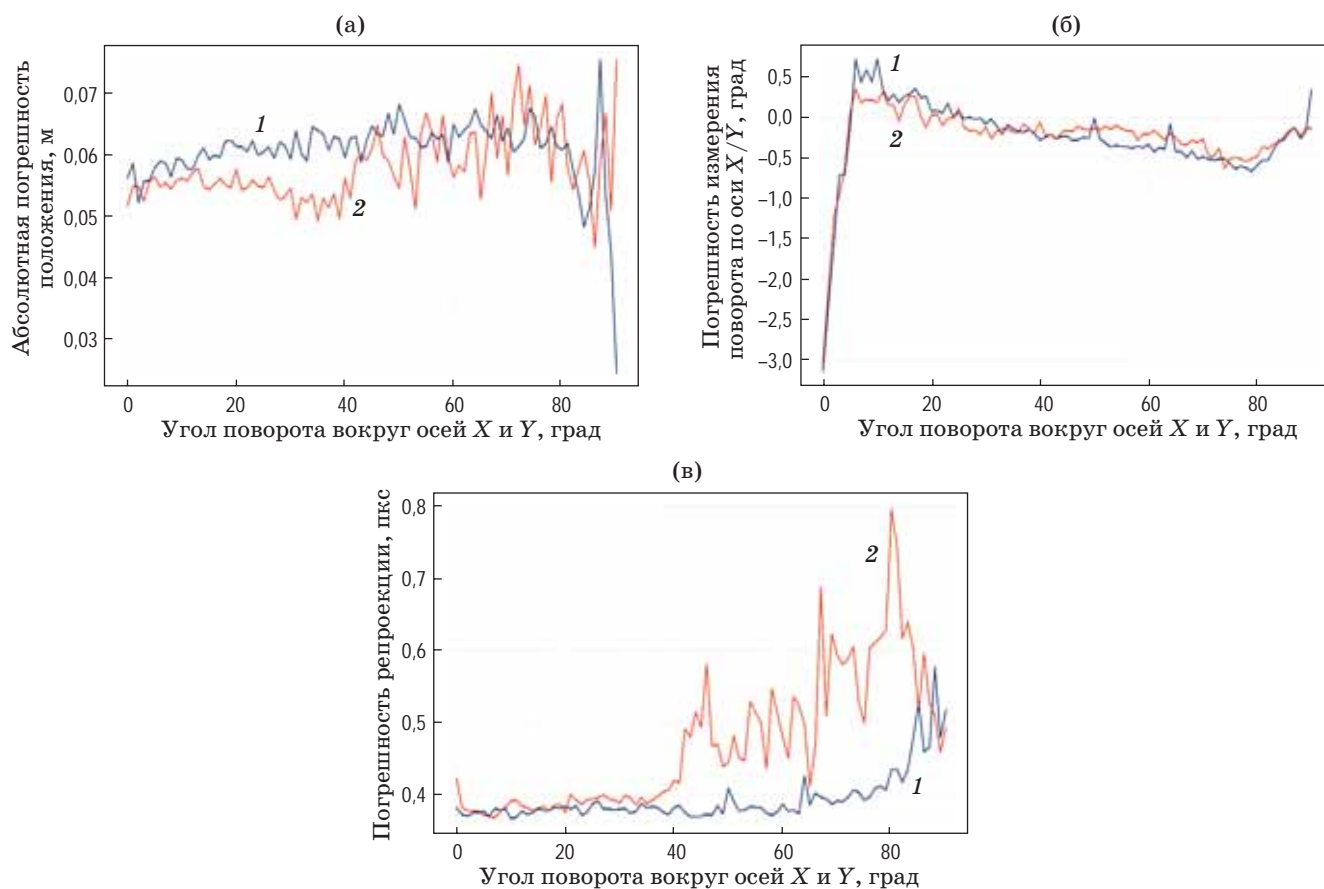


Рис. 4. Зависимости абсолютной погрешности определения положения маркера от угла поворота маркера вокруг осей X и Y (а), по оси X/Y от угла поворота маркера вокруг осей X и Y (б) и погрешности репроекции от угла поворота маркера вокруг осей X и Y (в). Поворот маркера вокруг оси X — 1, вокруг оси Y — 2
Fig. 4. Dependences of absolute error of marker position determination (a) on the marker rotation angle around X and Y axes, (б) on the X/Y axis on the marker rotation angle around the X and Y axes and (в) of the reprojection error on the marker rotation angle around the X and Y axes. (1) Rotate the marker around the X axis, (2) rotate around the Y axis

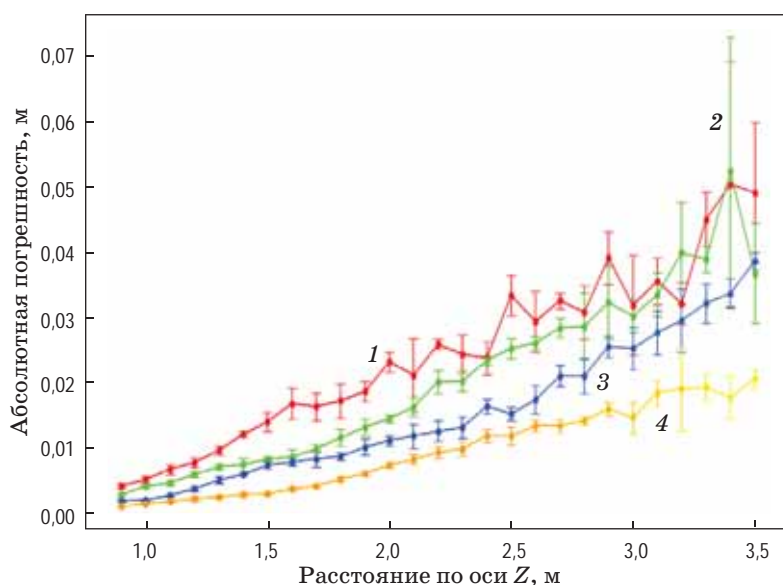


Рис. 5. Зависимости абсолютной погрешности определения положения маркера от расстояния между маркером и камерой при фокусных расстояниях объектива камеры 8 (1), 12 (2), 16 (3), 25 (4) мм
Fig. 5. Dependences of absolute error of marker position determination on the distance between the marker and the camera at camera focal lengths (1) 8, (2) 12, (3) 16, (4) 25 mm

Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими соображениями. Влияние фокусного расстояния объектива камеры на погрешность определения положения и ориентации кодового маркера можно объяснить тем, что при большем фокусном расстоянии объектива при равном расстоянии до объекта маркер будет занимать большую площадь на изображении, что делает его определение и распознавание более точным. Большее фокусное расстояние камеры может привести к уменьшению глубины резкости, особенно при близком расположении маркера, что ведет к ухудшению качества изображений из-за появления на них плохо сфокусированных участков и затруднениям в определении положения и ориентации маркеров. В целом, оптимальное фокусное расстояние объектива камеры зависит от размера кодового маркера, и необходимо найти компромисс между размером маркера на изображении, размером поля зрения и глубиной резкости изображаемого пространства для достижения оптимальных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен подход к оценке погрешности системы машинного зрения на основе кодовых маркеров с применением компьютерного моделирования. Он заключается в моделировании изображений кодового маркера в различ-

ных положениях и ориентациях относительно виртуальной камеры в графической системе Unity 3D. Оценка погрешности проведена сравнением результатов обработки смоделированных изображений с положениями и ориентациями, заданными при моделировании.

В ходе моделирования синтезировано и обработано более 100 000 изображений кодовых маркеров AprilTag в различных положениях и ориентациях, характерных для рассматриваемой системы отработки алгоритмов ориентации микроспутников. После обработки результатов моделирования получены зависимости абсолютной погрешности положения и ориентации в зависимости от различных факторов.

В полученной зависимости погрешности определения ориентации маркера от угла поворота маркера вокруг осей была обнаружена особенность, которая заключается в том, что существует некоторая оптимальная ориентация маркера, отличная от перпендикулярной к оптической оси камеры, для наиболее точного измерения.

Полученные результаты будут использованы для оптимизации расположения маркеров на платформе, подбора положения видеокамер и фокусных расстояний их объективов, а также внесения изменений в алгоритм обработки изображений для повышения точности проводимых измерений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kok M., Hol J.D., Schön Th.B. Using inertial sensors for position and orientation estimation // *Foundations and Trends in Signal Proc.* 2017. V. 11. № 1–2. 153 p. <http://dx.doi.org/10.1561/20000000094>
2. Wu R., Chen Y., Pan Y., et al. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation // *Opt. and Lasers in Eng.* 2015. V. 65. P. 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.04.020>
3. Liu T., Burner A., Jones T., et al. Photogrammetric techniques for aerospace applications // *Progress in Aerospace Sci.* 2012. V. 54. P. 1–58. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.03.002>
4. Jurado-Rodriguez D., Muñoz-Salinas R., Garrido-Jurado S., et al. 3D model-based tracking combining edges, keypoints and fiducial markers // *Virtual Reality.* 2023. V. 27. P. 3051–3065. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00853-5>
5. Kansal S., Mukherjee S. Vision-based kinematic analysis of the Delta robot for object catching // *Robotica.* 2022. V. 40. № 6. P. 2010–2030. <https://doi.org/10.1017/S0263574721001491>
6. Vela C., Fasano G., Opromolla R. Pose determination of passively cooperative spacecraft in close proximity using a monocular camera and Aruco markers // *Acta Astronautica.* 2022. V. 201. P. 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.08.024>
7. Vörös V., Page A.S., Deprest J., et al. Motion and viewing analysis during minimally invasive surgery for autostereoscopic visualization // *Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery.* 2023. V. 18. № 3. P. 527–535. <https://doi.org/10.1007/s11548-022-02753-6>
8. Olson E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system // 2011 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. 2011. P. 3400–3407. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979561>
9. Olson E., Wang J. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection // 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 4193–4198. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759617>
10. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F., et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // *Pattern Recognition.* 2014. V. 47. № 6. P. 2280–2292. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
11. Calvet L., Gurdjos P., Griwodz C., et al. Detection and accurate localization of circular fiducials under highly

- challenging conditions // 2016 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA. 2016. P. 562–570. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.67>
12. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Commun. ACM. 1981. V. 24. № 6. P. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
13. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение: учеб. пособ. / 3-е изд. (электронное) / Пер. с англ. Богуславского А.А. под ред. Соколова С.М. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 763 с.
Shapiro L.G., Stockman G.C. Computer vision. Prentice Hall, 2001. 580 p.
14. Болотских А.А., Иванов Д.С., Ткачѳв С.С. Лабораторное исследование алгоритмов определения углового движения наноспутника на стенде с аэродинамическим подвесом // XLV академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королѳва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Сб. тез. Т. 1. М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 387–388.
Bolotskikh A., Ivanov D., Tkachev S. Laboratory study of angular motion determination algorithms for nanosatellite on laboratory facility with aerodynamic suspension // AIP Conf. Proc. 2023. P. 060004. <https://doi.org/10.1063/5.0107896>
15. Shmatko E.V., Poroykov A.Yu. The estimation of inertial measurement units accuracy using digital image processing algorithms // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), IEEE. 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/WECONF55058.2022.9803505>
16. Kalaitzakis M., Carroll S., Ambrosi A., et al. Experimental comparison of fiducial markers for pose estimation // Int. Conf. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2020. P. 781–789. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213977>
17. Ullah S., Javed M., Rabbi I., et al. Analysing the attributes of fiducial markers for robust tracking in augmented reality applications // Int. J. Computational Vision and Robotics. 2017. V. 7. № 1/2. P. 68–82. <https://doi.org/10.1504/IJCVR.2017.10001817>
18. Abbas S.M., Aslam S., Berns K., et al. Analysis and improvements in apriltag based state estimation // Sensors (Basel). 2019. V. 19. P. 1–32. <https://doi.org/10.3390/s19245480>
19. Liu Y., Schofield H., Shan J. Intensity image-based LiDAR fiducial marker system // IEEE Robotics and Automation Lett. 2022. V. 7. № 3. P. 6542–6549. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3174971>
20. Górski F., Wichniarek R., Kuczko W., et al. Influence of marker arrangement on positioning accuracy of objects in a virtual environment // Advances in Sci. and Technol. Research J. 2015. V. 9. № 28. P. 112–119. <https://doi.org/10.12913/22998624/60797>
21. Shmatko E.V., Sivov N.Yu., Poroykov A.Y. Estimation of rotation measurement error of objects using computer simulation // 2023 5th Int. Youth Conf. Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), IEEE. 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086903>
22. Poroykov A., Pechinskaya O., Shmatko E., et al. An error estimation system for close-range photogrammetric systems and algorithms // Sensors. 2023. V. 23. № 24. P. 9715. <https://doi.org/10.3390/s23249715>

АВТОРЫ

Екатерина Викторовна Шматко — аспирант, ассистент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия; Scopus ID: 57219410280; <https://orcid.org/0000-0003-3565-9502>; shmatkoyv@mpei.ru

Никита Юрьевич Сивов — студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия; Scopus ID: 57797375300; <https://orcid.org/0000-0002-3120-7325>; sivovny@mpei.ru

Данил Владимирович Еремин — студент, инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия; <https://orcid.org/0009-0007-9241-2000>; yeremindv@mpei.ru

Антон Юрьевич Порошков — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия; Scopus ID: 16430625700; <https://orcid.org/0000-0002-9284-1397>; poroykovay@mpei.ru

AUTHORS

Ekaterina V. Shmatko — PhD Student, Teaching Assistant, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russia; Scopus ID: 57219410280; <https://orcid.org/0000-0003-3565-9502>; shmatkoyv@mpei.ru

Nikita Yu. Sivov — Student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russia; Scopus ID: 57797375300; <https://orcid.org/0000-0002-3120-7325>; sivovny@mpei.ru

Danil V. Eremin — Student, Engineer, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russia; <https://orcid.org/0009-0007-9241-2000>; yeremindv@mpei.ru

Anton Yu. Poroykov — PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russia; Scopus ID: 16430625700; <https://orcid.org/0000-0002-9284-1397>; poroykovay@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 19.01.2024
Одобрена после рецензирования 17.04.2024
Принята к печати 30.05.2024

The article was submitted to the editorial office 19.01.2024
Approved after review 17.04.2024
Accepted for publication 30.05.2024