

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АВТОНОМНОЙ КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА AR-601M

## TOWARDS AUTONOMOUS CAMERA CALIBRATION METHODS OF ANTHROPOMORPHIC ROBOT AR-601M

Магид Е.А., Сагитов А. Г., Шабалина К. С., Лавренов Р.О., Сабирова Л. Н.  
Magid E., Sagitov A., Shabalina K., Lavrenov R., Sabirova L.

ФГАОУ ВО КФУ

**Аннотация:** Задача нашего исследования – разработка автономного метода калибровки манипуляторов серии антропоморфных роботов AR-600 с использованием бортовых камер. Однако, перед калибровкой манипулятора, предварительно необходимо откалибровать камеры робота. Одним из перспективных методов калибровки является использование систем координатных меток. Главной особенностью таких систем является автоматическое обнаружение камерой метки в кадре с помощью соответствующего алгоритма распознавания. Для выбора наиболее подходящей системы необходимо установить критерии, по которым будет проводиться сравнение меток. В данной работе проведено исследование меток на устойчивость к перекрытию различной интенсивности и характера, что позволило выбрать одну из систем для проведения дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** калибровка камеры, координатные метки, ARTag, AprilTag, CALTag, AR-601M

**Abstract:** The main goal of our research is development and implementation of an autonomous calibration of AR-600 robot manipulators with on-board cameras. However, these cameras require a priori calibration. Using fiducial marker systems is one of the popular approaches for camera calibration. To select the most suitable system we set criteria for marker comparison. This paper compares three selected marker systems for marker occlusion resistance that allowed us to select one potentially suitable system for further detailed research.

**Keywords:** camera calibration, fiducial markers, ARTag, AprilTag, CALTag, AR-601M

### Введение

Калибровка суставов робота является важной задачей в области робототехники, так как корректно проведенная калибровка позволяет выполнять роботу заданные действия с высокой точностью. Неизбежный износ компонентов манипуляторов в ходе эксплуатации робота, даже при бережном обращении с его физическими компонентами, влияет на точность расположения конечностей манипуляторов. В результате этого выполняемые роботом задачи могут не соответствовать ожидаемым от них результатам, что, в свою очередь, повлияет на весь перечень возможных применений робототехнической системы, включая военное применение, взаимодействие человека и робота, применение в области медицины (в частности, внутриполостной хирургии) и в других возможных областях. Цель нашего исследования – разработка метода автономной калибровки манипуляторов серии антропоморфных роботов AR-600 российской компании «Андроидная техника». В идеале, процесс калибровки должен проводиться автономно с помощью встроенных в робота камер с использованием алгоритмов технического зрения. Использование встроенной камеры робота в калибровке манипуляторов, в первую очередь, требует предварительной её калибровки. Поэтому, для осуществления поставленной задачи по калибровке суставов необходимо создать такой метод калибровки, который может быть использован для выполнения обеих задач. Автономная калибровка камеры подразумевает процесс её выполнения без участия человека, и это может быть достигнуто с помощью шаблонов калибровки. Эти шаблоны обладают известной геометрией, уникальными особенностями (англ. Unique features), которые используются для распознавания шаблонов в пространстве в системах технического зрения.

Перспективным методом калибровки камеры с помощью шаблонов является использование систем координатных меток, которые представлены в данной статье. Мы анализируем производительность трех выбранных потенциальных систем меток – ARTag [1], AprilTag [2] и CALTag [3] для калибровки моно-камеры робота AR-601M. Анализ был проведен на основе результатов экспериментов с выбранными метками в отношении устойчивости к их перекрытию. Из трех систем лучшие результаты были продемонстрированы системой CALTag. Далее, разработка алгоритма автономной калибровки камер с выбранной нами системой координатных меток может быть применена для других мобильных робототехнических систем.

### Анализ существующих методов калибровки

На данном этапе работы проводилось теоретическое исследование существующих методов калибровки. Для калибровки камеры был выбран 2D-метод – использование плоского объекта в качестве шаблона калибровки. Данный метод был выбран по причине его популярности, доказанной надежности и точности результатов, а также существования большого количества плоских объектов, используемых в качестве шаблона для калибровки камеры. Основное внимание было сфокусировано на системах координатных меток. Эти системы автоматически обнаруживаются камерой в кадре с помощью индивидуальных алгоритмов распознавания. Данные системы непосредственно используются в области дополненной реальности и в робототехнике, например, для навигации роботов. Плоские метки имеют различный дизайн, который напрямую зависит от их дальнейшего применения. Распространенные формы меток – круглая и квадратная формы. Внешняя форма включает в себе уникальные особенности метки, для их детектирования в пространстве. Большинство меток имеют свой индивидуальный внутренний рисунок, внутри которого закодирован идентификационный номер (ID) для различия меток между собой [1].

Из рассмотренных систем координатных меток для сравнения были отобраны три системы: ARTag, AprilTag и CALTag (Рис.1). Системы ARTag и AprilTag являются самыми популярными среди исследователей в области робототехники и дополненной реальности (AR), а система CALTag является специальным решением для калибровки камер [3]. Поэтому именно эти системы были выбраны для проверки на пригодность к решению наших задач путем выявления их слабых и сильных сторон в экспериментальных условиях. Дополнительно была выбрана шахматная доска, классический метод для калибровки камеры [4], однако, в силу ограниченности по времени, исследование её возможностей при различных условиях работы и окружающей среды были запланировано как продолжение проекта в будущем.

Для оценки производительности метки обычно используются следующие критерии: устойчивость к перекрытиям (окклюзии), устойчивость к изменению освещения, вероятность путаницы между идентификаторами (ID) меток, минимально определяемый размер метки, максимальное расстояние до метки и другие [5]. Эти критерии позволят определить подходящую метку для дальнейшего её применения в поставленной задаче калибровки камеры и манипулятора робота. Далее, для применения метки на роботе, планируется закрепить ее на манипуляторе в уменьшенном размере для автоматической калибровки без участия человека. Вследствие этого может возникнуть частичное перекрытие метки другими объектами (самим манипулятором робота, другими попадающими в кадр объектами), а также



Рисунок 1. Метки слева направо: ARTag, AprilTag, CALTag

сказаться фактор различных углов поворота метки относительно камеры, что потенциально затрудняет её распознавание. Ввиду этих факторов, устойчивость метки к её перекрытию была выбрана критерием оценки качества систем координатных меток.

### **Экспериментальная работа**

Для работы с системами меток использовалось официальное открытое программное обеспечение AprilTagi CALTag, в случае с системой ARTag–библиотека ArUco, которая позволяет обнаруживать меток из разных семейств [6]. Для сравнения меток был разработан дизайн экспериментов, включающий три типа экспериментов на исследование систем устойчивости к перекрытиям различной интенсивности и вращение меток относительно координатных осей для исследования зависимости обнаружения метки от угла наклона относительно камеры.

Тип 1 – Систематическое перекрытие. Для каждой метки обеспечивались одинаковые условия освещенности помещения и положение камеры относительно метки. Часть каждой метки была перекрыта снизу шаблоном из белой плотной бумаги таким образом, что шаблон перекрывал  $K\%$  от площади метки, где  $K$  постепенно увеличивалось, принимая значение из 5-значного массива [0, 10, 20, 50, 70] [7].

Тип 2 - Произвольное перекрытие метки объектом. Каждая метка случайным образом перекрывалась одним из трех различных объектов, при этом объект целиком располагался в области метки, и процент перекрытия всегда оставался известным и постоянным. Первый объект – белая линейка из плотной бумаги, шириной 13 см, длиной 2,5 см, площадью 32,5 см<sup>2</sup>. Второй объект - металлические ножницы площадью 7,99 см<sup>2</sup>. Третий объект - черная пластиковая линейка шириной 15,7 см, длиной 2,6 см, площадью 40,82 см<sup>2</sup>. Эксперименты Типа 2 подразделены на две техники перекрытия метки. Первая заключается в закрытии части внутреннего рисунка метки с пересечением её границ, вторая заключается только в закрытии части внутреннего рисунка метки. Для первой техники объектом была выбрана черная пластиковая линейка, для второй – металлические ножницы и белая линейка. С каждым из трех объектов для каждой метки сначала было проведено 25 экспериментов на каждой метке из выбранных систем. Подчеркиваем особый случай для маркера CALTag размера 4x4: если черная линейка или белая линейка расположены строго вдоль стороны маркера, процент занятой области уменьшается по причине того, что ширина обоих объектов превышает размер маркера. В этом случае процент перекрытия варьируется от 25,5% до 33,84% для белой линейки и 25,5% и 33,84% для черной линейки.

Тип 3 - вращение меток относительно координатных осей X, Y, Z. Согласно дизайну экспериментов, вращение относительно осей  $X$  и  $Y$  производилось на заданные значения углов: 0, 10, 20, 30, 45, 55 и 65 градусов в обе стороны вращения метки [8]. Вращение относительно оси  $Z$  производилось на заданные значения углов: 0, 22.5, 45, 65.5, 90 градусов в обе стороны вращения метки с одновременным перекрытием метки на заданный процент из 5-значного массива эксперимента Типа 1.

### **Пилотные эксперименты с использованием камеры GeniusFaceCam 1000X**

Эксперименты проводились при использовании недорогой веб-камеры Genius FaceCam 1000X. Применение камеры низкого класса было выбрано для исследования возможностей каждой метки при использовании недорогого оборудования. Чтобы проанализировать влияние окклюзии на распознавание меток, было выбрано четыре различных метки семейства ARTag, четыре метки семейства AprilTag и две метки семейства CALTag (с размером CALTag 4x4 и 9x6). Идентификационные номера (ID) ARTag и AprilTag были выбраны случайным образом – AprilTag ID: 4, 6, 8, 9; ARTag ID: 2, 3, 6, 34. По результатам экспериментов Типа 1 было установлено, что AprilTag и ARTag чувствительны к перекрытию границ [7]. Дополнительные эксперименты позволили установить, что они могут быть распознаны камерой только в случае минимального перекрытия границ метки. Перекрытие границ меток не позволяло системе меток определить их внешние особенности

(квадратная форма, четыре угловые точки), поэтому их распознавание не было возможным. В свою очередь, CALTag выявил устойчивость к перекрытию метки вплоть до 50% от её площади (у CALTag 4x4). По результатам экспериментов Типа 2 все системы продемонстрировали устойчивость к перекрытию внутреннего рисунка с помощью объекта металлические ножницы, в случае с белой и черной линейками – только CALTag показал высокий результат. В ходе экспериментов Типа 3 AprilTag и CALTag показали высокие результаты. Они были обнаружены и правильно распознаны при любом заданном угле поворота и наклона: 10, 20, 30, 45, 55, 65. Система ARTag выявила чувствительность к большим углам поворота в 55 и 65 градусов. В случае с наклонами при этих углах, две метки (ARTag с ID=3 и ID=6) не были обнаружены в одном из направлений вращения метки [8].

### Эксперименты с реальным роботом AR-601M

Следующим этапом работы являлось проверка возможностей меток на фронтальной камере робота AR-601M (Рис.2). Все работы проводились по тому же дизайну экспериментов и соблюдением первоначальных условиях (расстояние от камеры до метки, положение камеры относительно метки, освещение). Проведенные вновь эксперименты с использованием камеры лучшего качества позволили выявить зависимость этапов распознавания и детектирования меток от качества аппаратуры и увидеть, какие результаты стали лучше по сравнению с предыдущими экспериментами [9], [10]. Для новых экспериментов использовалась фронтальная камера BasleracA640-90gc. ARTag и AprilTag снова продемонстрировали особую чувствительность к перекрытию границ меток в эксперименте Типа 1, даже при использовании камеры высокого качества. Перекрытие границ меток приводит к невозможности обнаружения уникальных особенностей метки, в результате чего не удается обнаружить метку [9]. CALTag оказалась единственной системой меток, которая была абсолютно устойчива к перекрытию границ меток благодаря удачному дизайну метки и алгоритму её обнаружения. Данная система более адаптирована под реальные ситуации при частичной видимости метки. По результатам эксперимента Типа 3, все метки оказались полностью устойчивы к вращению вокруг оси Z и вращению вокруг горизонтальной оси Y [10]. Исходя из проведенных опытов с использованием объектов перекрытия произвольным образом, метки AprilTag и ARTag применимы только в том случае, когда известно, что их внешние границы не будут перекрыты. В случае перекрытия внутреннего рисунка (эксперимент Типа 2) объектами малой площади (по сравнению с площадью метки), эти метки могут быть распознаны. Система CALTag показала высокие результаты во всех экспериментах с обеими камерами, что подтверждает её высокую устойчивость к наличию перекрытий внешних и внутренних рисунков вплоть до 50% от площади всей метки.

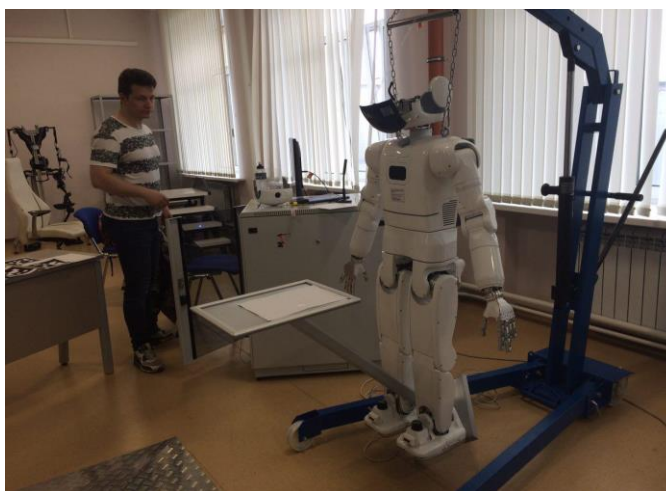


Рисунок 2. Подготовка оборудования и робота AR-601M к экспериментам. На фото – соавтор А.Г.Сагитов.

### Заключение и планируемые исследования

В результате проведенной работы был проведен обзор систем координатных меток и выбраны три потенциально подходящие метки для калибровки камеры робота AR-601: ARTag, AprilTag и CALTag. Для дальнейшего выбора метки проводился их сравнительный анализ. Оценивалась производительность каждой из систем в отношении устойчивости к различным типам перекрытия и вращения метки относительно координатных осей X, Y, Z. В результате экспериментов было установлено, что только система CALTag применима для работы в условиях возможного частичного перекрытия метки или частичной видимости метки вследствие её поворота относительно камеры. В рамках будущих исследований планируется проверить производительность систем BlurTag [11] и RuneTag [12], так как их авторы в своих работах указали на устойчивость систем к большим углам поворота относительно камеры и различным перекрытиям меток, и будет уделено особое внимание изучению возможностей калибровки при помощи классической шахматной доски. По результатам экспериментальной работы было установлено, что система CALTag является потенциально оптимальной системой для калибровки камеры и манипуляторов робота. Как продолжение работы, планируется провести дополнительный анализ этой системы, который позволит определить, подходит ли данная система для калибровки камеры и манипуляторов робота AR-601M.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Fiala, Comparing ARTag and ARToolKit Plus Fiducial Marker Systems, IEEE Int. Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications. pp. 148-153, 2005.
- [2] E. Olson. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. pp. 3400-3407, 2011.
- [3] B. Atcheson, F. Heide, W. Heidrich. CALTag: High Precision Fiducial Markers for Camera Calibration, Vision, Modeling, and Visualization Workshop, vol.10, pp. 41-48, 2010.
- [4] Zhang, Zhengyou. "A flexible new technique for camera calibration." IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. pp. 1330-1334, 2000.
- [5] M. Fiala, ARTag Revision 1. A Fiducial Marker System Using Digital Techniques, National Research Council Publication, vol. 47419. pp. 1-47, 2004.
- [6] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, M.J. Marín-Jiménez, Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, Pattern Recognition, vol. 47(6), pp. 2280-2292, 2014.
- [7] A. Sagitov, K. Shabalina, R. Lavrenov, and E. Magid, "Comparing fiducial marker systems in the presence of occlusion," in Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering, p. in press, IEEE, 2017.
- [8] A. Sagitov, K. Shabalina, E. Magid, "ARTag, AprilTag and CALTag Fiducial Marker Systems: Comparison in a Presence of Partial Marker Occlusion and Rotation". International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2017.
- [9] K. Shabalina, A. Sagitov, E. Magid, "Comparing Fiducial Marker Systems Occlusion Resilience Through a Robot Eye". Int. Conf. Developments in eSystems Engineering, 2017.
- [10] A. Sagitov, K. Shabalina, E. Magid, "Effects of rotation and systematic occlusion on fiducial marker recognition". Завалишинские чтения, 2017.
- [11] A. Reuter, H.-P. Seidel, and I. Ihrke, "Blurtags: spatially varying psf estimation with out-of-focus patterns," in 20th Int. Conf. on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, pp. 239-247, 2012.
- [12] F. Bergamasco, A. Albarelli, E. Rodola, and A. Torsello, "Rune-tag: A high accuracy fiducial marker with strong occlusion resilience," in Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 113-120, IEEE, 2011.