

УДК 681.786

## ПИЛОТНЫЕ ВИРТУАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СРАВНЕНИЮ СИСТЕМ КООРДИНАТНЫХ МЕТОК ARUCO И APRILTAG НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ВРАЩЕНИЮ

А.А. Закиев, К.С. Шабалина, Т.Г. Цой, Е.А. Магид  
(zaufar@it.kfu.ru, ks.shabalina@it.kfu.ru, tt@it.kfu.ru,  
magid@it.kfu.ru)

Казанский федеральный университет, Институт  
Информационных технологий и интеллектуальных систем,  
Лаборатория интеллектуальных робототехнических систем,  
Казань

**Аннотация.** В настоящее время, ввиду большого количества различных систем координатных меток научное сообщество и промышленность сталкиваются с трудностями при выборе оптимальной системы координатных меток для выполнения определенной задачи. В результате, каждая группа выбирает систему меток и идентификатор метки интуитивно или на основе своего предыдущего опыта. В данной работе представлен дизайн экспериментов и пилотные виртуальные эксперименты, позволяющие сравнить результаты распознавания различных систем координатных меток. Эксперименты были разработаны для оценки устойчивости систем координатных меток к вращению относительно различных осей в трехмерном пространстве. В виртуальных экспериментах исключено влияние внешней среды, включая условия освещения, шумы сенсора, неточности движений метки и другие. Эксперименты проводились в среде ROS/Gazebo с использованием двух систем координатных меток: ArUco и AprilTag. Для сбора статистически значимого количества данных было проведено и проанализировано более 300,000 виртуальных экспериментов.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** робототехника, калибровка, техническое зрение, система координатных меток, виртуальные эксперименты, ROS, Gazebo.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-58-45017).

## Введение

Системы координатных меток (СКМ) — это системы плоских графических изображений, спроектированных для определения и распознавания соответствующими алгоритмами технического зрения. СКМ широко используются в физике, медицине, робототехнике, дополненной реальности, метрологии, и других областях. Широкий перечень робототехнических задач, включая навигацию [Kuriya et al., 2015], локализацию [Dhiman et al., 2013], построение карты [Olson, 2011] и калибровку камеры [Fiala, 2005b], использует СКМ в качестве основного элемента. Нашей долгосрочной целью является автономная калибровка камер нескольких российских роботов, включая антропоморфного робота AR-601М (Рис. 1), с применением СКМ в автономном режиме. Современные СКМ были разработаны для различных целей, поэтому у каждой из них имеются свои преимущества и недостатки. Выбор подходящей СКМ среди существующего многообразия возможных вариантов требует сравнения систем по различным критериям, уделяя особое внимание именно тем критериям, которые являются важными для выполнения конкретной поставленной задачи. Нашей целью является автономная калибровка камер мобильного робота, а координатные метки располагаются на теле робота. Например, для AR-601М они располагаются на тыльной стороне ладони манипулятора, и робот, вращая манипулятор перед объективами бортовых камер, наблюдает за меткой для оценки и программного устранения искажения изображений с камеры. Для этой задачи СКМ должна быть устойчива к вращению манипулятора и частичным перекрытиям, которые возникают в результате перекрытия метки различными объектами (например, частями самого робота при движении манипулятора в процессе калибровки). Другими словами, используемая СКМ должна иметь максимальные углы инвариантности распознавания меток к изменению позиции камеры – отдельно для разных осей вращения.

Существующие на момент написания этой статьи исследования по сравнению разных СКМ не отличаются проработанным дизайном экспериментов. К их недостаткам относятся произвольный выбор ракурсов съемки при распознавании [Fiala, 2005b], отсутствие системного подхода к осуществлению перекрытия метки (например, использование пальца или руки для перекрытия) [Garrido-Jurado et al., 2014], а также сравнение авторами старого и нового алгоритмов распознавания одной и той же СКМ [Wang et al., 2016].

В наших предыдущих научных исследованиях [Sagitov et al., 2017] [Shabalina et al., 2017] мы изучали СКМ AprilTag, ARTag и CALTag [Atcheson et al., 2010]. Изучение велось путем сравнения этих систем по

критериям устойчивости к вращениям, систематическим окклюзиям и произвольным перекрытиям. Данные эксперименты проводились вручную сначала с использованием веб-камеры Genius FaceCam 1000X для получения данных об актуальности применения СКМ в условиях использования недорогого оборудования. Далее эксперименты проводились на антропоморфном роботе AR-601M, используя его монокамеру Basler acA640-90gc. Анализ результатов эксперимента показал, что AprilTag и ARTag устойчивы к вращениям метки, однако, очень чувствительны к перекрытиям краев метки. Это объясняется принципом работы алгоритма распознавания: первый этап заключается в поиске границ потенциальных меток и, если они не обнаруживаются, то весь процесс распознавания останавливается. С другой стороны, CALTag продемонстрировал стабильно высокий процент распознавания на различных углах наклона и различных перекрытиях.

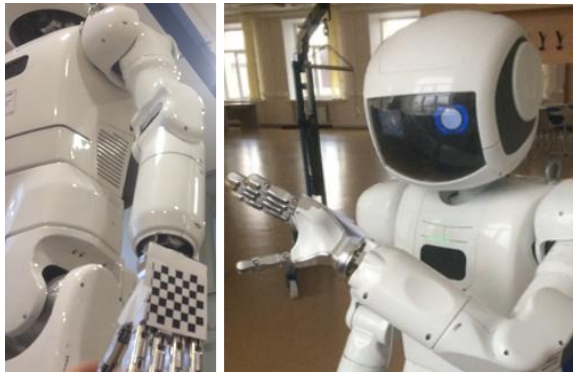


Рис. 1. Расположение координатной метки на манипуляторе робота (слева); робот наблюдает за меткой в процессе детектирования и распознавания метки (справа).

Однако проведение экспериментов вручную имеет ряд очевидных недостатков, которые не позволяют на практике повторить эксперименты и проверить их результаты:

- Требуется большое количество времени для осуществления экспериментов, так как требуются многочисленные итерации для сбора статистически значимого количества данных.
- Сложность контроля чистоты экспериментов. Контроль многочисленных условий среды, например, угла наклона метки, расположения метки относительно камеры, условий освещения и т.д., при отсутствии автоматизации на практике представляет собой

сложную задачу и не позволяет нейтрализовать различные погрешности.

- Ограничения в выборе аппаратного обеспечения. У любого оборудования наличие шумов неизбежно и часто оно не отвечает требованиям экспериментов, например, по разрешению камеры, искажениям оптики, чувствительности оптического сенсора и т.д.

Чтобы устранить эти недостатки, эксперименты были перенесены в виртуальную среду Gazebo / ROS. Проведение виртуальных экспериментов обладает следующими преимуществами:

- Проведение экспериментов автономно и требует вмешательства человека только на этапе запуска экспериментов и анализа полученных в ходе экспериментов данных, который проводится по окончании всех экспериментов.
- Отсутствие ограничений на используемое виртуальное оборудование. Виртуальное оборудование может иметь любые желаемые параметры.
- Виртуальные эксперименты могут быть легко повторены и их результаты могут перепроверены другими заинтересованными исследователями независимо от оригинальных экспериментов.

Данная статья представляет среду для виртуальных экспериментов и пилотное сравнение систем ArUco [Romero-Ramirez et al., 2018] и AprilTag [Olson, 2011] по критерию устойчивости метки к вращениям. Во второй главе представлены результаты предыдущих научных исследований. Глава 3 коротко описывает программные инструменты ROS/Gazebo, использованные для создания виртуальной среды для экспериментов. Глава 4 посвящена организации виртуальных экспериментов; в главе 5 показаны результаты проведенных сравнений, а глава 6 представляет наши заключения.

## 2 Среда ROS/Gazebo

Робототехническая операционная система (англ. Robot Operating System, ROS) — это быстро растущий фреймворк для робототехнической разработки. Ее архитектура состоит из так называемых узлов (англ. nodes) и потоков данных (англ. topics) для коммуникации между ними. Такая распределенная структура позволяет создавать различные схемы потоков информации, реализовать анализ данных датчиков и контроль движений узлов робота. ROS распространяется в форме минимально функциональных единиц — пакетов (англ. packages). Gazebo представляет собой трёхмерный симулятор, интегрированный в ROS. Он может быть использован как инструмент для визуализации симуляций и имитации характеристик

реального мира, включая освещение, обработку столкновений, гравитацию и другие внешние факторы.

Ряд СКМ обладает своими собственными алгоритмами распознавания в форме ROS пакетов, включая AprilTag, ArUco, Alvar [Woodward et al., 2002] и ChiliTag [Bonnard et al., 2013]. В действительности, ArUco – это универсальная библиотека распознавания, которая может быть использована для распознавания не только ArUco, но и AprilTag, ARTag [Hirzer et al., 2008] [Fiala, 2005a] и ARToolKitPlus [Wagner et al., 2007].

### 3 Организация эксперимента

Виртуальные эксперименты позволяют исключить влияние большинства факторов внешней среды, которые обычно неустранимы в реальных экспериментах, включая условия освещения, погрешности измерений и шумов сенсоров. Эксперименты, представленные в этой статье, посвящены сравнению двух СКМ в идеальной среде, когда внешние факторы среды не мешают работе алгоритмов распознавания. Результаты таких экспериментов необязательно могут быть повторены в лабораторных или полевых условиях. Однако, они дают понимание поведения сравниваемых СКМ при вращении меток относительно камеры

Таблица 1. Неизменные характеристики виртуальных экспериментов

• Характеристика	Значение
Разрешение камеры	640 x 480 пикс.
Уровень искажения камеры	0 (идеальная оптика)
Уровень шума камеры	0 (идеальное устройство)
Расстояние	2,0 м.
Диапазон вращения (ось X)	[ -180°; +180° )
Диапазон вращения (ось Z)	[ -90°; +90° ]
Размер метки	0,4 м. x 0,4 м.
Угол падения света	45°
Световой спектр	Белый свет
Условия освещения	Равномерное по всей площади метки

Мы создали двух роботов в виртуальной среде: робот-исполнитель, на котором крепится метка, и робот-наблюдатель с камерой, подобный роботу R2D2. Робот-исполнитель спроектирован для модификации положения метки между отдельными распознаваниями: он вращает метку на заранее заданную величину угла в определяемых пользователем пределах (схема вращения показана на Рис. 2). Робот-наблюдатель имитирует статичный

штатив с камерой (Рис. 3). Значения многих параметров эксперимента поддерживаются постоянными во всех экспериментах (см. Таблицу 1) для исключения их влияния на результаты распознавания.

Многочисленные параметры виртуального эксперимента можно контролировать с помощью графического интерфейса, который интегрирован в пакет. Эти параметры включают расстояние между камерой и маркером, уровень шума камеры, диапазоны вращения и количество потоков симуляции. Значения параметров остаются постоянными во всех наших экспериментах, включая условия освещения и отражения, что гарантирует чистоту и объективность эксперимента. Важно подчеркнуть, что виртуальность экспериментов полностью исключает влияние случайных факторов и обеспечивает детерминированность экспериментов.

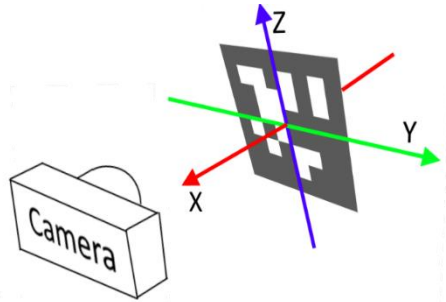


Рис. 2. Схема вращения метки в виртуальном эксперименте.

Эксперимент с каждой меткой проходит по следующему алгоритму:

1. Роботы устанавливаются на постоянном расстоянии друг от друга. Первоначально угол вращения маркера вокруг выбранной пользователем оси равен нулю.
2. Система протоколирования событий – то есть процесса записи в журнал информации о происходящих с координатной меткой событиях – ожидает полсекунды для обнаружения маркера.
3. Система протоколирования событий регистрирует угол наклона и результат обнаружения, который может быть успешным или неудачным.
4. Робот-исполнитель поворачивает маркер на 1 градус вокруг определенной пользователем оси (ось X или Z).
5. Если предел вращения, определяемый пользователем, не достигнут, алгоритм переходит к шагу №2; иначе эксперименты с данной меткой заканчиваются, происходит смена метки и переход на шаг №1.

Система регистрации регистрирует все результаты дважды: первый вывод поступает на консоль, второй - в файл с уникальным именем, включающий в себя семейство тегов (например, AgUco), тип тега (например, 25h7), идентификатор тега, расстояние до камеры, уровень шумов виртуальной камеры и дату эксперимента.

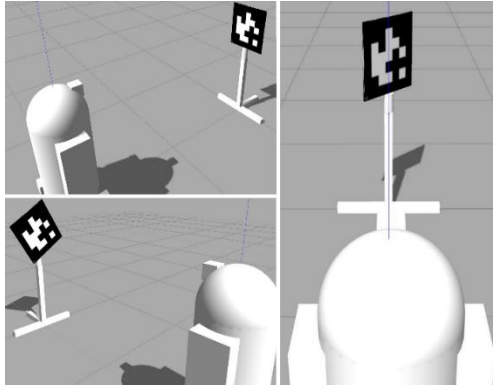


Рис. 3. Дизайн виртуальных экспериментов: начальное положение метки (вверху слева); поворот на 30 градусов вокруг оси X (внизу слева); поворот на 45 градусов вокруг оси Z (справа).

## 4 Результаты экспериментов

Все маркеры выбранного типа тестируются для сбора статистически значимого объема данных: 100 маркеров AgUco (тип 25h7) и 242 маркера AprilTag (тип 25h7). Маркеры этого типа имеют 25 пикселей кодирования, а расстояние Хэмминга между любыми из них равно или больше 7 (рис. 4). Показатель расстояния Хэмминга оценивает, насколько любые два маркера одного типа отличаются друг от друга. В практическом смысле это позволяет правильно распознавать метку даже в случаях неполных или поврежденных данных с камеры. Одинаковые типы маркеров устраняют разницу между свойствами кодирования СКМ и объемом закодированных данных. Эксперименты проводились с каждым отдельным маркером дважды, чтобы собрать надежные данные о каждом угле обнаружения. Предел вращения маркеров был установлен  $[-90; 90]$  для оси Z и  $[-180; 180]$  для оси X. Таким образом, суммарно было проведено  $(100 + 242) * (360 + 181) * 2 = 370044$  экспериментов. Результаты экспериментов представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Усредненные значения успешности распознавания по всем меткам относительно типа и способа их вращения

• Семейство и тип меток	Ось вращения	
	X	Z
• AprilTag – 25h7	• 99,94 %	• 69,96 %
• ArUco – 25h7	• 99,97 %	• 86,07 %

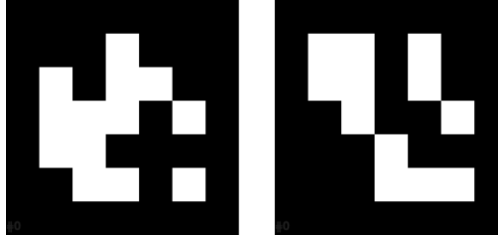


Рис. 4. Примеры меток из эксперимента: AprilTag 25h7 (слева) и ArUco 25h7 (справа).

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что маркеры семейств AprilTag и ArUco практически нечувствительны к поворотам относительно оси X; однако маркеры семейства ArUco обладают значительно лучшей устойчивостью к поворотам относительно оси Z. Распределения неуспешных обнаружений для каждого семейства маркеров представлены на рис. 5 и рис. 6.

Графики результатов распознавания при вращении относительно оси Z показывают довольно предсказуемое поведение СКМ: увеличение угла поворота уменьшает площадь маркера, видимую для камеры, что приводит к неудачным обнаружениям. Обе СКМ показали наивысшую устойчивость к вращению относительно оси X: для всех углов поворота была зафиксирована почти идеальная частота обнаружения.

## 5 Заключение

В данной статье представлен ряд экспериментов с маркерными системами AprilTag и ArUco в виртуальной среде и сравнение их устойчивости к вращениям. Обе СКМ показали себя практически инвариантными к вращению меток относительно оси X. Максимальные углы инвариантности распознавания меток ArUco оказались больше, чем углы инвариантности распознавания меток AprilTag:  $75^\circ$  у СКМ ArUco 25h7 против  $60^\circ$  у СКМ AprilTag. Созданная виртуальная среда может быть использована в качестве основы для дальнейших сравнительных исследований, поскольку добавление новой СКМ в проект упрощено. Наша будущая работа сосредоточена на сравнении различных СКМ для их устойчивости к перекрытиям (как систематическим, так и произвольным) и



изучению зависимости максимального расстояния обнаружения от разрешения камеры.

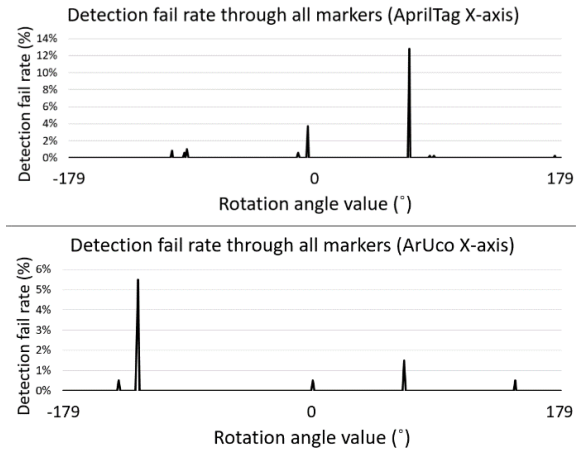


Рис. 5. Результаты экспериментов по вращению относительно оси X: распределение неудачных распознаваний среди всех меток для меток AprilTag (вверху) и ArUco (внизу).

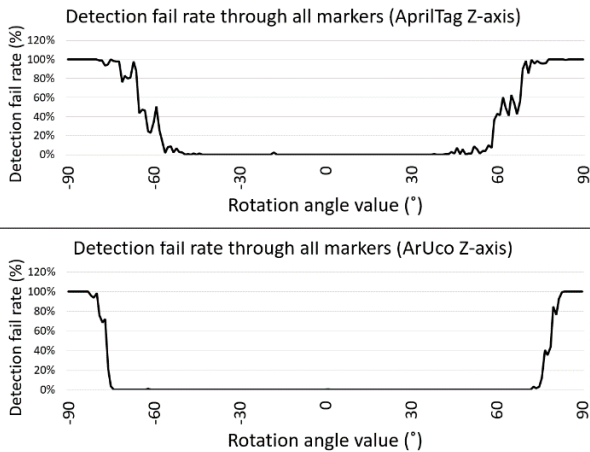


Рис. 6. Результаты экспериментов по вращению относительно оси Z: распределение неудачных распознаваний среди всех меток для меток AprilTag (вверху) и ArUco (внизу).

## Список литературы

- [Atcheson et al., 2010] Atcheson B., Heide F., Heidrich W. CALTag: High Precision Fiducial Markers for Camera Calibration //VMV. – 2010. – Т. 10. – С. 41-48.
- [Bonnard et al., 2013] Bonnard Q. et al. Chilitags 2: Robust fiducial markers for augmented reality and robotics //CHILI, EPFL, Switzerland. – 2013.
- [Dhiman et al., 2013] Dhiman V., Ryde J., Corso J. J. Mutual localization: Two camera relative 6-dof pose estimation from reciprocal fiducial observation // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2013. – С. 1347-1354.
- [Fiala, 2005a] Fiala M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques //2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2005. – Т. 2. – С. 590-596.
- [Fiala, 2005b] Fiala M. Comparing ARTag and ARToolkit Plus fiducial marker systems //IEEE Int. Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications. – IEEE, 2005. – С. 6.
- [Garrido-Jurado et al., 2014] Garrido-Jurado S. et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion //Pattern Recognition. – Т. 47. – №. 6. – С. 2280-2292.
- [Hirzer et al., 2008] Hirzer M. Marker detection for augmented reality applications //Seminar/Project Image Analysis Graz. – 2008. – С. 1-2.
- [Kuriya et al., 2015] Kuriya R., Tsujimura T., Izumi K. Augmented reality robot navigation using infrared marker //24th IEEE Int. Symposium on Robot and Human Interactive Communication. – IEEE, 2015. – С. 450-455.
- [Olson, 2011] Olson E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system //2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – IEEE, 2011. – С. 3400-3407.
- [Romero-Ramirez et al., 2018] Romero-Ramirez F. J., Muñoz-Salinas R., Medina-Carnicer R. Speeded up detection of squared fiducial markers //Image and Vision Computing. – 2018. – Т. 76. – С. 38-47.
- [Sagitov et al., 2017] Sagitov A. et al. Comparing fiducial marker systems in the presence of occlusion //Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering. – IEEE, 2017. – С. 377-382.
- [Shabalina et al., 2017] Shabalina K. et al. ARTag, AprilTag and CALTag Fiducial Systems Comparison in a Presence of Partial Rotation: Manual and Automated Approaches //Lecture Notes in Electrical Engineering.
- [Wagner et al., 2007] Wagner D., Schmalstieg D. Artoolkitplus for pose tracking on mobile devices. – na, 2007. – С. 139-146.
- [Wang et al., 2016] Wang J., Olson E. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection //IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2016. – С. 4193-4198.
- [Woodward et al., 2002] Woodward C. et al. Wireless 3d cad viewing on a pda device //Proceedings of the 2nd Asian Int. Mobile Computing Conf. – 2002. – Т. 14. – С. 17.