

УДК 681.786

## СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ КООРДИНАТНЫХ МЕТОК ДЛЯ КАЛИБРОВКИ КАМЕР МОБИЛЬНОГО РОБОТА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕКРЫТИЙ

К.С. Шабалина (*shabalina@it.kfu.ru*)

А.Г. Сагитов (*sagitov@it.kfu.ru*)

Е.А. Магид (*magid@it.kfu.ru*)

Высшая Школа Информационных Технологий и  
Информационных Систем, Казанский (Приволжский)  
Федеральный Университет, Казань

**Аннотация.** Система координатных меток – система уникальных 2D-меток, которые помещаются в окружающую среду и могут быть автоматически обнаружены камерой с помощью соответствующего алгоритма. Системы меток необходимы для осуществления калибровки камер и манипуляторов робототехнических систем с возможностью калибровки в автономном режиме. При этом, система должна быть устойчива к таким факторам как угол обзора, полное или частичное перекрытие метки, изменение расстояния до метки и др. Эта статья сравнивает три существующие системы меток: ARTag, AprilTag и CALTag. Основная цель работы - исследование надежности распознавания метки в условиях перекрытия разных типов и уровня, которые часто встречается на практике, затрудняя калибровку камер и манипуляторов мобильных роботов.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** координатные метки, сравнительный анализ, окклюзия, ARTag, AprilTag, CALTag, мобильный робот.

### Введение

Координатные метки (англ. fiducial markers) являются основными элементами в отслеживающих системах, которые используются в робототехнике и приложениях дополненной реальности для стабилизации поля зрения. Для упрощения процесса отслеживания, выравнивания и идентификации координатные метки крепятся к объектам. В робототехнике

---

<sup>1</sup> Работа осуществлена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 17-48- 160879. Часть работ выполнена в соответствии с Государственной программой конкурентоспособности Российской Федерации при Казанском федеральном университете.

метки позволяют калибровать камеру и механические части в робототехнических системах (РТС), которые востребованы в промышленных целях [Klimchik et al., 2016], взаимодействию РТС и человека, разработке антропоморфных РТС [Khusainov et al., 2015], методах одновременной локализации и построения карты (англ. SLAM), спасательной робототехнике [Magid et al., 2010] и других областях. При этом для беспилотных РТС с искусственным интеллектом операции калибровки камер и манипуляторов должны осуществляться в автономном режиме по мере востребованности системой управления.

Координатные метки существуют во многих вариациях: например, простые формы из нескольких точек, штрих-коды в форме эллипса, прямоугольные изображения. Использование четырех угловых точек прямоугольных маркеров позволяет однозначно определить координатное положение и ориентацию маркера относительно уже откалиброванной камеры. Метки должны быть устойчивы к таким факторам, как угол обзора камеры, окклюзии, изменение расстояния от камеры и др.

Для наших исследований координатные метки (или так называемые «теги») представляют интерес для калибровки трех передних (стереопара и моно-камера) и одной задней камер (моно-камера), и последующей калибровки двухзвенного манипулятора мобильного РТС «Сервосила Инженер» [Sokolov et al., 2017], а также для калибровки одной передней и одной задней камер (моно-камеры), и последующей калибровки двух двухзвенных манипуляторов типа «рука» антропоморфного РТС AR-601M [Khusainov et al., 2015]. Прежде чем приступить к калибровке на основе одной из систем меток, необходимо выбрать оптимальный вариант системы под наши требования. В этой работе проводится детальное сравнение тегов ARTag, AprilTag и CALTag на устойчивость к окклюзии. Для сравнения маркеров была применена окклюзия разных типов и уровня интенсивности. Контрольным показателем в работе является устойчивость и способность обнаружения маркера системой при наличии окклюзии разного характера и интенсивности. В работе предоставлено экспериментальное сравнение трех вышеуказанных маркеров. Обнаружение маркеров было выполнено с помощью недорогой веб-камеры.

## 1. Координатные системы маркеров

Большинство маркеров имеют общую особенность дизайна – внешняя квадратная форма с паттерном внутри, в котором закодирована информация. Квадратная форма популярна в силу того, что это позволяет обнаружить как минимум четыре особые точки (соответствующие точкам углов квадрата), которые позволяют калибровать камеру и рассчитать позицию маркера. Чтобы уменьшить чувствительность к световым

условиям, большинство маркеров сделаны монотонными [Hirzer, 2008]. ARTag, AprilTag, и CALTag системы имеют две стадии обнаружения тегов: поиск и детектирование уникальных особенностей (англ. unique features) и распознавание тега [Fiala, 2005a]. На первом этапе системой обнаруживаются особенности тега - квадратная форма и четыре угловые точки. На втором этапе проверяется внутреннее изображение для определения, является ли обнаруженный объект тегом или нет. Различный дизайн маркеров, алгоритмы обнаружения и распознавания влияют на сильные и слабые стороны тегов в различных ситуациях. Для оценки тегов существует несколько критериев: устойчивость к окклюзии (полное или частичное перекрытие тега другим объектом), устойчивость к изменению освещения, вероятность ошибочного принятия одного маркера за другой, минимальные размер маркера (или максимальное допустимое расстояние до маркера), и ложный/негативный эффект и другие [Fiala, 2004]. На рисунке 1 изображены примеры маркеров ARTag, AprilTag и CALTag.



Рис. 1. Маркеры ARTag, AprilTag, CALTag (слева направо)

## 1.1 ARTag

ARTag является системой маркеров, изначально созданной для улучшения системы ARToolKit [Fiala, 2004], и использует более сложный процесс распознавания и обнаружения маркера для повышения надежности системы по всем критериям. Изначально предполагалось, что ARTag заменит ARToolKit из-за использования новых алгоритмов распознавания и обнаружения: благодаря новым подходам, эта система успешно решила проблемы ARToolKit – обнаружение маркеров в пространстве при их фактическом отсутствии и ошибочное принятие одного маркера за другой. ARTag использует ту же идею о квадратной форме с внутренним изображением (в данном случае – штрих-кодом), но, в отличие от ARToolKit, используется цифровой подход чтения внутреннего паттерна – бинарного кода. ARTag система состоит из 2002 индивидуальных квадратных маркеров, среди которых 1001 тег имеет черную рамку, и 1001 тег – белую [Fiala, 2005b]. Внутреннее изображение представляет собой штрих-код, состоящий из сетки 6x6 ячеек, заполненных белыми или

черными ячейками, которые представляют собой закодированные 36 бит информации. Первые 10 бит последовательности отвечают за ID маркера, последние 26 бит являются избыточными и используются для обнаружения и коррекции ошибок для обеспечения уникальности четырех возможных ориентаций маркера.

## 1.2 AprilTag

Процесс обнаружения маркера AprilTag состоит из нескольких этапов: поиск линейных отрезков, обнаружение квадратов, вычисление положения и ориентации тега, и затем декодирование штрих-кода [Olson, 2011]. Поиск линейных отрезков (англ. segments) использует аналогичный ARTag подход, после которого последовательность отрезков обрабатывается для формирования квадрата из найденных сегментов. Чтобы закодировать внутренний паттерн тега, AprilTag использует технологию, основанную на лексикографических кодах (англ. Lexicographic code), которые характеризуются двумя параметрами: количество бит кодового слова (в данном случае - внутреннего паттерна) и минимальным расстоянием Хэмминга между двумя любыми кодами [Trachtenbert, 1996]. AprilTag имеет несколько семейств тегов, отличающихся двумя параметрами: количеством битов для кодирования и минимальным расстоянием Хэмминга.

## 1.3 CALTag

После анализа классической калибровки камеры, основанной на использовании шахматной доски, и координатных меток был предложен маркер CALTag, как специально разработанное решение для калибровки камеры [Atcheson et al., 2010]. Эта система также состоит из двух компонентов: непосредственно маркера и алгоритма его обнаружения. Калибровочный маркер используется в калибровочной сетке, которая внешне подобна шахматной доске. Каждый маркер состоит из матрицы  $M \times N$  из черных и белых квадратов, которые заключены в рамку, содержащую строго черные или строго белые пиксели. После первоначального обнаружения потенциальных маркеров они фильтруются и проверяются путем чтения их бинарных кодов. Любые пропущенные калибровочные точки восстанавливаются, поскольку системе CALTag известен шаблон шахматной доски.

## 2. Дизайн экспериментов

Экспериментальная работа была проведена для сравнения устойчивости ARTag, AprilTag и CALTag к окклюзии. Окклюзией в данной работе

определяется полное или частичное перекрытие исследуемого объекта (тега) другими объектами. Все эксперименты проводились при использовании недорогой веб-камеры Genius FaceCam 1000X. Применение камеры низкого класса было выбрано для исследования возможности каждого тега при использовании недорогого оборудования. Чтобы проанализировать влияние окклюзии на распознавание тегов, было выбрано четыре различных тега семейства ARTag, четыре тега семейства AprilTag и два тега семейства CALTag (с размером CALTag 4x4 и 9x6). Проводились два типа экспериментов: систематическая окклюзия и произвольное перекрытие тегов объектом.

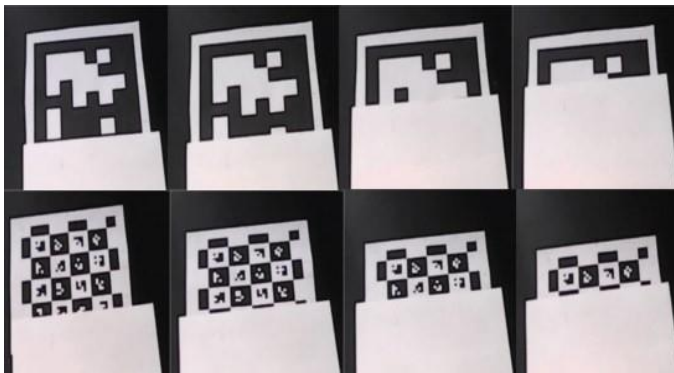


Рис. 2 Систематический подход к окклюзии. AprilTag (верхний ряд) и CALTag (нижний ряд) для  $K=10, 20, 50, 70$  процентов окклюзии (слева направо)

**Тип 1 - Систематическая окклюзия.** Для каждого маркера обеспечивались одинаковые условия освещения помещения и положение камеры относительно метки. Часть каждого тега была перекрыта снизу шаблоном из белой плотной бумаги таким образом, что шаблон перекрывал  $K\%$  от площади маркера, где  $K$  постепенно увеличивалось, принимая значение из 5-значного массива  $[0, 10, 20, 50, 70]$ . На рисунке 2 показаны примеры окклюзии AprilTag и CALTag для  $K=10, 20, 50, 70$  процентов.

**Тип 2 - Произвольное перекрытие тегов объектом.** Каждый тег случайным образом перекрывался одним из трех различных объектов, при этом объект целиком располагался в области тега и поэтому процент перекрытия всегда оставался известным и постоянным. Первым объектом была белая линейка из плотной бумаги, шириной 13 см, длиной 2,5 см, площадью  $32,5 \text{ см}^2$ . Второй объект - металлические ножницы площадью  $7,99 \text{ см}^2$ . Третий объект - черная пластиковая линейка шириной 15,7 см, длиной 2,6 см, площадью  $40,82 \text{ см}^2$ .

Эксперименты Типа 2 подразделены на две техники перекрытия маркера. Первая заключается в закрытии части внутреннего рисунка тега и пересечения его границ, вторая заключается только в закрытии части внутреннего рисунка тега. Для первой техники объектом был выбрана черная пластиковая линейка, для второй – металлические ножницы и белая линейка. С каждым из трех объектов для каждого тега было проведено 25 экспериментов на каждом теге из сравниваемой системы маркеров (см. рис. 3). Подчеркиваем особый случай для маркера CALTag размера 4x4: если черная линейка и белая линейка расположена 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.

### 3. Результаты экспериментов

Для экспериментов применялись официальное программное обеспечение систем AprilTag и CALTag, доступное для публичного использования. Для ARTag использовалась библиотека ArUco, которая позволяет обнаруживать и распознавать различные типы семейств тегов [Garrido-Jurado et al., 2014]. Все теги были распечатаны на белой бумаге следующих размеров: ARTag: 15.2 x 15.2 см, площадь 231.04 см<sup>2</sup>; AprilTag: 13.5 x 13.5 см, площадь 182.25 см<sup>2</sup>; CALTag 4x4: 9.8 x 9.8 см, площадь 96.04 см<sup>2</sup>; CALTag 9x6: 21.7 x 14.7 см, площадь 318.99 см<sup>2</sup>. Идентификаторы ARTag и AprilTag маркеров были выбраны случайным образом. Каждый тег имеет свой собственный уникальный идентификатор, который закодирован во внутреннем рисунке тега. Для экспериментов все AprilTag были выбраны из семейства тегов «36h11», то есть каждый из идентификаторов тегов кодируется в 36-битовом кодовом слове с минимальным расстоянием Хэмминга 11 бит. Для кодирования идентификатора AprilTag использует систему кодирования, основанную на лексикодах [Trachtenbert, 1996].

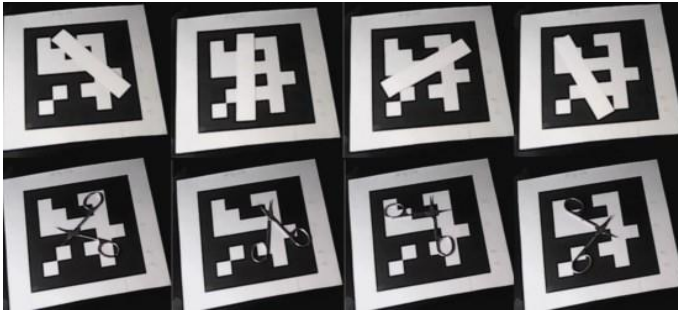


Рис. 3 Произвольное расположение объектов на маркере ARTag: белая линейка (верхний ряд) и ножницы (нижний ряд)

Важно отметить, что два типа окклюзии имеют различную экспериментальную реализацию. Тип 1 отражает типичную ситуацию реального мира, когда объект закрывает и внутренний паттерн, и границы метки. Поскольку границы тегов образуют уникальную особенность тега для его обнаружения, этот тип окклюзии влиял как на обнаружение тега, так и на их распознавание. В Типе 2 объект перекрывал исключительно внутренний рисунок метки, влияя только на этап распознавания тега.

Результаты экспериментов приведены в таблицах 1-4. Таблица 1 демонстрирует результаты экспериментов Типа 1. Значение “1” означает успешное обнаружение тега, “0” означает, что системе не удалось обнаружить тег. ARTag и AprilTag продемонстрировали высокую чувствительность к перекрытию границ тегов: перекрытие границ привело к невозможности обнаружения уникальных признаков (границ), и, соответственно, к отрицательному результату в обнаружении. CALTag оказался единственным устойчивым к такому типу окклюзии маркером, что объясняется его алгоритмом обнаружения [Zhang et al., 2002]. CALTag 9x6 был успешно обнаружен при окклюзии его площади на 50%; CALTag 4x4 - при окклюзии на 70%. Таким образом, система CALTag оказалась более адаптированной к реальным ситуациям с частичной видимостью тега.

Таблица 2 демонстрирует результаты экспериментов Типа 2 с использованием белой линейки. В случае AprilTag только 7 экспериментов из 100 (по 25 на один ID маркера) были успешными: ID4 и ID 6 по одному успешному результату, ID8 - 5, ID9 - 0. ARTag продемонстрировал самые низкие результаты по сравнению с другими системами – всего 2 успешных эксперимента из суммарных 100. Белая линейка затрудняет корректное считывание двоичного кода тегов, так как все теги – монохромные бинарные изображения. В это же время, успешность проведения экспериментов с маркером CALTag 4x4 составила 88%, а CALTag 9x6 -

96%. Эта система тегов более устойчива к перекрытию внутреннего рисунка благодаря дизайну маркера и алгоритму распознавания.

Таблица 3 демонстрирует результаты экспериментов Типа 2 с использованием черной пластиковой линейки в качестве объекта перекрытия. Объект был произвольно помещен во внутреннюю часть тега. Для каждого тега было проведено по двадцать пять экспериментов, чтобы положение объекта на теге было различным в каждом эксперименте. Черный цвет линейки затрудняет чтение двоичного кода тега, потому что все метки являются монохромными и, по условию эксперимента, линейка пересекает контуры меток. Частным случаем в этих экспериментах был тег CALTag 4x4, поскольку из-за его небольшого размера перекрытие области объектом варьировалось от 25,5% до 33,84%. Оба маркера CALTag (4x4 и 9x6) были успешно обнаружены в 46 экспериментах из 50 (92%), в то время как все 50 экспериментов с ARTag и AprilTag оказались неудачными.

Таблица 4 демонстрирует результаты экспериментов Типа 2 с использованием ножниц в качестве объекта перекрытия. Эти эксперименты демонстрируют зависимость алгоритма распознавания тегов при перекрытии только внутреннего рисунка маркера сложным объектом. Маркеры CALTag 9x6 и 4x4 были успешно обнаружены и распознаны во всех 50 экспериментах. Маркер ARTag также продемонстрировал высокую надежность (97%), а маркер AprilTag значительно уступил ему (85%).

*Таблица. 1*

Результаты систематического перекрытия тегов на заданный процент

Тег	0%	10%	20%	50%	70
ARTag (ID 2, 3, 6, 34)	1	0	0	0	0
AprilTag (ID 4, 6, 8, 9)	1	0	0	0	0
CALTag 4x4	1	1	1	1	0
CALTag 9x6	1	1	1	0	0

*Таблица. 2*

Результаты произвольного перекрытия тегов белой линейкой

Тег	Процент перекрытия	Процент успешных экспериментов
ARTag (ID 2)	14.06%	4%
ARTag (ID 3)	14.06%	4%
ARTag (ID 6)	14.06%	0%



ARTag (ID 34)	14.06%	0%
AprilTag (ID 4)	17.83%	4%
AprilTag (ID 6)	17.83%	4%
AprilTag (ID 8)	17.83%	20%
AprilTag (ID 9)	17.83%	0%
CALTag 4x4	22.5% - 32.5%	88%
CALTag 9x6	10.18%	96%

Таблица. 3

Результаты произвольного перекрытия тегов черной линейкой

Тег	Процент перекрытия	Процент успешных экспериментов
ARTag (ID 2, 3, 6, 34)	17.66%	0%
AprilTag (ID 4, 6, 8, 9)	22.39%	0%
CALTag 4x4	26.53% - 40.20%	92%
CALTag 9x6	12.79%	92%

Таблица. 4

Результаты произвольного перекрытия тегов с помощью ножниц

Тег	Процент перекрытия	Процент успешных экспериментов
ARTag (ID 2, 3, 6, 34)	3.45%	97%
AprilTag (ID 4, 6, 8, 9)	4.38%	85%
CALTag 4x4	8.32%	100%
CALTag 9x6	2.5%	100%

## Заключение и планируемые исследования

В работе были подробно описаны три системы маркеров: ARTag, AprilTag и CALTag. Проведены эксперименты с выбранными системами меток для оценивания их чувствительности к различным типам окклюзии. Цель эксперимента состояла в том, чтобы проанализировать слабые и сильные стороны каждого тега в отношении частичной или полной окклюзии маркера. Систематическая окклюзия отражала типичную ситуацию окклюзии реального мира, когда объект закрывает внутреннюю

часть метки и её края. При произвольной окклюзии объектом закрывалось только внутреннее изображение тега, что влияло только на этап распознавания внутреннего паттерна тега. Маркеры ARTag и AprilTag продемонстрировали высокую чувствительность к перекрытию границ тегов, что ограничивает их эффективное использование на практике. Маркеры CALTag показали лучшую устойчивость к окклюзии, как систематической, так и произвольной, включающей перекрытие границ. В ходе экспериментов произвольного перекрытия тегов объектом, ARTag продемонстрировал высокую устойчивость к перекрытию его внутреннего рисунка сложным объектом (ножницами), в то время как у AprilTag выявился более высокий уровень чувствительности к перекрытию при тех же условиях.

В будущем планируется проведение экспериментов на устойчивость тегов к окклюзии с использованием камер различного качества, а также сравнение систем координатных меток по другим критериям оценки. Особое внимание будет уделено CALTag системе, продемонстрировавшей наивысший результат в ходе всех экспериментов. Как долгосрочная цель наших исследований, требуется выбрать наилучшую систему координатных меток, которая будет далее применяться для автоматической калибровки камер и манипуляторов мобильной гусеничной РТС «Сервосила Инженер» и антропоморфной РТС AR-601M.

## Список литературы

- [Atcheson et al., 2010] Atcheson B., Heide F., Heidrich W. CALTag: High Precision Fiducial Markers for Camera Calibration // Vision, Modeling, and Visualization Workshop. — 2010. — vol.10. — С. 41-48.
- [Fiala, 2004] Fiala M. ARTag Revision 1. A Fiducial Marker System Using Digital Techniques // National Research Council Publication. — 2004. — vol. 47419. — С. 1-47.
- [Fiala, 2005a] Fiala M. Comparing ARTag and ARToolKit Plus Fiducial Marker Systems // IEEE Int. Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications. — 2005. — С. 148-153.
- [Fiala, 2005b] Fiala M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques // IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2005. — vol. 2. — С. 590- 596.
- [Garrido-Jurado et al., 2014] Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marín-Jiménez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // Pattern Recognition. — 2014. — vol. 47(6). — С. 2280-2292.
- [Hirzer, 2008] Hirzer M. Marker Detection for Augmented Reality Applications // Seminar/Project Image Analysis Graz. — 2008. — С. 1-25.
- [Khusainov et al., 2015] Khusainov R., Shimchik I., Afanasyev I., Magid E. Toward a human-like locomotion: Modelling dynamically stable locomotion of an

- anthropomorphic robot in Simulink environment // The 12th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics. — 2015. — Vol. 2. — C.141-148.
- [Klimchik et al., 2016]** Klimchik A., Magid E., Pashkevich A. Design of experiments for elastostatic calibration of heavy industrial robots with kinematic parallelogram and gravity compensator Pashkevich // 8th IFAC Conf. on Manufacturing Modelling, Management and Control. — 2016 — Elsevier Ltd., vol. 49(12) — C.967–972.
- [Magid et al., 2010]** Magid E., Tsubouchi T. Static Balance for Rescue Robot Navigation: Discretizing Rotational Motion within Random Step Environment // Lecture Notes in Artificial Intelligence. — 2010 — Vol. 6472 — C.423-435.
- [Olson, 2011]** Olson E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. — 2011. — C. 3400-3407.
- [Sokolov et al., 2017]** Sokolov M., Lavrenov R., Sagitov A., Sabirova L., Afanasyev I., Magid E. Modelling a crawler-type UGV for urban search and rescue in Gazebo environment // International Conference on Artificial Life and Robotics, — 2017. — C.360-363.
- [Trachtenbert, 1996]** Trachtenbert A. Computational methods in coding theory. MS thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign. – 1996.
- [Zhang et al., 2002]** Zhang X., Fronz S., Navab N. Visual Marker Detection and Decoding in AR Systems: A Comparative Study Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality. — 2002. — C. 97-106.