**АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ МЕТОК ARUCO И APRILTAG С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

**© 2025 г. Т.Н. Белов, М. Курченко, Н. Кузнецов**

*НИИ «Московский физико-технический институт», Долгопрудный*

\* e-mail: [belov.tn@phystech.edu](mailto:belov.tn@phystech.edu)

\*\* e-mail:

\*\*\* e-mail:

Поступила в редакцию \_\_.\_\_.2025 г.

После доработки \_\_.\_\_.2025 г.

Принята к публикации \_\_.\_\_.2025 г.

Изображения маркеров семейств aruco, apriltag, ARTag, CALTag и других используются для обнаружения позиции через них. В работе выполнено сравнение качества обнаружения позиций. В работе представлено сравнение методов на основе aruco и apriltag. Также сравнивается обнаружение одного маркера и куба с маркерами на каждой стороне, обнаружение по отдельности и их, как последовательности, с фильтром Кальмана, обнаружение на основе сгенерированных фотографий и на основе реальных.

[Добавить кратко про результаты, когда будут]

**Ключевые слова**: aruco, apriltag, фильтр Кальмана, OpenCV, компьютерное зрение, композиция меток, виртуальное пространство

**Введение.** Задача определения расположения объекта, а именно его позиция и вращение относительно камеры, для устойчивости решается через обнаружение заранее определенных и расположенных на объекте маркеров. На данный момент основными являются aruco и apriltag с различными их вариациями, как ArUcoE (1), и другие комбинированные решения (2).

К задачам, в которых они используются, относятся дополненная и виртуальная реальность, навигация на складах, производствах, навигации дронов в каких-либо других пространствах и другое. В силу наличия разных методов, при использовании также стоит задача определения метода, который будет лучше в общем или лучше подходить под конкретную задачу. Некоторые исследования качества методов обнаружения уже проводились, как обнаружение в целях AR (3), исследование aruco (4), сравнение некоторых методов (5), добавление дополнительных методов, не связанных с самим обнаружением, как фильтр Кальмана (6), обнаружение сгруппированных тегов (7) и другие исследования.

Этот метод также ассоциирован с некоторыми проблемами, как частичная видимость объекта, решаемая использованием множества тегов на объекте и обнаружение тех, которые полностью видны (8), примеры: CALTag, ChArUco board. Также тени и размытие из-за движения или расфокусированной камеры (7) могут привести к нераспознованию маркера. Даже в случае распознования из-за того, что маркер плоский его вращение не может быть однозначно определено, из-за чего решения иногда дают неверный результат (9).

В силу этих причин для конкретных ситуация какой-то метод может быть лучше или хуже по приведенным причинам, а также по скорости работы и точности в целом. В случае этой работы основная цель это сравнение методов обнаружения меток для задачи определения положения робота на поле в робофутболе (на позиции головы закреплен куб с меткой на каждой из сторон, аналогично работе (10)). В соответствии с этим в работе также используются траектории, заданные по времени, на которых сравниваются обычные методы обнаружения и другие, подкрепленные фильтром Кальмана (на подобии (10), но без учета вращения) и дополнительными методами. В работе также сравнивается использование для обнаружения одной метки (плоской пластины с меткой) и использование ранее упомянутого куба с метками.

Дополнительно в работе приведено сравнение результатов на основе изображений, сгенерированных в виртуальном пространстве (vtk) и на основе изображений с реальной камеры, чтобы определить возможность проведения подобных исследований только на основе более простого в использовании виртуального пространства.

# Существующие сравнения методов

## 1.1. Общая теория обнаружения тегов

Процесс идентификации тегов aruco и в том числе apriltag описан на странице opencv (11). Он состоит из:

* Конвертации пикселей изображения в черный и белый цвет
* Обнаружение контуров тегов
* Убирание перспективы
* Обнаружение белых и черных квадратов тега
* Идентификация тега по композиции цветов составляющих квадратов
* Улучшение положения обнаруженных углов тега
* Решение задачи перспективы n точек (определение положения тега относительно камеры)

В силу принципа обнаружения у рассматриваемых тегов различают два параметра: количество битов (соответствует количеству пикселей, которые могут быть черными или белыми), расстояние Хемминга.

Чем больше количество битов, тем больше доступных тегов. Однако и при одинаковом размере тега, на изображении его квадраты будут занимать меньшее количество пикселей и хуже распознаваться.

Расстояние Хемминга же показывает сколько из доступных тегов используется. При большем расстоянии, меньше тегов используется так, чтобы при неправильном обнаружении одного или нескольких пикселей тега можно было правильно определить номер исходного тега.

Подобное сравнение проводилось на основе aruco и apriltag с использованием двух семейств тегов (12).

### 1.2. Обнаружение заслоненных тегов

В силу принципа обнаружения тега нужно чтобы он был полностью виден на изображении. В задачах же часто тег может быть частично заслонен или быть частично в тени. Также уровень освящения и искажения изображения, например размытие, могут влиять на распознавание.

В таких случая часто решают задачу через обнаружение набора тегов на одной плоскости. Обнаружения хотя бы некоторых на полностью видимой части равносильно обнаружению всей группы тегов. К таким относятся CALTag и ChArUco board.

В силу невозможности обнаружения обычного частично заслоненного тега их сравнение невозможно. Тем не менее проводили сравнения решений из библиотек и выполненными через оригинальные методы, включая машинное обучение (1) (4).

## 1.3. Проблемы двойственности решения задачи обратной проекции

Теги являются плоскими, что упрощает решение задачи обратной проекции, но при этом приводит к двойственности решения этой задачи.

Два положения тега симметричных относительно плоскости зрения камеры будут изображены с небольшими отличиями на основе размера в силу перспективы, которые на большом расстоянии часто не позволяют определить действительное вращение тега.

Проблема часто решается через тени, окружение тега (8), модификации тега (13), выбор решения по истории обнаружений тега (10).

## 1.4. Использование последовательных обнаружений тега

В задачах часто тег нужно обнаруживать на протяжении некоторого времени. В таких условиях можно применить фильтр Кальмана и другие методы, использующие информацию о предыдущих позициях тега для корректировки последующих обнаружений.

Часто используют более простой, линейный фильтр Кальмана (5). Поскольку в задаче участвует вращение иногда используют расширенный кватернионный фильтр Кальмана (EQKF) (10).

1. **Предлагаемый метод анализа**

## 2.1. Семейства тегов

Основная цель эксперимента — определения более качественного детектора между aruco и apriltag, поэтому во всех экспериментах участвует сравнение этих двух методов. Используется aruco из библиотеки opencv и apriltag3 из публичного репозитория (apriltag). Всего использовали два семейства тегов aruco\_5x5 и apriltag36h11.

## 2.2. Композиции тегов

В задаче, на которую нацелена работа, используется куб. В силу этого также проводится сравнение качества обнаружения при участии куба (с тегом на пяти сторонах) [добавить изображение или сноску на него] с обнаружением только одного тега (тот же куб, но все теги кроме одного заслонены) [добавить изображение или сноску на него]. В обоих случаях по тегам определяется положение куба с системой координат по центру [добавить изображение или сноску на него]. Для определения позиции куба при нескольких обнаруженных тегах использовалось среднее позиций:

(где – позиция куба, полученная используя i-ый обнаруженный тег) и среднее вращение, минимизирующее квадраты норм отклонений:

(где – вращение куба полученное используя i-ый обнаруженный тег).

В обоих случаях алгоритм обнаружения тега определяет позицию самого тега. По полученному номеру тега и информации о конструкции тегов применяется обратное преобразование локальной позиции тега по отношения к системе координат всей конструкции (куба) для определения положения самой конструкции по отношению к камере. [добавить изображение или сноску на него]

– положение тега (t) в системе координат камеры (c)

– вращение тега (t) в системе координат камеры (c)

– обратное вращение к

– результат применения вращения к вектору

Аналогично присутствуют объекты: конструкция (k), гриппер (g), манипулятор (m).

## 2.3. Типы позиций

Использовали, как наборы отдельных позиций, не связанных друг с другом, так и траектории с параметром времени и приближающими теоретическую съемку движения объекта. В случае с траекториями сравнивали также их последовательное распознавание с использованием линейного фильтра Кальмана на позицию и их распознавание, как отдельных изображений без информации о других. В случае фильтра Кальмана также сравнивали использование дополнительных возможностей: определение лучшей из двойственных позиций и использование только тега видного под меньшим углом из всех.

## 2.4. Окружение и задание позиций

Сравнили использование изображений, сгенерированных на основе виртуального пространства (vtk), и полученных от реальной камеры. Информация о камере и ее позиции используется для экспериментов с виртуальным пространством для проведения аналогичных замеров. Далее мы их сравниваем для определения возможности использования vtk, как единственного источника данных в подобных анализах качества методов обнаружения.

В обоих случаях мы храним и используем для выставления и анализа позиции в виде (от камеры к конструкции).

В случае реальной камеры позицию выставляются использую манипулятор. Так как манипулятор задает положение своего гриппера, мы замерили позицию объекта в координатах гриппера ( ) и применяем преобразование:

Потом по известному локальному переходим к позиции родителя:

В случае vtk проводятся аналогичные преобразования, пропуская второй этап, так как в этом случае условная позиция гриппера соответствует позиции конструкции.

Также в vtk мы повторяем положение камеры и ее внутренние параметры (оптическая ось и фокусное расстояние в пикселях), полученные на основе реальной камеры.

Внутренние параметры:

Размер изображения ( – пикселей по ширине, - по высоте). Тогда центр окна (), угол зрения (va) и трансформация будут (t):

У камеры также есть дисторсия, которую мы не повторяли в vtk, так как алгоритмы определения позиции тега исправляют дисторсию изображения перед своей работой.

## 2.5. Метрики

Для определения качества распознавания мы используем три метрики.

Первая, процент изображений эксперимента, на которых были распознаны теги.

Вторая, среднее значение различия между обнаруженной позицией и считающейся истинной. Зависимо от обнаружения, поэтому высчитывается только по изображениям, где удалось распознать тег. Значение в метрах.

Третья, аналогична второй, но считает среднее различие по вращению. Значение в градусах.

(N – количество распознанных, – i-ое истинное положение и вращение объекта относительно камеры среди изображений с распознанными тегами, – i-ое распознанное положение и вращение объекта относительно камеры)

1. **Эксперименты**

### 3.1. Установка с манипулятором

Манипулятор: ur3

Камера:

Кубики: сделанные на 3d принтере, длина стороны 9 см, картинки с тегами распечатаны и наклеены на куб, размер тегов 7 см (рисунок 1).

**Рис. 1**

Вся установка (рисунок 2).

**Рис. 3,4**

**Рис. 2**

Использованные теги aruco (рисунок 3), apriltag (рисунок 4).

### 3.2. Независимые варьирования

Эти эксперименты направлены на выявление зависимости ошибки обнаружения от позиции тега. Для упрощения анализа в каждой траектории варьируются только два параметра из шести возможных (3 координаты позиции и 3 координаты вращения). Также для упрощения проведения замеров на манипуляторе траектории изначально заданы как варьирование позиции клешни манипулятора относительно манипулятора. Эти диапазоны указаны, как .

Также приведен примерный перевод в положение объекта относительно камеры, соответствующие замеренному на нашей установке, как .

Вращения указаны углами Эйлера. Если последовательность применения имеет значения, то она указана снизу диапазона.

В двух участвуют только смещения, в двух смещение и вращение (все вращения в градусах, таблица 1).

**Табл. 1**

### 3.3. Траектории

Эти эксперименты заданы формулой, описывающей движение объекта в зависимости от времени. Они были заданы так с целью симулировать съемку движения объекта с какой-то частотой кадров. Далее при обработке изображений в «хронологическом» порядке (по увеличению параметра времени в формуле), считая их за реальное движение объекта, можно применить фильтр Кальмана и другие приемы, использующие историю обнаружений одного и того же объекта. В основном используется только информация о предыдущей позиции.

Мы используем две траектории, одна без вращения и одна с вращением (все вращения в градусах, таблица 2).

**Табл. 2**

### 3.4. Повторение в виртуальном пространстве

Далее мы проводим аналогичные измерения на vtk.

Для возможности сопоставления результатов мы используем те же внутренние параметры камеры, что и замеренные в реальности.

Также положения относительно виртуальной камеры равны тем, что использовались в реальности, с точностью до результатов алгоритма hand-eye (подробнее позже).

### 3.5. Дополнительные этапы

Обе задачи, описанные тут, мы решаем с помощью функций из библиотеки OpenCV.

Для работы с камерой необходимы ее внутренние параметры и дисторсия. Для этого мы решаем задачу калибровки, используя изображения с шахматным полем.

Также в случае с манипулятором мы задаем ему . Однако в случае распознавания позиции камерой мы получаем . По заранее заданным локальным преобразованием мы получаем одно значение .

В общем наш приоритет на распознавании, что не привязано к манипулятору. Поэтому мы храним сразу же , выставляем их на манипуляторе и используем для анализа.

Для их преобразования в , необходимо преобразование , которое и определяется алгоритмом hand-eye в конфигурации eye-to-hand. В нашем случае мы проводим его на всех удачных изображениях с экспериментов, используя стандартный алгоритм aruco.

Алгоритм по наборам и , включающими минимум два непараллельным вращения, определяет .

Примерная схема показана на рисунке 5 (по наборам , находится ).

**Рис. 5**

1. **Результаты**

## 4.1. Независимые варьирования

## 4.2. Траектории

В таблице 3 представлены полученные значения метрик для разных конфигураций экспериментов с траекториями. В конфигурациях представлены, как виртуальное или реальное окружение, один тег или куб с тегами, использованный метод обнаружения, использовался ли фильтр Кальмана, использовались ли дополнительные методы к фильтру Кальмана (попытка взятия лучшей из двойственных позиций и использование только тега видного под меньшим углом).

**Табл. 3**

По первой метрике распознано было везде, где использовался куб, виртуальное окружение или “traj\_1”. На одном теге, “traj\_2” на реальных изображениях с aruco 8% было нераспознанно, с apriltag 29%.

На “traj\_1” с реальным окружением лучший результат по второй метрике у apriltag с одним тегом (0.015|3.4). По третьей метрике лучшее у apriltag с кубом, фильтром Кальмана и взятием лучшей двойственной (0.016|2.8). Худшие же обе метрики у aruco3 с кубом, фильтром Кальмана и взятием лучшей двойственной (0.029|6.2).

На “traj\_2” с реальным окружением по второй и третьей метрике лучший результат у apriltag с одним тегом (0.017|1.5), тем не менее у него много нераспознанных. По второй метрике худший результат у aruco3 с одним тегом и фильтром Кальмана (0.055|3.0).

На “traj\_1” с виртуальным окружением лучшее по второй метрике apriltag с кубом (0.005|4.8) и лучшее по третьей метрике aruco с кубом (0.011|4.2).

На “traj\_2” с виртуальным окружением лучший результат по второй метрике у apriltag с кубом (0.003|0.5). По третьей метрике лучшее у apriltag с кубом, фильтром Кальмана и взятием лучшей двойственной (0.039|0.4).

Мы также рассмотрели влияние изменение параметров обнаружения, как добавление тегов от одного тега до куба, добавление фильтра Кальмана, добавление выбора лучшей двойственной и выбора видного под меньшим углом к фильтру Кальмана. В каждом сравнении мы берем соответствующие настройки обнаружения, различающиеся по сравниваемому параметру, находим разницу метрик у соответствующих и берем среднее по всем.

Изменение второй и третьей метрики записано, как (a|b), где a – изменение второй метрики в метрах со знаком, b – изменение третьей метрики в градусах со знаком.

В таблице 4 представлены результаты переходом с одного тега на куб, с изолированного обнаружения на фильтр Кальмана, добавления выбора лучшей двойственной к фильтру Кальмана, добавления выбора видного под меньшим углом к фильтру Кальмана, добавления выбора лучшей двойственной позиции и видного под меньшим углом к фильтру Кальмана.

**Табл. 4**

Обнаружение набора тегов довольно значительно улучшило результаты. На “traj\_2” влияние меньше и с незначительными (1 мм по позиции и меньше 0,1 градуса по вращению) ухудшениями в некоторых позициях. Тем не менее оно улучшает первую метрику, что не представлено в таблице.

Фильтр Кальмана ухудшил обнаружение позиции на несколько сантиметров. Вероятная причина - сильная инертность скорости перемещение, под что надо подбирать параметры фильтра. В силу этого говорит наличие ухудшения только у “traj\_2”. Также среднее значение ошибок не вокруг нуля. Все позиции были скошены по оси аппликат, из-за чего фильтр нивелируя разброс не приближался к реальным позициям.

Выбор лучшей двойственной везде улучшил значения. По вращениям улучшение вплоть до 1 градуса при средних ошибках в районе 5-ти.

Выбор одного тега для определения позиции дал смешанные результаты. Вероятнее всего это ухудшает качество, но также может исключить иногда теги, которые были обнаружены в неправильном двойственном положении.

Их объединение дало результаты аналогичные выбору одного тега, но с более плохими результатами.

1. **Заключение**

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

(б.д.). Получено из https://openaccess.thecvf.com/content\_CVPR\_2019/html/Hu\_Deep\_ChArUco\_Dark\_ChArUco\_Marker\_Pose\_Estimation\_CVPR\_2019\_paper.html

(б.д.). Получено из https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1115078/

(б.д.). Получено из https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-61582-5\_12

(б.д.). Получено из https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-11292-9\_27

(б.д.). Получено из https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8441049/

(б.д.). Получено из https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-020-01307-9

(б.д.). Получено из https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320314000235

(б.д.). Получено из https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9196902/

(б.д.). Получено из https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9650050/

(б.д.). Получено из https://www.researchgate.net/publication/316592734\_Relative\_Vessel\_Motion\_Tracking\_using\_Sensor\_Fusion\_Aruco\_Markers\_and\_MRU\_Sensors

(б.д.). Получено из https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial\_aruco\_detection.html

(б.д.). Получено из https://april.eecs.umich.edu/media/pdfs/krogius2019iros.pdf

(б.д.). Получено из https://www.researchgate.net/publication/362902063\_A\_novel\_encoding\_element\_for\_robust\_pose\_estimation\_using\_planar\_fiducials

(б.д.). Получено из https://github.com/AprilRobotics/apriltag

**Подписи к рисункам к статье**

Рисунок 1. Кубики использованные в эксперименте вместе с обертками с распечатанными тегами

Рисунок 2. Установка с манипулятором и камерой

Рисунок 3. Набор тегов aruco (для печати использовали увеличенную версию)

Рисунок 4. Набор тегов apriltag (для печати использовали увеличенную версию)

Рисунок 5. Схема эксперимента с преобразованиями систем координат

A pair of cubes with black and white designs

AI-generated content may be incorrect.

Рисунок 1

A camera and a microphone in a room

AI-generated content may be incorrect.

Рисунок 2



Рисунок 3

A black and white logo

AI-generated content may be incorrect.

Рисунок 4

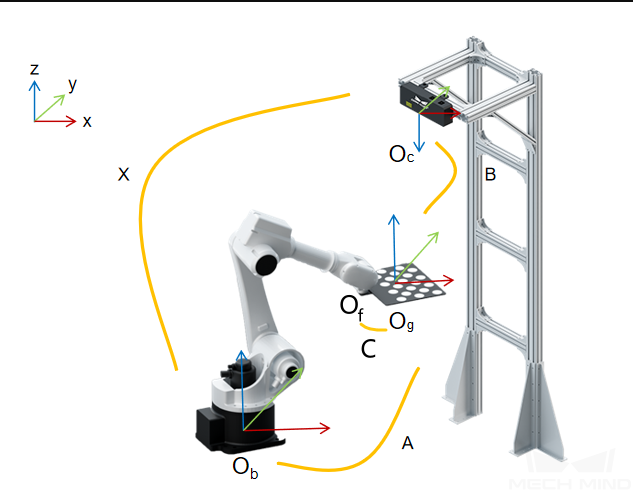


Рисунок 5

**Подписи к таблицам к статье**

Таблица 1. Разброс позиций экспериментов с независимыми варьированиями

Таблица 2. Разброс позиций экспериментов с непрерывными траекториями

Таблица 3. Полученные значения метрик для экспериментов на непрерывных траекториях

Таблица 4. Изменение метрик с переходом от одного тега на куб / на фильтр Кальмана / на добавление выбора лучшей двойственной к фильтру Кальмана / на добавлением выбора тега видного под меньшим углом к фильтру Кальмана / на добавление выбора лучшей двойственной позиции и тега видного под меньшим углом к фильтру Кальмана, значения в виде a|b – изменение второй метрики в метрах (a) и третьей метрики в градусах со знаков (b)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Название |  |  |  |  |
| “x\_y” |  |  |  |  |
| “x\_z” |  |  |  |  |
| “x\_rx” |  |  |  |  |
| “x\_rz” |  |  |  |  |

Таблица 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Название |  |  |  |  |
| “traj\_1” |  |  |  |  |
| “traj\_2” |  |  |  |  |

Таблица 2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Словарь настроек эксперимент | V1 | V2 | V3 |
| {'aruco3': False, 'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.028 | 6.018 |
| {'aruco3': False, 'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.029 | 6.018 |
| {'aruco3': False, 'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.029 | 5.250 |
| {'aruco3': True, 'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.028 | 6.018 |
| {'aruco3': True, 'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.029 | 6.018 |
| {'aruco3': True, 'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.029 | 6.150 |
| {'aruco3': False, 'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 7.921 | 0.034 | 3.681 |
| {'aruco3': False, 'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 7.921 | 0.051 | 3.681 |
| {'aruco3': False, 'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 7.921 | 0.051 | 2.049 |
| {'aruco3': True, 'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 7.921 | 0.035 | 3.716 |
| {'aruco3': True, 'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 7.921 | 0.053 | 3.716 |
| {'aruco3': True, 'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 7.921 | 0.053 | 2.084 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.015 | 3.422 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.016 | 3.422 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.016 | 2.990 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 28.713 | 0.017 | 1.510 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 28.713 | 0.035 | 1.510 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 28.713 | 0.035 | 1.510 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 4.716 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 4.716 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 4.716 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 5.019 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 5.019 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 4.716 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 4.716 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.026 | 4.716 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.027 | 5.019 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.027 | 5.019 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.031 | 3.003 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.051 | 3.003 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.048 | 2.541 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.051 | 2.104 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.048 | 2.753 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.031 | 3.003 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.055 | 3.003 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.052 | 2.541 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.055 | 2.104 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.052 | 2.753 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.015 | 2.836 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.016 | 2.836 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.016 | 3.310 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.016 | 2.774 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.016 | 3.288 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 1.980 | 0.017 | 2.953 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 1.980 | 0.040 | 2.953 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 1.980 | 0.039 | 1.511 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 1.980 | 0.040 | 1.689 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'real', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 1.980 | 0.039 | 1.511 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.011 | 4.330 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.330 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.334 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.011 | 4.330 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.330 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.334 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.016 | 0.830 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.048 | 0.830 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.048 | 0.830 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.016 | 0.830 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.050 | 0.830 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.050 | 0.830 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 5.315 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 5.315 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 5.313 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.003 | 0.566 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.039 | 0.566 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'single', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.039 | 0.566 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.011 | 4.186 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.186 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.312 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.191 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.317 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.011 | 4.186 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.186 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.312 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.191 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.012 | 4.317 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.018 | 0.545 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.047 | 0.545 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.044 | 0.911 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.047 | 0.545 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': False, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.044 | 0.911 |
| {'parser': 'simple', 'aruco3': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.018 | 0.545 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.050 | 0.545 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.047 | 0.911 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.050 | 0.545 |
| {'parser': 'kalman', 'aruco3': True, 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'aruco', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.047 | 0.911 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 4.838 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 4.838 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 5.315 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 4.837 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_1'} | 0.000 | 0.005 | 5.313 |
| {'parser': 'simple', 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.003 | 0.505 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.039 | 0.505 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': False, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.039 | 0.629 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': False, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.039 | 0.405 |
| {'parser': 'kalman', 'flip': True, 'filter': True, 'environment': 'virtual', 'composition': 'cube', 'method': 'apriltag', 'experiment': 'traj\_2'} | 0.000 | 0.039 | 0.629 |

Таблица 3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Переход | Окружение | “traj\_1” | “traj\_2” |
| От одного тега на куб тегов | Реальное окружение | -0,002|-1,06 | -0,002|+0,02 |
| Виртуальное окружение | -0,000|-0,25 | +0,001|-0,21 |
| На фильтр Кальмана | Реальное окружение | +0,001|+0,00 | +0,020|+0,00 |
| Виртуальное окружение | +0,000|+0,00 | +0,033|+0,00 |
| На выбор лучшей двойственной | Реальное окружение | +0,000|-0,09 | -0,000|-1,05 |
| Виртуальное окружение | +0,000|+0,00 | -0,000|-0,02 |
| На выбор тега видного под меньшим углом | Реальное окружение | -0,000|+0,16 | -0,002|-0,79 |
| Виртуальное окружение | -0,000|+0,24 | -0,002|+0,28 |
| На выбор лучшего двойственного и видного под меньшим углом | Реальное окружение | +0,000|+0,35 | -0,002|-0,65 |
| Виртуальное окружение | -0,000|+0,24 | -0,002|+0,28 |

Таблица 4