

**УДК 681.786.23
ВИРТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ СРАВНЕНИЯ
СИСТЕМ КООРДИНАТНЫХ МЕТОК
В СРЕДЕ GAZEBO****VIRTUAL APPROACH
FOR AUTOMATED EXPERIMENTS
OF FIDUCIAL MARKER COMPARISON
IN GAZEBO ENVIRONMENT**

*Шабалина К.С., младший научный сотрудник;
Сагитов А.Г., младший научный сотрудник;
Магид Е.А., профессор, заведующий кафедрой
интеллектуальной робототехники,
лаборатория интеллектуальных
робототехнических систем, Высшая
школа информационных технологий
и информационных систем Казанского
(Приволжского) федерального университета,
г. Казань, Россия*

*Shabalina K.S., Research Associate;
Sagitov A.G., Research Associate;
Magid E.A., Professor, Head of the Intelligent
Robotics Systems Laboratory, Higher Institute
for Information Technology and Information
Systems, Kazan (Volga Region) Federal
University, Kazan, Russia*

Аннотация

Калибровка камеры в качестве датчика системы технического зрения в беспилотных транспортных системах является обязательным условием, обеспечивающим надежность алгоритмов компьютерного зрения, что имеет критическое значение для безопасности передвижения беспилотного транспорта по дорогам общего пользования. Данная работа посвящена автоматизированному подходу для выполнения экспериментов по сравнению систем координатных меток, которые используются для калибровки различных камер. В предыдущих работах авторов было проведено экспериментальное сравнение систем ARTag, AprilTag и CALTag в трех различных условиях: систематическое перекрытие, произвольное перекрытие с помощью объекта и вращения меток. Однако для того, чтобы результаты экспериментов имели статистически весомый характер, необходимо существенно увеличить число проводимых экспериментов. Используя систему Gazebo, в виртуальной среде был разработан робот, который выполняет все необходимые действия для проведения эксперимента автоматически; в свою очередь, для приближения симуляционного моделирования к реальным условиям при работе с метками был добавлен гауссовский шум.

Работа осуществлена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №17-48-160879. Часть работ выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства науки и технологий и Государством Израиль (совместный проект ID 15-57-06010).

Abstract

Calibrating cameras as sensors of unmanned mobile robotic systems is required and ensures the reliability of computer vision algorithms, which plays a crucial role for the safety of locomotion on public roads. This paper is devoted to experimental automated approach for comparing fiducial marker systems which used for camera calibration. Previously we experimentally compared ARTag, AprilTag, CALTag systems under three types of different conditions: systematic occlusion, arbitrary overlap with an object and markers rotation. However, to improve statistical significance of our experimental work we need to conduct over a thousand additional experiments. Using Gazebo environment, we implemented virtual robot system that performs

all necessary manipulations of experiments automatically. We investigate addition of Gaussian noise to make simulations closer to real world.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR, project ID 17-48-160879). Part of the work was supported by RFBR and Ministry of Science Technology & Space State of Israel (joint project ID 15-57-06010).

Ключевые слова: робот, моделирование, алгоритмы, системы координатных меток, экспериментальное сравнение, ARTag, AprilTag, CALTag, ROS, Gazebo, симуляция.

Key words: robot, modelling, algorithm, fiducial marker system, experimental comparison, ARTag, AprilTag, CALTag, ROS, Gazebo, simulation.

Введение

Системы координатных меток – системы, которые будут автоматически обнаружены камерой с помощью соответствующего алгоритма распознавания. Они имеют применение в различных областях: физика, медицина, робототехника, дополненная реальность, метрология. В области робототехники отводятся следующие сценарии использования систем меток: навигация роботов [6], локализация [2], картографирование [7], калибровка камеры [3], а также задачи, требующие вычисление позиции и ориентации камеры [4]. В свою очередь, робототехника и технологии компьютерного зрения тесно взаимодействуют для реализации таких задач, как: автоматизированный режим робототехнической системы, беспилотные автомобили, системы технического зрения, анализ окружающей ситуации на основе нейронных сетей и технологий компьютерного зрения. При использовании камер или лидара в этих системах в качестве датчиков необходима их калибровка [6]. В беспилотных системах, где для автономной навигации робототехнических систем используются камеры в качестве датчиков (в интеграции с технологиями компьютерного зрения), калибровка повышает надежность алгоритма движения и повышается точность реконструкции карты [8]. Эти факторы напрямую обеспечивают безопасность передвижения беспилотных транспортных систем.

В настоящее время существует несколько методов калибровки камеры, но самым популярным остается метод 2D калибровки камеры с помощью плоского шаблона.

Под плоским шаблоном понимается классический шаблон шахматной доски [10], а также координатные системы меток – альтернатива стандартному шаблону. Такой процесс необходим не только для функционирования транспортных беспилотных роботизированных системах, но и в робототехнических системах с другими типами управления (например, в телеоперируемых системах).

Для проведения экспериментальных работ по верификации результатов оценки эффективности функционирования систем координатных меток в качестве робототехнической системы нами был выбран Российский антропоморфный (человекоподобный) робот производства компании «Андроидная техника» AR-601M [5]. В рамках поставленной задачи – калибровки камеры и манипуляторов робота AR-601M – были выбраны несколько систем координатных меток, которые потенциально могут быть использованы для решения этой задачи. Однако важно учесть, что каждая система координатных меток имеет свои слабые и сильные стороны, которые определяют возможные и наиболее подходящие области применения меток. Поэтому первоначально необходимо сравнить выбранные системы для определения подходящей системы для поставленной специфичной задачи.

Существует несколько критериев оценки эффективности функционирования и производительности меток [3], однако в этой работе внимание сфокусировано на исследовании устойчивости меток к их перекрытию, так как это часто встречающийся фактор при работе

с метками в реальных условиях с роботом: метки обычно перекрываются различными объектами, находящимися в рабочей области манипуляторов робота, а также возможна ситуация перекрытия метки частями собственного тела робота. Важно отметить, что метки для калибровки должны быть закреплены на самом роботе, вследствие чего в ходе работы они имеют угол наклона относительно камеры, что также влияет на способность успешного обнаружения метки в пространстве, ее дальнейшего распознавания и классификации [3].

В ранних исследованиях нами вручную были проведены эксперименты для

оценки устойчивости системы при перекрытой области метки (систематическое и произвольное перекрытие с помощью объекта) и её различного вращения относительно камеры [9]. Проведение экспериментов вручную требует большое количество времени, а проведение более тысячи испытаний крайне затруднительно в разумные сроки, вследствие чего было решено автоматизировать процесс проведения экспериментов. Для автоматизации экспериментов была использована среда ROS (Робототехническая Операционная Система) и программный 3D-симулятор Gazebo (рис. 1).

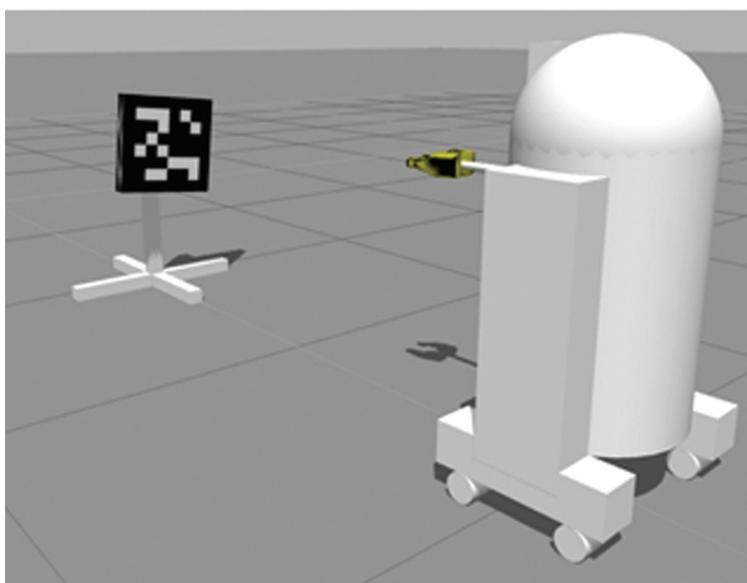


Рис. 1. Симулятор Gazebo

Ранние исследования

Первоначально, для проведения исследований, в качестве потенциально оптимальных систем координатных меток были выбраны ARTag [3, 4], AprilTag [7] и CALTag [1]. В предыдущей части работы все эксперименты с метками были проведены вручную. Экспериментальная работа состояла из двух частей: экспериментов с веб-камерой Genius FaceCam 1000X и экспериментов с антропоморфным роботом AR-601M (рис. 2). Были разработаны два типа дизайна экспериментов, отличающиеся уровнем сложности. Первый тип

состоял из систематического и произвольного перекрытия метки объектом. Второй тип (усложненный) состоял из нескольких манипуляций: вращение метки, систематическое перекрытие, вращение метки с систематическим перекрытием и произвольное перекрытие с помощью объекта. Пример первого типа экспериментов показан на рис. 3. На рис. 4 показана схема вращения метки, относящаяся к экспериментам второго типа дизайна. На рис. 5 показан пример эксперимента вращения метки согласно установленной схеме вращения. Первоначально все эксперименты были вы-



Рис. 2. Робот AR-601M, Казанский федеральный университет

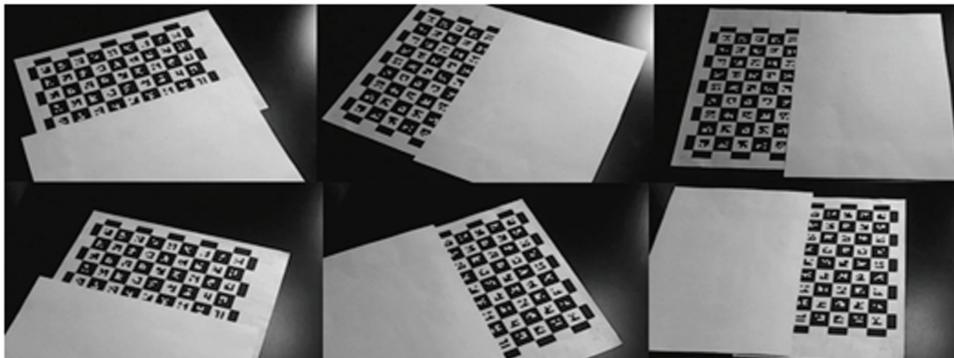


Рис. 3. Пример первого типа экспериментов – систематического перекрытия метки CALTag

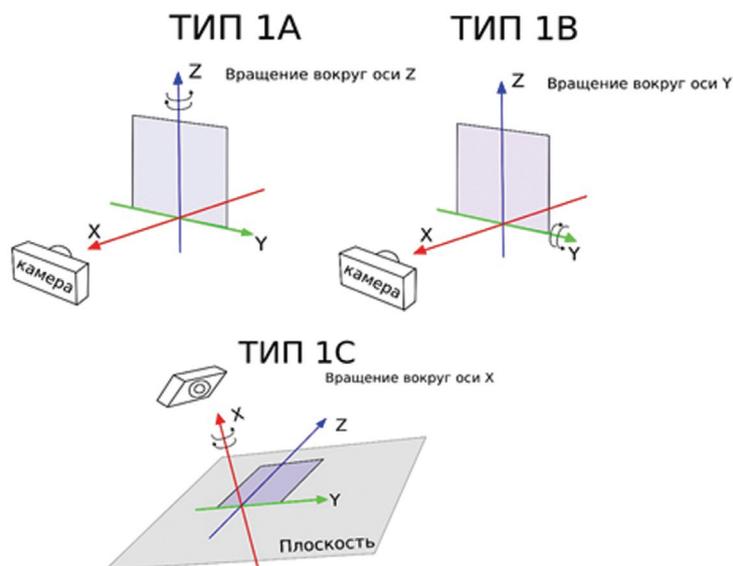


Рис. 4. Схема вращения метки относительно осей X, Y, Z

полнены с использованием камеры Genius FaceCam 1000X для исследования возможностей меток с использованием недорогого

оборудования. Далее эти же эксперименты были выполнены с использованием фронтальной камеры робота AR-601M – модели

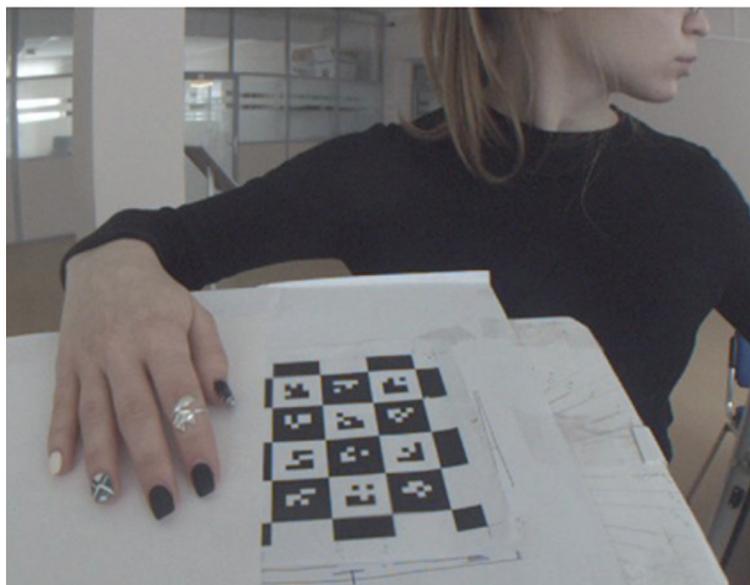


Рис. 5. Эксперименты по вращению метки CALTag относительно оси X с одновременным систематическим перекрытием метки (Шабалина К.С.)

асA640-90gc, производимой компанией Basler AG.

По результатам всех экспериментов, системы меток AprilTag и ARTag продемонстрировали высокую чувствительность к перекрытию границ меток; они показали удовлетворительные результаты в экспериментах с произвольным перекрытием меток, а в экспериментах вращения метки система распознала метку при любом заданном угле вращения. В свою очередь, система CALTag показала высокую устойчивость ко всем типам перекрытия: перекрытие границ, произвольное перекрытие с помощью объекта и вращение метки [9].

Среда ROS Gazebo

Робототехническая Операционная Система (англ. Robot Operating System) – это самый популярный фреймворк для программирования роботов, впервые разработанный компанией Willow Garage. Основной идеей ROS является совместное создание программного обеспечения распределенными и, возможно, даже не связанными между собой командами для нужд робототехники. Каждый разработчик может использовать и улучшать пакеты ROS (пакет – это атомарный блок в системе ROS, который представляет одну или не-

сколько функций, реализующих определенный функционал под конкретную задачу) или создать новый пакет. Все вычисления в ROS производят процессы – так называемые «ноды».

Gazebo – это 3D-симулятор для моделирования различных типов роботов, позволяющий создавать новых роботов и тестировать алгоритмы на этих роботах в режиме симуляционного моделирования. Gazebo включает в себя моделирование физики, модели роботов и окружающей среды, и пользовательские плагины. Gazebo был выбран благодаря своей готовой интеграции с ROS и доступным пользовательским возможностям для работы с моделями робота, которые позволяют создавать собственные программы по управлению контроллерами роботов.

Дизайн экспериментов

Автоматизированное выполнение большого количества экспериментов с каждой из семейств меток позволяет свести к минимуму затраченные на изнурительную и несложную техническую работу человеко-часы и усилия. Для реализации этой цели был создан виртуальный мир Gazebo с двумя роботами: роботом R2D2 («наблюдатель») и роботом, управляющим меткой («испол-

нитель»). Робот «исполнитель» фактически представляет собой несколько взаимозаменяемых моделей роботов, разработанных для каждого типа экспериментов (согласно схеме, рис. 4).

В рамках данной работы проводились пилотные эксперименты только с одной из семейств меток – AprilTag, а автоматизированный тип эксперимента состоял во вращении метки относительно оси Z. Этот тип эксперимента представлен на рисунке 4 как Тип 1А. Ограниченность поставленной задачи объясняется ее целью: пилотной оценкой дизайна и функционирования виртуальной системы перед ее внедрением с полномасштабным функционалом.

Робот «исполнитель» был реализован с использованием пакета `ros_control`. Требовалось настроить ПИД-регулятор вращательного сустава и разработать программу для вращения метки роботом относительно оси Z на заданный угол (от 0 до 90 градусов) в обоих направлениях (реализовано как нода `tag_rotation_node`). Используя уже существующую реализацию AprilTag в ROS (`apriltags_ros` от Mitchell Wills), разработанная программа обнаруживает метку в наборе кадров от камеры робота «наблюдателя» R2D2, а робот «исполнитель» поворачивает метку AprilTag, публикуя

результаты текущего распознавания метки (идентификатор (ID) метки и угол поворота метки). Таким образом, эксперимент полностью автоматизирован; по завершению эксперимента (достижения нужного количества итераций) пользователь получает краткое резюме результатов проведенных экспериментов: количество обнаруженных меток из общего количества итераций и информацию о каждом вращении метки и ее статусе обнаружения системой.

Чтобы приблизить эксперименты к реальным условиям, были добавлены три параметра гауссовского шума (`stddev`) для камеры робота R2D2: 0.009, 0.09 и 0.1. На рисунке 6 показаны примеры изображения с камеры при различном уровне гауссовского шума. Изображение слева соответствует параметру `stddev=0.009`, и рассматривается как обычный уровень шума для реальной камеры. Изображение в центре имеет `stddev=0.09`, что представляет собой умеренный (средний) уровень шума. На изображении справа камера имеет `stddev=0.1`, что представляет собой высокий уровень шума и, фактически, является пороговым значением между возможным распознаванием метки системой (`stddev <= 0.1`) и невозможным распознаванием системой (`stddev > 0.2`).

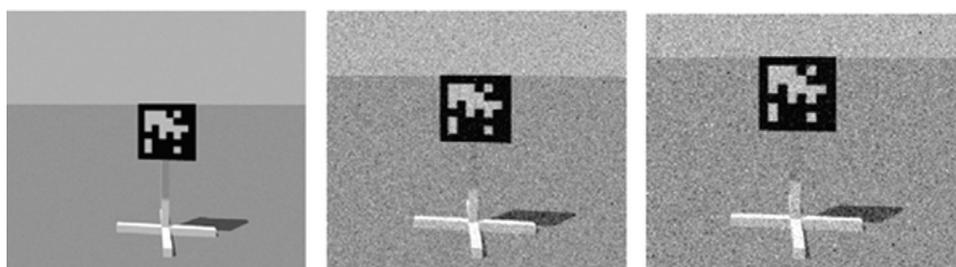


Рис. 6. Кадры с камеры робота «наблюдателя» при различном уровне гауссовского шума. Слева направо применены следующие параметры: 0.009, 0.09, 0.1

Результаты экспериментов

Для автоматизированных экспериментов были выбраны 4 метки AprilTag с четырьмя определенными идентификаторами, соответствующими меткам в нашей предыдущей работе [Shabalina, Magid, Sagitov, in press]: ID 4, 6, 8, 9 (первоначаль-

но в [Shabalina, Magid, Sagitov, in press] эти идентификаторы были выбраны случайным образом). В автоматическом режиме были выполнены три тысячи экспериментов для каждой метки. Результаты экспериментов продемонстрированы в таблице 1. Каждая метка была обнару-

жена при повороте вплоть до 41 градуса с низким параметром шума (0.009) и до 25-38 градусов с высоким уровнем шума (0.1). Низкий процент успешных экспериментов в Таблице 1 объясняется вращением меток до 89 градусов и наличием одного из трех параметров шума. Важно отметить,

что количество произвольно обнаруженных меток и, наоборот, не обнаруженных меток при малом угле вращения (хотя метка должна быть обнаружена / не должна быть обнаружена согласно статистическим результатам) увеличивается с повышением уровня шума.

Таблица 1

Процент успешного распознавания метки при заданном уровне шума в ходе вращения метки относительно оси Z

ID Метки	Уровень шума (Stddev)		
	Низкий (0.009)	Средний (0.09)	Высокий (0.1)
4	60,8%	42,2%	30,2%
6	49,8%	35,4%	22,7%
8	40,9%	32,4%	25,3%
9	43,3%	20,8%	17,4%

Заключение

В этой статье представлен разработанный способ автоматизации виртуальных экспериментов в среде ROS Gazebo, который позволяет осуществить большое количество виртуальных экспериментов за достаточно короткое время и на основе статистически значимого анализа виртуальных результатов построить правильный дизайн реальных экспериментов с минимизированием их избыточного количества. Для автоматизации был построен мир в симуляторе Gazebo, который включал в себя робота R2D2 («наблюдатель») и робота, который манипулировал закрепленной на него меткой AprilTag («исполнитель»). «Исполнитель» вращал метку AprilTag на заданный угол (от 0 до 90 градусов) в обоих направлениях с помощью вращательного сустава. Далее вращение было интегрировано с детектором меток AprilTag, что позволило отслеживать статус распознавания метки на каж-

дом углу ее вращения. Чтобы смоделированная среда была приближена к реальным условиям, были добавлены три различных значения стандартного отклонения гауссовского шума (stddev). По результатам пилотных экспериментов с меткой AprilTag, система обнаруживала метки до 40 градусов ее поворота относительно камеры с низким уровнем шума и до 25-38 градусов с высоким уровнем шума.

В рамках будущей работы планируется построить автоматический инструмент для выполнения всех типов экспериментов перекрытия меток выбранных систем: AprilTag, CALTag и ARTag. Также планируется уделить внимание классическому методу калибровки камеры – шаблону шахматной доски – для изучения её сильных и слабых сторон в сравнении с новыми альтернативными системами. Наиболее устойчивая ко всем типам перекрытия система будет выбрана для калибровки камеры и манипуляторов AR-601M.

Список литературы

1 Atcheson B., Heide F., Heidrich W. CALTag: High Precision Fiducial Markers for Camera Calibration // Vision, Modeling, and Visualization Workshop. – 2010. – Vol.10. – P. 41–48.

2. Dhiman V., Ryde J., Corso J. Mutual localization: Two camera relative 6-DOF pose estimation from reciprocal fiducial observation // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – 2013. – P. 1347–1354.
3. Fiala M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques // Computer Vision and Pattern Recognition. – Vol.2. – 2005. – P. 590–596.
4. Hirzer M. Marker Detection for Augmented Reality Applications // Seminar/Project Image Analysis Graz. – 2008. – P. 1–25.
5. Khusainov R., Afanasyev I., Sabirova L., Magid E. Bipedal robot locomotion modelling with virtual height inverted pendulum and preview control approaches in Simulink environment // Journal of Robotics, Networking and Artificial Life. – Vol3(3). – 2016. – P. 182–187.
6. Levinson J., Askeland J., Becker J., Dolson J., Held D., Kammel S., Kolter J.Z., Langer D., Pink O., Pratt V., Sokolsky M. Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms // In Intelligent Vehicles Symposium (IV). – 2011. – P. 163–168.
7. Olson E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 2011. – P. 3400–3407.
8. Royer E., Lhuillier M., Dhome M., Lavest J.M. Monocular vision for mobile robot localization and autonomous navigation // International Journal of Computer Vision. – 74(3). – 2007. – P. 237–260.
9. Shabalina K., Magid E., Sagitov A. ARTag, AprilTag and CALTag Fiducial Systems: Comparison in a Presence of Partial Rotation Through Manual and Automated Approaches // Lecture Notes in Electrical Engineering. in press.
10. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 22(11). – 2000. – P. 1330–1334.