

# Разработка программного обеспечения для системы ориентации мобильной роботизированной системы в пространстве на основе стереозрения

А.И. Ярославцева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, ул. Гагарина, 59/1, Рязань, 390005, Россия

## Аннотация

Алгоритмы стереозрения могут представлять большой интерес для проектирования систем компьютерного зрения автономных мобильных объектов. В статье представлено описание и результаты реализации метода стереозрения на одноплатном компьютере. Стоит отметить, что для многих мобильных систем энергоэффективность, размер и стоимость будут важнее производительности. В результате выполнения практической части была развернута программная оболочка для реализации алгоритма стереозрения на одноплатном компьютере Raspberry Pi под управлением операционной системы Linux, а также сравнение производительности одноплатных компьютеров с различными техническими характеристиками. Предлагаемые результаты могут представлять интерес при проектировании систем технического зрения для прикладных применений.

## Ключевые слова

Стереозрение, калибровка камеры, карта глубины, одноплатные компьютеры, Raspberry Pi, установка операционной системы.

# Development of Software for the Orientation System of a Mobile Robotic System in Space Based on Stereo Vision

A.I. Yaroslavtseva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V.F.Utkin, 59, Ryazan, 390005, Russia

## Abstract

Stereovision algorithms may be of great interest for the design of computer vision systems for autonomous mobile objects. The article presents the content and results of the stereo vision method implementation on a single-board computer. It is worth noting that for many mobile systems, energy efficiency, size, and cost will be more important than performance. As a result of the work, a software shell was deployed to implement the stereovision algorithm on a Raspberry Pi single-board computer running the Linux operating system, as well as a comparison of the performance of single-board computers with various technical characteristics. The proposed results may be of interest in the design of vision systems for applied applications.

## Keywords

Stereo vision, camera calibration, depth map, single-board computers, Raspberry Pi, operating system installation.

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: 79065445680@yandex.ru (А.И. Ярославцева)

ORCID: 0000-0001-7612-813X (A.I. Yaroslavtseva)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## 1. Введение

Трёхмерное машинное зрение востребовано во многих технических областях, таких как контроль производства, робототехника, моделирование, системы активной безопасности в автомобилестроении, медицина и другие. Потребность в трёхмерном зрении остро стоит в интеллектуальных робототехнических комплексах – для распознавания объектов и ориентации в пространстве роботу необходимо быстро и безошибочно строить объёмные модели окружающего пространства [8].

В настоящее время все чаще упоминаются системы, состоящие из комбинаций нескольких видеокамер, лазерных радаров, тепловизоров и других источников получения информации об окружающей среде [11]. Широкое применение оборудование такого класса получило при создании автопилотов для транспортных средств, систем контроля безопасности, беспилотной авиаразведки, различных бытовых роботов. Применение стереозрения позволяет получать данные о глубине изображения и расстоянии до объектов, строить трехмерную картину окружающего мира [9].

Задача разработки мобильных робототехнических систем занимает одно из ведущих мест среди проблем современной науки и техники. Современный этап развития науки и техники тесно связан с широким внедрением автономных роботизированных систем. Одной из наиболее актуальных проблем синтетического зрения является пространственная ориентация робота [12].

Алгоритмы стереовидения могут представлять большой интерес для проектирования систем компьютерного зрения автономных мобильных объектов.

Применение стереовидения для оценки расстояний до окружающих объектов часто рассматривается при проектировании систем компьютерного зрения мобильных и автономных роботизированных систем [10].

Точность расчета и максимальная дальность измерения расстояния до объекта с помощью стереовидения зависит от параметров стереосистемы и разрешающей способности датчиков. В процессе изменения этих параметров можно точно определить расстояния до объектов, находящихся на расстоянии 50-100 м [7].

## 2. Одноплатные компьютеры

Одноплатный компьютер — компьютер, собранный на одной печатной плате, на которой установлены микропроцессор, оперативная память, системы ввода-вывода и другие модули, необходимые для функционирования компьютера [1]. Одноплатные компьютеры изготавливаются в качестве демонстрационных систем [15]. Они могут быть предназначены для разработчиков или применяться в рамках обучения, а также использоваться в роли промышленных или встраиваемых компьютеров [16].

В отличие от традиционных персональных компьютеров форм-фактора «desktop» (стандарты AT, ATX, и т. п.), одноплатные компьютеры часто не требуют установки каких-либо дополнительных периферийных плат.

### 2.1. Raspberry Pi

Raspberry Pi — это полноценный одноплатный компьютер, построенный на ARM-архитектуре и обладающий небольшой ценой и малыми габаритами [2]. У него есть процессор, ОЗУ, видеоускоритель, а некоторые модели линейки обладают множеством полноценных разъёмов, включая USB, Ethernet и microHDMI. Другими словами, он полностью готов к работе из коробки. Микрокомпьютер разрабатывается британской компанией Raspberry Pi Foundation.

Для начала работы с Raspberry Pi необходимы:

- Сам одноплатный миникомпьютер Raspberry Pi
- Блок питания постоянного тока 5В/2А
- Кабель USB - MicroUSB
- Монитор с HDMI-входом

- Кабель HDMI
- Карта памяти microSD (ёмкостью от 8 до 64 Гб включительно)
- Проводная USB-мышка и клавиатура (или беспроводной аналог с Bluetooth адаптером)

Преимущества Raspberry Pi:

- Низкая стоимость
- Низкое энергопотребление
- Разумная производительность процессора, графического ядра и памяти
- Широкая доступность по всему миру
- Хорошая документированность
- Большая экосистема разработчиков, пользователей и поставщиков дополнительного оборудования
- Стабильный производитель (более семи лет)
- Множество опций операционной системы, большинство из которых с открытым исходным кодом и не требуют затрат на лицензирование

Ограничения на аппаратном уровне:

- CPU и GPU используют одну и ту же оперативную память
- Интерфейс USB – это USB 2.0
- Порты USB и Ethernet используют одну и ту же шину, и один и тот же контроллер, что ограничивает полосу пропускания
- Нет встроенного АЦП
- Система не имеет часов реального времени и, как правило, использует сетевое соединение для получения текущего времени при включении питания
- Операционная система Raspbian предназначена для использования на настольных компьютерах и не очень подходит для встроенных приложений.

### 2.1.1. Выбор модели

Первые Raspberry Pi поступили в продажу ещё в 2012 году, и с тех пор устройство претерпело множество изменений, что в конечном итоге вылилось в различные вариации [17].

Raspberry Pi Zero W (рисунок 1).



Рисунок 1 – Raspberry Pi Zero W

Базовым и самым доступным является Raspberry Pi с одноядерным процессором и 512 МБ ОЗУ. Он подойдёт только для решений, где важна компактность. В иных случаях стоит отдать предпочтение более производительным моделям. От обычного Pi Zero он отличается лишь наличием беспроводных интерфейсов Bluetooth и Wi-Fi, которые зачастую используются в проектах.

Raspberry Pi 3 Model B+ (рисунок 2).

От обычной Pi 3 Model B эта модель отличается наличием более быстрого четырёхядерного процессора Broadcom BCM2837B0, порта Gigabit Ethernet с пропускной способностью до 300 Мбит/с, технологии Power over Ethernet, а также поддержкой Wi-Fi 5 ГГц.

Raspberry Pi Compute Module 3+ (рисунок 3).



**Рисунок 2** – Raspberry Pi 3 Model B+



**Рисунок 3** – Raspberry Pi Compute Module 3+

Одноплатный компьютер представляет из себя всё тот же Raspberry Pi 3 Model B+ по компонентам, но в более компактном форм-факторе. У девайса нет портов — добавить их можно только с помощью платы расширения Compute Module 1/3/3+ IO Board. На ней расположен разъём DDR2 SODIMM, в который вставляется вычислительная плата. Сама компания позиционирует Compute Module 3+ как девайс для интеграции с другими продуктами, а не как решение для самостоятельного использования.

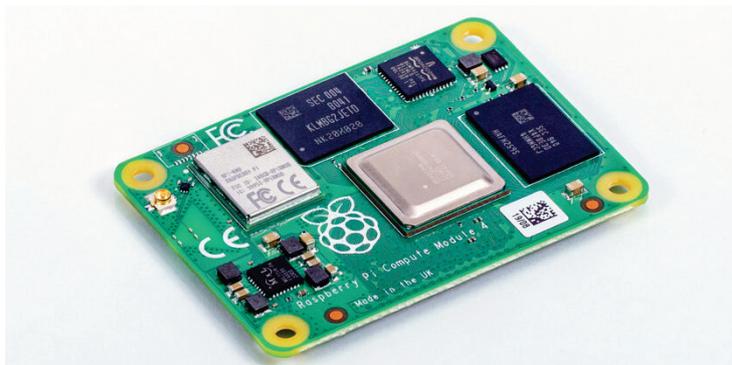
Raspberry Pi 4 Model B (рисунок 4).



**Рисунок 4** – Raspberry Pi 4 Model B

Является самым производительным в линейке мини-компьютеров на данный момент. На выбор доступно 2, 4 или 8 ГБ оперативной памяти. Последний вариант на текущий момент избыточен для большинства ситуаций, но будет полезен для запуска сразу нескольких виртуальных машин или использования RAM-диска. В этой модели добавили 2 быстрых порта USB 3.0 и Bluetooth 5.0.

Raspberry Pi Compute Module 4 (рисунок 5).



**Рисунок 5** – Raspberry Pi Compute Module 4

Raspberry Pi Compute Module 4 является упрощенной версией стандартной модели. Достоинства Pi Compute Module 4 заключаются в компактности и более низкой цене. Другие характеристики одинаковы с Raspberry Pi 4. Портов нет, решением является дополнительная плата IO Board. Ее особенностью является наличие слота PCIe Gen 2 ×1.

Raspberry Pi 400 (рисунок 6).



**Рисунок 6** – Raspberry Pi 400

Pi 400 была представлена относительно недавно, плата представляет из себя обычную Pi 4 Model B, но без Jack 3,5-мм и Power over Ethernet. Особенностью является то, что плата находится в совмещённом с клавиатурой корпусе. Также стоит обратить внимание на наличие более новой версии процессора относительно прошлой модели: благодаря этому базовая частота чипа на 0,3 ГГц выше, а разогнать его удаётся до 2,2 ГГц, в то время как раньше максимум был зафиксирован на отметке 2,147 ГГц. Внутри корпуса расположена металлическая пластина, выполняющая роль радиатора, которая эффективно отводит тепло.

Для работы была выбрана плата Raspberry Pi3 Model B+. Хотя Raspberry Pi3 Model B+ не является последней версией Raspberry Pi, он считается более надёжным, пока не будут устранены недочеты Raspberry Pi4.

### 2.1.2. Выбор операционной системы

Для Raspberry Pi доступно множество операционных систем. Выбор зависит от назначения, а также проекта, в котором будет использоваться одноплатный компьютер.

Официальной операционной системой для микрокомпьютера Raspberry Pi является Raspbian, рекомендованная Raspberry Pi Foundation [3]. Raspbian основан на Debian, но имеет специфические особенности, адаптированные для плат Raspberry Pi. Raspbian поставляется с предустановленным множеством программного обеспечения для разработки, образования и мультимедиа, что делает его лучшей ОС общего назначения для пользователей Raspberry Pi.

Также ОС имеет предустановленное окружение Raspberry Desktop. Но с окружение рабочего стола может быть заменено, например, на привычный для многих пользователей Linux GNOME. Есть версия системы без графического интерфейса — Raspberry Pi OS Lite, которая может быть полезна для проектов, где не предполагается регулярное использование оболочки (к примеру, если Raspberry Pi выступает в роли метеостанции или сервера).

#### Ubuntu Desktop

Список микрокомпьютеров, поддерживающих ОС:

- Raspberry Pi 2 (Ubuntu Server)
- Raspberry Pi 3 (Ubuntu Server)
- Raspberry Pi 4
- Raspberry Pi 400

Популярный GNU/Linux-дистрибутив выпущен специально для Raspberry Pi. Отличается от Raspberry Pi OS дизайном и широким функционалом. Предустановлено графическое окружение GNOME. Главным недостатком является достаточно медленная работа системы.

Есть более легкая версия - Ubuntu Server без графического интерфейса, подойдет для проектов, в которых он не нужен для работы не нужен. Является более лёгкой, и поэтому будет значительно быстрее в работе.

#### CentOS

Микрокомпьютеры, поддерживающих ОС:

- Raspberry Pi 2
- Raspberry Pi 3
- Raspberry Pi 4

CentOS основана на дистрибутиве Red Hat Linux и считается одной из самых стабильных систем. Стабильность заключается в том, что все системные инструменты здесь используются достаточно давно и имеют высокую отказоустойчивость. Ещё одно преимущество ОС — длительное время поддержки. CentOS подойдёт для серьёзных проектов, где необходима надёжность. Одним из вариантов использования может также стать создание веб-сервера на базе Raspberry Pi.

#### Manjaro

Может быть установлена на следующих микрокомпьютерах:

- Raspberry Pi 4
- Raspberry Pi 400

Дистрибутив основан на Arch Linux и обладает несколькими вариантами окружения рабочего стола - XFCE и KDE Plasma. Имеет интуитивный пользовательский интерфейс, но не отличается высокой скорости работы. Хороший вариант для обычных пользователей, а использования в рамках серьезных проектов.

#### LibreELEC

Список микрокомпьютеров, поддерживающих данную ОС:

- Raspberry Pi 0 / W
- Raspberry Pi 1
- Raspberry Pi 2
- Raspberry Pi 3
- Raspberry Pi 4

Минималистичная система на ядре Linux с предустановленным плеером Kodi. В отличие от других систем, доступна на всех моделях Raspberry Pi. Умеет воспроизводить видеофайлы не только с внешних накопителей, но и из домашних сетевых хранилищ, а некоторые микрокомпьютеры Raspberry Pi могут воспроизводить 4K-видео. Сама операционная система является достаточно легкой.

## 2.2. Камеры для Raspberry Pi

Raspberry Pi Camera v2 (рисунок 7) - камера с инфракрасным фильтром, позволяющая вести съёмку в инфракрасном спектре и в условиях слабой или полностью отсутствующей освещённости.



Рисунок 7 – Raspberry Pi Camera v2

Характеристики:

- Матрица: Sony IMX219PQ с ИК-фильтром;
- Разрешение матрицы: 8 Мп;
- Максимальный размер изображения: 3280 x 2464;
- Поддерживаемые форматы видео: 1080p (30fps), 720p (60fps), 640×480p (90fps);
- Эквивалентное фокусное расстояние: 33 мм;
- Светосила объектива:  $f/2$ ;
- Размеры: 25×20×9 мм
- Вес: 3 г

Модуль подключается по видеовходу CSI, благодаря чему снижается нагрузка на процессор. Модуль совместим со всеми моделями Raspberry Pi 1, 2 и 3.

Для работы с камерой вам понадобится библиотека Picamera.

StereoPi (рисунок 8) - это стереоскопическая камера базе Raspberry Pi. Совместима со всеми вариантами модулей: CM1, CM3 (normal и Lite) и CM3+ (normal и Lite).

Может захватывать, сохранять, транслировать и обрабатывать стереоскопическое видео и изображения в реальном времени. StereoPi открывает бесчисленные возможности в робототехнике, AR / VR, компьютерном зрении, беспилотных приборах, создании панорамных видео и многом другом.

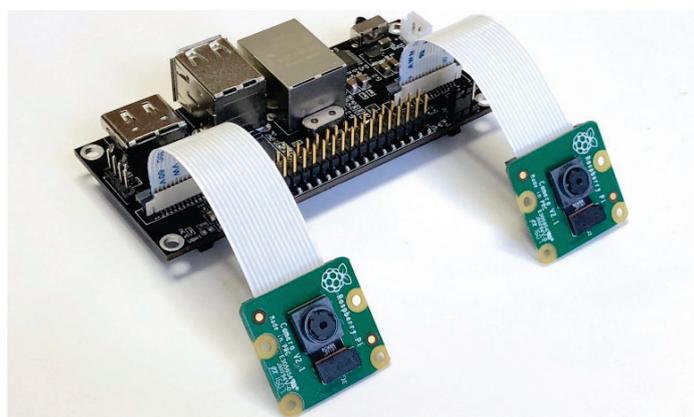


Рисунок 8 – StereoPi

Основные характеристики:

- Размеры: 90x40 mm
- Камеры: 2 x CSI 15 lanes cable
- GPIO: 40 classic Raspberry PI GPIO

- USB: 2 x USB type A, 1 USB on a pins
  - Ethernet: RJ45
  - Память: Micro SD (for CM3 Lite), у остальных NAND (flash)
  - Монитор: HDMI out
  - Питание: 5V DC
  - Поддерживаемые модели: Raspberry Pi Compute Module 3, Raspberry Pi CM 3 Lite, Raspberry Pi CM 1
  - Типы поддерживаемых камер: Raspberry Pi camera OV5647, Raspberry Pi camera Sony IMX 237, HDMI In (одиночный режим)
  - Для прошивки NAND: MicroUSB connector
  - Выключатель питания: Есть
- Последней выпущенной версией является StereoPi V2 [4], совместимая с Raspberry Pi CM4 или CM4Lite (рисунок 9).

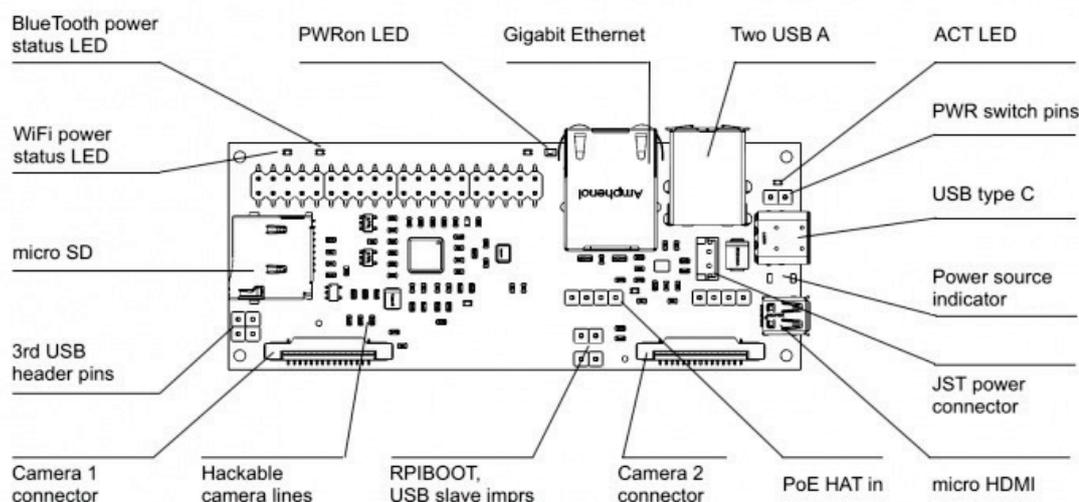


Рисунок 9 – StereoPi V2

Исследование данной платформы, а также программного кода, представленного Raspberry, будет представлено в дальнейших работах в связи с задержкой поставки оборудования.

### 3. Установка операционной системы и настройка микрокомпьютера Raspberry Pi

Raspberry Pi Imager (рисунок 10) - это быстрый и простой способ установки Raspberry Pi OS и других операционных систем на карту microSD, готовую к использованию с вашим Raspberry Pi. Скачать Raspberry Pi Imager можно с официального сайта: <https://www.raspberrypi.com/software/>.

Загрузите и установите Raspberry Pi Imager на компьютер с устройством чтения SD-карт. Поместите SD-карту, которую вы будете использовать с Raspberry Pi, в считыватель и запустите Raspberry Pi Imager [5].

Загрузка образа системы

Сначала необходимо установить свежую версию операционной системы на пустую карту памяти. Для этого переходим на официальный сайт <https://www.raspberrypi.org/software/>.

Raspberry Pi Imager может быть установлен на операционные системы: Windows, macOS, Ubuntu для x86.

В операционных системах Linux достаточно ввести в окне терминала от имени администратора команду `sudo apt install rpi-imager`.



**Рисунок 10** – Интерфейс Raspberry Pi Imager

В данной работе Raspberry Pi Imager устанавливается на персональный компьютер под управлением операционной системы Windows. Нажимаем «Download».

Скачиваем файл установщика и запускаем. Откроется диалоговое окно установщика - нажимаем «Install». Начнется процесс установки Raspberry Pi Imager.

После завершения установки проверяем, что галочка «Run Raspberry Pi Imager» выбрана, и нажимаем «Finish» для завершения установки. Откроется диалоговое окно установки Raspberry Pi OS на SD карту. Нажимаем «CHOOSE OS» для выбора версии операционной системы. Выбираем «Raspberry Pi OS (32-bit)».

Нажимаем «CHOOSE STORAGE» для выбора носителя для загрузки (рисунок 10). Выбираем вставленную в компьютер SD карту из списка. Нажимаем «Write». Начнется процесс скачивания и копирования ОС на SD карту.

Подключение Raspberry Pi

Алгоритм подключения Raspberry Pi [6]:

- Помещаем микрокомпьютер Raspberry Pi на ровную твердую поверхность.
- Вставляем карту памяти в разъем для MicroSD на нижней части платы. Проверяем, что она надежно зафиксирована в разьеме.
- Подключаем провода клавиатуры и мышки в разъемы USB.
- Подключаем монитор к микрокомпьютеру с помощью кабеля HDMI.
- Подключаем блок питания к разъему MicroUSB.
- Включаем монитор, затем включаем блок питания Raspberry Pi.

На микрокомпьютере нет отдельной кнопки включения, поэтому он запустится сразу после подключения к сети и подачи питания. Если все выполнено правильно, появится стартовый экран ОС Raspbian.

Схематически подключение Raspberry Pi представлено на рисунке 11.

### 3.1. Установка и использование модулей (библиотек) Python

Python – высокоуровневый язык программирования придуманный нидерландским программистом Гвидо (Гuido) ван Россумом в 1991 году.

Код Python в основном является скриптом для интерпретатора — виртуальной машины, в которой он выполняется без компилирования в машинный код.

Установка модулей Python в графической среде в редакторе Thonny Python IDE.

Thonny Python IDE — интегрированная среда разработки, предустановленная в операционной системе Raspbian для Raspberry Pi.

Выбираем в меню приложений Программирование -> Thonny Pyth IDE (рисунок 12).

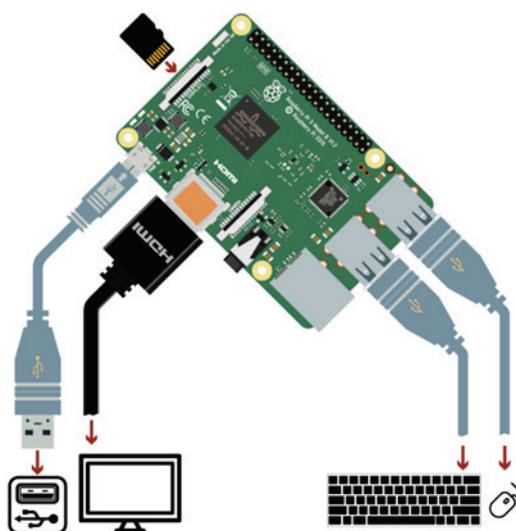


Рисунок 11 – Подключение Raspberry Pi

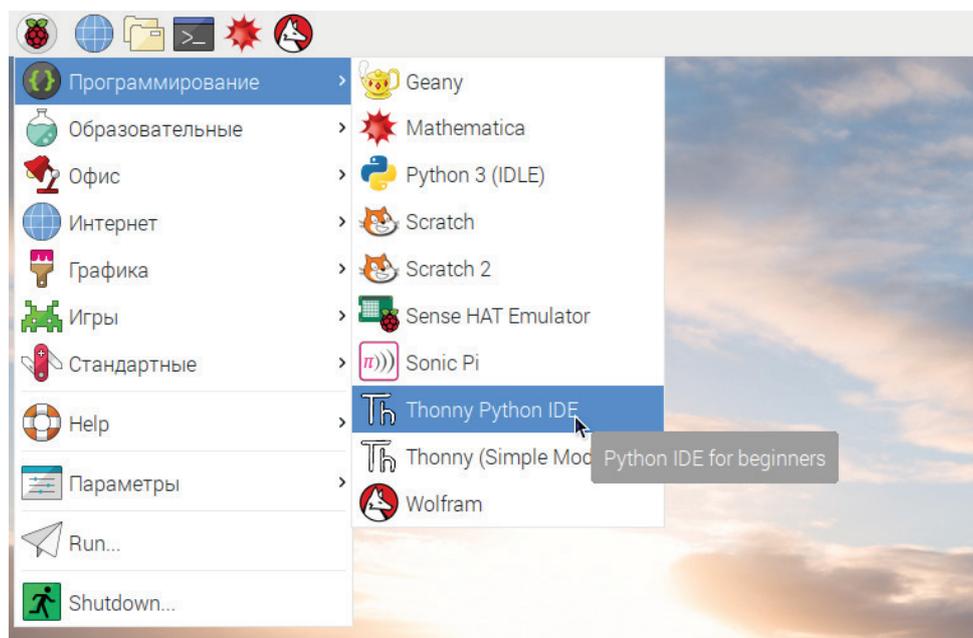


Рисунок 12 – Thonny Pyth IDE в меню приложений

Откроется окно Thonny Python IDE. Далее в строке меню выбираем Tools -> Manage packages. Откроется окно установки пакетов. В строке поиска вводим название модуля, который необходимо установить. Нажимаем кнопку «Install» для установки нужного модуля.

Начнётся процесс установки. После установки нужный модуль появится в списке ранее установленных. Теперь его можно в Thonny Python IDE.

Для использования модуля в качестве системного его нужно установить от имени суперпользователя в терминале.

В терминале вводим с клавиатуры команду `sudo pip3 install pyiArduinoI2Crelay`, начнётся процесс установки.

Установка завершена. Проверяем работоспособность установленного модуля. Если ввести с клавиатуры команду `python3`, откроется строка ввода интерпретатора Python. Для выхода из интерпретатора используется команда `exit()`.

Кроме предустановленного ПО в рамках операционной системы Raspbian будут необходимы дополнительные библиотеки. Были установлены требуемые пакеты — matplotlib, numpy и другие.

Интерфейс установленной операционной системы и среды разработки Thonny Python IDE представлен на рисунке 13.

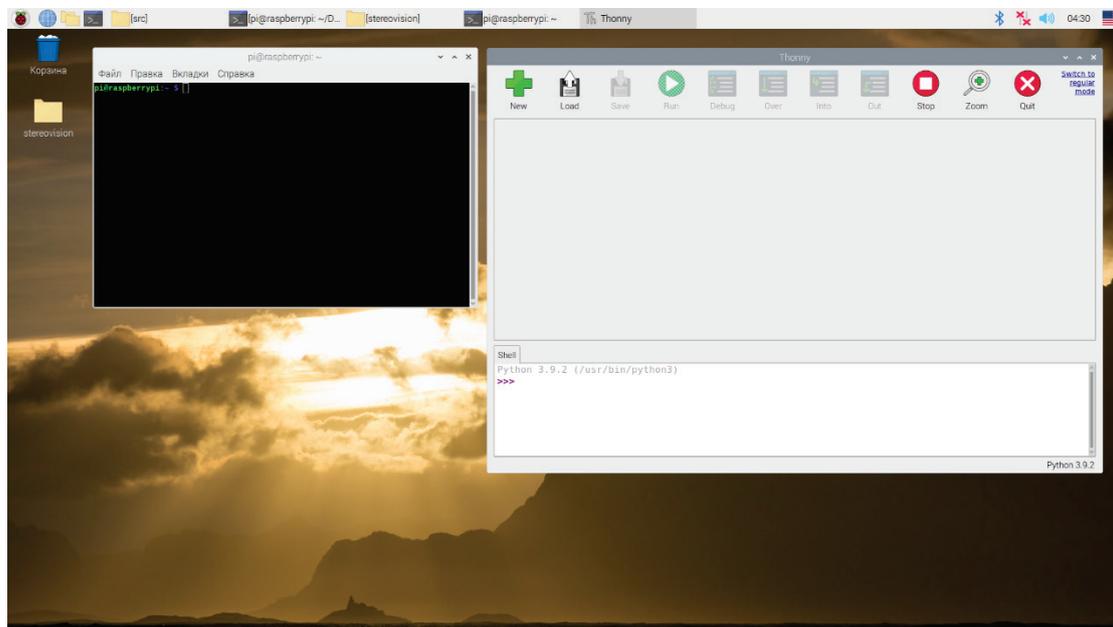


Рисунок 13 – Интерфейс операционной системы и интегрированной среды разработки

### 3.2. Реализация алгоритма стереозрения

Реализация алгоритма стереозрения представляет собой последовательный запуск шести скриптов, сохраненных в рабочей директории, в терминале. Скрипты написаны на языке программирования Python.

Условия использования программы:

1. Оперативная память: не менее 4Гб.
2. Операционная система, основанная на ядре Linux из семейства Debian-подобных дистрибутивов.
3. Использования платы Raspberry Pi3 Model B+ или более младшей версии.

Входные и выходные данные:

Для корректной обработки данных на вход данной программы необходимо передавать изображения в форматах JPG или PNG с минимальным расширением 1280x720 пикселей.

Результат построения карты глубины показан на рисунке 14.

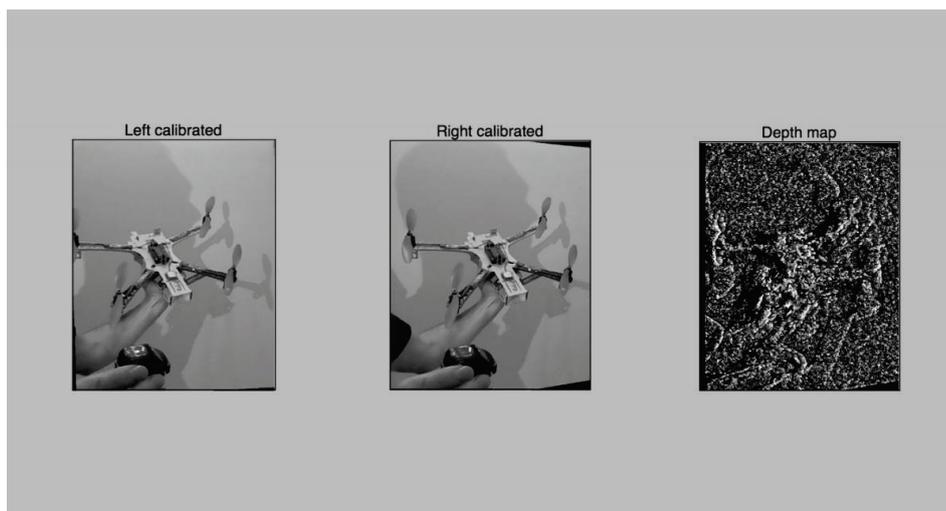
Данный набор скриптов предназначен для построения карты глубины на основе пары изображений.

Программа для реализации алгоритма стереозрения и построения карты глубины написана на языке высокого уровня Python при помощи Thonny Python IDE. Скрипты могут быть запущены на одноплатном компьютере Raspberry Pi с установленной операционной системой Raspbian.

Алгоритм стереозрения реализован за счет открытой библиотеки StereoVision, который помогает построить карту глубины по заданным изображениям.

Таким образом алгоритмы стереозрения могут широко использоваться для проектирования систем компьютерного зрения автономных мобильных объектов.

Стоит отметить, что на каждом этапе выполнения данной работы, от выбора аппаратной платформы и реализации алгоритмов стереозрения до подхода к созданию приложения, присутствует множества подходов и способов, которыми может воспользоваться разработчик. В данной работе были изучены лишь некоторые решения.



**Рисунок 14** – Результат построения карты глубины на основе стереопары

#### 4. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Одноплатный компьютер – материал из Википедии [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Одноплатный\\_компьютер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Одноплатный_компьютер). (дата обращения 25.03.2022).
- [2] Документация Raspberry Pi [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers>. (дата обращения 25.03.2022).
- [3] Raspberry Pi OS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.com/software>. (дата обращения 25.03.2022).
- [4] STEREOPI V2. Новые ключевые особенности [Электронный ресурс]. URL: <https://stereopi.com/v2>. (дата обращения 02.04.2022).
- [5] Real-time depth perception with the Compute Module [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.com/news/real-time-depth-perception-with-the-compute-module>. (дата обращения 03.04.2022).
- [6] Ustukov Dmitry, Muratov Yevgeniy, Nikiforov Michael, Melnik Olga. Analysis of the efficiency of dense stereovision algorithm implementation on different computer architectures // 2017. P. 78–81.
- [7] Multiple View Geometry in Computer Vision / R. Hartley, A. Zisserman // Cambridge university press. 2004. P. 673.
- [8] Stereovision 3D type workspace mapping system architecture for transport devices / Szpytko J., Hyla P. // Jour. of KONES Powertrain and Transport. 2010. № 17. P. 496-502.
- [9] Implementing one of stereovision algorithms on FPGA / [10] Ustukov D.I., Nikiforov M.B., Muratov E.R. [and etc.] // 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Bar. 2016. P. 64-67.
- [10] Yevgeniy R. Muratov, Michael B. Nikiforov, Alexey B. Rusakov, Victor S. Gurov. Estimation of Distance to Objects by Stereovision. 4rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva. 2015. P. 155-158.
- [11] Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision a modern approach. Upper Saddle River. NJ 07458. 2003. P 926.
- [12] ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [Текст]. Введ. 01.01.77. М.: Изд. стандартов. 1976.
- [13] Тарасов И.Е. Специализированные вычислительные комплексы для помехоустойчивой статистической обработки информации в измерительных устройствах. дис. д-ра. тех. наук: 05.13.15 / Тарасов Илья Евгеньевич М.: 2012. 265 с.
- [14] Bailey T and N. Durrant-Whyte “Simultaneous Localization and Mapping: Part II,” IEEE Robotics and Automation Magazine. vol. 13. no. 3. pp. 108 117, Sept. 2006.

- [15] Civera O.G. Grasa A.J. Davison and J.M.M. Montiel “1 Point RANSAC for EKF-Based Structure from Motion,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).2009. pp. 3498 3504.
- [16] Калинкина Т.И., Панченко А.А., Саблина В.А. Оценка внутренних и внешних параметров камеры по фотоснимкам калибровочного объекта // Методы и средства обработки и хранения информации. Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.К. Злобина. Рязань: РГРТУ. 2014. С. 69 75.
- [17] Тарасов И.Е. Специализированные вычислительные комплексы для помехоустойчивой статистической обработки информации в измерительных устройствах. дис. д-ра. тех.
- [18] Victoria A. Sablina, Anatoly I. Novikov, Michael B. Nikiforov, and Alexander A. Loginov, An Approach to the Image Superimposition Problem in Multispectral Computer Vision Systems, 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro. 2013. pp.117 120.
- [19] Muja M., Lowe D., Fast matching of binary features. In Computer and Robot Vision (CRV). 2012 Ninth Conference on (May 2012). pp. 404 410.
- [20] D. Scharstein and R. Szeliski. Middlebury stereo evaluation URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval/>.