

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа автоматизации и робототехники

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Система стереозрения на основе ортогонально ориентированных камер

Выполнил студент гр.3331506/80401	<подпись>	М. Д. Пантелеев
Руководитель старший преподаватель	<подпись>	А. С. Габриель
Научный консультант	<подпись>	В. В. Варлашин

«___» _____ 202__ г.

Санкт-Петербург
2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Обзор опыта построения систем стереозрения с использованием сверхширокоугольных камер	7
1.1 Модель сверхширокоугольной камеры	7
1.2 Обзор существующих систем стереозрения, использующих сверхширокоугольные камеры	9
1.3 Обоснование выбора ПО	10
1.4 Выводы по главе	12
2 Система стереозрения	13
2.1 Алгоритм устранения искажений	13
2.2 Описание системы стереозрения	16
2.3 Виртуальное моделирование системы	18
2.4 Передача изображений с виртуальных камер для обработки . .	20
2.5 Выводы по главе	21
3 Экспериментальное исследование системы стереозрения	23
3.1 Оценка качества устранения искажений	23
3.2 Оценка отклонения облака точек от поверхности	25
3.3 Выводы по главе	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	29
ПРИЛОЖЕНИЕ А	30
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	33
ПРИЛОЖЕНИЕ В	44
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	54

ПРИЛОЖЕНИЕ Д	62
------------------------	----

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы был совершён существенный прогресс в доступности и точности сенсоров, позволяющих мобильным роботам осуществлять оценку окружающего пространства. Такие информационно-измерительные устройства как лидары, сонары и стереокамеры стали основной опорой алгоритмов для алгоритмов автономной навигации и локализации. Тем не менее в роботах по-прежнему присутствуют оптические системы, так как они дают наиболее читаемую информацию для оператора в случаях, когда его вмешательство необходимо. Многие современные мобильные роботы имеют у себя на борту камеры с сверхшироким ($> 90^\circ$) углом зрения, так как они, хоть и вносят искажения в воспринимаемую картину, позволяют охватить больше окружающего пространства. Набор таких камер может составлять систему кругового обзора [], позволяющую оператору видеть не только в любом направлении, но даже с видом от третьего лица [6].

В случае автономных мобильных роботов подобные системы включаются лишь по необходимости, но при этом могут быть весьма дорогостоящими и занимать место в корпусе. Широкоугольные камеры в системах кругового обзора роботов часто имеют области пересечения полей зрения, что позволяет проводить оценку глубины. Реализация системы стереозрения, способной работать в таких конфигурациях, позволит дать существующим роботам новый способ получать информацию об окружении и проектировать будущих роботов с учётом этой возможности.

Однако значительные радиальные искажения изображения, вызванные особенностями используемых объективов, вместе с тем фактом, что области пересечения обычно расположены ближе к краям изображения, не позволяют использовать известные алгоритмы стереозрения.

Целью работы является разработка и изучение точности системы стереозрения, основанной на ортогонально расположенных сверхширокоугольных камерах.

В ходе работы решаются следующие задачи:

- Обзор современных систем стереозрения, использующих изображения с широкоугольных камер.
- Обзор моделей, применяющихся в моделировании камер с объективами "рыбий глаз".
- Обоснование выбора программного обеспечения, используемого для разработки и тестирования алгоритма.
- Разработка алгоритма устранения искажений fisheye-изображения в любой области кадра.
- Моделирование системы стереозрения в виртуальной среде.
- Определение точности оценки глубины стереосистемой.

1 Обзор опыта построения систем стереозрения с использованием сверхширокоугольных камер

1.1 Модель сверхширокоугольной камеры

Сверхширокоугольные объективы имеют в своей основе сложную систему линз, схема которой представлена на рисунке 1.1. Особенности этой системы позволяют достигать существенного угла обзора, но также являются причиной аберрации и характерных искажений изображения. Моделировать реальный ход лучей в подобных камерах нецелесообразно, поэтому исследователи прибегают к моделям камер.

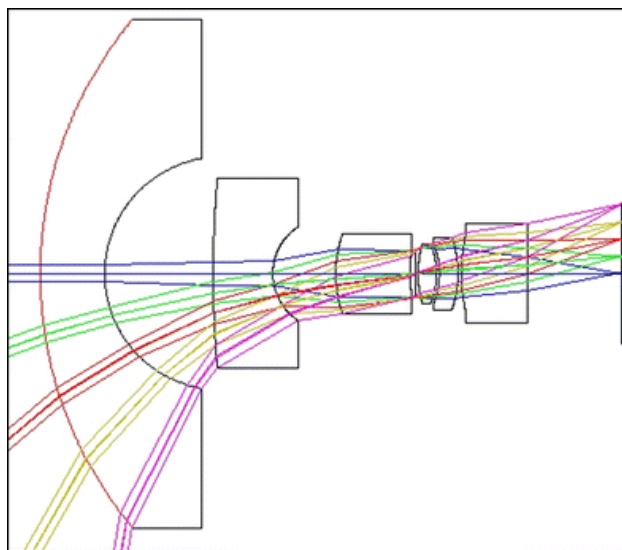


Рисунок 1.1 – Схема хода лучей объектива "рыбий глаз"

Как видно по рисунку 1.2, модель проекции для камеры это функция, обычно обозначаемая π_c , которая моделирует преобразование из точки трёхмерного пространства ($P = [x_c, y_c, z_c]^T$) в области зрения камеры в точку на плоскости изображения ($p = [x, y]^T$). Единичная полусфера S с центром в точке O_c описывает поле зрения. На ней также лежит точка P_C , являющаяся результатом обратной проекции $\pi_c^{-1}(p)$. Угол θ является углом падения для рассматриваемой точки, а угол ϕ откладывается между положительным направлением оси x и $O_i p$.

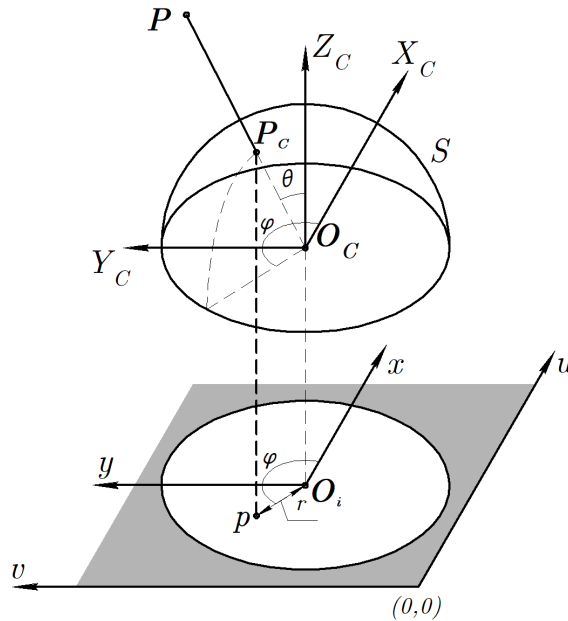


Рисунок 1.2 – Схема проекции точки трёхмерного пространства в точку на изображении

Модели камер включают в себя описания множества типов искажений, но в сверхширокоугольных объективах самыми существенными являются радиальные - искажения, проявляющиеся сильнее ближе к краям изображения. Поэтому далее в этой секции модели будут рассматриваться именно с точки зрения моделирования радиальных искажений.

Перспективная проекция, которая обычно используется в качестве простейшей модели камеры, не способна спроецировать широкоугольный снимок на кадр конечного размера. Поэтому при описании fisheye-объективов опираются на другие виды проекций ???. Но реальные линзы не всегда в точности следуют заданным моделям, к тому же отличия в используемых параметрах усложняют процесс калибровки камер. По этой причине радиальные искажения принято аппроксимировать многочленами, например, вида



$$\delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots + k_n r^{n+2}, \quad (1.1)$$

где k_i - коэффициенты, описывающие внутренние параметры камеры.

В настоящий момент есть несколько распространённых моделей, аппроксимирующих реальные искажения подобных объективов. Модель Канналы и Брандта [5] реализована в OpenCV и описывает радиальные искаже-

ния через угол падения луча света на линзу, а не расстояние от центра изображения до места падения, как это делалось в более ранних моделях. Авторы посчитали, что для описания типичных искажений достаточно пяти членов полинома. Таким образом, указанную модель можно записать следующими уравнениями:

$$\theta = \arctan\left(\frac{r}{f}\right), \quad (1.2)$$

$$\delta r = k_1\theta + k_2\theta^3 + k_3\theta^5 + k_4\theta^7 + k_5\theta^9, \quad (1.3)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \delta r(\theta) \begin{pmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{pmatrix}, \quad (1.4)$$

где θ - угол падения луча, определяемый выбранным типом проекции; ϕ - угол между горизонтом и проекцией падающего луча на плоскость изображения; r - расстояние от спроектированной точки до центра изображения; f - фокусное расстояние.

Также большое распространение получила модель Скарамuzzi [8], которая легла в основу Matlab Omnidirectional Camera Calibration Toolbox. Она связывает точки на изображении с соответствующей им точкой в координатах камеры следующим образом


$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} u \\ v \\ a_0 + a_2r^2 + a_3r^3 + a_4r^4 \end{pmatrix}, \quad (1.5)$$

где $a_0...a_4$ - коэффициенты, описывающие внутренние параметры камеры; λ - масштабный коэффициент.




1.2 Обзор существующих систем стереозрения, использующих сверхширокоугольные камеры

Распространённые библиотеки машинного зрения (OpenCV, MATLAB CV Toolbox) предлагают готовые к использованию классы и функции, позволяющие после калибровки камер получать с помощью них карты глубины.

Однако на практике эти методы весьма ограничены. Для стереосопоставления используются традиционные методы, приспособленные для классических камер с перспективной проекцией, что не позволяет использовать кадры с широкоугольных камер целиком. В результате у этих кадров после устранения искажений остаётся угол зрения порядка 90° . Кроме того, библиотечные функции не позволяют задать область интереса для каждой камеры, что ограничивает их область применения только для копланарного расположения камер. 

Исследователи предложили несколько реализаций стереозрения, опирающихся на снимки со сверхширокоугольных объективов и лишённых недостатков распространённых решений. Например, метод, предложенный в [2], позволяет создать кольцевую область стереозрения с вертикальным полем зрения 65° . Для этого используются две 245° камеры, закреплённые на противоположных концах жёсткого стержня. Это позволяет достигнуть панорамного обзора глубины с качеством, достаточным для осуществления автономной навигации и локализации [1], но доступна такая схема расположения камер только летательным аппаратам.

Другие авторы [7] решили отказаться от типичных для стереозрения этапов устранения искажений и ректификации и извлекать информацию о глубине напрямую по двум снимкам fisheye-камер. Для производства карт глубины используется свёрточная нейронная сеть, что требует существенных вычислительных мощностей - для достижения производительности в реальном времени разработчикам понадобилось использовать компьютер с ЦПУ i7-4770 и ГПУ NVIDIA GTX 1080Ti. В мобильном автономном роботе такой вычислитель разместить может быть проблематично. Кроме того, метод так же предполагает, что обе камеры направлены в одном направлении. 

1.3 Обоснование выбора ПО

Разработку и первоначальные испытания алгоритма стереозрения целесообразно проводить в виртуальной среде. Это позволяет значительно

упростить разработку, так как уменьшает время на проверку гипотез и расходы на реальное оборудование, особенно в случае неудачных испытаний. Из-за этих факторов виртуальное моделирование в робототехнике приобрело широкое распространение и активно применяется, например, для разработки систем локализации и навигации беспилотного транспорта []. Возросшее качество компьютерной графики к тому же позволило моделировать реалистичное окружение, что особенно важно при работе с системами технического зрения.

Для разработки алгоритма, описанного в этой работе, нужна виртуальная среда, в которой можно симулировать несколько широкоугольных камер и настраивать их параметры, легко интегрировать алгоритмы технического зрения и создать окружение, приближенное к тому, в котором будет работать алгоритм. На данный момент исследователю доступен широкий выбор программного обеспечения, подходящего для этой задачи. В таблице 1.1 представлено сравнение имеющихся предложений по основным изложенным выше требованиям.

Таблица 1.1 – Сравнение ПО для симуляции

Название	Симуляция fisheye-камер	Реалистичное моделирование	Интеграция кода	Доступность
Gazebo	Возможна	Затруднено	Возможна посредством ROS	Бесплатно
RoboDK	Нет	Затруднено	Нет	От 145€
Webots	Затруднена	Возможно	Возможна	Бесплатно
CoppeliaSim	Затруднена	Затруднено	Возможна	Бесплатно
NVIDIA Isaac Sim	Возможна	Возможно	Возможна	Бесплатно
CARLA	Затруднена	Возможно	Возможна	Бесплатно
Unity	Возможна	Возможно	Возможна	Бесплатно

По результатам оценки собранные сведений было принято решение проводить разработку в симуляторе Unity. Он позволяет подробно настраивать камеру и эмулировать fisheye-объектив, строить реалистичные сцены благодаря свободному импорту моделей, а при программировании в симуляторе можно использовать сторонние программы в виде динамически подключаемых библиотек. По функционалу так же подходит NVIDIA Isaac Sim, но от него пришлось отказаться из-за высоких системных требований и малой изученности продукта.

Разрабатываемое решение должно иметь возможность внедрения в ПО робота, поэтому должно реализовываться на одном из популярных и быстродейственных языков программирования. Учитывая необходимость интеграции с Unity и потребность использовать популярные библиотеки, был выбран язык C++. Другим важным фактором является библиотека обработки изображений. В качестве основы для программной части была выбрана библиотека OpenCV, являющаяся стандартом при разработке систем технического зрения. Она доступна к использованию со множеством языков программирования, но наилучшую производительность показывает именно с C++ [1].

1.4 Выводы по главе

Обзор современных моделей сверхширокоугольных камер позволил выбрать наиболее точную и удобную для калибровки. Был осуществлён обзор существующих систем стереозрения, применяющих камеры типа ”рыбий глаз” с целью ознакомления с мировым опытом. Было принято решение разрабатывать и тестировать предлагаемую систему стереозрения с применением виртуального моделирования.

Для моделирования выбрана среда разработки Unity. Для обработки изображений с камер выбрана библиотека OpenCV для языка программирования C++.

кретизации двух изображений. Поэтому вместо этого алгоритм выполняет обратное преобразование для каждого пикселя итогового изображения ν , находя таким образом соответствующую ему точку в системе координат камеры (X_c, Y_c, Z_c)

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u + c_x) * z_c / f \\ (v + c_y) * z_c / f \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где c_x, c_y - координаты центра изображения; f - фокусное расстояние.

Набор таких точек формирует прямоугольную область ν_p с центром в точке O_p и является виртуальной камерой-обскурой с оптической осью Z_p . Поворот точек, входящих в ν_p , с помощью матрицы вращения \mathbf{R} образует ν'_p и позволяет таким образом задать направление обзора и ориентацию виртуальной камеры.

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \mathbf{R}. \quad (2.2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

где α, β, γ - углы Эйлера.

Тогда обратная fisheye-проекция точек из ν'_p позволяют получить область ν_i исходного изображения с искомыми пикселями. Таким образом, зная как геометрически проектируется каждая точка из ν в ν_i , можно перенести информацию о цвете и получить изображение с устранёнными радиальными искажениями в любой части поля зрения камеры.

Так как в используемой модели искажения в точке считаются центрально симметричными и зависят только от её удаления от центра изображения, рассмотрим ход падающего луча в координатах (Z_c, ρ) , изображённый на рисунке 2.2.

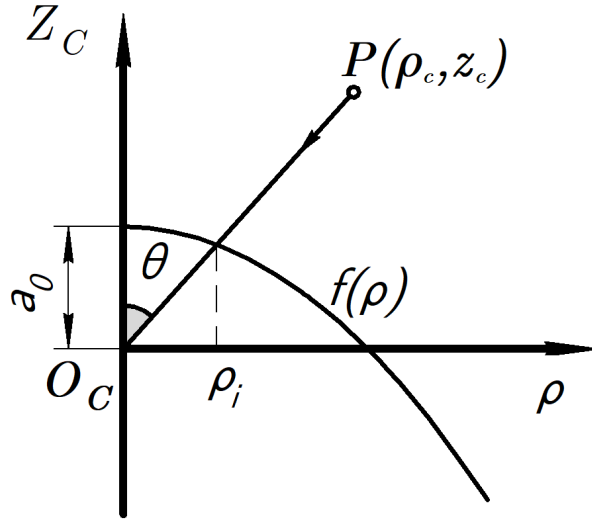


Рисунок 2.2

Для модели (1.5) обратная проекция записывается как

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_c}{\lambda} \\ \frac{y_c}{\lambda} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где $\lambda = \rho_c / \rho_i$ - масштабный коэффициент.

Для нахождения ρ_i был применён метод последовательных приближений. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.3.

SAMPLE

Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритма поиска ρ

Очевидно, весь процесс преобразования $\nu \rightarrow \nu_i$ требует выполнения существенного количества математических операций, что негативно сказывается на скорости, с которой алгоритм может обрабатывать изображения в реальном времени. Однако при неизменных параметрах модели алгоритм достаточно выполнить лишь один раз, записав результат в таблицу поиска - структуру данных, которая позволяет дальнейшие преобразования проводить по уже известным соотношениям между пикселями. Время построения таблицы поиска для выходного изображения разрешением 540*540 пикселей

и входного изображения 1080×1080 пикселей составляет $\sim 2.2c$. Это время можно уменьшить, применив различные оптимизации и параллельные вычисления (проекция каждого пикселя может рассчитывать независимо). Время отображения с использованием таблиц поиска составляет для того же изображения ..., что позволяет применять алгоритм для устранения искажений в реальном времени.

2.2 Описание системы стереозрения

Предлагаемая система стереозрения состоит из двух или более камер с объективами типа "рыбий глаз" $\geq 180^\circ$, расположенных ортогонально. В таком случае поля зрения соседних камер могут пересекаться, образуя области, точки пространства в которых видны на обеих камерах. Это позволяет получить информацию о глубине в указанных областях.

Пример такой системы для робота "Капитан" представлен на рисунке 2.4. Здесь 4 камеры, изображённых полукругами, с центрами в точках C_{0-3} размещены спереди, сзади и по бортам корпуса робота. Пересечения их полей зрения образуют 4 области объёмного зрения, закрашенных голубым.



Рисунок 2.4 – Система стереозрения из четырёх камер на примере робота
”Капитан”

Применение традиционных алгоритмов стереозрения предполагает наличие стереопары - двух камер с известным взаимным положением, наблюдающих одну область пространства с разных ракурсов. Описанный в предыдущей секции метод устранения искажений сверхширокоугольной камеры позволяет создавать виртуальные камеры-обскуры и регулировать их направление обзора. Таким образом, стереопару можно сформировать из двух таких виртуальных камер. Далее для упрощения рассмотрения системы будет считаться, что оптические оси всех камер находятся в одной плоскости, а на ориентацию виртуальных камер влияет только один угол.

На рисунке 2.5 изображён вариант системы с двумя камерами под углом 90° , соответствующий фрагменту схемы, представленной на рисунке 2.4.

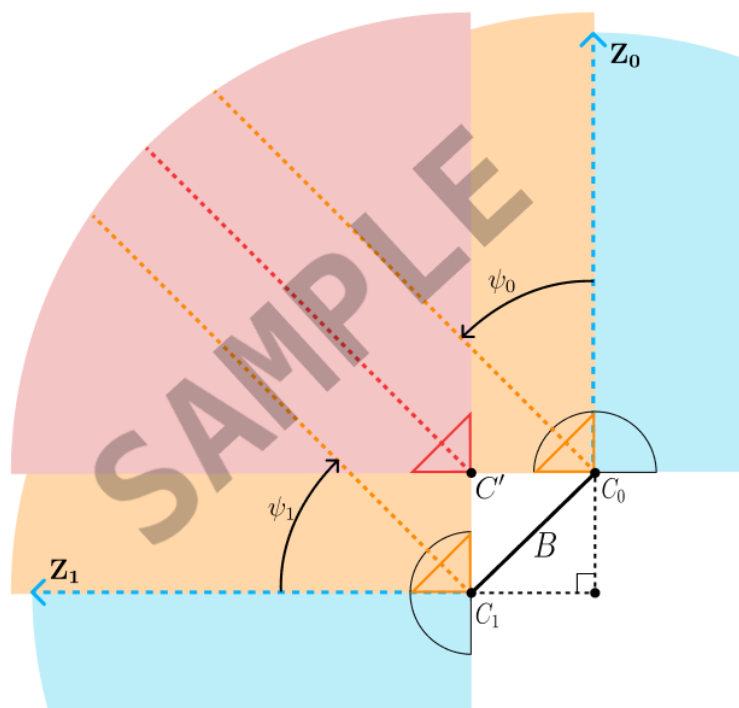


Рисунок 2.5 – Геометрическая модель бинокулярной системы стереозрения

Здесь у полей зрения камер C_0 и C_1 есть область пересечения, обозначенная красным. Эта область эквивалентна области пересечения полей зрения двух камер с полями зрения 90° (обозначены оранжевым), повернутых на 45° в сторону области интереса. Примеры изображений, полученных в такой конфигурации, изображены на рисунке 2.6.

SAMPLE

Рисунок 2.6 – Пример исходных изображений и снимков виртуальной стереопары

2.3 Виртуальное моделирование системы

Описанная система была смоделирована в среде Unity, её внешний вид представлен на рисунке 2.7. Мир Unity предназначен для базовой проверки работоспособности испытываемого принципа, поэтому не содержит подробной модели какого-либо робота. В нём присутствуют: плоскость земли, кронштейн, на котором сверхширокоугольные камеры закреплены под углом

90 deg, и различные объекты-цели, предназначенные для оценки расстояния. В силу особенностей работы многих алгоритмов стереозрения эти объекты должны сильнотекстурированы []].

SAMPLE

Рисунок 2.7 – Внешний вид модели системы стереозрения

В Unity создание сцены происходит с использованием встроенных примитивов, импортированных файлов моделей популярных форматов или моделей из магазина ассетов, предлагающего обширную библиотеку объектов и текстур, повторяющих различные реальные объекты. В данной работе использовались как и примитивы для создания простых объектов, так и модели из магазина для имитации препятствий и окружения.

Для моделирования камеры ”рыбий глаз” использовался аддон Dome Tools из магазина Unity Asset Store. Он позволяет моделировать сверхширокоугольные объективы с разным углом зрения в эквидистантной проекции []]. При этом с точки зрения других искажений, не относящихся к моделированию правильной проекции, снимки с этой камеры получаются идеальными. Окно настроек камеры представлено на рисунке 2.8.

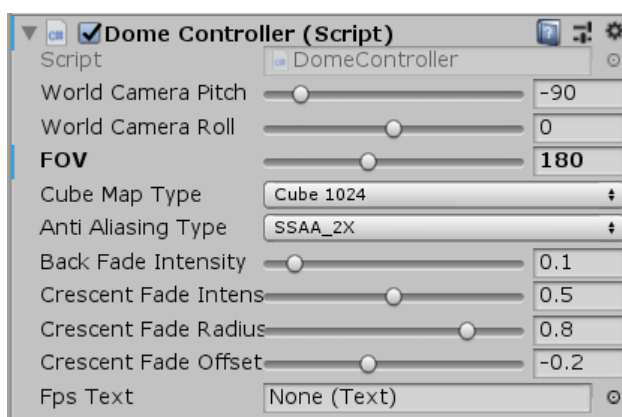


Рисунок 2.8 – Окно настроек виртуальной камеры в Unity

Для виртуальной камеры доступны настройки угла зрения и виньетки по краям изображения, а также различных параметров рендеринга, влияющих на качество получаемого изображения.

2.4 Передача изображений с виртуальных камер для обработки

Unity в качестве основного языка программирования использует C# и не позволяет импортировать выбранную библиотеку технического зрения OpenCV напрямую. Однако как уже упоминалось в секции 1.3, данная среда позволяет интегрировать плагины, в том числе написанные на других языках программирования, в виде динамически подключаемых библиотек (DLL). Именно этот подход был использован для передачи изображений - была разработана библиотека с функциями для обработки снимков, которая компилировалась отдельно и затем импортировалась в Unity.

Для реализации описанного в этой работе принципа и упрощения разработки в библиотеке были реализованы следующие функции:

- initialize - выделяет память под нужные структуры, заполняет таблицу поиска и создаёт окна для отображения будущих изображений.
- getImages - передаёт изображения в библиотеку и производит обработку изображений в соответствии с аргументами.
- takeScreenshot - производит ту же обработку входного изображения, что и предыдущая функция, но результат сохраняет в файл.
- processImage - передаёт обратно в скрипт уже обработанные изображения для удобного отображения в интерфейсе Unity.
- terminate - высвобождает память по завершении работы симуляции.

Обработка, упомянутая в пунктах с функциями getImages и takeScreenshot, заключается в конвертации цветового пространства изображений (из RGBA, используемого в Unity, в BGR, используемый в OpenCV), горизонтальном зеркальном отображении (из-за разного положения точки отсчёта координат пикселей) и, наконец, устранении искажений в области интереса. Так как для наилучшей работы стереосопоставления снимки должны быть синхронизированы (то есть получены камерами в один момент времени), обработка производится сразу для двух изображений. Программный код файлов, входящих в динамически подключаемую библиотеку, представлен в приложении ??.

Также написан специальный скрипт, который управляет процессом взаимодействия симуляции и библиотеки, его код приведён в приложении ???. Эта программа имеет окно настроек, которое позволяет задать используемые камеры и элементы управления параметрами, выбрать область интереса и ... Внешний вид этого окна представлен на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Внешний вид окна настроек скрипта

Сразу после запуска симуляции происходит запуск дополнительных вычислительных потоков для обработки кадров с каждой пары камер и передача настроек скриптом в библиотеку для построения таблиц поиска. Использование нескольких потоков позволяет не блокировать работу симуляции на время обработки изображений. Далее каждое обновление кадра скрипт считывает изображения с камер и помещает их в память соответствующего потока. Поток же работает независимо и обрабатывает каждую следующую пару изображений после готовности предыдущей.

2.5 Выводы по главе

Описан принцип устранения искажений сверхширокоугольных линз с выбором области интереса. Разработан алгоритм нахождения обратной проекции для fisheye-изображения. Описано устройство системы стереозре-

ния. Разработана её виртуальная модель в среде Unity вместе с алгоритмом передачи изображений с виртуальной камеры в программу обработки изображений... Виртуальная модель системы позволяет перейти к её испытаниям.

3 Экспериментальное исследование системы стереозрения

Описанная в предыдущей главе виртуальная модель системы стереозрения позволяет проводить с ней испытания для оценки работоспособности и сравнения с аналогами в контролируемой среде.

Результатом работы алгоритма стереозрения является карта глубины воспринимаемого пространства. Подобные карты могут использоваться, например, алгоритмами навигации и локализации для построения карты окружения робота. Точность работы этих алгоритмов зависит от того, насколько точно карта глубины передаёт реальную информацию о форме объектов. Оценить эту характеристику для отдельной системы стереозрения проблематично, так как она зависит от множества факторов. Поэтому оценка качества работы системы проведена в сравнении с виртуальной моделью традиционной стереопары.

Виртуальная сцена позволяет разместить сразу несколько объектов в одной точке пространства, таким образом возможно в существующую модель в Unity добавить ещё 2 камеры, совпадающие по параметрам и положению с виртуальными камерами на рисунке 2.5. Разрешение этих камер выбрано исходя из размеров проекции ν_i области интереса на широкоугольном снимке. Для камер "рыбий глаз" с разрешением $1080 * 1080$ пикселей она составляет 287482 пикселей, что аналогично камере с разрешением $540 * 540$. В результате получена эталонная стереопара для сравнения.

3.1 Оценка качества устранения искажений

Добавление в виртуальную модель эталонной камеры позволяет оценить качество устранения искажений путём сравнения её снимков со снимками виртуальной камеры-обскуры модуля устранения искажений.

Параметры полинома (1.5) для устранения искажений получены с помощью MATLAB Camera Calibrator и занесены в код библиотеки обработки изображений. Снимки после устранения искажений и с эталонной камеры показаны на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Слева - снимок после устранения искажений; справа - эталонный снимок.

На левом изображении заметна большая резкость, вызванная, вероятно, округлениями чисел в процессе проекции. Также присутствует затенение по левому краю - следствие аберрации на исходном снимке. В той же области есть малозаметные искажения геометрии. Более явно эти дефекты можно увидеть на разностном изображении, представленном на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Разностное изображение

Анализ этого изображения подтверждает различия в резкости и наличии искажений в левой части снимка. Тем не менее, искажения достаточно незначительны и проявляются лишь близь краёв исходного изображения,

что позволяет считать подобные снимки пригодными к применению в системе стереозрения. Кроме того, некоторые эффекты возможно устранить или сильно ослабить более качественной калибровкой камер...

3.2 Оценка отклонения облака точек от поверхности

В качестве целевой поверхности выбрана виртуальная плоскость с нанесённой на неё текстурой высоко разрешения. Размеры и положение плоскости относительно камер известно с высокой точностью, что позволяет сравнить результаты стереорекострукции с реальным положением целевого объекта и оценить ошибку. В качестве метрики оценки выбрано среднее квадратичное отклонение положения точек от модели плоскости.

Исследования проведены в MATLAB, снимки получены с помощью виртуальной модели. Сначала для обеих стереопар проводится калибровка по снимкам узора шахматной доски с помощью методики [3], что позволяет получить внутренние и внешние параметры камер. Далее происходит построение карты расхождений [4] и 3D-реконструкция сцены. Результирующее облако точек представлено на рисунке 3.3.

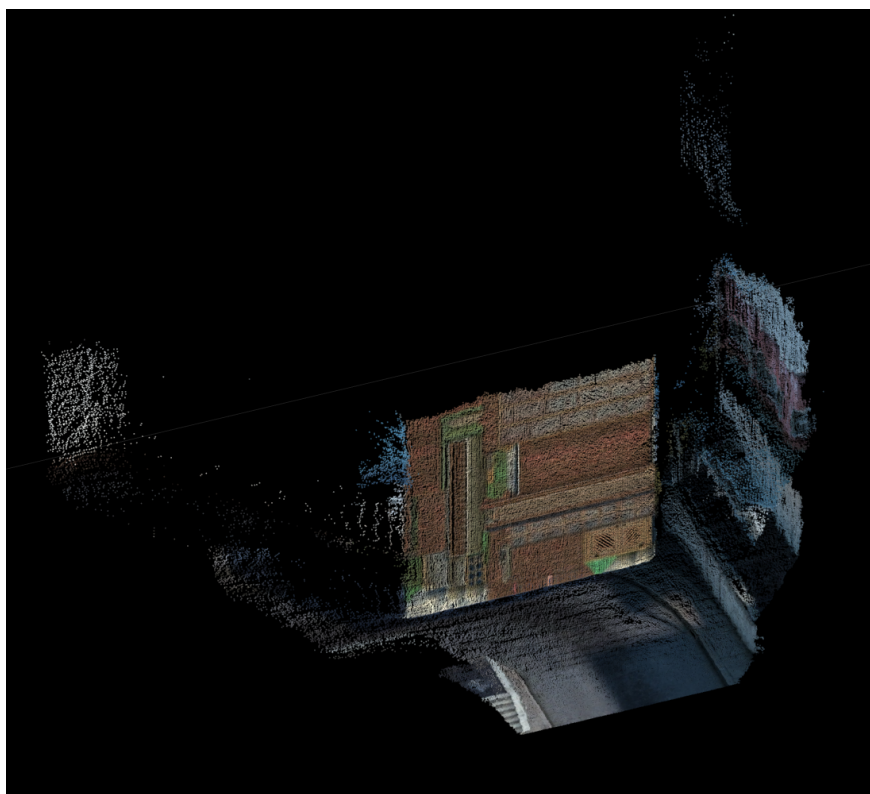


Рисунок 3.3 – Неочищенное облако точек

По заданным параметрам строится модель целевой плоскости, а точки за пределами её окрестности отбрасываются. Затем скрипт перебирает все оставшиеся точки и рассчитывает среднее квадратичное отклонение по длине нормали от точки к плоскости. Код скрипта приведён в приложении Д.

Описанный алгоритм применён к снимкам целевой плоскости на разных расстояниях с эталонной и исследуемой стереопар. Результаты приведены на графике 3.4.

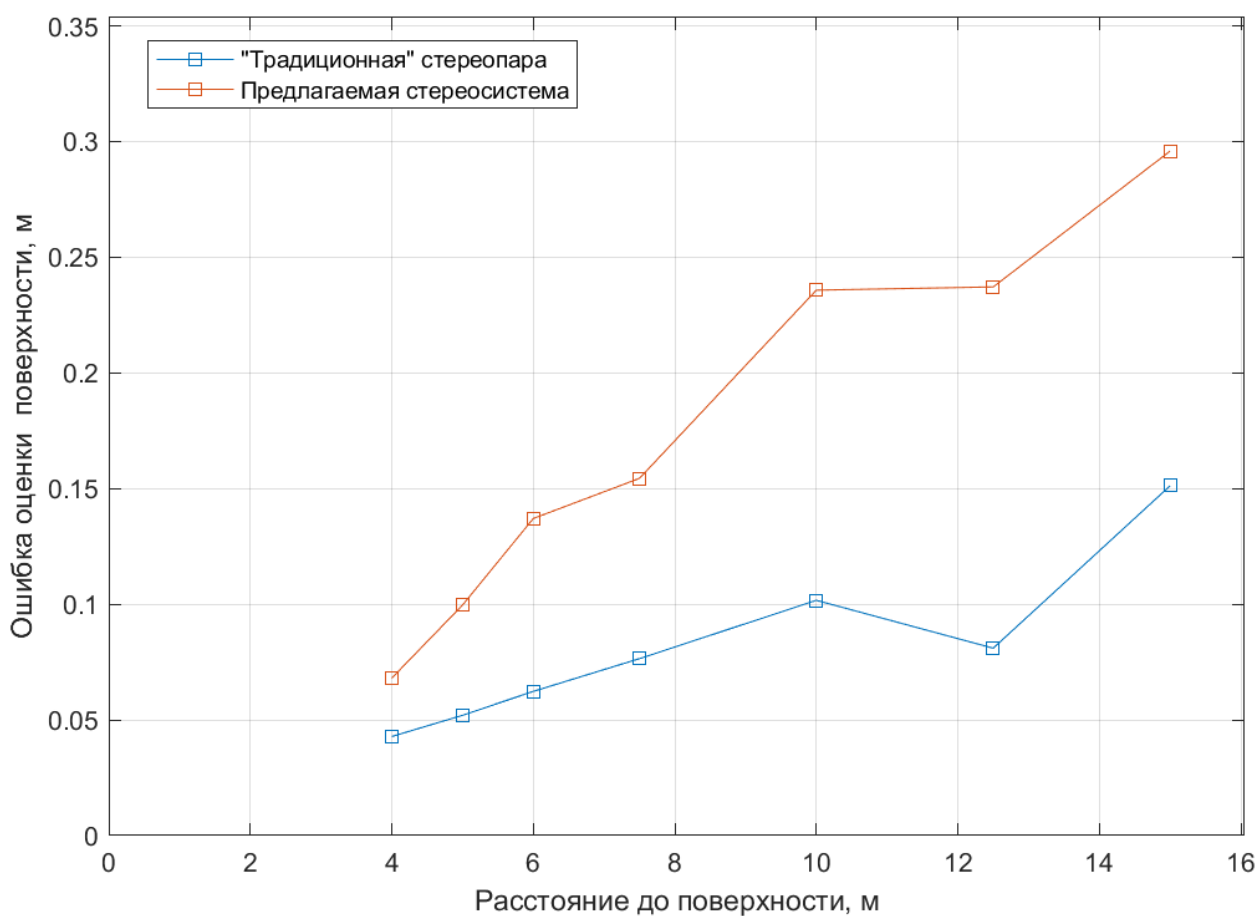


Рисунок 3.4 – График среднеквадратичной ошибки в зависимости от расстояния для эталонной и исследуемой стереопар

Как видно из графика, ошибка оценки поверхности в исследуемой системе в среднем в два раза больше этого показателя для традиционной стереопары. Меньшая точность исследуемой системы связана с влиянием факторов, описанных в предыдущей секции, на алгоритм стереосопоставления. Тем не менее она остаётся в пределах 3% от реального расстояния.

3.3 Выводы по главе

Исследованы снимки, полученные с помощью виртуальных камер. Выполнено их сравнение с эталонными изображениями, которое продемонстрировало пригодность снимков для использования в системах стереозрения.

В виртуальную среду добавлена традиционная стереопара для сравнения с разработанной системой. Проведён эксперимент по оценке качества облака точек, полученного с помощью предлагаемого решения. Результаты можно считать удовлетворительными для систем подобного класса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы рассмотрены существующие системы стереозрения, в особенности использующие информацию со сверхширокоугольных камер. Изучены модели, описывающие подобные камеры. Рассмотрено ПО для виртуального моделирования робототехнических комплексов и систем технического зрения. Выбрано ПО для моделирования и разработки системы стереозрения, использующей объективы ”рыбий глаз”.

Разработан и описан алгоритм устранения искажений в области интереса и его математическая модель. Описана возможная конфигурация системы стереозрения, рассмотрен принцип работы её фрагмента. Этот фрагмент считаться был смоделирован в среде Unity. В процессе размещены и настроены камеры, подготовлены объекты для калибровки и дальнейших испытаний системы. Реализована передача изображений с виртуальных камер для обработки алгоритмами компьютерного зрения. С помощью снимков из виртуальной модели исследовано качество устранения искажений и выполнено сравнение точности оценки глубина предлагаемой системы и варианта с обычными камерами. Результаты позволяют рассмотреть применение системы с реальными камерами и указывают на возможные доработки.

Дальнейшая работа будет сконцентрирована на оптимизации и повышении точности алгоритма устранения искажений, разработке способа автоматической установки параметров системы при разных конфигурациях камер. После этого можно будет приступить к испытаниям качества построения карты и локализации с применением описанной системы сначала с виртуальным, а затем и с реальным роботом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Autonomous aerial robot using dual-fisheye cameras / W. Gao [и др.] // *Journal of Field Robotics*. — 2020. — Т. 37, № 4. — С. 497—514.
2. *Gao W., Shen S.* Dual-fisheye omnidirectional stereo // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — 2017. — С. 6715—6722. — DOI: 10.1109/IROS.2017.8206587.
3. *Heikkila J., Silven O.* A four-step camera calibration procedure with implicit image correction // *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. — 1997. — С. 1106—1112. — DOI: 10.1109/CVPR.1997.609468.
4. *Hirschmuller H.* Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05). Т. 2. — 2005. — 807—814 vol. 2. — DOI: 10.1109/CVPR.2005.56.
5. *Kannala J., Brandt S.* A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. — 2006. — Т. 28, № 8. — С. 1335—1340. — DOI: 10.1109/TPAMI.2006.153.
6. Real-Time Bird's Eye Surround View System: An Embedded Perspective / M. Al-Hami [и др.] // *Applied Artificial Intelligence*. — 2021. — Т. 35, № 10. — С. 765—781. — DOI: 10.1080/08839514.2021.1935587.
7. *Roxas M., Oishi T.* Real-Time Variational Fisheye Stereo without Rectification and Undistortion. — 2019. — arXiv: 1909.07545 [cs.RO].
8. *Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R.* A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structure from Motion // *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06)*. — 2006. — С. 45—45. — DOI: 10.1109/ICVS.2006.3.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программный код файла FisheyeDewarper.hpp

```
1 #define _USE_MATH_DEFINES
2 #include "opencv2/core.hpp"
3 #include "opencv2/imgproc.hpp"
4 #include <iostream>
5 #include <vector>
6 #include <numbers>
7 #include <math.h>
8
9 #define SCARAMUZZA    10
10 #define ATAN          20
11 #define REV_SCARAMUZZA  30
12
13 /* TODO: -Constructor,
14     -
15 */
16
17 class FisheyeDewarper
18 {
19 private: /* Parameters */
20     const double PI = M_PI;
21     float xFov;           // output image fov
22     float yFov;           // or 16:9 equivalent
23     cv::Size oldSize;      // input image size
24     cv::Size newSize;      // output image size
25     /* RPY angles for the world point rotator*/
26     float yaw;
27     float pitch;
28     float roll;
29
30 private: /* Data */
31     double errorsum;
32     /* Intrinsics */
33     std::vector <double> polynom;    // Scaramuzza model
        coefficients
```

```

34  cv::Vec2d centerOffset;          // Distortion center
35  cv::Matx22d stretchMatrix;      // Stretch matrix
36  double lambda;                   // Scale factor
37  /* Structures */
38  cv::Mat map1;                    // x map
39  cv::Mat map2;                    // y map
40  std::vector<cv::Point> frameBorder; //border to draw on the
    original image
41
42 private:  /* Internal functions */
43  void createMaps();
44  /* Transformations */
45  void toCenter(cv::Point& cornerPixel, cv::Size imagesize);
46  void toCorner(cv::Point& centerPixel, cv::Size imagesize);
47  cv::Mat rotatePoint(cv::Mat worldPoint);
48  /* Projection functions */
49  cv::Point2f projectWorldToFisheyeAtan(cv::Mat worldPoint);
50  cv::Point2d projectWorldToFisheye(cv::Mat worldPoint);
51  cv::Point2f projectWorldToPinhole(cv::Mat cameraCoords);
52  cv::Mat projectFisheyeToWorld(cv::Point pixel);
53  cv::Mat projectPinholeToWorld(cv::Point pixel);
54  cv::Point reverseScaramuzza(cv::Point pixel); // Fisheye to
    Pinhole
55  /* Tools */
56  void fillMapsScaramuzza();
57  void fillMapsRevScaramuzza();
58  void fillMapsAtan();
59  void setFovWide(float wFov);
60
61 public:  /* Settings */
62  FisheyeDewarper();
63  void setSize(int oldWidth, int oldHeight, int newWidth, int
    newHeight, float wideFov);
64  void setSize(cv::Size oldsize, cv::Size newsize, float wideFov)
    ;
65  void setIntrinsics(double coeffs[4], cv::Vec2d centerOffset, cv
    ::Matx22d stretchMatrix, double scaleFactor);

```

```

66     void setIntrinsics(double a1, double a2, double a3, double a4,
        cv::Vec2d centerOffset, cv::Matx22d stretchMatrix, double
        scaleFactor);
67     void setRpy(float yaw, float pitch, float roll);
68
69     std::vector<cv::Point> getBorder();
70
71 public:    /* */
72     void fillMaps(int mode);
73     cv::Mat dewrapImage(cv::Mat inputImage);
74
75 };

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программный код файла FisheyeDewarper.cpp

```
1 #include "FisheyeDewarper.hpp"
2
3 FisheyeDewarper::FisheyeDewarper()
4 {
5
6 }
7
8 void FisheyeDewarper::createMaps()
9 {
10     map1 = cv::Mat(oldSize, CV_32FC1, float(0));
11     map2 = cv::Mat(oldSize, CV_32FC1, float(0));
12 }
13
14 void FisheyeDewarper::setSize(int oldWidth, int oldHeight, int
    newWidth, int newHeight, float wideFov)
15 {
16     oldSize.width = oldWidth;
17     oldSize.height = oldHeight;
18     newSize.width = newWidth;
19     newSize.height = newHeight;
20     createMaps();
21     setFovWide(wideFov);
22 }
23
24 void FisheyeDewarper::setSize(cv::Size oldsize, cv::Size newsize,
    float wideFov)
25 {
26     oldSize = oldsize;
27     newSize = newsize;
28     createMaps();
29     setFovWide(wideFov);
30 }
31
32 void FisheyeDewarper::setFovWide(float wFov)
```



```

33 {
34     xFov = wFov;
35     yFov = wFov * newSize.height / newSize.width;          // *
        9/16
36
37     // std::cout << "FOV, x: " << xFov << " FOV, y: " << yFov <<
        std::endl;
38 }
39
40 void FisheyeDewarper::setIntrinsics(double coeffs[4], cv::Vec2d
    centerOffset, cv::Matx22d stretchMatrix, double scaleFactor)
41 {
42     polynom.assign(coeffs, coeffs+4);          // treats both values
        as pointers
43
44     this->centerOffset = centerOffset;
45     this->stretchMatrix = stretchMatrix;
46     this->lambda = scaleFactor;
47 }
48
49 void FisheyeDewarper::setIntrinsics(double a1, double a2, double
    a3, double a4, cv::Vec2d centerOffset, cv::Matx22d
    stretchMatrix, double scaleFactor)
50 {
51     polynom.clear();
52     polynom.push_back(a1);
53     polynom.push_back(a2);
54     polynom.push_back(a3);
55     polynom.push_back(a4);
56
57     this->centerOffset = centerOffset;
58     this->stretchMatrix = stretchMatrix;
59     this->lambda = scaleFactor;
60 }
61
62 void FisheyeDewarper::setRpy(float yaw, float pitch, float roll)
63 {

```

```

64     this->yaw    =    yaw * PI / 180;
65     this->pitch = -pitch * PI / 180;
66     this->roll   =    roll * PI / 180;
67
68     // TODO: fillMaps() after angle update. Or should it be
        handled manually?
69 }
70
71 std::vector<cv::Point> FisheyeDewarper::getBorder() {
72     return this->frameBorder;
73 }
74
75 cv::Point2f FisheyeDewarper::projectWorldToFisheyeAtan(cv::Mat
    worldPoint)
76 {
77     float wx = worldPoint.at<float>(0);
78     float wy = worldPoint.at<float>(1);
79     float wz = worldPoint.at<float>(2);
80     // sqrt destroys signs so I remember them here
81     int8_t xSign = 1, ySign = 1;
82     if (wx == 0) wx += 0.0001;
83     else if (wx < 0) xSign = -1;
84     if (wy == 0) wy += 0.0001;
85     else if (wy < 0) ySign = -1;
86     if (wz == 0) wz += 0.0001;
87     // fisheye focus
88     double xFocus = newSize.width / PI;
89     double yFocus = newSize.height / PI;
90     cv::Point projectionPoint(newSize.width / 2, newSize.height /
        2); // initial value set to the image corner
91
92     // calculate the point location on fisheye image in central
        coordinates
93     projectionPoint.x = xSign * xFocus * atan(sqrt(wx * wx + wy *
        wy) / wz)
94         / sqrt((wy * wy) / (wx * wx) + 1);

```

```

95     projectionPoint.y = ySign * yFocus * atan(sqrt(wx * wx + wy *
        wy) / wz)
96         / sqrt((wx * wx) / (wy * wy) + 1);
97
98     // convert to corner coordinates
99     projectionPoint.x = projectionPoint.x + newSize.width / 2;
100    projectionPoint.y = -projectionPoint.y + newSize.height / 2;
101
102    return projectionPoint;
103 }
104
105 cv::Point2f FisheyeDewarper::projectWorldToPinhole(cv::Mat
    cameraCoords)
106 {
107     double xFovRad = xFov * PI / 180;
108     double yFovRad = yFov * PI / 180;
109     double xPinholeFocus = newSize.width / (2 * tan(xFovRad / 2)
        );
110     double yPinholeFocus = newSize.height / (2 * tan(yFovRad / 2)
        );
111
112     float cx = cameraCoords.at<float>(0);
113     float cy = cameraCoords.at<float>(1);
114     float cz = cameraCoords.at<float>(2);
115
116     cv::Point2f pinholePoint;
117     pinholePoint.x = xPinholeFocus * cx / cz;
118     pinholePoint.y = yPinholeFocus * cy / cz;
119
120     return pinholePoint;
121 }
122
123 cv::Mat FisheyeDewarper::projectPinholeToWorld(cv::Point pixel)
124 {
125     toCenter(pixel, newSize);
126

```

```

127     float cz = 200.0;                                     //
        doesn't really affect much
128     double xFovRad = xFov * PI / 180;
129     double yFovRad = yFov * PI / 180;
130     double xPinholeFocus = newSize.width / (2 * tan(xFovRad / 2))
        ;
131     double yPinholeFocus = newSize.height / (2 * tan(yFovRad / 2)
        );
132
133     cv::Mat cameraCoords(1, 3, CV_32F, float(0));
134     cameraCoords.at<float>(0) = pixel.x * cz / xPinholeFocus;
135     cameraCoords.at<float>(1) = pixel.y * cz / yPinholeFocus;
136     cameraCoords.at<float>(2) = cz;
137     //std::cout << xPinholeFocus << " | " << yPinholeFocus << std
        ::endl;
138     return cameraCoords;
139 }
140
141 cv::Mat FisheyeDewarper::projectFisheyeToWorld(cv::Point pixel)
142 {
143     cv::Vec2d undistPixel = stretchMatrix * ( cv::Vec2d(pixel.x,
        pixel.y) - centerOffset);    // TODO: delete
144     //std::cout << stretchMatrix << " | " << cv::Vec2d(pixel.x,
        pixel.y) - centerOffset << " | " << lambda * undistPixel
        [0] << std::endl;
145     cv::Mat cameraCoords(1, 3, CV_32F, float(0));
146     double rho = norm(pixel);    // sqrt ( x^2 + y^2 )
147     cameraCoords.at<float>(0) = lambda * undistPixel[0];
148     cameraCoords.at<float>(1) = lambda * undistPixel[1];
149     cameraCoords.at<float>(2) = lambda * (polynom[0] + polynom[1]
        * pow(rho, 2) + polynom[2] * pow(rho, 3) + polynom[3] *
        pow(rho, 4));
150
151     return rotatePoint(cameraCoords);
152 }
153

```

```

154 cv::Point2d FisheyeDewarper::projectWorldToFisheye(cv::Mat
    worldPoint)
155 {
156     double X = worldPoint.at<float>(0);
157     double Y = worldPoint.at<float>(1);
158     double Z = worldPoint.at<float>(2);
159     double phi = atan2(Z, sqrt(X * X + Y * Y));
160     double rho = 0;
161     double error = 1;
162
163     int iter = 0;
164     do
165     {
166         double R = polynom[0];          // R = f(rho)
167         for (int i = 1; i < polynom.size(); i++)
168         {
169             R += polynom[i] * pow(rho, i+1);
170             //std::cout << "R: " << R << std::endl;
171         }
172
173         error = atan2(R, rho) - phi;
174         iter++;
175         rho = rho + 200*error;
176         //std::cout << "It " << iter << " Point: " << worldPoint
            << " | Rho: " << rho << " f(Rho): " << 424242 << "
            Error: " << error << std::endl;
177     } while (std::abs(error) > 0.005 && iter < 100);
178     errorsum += error;
179
180     lambda = sqrt(X * X + Y * Y) / rho;
181     double u = X / lambda;
182     double v = Y / lambda;
183
184     cv::Point fypixel( stretchMatrix * cv::Vec2d(u, v) +
        centerOffset );          // technically could do toCorner's
        job, but I'll keep it simple for now
185     toCorner(fypixel, oldSize);

```

```

186     return fypixel;
187 }
188
189 cv::Mat FisheyeDewarper::rotatePoint(cv::Mat worldPoint)
190 {
191     cv::Mat rotZ(cv::Matx33f(1, 0, 0,
192                             0, cos(yaw), sin(yaw),
193                             0, -sin(yaw), cos(yaw)));
194     cv::Mat rotX(cv::Matx33f(cos(pitch), 0, -sin(pitch),
195                             0, 1, 0,
196                             sin(pitch), 0, cos(pitch)));
197     cv::Mat rotY(cv::Matx33f(cos(roll), -sin(roll), 0,
198                             sin(roll), cos(roll), 0,
199                             0, 0, 1));
200     return worldPoint * rotY * rotZ * rotX;           // calib3d/
        utils proposes this order
201 }
202
203 // converting corner coordinates to the center ones
204 void FisheyeDewarper::toCenter(cv::Point& cornerPixel, cv::Size
        imagesize)
205 {
206     cornerPixel.x = cornerPixel.x - imagesize.width / 2;
207     cornerPixel.y = -cornerPixel.y + imagesize.height / 2;
208 }
209
210 // converting center coordinates to the corner ones
211 void FisheyeDewarper::toCorner(cv::Point& centerPixel, cv::Size
        imagesize)
212 {
213     centerPixel.x = centerPixel.x + imagesize.width / 2;
214     centerPixel.y = -centerPixel.y + imagesize.height / 2;
215 }
216
217 void FisheyeDewarper::fillMaps(int mode)
218 {
219     createMaps();

```

```

220     frameBorder.clear();
221
222     if (mode == SCARAMUZZA) fillMapsScaramuzza();
223     if (mode == REV_SCARAMUZZA) fillMapsRevScaramuzza();
224     if (mode == ATAN)         fillMapsAtan();
225
226 }
227
228 void FisheyeDewarper::fillMapsScaramuzza()
229 {
230     for (int i = 0; i < newSize.width; i++)
231     {
232         for (int j = 0; j < newSize.height; j++)
233         {
234             cv::Mat worldPoint = projectPinholeToWorld(cv::Point(
235                 i, j));
236             worldPoint = rotatePoint(worldPoint);
237             cv::Point distPoint = projectWorldToFisheye(
238                 worldPoint);
239
240             if (distPoint.x > oldSize.width - 1 || distPoint.x <
241                 0 ||
242                 distPoint.y > oldSize.height - 1 || distPoint.y <
243                 0)
244             {
245                 continue;    // skips out of border points
246             }
247
248             // save distorted edge of the frame
249             if ((j == 0 || j == newSize.height - 1) && i % 100
250                 == 0) ||
251                 ((i == 0 || i == newSize.width - 1) && j % 100 ==
252                 0))
253             {
254                 frameBorder.push_back(cv::Point(distPoint.y,
255                     distPoint.x));
256             }
257         }
258     }
259 }

```

```

250
251         //map1.at<float>(distPoint.x, distPoint.y) = j;
252         //map2.at<float>(distPoint.x, distPoint.y) = i;
253         map1.at<float>(i, j) = distPoint.y;
254         map2.at<float>(i, j) = distPoint.x;
255     }
256     if (i % 100 == 0) std::cout << "Collumn N" << i << std::
        endl;
257 }
258 std::cout << "Avg. error: " << errorsum / (newSize.area()) <<
    std::endl;
259 }
260
261 void FisheyeDewarper::fillMapsRevScaramuzza()
262 {
263     for (int i = 0; i < oldSize.width; i++)
264     {
265         for (int j = 0; j < oldSize.height; j++)
266         {
267             cv::Point distPoint = reverseScaramuzza(cv::Point(i,
                j));
268
269             if (distPoint.x > newSize.width - 1 || distPoint.x <
                0 ||
270                 distPoint.y > newSize.height - 1 || distPoint.y <
                0)
271             {
272                 continue;    // skips out of border points
273             }
274
275             // save distorted edge of the frame
276             if (((j == 0 || j == oldSize.height - 1) && i % 100
                == 0) ||
277                 ((i == 0 || i == oldSize.width - 1) && j % 100 ==
                0))
278             {

```



```

279         frameBorder.push_back(cv::Point(distPoint.y,
280                                         distPoint.x));
281     }
282     map1.at<float>(i, j) = distPoint.y;
283     map2.at<float>(i, j) = distPoint.x;
284 }
285     if (i%10==0) std::cout << "Collumn N" << i << std::endl;
286 }
287     std::cout << "Avg. error: " << errorsun / (1080 * 1080) <<
288         std::endl;    // HACK
289 }
290 void FisheyeDewarper::fillMapsAtan()
291 {
292     for (int i = 0; i < newSize.width; i++)
293     {
294         for (int j = 0; j < newSize.height; j++)
295         {
296             cv::Point distPoint = projectWorldToFisheye(
297                 projectPinholeToWorld(cv::Point(i, j)));
298             if (distPoint.x > oldSize.width - 1 || distPoint.x <
299                 0 ||
300                 distPoint.y > oldSize.height - 1 || distPoint.y <
301                 0)
302             {
303                 continue;    // skips out of border points
304             }
305             // save distorted edge of the frame
306             if (((j == 0 || j == newSize.height - 1) && i % 100
307                 == 0) ||
308                 ((i == 0 || i == newSize.width - 1) && j % 100 ==
309                 0))
310             {

```

```

308             frameBorder.push_back(cv::Point(distPoint.y,
309                                     distPoint.x));
310
311             map1.at<float>(i, j) = distPoint.y;
312             map2.at<float>(i, j) = distPoint.x;
313         }
314     }
315 }
316
317 cv::Mat FisheyeDewarper::dewrapImage(cv::Mat inputImage)
318 {
319     cv::Mat remapped(newSize, CV_8UC3, cv::Scalar(0, 0, 0));
320     cv::remap(inputImage, remapped, map1, map2, cv::INTER_CUBIC,
321               cv::BORDER_CONSTANT);
322     return remapped;
323 }

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программный код файла unity_plugin.cpp

```
1  ///include "stdafx.h"
2  #include <opencv2/opencv.hpp>
3  #include <opencv2/core/ocl.hpp>
4  #include "surroundView.h"
5  #include <string>
6  #include "../cpp_project/FisheyeDewarper.cpp"
7
8  #define CAMERA_REGULAR 0
9  #define CAMERA_FISHEYE 1
10
11 using namespace std;
12
13 extern "C"
14 {
15     //time's stuff
16     int startTime = 0;
17     int stopTime = 0;
18     int runTime = 0;
19
20     //variables and objects for image transmtion
21     vector<Color32*> rawData; //raw data from virtual camera
22     vector<cv::Mat> frames; // all frames
23     vector<cv::cuda::GpuMat> framesGpu;
24     vector<string> framesNames; //and their names
25     cv::ocl::Context context;
26     cv::ocl::Device device;
27
28     bool gotFrames = false;
29     bool isShowed = false;
30
31     cv::Mat output;
32     cv::Mat fisheyeDisparity;
33     cv::Mat regularDisparity;
34
```

```

35     FisheyeDewarper left_dewarper;          // dewarper library
        object
36     FisheyeDewarper right_dewarper;
37     // Creating an object of StereoSGBM algorithm
38     //cv::Ptr<cv::StereoBM> stereo;
39     cv::Ptr<cv::StereoSGBM> stereo;
40     // initialize values for StereoSGBM parameters
41     int numDisparities = 8;
42     int blockSize = 5;
43     int preFilterType = 1;
44     int preFilterSize = 1;
45     int preFilterCap = 31;
46     int minDisparity = 0;
47     int textureThreshold = 10;
48     int uniquenessRatio = 15;
49     int speckleRange = 0;
50     int speckleWindowSize = 0;
51     int disp12MaxDiff = -1;
52     int dispType = CV_16S;
53
54
55     int camType;
56
57
58     int initialize(int width, int height, int numOfImg, int
        cameraType, int leftRot, int rightRot)
59     {
60         camType = cameraType;
61
62         if (!cv::ocl::haveOpenCL())
63         {
64             return 2;
65         }
66
67         if (!context.create(cv::ocl::Device::TYPE_GPU))
68         {
69             return 3;

```

```

70         }
71
72         for (int i = 0; i < context.ndevices(); i++)
73         {
74             device = context.device(i);
75         }
76
77         // Select the first device
78         cv::ocl::Device(context.device(0));
79
80         if (numOfImg < 1)
81         {
82             return 1;
83         }
84
85         frames.clear();
86         framesNames.clear();
87
88         for (int i = 0; i < numOfImg; i++)
89         {
90             frames.push_back(cv::Mat(height, width, CV_8UC4));
91             framesNames.push_back(to_string(i + 1) + "of" +
92                                   to_string(numOfImg));
93
94         }
95
96         rawData.clear();
97
98         for (int i = 0; i < numOfImg; i++)
99         {
100             rawData.push_back(0);
101         }
102
103         if (cameraType == CAMERA_FISHEYE)
104         {
105             // 180 deg: 350.8434, -0.0015, 2.1981 * pow(10, -6),
106                 -3.154 * pow(10, -9)

```

```

104         // 270 deg: 229.3778, -0.0016, 9.737 * pow(10, -7),
           -4.2154 * pow(10, -9)
105     left_dewarper.setIntrinsics(350.8434, -0.0015, 2.1981
           * pow(10, -6), -3.154 * pow(10, -9), cv::Vec2d(0,
           0), cv::Matx22d(1, 0, 0, 1), 0.022);           //
           270 deg coefs
106     left_dewarper.setSize(cv::Size(1080, 1080), cv::Size
           (540, 540), 90);
107     left_dewarper.setRpy(leftRot, 0, 0);
108     left_dewarper.fillMaps(SCARAMUZZA);
109
110     right_dewarper.setIntrinsics(350.8434, -0.0015,
           2.1981 * pow(10, -6), -3.154 * pow(10, -9), cv::
           Vec2d(0, 0), cv::Matx22d(1, 0, 0, 1), 0.022);
111     right_dewarper.setSize(cv::Size(1080, 1080), cv::Size
           (540, 540), 90);
112     right_dewarper.setRpy(rightRot, 0, 0);
113     right_dewarper.fillMaps(SCARAMUZZA);
114
115     //cv::namedWindow("Fisheye disparity", cv::
           WindowFlags::WINDOW_AUTOSIZE);
116     //cv::namedWindow("Regular disparity", cv::
           WindowFlags::WINDOW_AUTOSIZE);
117
118     }
119
120     stereo = cv::StereoSGBM::create();
121     return 0;
122 }
123
124 int screenIndex = 0;
125
126 int takeScreenshot(Color32** raw, int width, int height, int
           numOfCam, bool isShow)
127 {
128     cv::Mat sceen = cv::Mat(height, width, CV_8UC4, raw[
           numOfCam]);

```

```

129         cvtColor(sceen, sceen, cv::COLOR_BGRA2RGB);
130         flip(sceen, sceen, 0);
131         screenIndex++;
132         string path = "D:/Work/Coding/Repos/RTC_Practice/
            fisheye_stereo/data/stereo_img/" + to_string(
            screenIndex) + "_shot.jpg";
133         cv::imwrite(path, sceen);
134
135         if (isShow)
136         {
137             imshow("OpenCV Screenshot", sceen);
138         }
139
140         return 0;
141     }
142
143     int takeStereoScreenshot(Color32** raw, int width, int height
        , int cameraType, int numOfCam1, int numOfCam2, bool
        isShow)
144     {
145         cv::Mat stereo = cv::Mat(height, 2 * width, CV_8UC4, cv::
            Scalar(0, 0, 0));
146         cv::Mat cam1 = cv::Mat(height, width, CV_8UC4, raw[
            numOfCam1]);
147         cv::Mat cam2 = cv::Mat(height, width, CV_8UC4, raw[
            numOfCam2]);
148
149         cv::Mat de_cam1 = cv::Mat(540, 540, CV_8UC4);
150         cv::Mat de_cam2 = cv::Mat(540, 540, CV_8UC4);
151
152         cvtColor(cam1, cam1, cv::COLOR_BGRA2RGB);
153         flip(cam1, cam1, 0);
154         cvtColor(cam2, cam2, cv::COLOR_BGRA2RGB);
155
156         screenIndex++;
157         string left_path;
158         string right_path;

```

```

159         if (cameraType == CAMERA_REGULAR) {
160             left_path = "D:/Work/Coding/Repos/RTC_Practice/
                        fisheye_stereo/data/stereo_img/" + to_string(
                        screenIndex) + "_reg_l_shot.jpg";
161             right_path = "D:/Work/Coding/Repos/RTC_Practice/
                        fisheye_stereo/data/stereo_img/" + to_string(
                        screenIndex) + "_reg_r_shot.jpg";
162             cv::imwrite(left_path, cam1);
163             cv::imwrite(right_path, cam2);
164         }
165         else {
166             //de_cam1 = ;
167             de_cam2 = right_dewarper.dewrapImage(cam2);
168             de_cam1 = left_dewarper.dewrapImage(cam1);
169             left_path = "D:/Work/Coding/Repos/RTC_Practice/
                        fisheye_stereo/data/stereo_img/" + to_string(
                        screenIndex) + "_fy_l_shot.jpg";
170             right_path = "D:/Work/Coding/Repos/RTC_Practice/
                        fisheye_stereo/data/stereo_img/" + to_string(
                        screenIndex) + "_fy_r_shot.jpg";
171
172             cv::imwrite(left_path, de_cam1(cv::Rect(0, 0, 540,
                        540)));
173             cv::imwrite(right_path, de_cam2(cv::Rect(0, 0, 540,
                        540)));
174
175             if (isShow)
176             {
177                 imshow("OpenCV Screenshot", cam1);
178             }
179
180             return 0;
181         }
182
183     int getImages(Color32** raw, int width, int height, int
        cameraType, int numOfImg, bool isShow, SGBMparams sgbm)
184     {

```



```

185         if (numOfImg < 1)
186         {
187             gotFrames = false;
188             return 1;
189         }
190         else
191         {
192     #pragma omp parallel for
193             for (int i = 0; i < numOfImg; i++)
194             {
195                 frames[i] = cv::Mat(height, width, CV_8UC4, raw[i
196                     ]);
197                 cvtColor(frames[i], frames[i], cv::COLOR_BGRA2RGB
198                     );
199                 flip(frames[i], frames[i], 0);
200
201                 if (cameraType == CAMERA_FISHEYE) {
202                     frames[0] = left_dewarper.dewrapImage(frames[0]);
203                     // undistort
204                     frames[1] = right_dewarper.dewrapImage(frames[1])
205                         ;
206                 }
207                 fillStereoParams(sgbm);
208                 cv::Mat disparity = calculateDisparities(frames[0],
209                     frames[1], cameraType);
210
211                 if (isShow)
212                 {
213                     for (int i = 0; i < numOfImg; i++)
214                     {
215                         imshow(framesNames[i], frames[i]);
216                         isShowed = true;
217                     }
218                 }
219             }
220         }
221     }
222     else

```

```

217         {
218             if (isShowed)
219             {
220                 for (int i = 0; i < numOfImg; i++)
221                 {
222                     cv::destroyWindow(framesNames[i]);
223                     isShowed = false;
224                 }
225             }
226         }
227
228         gotFrames = true;
229     }
230
231     return 0;
232 }
233
234
235 void processImage(unsigned char* data, int width, int height)
236 {
237     //Convert from RGB to ARGB
238     cv::Mat argb_img;
239     cvtColor(output, argb_img, cv::COLOR_RGB2BGRA);
240     cv::flip(argb_img, argb_img, 0);
241     vector<cv::Mat> bgra;
242     split(argb_img, bgra);
243     swap(bgra[0], bgra[3]);
244     swap(bgra[1], bgra[2]);
245     merge(bgra, argb_img);
246     memcpy(data, argb_img.data, argb_img.total() * argb_img.
        elemSize());
247 }
248
249 void terminate()
250 {
251     rawData.clear();
252     frames.clear();

```

```

253         cv::destroyAllWindows();
254     }
255 }
256
257 void fillStereoParams(SGBMparams& sgbm)
258 {
259     stereo->setBlockSize(sgbm.blockSize * 2 + 5);
260     stereo->setPreFilterCap(sgbm.preFilterCap);
261     //stereo->setPreFilterSize(sgbm.preFilterSize*2+5);
262     stereo->setP1(sgbm.preFilterSize);
263     stereo->setMinDisparity(sgbm.minDisparity);
264     stereo->setNumDisparities(sgbm.numDisparities * 16);
265     //stereo->setTextureThreshold(sgbm.textureThreshold);
266     stereo->setP2(sgbm.textureThreshold);
267     stereo->setUniquenessRatio(sgbm.uniquenessRatio);
268     stereo->setSpeckleWindowSize(sgbm.speckleWindowSize * 2);
269     stereo->setSpeckleRange(sgbm.speckleRange);
270     stereo->setDisp12MaxDiff(sgbm.disp12MaxDiff);
271     // 2 pass expensive method
272     // stereo->setMode(cv::StereoSGBM::MODE_HH);
273
274 }
275
276 cv::Mat calculateDisparities(cv::Mat leftImage, cv::Mat
    rightImage, int cameraType) {
277     cv::Mat disp;
278     // Converting images to grayscale
279     cv::cvtColor(leftImage, leftImage, cv::COLOR_BGR2GRAY);
280     cv::cvtColor(rightImage, rightImage, cv::COLOR_BGR2GRAY);
281
282     // Calculating disparith using the StereoBM algorithm
283     stereo->compute(leftImage, rightImage, disp);
284
285     // Converting disparity values to CV_32F from CV_16S
286     disp.convertTo(disp, CV_32F, 1.0);
287
288     // Scaling down the disparity values and normalizing them

```

```

289         disp = (disp / 16.0f - (float)stereo->getMinDisparity())
           / ((float)stereo->getNumDisparities());
290
291         if (cameraType == CAMERA_FISHEYE) {
292             fisheyeDisparity = disp;
293             imshow("Fisheye disparity", fisheyeDisparity);
294         }
295         if (cameraType == CAMERA_REGULAR) {
296             regularDisparity = disp;
297             imshow("Regular disparity", regularDisparity);
298         }
299         cv::waitKey(1);
300
301         return disp;
302     }

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Программный код файла Connector.cs

```
1 using System.Collections;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System;
4 using System.Globalization;
5 using System.Linq;
6 using System.Runtime.ExceptionServices;
7 using System.Runtime.InteropServices;
8 using System.Threading;
9 using System.Threading.Tasks;
10 using UnityEngine;
11 using UnityEngine.UI;
12 using Multithreading;
13
14
15
16 public struct SGBMparams
17 {
18     public byte preFilterSize;
19     public byte preFilterCap;
20     public byte blockSize;
21     public byte minDisparity;
22     public byte numDisparities;
23     public byte textureThreshold;
24     public byte uniquenessRatio;
25     public byte speckleRange;
26     public byte disp12MaxDiff;
27     public byte speckleWindowSize;
28 };
29
30 public class Connector : MonoBehaviour
31 {
32     [Header("Cameras")]
33     public Camera camera1;
34     public int cam1XRot;
```

```

35     public Camera camera2;
36     public int cam2XRot;
37     public Camera camera3;
38     public Camera camera4;
39
40     [Header("Screens")]
41     public GameObject disparityScreen;
42     // for bowl
43     private int dispScreenWidth = 1080;
44     private int dispScreenHeight = 1080;
45     private Texture2D dispScreenTexture;
46     private Color32[] dispScreenPixels;
47     private GCHandle pixelHandle;
48     private IntPtr pixelPtr;
49
50
51     [Header("Sliders")]
52     public Slider preFilterSize;
53     public Slider preFilterCap;
54     public Slider blockSize;
55     public Slider minDisparity;
56     public Slider numDisparities;
57     public Slider textureThreshold;
58     public Slider uniquenessRatio;
59     public Slider speckleRange;
60     public Slider speckleWindowSize;
61     public Slider disp12MaxDiff;
62
63     [Header("Img parameters")]
64     public static int width = 1080;
65     public static int height = 1080;
66     public static bool showImages = false;
67     public bool showPano = false;
68     // Fisheye
69     private Texture2D camTex1;
70     private Texture2D camTex2;
71     // Regular

```

```

72     private Texture2D camTex3;
73     private Texture2D camTex4;
74
75     private SGBMparams sgbm;           // structure to store SGBM
        parameter values
76
77     private Rect readingRect;
78     int isOk = 0;
79     public int gap = 40;
80     int actionId = 0;
81
82     bool pano = false;
83     // Threading stuff
84     DisaprityCalculator imageProcessingThread;
85     DisaprityCalculator regularCameraThread;
86     bool threadStarted = false;
87     bool initFlag = false;
88     bool turn = true;
89
90     // Start is called before the first frame update
91     void Start()
92     {
93         Debug.Log("Start Function");
94         InitTexture();
95         disparityScreen.GetComponent<Renderer>().material.
            mainTexture = dispScreenTexture;
96         unsafe {
97             //AllocConsole();
98             sgbm = new SGBMparams();
99             imageProcessingThread = new DisaprityCalculator(1,
                1080, 1080, showImages, cam1XRot, cam2XRot,
                pixelPtr);
100             regularCameraThread = new DisaprityCalculator(0, 540,
                540, showImages, 0, 0, pixelPtr);
101         }
102
103     }

```

```

104     // Update is called once per frame
105     void Update()
106     {
107         // Fisheye cameras
108         camTex1 = CameraToTexture2D(camera1);
109         camTex2 = CameraToTexture2D(camera2);
110         // Regular cameras
111         camTex3 = CameraToTexture2D(camera3);
112         camTex4 = CameraToTexture2D(camera4);
113
114         fillStereoParams();           // fills 'sgbm' structure with
            slider values
115         actionId = 0;                 // Default to update action
116         // TODO: id's are messed up
117         /* Update texture in the world */
118         if (Input.GetKeyUp("[1]")) {
119             actionId = 3;
120             // TODO: World texture renderer
121         }
122         /* Take screenshot */
123         if (Input.GetKeyUp("[2]")) {
124
125             actionId = 1;
126         }
127         /* Reinitialize */
128         if (Input.GetKeyUp("[3]")) {
129             actionId = 2;
130         }
131         /* Start the second thread */
132         if (!threadStarted)           // image processing thread
            hasn't been started before
133         {
134             Debug.Log("Starting thread");
135             regularCameraThread.Start();
136             imageProcessingThread.Start();      // start the
                threads
137             threadStarted = true;

```



```

138     }
139     /* Pass the data to the thread */
140     // idk seems like both threads use the same library
        memory
141     if (imageProcessingThread.code == 0 &&
        regularCameraThread.code == 0 || true)
142     {
143         imageProcessingThread.Update(camTex1.GetPixels32(),
        camTex2.GetPixels32(), sgbm, actionId);
144         regularCameraThread.Update(camTex3.GetPixels32(),
        camTex4.GetPixels32(), sgbm, actionId);
145     }
146
147     /* textures are not erased by the GC automatically */
148     Destroy(camTex1);
149     Destroy(camTex2);
150     Destroy(camTex3);
151     Destroy(camTex4);
152 }
153
154
155 void OnApplicationQuit()
156 {
157     pixelHandle.Free();
158     imageProcessingThread.Abort();
159     regularCameraThread.Abort();
160 }
161
162 void OnGUI()
163 {
164     GUI.Label(new Rect(0, 0, 100, 100), (1.0f / (Time.
        smoothDeltaTime)).ToString());
165 }
166
167 private Texture2D CameraToTexture2D(Camera camera)
168 {
169     Rect rect;

```

```

170         RenderTexture renderTexture = new RenderTexture(1080,
            1080, 24);          // TODO: adapt texture for regular and
                               fisheye
171         Texture2D screenShot = new Texture2D(540, 540,
            TextureFormat.ARGB32, false);
172         if (camera == camera3)
173         { rect = new Rect(0, height / 2, width / 2, height / 2);
            }
174         else if (camera == camera4)
175         { rect = new Rect(width / 2, height / 2, width / 2,
            height / 2); }
176         else          // full frame fusheye
177         {
178             rect = new Rect(0, 0, width, height);
179             renderTexture = new RenderTexture(width, height, 24);
180             screenShot = new Texture2D(width, height,
                TextureFormat.ARGB32, false);
181         }
182
183         camera.targetTexture = renderTexture;
184         camera.Render();
185
186         RenderTexture.active = renderTexture;
187         screenShot.ReadPixels(rect, 0, 0);
188
189         camera.targetTexture = null;
190         RenderTexture.active = null;
191
192         Destroy(renderTexture);
193         renderTexture = null;
194         return screenShot;
195     }
196
197
198     void InitTexture()
199     {

```

```

200         dispScreenTexture = new Texture2D(dispScreenWidth,
        dispScreenHeight, TextureFormat.ARGB32, false);
201         dispScreenPixels = dispScreenTexture.GetPixels32();
202         //Pin pixel32 array
203         pixelHandle = GCHandle.Alloc(dispScreenPixels,
        GCHandleType.Pinned);
204         //Get the pinned address
205         pixelPtr = pixelHandle.AddrOfPinnedObject();
206     }
207
208     unsafe void MatToTexture2D()
209     {
210         //Convert Mat to Texture2D
211         processImage(pixelPtr, dispScreenWidth, dispScreenHeight)
        ;
212         //Update the Texture2D with array updated in C++
213         dispScreenTexture.SetPixels32(dispScreenPixels);
214         dispScreenTexture.Apply();
215     }
216
217     void fillStereoParams()
218     {
219         sgbm.preFilterCap      = (byte)preFilterCap.value;
220         sgbm.preFilterSize     = (byte)preFilterSize.value;
221         sgbm.blockSize         = (byte)blockSize.value;
222         sgbm.minDisparity      = (byte)minDisparity.value;
223         sgbm.numDisparities    = (byte)numDisparities.value;
224         sgbm.textureThreshold  = (byte)textureThreshold.value;
225         sgbm.uniquenessRatio    = (byte)uniquenessRatio.value;
226         sgbm.speckleRange      = (byte)speckleRange.value;
227         sgbm.disp12MaxDiff     = (byte)disp12MaxDiff.value;
228     }
229
230     #region dllimport
231
232     [DllImport("unity_plugin", EntryPoint = "initialize")]

```

```

233     unsafe private static extern int initialize(int width, int
        height, int num, int imageType, int leftRot, int rightRot)
        ;
234
235     [DllImport("unity_plugin", EntryPoint = "terminate")]
236     unsafe private static extern void terminate();
237
238     [DllImport("unity_plugin", EntryPoint = "processImage")]
239     unsafe private static extern void processImage(IntPtr data,
        int width, int height);
240
241     [DllImport("unity_plugin", EntryPoint = "getImages")]
242     unsafe private static extern int getImages(IntPtr raw, int
        width, int height, int numOfImg, int cameraType, bool
        isShow, SGBMparams sgbm);
243
244     [DllImport("unity_plugin", EntryPoint = "takeScreenshot")]
245     unsafe private static extern int takeScreenshot(IntPtr raw,
        int width, int height, int numOfCam, bool isShow);
246
247     [DllImport("unity_plugin", EntryPoint = "takeStereoScreenshot
        ")]
248     unsafe private static extern int takeStereoScreenshot(IntPtr
        raw, int width, int height, int numOfCam1, int numOfCam2,
        bool isShow);
249
250     [DllImport("unity_plugin", EntryPoint = "AllocConsole")]
251     private static extern bool AllocConsole();
252     #endregion
253 }

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Программный код файла DisparityPlayground.m

```
1
2 SHOW = false;
3 distances = [4 5 6 7.5 10 12.5 15]; % // 13
4 regErrors = [];
5 fyErrors = [];
6
7 for dst = distances
8
9     %%%      FISHEYE      %%%
10     fy_e = computePlaneError(newFisheyeStereoParams, dst, "fy",
        SHOW);
11     fyErrors = [fyErrors fy_e];
12     %%%      REGULAR      %%%
13     reg_e = computePlaneError(newRegularStereoParams, dst, "reg",
        SHOW);
14     regErrors = [regErrors reg_e];
15     disp("Distance ready")
16 end
17
18 createfigure(distances, [regErrors; fyErrors])
19
20
21
22 function [MSE] = computePlaneError(stereoParams, distance, type,
        show)
23     base_path = "D:\Work\Coding\Repos\RTC_Practice\fisheye_stereo
        \data\stereo_img\compar\plane" + string(distance) + "m\";
24
25     targetDistance = distance;
26     target_roi = [-0.4 0.6 -0.6 0.46 targetDistance/10-0.05
        targetDistance/10+0.05];
27
28     targetParamsVector = [0, 0, 1, -targetDistance/10]; %
        normal + distance
```

```

29     ref_model = planeModel(targetParamsVector);
30
31     imgRight = base_path + type + "_r_shot.jpg";
32     imgLeft = base_path + type + "_l_shot.jpg";
33
34     lImage = imread(imgLeft);
35     rImage = imread(imgRight);
36
37     [frameLeftRect, frameRightRect] = rectifyStereoImages(lImage,
        rImage, stereoParams);
38
39     %figure;
40     %imshow(stereoAnaglyph(frameLeftRect, frameRightRect));
41     %title('Rectified Video Frames');
42
43     frameLeftGray = rgb2gray(frameLeftRect);
44     frameRightGray = rgb2gray(frameRightRect);
45
46     disparityMapReg = disparitySGM(frameLeftGray, frameRightGray)
        ;
47     % figure;
48     % imshow(disparityMapReg, [0, 64]);
49     % title('Disparity Map');
50     % colormap jet
51     % colorbar
52
53     points3Dreg = reconstructScene(disparityMapReg, stereoParams)
        ;
54     points3Dreg = points3Dreg ./ 1000;
55     ptCloud = pointCloud(points3Dreg, 'Color', frameLeftRect);
56     indicies = findPointsInROI(ptCloud, target_roi);
57     ptCloud = select(ptCloud, indicies);
58     %
59     MSE = findMSE(ptCloud, ref_model);
60
61     if (show)
62         disp(type+"ERROR: ")

```

```

63         disp(MSE)
64         % Visualize the point cloud
65         figure('Name','type+' depth')
66         pcshow(ptCloud);
67         hold on
68         plot(ref_model, 'color', 'white')
69         hold off
70     end
71 end
72
73 function [MSE] = findMSE(pt_cloud, plane_model)
74     errorSum = 0.0;
75     for elm = 1:pt_cloud.Count
76         pnt = pt_cloud.Location(elm,:);
77         pnt_error = findSquareError(pnt, plane_model);
78         errorSum = errorSum + pnt_error;
79
80
81     end
82
83     MSE = sqrt(errorSum/pt_cloud.Count);
84 end
85
86 function [error] = findSquareError(point, plane)
87     planePoint = [0, 0, -plane.Parameters(4)]; % plane center
88     PQ = point - planePoint;
89     error = (dot(PQ, plane.Normal)*10 )^2;      % squared
           difference
90 end
91
92 function createfigure(X1, YMatrix1)
93 %CREATEFIGURE(X1, YMatrix1)
94 % X1: vector of x data
95 % YMATRIX1: matrix of y data
96
97 % Auto-generated by MATLAB on 16-Jan-2022 02:26:31
98

```

```

99 % Create figure
100 figure1 = figure;
101
102 % Create axes
103 axes1 = axes('Parent',figure1);
104 hold(axes1,'on');
105
106 % Create multiple lines using matrix input to plot
107 plot1 = plot(X1,YMatrix1,'Marker','square');
108 set(plot1(1),'DisplayName','XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX');
109 set(plot1(2),'DisplayName','XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX');
110
111 % Create ylabel
112 ylabel('XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX', '°');
113
114 % Create xlabel
115 xlabel('XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX', '°');
116
117 % Uncomment the following line to preserve the X-limits of the
      axes
118 xlim(axes1,[-0.000209902368405811 16.0517554642163]);
119 % Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the
      axes
120 ylim(axes1,[-3.8322756199846e-05 0.35351683918712]);
121 box(axes1,'on');
122 % Set the remaining axes properties
123 set(axes1,'XGrid','on','YGrid','on');
124 % Create legend
125 legend1 = legend(axes1,'show');
126 set(legend1,...
127     'Position',[0.172415836709068 0.839227796053986
128                 0.262158950099176 0.0602310215285902]);
128 end

```