

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Информатика и управление в технических системах»

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методические указания

к проведению лабораторного практикума по дисциплине
для студентов направлений подготовки
27.04.04 «Управление в технических системах»,
15.04.06 «Мехатроника и робототехника»



Севастополь
СевГУ
2025

УДК 681.511(076.5)
ББК 32.965я73
М54

Р е ц е н з е н т:

В.А. Карапетьян – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры
"Информатика и управление в технических системах"

Составители: Скороход Б. А., Жиляков П. В.

М54 Методы и алгоритмы обработки изображений : методические указания к проведению лабораторного практикума по дисциплине для студентов направлений подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах», 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, кафедра «Информатика и управление в технических системах»; сост.: Б. А. Скороход, П. В. Жиляков. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 36 с. – Текст : электронный.

Приводится описание практических занятий, целью которых является изучение методов обработки изображений.

Предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения по направлениям подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах», 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

УДК 681.511(076.5)
ББК 32.965я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры "Информатика и управления в технических системах", протокол № 5 от 28 января 2025 г.

© Скороход Б.А., Жиляков П.В., сост., 2025
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. Обнаружение движущихся объектов с помощью алгоритмов вычитания фона и линейной комбинации гауссианов	4
2. Обнаружение движущихся объектов по видеоизображениям с помощью алгоритмов Лукаса - Канаде и Фарнбека	9
3. Регистрация изображений	11
4. Оценка параметров модели монокулярной камеры (калибровка камеры)	16
5. Оценка геометрических параметров объектов с помощью монокулярной камеры	23
6. Оценка параметров модели стереокамеры (калибровка камеры)	24
Библиографический список	36

1 ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ ВЫЧИТАНИЯ ФОНА И ЛИНЕЙНОЙ КОМБИНАЦИИ ГАУССИАНОВ

1.1 Постановка задачи

Целью работы является разработка алгоритмов обнаружения и слежения за движущимися объектами в предположении, что наблюдение за объектами ведётся со стационарной, закреплённой камеры. На вход камеры поступает изображение, выходом алгоритма являются координаты пикселей, которые как предполагается принадлежат подвижным и неподвижным объектам.

При использовании смеси Гауссовых распределений фоновое изображение моделируется с использованием нескольких гауссианов. Основными параметрами для сопровождения объекта являются координаты центроида сегментированного объекта и окно слежения. Метод основан на идее попиксельного сравнения текущего кадра с некоторым шаблоном, который обычно называется моделью фона. Модель представляет описание сцены без движущихся объектов, и должна постоянно обновляться, чтобы учитывать изменения освещения и других параметров. Результатами работы алгоритма является двоичная маска, где 1 – соответствует пикселю, принадлежащему подвижному объекту, а 0 – фону.

Рассмотрим конкретный пиксель с интенсивностью g_t в момент t , $t = 1, 2, \dots$. g_t моделируется с помощью K Гауссианов $N_{kt} = N(\mu_{kt}, \sigma_{kt}^2)$, $k = 1, 2, \dots, K$. Вероятность наблюдения g_t определяется выражением

$$P(g_t) = \sum_{k=1}^K \omega_{kt} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(g_t - \mu_{kt})^2}{\sigma_{kt}^2}\right),$$
$$\omega_{1t} + \dots + \omega_{Kt} = 1,$$

где ω_{kt} – веса, который является показателем того, насколько часто данный процесс в данном пикселе попадал в поле зрения камеры.

Используя и обучая такую модель можно создать алгоритм, который справляется практически со всеми перечисленными выше проблемами (кроме движущихся теней).

Алгоритм состоит из следующих шагов:

а) Инициализация.

Модель инициализируется, используя первый кадр последовательности. Для каждого пикселя создаётся одно распределение со следующими параметрами:

$$\omega_{1,1} = 1, \mu_{1,1} = X_1$$

и заданной заранее ковариационной матрицей. Считается, что все пиксели первого кадра принадлежат фону.

Для последующих кадров выполняется последовательность:

б) Проверка на принадлежность к существующим распределениям:

Каждое новое значение интенсивности пикселя X_t проверяется на соответствие имеющимся $k \leq K$ нормальным распределениям. Соответствие считается найденным, если следующее неравенство (расстояние Махаланобиса) верно

$$\left[(X_t - \mu_{i,t})^T \Sigma_{i,t}^{-1} (X_t - \mu_{i,t}) \right]^{1/2} < \delta,$$

где обычно δ полагают равным 2-2.5. Найденное распределение помечается как текущее, имеющее индекс k_0 , и происходит переход к шагу алгоритма е). Если распределение удовлетворяющее неравенству не найдено, то выполняется следующий пункт.

в) Создание нового распределения.

Параметры нового распределения оцениваются также как и для первого кадра, за исключением весового коэффициента. Если число распределений в модели уже равно K , то осуществляется поиск распределения с наименьшим весом, этот вес и выбирается для нового распределения, которое заменит найденное. После этого новое распределение помечается как текущее, и алгоритм переходит к шагу д).

г) Обновление математического ожидания и матрицы ковариации текущего распределения

Математическое ожидание и ковариационная матрица обновляются с помощью низкочастотного фильтра:

$$\begin{aligned} \mu_{k_0,t} &= (1 - p)\mu_{k_0,t-1} + pX_t, \\ \Sigma_{k_0,t} &= (1 - p)\Sigma_{k_0,t-1} + p(X_t - \mu_{k_0,t})^T (X_t - \mu_{k_0,t}), \\ p &= \alpha \eta(X_t | \mu_{k_0,t-1}, \Sigma_{k_0,t-1}) = \alpha \frac{\omega_{k_0,t} \eta(X_t, \mu_{k_0,t}, \Sigma_{k_0,t})}{P(X_t)}, \end{aligned}$$

где α – параметр, который регулирует скорость обучения.

д) Обновление весовых коэффициентов.

Весовые коэффициенты при распределениях, изменяются в соответствии со следующей формулой:

$$\omega_{k,t} = (1 - \alpha)\omega_{k,t-1} + \alpha M_{k,t},$$

где

$$M_{k,t} = \begin{cases} 1, & k = k_0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

е) Классификация пикселей.

Последним шагом алгоритма является непосредственная классификация пикселя, как принадлежащего подвижному объекту или фону. Первоначально

все K распределений упорядочиваются по возрастанию $\frac{\omega_{k,t}}{\|\Sigma_{k,t}\|}$. Это делается для

того, что бы те распределения, которые наилучшим способом аппроксимируют пиксель оказались вверху списка, а те, которые худшим образом аппроксимируют пиксель, опускались в конец списка, и в последующих итерациях заменялись новыми. Тогда фоновыми, будут считаться такие распределения B_t , что

$$B_t = \underset{b}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{k=1}^b (\omega_{k,t}) > \delta_T \right),$$

Если в качестве величины порога δ_T принять малое значение, то модель фона будет унимодальной. Если же δ_T будет велико, то это приведёт к тому, что одновременно несколько распределений будет относиться к фону. Благодаря данной особенности, в прошествии определённого периода времени, алгоритм способен подстраиваться к периодическим движениям на видеоизображении (таким как колебание деревьев), также данный алгоритм способен адаптироваться к медленным изменениям фона, но быстрые изменения фона и освещения, а также присутствие большого количества теней увеличивают количество ошибок первого рода (количество ложноположительных обнаружений). Например, определённый пиксель был классифицирован как подвижный объект и для него существует единственное распределение с весовым коэффициентом 1. Если в следующих кадрах данный пиксель действительно будет принадлежать фону, то пройдёт $\log_{(1-\alpha)} \delta_r$ кадров до того момента, как он действительно будет классифицирован как фон. Для значений параметров $\alpha = 0.002$ и $\delta_T = 0.6$, указанное выше количество кадров будет соответствовать 255. Для устранения недостатков в работе предлагается поступить следующим образом, а именно ввести фазу обучения, для которой будет использована последовательность из первых L кадров. Тогда на фазе обучения обновление параметров происходит по следующим формулам

$$\omega_{k,t} = \omega_{k,t-1} + \frac{1}{t} (M_{k,t} - \omega_{k,t-1}),$$

$$\mu_{k,t} = \mu_{k,t-1} + \frac{M_{k,t}}{\sum_{i=1}^t M_{k,i}} (X_t - \mu_{k,t-1}),$$

$$\Sigma_{k,t} = \Sigma_{k,t-1} + \frac{M_{k,t}}{\sum_{i=1}^t M_{k,i}} \left[(X_t - \mu_{k,t-1})^T (X_t - \mu_{k,t-1}) - \Sigma_{k,t-1} \right].$$

После фазы обучения, наступает фаза непосредственного функционирования, где обновление параметров происходит по следующим формулам

$$\omega_{k,t} = \omega_{k,t-1} + \frac{1}{L} (M_{k,t} - \omega_{k,t-1}),$$

$$\mu_{k,t} = \mu_{k,t-1} + \frac{1}{L} \frac{M_{k,t}}{\sum_{i=1}^t M_{k,i}} \left(\frac{M_{k,t} X_t}{\omega_{k,t}} - \mu_{k,t-1} \right),$$

$$\Sigma_{k,t} = \Sigma_{k,t-1} + \frac{1}{L} \left[\frac{M_{k,t} (X_t - \mu_{k,t-1})^T (X_t - \mu_{k,t-1})}{\omega_{k,t}} - \Sigma_{k,t-1} \right].$$

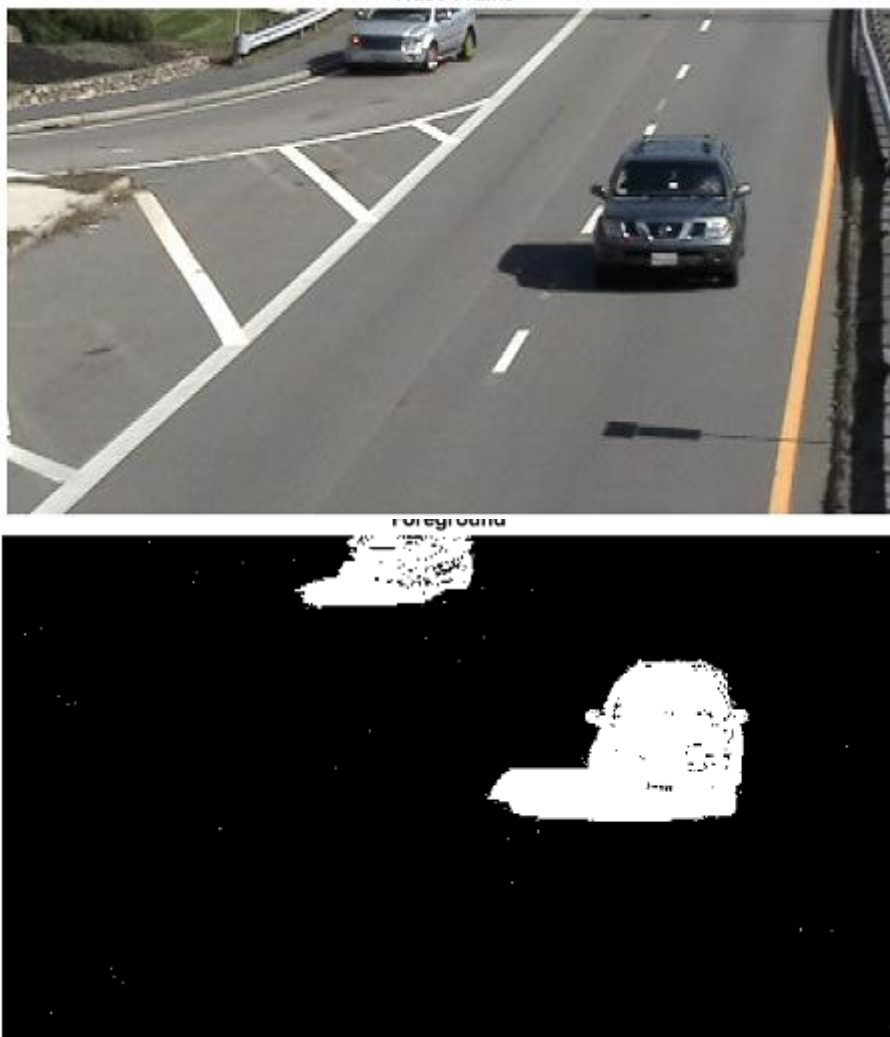
Предложенные изменения в алгоритме, позволяют ему адаптироваться к изменениям освещённости.

Для каждого пикселя ищется соответствующий ему Гауссиан: если соответствие находится в пределах 2.5 с.к.о. от среднего, то он соответствует фону, если найдется несколько Гауссианов, то берется наилучший.

1.2 Порядок выполнения работы

Шаг 1 - Импорт видео visiontraffic.avi и инициализация детектора переднего плана, используя алгоритмы вычитания фона и линейную комбинацию Гауссианов.

На двух рисунках ниже показаны один из видеок кадров и маска переднего плана, вычисленная детектором.



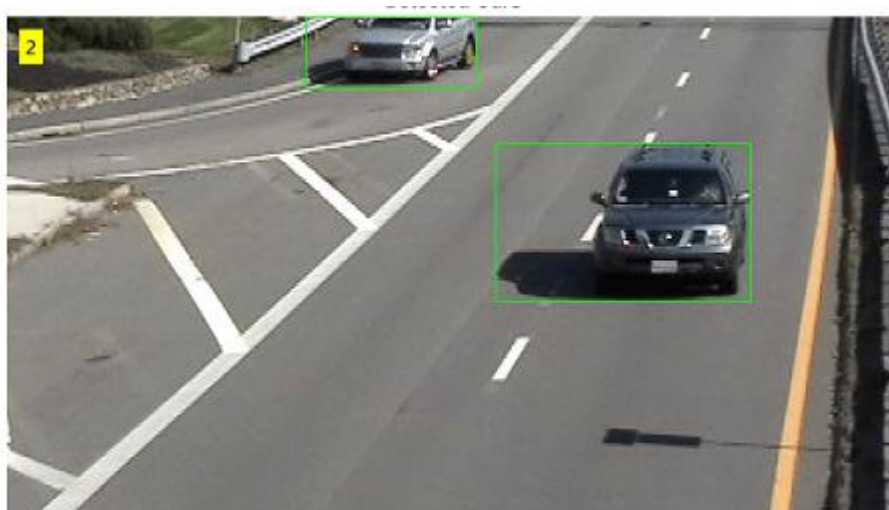
Шаг 2 - Обнаружение автомобилей в начальном видеокадре.

Процесс сегментации фона и переднего плана не идеален и часто включает нежелательные шумы. Для устранения шума и заполнения пробелов в обнаруженных объектах предлагается использовать морфологические операции. Пример результатов обработки показан на рисунке внизу.



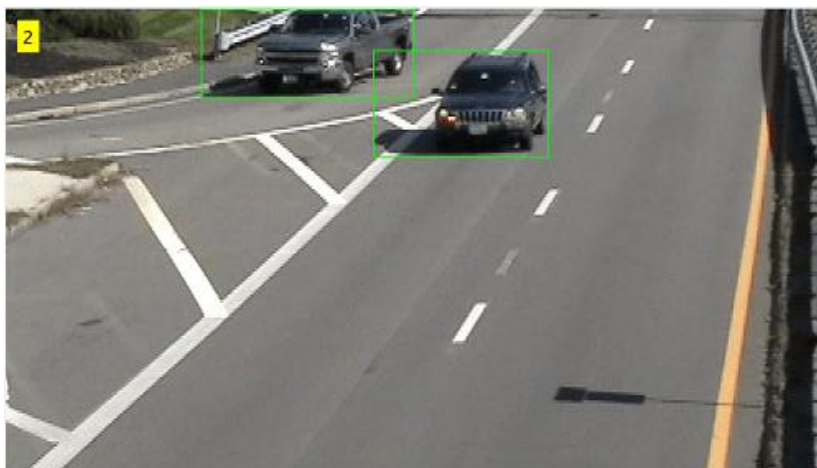
Шаг 3 – Построение ограничительных рамок для объектов.

Программа должна находить ограничительные рамки для каждого обнаруженного движущегося объекта, отбрасывая большие двоичные объекты, которые содержат менее 150 пикселей. На рисунке внизу показаны результаты выполнения этой части программы.



Шаг 4 - Обработка остальных видеокадров

На последнем этапе программа должна обрабатывать оставшиеся видеокадры, обнаруживая связанные компоненты с указанной минимальной площадью и отображая их ограничивающими рамками, и определяя количество автомобилей, найденных в видеокадре. На рисунке внизу показан один из обработанных кадров.



При написании программ рекомендуется использовать следующие операторы пакета матлаб: `vision.ForegroundDetector`, `vision.VideoFileReader`, `release`, `step`, `strel`, `imopen`, `vision.BlobAnalysis`, `insertShape`, `vision.VideoPlayer`, `release`.

После написания программ и проверки их работоспособности требуется сравнить алгоритмы и исследовать свойства алгоритма с распределениями Гаусса к изменениям количества, используемых для моделирования фона, гауссианов и количества начальных кадров.

2 ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯМ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ ЛУКАСА - КАНАДЕ И ФАРНБЕКА

2.1 Постановка задачи

Целью работы является разработка алгоритма обнаружения и слежения за движущимися объектами предполагающего, что наблюдение за объектами ведётся со стационарной, закреплённой камеры. На вход камеры поступает изображение, выходом алгоритма являются координаты пикселей, которые как предполагается принадлежат подвижным так и неподвижным объектам. Требуется выделить на изображении автомобили:

- а) оценивая световой поток и используя фильтр Гаусса для предварительной фильтрации производных Лукаса - Канадэ;
- б) оценивая световой поток используя алгоритм Фарнбека;
- в) выделить по цвету темный автомобиль.

2.2 Порядок выполнения работы

Шаг 1 – Разобраться с алгоритмом оценки светового потока с использованием фильтра Гаусса (лекция 1 курса).

Шаг 2 - Импорт видео `visiontraffic.avi`. На рисунке ниже показан один из видеок кадров.



Рис. 1. Один из видеок кадров

Шаг 3 - Обнаружение автомобилей.

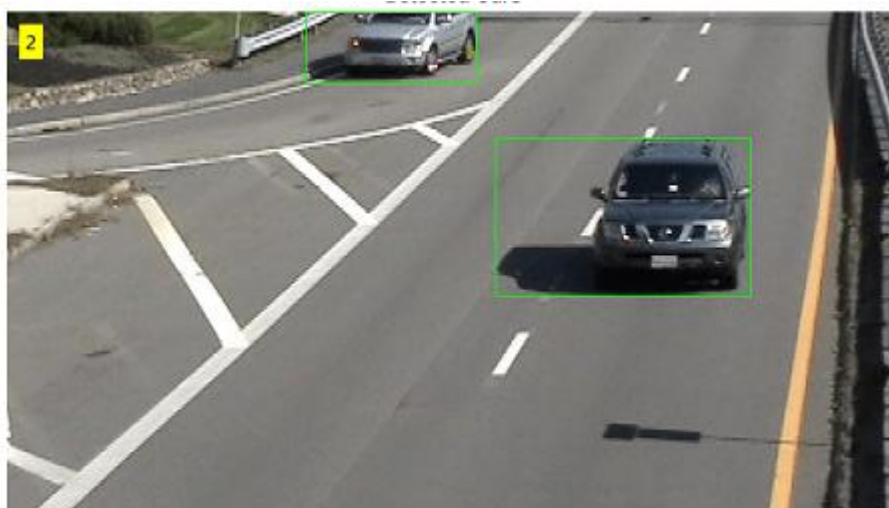
Процесс сегментации фона и переднего плана не идеален и часто включает нежелательные шумы (рис. 2). Для устранения шума и заполнения пробелов в обнаруженных объектах предлагается использовать морфологические операции.



Рис. 2 Выделенные объекты

Шаг 4 – Построение ограничительных рамок для объектов.

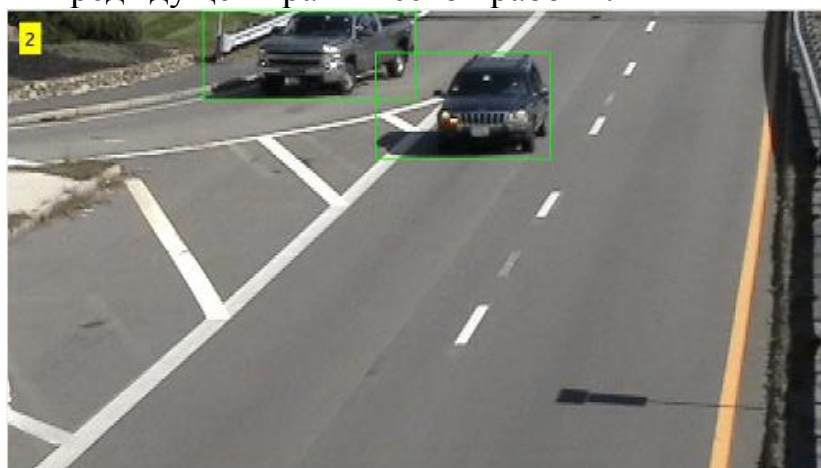
Программа должна находить ограничительные рамки для каждого обнаруженного движущегося объекта, отбрасывая большие двоичные объекты, которые содержат менее 150 пикселей. На рисунке внизу показаны результаты выполнения этой части программы.



Шаг 5 - Обработка остальных видеок кадров

На последнем этапе программа должна обнаруживать связанные компоненты с указанной минимальной площадью и отображая их ограничивающими рамками, и определяя количество автомобилей, найденных в видеокadre. На рисунке внизу показан один из обработанных кадров.

Шаг 5. Сравнить результаты обнаружения объектов, полученные при выполнении этой и предыдущей практической работы.



При написании программы рекомендуется использовать следующие операторы пакета матлаб:

`opticalFlowLKDoG`, `opticalFlowFarneback`, `readFrame`, `estimateFlow`, `VideoReader`, `insertShape`, `strel`, `imopen`, `insertShape`.

3 РЕГИСТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1 Постановка задачи

Под регистрацией изображений (сопоставлением, наложением) понимается процесс трансформации различных наборов данных в одну координатную систему. Данными могут быть серия фотографий, данные из разных сенсоров, моментов времени, глубины, или точек наблюдения. Алгоритмы регистрации

изображений используются в компьютерном видении, методах медицинской визуализации, в военном деле для автоматического распознавания целей, и для упорядочивания и анализа изображений спутниковых данных. Регистрация необходима для того, чтобы иметь возможность сравнивать или интегрировать полученные из этих различных устройств регистрации данных. Одна часть изображений представляет собой опорное изображение или эталон, а другие соответствующие изображения называются целевыми, или теми, подлежащих сканированию, поиска объектов. Регистрация изображения достигается путем сопоставления целевых изображений, так чтобы они совпадали с эталонным изображением.

3.2 Алгоритмы регистрации изображений

В методах, которые работают с интенсивностью изображений, сравнивают образцы интенсивности изображения на основе корреляции показателей, а в методах, основанных на выделении признаков, ищут соответствия между элементами изображения, такими как точки, линии и контуры. Методы на основе анализа интенсивности, сопоставляют целые изображения или части изображений. Если сопоставляются части изображений, центры соответствующих частей изображения рассматриваются как соответствующие характерные точки. Методы на основе выделения признаков главным образом устанавливают соответствие между группой различных точек изображения. Найдя соответствие между этими группами точек на изображении (образами), для изображения конечного изображения выполняется геометрическая трансформация целевого изображением, перед сопоставлением с эталонным изображением, которая показывает соответствие между этими изображениями точка за точкой.

Методы регистрации изображений делают пригонку разных изображений одной и той же сцены. Изображения могли быть получены примерно в одно и то же время, но разными регистрирующими устройствами, например, сканированием магнитно-резонансным методом и одновременно позитронно-эмиссионной томографией. Или, возможно, изображения были сняты одним и тем же устройством, но в разные моменты времени. Например, фотоснимки со спутника, сфотографированные через несколько дней, месяцев или лет. В любом случае, комбинирование изображений, количественный анализ и сравнение требует компенсации геометрических aberrаций, происходящих от разных углов наклона фотокамеры, разницы расстояния и особенностей ориентации объектов съемки, а также из-за различия разрешения регистрирующих устройств, перемещения объектов и влияния других факторов.

Алгоритмы сопоставления изображений можно классифицировать в соответствии с моделями трансформации, которые они используют для соотношения пространства целевого изображения в пространство эталонного изображения. Первая широкая категория моделей трансформации включает в себя линейные отображения такие как: вращение, масштабирование, перемещение и другие аффинные преобразования. Линейные отображения носят глобальный характер, таким образом, их нельзя применять для моделирования

местных геометрических различий между изображениями. Вторая категория преобразований позволяет осуществлять эластичные или нежесткие преобразования. Такие трансформации позволяют осуществлять локальные деформации целевого изображения для согласования с эталонным. Нежесткие преобразования включают в свой набор радиальные базисные функции или сплайны поверхностей.

Пространственные методы имеют дело с пространством изображения сравнивая образцы интенсивности или элементы изображения. Некоторые алгоритмы выделения признаков происходят от традиционных техник для выполнения ручного сопоставления изображений, в которых оператор вручную выделяет соответствующие контрольные точки в изображениях. Когда количество точек превышает минимум, который необходим для определения правильной модели трансформации, могут применяться итеративные алгоритмы, такие как RANSAC, чтобы быстро оценить параметры конкретного типа преобразования (например, аффинного) для сопоставления изображений.

Методы, работающие в частотной области, определяют параметры трансформации для сопоставления изображений при работе в области преобразования. Такие методы применяются для простых преобразований, таких как перемещение, вращение и масштабирование. Применяя метод фазовой корреляции в пары изображений, получают третье изображение, которое содержит единичный пик (точку). Координаты этого пика, соответствуют относительному сдвигу между изображениями. В отличие от пространственных алгоритмов, метод фазовой корреляции устойчив к наличию шума, осцилляций, и других препятствий, которые являются типичными для медицинских или спутниковых изображений. Кроме того, метод фазовой корреляции использует быстрое преобразование Фурье для подсчета кросс-корреляции между двумя изображениями, как правило, происходит с высокой производительностью. Метод можно усовершенствовать для расчета разницы при вращении и масштабировании между двумя изображениями переведя их перед тем в лог-полярных координат. Благодаря свойствам преобразования Фурье, вращение и масштабирование может определяться способом инвариантный к перемещению.

В пакете `matlab` поддерживается метод регистрации изображений на основе контрольных точек, иногда называемых точками привязки. Контрольные точки образуют подмножество пикселей, координаты которых на обоих изображениях известны или могут быть выбраны интерактивно. На рис. 1 проиллюстрирована идея контрольных точек на тестовом изображении и на измененном тестовом изображении, подвергнутом проективному искажению. Если выбрано достаточное количество контрольных точек, функция `cp2tform` подбирает подходящее преобразование предписанного типа по этим контрольным точкам (при этом используется метод наименьших квадратов). Типы пространственных преобразований, которые распознаются функцией `cp2tform`, перечислены в табл. 1.

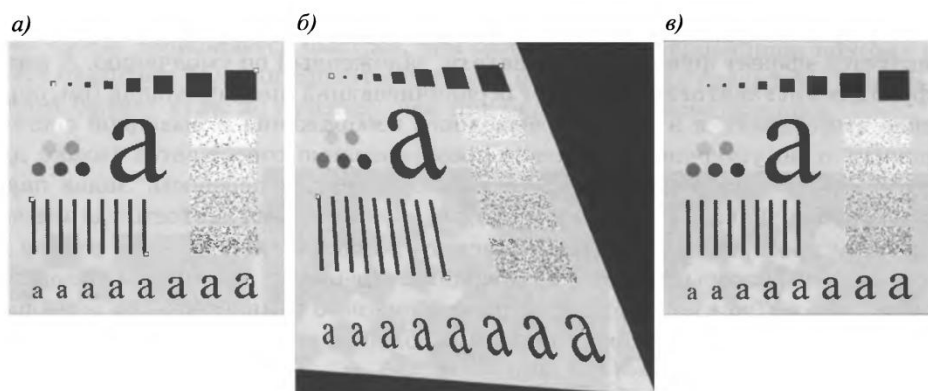


Рис. 1. Регистрация изображений с помощью контрольных точек:
а) исходное изображение с контрольными точками (маленькие квадратики, наложенные на изображение); б) геометрически искаженное изображение с контрольными точками, в) скорректированное изображение с помощью проективного преобразования, построенного по контрольным точкам

Таблица 1. Типы преобразований, которые поддерживают функции `cp2tform` и `maketform`

Тип преобразования	Описание	Функции
Affine	Композиция растяжения/сжатия, поворота, сдвига и переноса. Прямые линии остаются прямыми, параллельные линии остаются параллельными.	<code>maketform</code> <code>cp2tform</code>
Box	Независимое растяжение/сжатие и перенос по любой размерности; подмножество аффинных преобразований.	<code>maketform</code>
Composite	Семейство пространственных преобразований, которые применяются последовательно.	<code>maketform</code>
Custom	Пространственное преобразование, заданное пользователем, который определяет функции для вычисления T и T^{-1} .	<code>maketform</code>
Linear conformal	Растяжение/сжатие (одинаковое по обеим размерностям), поворот и перенос; подмножество аффинных преобразований.	<code>cp2tform</code>
LWM	Локальное взвешенное среднее; локально варьируемое пространственное преобразование.	<code>cp2tform</code>
Piecewise linear	Локально варьируемое пространственное преобразование.	<code>cp2tform</code>
Polynomial	Входные пространственные координаты выражаются в виде полиномиальных функций входных координат.	<code>cp2tform</code>
Projective	Как и при аффинных преобразованиях, прямые линии остаются прямыми, однако параллельные переходят в непараллельные с удаленной точкой пересечения.	<code>maketform</code> <code>cp2tform</code>

3.3 Задание и исходные данные

Задание 1. На рис. 2 показано исходное (эталонное - `westconcordorthophoto.png`) изображение, а на рис. 3 это же изображение, но полученное при другом наклоне камер (`westconcordaerial`). Требуется, используя метод контрольных точек, подогнать, используя операторы пакета `matlab`, эти изображения.

Задание 2. На рис.4 показано исходное (эталонное - `cameraman.tif`) изображение. Требуется преобразовать это изображение к виду похожему показан-

ному на рис.4 полученному при другом наклоне камеры. Требуется, используя метод контрольных точек, подогнать эти изображения.



Рис. 2

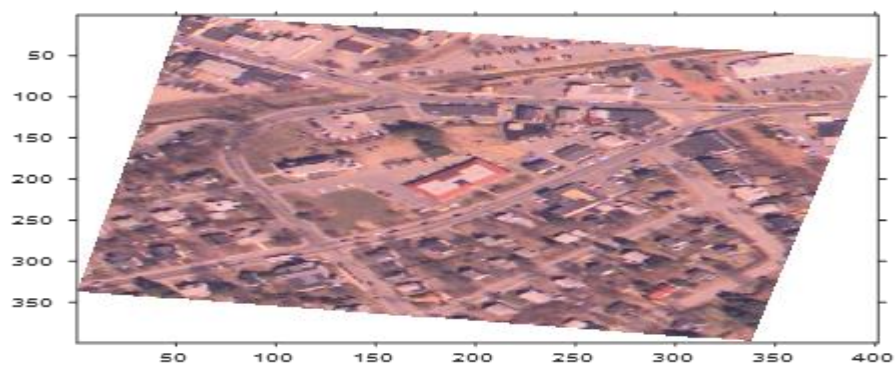
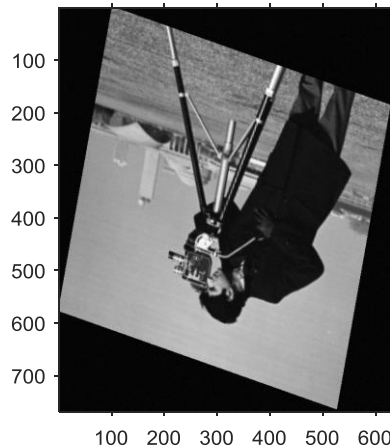


Рис. 3



Рис. 4



4 ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ МОНОКУЛЯРНОЙ КАМЕРЫ (КАЛИБРОВКА КАМЕРЫ)

Цель работы: Оценить параметры модели (провести калибровку) камер лабораторного стенда с помощью алгоритмов калибровки инструмента Computer Vision Toolbox среды MATLAB.

Задание на работу

1. Ознакомиться с характеристиками и параметрами камер лабораторного стенда. Подключиться к камерам лабораторного стенда (DMK 23U445) с помощью инструмента Image Acquisition Toolbox среды MATLAB. Получить изображения и видео данные с камер.

```
clc;
clear;
close all;

vid1=videoinput('winvideo',1);
%vid2=videoinput('winvideo',2);
preview(vid1);
% preview(vid2);
N = 10;
IM_cell = cell(1,N);
for q = 1:N
    dsfsd =1;
    f1 = getsnapshot(vid1);
    % imshow(f1);
    imwrite(f1,['L',num2str(q),'.bmp']);
    IM_cell{1,q} = f1;
end
```

```

IM_cell = cell(1,N);
for q = 1:N
    im1 = imread(['L',num2str(q),'.bmp']);
    IM_cell{1,q} = im1;
end

```

```

delete(vid1);
delete(vid2);

```

2. Изучить требования к калибровочной доске.

3. Написать программу (скрипт) калибровки монокулярной камеры в среде MATLAB. Провести калибровку камеры лабораторного стенда так чтобы средняя ошибка перепроецирования (Mean Reprojection Error) была меньше 0,5 пикселя. Вывести в отчёт внутренние параметры модели камеры:

K – матрица камер внутренних параметров камеры;

c_x, c_y – координаты главной точки относительно начала координат камеры;

f_x, f_y – фокусное расстояние в размерах пикселя матрицы камеры, могут быть различными, если пиксели не квадратные;

s – коэффициент перекоса между осями x и y , параметры;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной дисторсии;

p_1, p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии.

4. Вывести контурные графики радиальной и тангенциальной дисторсии.

Пример на рис. 1.

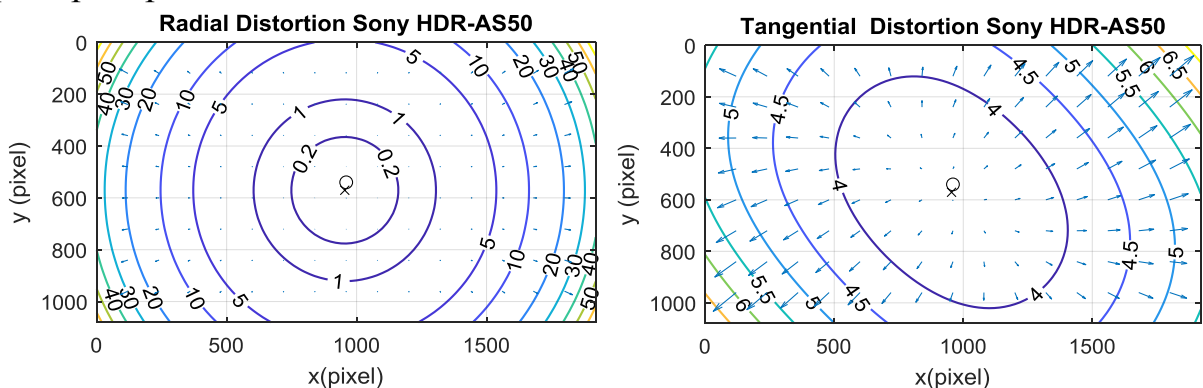


Рис. 1. Примеры контурных графиков

Исправить дисторсию на изображениях, получаемых с камер лабораторного стенда.

Для работы рекомендуется использовать среду MATLAB не ниже R2018a и инструменты Image Acquisition Toolbox и Computer Vision Toolbox.

Рекомендованные функции из пакета Computer Vision Toolbox для калибровки:

```

detectCheckerboardPoints();

```

```

generateCheckerboardPoints();
estimateCameraParameters();
showExtrinsics();
showReprojectionErrors()

```

Рекомендованные функции из пакета Computer Vision Toolbox для заданий 4:

```

contour();
gradient();
quiver();
plot3();
undistortImage()

```

Краткие теоретические сведения

Калибровка камеры

Реальные камеры не являются идеальной оптической системой и не полностью соответствуют модели камеры и почти всегда приносят в изображения искажения (дисторсию), которые вызваны *абберацией оптической системы* – отклонение луча света от того направления, по которому луч должен был бы идти в идеальной оптической системе.

Дисторсия (от лат. *distorsio* – искривление) – вызванное абберацией оптической системы геометрические искажения на изображениях камеры. Коэффициент дисторсии линейно изменяется по мере удаления пикселей изображения от главной точки изображения (через главную точку изображения проходит оптическая ось камеры).

На рисунке 2 показаны исходные изображения с одной из камер стереокамеры СТЗ в воздушной и водной средах.

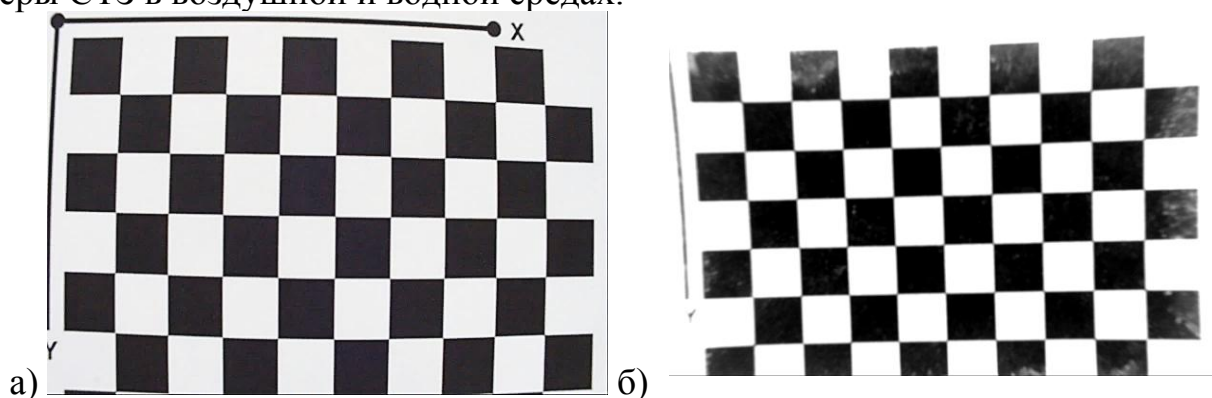


Рис. 2. Искажения, вызванные дисторсией:
а) в воздушной среде; б) под водой среде

Можно заметить, что при погружении стереокамеры в водную среду из воздушной дисторсия на изображениях меняет свою вид. На изображении в воздушной среде присутствует *положительная* («подушкообразная») дистор-

сия, а на изображении в водной среде – *отрицательная* («бочкообразная») дисторсия.

Дисторсия исправляется (уменьшается) при создании оптической системы с помощью подбора линз и других элементов или (и) с помощью цифровой обработки изображения на компьютере.

Такие искажения можно исправить дополнением к модели стереокамеры коррекции дисторсии:

$$\begin{aligned}\bar{x}_u &= x_u(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1x_u x_v + p_2(r^2 + 2x_u^2) \\ \bar{x}_v &= x_v(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2x_v^2) + 2p_2x_u x_v\end{aligned}$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной дисторсии, p_1, p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии, x_u, x_v – истинные координаты пикселя относительно (c_x, c_y) ; $\bar{x}_u, \bar{x}_v$ – искаженные координаты пикселя относительно (c_x, c_y) ; (c_x, c_y) – центр изображения (главная точка изображения).

На рисунке 3 приведены изображение до и после исправления дисторсии с одной из камер стереокамеры СТЗ в подводной среде.

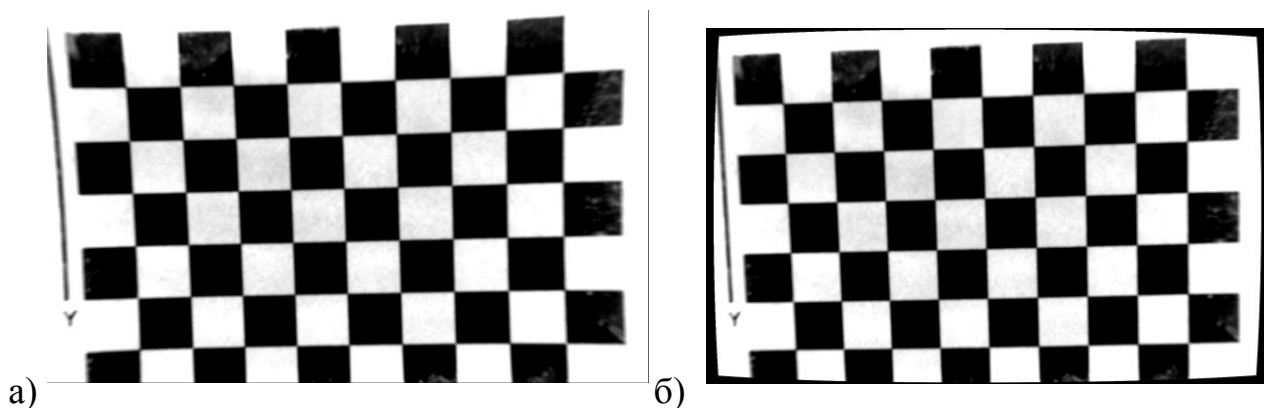


Рис. 3. Искажения, вызванные дисторсией в подводной среде:
а) до их удаления (исходное изображение); б) после их удаления

Характеристики и параметры калибровочной доски (КД)

Почему шахматная доска так широко используется в калибровке?

Клетки шахматной доски легко различимы на изображении и их легко обнаружить. Более того, углы клеток шахматной доски идеально подходят для их локализации, поскольку имеют резкие градиенты в двух направлениях. Кроме того, углы находятся на пересечении линий шахматной доски. Все эти факторы определяют надёжность поиска углов клеток, расположенных в шахматном порядке.

На доску наносится чёрно-белый рисунок в виде чередования светлых и темных квадратов (рис. 4).

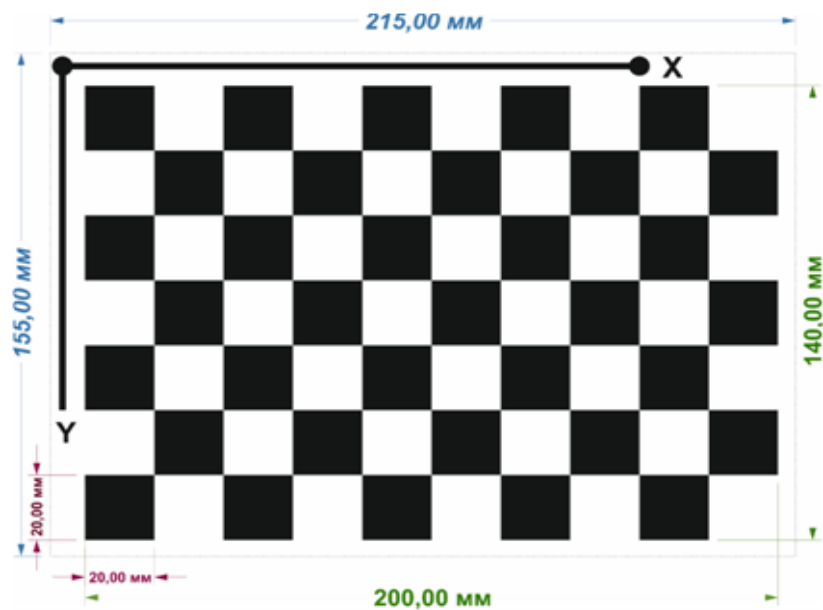


Рис. 4. Пример калибровочной доски

Границы соседних квадратов не имеют общей границы. На рисунке 3 показаны квадраты с их границами. Границы имеют толщину в один пиксель. Зелёным цветом обозначены границы светлых квадратов, черным – темных.

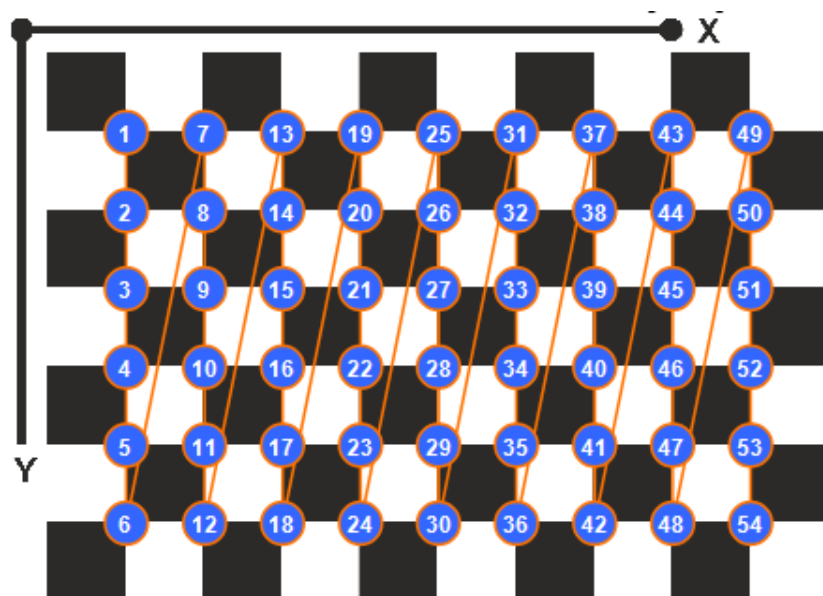


Рис. 5. Нумерация угловых точек на калибровочной доске

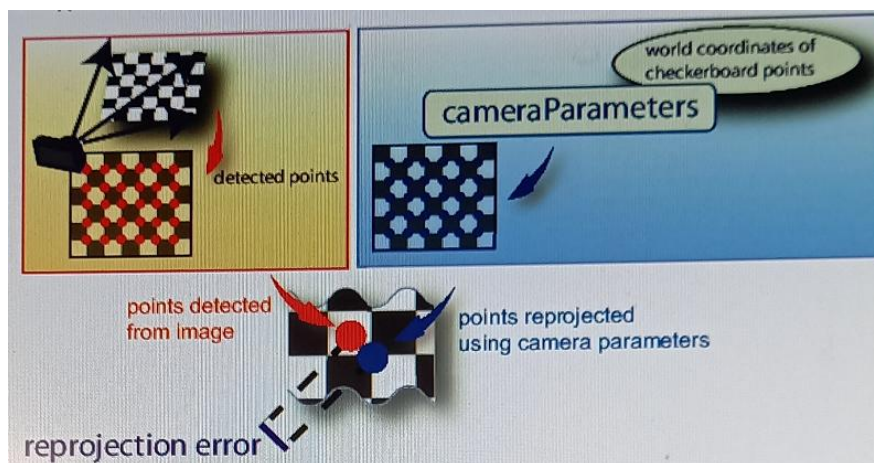


Рис. 6. Ошибка перепроецирования

Для корректной работы процедуры калибровки необходимо получить с калибруемой камеры несколько (от 10 до 60) снимков КД, на различных расстояниях от камер в пределах рабочего пространства и под разными углами до 45° . Ключевые точки КД расположены в местах стыковки четырёх светло-темных квадратов. Положение точек на КД известно. Расстояние между точками задаётся в метрических единицах. Это означает, что могут быть заданы координаты в системе, связанной с КД. Ключевые точки КД обнаруживаются алгоритмами калибровки автоматически.

Для оценки параметров используется проективная модель камеры. Процедура оценивания параметров включает несколько этапов:

а) находятся оценки параметров по линейному приближению; уточнения параметров с помощью алгоритма Левенберга - Марквардта, а полученные в предыдущем этапе оценки используются в качестве начального приближения.

Рекомендации к проведению процедуры калибровки:

в процессе снятия снимков для калибровки можно перемещать как саму КД (камера не подвижна), так и саму камеру (КД неподвижна), или сочетать оба подхода одновременно;

необходимо, чтоб все углы стыковки четырёх квадратов не выходили за область изображения (или рабочую область, в случае со стереокамерой);

желательно не приближать КД близко к камерам так как это может во время работы алгоритма калибровки вызвать при оценки параметров камеры большие нелинейные искажения между соседними точками КД, что приведёт к высоким ошибкам перепроецирования.

КД желательно перемещать по всему изображению камеры;

необходимо добавить: снимки с поворотами КД под разными углами до 45° градусов, и снимки КД на различных расстояниях от камеры; количество снимков от 10 до 50.

DMK 23U445 Specification

GENERAL BEHAVIOR

Video formats @ frame rate	1,280 x 960 (1.2 MP), Y800 @ 30, 20, 15, 7.5, 3.75 FPS 1,280 x 960 (1.2 MP), Y16 @ 30, 20, 20, 15, 7.5, 3.75 FPS
Sensitivity	0.015 lx
Dynamic range	8 bit

INTERFACE (OPTICAL)

IR cut filter	no
Sensor specification	Sony ICX445ALA
Shutter	Global
Format	1/3 "
Resolution	H: 1,280 pixel, V: 960 pixel
Pixel size	H: 3.75 µm, V: 3.75 µm
Lens mount	C/CS

INTERFACE (ELECTRICAL)

Supply voltage	11 VDC to 13 VDC or PoE: 48 VDC to 56 VDC
Current consumption	approx 400 mA at 12 VDC

INTERFACE (MECHANICAL)

Dimensions	H: 29 mm, W: 29 mm, L: 43 mm
Mass	65 g

ADJUSTMENTS (MANUAL)

Shutter	1/10,000 s to 1/4 s
Gain	0 dB to 36 dB

ADJUSTMENTS (AUTOMATIC)

Shutter	1/10,000 s to 1/4 s
Gain	0 dB to 36 dB

ENVIRONMENTAL

Temperature (operation)	-5 °C to 45 °C
Temperature (storage)	-20 °C to 60 °C
Humidity (operation)	20 % to 80 % non-condensing
Humidity (storage)	20 % to 95 % non-condensing

Subject to change

5 ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МОНОКУЛЯРНОЙ КАМЕРЫ

Цель работы: Оценить геометрические параметры заданных объектов с помощью монокулярной камеры.

5.1 Задание на работу

На лабораторном столе стенда подготовить сцену, изображение которой показано на рисунке 1. Сцена должна включать шахматную доску и две монеты.

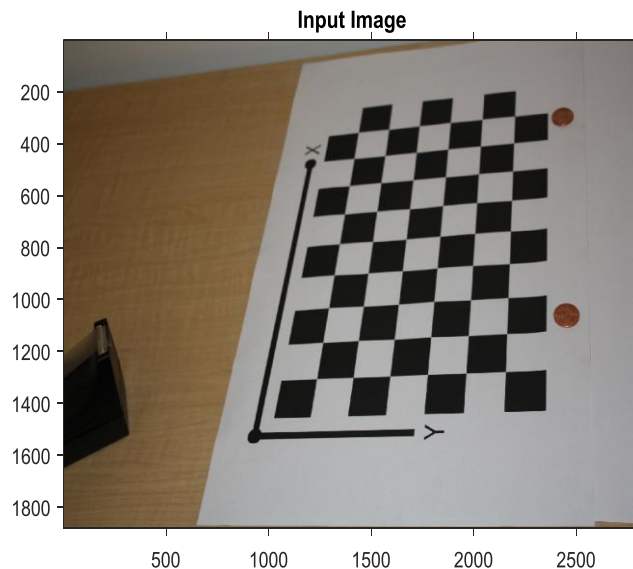


Рис. 1. Изображение сцены

Требуется измерить диаметры монет, расстояния от центра изображения до каждого из центров монет.

5.2 Порядок выполнения

1. Подключиться к камерам лабораторного стенда (DMK 23U445) с помощью инструмента Image Acquisition Toolbox среды MATLAB. Получить изображения и видео данные с одной из камер

```
vid1=videoinput('winvideo',1);  
preview(vid1);
```

2. Провести калибровку камеры лабораторного стенда так чтобы средняя ошибка перепроецирования (Mean Reprojection Error) была меньше 0,5 пикселя.

3. На лабораторном столе стенда подготовить сцену, изображение которой показано на рисунке 1. Сцена должна включать шахматную доску и две монеты.

4. Сегментировать на изображении монеты и найти их диаметры, расстояния до центра изображения и между монетами.

5. Сравнить полученные результаты с использованием некалиброванной камеры.

6 ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ СТЕРЕОКАМЕРЫ (КАЛИБРОВКА КАМЕРЫ)

Цель работы: Оценить параметры модели (провести калибровку) камер лабораторного стенда с помощью алгоритмов калибровки инструмента Computer Vision Toolbox среды MATLAB. Используя параметры модель камеры, решить некоторые практические задачи.

Задание на работу

1. Ознакомиться с характеристиками и параметрами камер лабораторного стенда. Подключиться к камерам лабораторного стенда (DMK 23U445) с помощью инструмента Image Acquisition Toolbox среды MATLAB. Получить изображения и видео данные с камер.

```
vid1=videoinput('winvideo',1);  
vid2=videoinput('winvideo',2);  
preview(vid1);  
preview(vid2);
```

2. Изучить требования к калибровочной доске. Распечатать калибровочную доску, размеры доски (количество квадратов по горизонтали и вертикали) и размер квадрата выбирается студентами самостоятельно.

3. Написать программу (скрипт) калибровки монокамеры в среде MATLAB. Провести калибровку камеры лабораторного стенда так что бы средняя ошибка перепроецирования (Mean Reprojection Error) была меньше 0,5 пикселя. Вывести в отчёт внутренние параметры модели камеры:

K – матрица камер внутренних параметров камеры;

c_x, c_y – координаты главной точки относительно начала координат камеры;

f_x, f_y – фокусное расстояние в размерах пикселя матрицы камеры, могут быть различными, если пиксели не квадратные;

s – коэффициент перекося между осями x и y , параметры;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной дисторсии;

p_1, p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии.

Используя параметры калибровки стереокамеры, рассчитать полученное в результате калибровки оценку фокусного расстояния в метрических единицах измерения и сравнить расчёты с характеристиками объектива в документации на объектив.

Рассчитать углы обзора по вертикали и горизонтали, используя характеристики в документации на объектив и матрицу камеры.

4. Написать программу (скрипт) калибровки стереокамеры в среде MATLAB. Установить стереобазу камеры в соответствии с вариантом задания в таблице 1. Провести калибровку стереокамеры лабораторного стенда так, чтобы средняя ошибка перепроецирования (Mean Reprojection Error) была меньше 0,5 пикселя. Вывести в отчёт внешние параметры модели стереокамеры камеры:

R – матрица поворота правой камеры относительно левой соответственно

T – вектор смещения правой камеры относительно левой соответственно.

Рекомендация. Используйте приложение и функции Stereo Camera Calibrator для оценки параметров, относительного положения и ориентации обеих камер в паре стереокамер. Затем вы можете использовать камеру для восстановления глубины изображений. Программа также вычисляет положение и ориентацию второй камеры относительно первой камеры.

5. Вывести контурные графики радиальной и тангенциальной дисторсии. Пример на рис. 1.

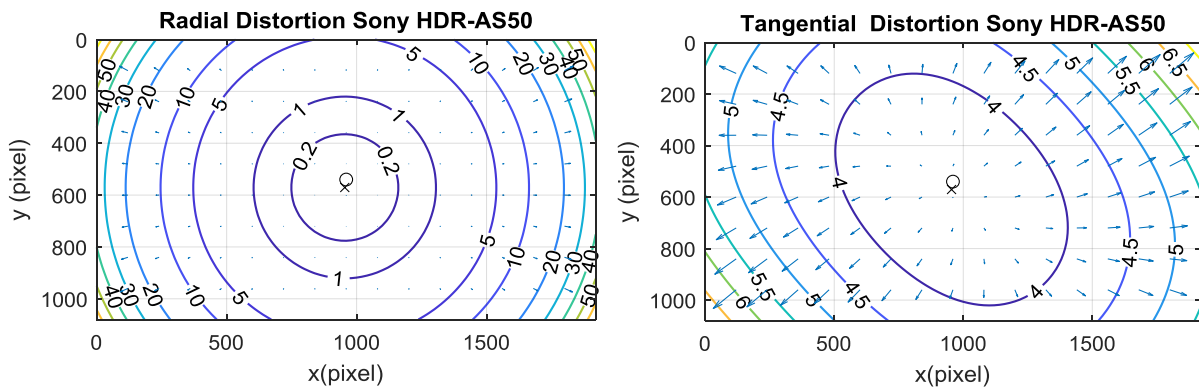


Рис. 1. Примеры контурных графиков

Исправить дисторсию на изображениях, получаемых с камер лабораторного стенда.

6. Используя параметры калибровки стереокамеры создать проекции облака 3D точек на изображения со стереокамеры.

Код программы для получения облака точек:

```
load('xyzPoints');
xyz = xyzPoints;
scale = 50; % Коэф-т увеличения объекта
to = [0 0 400]';
ang_o = [0, 0, 0];
Rox = rotx(ang_o(1));
Roy = roty(ang_o(2));
Roz = rotz(ang_o(3));
Ro = Rox*Roy*Roz;
for q = 1:size(xyz,1)
    xyz(q,:) = (Ro*(scale* xyz(q,:))) + to;
end
ptCloud = pointCloud(xyz);
pcshow(ptCloud);
xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z');
```

Для работы рекомендуется использовать среду MATLAB не ниже R2018a и инструменты Image Acquisition Toolbox и Computer Vision Toolbox.

Рекомендованные функции из пакета Computer Vision Toolbox для калибровки:

```
detectCheckerboardPoints();
generateCheckerboardPoints();
```

```

estimateCameraParameters();
showExtrinsics();
showReprojectionErrors()

```

Рекомендованные функции из пакета Computer Vision Toolbox для заданий 5:

```

contour();
gradient();
quiver();
plot3();
undistortImage()

```

Варианты задания

Таблица 1 – Вариант задания

№	Стереобаза
1.	8
2.	9
3.	10
4.	11
5.	12
6.	13
7.	14
8.	15

Краткие теоретические сведения

1 Проективная модель камеры. Калибровка камеры

На рисунке 2 показана геометрия, используемая при построении проективной модели камеры. Здесь C – центр изображения (фокус), p – главная (принципиальная) точка изображения, f – фокусное расстояние, $Z = f$ – плоскость изображения, перпендикулярная главной оптической оси, X_w – точка в 3D пространстве, $CZXY$, pxy – системы координат камеры и изображения, соответственно.

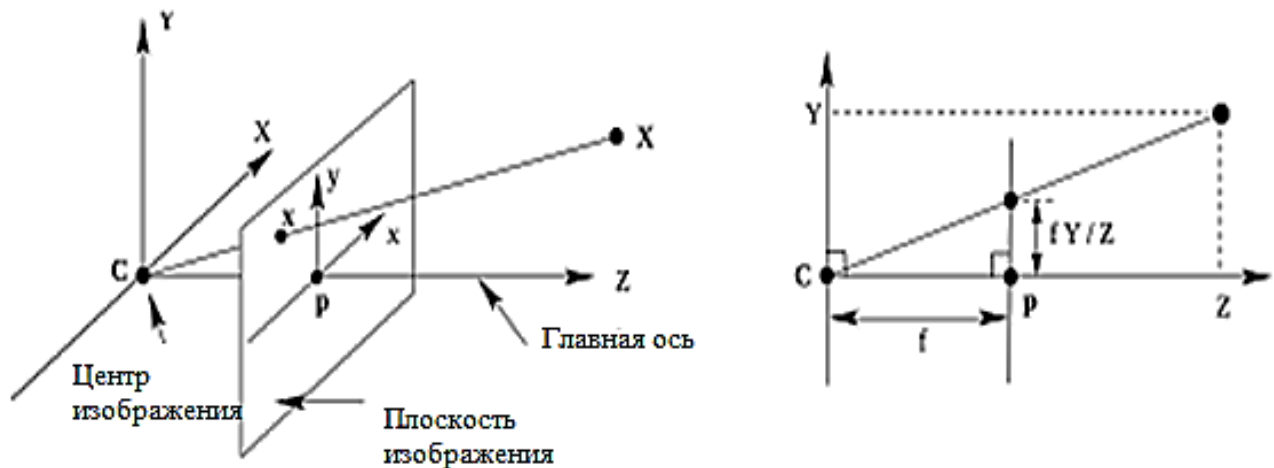


Рис. 2. Геометрия проективной модели камеры

С учётом рисунка 2, точка $\mathbf{X}_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$, заданная в абсолютной системе координат, в $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ – в системе координат камеры, отображается в точку $\mathbf{x} = (x, y)^T$ изображения, заданную в однородной системе координат $(x', y', \omega')^T$ с помощью выражения

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' / \omega' \\ y' / \omega' \\ \omega' / \omega' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \omega' \end{pmatrix}.$$

Для проекции точки на плоскость изображения в проективной модели камеры применяется уравнение, которые связывают трёхмерную точку $\mathbf{X}_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ в мировых координатах с её проекцией в координатах изображения $\mathbf{x} = (x, y)^T$:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \omega \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{P}$ — матрица проекции размером 3×4 , состоящая из двух частей: внутренней матрицы $\mathbf{K}$, которая содержит внутренние параметры и внешнюю матрицу $[\mathbf{R} \mid \mathbf{t}]$, которая является комбинацией матрицы вращения $\mathbf{R}$ размером 3×3 и вектора преобразования $\mathbf{t}$ размером 3×1

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} * [\mathbf{R} \mid \mathbf{t}].$$

Матрица камеры (матрица внутренних параметров):

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{K}$ – матрица камер внутренних параметров камеры:

c_x, c_y – координаты главной точки (оптического центра) в плоскости изображения. Использование центра изображения обычно является достаточно хорошим приближением.

Далее мы будем использовать следующую более общую форму матрицы камеры

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

где s – коэффициент перекоса между осями x и y , параметры f_x, f_y могут быть различными, если пиксели не квадратные.

Начало абсолютной системы координат, не совпадает с началом координат камеры и может располагаться в произвольной точке пространства $\mathbf{C}_w$. Любая точка 3D пространства, заданная в координатах камеры может быть трансформирована в абсолютную систему $\mathbf{C}_w \mathbf{Z}_w \mathbf{Y}_w \mathbf{X}_w$ – координат с помощью выражения

$$\mathbf{X}_w = \mathbf{R}\mathbf{X} + \mathbf{t}, \quad (1.2)$$

где $\mathbf{R}$ — матрица, описывающая поворот системы координат камеры относительно абсолютной системы координат;

$\mathbf{t}$ — вектор смещения начала абсолютной системы координат относительно системы координат камеры.

Из приведённых соотношений следует *проективная модель камеры*

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}\mathbf{R} \begin{pmatrix} X/Z \\ Y/Z \\ 1 \end{pmatrix} + \mathbf{K}\mathbf{t}. \quad (1.3)$$

Используя однородную форму записи векторов, её можно представить в виде

$$Z \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (1.4)$$

Цель калибровки камеры

Цель процесса калибровки — найти матрицу $\mathbf{K}$, матрицу вращения $\mathbf{R}$ и вектор перемещения $\mathbf{t}$, используя набор известных трехмерных точек $\mathbf{X}_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ и соответствующие им координаты изображения $\mathbf{x} = (x, y)^T$. Когда мы получаем значения внутренних и внешних параметров, камера считается откалиброванной.

Таким образом, алгоритм калибровки камеры имеет следующие входы и выходы:

Входные данные: коллекция изображений с точками, чьи координаты 2D-изображения и 3D-мировые координаты известны.

Выходы: матрица камеры $\mathbf{K}$, матрицу вращения $\mathbf{R}$ и вектор перемещения $\mathbf{t}$.

Характеристики и параметры калибровочной доски (КД)

Почему шахматная доска так широко используется в калибровке?

Клетки шахматной доски легко различимы на изображении и их легко обнаружить. Более того, углы клеток шахматной доски идеально подходят для их локализации, поскольку имеют резкие градиенты в двух направлениях. Кроме того, углы находятся на пересечении линий шахматной доски. Все эти факторы определяют надёжность поиска углов клеток, расположенных в шахматном порядке.

На доску наносится чёрно-белый рисунок в виде чередования светлых и темных квадратов (рис. 3).

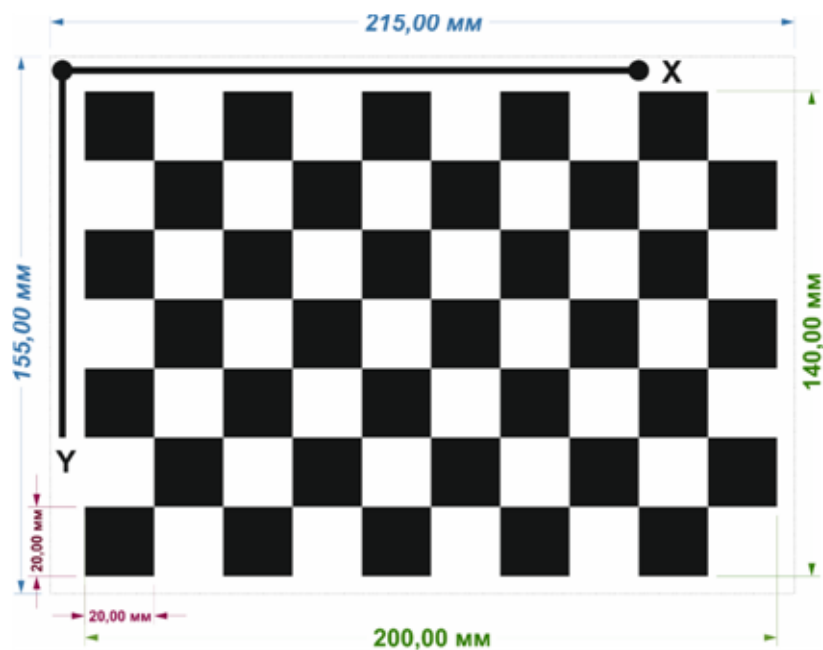


Рис. 3. Пример калибровочной доски

Границы соседних квадратов не имеют общей границы. На рисунке 4 показаны квадраты с их границами. Границы имеют толщину в один пиксель. Зелёным цветом обозначены границы светлых квадратов, черным – темных.



Рис. 4. Графическое пояснение о границах квадратов

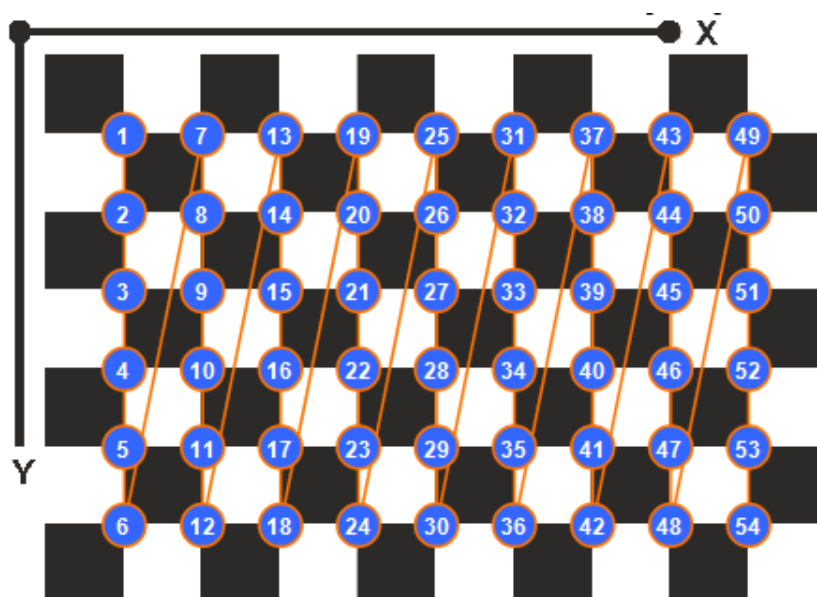


Рис. 5. Нумерация угловых точек на калибровочной доске

Для корректной работы процедуры калибровки необходимо получить с калибруемой камеры несколько (от 10 до 60) снимков КД, на различных расстояниях от камер в пределах рабочего пространства и под разными углами до 45° .

Ключевые точки КД расположены в местах стыковки четырёх светлотемных квадратов. Положение точек на КД известно. Расстояние между точками задаётся в метрических единицах. Это означает, что могут быть заданы координаты в системе, связанной с КД. Ключевые точки КД обнаруживаются алгоритмами калибровки автоматически.

Для оценки параметров используется проективная модель камеры. Процедура оценивания параметров включает несколько этапов:

б) находятся оценки параметров, используя фундаментальную матрицу, ректификацию изображений и триангуляцию;

уточнения параметров с помощью алгоритма Левенберга - Марквардта, а полученные в предыдущем этапе оценки используются в качестве начального приближения;

оцениваются параметры, описывающие радиальные и тангенциальные искажения;

используется линейный метод наименьших параметров для оценки параметров нелинейных искажений полагая, что искажения полученные на первых двух этапах без учета нелинейных искажений достаточно малы;

на последнем этапе применяется нелинейная оптимизация для уточнения всех калибровочных параметров, где в качестве начального приближения используются их значения, полученные на предыдущих этапах.

Рекомендации к проведению процедуры калибровки:

в процессе снятия снимков для калибровки можно перемещать как саму КД (камера не подвижна), так и саму камеру (КД неподвижна), или сочетать оба подхода одновременно;

необходимо, чтоб все углы стыковки четырёх квадратов не выходили за область изображения (или рабочую область, в случае со стереокамерой);

желательно не приближать КД близко к камерам так как это может во время работы алгоритма калибровки вызвать при оценки параметров камеры большие нелинейные искажения между соседними точками КД, что приведёт к высоким ошибкам перепроецирования.

КД желательно перемещать по всему изображению камеры;

необходимо добавить: снимки с поворотами КД под разными углами до 45° градусов, и снимки КД на различных расстояниях от камеры;

количество снимков от 10 до 50.

Модель стереокамеры. Проективная геометрия

Рисунок 6 иллюстрирует геометрию стереокамеры (эпиполярную геометрию), построенного на основе использования проективной модели камеры. Точка M пространства проектируется на две точки изображений m_1, m_2 . Базовая линия определяется как линия, соединяющая центры камер C_1 и C_2 . Плоскость, содержащая базовую линию и точку пространства, называется эпиполярной плоскостью. Эпиполярными линиями l_1 и l_2 называются линии пересечения эпиполярной плоскости с плоскостями изображений. Наиболее важным свойством эпиполярной линии является то, что проекции точки M на изображениях двух камер должны лежать на соответствующих им эпиполярных линиях.

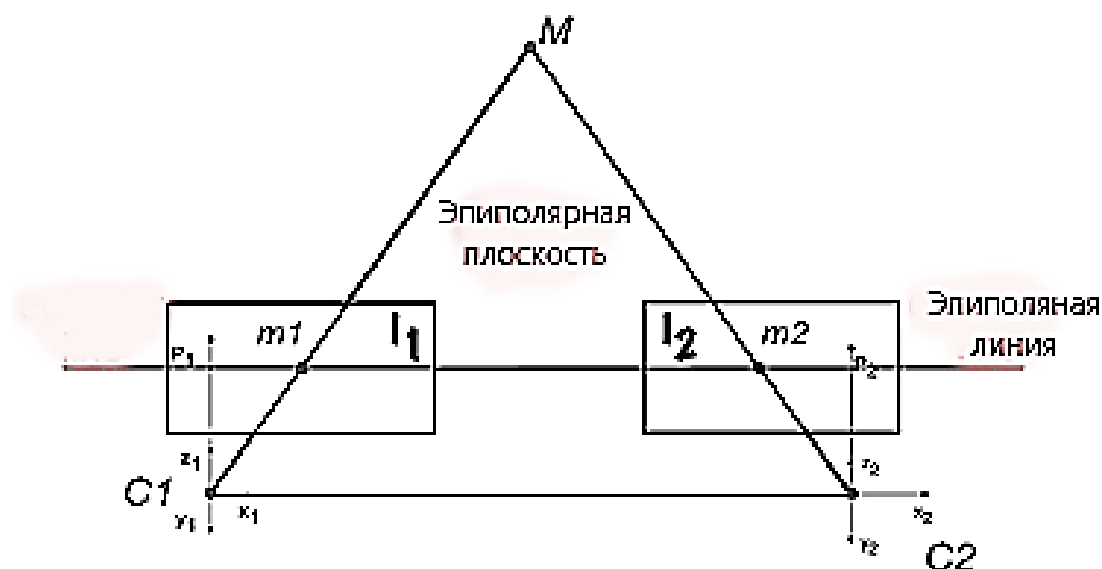


Рис. 6. Геометрия стереопары

Рисунок 6 иллюстрирует геометрию стереокамеры (эпиполярную геометрию), построенного на основе использования проективной модели камеры. Точка M пространства проектируется на две точки изображений m_1, m_2 . Базовая линия определяется как линия, соединяющая центры камер C_1 и C_2 . Плос-

кость, содержащая базовую линию и точку пространства, называется эпполярной плоскостью. Эпполярными линиями l_1 и l_2 называются линии пересечения эпполярной плоскости с плоскостями изображений. Наиболее важным свойством эпполярной линии является то, что проекции точки M на изображениях двух камер должны лежать на соответствующих им эпполярных линиях.

Из рисунка 6 следуют выражения для координат точки M в пространстве относительно левой камеры для идеальной стереопары. Первый шаг состоит в определении величины Z_w (глубины изображения)

$$Z_w = \frac{fb}{x_l - x_r}, \quad (1.5)$$

где b – расстояние между камерами (длина базовой линии),

$x_l - x_r$ – разность координат в пикселах проекций точки M на левую и правую камеры (диспарантность).

Следующий шаг состоит в определении значений X_w, Y_w с помощью выражений

$$X_w = \frac{xZ_w}{f}, \quad Y_w = \frac{yZ_w}{f}. \quad (1.6)$$

Обычно абсолютная система координат связана с левой камерой и используются проективные модели для левых и правых камер, соответственно

$$\begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z} K_1 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (1.7)$$

$$\begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z} K_2 R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + K_2 T, \quad (1.8)$$

где x_l, y_l, x_r, y_r – координаты пространственной точки на левом и правом изображениях;

K_1, K_2 – матрицы камер левой и правой камер стереокамеры соответственно;

R, T – матрица поворота и вектор смещения правой камеры относительно левой соответственно.

Реальные камеры не являются идеальной оптической системой и не полностью соответствуют модели камеры и почти всегда привносят в изображения искажения (дисторсию), которые вызваны *абберацией оптической системы* – отклонение луча света от того направления, по которому луч должен был бы идти в идеальной оптической системе.

Дисторсия (от лат. *distorsio* – искривление) – вызванное абберацией оптической системы геометрические искажения на изображениях камеры. Коэффициент дисторсии линейно изменяется по мере удаления пикселей изображения от главной точки изображения (через главную точку изображения проходит оптическая ось камеры).

На рисунке 7 показаны исходные изображения с одной из камер стереокамеры СТЗ в воздушной и водной средах.

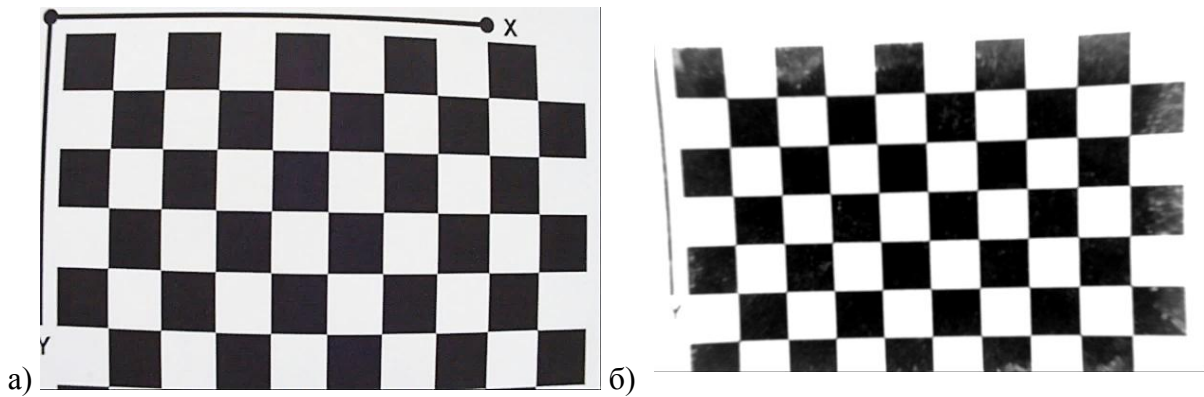


Рис. 7. Искажения, вызванные дисторсией:
а) в воздушной среде; б) подводной среде

Можно заметить, что при погружении стереокамеры в водную среду из воздушной дисторсия на изображениях меняет свою вид. На изображении в воздушной среде присутствует *положительная* («подушкообразная») дисторсия, а на изображении в водной среде – *отрицательная* («бочкообразная») дисторсия.

Дисторсия исправляется (уменьшается) при создании оптической системы с помощью подбора линз и других элементов или (и) с помощью цифровой обработки изображения на компьютере.

Такие искажения можно исправить дополнением к модели стереокамеры коррекции дисторсии:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{pmatrix} = D_1 \left(\frac{1}{Z} K_1 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \right) \\ \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{pmatrix} = D_2 \left(\frac{1}{Z} K_2 R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + K_2 T \right) \end{cases}, \quad (1.9)$$

где D_1, D_2 – коррекция дисторсии левой и правой камер стереокамеры соответственно. Коэффициенты дисторсии $D\{k_1, k_2, k_3, p_1, p_2\}$ используются для удаления искажений (дисторсии) на изображении и нахождения истинных значений координат пикселей. $(x_u, x_v) = D(\bar{x}_u, \bar{x}_v)$ – функция, принимающая искаженные координаты пикселя и возвращающая истинные координаты пикселя. Данная функция основана на системе уравнений:

$$\begin{aligned} \bar{x}_u &= x_u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x_u x_v + p_2(r^2 + 2x_u^2) \\ \bar{x}_v &= x_v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2x_v^2) + 2p_2 x_u x_v \end{aligned}, \quad (1.10)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной дисторсии,

p_1, p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии,

x_u, x_v – истинные координаты пикселя относительно (c_x, c_y) ;

$\bar{x}_u, \bar{x}_v$ – искаженные координаты пикселя относительно (c_x, c_y) ;

(c_x, c_y) – центр изображения (главная точка изображения).

На рисунке 8 приведены изображение до и после исправления дисторсии с одной из камер стереокамеры СТЗ в подводной среде.

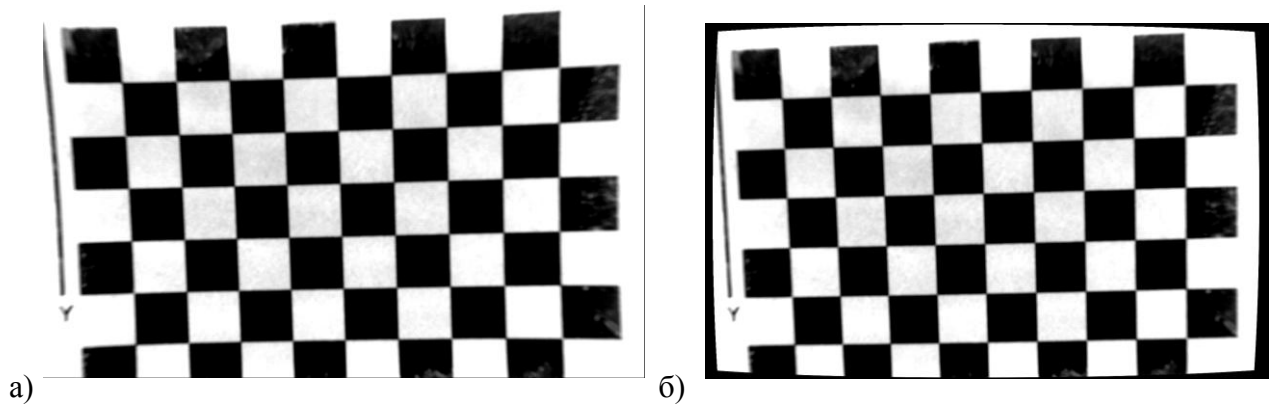


Рис. 8. Искажения, вызванные дисторсией в подводной среде:
а) до их удаления (исходное изображение); б) после их удаления

Расчёт углов обзора камеры

Горизонтальные, α_u^a и вертикальные, α_v^a углы обзора камер в воздухе определяются выражениями

$$\alpha_u^a = 2 \arctg \left(\frac{u}{2f} \right), \quad \alpha_v^a = 2 \arctg \left(\frac{v}{2f} \right),$$

где u, v – размеры сенсора по горизонтали вертикали соответственно,

f – фокусное расстояние.

DMK 23U445 Specification

GENERAL BEHAVIOR

Video formats @ frame rate	1,280 x 960 (1.2 MP), Y800 @ 30, 20, 15, 7.5, 3.75 FPS 1,280 x 960 (1.2 MP), Y16 @ 30, 20, 20, 15, 7.5, 3.75 FPS
Sensitivity	0.015 lx
Dynamic range	8 bit

INTERFACE (OPTICAL)

IR cut filter	no
Sensor specification	Sony ICX445ALA
Shutter	Global
Format	1/3 "
Resolution	H: 1,280 pixel, V: 960 pixel
Pixel size	H: 3.75 µm, V: 3.75 µm
Lens mount	C/CS

INTERFACE (ELECTRICAL)

Supply voltage	11 VDC to 13 VDC or PoE: 48 VDC to 56 VDC
Current consumption	approx 400 mA at 12 VDC

INTERFACE (MECHANICAL)

Dimensions	H: 29 mm, W: 29 mm, L: 43 mm
Mass	65 g

ADJUSTMENTS (MANUAL)

Shutter	1/10,000 s to 1/4 s
Gain	0 dB to 36 dB

ADJUSTMENTS (AUTOMATIC)

Shutter	1/10,000 s to 1/4 s
Gain	0 dB to 36 dB

ENVIRONMENTAL

Temperature (operation)	-5 °C to 45 °C
Temperature (storage)	-20 °C to 60 °C
Humidity (operation)	20 % to 80 % non-condensing
Humidity (storage)	20 % to 95 % non-condensing

Subject to change

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конспект лекций по курсу " Методы и алгоритмы обработки изображений".
2. Шефер, Е. А. Цифровая обработка изображений : учебное пособие / Е. А. Шефер. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2019. — 100 с. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/102493.html> (дата обращения: 10.04.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: <https://doi.org/10.23682/102493> — Текст : электронный.
3. Шилина, О. И. Цифровая обработка изображений: учебно-методическое пособие / О. И. Шилина, Д. А. Наумов, Е. А. Уварова. — Рязань: РГРТУ, 2021. — 265 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/310580> (дата обращения: 10.04.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — Текст: электронный.
4. Злобин, В. К. Обработка аэрокосмических изображений / В. К. Злобин, В. В. Еремеев. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 288 с. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/118066> (дата обращения: 10.04.2025). – Режим доступа: по подписке. ISBN 5-9221-0739-9, 500 экз. - Текст : электронный.

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методические указания

Составители: **Скороход** Борис Аркадьевич,
Жиляков Павел Владимирович

В авторской редакции