Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.И. ГУЖОВ

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ 3D-ПРОФИЛЯ ОБЪЕКТОВ

КОНТАКТНЫЕ, ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2015

УДК 004.92 : 535(075.8)
Г 936

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *В.Г. Нечаев*,
д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой
общей экспериментальной физики ТГУ *В.П. Демкин*

Гужов В.И.

Г 936 Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: учеб. пособие / В.И. Гужов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 82 с.

ISBN 978-5-7782-2727-9

Учебное пособие предназначено для студентов АВТФ НГТУ направлений «Биотехнические системы и технологии», «Информационные системы и технологии», «Информатика и вычислительная техника». Может быть использовано при изучении дисциплин «Компьютерная графика», «Графические системы», «Мультимедиатехнологии», «Обработка изображений». Актуальность пособия связана с изменением учебных планов и рабочих программ указанных направлений и с включением в них новых разделов, посвященных вопросам создания моделей 3D-объектов.

Работа подготовлена на кафедре систем сбора и обработки данных

УДК 004.92 : 535(075.8)

ISBN 978-5-7782-2727-9

© Гужов В.И., 2015
© Новосибирский государственный технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель учебного пособия – рассмотрение алгоритмов обработки цифровых изображений для построения трехмерной модели объекта.

3D-сканер представляет собой специальное устройство, которое анализирует физический объект, чтобы получить данные о форме предмета. Собранные данные в дальнейшем применяются для создания цифровой трехмерной модели этого объекта. В настоящее время 3D-сканеры применяются для решения различных прикладных задач, таких как контроль формы, распознавание, визуализация, анимация, и используются в различных областях промышленности, медицины, образовании, научных исследований.

В последнее время возникла проблема сохранения объектов культурного наследия в случаях утраты или повреждения. Для этого необходима высокая геометрическая точность, фотореализм результатов, возможность автоматизации, гибкость, низкая стоимость сканирования.

Выбрать наиболее подходящий метод сканирования – не всегда простая задача. Создание точной и фотореалистичной модели сложного объекта по-прежнему остается сложной задачей.

В учебном пособии приведена классификация методов сканирования, описаны контактные, триангуляционные системы и методы на основе структурированного освещения.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ

На сегодняшний день разработано достаточно много технологий для цифрового 3D-сканирования.

Многие методы основаны на опыте восприятия человеком информации об объеме.

- Геометрическая перспектива, воздушная перспектива, знание реальных размеров наблюдаемых объектов.
- Тени и блики.
- Перемещение объекта или перемещение глаза относительно объекта.
- Аккомодация хрусталика. Фокусировка изображения с помощью изменения фокусного расстояния хрусталика аккомодационными мышцами.
- Бинокулярность зрения – мозг сопоставляет изображения, которые видят правый и левый глаз.
- Тактильные ощущения.

Однако существуют и методы, основанные на новых физических принципах.

- Определение времени прохождения света до препятствия и обратно.
- Методы структурированной подсветки.
- Фазовые методы, основанные на принципах интерференции и голографии.
- Использование излучения в расширенном диапазоне длин волн (инфракрасное, рентгеновское и т. п.)

Методы измерения 3D-объектов можно также разделить на контактные (координатно-измерительные машины, механические щупы, методы, основанные на получении срезов объекта) и бесконтактные методы (стереобинокулярные системы, лазерное и рентгеновское сканирование, структурное освещение).

Контактные методы разделяются на неразрущающие (non-destructive) и разрушающие (destructive) методы анализа.

За последние годы достигнут значительный прогресс в развитии бесконтактных методов на основе оптического освещения. Бесконтактные 3D-сканеры можно поделить на две группы – активные и пассивные (рис. 1).

Пассивные способы сканирования 3D-объектов

1. Методы, основанные на анализе одного изображения. Наиболее точные результаты достигаются на основе интерактивных подходов. Информация об объеме получается в результате анализа контура, затенения, текстуры, освещенности, использования методов проектированной геометрии.

Рис. 1. Определение 3D-профиля на основе бесконтактных методов, использующих световое освещение

2. Триангуляционные методы. Восстановление объекта по набору двумерных входных изображений. Сравниваются расположение одинаковых точек на соседних кадрах. Необходимо точно знать позицию камеры и нужно большое количество близко расположенных кадров для согласования различных изображений. Наиболее распространенный способ – восстановление 3D по двум стереоизображениям. Основ-

ная сложность – определение одинаковых точек на разных изображениях.

Активные способы сканирования 3D-объектов

1. Измерение временной задержки прохождения света от различных частей объекта.

2. Методы структурированного освещения.

3. Фазовые интерференционные, муаровые и голографические методы.

Во многих случаях использование одного способа невозможно, поэтому хороший результат дает сочетание нескольких способов.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ 3D-ОБЪЕКТА ПО СРЕЗАМ (SLICING)

Особое место в развитии анатомии принадлежит Н.И. Пирогову, который придумал совершенно оригинальный метод изучения взаимного расположения органов в человеческом теле. Он предложил замораживать трупы, затем распиливать их в нужной плоскости и изучать видимую поверхность.

Современные технологии позволяют значительно усовершенствовать этот метод. Проект создания атласа человеческого тела (Visible Human Project) представляет собой попытку полной визуализации анатомии человека. В августе 1991 года контракт на создание цифровой «матрицы» получили ученые из университета Колорадо. Тело мужчины и женщины заморозили в желатине и с помощью специального устройства делали срезы (тело мужчины – через 1 мм, 1871 срез; тело женщины – через 0.33 мм, при разрешении 2048 на 1216 пикселов).

Компания Google презентовала разработку под названием Body Browser, с помощью которой возможно рассматривать тело человека через несколько «слоев», постепенно переходя от кожи к мускулам, костям и отдельным внутренним органам. Предусмотрена возможность изучать тело на разных «уровнях»: нервную и кровеносную системы, скелет, внутренние органы, мускулатуру, при этом осмотр можно осуществлять с разных углов зрения (рис. 2.1). Проект Body Browser был закрыт вместе со многими Google Labs проектами. Однако данный сервис не пропал и в настоящее время доступен под названием Zygote Body, который поддерживается компанией Zygote.

Для изучения строения внутренних органов и тканей в медицине используется магнитно-резонансная томография. Метод основан на измерении электромагнитного отклика атомных ядер, чаще всего ядер атомов водорода, а именно на возбуждении их определенной комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряженности.

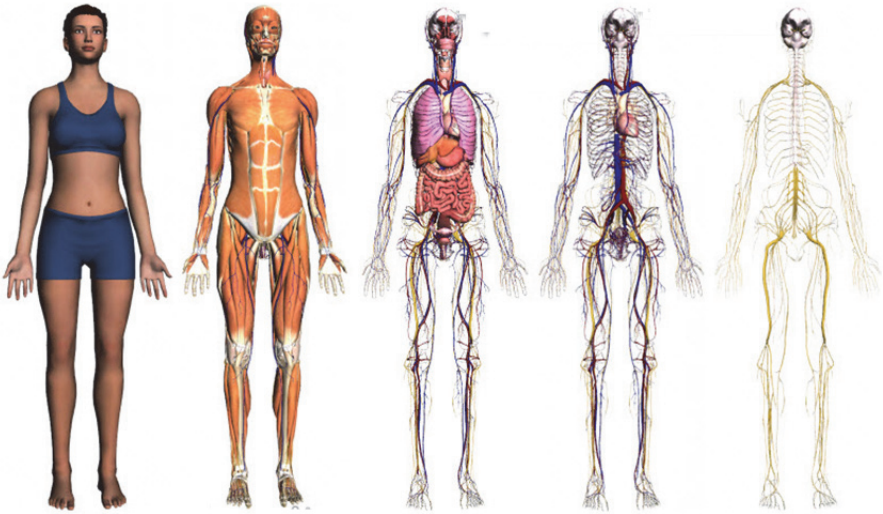


Рис. 2.1. Body Browser – интерактивный трехмерный атлас человеческого тела

МРТ томографы способны получать серию сверхтонких срезов (рис. 2.2), что дает возможность построить трехмерную модель исследуемой области. Изображения мозга, полученные методом магнитно-резонансной томографии, обычно имеют разрешение 0,5…1 мм.

Исследователи из Исследовательского центра Юлих и Монреальского неврологического института создали первую трехмерную цифровую модель мозга высокого разрешения и назвали ее BigBrain (большой мозг). Используя высокотехнологичную резку, исследователи разрезали человеческий мозг на 7404 тонких пластинок, каждая с толщину полиэтиленовой пленки (рис. 2.3).

Далее исследователи окрашивали листы для повышения контрастности, сфотографировали каждый лист планшетным сканером, а затем использовали вычислительные мощности суперкомпьютеров из семи центров Канады для цифровой склейки изображений (использовалось около 100 000 компьютерных процессоров). Исследователи проанализировали изображения объемом около одного терабайта. В результате получился самый подробный атлас мозга (рис. 2.4).

Цифровая реконструкция мозга человека позволяет разглядеть его на уровне отдельных клеток: ее разрешение составляет 20 микрон. В общей сложности в ходе кропотливой работы, на которую ученые потратили 10 лет, было зафиксировано 80 млрд нейронов.

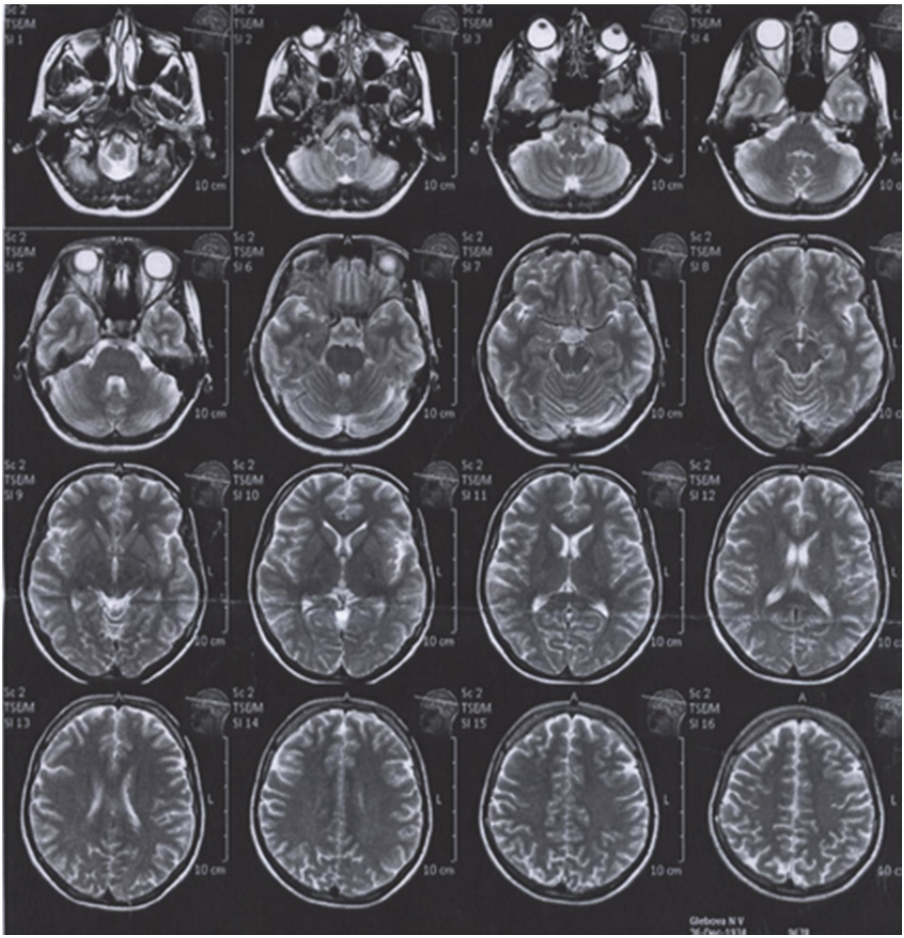


Рис. 2.2. МРТ томография головного мозга

В настоящее время делаются попытки построения модели мозга с разрешением 1 мкм. Эта модель способна будет отразить морфологию мозга на субклеточном уровне.

В США объявили о выделении 130 млн долларов для проекта по картографированию мозга человека, чтобы помочь найти лечение от таких расстройств, как, например, болезнь Альцгеймера. К крупнейшим инвесторам в сфере исследования мозга относится траст Wellcome,

Рис. 2.3. Подготовка срезов мозга к сканированию

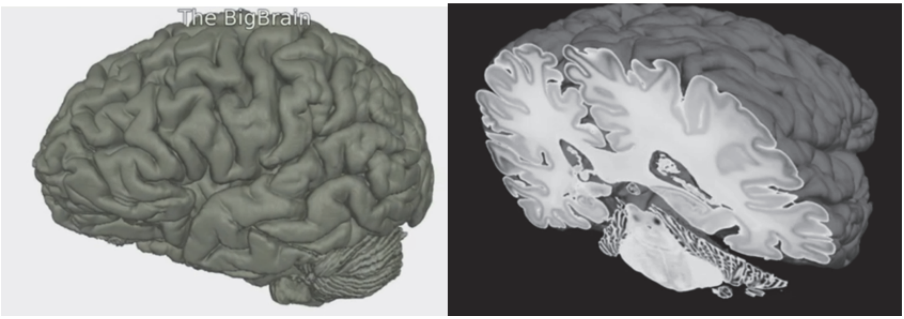


Рис. 2.4. 3-D атлас человеческого мозга (bigbrain.loris.ca)

который ежегодно вкладывает 80 млн фунтов в эту область. Европейский союз готов выделить 1 млрд фунтов на разработку модели человеческого мозга с использованием компьютерных технологий.

3. КОНТАКТНЫЕ 3D-СКАНЕРЫ

Контактные 3D-сканеры исследуют (зондируют) объект с помощью непосредственного физического контакта.

Механизм сканера бывает трех различных форм.

- Каретка с фиксированной измерительной рукой, расположенной перпендикулярно, а измерение по осям происходит, пока рука скользит вдоль каретки. Эта система оптимальна для плоских или обычных выпуклых кривых поверхностей.
- Манипулятор с фиксированными составляющими и с высокоточными угловыми датчиками. Расположение конца измерительной руки влечет за собой сложные математические вычисления, касающиеся угла вращения шарнира запястья руки, а также угла разворота каждого из соединений руки. Этот механизм идеально подходит для зондирования углублений или внутренних пространств с небольшим входным отверстием.
- Одновременное использование предыдущих двух методов. К примеру, манипулятор можно совместить с кареткой, что позволит получить 3D-данные от больших объектов, обладающих внутренними полостями или перекрывающих друг друга поверхностями.

На рис. 3.1 показана одна из схем построения координатно-измерительной машины.

Координатно-измерительная машина представляет собой пример контактного 3D-сканера. Такие устройства используются в основном в производстве и должны быть достаточно точными. Перемещение измерительной руки с установленным зондом может оказаться очень медленным. Скорость сканирования не превышает нескольких сотен герц.

Еще одним примером могут служить ручные измерительные зонды, с помощью которых оцифровывают глиняные модели для компьютерной анимации.

В большинстве случаев используются полуавтоматические системы на основе механических или оптических щупов. Это наиболее популярная технология 3D-сканирования – так называемая сколка (рис. 3.2). Такие системы представляют собой контактный щуп, который при по-

мощи нескольких потенциометров, установленных на складной арматуре с шарнирными соединениями, фиксирует информацию о том, в каком месте находится головка, и передает эту информацию в виде координат в трехмерном пространстве при нажатии соответствующей кнопки. Достаточно сделать необходимое количество замеров – и у вас готова сетка для моделирования поверхности будущей модели.

Рис. 3.1. Координатно-измерительная машина с двумя фиксированными взаимно перпендикулярными измерительными плечами

Одно из основных преимуществ таких систем – высокая степень контроля за процессом оцифровки со стороны оператора. Причем само это устройство может быть довольно сложным: в нем, например, применяются система противовесов и автоматическая компенсация изменения температуры и соответствующих расширений и сжатий металла.

При моделировании на исходный объект карандашом или маркером наносятся контрольные линии; затем оператор решает, где к сетке нужно добавить деталей, а где оставить возможность деталировки 3D-дизайнерам – все это зависит от назначения модели. Цель таких предварительных работ – убедиться, что окончательная сетка будет достаточно точной и максимально рациональной. Когда же рисование на модели невозможно, вместо нее используется макет.

Рис. 3.2. 3D-дигитайзер (Immersion MicroScribe System). Погрешность измерения 0.3 мм

После любой оцифровки все равно неизбежно потребуется довольно трудоемкая обработка, но при правильном планировании создаваемой сетки такую работу можно значительно оптимизировать еще на этапе сколки.

Недостатком контактных сканеров является необходимость непосредственного контакта с поверхностью объекта. Поэтому существует возможность изменить предмет в процессе сканирования или даже повредить его. Это весьма важно в том случае, если сканируются тонкие или ценные предметы, например исторические артефакты.

Еще один существенный недостаток перед другими методами сканирования – небольшая скорость сканирования.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАТЧИКОВ

Технология Motion Capture (mocap), или «захват движений», позволяет оцифровать движения человека и использовать их для управления трехмерной моделью персонажа. Захват движения активно используется и в компьютерных играх, и в анимации, и в кинематографе.

Студия Уолта Диснея для реалистичной анимации человеческих персонажей использовала технику, называемую ротоскопией. Аниматоры брали фрагменты кинопленки и на специальном станке перерисовывали с реальных актеров фигурки героев будущего мультфильма. Первым таким фильмом стал полнометражный мультипликационный фильм «Белоснежка и семь гномов» (1937 г.), в котором персонаж Белоснежки создавался по такой технологии.

В начале 1980-х годов Том Калверт предложил использовать потенциометры, прикрепляя их к различным суставам на человеческом теле. Компьютер измерял данные приборов и показывал на экране двигающийся скелет человека. Калверт использовал свое изобретение для наглядного изучения кинематики человеческого организма.

В это же время компьютерные установки, отслеживающие движения человека, стали использоваться в компьютерной графике. Первые комплексы Motion Capture были оптическими. Принцип их работы был следующим: на теле актера в местах сочленений и суставов крепились маленькие лампочки или же обычные светоотражающие элементы (наподобие велосипедных катафот), и движения фигуры снимались на камеру. Для получения объемного изображения актера снимали двумя камерами, под разными углами. Совмещая координаты одной и той же лампочки, полученные с двух камер, можно было достаточно точно вычислить месторасположение точки в пространстве. Такие оптические системы были весьма медленными и неточными. К тому же отснятый материал требовал дополнительной обработки и фильтрации.

С течением времени технологии Motion Capture совершенствовались, становились удобнее и точнее. Взамен светодиодам стали использовать магнитное поле (актера обклеивали маленькими металлическими детек-

торами) и даже изобрели специальные костюмы exoskeleton, позволявшие отследить даже малейшие движения мускулов.

На сегодняшний день существуют большое количество маркерных систем захвата движений. Различие между ними заключается в принципе передачи движений.

Оптические пассивные системы. На костюме, входящем в комплект такой системы, прикреплены датчики-маркеры, которые названы пассивными, потому что отражают только посланный на них свет, но сами не светятся. Маркеры, как правило, крепятся непосредственно к коже или к облегающему тело костюму. В таких системах свет на маркеры посылается с установленных на камерах высокочастотных стробоскопов и, отразившись от маркеров, попадает обратно в объектив камеры, сообщая тем самым позицию маркера. Пассивные системы оптического захвата движения используют специальные камеры, зафиксированные по периметру зоны захвата. Изображение, зафиксированное камерами с различных позиций, проходит специальную обработку для выявления позиции маркеров в изображении; посредством триангуляции рассчитывается позиция каждого маркера в трехмерном пространстве. Особенности камер заключаются в наличии инфракрасных светодиодов, установленных вокруг объектива камеры, а также инфракрасных фильтров, размещенных перед матрицей, что в совокупности позволяет работать камерам даже в темном помещении. Обычно пассивные системы захвата движения имеют в своем составе от 6 до 24 камер.

Недостатки пассивных систем: размещение маркеров занимает длительное время, система может путать маркеры при быстром движении или близком расположении их друг к другу.

Оптические активные системы названы так потому, что вместо светоотражающих маркеров, которые крепятся к костюму актера, в них используются светодиоды с интегрированными процессорами и радио-синхронизацией. Каждому светодиоду назначается ID (идентификатор), что позволяет системе не путать маркеры друг с другом, а также узнавать их, после того как они были перекрыты и снова появились в поле зрения камер. Во всем остальном принцип работы таких систем схож с пассивными системами. Активные системы по сравнению с пассивными обладают большей точностью и возможностью охвата большей рабочей зоны. Кроме того, светодиоды могут быть импульсными, что дает возможность захвата большего количества маркеров, расположенных ближе друг к другу (рис. 4.1).

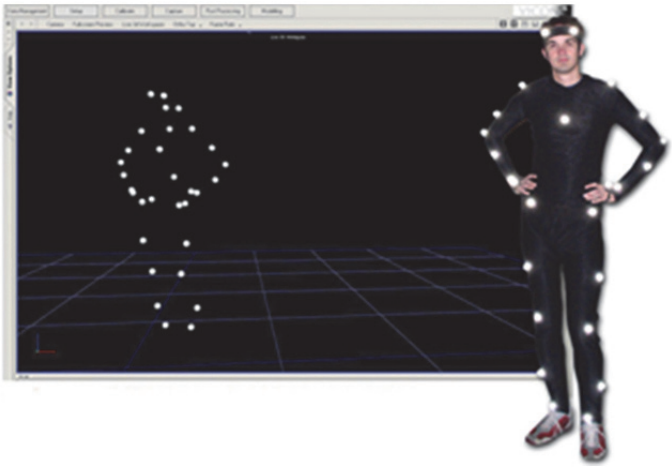


Рис. 4.1. Оптическая маркерная система захвата движений

Магнитные системы, в которых маркерами являются магниты, а камерами – ресиверы, система высчитывает их позиции по искажениям магнитного потока. Магнитные системы вычисляют положение и ориентацию датчика относительно магнитного потока при помощи трех ортогональных катушек. Величина напряжения или тока в катушках позволяет этим системам рассчитывать дальность и ориентацию датчиков. Преимуществом таких систем является использование одного датчика для получения сразу шести степеней свободы (позиция и ориентация в пространстве). Недостатками являются чувствительность к магнитным и электромагнитным помехам.

Механические системы напрямую следят за сгибами суставов, для этого на актера надевается специальный механический экзоскелет, который повторяет следом за ним все движения (рис. 4.2). В компьютер при этом передаются данные об углах сгибов всех суставов. Такие системы захвата движения при использовании беспроводной передачи данных имеют неограниченный объем захвата. Как правило, они используют жесткие структурные соединения пластмассовых или металлических стержней, соединенных с потенциометрами, что позволяет отслеживать повороты суставов тела. Достоинствами подобных систем являются надежность и простота считывания, относительная дешевизна и работа в режиме реального времени. Недостатки – ограничение динамики движений актера.

Рис .4.2. Механические системы захвата движения – экзо-скелет

Гироскопические/инерциальные системы для сбора информации о движении используют миниатюрные гироскопы и инерциальные сенсоры, расположенные на теле актера, так же как и маркеры или магниты в других mocap-системах. Данные с гироскопов и сенсоров передаются в компьютер, где происходит их обработка и запись. Система определяет не только положение сенсора, но также угол его наклона. Такие системы позволяют отслеживать шесть степеней свободы движения тела человека в режиме реального времени. Преимуществом инерционных систем является возможность охвата большой рабочей зоны для перемещений. К недостаткам можно отнести низкую точность позиционирования и позиционные сбои.

Для передачи мимики лица используются специальные системы.

При создании фильма «Беовульф» для оцифровки мимики актеров использовались сотни крохотных датчиков, с помощью которых восстанавливался профиль лица (рис. 4.3).

Для «захвата движений» лиц актеров WETA Digital разработала надеваемое на голову приспособление, представлявшее собой шлем с прикрепленной к нему миниатюрной камерой. Направленная на лицо актера, она в режиме реального времени «захватывала» мимику благодаря зеленым контрольным маркерам, расположенным на лице (рис. 4.4).

Программное обеспечение автоматически определяло, какие мускулы отвечают за то или иное выражение на лице человека, а также

Рис. 4.3. Система датчиков
на лице актера

Рис. 4.4. «Захват» мимики с помощью контрольных маркерных точек

рассчитывало степень их растяжения или, наоборот, сжатия. Затем программа автоматически подгоняла движения мускулов под нестандартную анатомию и анимировало трехмерную карту лица персонажа.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Уровень развития электроники позволяет сейчас напрямую измерить время, проходимое светом до объекта. 3D-сканеры, работающие на этом принципе, называются времяпролетными (time-of-flight).

Устройство времяпролетных сканеров бывает двух типов. Первый тип основан на лазерных дальномерах, которые определяют задержку прохождения света до объекта и обратно. Второй использует специальные видеокамеры на фотодиодных матрицах, измеряющих для каждого элемента матрицы время задержки распространения модулированной подсветки до объекта и обратно.

5.1. УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Посылается сигнал, который распространяется с характерной скоростью. Он отражается от объекта и возвращается обратно. Время прохождения определяет прошедшее расстояние. Если известна скорость распространения зондирующего импульса в среде, то умножение скорости на половину времени между моментами излучения и приема импульса даст расстояние от излучателя до объекта, который отразил сигнал.

Активные сканеры используют определенные виды излучения и сканируют объект через отражение света или прохождение излучения через объект или среду. В таких устройствах применяются свет, ультразвук или рентгеновские лучи.

Производство компактных твердотельных лазеров позволило создать системы измерения, которые в качестве зондирующего импульса использовали свет. Тот или иной механический способ ориентирования светового луча позволяет таким системам производить последовательные измерения в пространственном секторе (или сканировать его, такие устройства измерения стали называться лазерными сканерами). Любой сканер выдает набор трехмерных координат точек отражения

лазерного луча относительно точки излучения. Представление в такой локальной системе координат является вполне достаточным для измерений локальных размеров объектов вплоть до размеров здания.

Если же снабдить такой сканер достаточно точным GPS-приемником и системой измерений его угловой ориентации по трем направлениям, то его можно устанавливать на самолет как аэросъемочный сканер или на автомобиль как мобильный сканер.

Рабочей длиной волны большинства сканеров является ближний инфракрасный свет с длиной волны около 1 мкм для авиационных сканеров (меньшее рассеивание в парах атмосферы) и больше 1 мкм для стационарных сканеров (более безопасно для зрения).

Результатом работы лазерных сканеров является облако трехмерных точек.

Лазерный сканер состоит из лазерного дальномера и блока развертки лазерного луча. В качестве блока развертки могут использоваться сервопривод и полигональное зеркало или призма. Сервопривод отклоняет луч на заданную величину в горизонтальной плоскости, при этом поворачивается вся верхняя часть сканера, которая называется головкой. Развертка в вертикальной плоскости осуществляется за счет вращения или качания зеркала.

Основу работы лазерных дальномеров составляют импульсный и фазовый методы измерения расстояний, а также метод прямой угловой развертки (триангуляционный метод).

Импульсный метод измерения расстояний. Импульсный метод измерения расстояний основан на измерении времени прохождения сигнала от приемо-передающего устройства до объекта и обратно. Зная скорость распространения электромагнитных волн c, можно определить расстояние:

$$R = c\,\tau / 2, \tag{5.1}$$

где τ – время, измеряемое с момента подачи импульса на лазерный диод до момента приема отраженного сигнала (рис. 5.1).

Необходимо отметить, что характерные размеры области измерений и требуемая точность выдвигают очень жесткие требования к временной точности работы всех измерительных устройств. В связи с высокой скоростью света временная точность должна быть очень высокой – около 1 нс для пространственной точности в 15 см (при скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Для сканирования с точностью 1 мм устройство должно считать время с точностью порядка 3 пикосекунды.

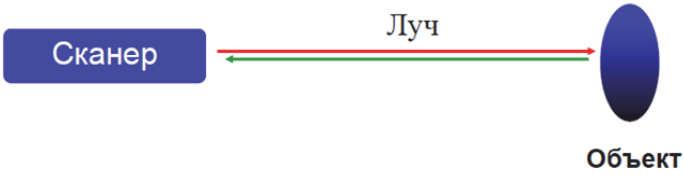


Рис. 5.1. Измерение времени отражения лазерного луча

Характерные рабочие частоты электронной схемы должны находиться в области гигагерц, поэтому оборудование, необходимое для измерения этого малого промежутка времени, должно работать чрезвычайно быстро. Это стало возможным только при использовании последних достижений в современной электронике и вычислительной технике.

Импульсный метод измерения расстояний по точности уступает фазовому методу. Это происходит потому, что фактическая точность каждого измерения зависит от ряда параметров, каждый из которых может оказать влияние на точность конкретного измерения. Таковыми параметрами являются:

- длительность и форма (в частности, крутизна переднего фронта) зондирующего импульса;
- отражательные характеристики объекта;
- оптические свойства атмосферы;
- текстура и ориентация элементарной поверхности объекта, вызвавшей отражение зондирующего луча по отношению к линии визирования.

Фазовый метод измерения расстояний. Фазовый метод измерения расстояний основан на определении разности фаз посылаемых и принимаемых модулированных сигналов. В этом случае расстояние вычисляется по формуле

$$R = \varphi_{2R}\, c / (4\pi f), \tag{5.2}$$

где φ_{2R} – разность фаз между опорным и рабочим сигналами; f – частота модуляции.

Лазерный луч с синусоидально модулированной оптической мощностью направляется на цель. Отслеживаются отраженный свет (рассеянный или зеркально отраженный) и фаза модуляции мощности по сравнению с переданным светом. По полученной разности фаз опреде-

ляется расстояние. Более высокие частоты модуляции позволяют получить более высокую точность.

Метод фазового сдвига предполагает неопределенность в отношении расстояния, потому что с увеличением расстояния фаза будет периодически меняться. Однако, периодичность гораздо больше, чем в интерферометре, так как частота модуляции значительно ниже, чем оптическая частота. Кроме того, неопределенность может быть легко удалена, например, путем измерения с двумя различными частотами модуляции.

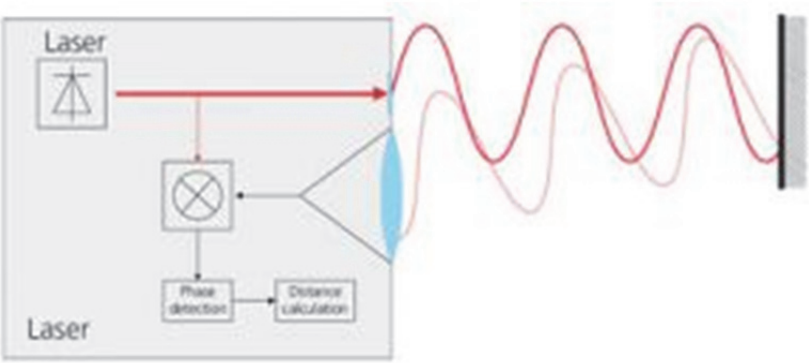


Рис. 5.2. Метод сдвига фаз

По сравнению с интерферометрами устройства, основанные на технике фазового сдвига, менее точны, но они позволяют однозначно измерять большие расстояния. Кроме того, они подходят для целей с рассеянным отражением от шероховатой поверхности.

Режим работы фазоизмерительного устройства зависит от его температуры, с изменением которой незначительно изменяется фаза сигнала. Вследствие этого точное начало отсчета фазы определить нельзя. С этой целью фазовые измерения повторяются на эталонном отрезке (калибровочной линии) внутри прибора.

Главное преимущество фазового метода измерения – более высокая точность, которая может достигать единиц миллиметров.

Достоинства лазерного сканирования

- Возможность измерения профиля сквозь оптически прозрачные для используемого освещения слои. В частности, воздушное лазерное сканирование позволяет получать координаты рельефа под покровом растительности.

- Высокая производительность, что особенно важно для мобильных систем.
- Они идеально подходят для сканирования зданий или географических объектов. Могут работать на очень больших расстояниях вплоть до нескольких километров.

Недостатки лазерного сканирования

- Длительность процесса механического сканирования выбранного пространственного сектора.
- Отсутствие полутоновой информации. Однако большинство современных моделей лазерных сканеров имеют встроенную видео- или фотокамеру, благодаря чему облако точек может быть также окрашено в реальные цвета.
- Невысокая точность измерений.

Если известны параметры оптической системы, то задача восстановления пространственного положения любого пришедшего на матрицу луча является достаточно простой. Дело остается за тем, чтобы создать вспышку света на корпусе измеряющего аппарата и каким-то образом измерить задержку в приходе отраженного от объекта света на каждый пиксель цифровой матрицы.

В настоящее время разработкой приборов для трехмерного лазерного сканирования занимается множество фирм, все эти фирмы выпускают сканеры для различных целей. Основными характеристиками современных наземных лазерных сканеров являются следующие:

- точность измерения расстояния, горизонтального и вертикального углов;
- максимальное разрешение сканирования;
- скорость сканирования;
- дальность действия лазерного сканера;
- расходимость лазерного луча;
- поле зрения сканера;
- используемые средства получения информации о реальном цвете;
- класс безопасности используемого лазера;
- портативность и особенности интерфейса.

На рис. 5.3 показан один из лазерных сканеров семейства Surphaser компании Basis Software Inc. (США). Surphaser – это серия приборов, представленная несколькими модификациями, рассчитанными на разные диапазоны рабочих расстояний – от 0.2 м до 70 м. В этом приборе реализован фазовый метод определения расстояния, за счет чего достигается высокая скорость сканирования (до 1.2 млн точек в секунду).

Рис. 5.3. Лазерные 3D-сканеры Surphaser 25HSX (длина волны лазера – 685 нм (красный), мощность лазера 15 мВт, частота сканирования (точек в секунду) от 216,000 до 1 200,000)

5.2. УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДНЫХ МАТРИЦ

В 2009 году компания Microsoft приобрела израильскую фирму 3DV Systems, которая выпустила на рынок дальномерную камеру ZCam. Microsoft оценила технологию как перспективную и решила использовать ее для внедрения в новый контроллер для игровой приставки Xbox 360, назвав эту разработку «проект Наталь».

Основными узлами Kinect являются излучатель, оптическая система, специальная цифровая фотодиодная матрица и электронная измерительная и вычислительная система. Необходимо отметить, что характерные размеры области измерений (несколько метров) и требуемая точность (несколько сантиметров) выдвигают очень жесткие требования к временной точности работы всех измерительных устройств.

Излучатель создает очень короткую световую вспышку (максимальная дальность камеры около 7.5 м при длительности вспышки $t_0 = 50$ нс). Рабочая длина волны составляет, скорее всего, 1.5 мкм.

Отраженный от сцены свет возвращается обратно и фокусируется оптической системой так, чтобы падать на цифровую матрицу.

Рис. 5.4. Kinect 2 компании Microsoft

Эта матрица имеет специальный тип и состоит из фотодиодов. При попадании света на фотодиод он начинает вырабатывать ток, который через ключ передается на накопительные элементы (конденсаторы). В простейшем случае можно использовать два конденсатора. Первоначально заряжается первый конденсатор S_1, через 50 нс после начала световой вспышки ключ переключается на зарядку второго конденсатора S_2. Еще через 50 нс ключ переходит в нейтральное положение. Через небольшой интервал весь процесс повторяется снова. Так как

частота следования вспышек достаточно большая и всю сцену можно считать неподвижной, то заряды конденсаторов S_1 и S_2 накапливаются от вспышки к вспышке, тем самым повышая уровень сигнал/шум и увеличивая надежность расчета. Для накопления используются несколько тысяч циклов.

В результате соотношение между зарядами S_1 и S_2 позволяет определить положение фронта отраженного импульса относительно вспышки. Окончательно рассчитать расстояние D вдоль луча, пришедшего к данному пикселю, можно по формуле

$$D = ct_0 S_2 / 2(S_1 + S_2). \tag{5.3}$$

Согласно заявленным техническим характеристикам, контроллер Kinetic 2 поддерживает рабочий диапазон дальностей от 0.5 до 4.5 м и имеет поле зрения примерно 50 угловых градусов в обоих направлениях. Разрешение дальномерной матрицы невелико и составляет 512 × × 426 пикселей. Одновременно со сбором информации о дальности обычная цифровая матрица выполняет видеосъемку сцены с разрешением 1920 на 1080 точек (с. рис. 5.4).

Проекты создания подобных систем есть у всех ведущих компаний в области IT-индустрии: Apple, Google, Sony.

6. ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СКАНЕРЫ

Триангуляционные лазерные 3D-сканеры используют лазерный луч для того, чтобы прозондировать объект. Камера фиксирует расположение точки, куда попал лазер.

Теодолит представляет собой телескоп, установленный на двух осях вращения. Угол на объект отслеживается точно. Измеряя угловые измерения из разных положений, может быть получено расстояние до объекта. Современные теодолиты управляются компьютером для автоматического отслеживания измеряемого объекта при его перемещении (рис. 6.1).

Рис. 6.1. Теодолит

Триангуляционный метод контроля основан на расчете искомого расстояния через соотношения треугольника с использованием известных параметров системы. Технология называется триангуляцией потому, что камера, лазерный излучатель и сама лазерная точка на поверхности объекта образуют своеобразный треугольник. В этой системе известна длина одной из сторон треугольника – это расстояние между лазерным излучателем и камерой. Также известен угол лазерного излучателя, а угол камеры определяется по расположению лазерной точки в поле обзора камеры. Эти три характеристики полностью формируют размер треугольника и указывают на расположение угла лазерной точки.

Лазерная триангуляции осуществляется путем проектирования лазерной линии или точки на объект, а затем регистрации ее отражения с помощью датчиков, расположенных на известном расстоянии от лазерного источника. В результате угол отражения может быть интерпретирован как информация о рельефе (рис. 6.2).

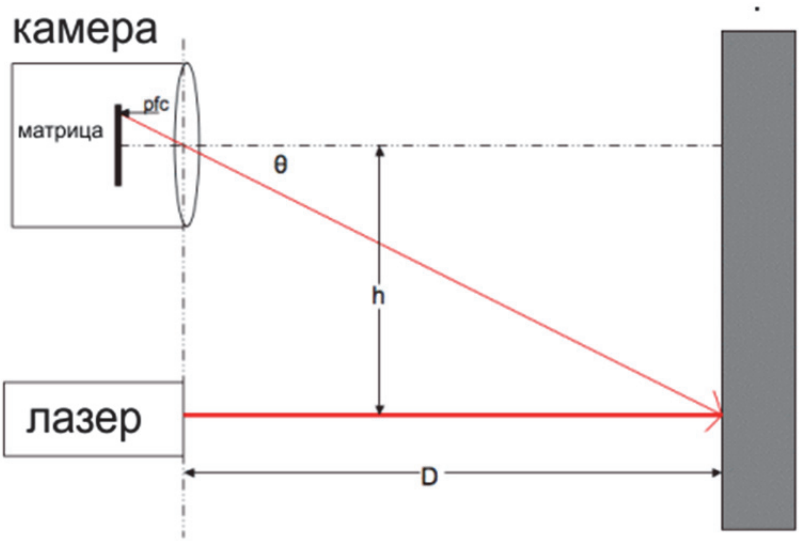


Рис. 6.2. Принцип работы триангуляционного лазерного дальномера

Лазерный луч проецируется на объект в поле зрения камеры. Этот луч должен быть идеально параллелен оптической оси камеры. Лазерная точка захватывается вместе с остальной сценой. Необходимо найти

на изображении яркое пятно. Предполагается, что точка лазера является более яркой на фоне более темного объекта. Затем нам нужно рассчитать дальность до объекта.

Как мы видим из рис. 6.2, расстояние D может быть рассчитано по формуле

$$D = \frac{h}{\mathrm{tg}\theta}, \tag{6.1}$$

где h – фиксированное расстояние.

Угол θ можно определить как

$$\theta = pfc \cdot rpc \cdot ro, \tag{6.2}$$

где pfc – номер пикселя центра светлой точки от центра изображения; rpc – радиан на пиксель; ro – компенсация.

Количество пикселей от центра плоскости изображения до лазерной точки может быть найдено простым подсчетом. Для получения других параметров необходимо выполнить калибровку.

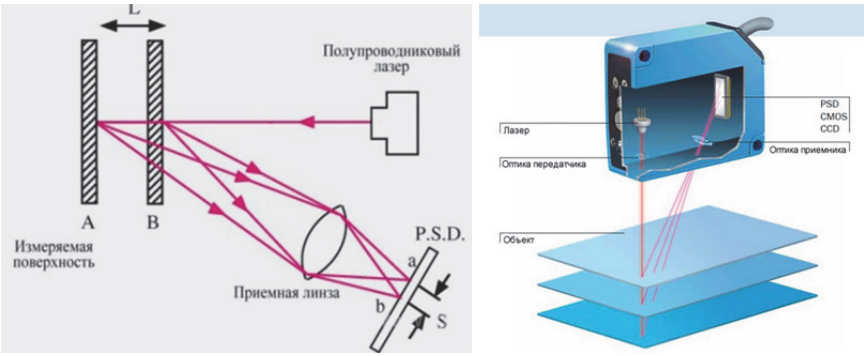


Рис. 6.3. Схема триангуляционного датчика измерений расстояний

Для калибровки системы можно использовать серию измерений, где известны дальность до цели, а также количество пикселей центра изображения до точки лазера:

$$\theta_{\text{факт}} = \mathrm{arctg}\left(\frac{h}{D_{\text{факт}}}\right). \tag{6.3}$$

Теперь можно вывести расчетные соотношения или просто использовать линейную зависимость угла от номера пикселя.

На таком принципе построена и работа промышленных триангуляционных измерителей расстояния (рис. 6.3).

Одним из конкретных улучшений, которые могут быть внесены в работу этого дальномера, является проекция горизонтальной лазерной линии вместо точки. Таким образом, можно вычислять расстояние до цели для каждого ряда пикселей на изображении.

7. ПАССИВНЫЕ СТЕРЕОСИСТЕМЫ

Бесконтактные пассивные сканеры фиксируют только отраженный естественный свет. Помимо улавливания видимого спектра света они могут фиксировать инфракрасное и другие типы излучения. Пассивный метод сканирования относительно дешевый, так как не требует использования дорогостоящего специализированного оборудования, достаточно обычной цифровой камеры и специализированного программного обеспечения.

Фотограмметрия основана на обработке стандартных фотографий методами проективной геометрии и первоначально использовалась для оцифровки крупных объектов, таких как здания, буровые установки и склады. В фотометрических системах, как правило, используется одна камера, которая производит съемку нескольких кадров. Эти методы позволяют преобразовать модель объекта, чтобы восстановить поверхность по каждому пикселю. Принцип фотограмметрии заключается в том, чтобы сделать несколько изображений объектов и вручную или автоматически найти общие точки на каждой фотографии. После чего происходит восстановление модели объекта по каждому пикселю на снимках. Фотограмметрия часто используется с другими 3D-технологиями сканирования.

Построение модели может выполняться с использованием так называемой «силуэтной техники», в которой анализируется серия фотографий трехмерного объекта на контрастном фоне. Преобразуя полученные силуэты, исследователь формирует оболочку объекта. Недостатком данного метода является отсутствие возможности сканирования углублений объекта. Кроме того, существуют методы, основанные на том, что пользователь обнаруживает и идентифицирует некоторые особенности формы объекта, опираясь на множество различных его изображений, что позволяет в итоге создать приблизительную трехмерную модель объекта простой формы. Таким функционалом обладает ряд современных программных продуктов, например D-Sculptor, iModeller, Autodesk ImageModeler или PhotoModeler.

Стереоскопические системы предполагают использование двух видеокамер, которые расположены в разных местах. По анализу различий изображения каждой из камер можно определить расстояние до каждой точки. Данный способ по своему принципу похож на стереоскопическое зрение человека. Наиболее просто снять два стереоснимка, а потом преобразовать их в трехмерный объект. Два изображения называются «стереопарой». Для получения двух стереоснимков можно использовать специальный штатив для закрепления двух фотоаппаратов или использовать специализированные камеры (рис. 7.1).

Рис. 7.1. Фотокамеры для получения стереоснимков, выпускаемые в СССР

При съемке 3D-фильмов используются модернизированные или выпускаемые серийно видеокамеры (рис. 7.2).

Для получения трехмерного объекта необходимо установить соответствие точек на двух снимках и методами триангуляции определить z-координату.

Автоматический поиск соответствующих точек (point match) – одна из самых сложных задач в области машинного зрения. Для этого определяются проекции одной и той же точки сцены (рис. 7.3). Отрезок между оптическими центрами камер называется стереобазой. Стереореконструкция – задача определения координат точек в трехмерном

пространстве на основании их положения на кадрах видеоряда или нескольких (не меньше двух) изображений. Если B – базис стереосъемки, D – расстояние до объекта, то базис выбирается из следующего выражения:

$$B = 0{,}03D. \tag{7.1}$$

Рис. 7.2. Камерная система Fusion 3D с объективами Fujinon HA5×7B-W50, которая использовалась для съемок фильмов Джеймса Кэмерона «Экспедиция “Бисмарк”», «Призраки бездны» и «Аватар»

Коэффициент 0.03 обусловлен углом схождения зрительных осей, который обеспечивает оптимальные условия для наблюдения стереоэффекта [1].

В общем случае из-за ошибок калибровки камер или измерения координат проекции лучи не пересекаются. Для нахождения средней точки находится перпендикуляр к лучам (рис. 7.4).

Координаты произвольной точки A находятся по ее проекциям m_1 и m_2 (рис. 7.5). Для этого необходимо указать точки на каждом из изображений стереопары, которые соответствуют точке A (stereo matching).

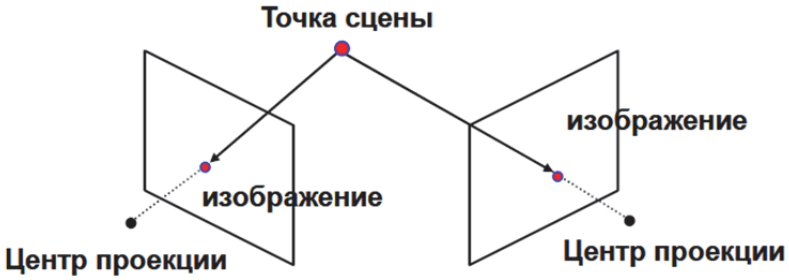


Рис. 7.3. Получение двух стереоизображений

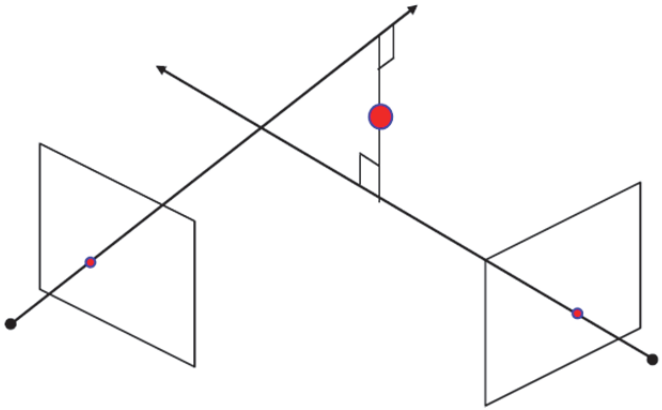


Рис. 7.4. Нахождение средней точки сцены

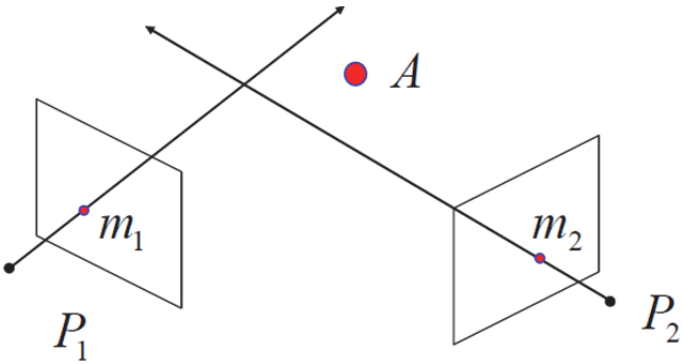


Рис. 7.5. Определение координат точки по ее проекциям

Эту задачу можно упростить, если рассматривать точки, лежащие на эпиполярных линиях. Два центра проекций и точка сцены образуют эпиполярную плоскость. Эпиполярные линии – пересечение эпиполярной плоскости и плоскости изображений (рис. 7.6). В этом случае соответствующая точка на втором изображении должна лежать на эпиполярной линии. Вместо поиска соответствующей точки по всему изображению можно осуществлять поиск точки только вдоль эпиполярной линии.

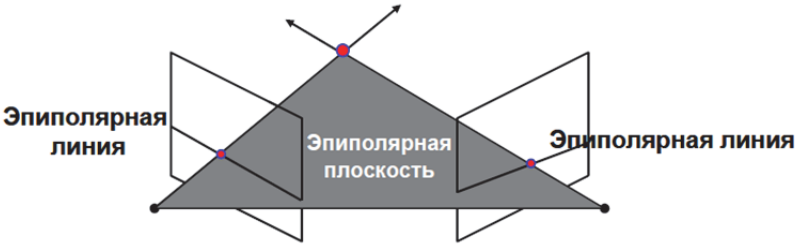


Рис. 7.6. Эпиполярная плоскость

Однако два изображения обычно произвольным образом располагаются друг относительно друга из-за произвольности расположения камер. (рис. 7.7). Эпиполярные линии проходят под произвольным углом в двух изображениях. Поэтому линии надо выровнять.

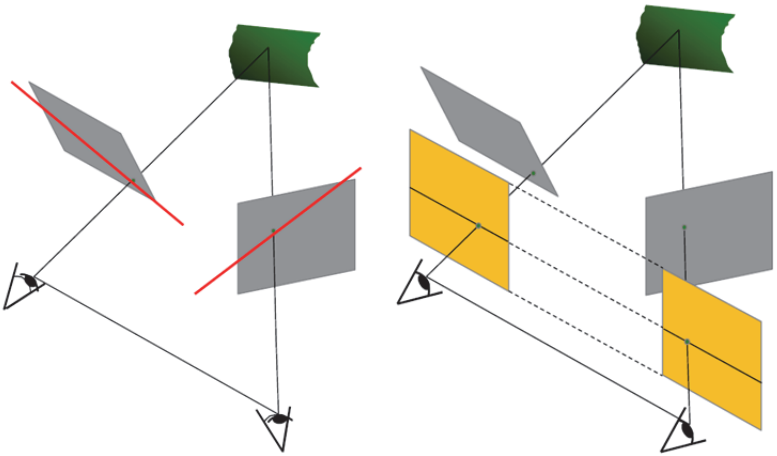


Рис. 7.7. Ректификация (выпрямление) стереопары

Для этого проецируем оба изображения на одну плоскость, параллельную стереобазе; строки изображений параллельны стереобазе.

Теперь эпиполярные линии совпадают со строками изображений и соответствующие точки лежат на одной и той же строчке. Этот процесс называется ректификацией (от англ. – исправление, выравнивание). Пример ректификации стереопары показан на рис. 7.8.

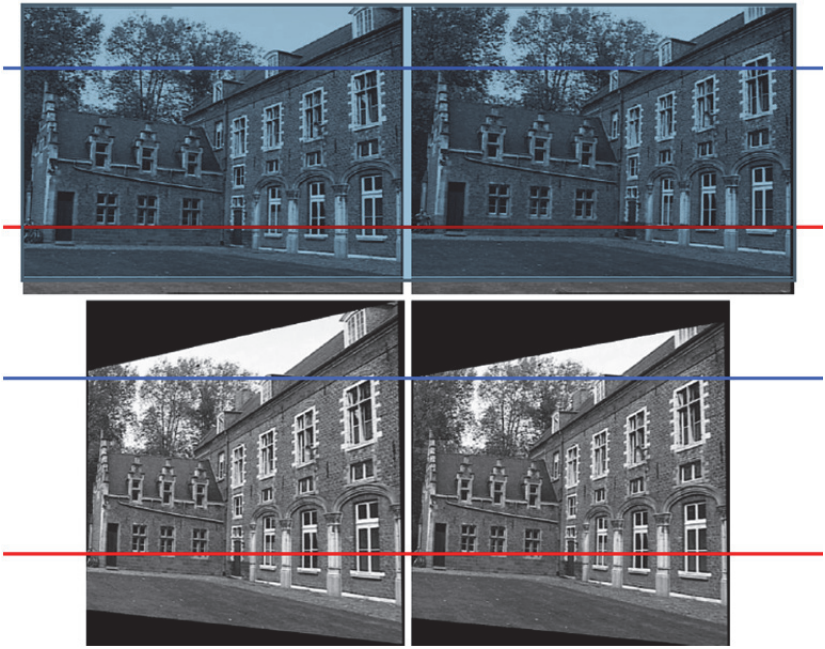


Рис. 7.8. Ректификация стереопары

Ключевая проблема стереозрения заключается в том, как на двух изображениях можно распознать сопряженные точки. Если можно сопряженные точки найти по всей поверхности объекта, то можно определить диспаритет (разницу между смещением сопряженных точек на обоих кадрах) (рис. 7.9).

Диспаритет находится для получения карт глубины. Рассмотрим задачу, когда одна из точек находится на оптической оси одной из камер (рис. 7.10).

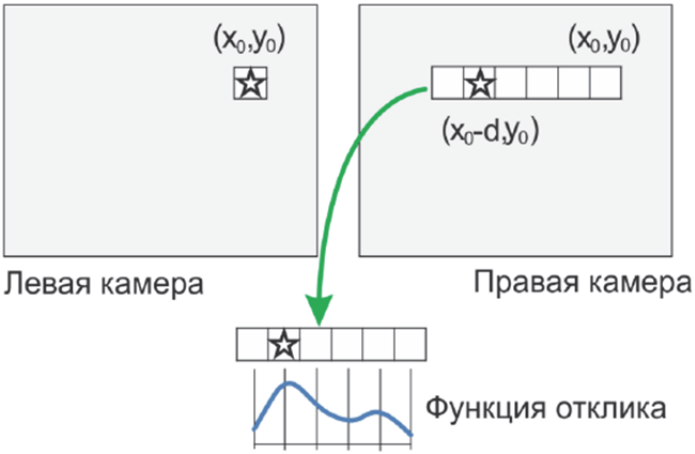


Рис. 7.9. Нахождение диспаритета

Из рис. 7.9 видно, что чем дальше точка от камеры, тем ее смещение меньше.

Для общего случая можно получить следующее выражение:

$$\text{disparity} = x - x' = \frac{B}{z}, \tag{7.2}$$

где B – базис стереосъемки, f – фокусное расстояние камер (рис. 7.11).

Можно выделить следующие этапы определения глубины по стереоизображениям:

- откалибровать камеры;
- получить снимки объекта (стереопары);
- ректифицировать изображения;
- произвести поиск сопряженных точек;
- отделить объекта от фона;
- вычислить диспаритет (разница между смещением точки на обоих кадрах);
- оценить глубину;
- вывести результаты в виде 3D-модели.

Поиск точек на соответствующих эпистолярных линиях – достаточно сложная задача. В литературе описано множество подходов и алгоритмов [2]. Для облегчения этой задачи используются активные лазерные системы.

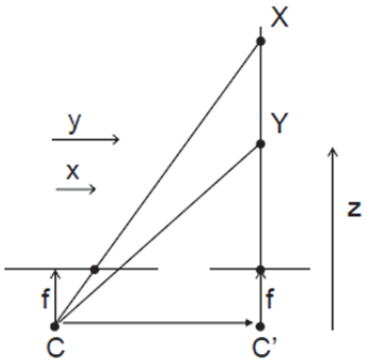


Рис. 7.10. Смещение двух точек с разными значениями *z*

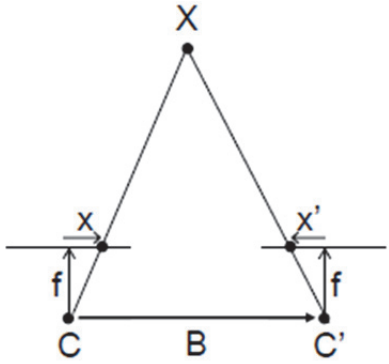


Рис. 7.11. Определение *z*-координаты по диспаритету

Лазерные 3D-сканеры, использующие принцип триангуляции, относятся к типу активных сканеров, которые используют лазерный луч. Как и времяпролетные 3D-сканеры, триангуляционные устройства посылают на сканируемый объект лазерный луч, а отдельно стоящая камера фиксирует точки на поверхности, куда падает лазер. Перемещая лазерный луч по объекту, камера фиксирует точки рельефа поверхности. Обычно для ускорения процесса сканирования в сканерах данного типа вместо лазерной точки используют лазерную полосу.

Ручные лазерные сканеры работают по принципу триангуляции, который был описан выше. Сенсор измеряет расстояние до поверхности объекта, в то время как лазерный луч или полоса проецируется на объект из ручного излучателя. В роли сенсора часто используется прибор с зарядовой связью или координатно-чувствительный детектор. Так как во время сканирования сканер часто находится в движении, а данные фиксируются относительно внутренней системы координат сканера, для определения точного положения устройства в пространстве зачастую используются специальные метки или используют природные особенности фона для последующего приведения результатов сканирования к единой системе координат.

3D-сканер UNIscan (ZScanner 600) нашел свою популярность благодаря простоте эксплуатации и портативности (рис. 7.12).

Для того чтобы начать работу со сканером, необходимо нанести на объект сканирования светоотражающие метки (рис. 7.13).

Рис. 7.12. Ручной портативный 3D-сканер ZScanner 600 (Z Corporation, Zcorp), разрешение по *z*-координате до 0,1 мм, точность по осям *X* и *Y* до 80 микрон, скорость сканирования 18 000 замеров в секунду

Рис. 7.13. Процесс сканирования с помощью ручного лазерного сканера

После этого происходит калибровка сканера. Линии, проецируемые лазерными лучами на объекте, считываются камерами, и данные посылаются в режиме реального времени для обработки в компьютер.

Недорогими конкурентами Kinetic могут стать устройства, работающие на триангуляционных принципах, например, очень простое устройство Leap Motion (рис. 7.14).

Рис. 7.14. Leap Motion (вид сверху со снятой передней крышкой)

Конструктивно Leap Motion – небольшой блок, под тонированным стеклом находятся две инфракрасные камеры и три инфракрасных диода, с их помощью улавливаются движения ваших рук или одной руки (рис. 7.15).

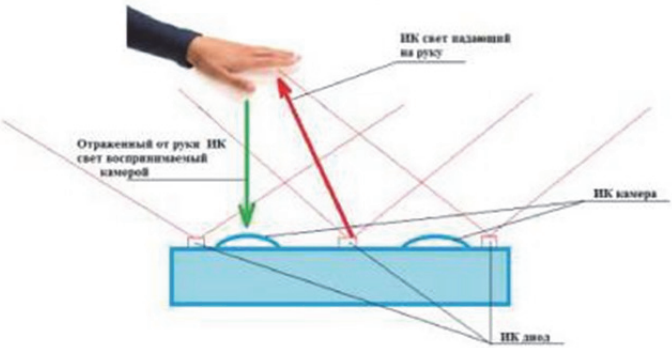


Рис. 7.15. Принцип работы Leap Motion

В качестве тонированного стекла и в Kinetic, и в Leap Motion используется фильтр, который пропускает только инфракрасное излучение (passing filter). Данный фильтр обычно черного цвета.

8. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЛЬЕФА С ПОМОЩЬЮ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ МЕТОДОВ

При восстановлении трехмерных объектов основным измерительным прибором является цифровая камера. Рассмотрим погрешность измерения рельефа с помощью триангуляционных методов [3]. Пусть камера представляет собой матрицу фоточувствительных элементов, помещенную в фокальной плоскости объектива, на которой формируется изображение. Искажения, которые вносят оптические элементы, не рассматриваем.

На рис. 8.1 плоскость изображения *I* (матрица) изображена впереди оптического центра О камеры, так как это не влияет на угловые зависимости, но упрощает запись формул и рисунки. Камера характеризуется максимальным углом обзора φ_{max} и количеством фоточувствительных элементов матрицы *MxN*. Размер каждого фоточувствительного элемента одинаков, и они образуют прямоугольную сетку.

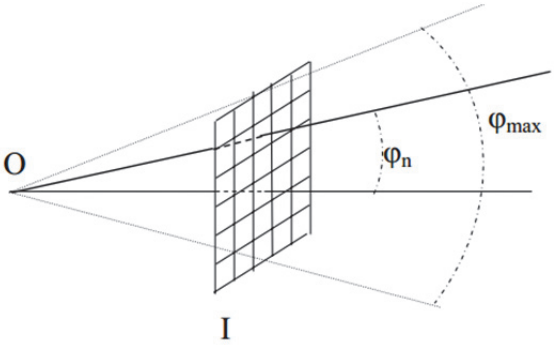


Рис. 8.1. Матрица элементов цифровой фотокамеры

Направление луча, проходящего через *n*-й пиксель, $-N/2 < n < N/2$, задается углом φ_n, который может быть выражен как

$$\mathrm{tg}\varphi_n = \frac{n\mathrm{tg}\dfrac{\varphi_{\max}}{2}}{N/2}. \qquad (8.1)$$

Камеры расположены на расстоянии b друг от друга (стереобаза). Направления оптических осей камер задаются углами θ_1 и θ_2 относительно перпендикуляра к направлению b (рис. 8.2).

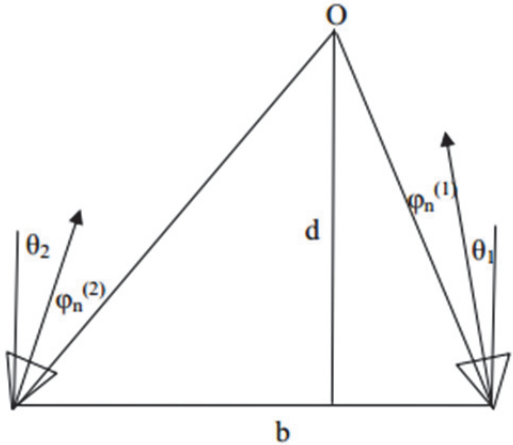


Рис. 8.2. Схема триангуляционных вычислений

Камеры видят точку O объекта соответственно в пикселе n_1 и n_2, направления на эту точку задаются углами θ соответственно. Расстояние до точки O от базовой линии b равно d. Обозначая расстояния от первой и второй камер до точки O через a_1 и a_2, можно записать

$$d = a_1 \cos\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right), \qquad (8.2)$$

$$d = a_2 \cos\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right), \qquad (8.3)$$

$$b = a_1 \sin\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right) + a_2 \sin\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right). \qquad (8.4)$$

Избавимся от a_1 и a_2:

$$\frac{b}{d} = \mathrm{tg}\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right) + \mathrm{tg}\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right) =$$

$$= \frac{\mathrm{tg}(\theta_1) + \mathrm{tg}\left(\varphi_{n1}^1\right)}{1 - \mathrm{tg}(\theta_1)\mathrm{tg}\left(\varphi_{n1}^1\right)} + \frac{\mathrm{tg}(\theta_2) + \mathrm{tg}\left(\varphi_{n2}^2\right)}{1 - \mathrm{tg}(\theta_2)\mathrm{tg}\left(\varphi_{n2}^2\right)}. \qquad (8.5)$$

В случае, если погрешность определения координат точки на изображении составляет 1 пиксель, углы φ_{n1}^1 и φ_{n2}^2 имеют погрешность

$$\Delta\varphi_{n1}^1 = \frac{n\mathrm{tg}\dfrac{\varphi_{\max}^1}{2}}{N/2}. \qquad (8.6)$$

Учитывая, что погрешность угла мала по сравнению с остальными углами, т. е. разрешение камеры велико:

$$\left|\Delta\frac{b}{d}\right| = \frac{b\Delta d}{d(d+\Delta d)} \approx \frac{b\Delta d}{d^2} = \mathrm{tg}\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right) -$$

$$-\mathrm{tg}\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right) + \mathrm{tg}\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2 + \Delta\varphi_{n2}^2\right) =$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\varphi_{n1}^1}{\cos^2\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right)} + \frac{\Delta\varphi_{n2}^2}{\cos^2\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right)} + \left(\Delta\varphi_{n1}^1 + \Delta\varphi_{n2}^2\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left(1 - \mathrm{tg}\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right)\mathrm{tg}\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right)\right)\right). \qquad (8.7)$$

Полагая, что обе камеры имеют одинаковое разрешение и максимальный угол обзора, можно записать

$$\frac{b\Delta d}{d^2} \approx \frac{n\mathrm{tg}\dfrac{\varphi_{\max}}{2}}{N/2}\left(\frac{1}{\cos^2\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right)} + \frac{1}{\cos^2\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right)} +\right.$$

$$\left. + 2\left(1 - \mathrm{tg}\left(\theta_1 + \varphi_{n1}^1\right)\mathrm{tg}\left(\theta_2 + \varphi_{n2}^2\right)\right)\right). \qquad (8.8)$$

Выражение в скобках не может быть меньше, чем 2, поэтому

$$\frac{b\Delta d}{d^2} > \frac{n\,\mathrm{tg}\frac{\varphi_{\max}}{2}}{N/2}. \qquad (8.9)$$

Отсюда можем получить оценку относительной погрешности определения расстояния

$$\frac{\Delta d}{d} > \frac{n}{N}\frac{d}{b}\mathrm{tg}\frac{\varphi_{\max}}{2}. \qquad (8.10)$$

Например, если угол зрения камеры составляет 45°, то $\mathrm{tg}\frac{\varphi_{\max}}{2} = 4.0$, и для камеры с разрешением 1000 пикселей в строке (столбце) при расстоянии между камерами 1 м и расстоянии до объекта 1 м погрешность составит 1/1000 · 0.4 = 0.0004 м = 0.4 мм. Если же расстояние между камерами равно 1 м, а расстояние до объекта равно 10 м, то погрешность измерения расстояния составит уже 0.04 м = 4 см, при увеличении расстояния до объекта вдовое (до 20 м) точность упадет до 16 см.

Из этой же формулы можно получить оценку диапазона расстояний, вне которых измерения вообще невозможны, это расстояние $d_{\max}$, начиная с которого погрешность превышает само расстояние:

$$\frac{b}{d_{\max}} = \frac{n}{N}\mathrm{tg}\frac{\varphi_{\max}}{2}. \qquad (8.11)$$

То есть если отношение базы к расстоянию образует угол, сопоставимый или меньший, чем угловое разрешение камеры, то стереоэффект отсутствует и измерение расстояния невозможно принципиально.

Приведенные оценки максимально оптимистичные и получены в предположении наилучшей из возможных геометрии съемки. При использовании различных алгоритмов имеются факторы, приводящие как к улучшению, так и к ухудшению полученных оценок. К некоторому улучшению ведет возможность определения координат точки на изображении с субпиксельной точностью. С другой стороны, возможность нахождения ошибочных соответствий, шумы, радиальная дисторсия камеры, погрешности калибровки и неточность фокусировки приводят к ухудшению полученных оценок. Поэтому приведенные оценки являются достаточно достоверными.

9. СТРУКТУРИРОВАННАЯ ПОДСВЕТКА

Стереоскопические методы связаны с принципиальными ограничениями, в частности, сложностью поиска соответствующих точек на объектах, не обладающих ярко выраженной текстурой или имеющих большие однородные области. Чтобы преодолеть эти недостатки стереоскопического метода, можно дополнить систему проектором для нанесения на поверхность набора точек или линий (рис. 9.1).

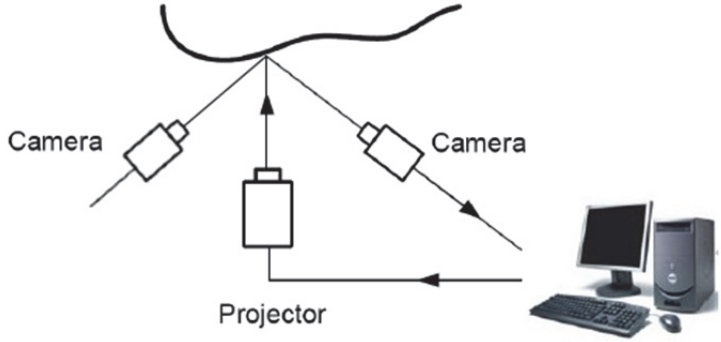


Рис. 9.1. Общий вид системы проекции с двумя видеокамерами

Достоинством этой схемы является то, что не нужна калибровка проекционного устройства, так как для триангуляции не требуется знать, куда на объекте попадают те или иные точки подсветки. Для определения профиля поверхности используются те же разрешающие уравнения, что и для пассивных триангуляционных систем.

Однако, вторая камера является избыточной. Можно заменить одну из камер стереопары проектором. Схема системы, построенной на данном принципе, показана на рис. 9.2. На объект проецируется некоторая картина (структурированная подсветка); ее искажения, вызванные формой объекта, регистрируются камерой.

3D-сканеры, работающие по технологии структурированного света, представляют собой проекцию известной картины (чаще световой сет-

ки) непосредственно на объект, деформация этого рисунка и представляет собой модель сканируемого предмета.

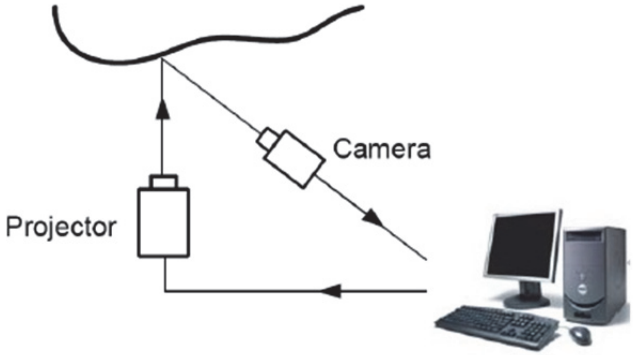


Рис. 9.2. Общий вид системы проекции структурированных изображений

Метод Гартмана был одним из наиболее ранних способов определения кривизны оптического волнового фронта (начало 1900-х гг.) с помощью принципов структурированного освещения [4]. Первые датчики Гартмана представляли собой плоские пластины с небольшими отверстиями, которые работали как собирающие линзы. Изображение пятен в фокальной плоскости называется гартманограммой. По ее виду можно судить об искривленности волнового фронта. Позднее, в 1960-х гг., Роланд Шак и Бен Платт модифицировали эту технологию, заменив набор отверстий на множество линз (линзовый растр).

Принцип работы датчика Шака–Гартмана состоит в том, что излучение проходит через линзовый растр – матрицу микролинз – и падает на фотоприемник (рис. 9.3). Микролинзы разбивают падающий фронт на малые потоки и фокусируют их на матрице фотоприемников. Когда приходящий волновой фронт плоский, все сфокусированные изображения расположены в правильной сетке, обусловленной расположением линз. Если падающая волна имеет какие-либо искажения, то изображения смещаются со своих номинальных значений. Такие датчики используются в лабораториях для измерения формы оптических элементов, а также для 3D-реконструкции волнового фронта, искаженного атмосферой.

Датчики Шака–Гартмана имеют существенный недостаток: перекрестные помехи на фотоматрицах. Они возникают, когда точки фокусировки выходят за пределы своего подмассива. Для увеличения раз-

решения необходимо увеличить число линз, но это приведет к уменьшению динамического диапазона.

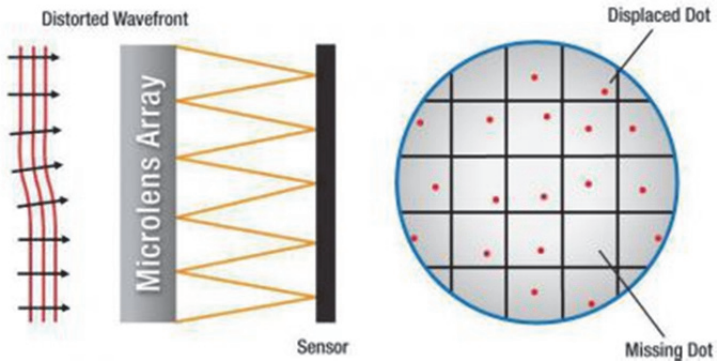


Рис. 9.3. Определение искажения волнового фронта с помощью массива микролинз

Использование кодированного структурированного освещения является одним из самых надежных методов для восстановления поверхности объектов. Этот метод основан на проецировании светового шаблона и просмотре освещенной сцены с одной или более позиций. Поскольку шаблон кодируется, соответствия между точками изображения и точками проецируемого шаблона могут быть легко найдены.

9.1. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ

Измеренная картина содержит информацию о профиле изучаемого объекта и включает наклон этого объекта к плоскости проецирования. Однако нас интересует в большей степени профиль объекта без наклона. Для этого используется простой алгоритм вычитания плоскости наклона [5]. Принципиальная схема системы показана на рис. 9.4.

Точки *P* и *I* – центры выходных зрачков проектора и камеры соответственно. Оптические оси проектора и камеры пересекаются в точке O. Перед началом измерений объекта измерялась фазовая карта опорной плоскости, которая использовалась в качестве эталона при дальнейших измерениях. Профиль объекта измеряется по отношению к этой плоскости. С точки зрения проектора точка *D* на поверхности объекта имеет то же значение, как и точка *C* на опорной плоскости. В то время на фотокамере точка *D* на поверхности объекта и *A* на базовой плоскости отображаются в один пиксель.

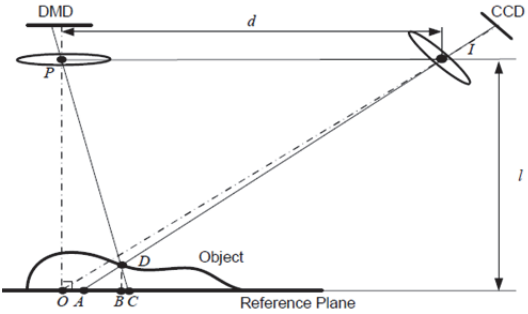


Рис. 9.4. Схема преобразования фазовой информации в картину профиля объекта

Вычитая фазовую карту опорной плоскости из фазового распределения на объекте, мы получим фазовую разность на этом же пикселе:

$$\varphi_{AD} = \varphi_{AC} = \varphi_A - \varphi_C \,. \tag{9.1}$$

Предположим, точки P и I расположены так, чтобы быть в одной плоскости с вектором l (расстояние до опорной плоскости) и имеют фиксированное расстояние d между ними, и опорная плоскость параллельна линии между зрачками камеры и проектора. Таким образом, треугольники ΔPID и ΔCAD подобны, высота точки D на поверхности объекта по отношению к опорной плоскости DB зависит от расстояния между точками A и C:

$$\frac{d}{\overline{AC}} = \frac{l - \overline{DB}}{\overline{DB}} = \frac{l}{\overline{DB}} - 1 \,, \tag{9.2}$$

так как d намного больше, чем $\overline{AC}$, для реальных измерений это выражение можно упростить:

$$z(x, y) = \overline{DB} \approx \frac{l}{d}\overline{AC} = \frac{pl}{2\pi d}\varphi_{AC} = K\varphi_{AC} \,, \tag{9.3}$$

где p – ширина полосы на опорной плоскости. Таким образом, высота поверхности находится в пропорциональной зависимости от фазы.

Для определения коэффициента K можно использовать объект с известной высотой. Пусть высота плоской поверхности 15 ± 0.1 мм. Можно определить фазовую разность между верхней и нижней поверхностями.

Пусть

$$\varphi_{AC} = \varphi_A - \varphi_C = \varphi_{\text{top}} - \varphi_{\text{botton}} = 4.6 \text{ рад}, \tag{9.4}$$

тогда

$$K = \frac{15}{4.6} = 3.2609 \text{ (мм/рад)}. \tag{9.5}$$

Допустим, что координаты x и y пропорциональны реальным координатам объекта. Пусть измеряемая область 260 × 244 мм, массив фотодетекторов имеет 800 × 600 точек. Тогда

$$k_x = \frac{260}{800} = 0.325 \text{ (мм/пиксель)}. \tag{9.6}$$

Используя эти коэффициенты, можно получить карту высот поверхности исследуемого объекта.

Этот простой метод калибровки дает только приближенное соотношение между распределением фаз и реальными координатами. Для объектов с небольшими изменениями рельефа эти предположения могут и выполняться. Однако для объектов с большой глубиной рельефа выражения не дают точных результатов. В этой модели не учитываются также дисторсии объективов, которые приводят к неравномерности распределения полос в опорной плоскости. Эта неравномерность может быть разной для опорной плоскости и на поверхности объекта. Поэтому при вычитании поля фаз на опорной поверхности из поля фаз на поверхности объекта искажения устраняться не будут. Поэтому перед началом работы необходимо проводить калибровку системы.

9.2. ПРОЕЦИРОВАНИЕ ТОЧЕК, ЛИНИЙ, СЕТОК

Современные способы, основанные на структурированном освещении, проектируют специальные картины, искажения которых и определяют форму поверхности. Наиболее простые картины: набор точек, линии, сетки.

Можно проецировать линии с помощью специальных лазерных указок, слайд-проекторов, но наиболее простым способом является проекция линий на объект с помощью обычного жидкокристаллического проектора. Камера, расположенная чуть в стороне от проектора, фиксирует форму сети и вычисляет расстояние до каждой точки в поле зрения.

Примеры сканеров с проекцией линии показаны на рис. 9.5 и 9.6.

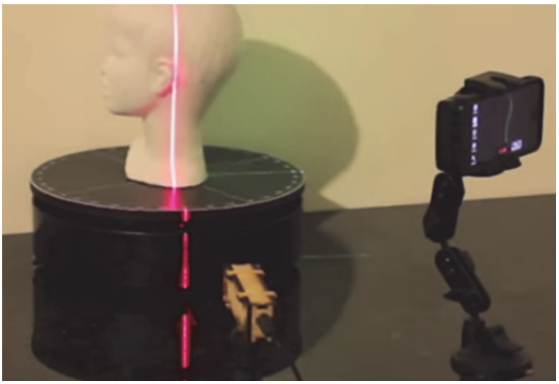


Рис. 9.5. Определение 3D-профиля с помощью проекции вертикальной линии

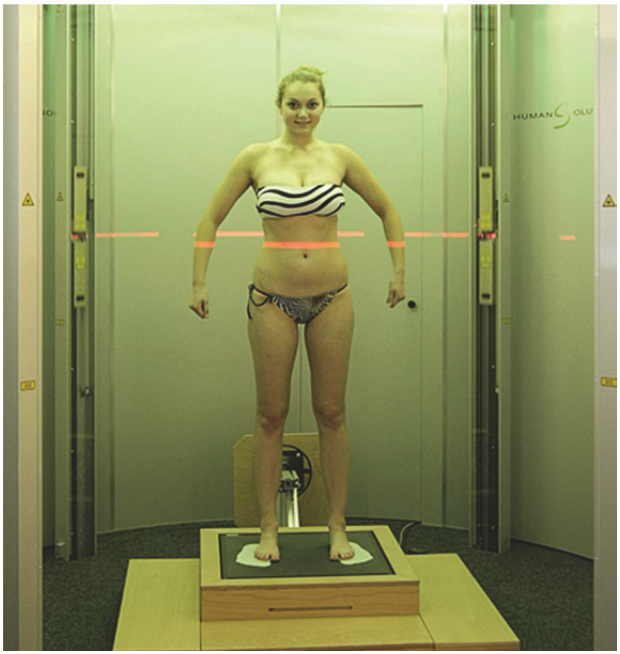


Рис. 9.6. Сканер фирмы Human Solutions (Германия) для трехмерного измерения тела человека

Преимущество 3D-сканеров, использующих структурированную двумерную картину, в их скорости и точности работы. Вместо сканирования одной точки в один момент времени или одной линии структурированные сканеры сканируют одновременно все поле зрения сразу. В качестве подсветки выбираются геометрические формы, которые легко распознаются при проекции на объект. В качестве примера покажем, как работает структурированная подсветка в виде регулярной сетки (рис. 9.7).

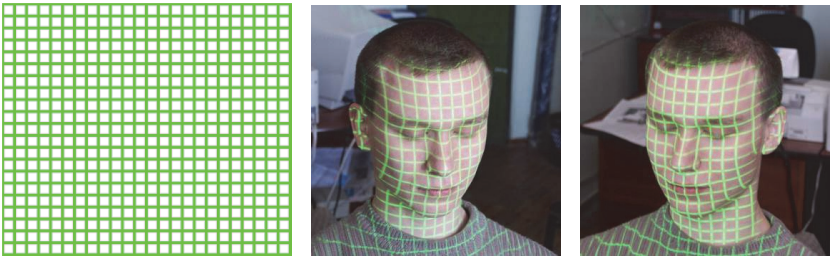


Рис. 9.7. Структурированная подсветка и два изображения объекта под разными углами

Узловые точки в узлах решетки выделяются автоматически. Для каждой точки из полученного массива может быть определена z-координата в узловых точках.

Однако набор точек, которые мы получили, сильно разрежен. Для получения 3D-модели необходимо вычислить полигональную модель объекта, т. е. необходимо соединить все точки в многоугольники. Этот процесс в геодезии называется триангуляцией. Существует много алгоритмов. Наилучшей для представления 3D-объектов является триангуляция Делоне [6] (рис. 9.8).

Сканирование всего поля зрения занимает долю секунды, а сгенерированные профили являются более точными, чем лазерные триангуляции. Это также решает проблему искажения данных, вызванного движением. Кроме того, некоторые существующие системы способны сканировать даже движущиеся объекты в режиме реального времени.

Использование инфракрасного света позволяет не мешать другим задачам компьютерного зрения.

В настоящее время разработано множество различных вариантов картин для использования в системах структурированной подсветки, представляющих собой как серии изменяющихся картин (картины с временным мультиплексированием), так и неизменные картины с использованием различных вариантов цветовой кодировки.

Рис. 9.8. Построение триангуляции Делоне. Карта высот, полученная аппроксимированием областей в треугольниках. Текстура, наложенная на каркасную модель

Кодируемая система структурированного освещения основана на проекции одного шаблона или набора шаблонов на измерительную сцену, которая затем просматривается одной или несколькими камерами. Образцы разработаны специально таким образом, чтобы кодовые слова присваивались набору пикселей. Каждый закодированный пиксель имеет свое собственное кодовое слово, так что существует прямое соответствие кодовых слов и соответствующих им координат пикселя в шаблоне. Кодовые слова – это просто числа, которые отображены в шаблоне с помощью уровней серого цвета или геометрических представлений. Чем больше число точек, которые должны быть закодированы, тем больше кодовых слов, и, таким образом, отображение таких кодовых слов на шаблоне становится более сложным.

Методы проекции шаблона отличаются тем, каким образом в шаблоне определена каждая точка, т. е. какие кодовые слова используются и кодирует ли он одну или две пространственные оси. Хороший обзор систем кодирования приведен в [7].

9.3. СТРАТЕГИЯ ВРЕМЕННОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ

Временное мультиплексирование – одна из наиболее часто используемых стратегий. В этом случае последовательно проецируется набор шаблонов на измеряемую поверхность. Кодовое слово в заданном пикселе, как правило, формируется с помощью последовательности значений освещенности для этого пикселя через проецируемые шаблоны. Таким образом, кодирование называют временным, поскольку биты кодовых слов мультиплексируются во времени. С помощью такого шаблона можно добиться высокой точности.

За последние годы появилось несколько методов, основанных на временном мультиплексировании. Эти методы могут быть классифицированы следующим образом:

- методы, основанные на двоичных кодах: последовательность двоичных шаблонов, использующихся для того чтобы генерировать двоичные кодовые слова;
- методы на основе N-значных кодов: n базисных элементов используется для генерации кодовых слов;
- код Грея в сочетании с фазовым сдвигом: определенный шаблон проецируются несколько раз, его перемещают в определенном направлении, чтобы увеличить разрешение;
- гибридные методы: сочетание временного мультиплексирования и пространственного кодирования стратегий.

Методы, основанные на двоичных кодах. В этих методах обычно используются только два уровня освещения, которые кодируются как 0 и 1. Каждый пиксель рисунка имеет свое собственное кодовое слово, формируемое последовательностью 0 и 1, соответствующих его значению в каждом проецируемом шаблоне. Таким образом, кодовое слово получается только тогда, когда завершается проецируемая последовательность. Важной характеристикой этого метода является то, что кодируется только одна из двух осей в шаблонах.

В 1981 г. Posdamer и Altschuler [8] предложили проецировать последовательность из m шаблонов для кодирования 2^m чисел, используя простой двоичный код. Таким образом, кодовое слово, связанное с каждым пикселем, является последовательностью из 0 и 1, полученных из m шаблонов; первым шаблоном становится тот, который содержит наиболее значимый бит. Символ 0 соответствует черной интенсивности, в то время как символ 1 соответствует полному свечению белого цвета. Таким образом, количество полос возрастает с коэффициентом 2 для каждого последовательного шаблона. Каждая полоса последнего шаблона имеет свой собственный двоичный код. Максимальное количество шаблонов, которое может быть спроецировано, определяется разрешением проектора в пикселях. Следует отметить, что все пиксели, принадлежащие одной и той же полосе в шаблоне с высокой частотой, имеют одинаковые кодовые слова. Таким образом, перед триангуляцией необходимо рассчитать либо центр каждой полосы, либо границу между двумя последовательными полосами. Пример такой модели из семи шаблонов изображен на рис. 9.9.

К сожалению, при малом расстоянии между полосами возникают ошибки при определении границ белого и черного. Поэтому возникают

ошибки при определении младших разрядов чисел. В работе [9] предложено не определять границы белого и черного, а вычислять код числа по измерениям картины интенсивностей, которая представлена различными уровнями серого с соответствующими весами.

$$I_p = \sum_{n=0}^{N-1} 2^n I_n(x, y). \tag{9.7}$$

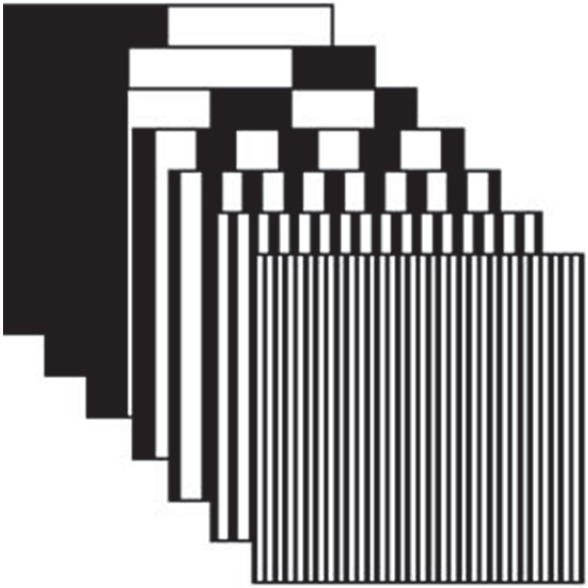


Рис. 9.9. Временное мультиплексирование (7 шаблонов, которые кодируют 7 двоичных разрядов)

По этой схеме можно восстановить 7 и более двоичных разрядов.

Inokuchi и другие авторы [10] улучшили схему кодирования, вводя код Грея вместо обычного двоичного кода. Преимущества кода Грея в том, что последовательные кодовые слова имеют единичное расстояние Хэмминга и более устойчивы к шуму.

На рис. 9.10 можно наблюдать соответствующие шаблоны с использованием обычного кодирования и кода Грея.

Большая часть работ, касающихся двоично-кодированных шаблонов, нацелена на улучшение субпиксельной локализации краев полосы.

Рис. 9.10. Временное мультиплексирование: вверху шаблоны с обычным представлением разрядов, внизу – с использованием кода Грея

Полосы могут быть найдены путем простой бинаризации изображений. Двоичный порог устанавливается независимо для каждого пикселя. Необходимо получить изображение полностью освещенной сцены (белый шаблон) и неосвещенной сцены (черный шаблон). Вариантом порога для таких изображений является середина между уровнями серого, как показано на рис. 9.11, *а*. С такой бинаризацией границы могут быть обнаружены с точностью до пикселя. Тем не менее профиль перехода между белой и черной полосами в изображениях не является идеальным перепадом. Это, как правило, нелинейный профиль.

Было предложено два способа обнаружения края полосы с точностью до субпикселя.

Первый способ обнаружения края полосы состоит в том, чтобы найти нулевые пересечения второй производной изображения, перпендикулярной полосе. Проблема такого подхода состоит в нахождении оптимального размера фильтра градиента.

Альтернативный способ заключается в чередовании проецирования как нормальных, так и обратных шаблонов, т. е. положительных и отрицательных шаблонов. Затем находится точка пересечения обоих профилей и, соответственно, край полосы. Поскольку профили – нелинейные функции, используется линейная интерполяция между ближайшими точками выборки (уровни серого близлежащих пикселей). Как показано на рис. 9.11, *г*, на пересечении линии *AB* с линией *EF* находится край. Как можно видеть на рис. 9.11, *б*, пересечения обратных и нормальных профилей не всегда совпадают с вариантом двоичного порога, поэтому этот метод является более точным.

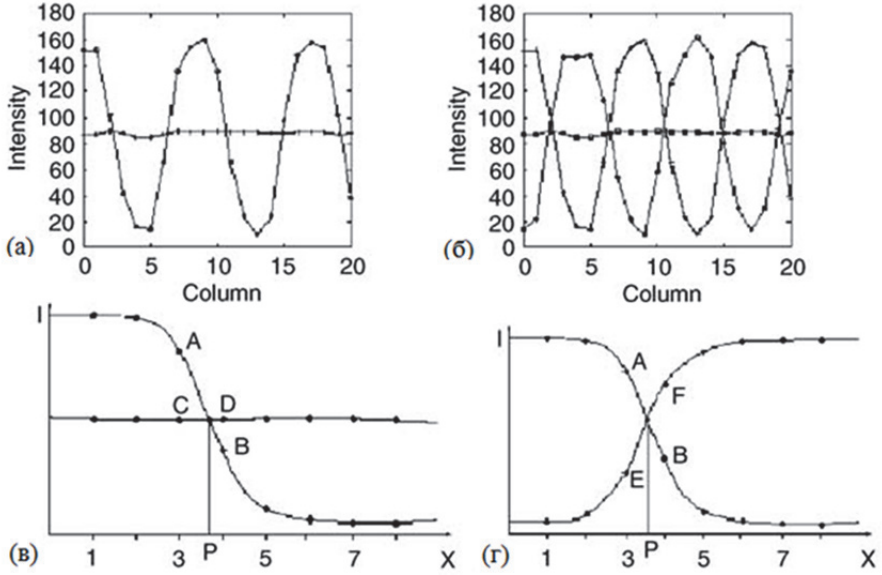


Рис. 9.11. Временное мультиплексирование:

а – вариант двоичного порога нормальной полосы шаблона; *б* – вариант двоичного порога нормальной и обратной полосы шаблона; *в* – положение полосы по обычной полосе шаблона и двоичному порогу; *г* – положение полосы, использующей обычные и обратные шаблоны

Если проецирования обратных шаблонов не требуется, линейно интерполированный нормальный профиль может пересекаться с пороговым вариантом профиля. Этот способ показан на рис. 9.11, *в*, где сегмент *AB* должен пересекаться с сегментом *CB*. Анализируя результаты эксперимента, Trobina [11] пришел к заключению, что линейная интерполяция более точная, чем использование второй производной, и с помощью нее могут быть получены лучшие результаты, если спроецировать нормальные и обратные шаблоны.

Объекты, содержащие области с различными отражающими свойствами, трудно восстановить. При проецировании шаблонов в условиях низкой освещенности отношение сигнал/шум системы уменьшается, и, следовательно, становится невозможным получить глубину в плохо отражающих областях. С другой стороны, при проецировании шаблонов с высокой интенсивностью освещения глубина из регионов с высоким коэффициентом отражения не может быть восстановлена из-

за насыщения пикселей. Таким образом, большинство методов двоичного кодирования предполагают, что эти объекты имеют *однородную отражательную* способность, в противном случае будет невозможно восстановить всю поверхность.

В 2001 г. Rocchini и другие авторы [12] ввели небольшое изменение в типичные шаблоны, закодированные с помощью кода Грэя, чтобы упростить локализацию переходов полос. С этой целью полосы кодировались *синим* и *красным* цветом вместо черного и белого. Кроме того, был введен зеленый разрез между каждой полосой шириной в один пиксель. Затем были восстановлены переходы полос для шаблона более высокого разрешения при помощи определения местонахождения зеленого разреза с субпиксельной точностью.

Методы, основанные на *N*-значных кодах. Основным недостатком схем на основе двоичных кодов является необходимость проецирования *большого количества шаблонов*. Поэтому были разработаны методы сокращения количества шаблонов *за счет увеличения числа уровней интенсивности*, используемых для кодирования полосы.

В 1998 г. Caspi и другие авторы [13] предложили многоуровневый код Грея, основанный на цвете. Расширение кода Грея основано на алфавите из n символов, где каждый символ связан с определенным цветом RGB. Этот расширенный алфавит позволяет уменьшить количество шаблонов. Например, двоичный код Грея для кодирования 2^m полос требует m шаблонов. С *N*-значным кодом Грея могут быть закодированы n^m полос с использованием того же числа шаблонов. Эта работа была очень важна, поскольку она является обобщением наиболее широко используемых стратегий кодирования временного мультиплексирования.

Предложенная модель учитывает спектр света ЖК-проектора, спектральную чувствительность 3-CCD камеры и отражательную способность поверхности. Вся модель представлена в формуле

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}}_{\vec{C}} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{rr} & a_{rg} & a_{rb} \\ a_{gr} & a_{gg} & a_{gb} \\ a_{br} & a_{bg} & a_{bb} \end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix}}_{K} \vec{P} \underbrace{\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}}_{\vec{c}} + \underbrace{\begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}}_{\vec{C}_0}, \qquad (9.8)$$

где $\vec{C}$ является инструкцией для проекции данной полосы, т. е. $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ представляет уровень черного, а $\begin{bmatrix} 255 & 255 & 255 \end{bmatrix}^T$ – бело-

го; $\vec{P}$ является нелинейным преобразованием из инструкции проекции в реально проецируемые интенсивности для каждого канала RGB; A – это матрица связи проектора и камеры. Каждый элемент a_{ij} матрицы A является сверткой спектральной чувствительности камеры для канала i со спектром света, спроецированным в канал j. Матрица A показывает перекрестные помехи между цветовыми каналами. $\vec{C}$ является вектором, содержащим значение RGB определенного пикселя с камеры. $\vec{C}_0$ является показанием камеры, соответствующим измеряемой сцене под внешним освещением. И, наконец, K – матрица поверхностных коэффициентов отражения, определенная для каждой точки сцены, спроецированной в пиксель камеры. Эта матрица содержит константу отражения для каждого канала RGB.

Основное преимущество этой модели в том, что она считает постоянные коэффициенты отражения для каждой точки сцены по трем каналам RGB. Это гораздо более реалистично, чем в моделях с учетом цветовой нейтральности сцены, которая обычно принята в большинстве систем, связанных с цветовыми схемами кодирования. В случае цветовой нейтральности матрица K является единичной для каждого пикселя. Для того чтобы рассчитать различные члены в уравнении (9.10), необходимо выполнить цветовую калибровку. С помощью этой процедуры получают A и $\vec{P}$; $\vec{P}$ является нелинейной функцией, но обратимой, поэтому она может быть представлена в виде трех справочных таблиц (по одной на каждый цветовой канал).

Цветовая калибровка необходима только один раз. Тогда матрица K получается просто: берется эталонное изображение при дневном освещении $\left(\vec{C}_w = \begin{bmatrix}255 & 255 & 255\end{bmatrix}^T\right)$, и решается уравнение (9.10). Могут осуществляться некоторые аппроксимации модели, чтобы избежать всю процедуру цветовой калибровки, как описано в работе [14].

Предложенная модель освещения позволяет оценить спроецированный цвет по данным, полученным с камеры. Это очень важно при работе с закодированными цветными полосами, так как правильная идентификация цветов непосредственно влияет на правильное декодирование. Таким образом, такая модель может быть применена к любой системе, работающей с цветом.

После экспериментов Caspi и других установлено, что N-значные коды Грея достигают точности и надежности техники двоичного кода Грея с использованием меньшего количества шаблонов.

Другой метод, который кодирует соседние полосы *N*-значными кодовыми словами, предложен Horn и Kiryati [15]. Алфавит кодов основан на нескольких уровнях серого, а не двоичного алфавита. Целью работы был поиск наименьшего набора шаблонов, который отвечает требованиям к точности определенного применения, демонстрируя лучшую производительность при определенных условиях шума. Пример использования четырехзначного кода и трех шаблонов для кодирования 64 полос Horn и Kiryati можно увидеть на рис. 9.12.

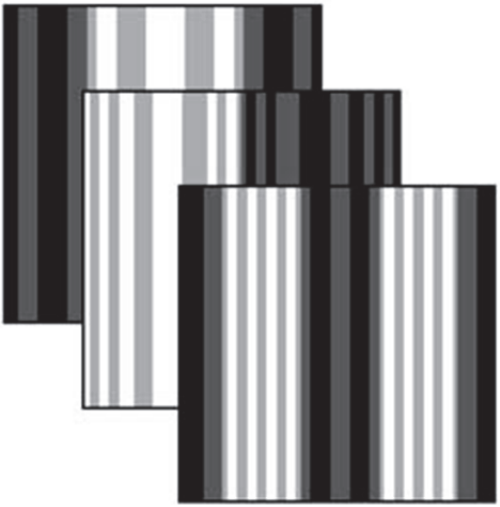


Рис. 9.12. Три шаблона, кодирующие 64 полосы
с помощью четырех уровней серого

С учетом использования алфавита из n символов код создается таким образом, чтобы последовательные кодовые слова имели расстояние Хэмминга, равное единице. Каждый элемент алфавита сопоставляется с определенным уровнем серого. Если выразить различие элементов двух последовательных кодовых слов в терминах, связанных с уровнями серого, то разница является постоянной для всех пар последовательных кодовых слов. Например, если доступно 256 уровней серого, при использовании двоичного кода Грея расстояние последовательных кодовых слов в терминах уровня серого составляет 255 или 100 %. При увеличении основания кода и поддержании его длины может быть получено больше кодовых слов, несмотря на уменьшение

расстояния в терминах доступных процентов уровней серого между последовательными единицами.

Сочетание кода Грея и фазового сдвига. Шаблоны, основанные на использовании кода Грея, а также бинарные и *N*-значные коды имеют то преимущество, что кодирование пикселя производится очень точно и не рассматривается пространственное соседство в кодировании. Тем не менее дискретный характер таких моделей ограничивает разрешение по дальности.

Методы фазового сдвига используют более высокое пространственное разрешение, так как они проецируют шаблон с периодической интенсивностью несколько раз, перемещая его в каждой проекции. Недостатком этих методов является периодический характер шаблонов, который вводит неоднозначность при определении периодов сигнала в изображении с камеры. Интеграция методов кода Грея (МКГ) с методами фазового сдвига (МФС) объединяет в себе преимущества обеих стратегий, а именно однозначное и надежное кодирование полосовых шаблонов МКГ, а также высокое разрешение МФС.

Сочетание обоих методов приводит к высокой точности восстановления 3D-профиля. Тем не менее количество проецируемых шаблонов значительно увеличивается.

В 2001 г. Gühring предложил заменить МФС на новый метод под названием «линейный сдвиг» [16], который также был совмещен с МКГ (рис. 9.13). Gühring отметил, что фазовый сдвиг имеет ряд недостатков. Например, при реконструкции поверхностей с неравномерным полем (с резкими изменениями от черного к белому) фаза не может быть точно определена. Кроме того, во многих камерах значения пикселей зависят от соседних. Чтобы избежать этой проблемы, разрешение камеры должно быть значительно выше, чем разрешение проектора. Для того чтобы избежать проблем фазового сдвига, автор предложил заменить синусоидальный периодический профиль таких методов с помощью мультиполосного шаблона, сдвигаемого несколько раз. Gühring разработал шаблон разрешением 640×640 для ЖК-проекторов, где каждый 6-й столбец белый, а остальные черные. При последовательном смещении шаблона 6 раз охватывается полное разрешение для каждой строки шаблона.

Повторяя процесс с кодированными строками шаблона, достигается использование всего разрешения шаблона. Поскольку мультиполосной шаблон также является периодическим шаблоном (дискретного характера), проецирование шаблонов кода Грея также необходимо для того, чтобы решить возникающие неоднозначности.

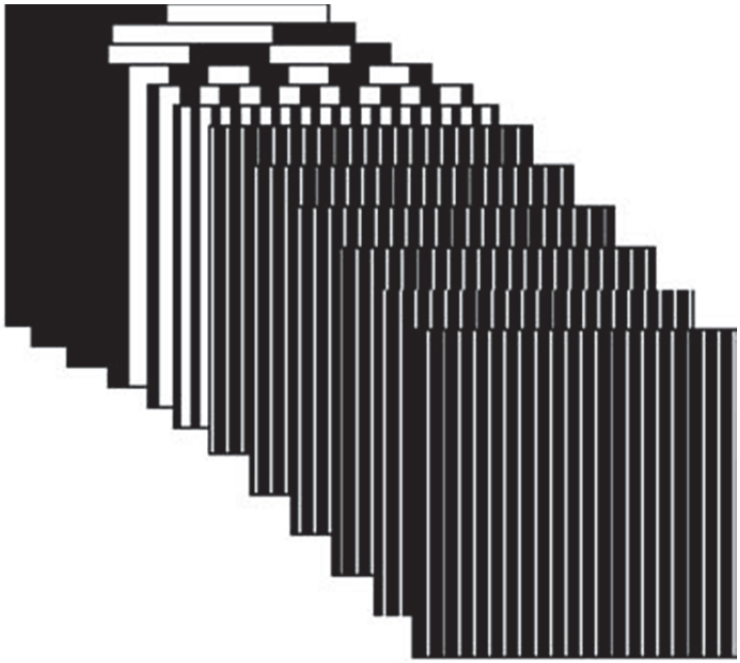


Рис. 9.13. Линейный сдвиг, использующий 6 кодовых картин Грея и 21 белый столбец, сдвинутый 6 раз

Для шаблонов, содержащих линейный сдвиг, положение пика каждой освещенной линии предназначается для нахождения его в изображении с камеры с субпиксельной точностью.

Гибридные методы. Существуют методы, основанные на проекции нескольких шаблонов, которые используют временное мультиплексирование, но также в процессе декодирования принимается во внимание пространственная информация в соседних точках.

Например, идея Kosuke Sato [17] заключалась в проецировании определенных двоичных шаблонов, строки которых имеют резкий импульс на функции автокорреляции. Шаблон проецируется несколько раз, перемещаясь по горизонтали (чем на большее количество раз смещается картина, тем больше полученное разрешение). Для каждой проекции захватывается изображение, в котором вычисляется максимальный пик автокорреляции каждой строки. Затем, когда фазовый сдвиг соответствующего проецируемого шаблона известен, пиксели, содер-

жащие такие пики, могут быть восстановлены с помощью триангуляции. По мнению автора, эта стратегия обеспечивает лучшую точность, чем проецирование и сдвиг одной щели, так как пик взаимной корреляции показывает более четкий импульс и может быть расположен более точно.

9.4. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СОСЕДСТВО

Методы этой группы имеют тенденцию концентрировать всю кодирующую схему в уникальном шаблоне. Кодовое слово, которое маркирует определенную точку шаблона, получают из окрестных точек вокруг нее. Однако этап декодирования становится более трудным, поскольку не всегда может быть определено точное пространственное соседство и могут возникнуть 3D-ошибки. Как правило, визуальными характеристиками, собранными в окрестности, являются интенсивность, цвет пикселей или группы смежных пикселей вокруг него.

Методы пространственного соседства могут быть классифицированы следующим образом:

- стратегии на основе неформального кодирования: окрестности генерируются интуитивно;
- стратегии на основе последовательностей де Брёйна: окрестности определяются с помощью псевдослучайных последовательностей;
- стратегии, основанные на М-массивах: расширение теории псевдослучайных 2D-случаев.

Стратегии, основанные на неформальном кодировании. Некоторые авторы предлагают методы, основанные на шаблоне, устроенном так, что он разделен на определенное число областей, в которых часть информации генерирует другое кодовое слово без использования какой-либо математической теории кодирования. Например, в 1993 г. Maruyama Abe [18] разработал закодированный двоичный шаблон с вертикальными щелями, содержащий произвольно распределенные разрезы. Система была разработана для измерения поверхностей с плавными изменениями глубины. В случайных разрезах создан набор линейных сегментов, так что положение сегмента в шаблоне определяется собственной длиной и длинами шести смежных сегментов. Этап декодирования начинается с сопоставления каждого сегмента шаблона с наблюдаемыми щелями одинаковой длины. Для каждого сегмента можно найти несколько паросочетаний. Для того чтобы выяснить правильность соответствия, нужно рассмотреть длины шести соседних

сегментов. После того как все совершенные паросочетания найдены, применяется алгоритм растущей области для того, чтобы определить непарные сегменты. Основным недостатком этого метода является то, что длина сегмента может меняться в зависимости от расстояния между камерой, поверхностью и оптикой обоих устройств: камеры и проектора. Все эти факторы значительно ограничивают устойчивость и безотказность системы.

Ito и Ishii в 1994 г. [19] представили трехуровневый шахматный шаблон. Предлагаемый шаблон – уникальная сетка, где каждая клетка окрашена одним из трех возможных уровней интенсивности. Уровень интенсивности клетки выбирают таким образом, чтобы она отличалась от четырех ближайших соседей. Узел определяется как пересечение между четырьмя клетками шаблона. Основной код узла определяется уровнями интенсивности четырех соседних клеток. Так, используются три уровня интенсивности, число различных основных кодов 18 ($3 \times 2 \times 2 \times 2$). Субкод узла определяется числом комбинации основных кодов четырех соседних узлов. Субкод представляет собой кодовое слово для каждой границы пересечения шаблона. Поэтому, для того чтобы декодировать позицию наблюдаемого узла, необходимо проанализировать пространственную окрестность 12 клеток сетки. Отметим также, что кодируются обе пространственные координаты вершин. Для того чтобы получить надежную схему кодирования, все возможные субкоды должны появиться в шаблоне только один раз. Однако Ito и Ishii не изучали автоматическую генерацию такого шаблона, поэтому они допускали повторы субкодов. Авторы использовали эпиполярные ограничения между камерой и проектором для того, чтобы различать узлы, которые разделяют тот же субкод.

Техника, предложенная Boyer и Kak [20], использует шаблон, сформированный вертикальными щелями, закодированными тремя основными цветами (красный, зеленый и синий) и отделенными черными полосами. Последовательность цветных щелей была разработана таким образом, чтобы при разделении шаблона на подшаблоны определенной длины ни один из них не повторялся.

Стратегии, основанные на последовательностях де Брёйна (de Bruijn). Методы проекций шаблона, представленные в предыдущем подразделе, как правило, генерируются с помощью алгоритмов перебора для того, чтобы получить желаемые характеристики. В этом пункте представлена группа шаблонов, закодированных с помощью хорошо определенного типа последовательностей, называемых последовательностями де Брёйна.

Последовательность де Брёйна порядка m по алфавиту n символов – круговая последовательность длины n^m, которая содержит каждую подстроку длины m только один раз. Аналогично псевдослучайной последовательности ее длина равна $n^m - 1$, потому что это она не содержит сформированную нулевую подстроку [21].

Этот вид последовательности может быть получен путем поиска цепей Эйлера или гамильтоновых циклов по различным видам графов де Брёйна [22]. Например, в графе, показанном на рис. 9.14, все слова длины $m-1$ (с m, равным 4) включены в вершины. Эйлерова цепь – это путь, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же вершине и проходящий через все вершины только один раз. Собирая краевые метки в такой схеме, можно получить последовательность де Брёйна порядка m, т. е. $S = 1000010111101001$.

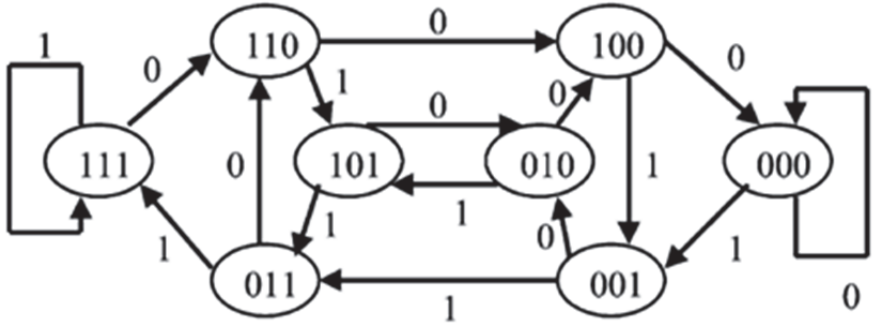


Рис. 9.14. Стратегия кодирования де Брёйна: пример графа де Брёйна, построенный по последовательности де Брёйна

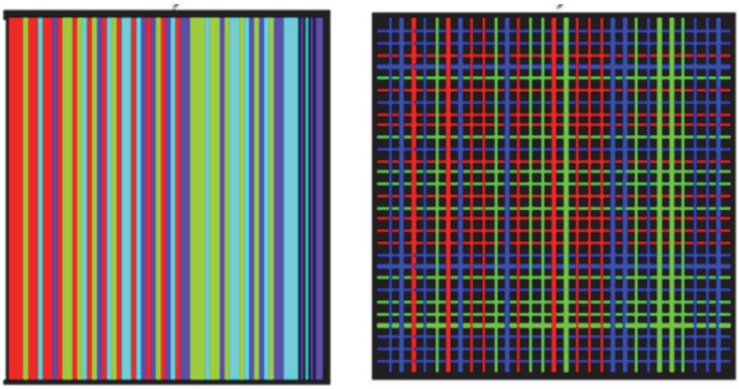
Если гамильтонов цикл ищется по тому же самому графу (путь, который проходит через все вершины только один раз и начинается и заканчивается в той же самой вершине), получают последовательность де Брёйна порядка $m-1$ ($S = 00101110$). Интересным свойством последовательности де Брёйна является то, что она представляет собой функцию автокорреляции Kat с уникальным пиком в нулевой момент.

Можно сказать, что это лучшая автокорреляционная функция, которая может быть получена, и это означает, что она явно не коррелирована. Были использованы псевдослучайные последовательности для кодирования шаблонов на основе столбцов (рис. 9.15, *а*) или строк линий и клетчатых шаблонов.

В следующих пунктах объясняются некоторые работы, в которых используются последовательности де Брёйна для кодирования шаблонов.

Monks и другие авторы [23] разработали шаблон, основанный на горизонтальных цветных полосах с целью восстановления динамических сцен. Всего было использовано 6 цветов для окраски щелей, разделенных черными полосами. Окраска щелей была выбрана так, что каждая подпоследовательность из трех цветов появлялась в шаблоне только один раз. Таким образом, использовалась последовательность де Брёйна третьего порядка, основанная на алфавите из шести символов. Данная последовательность была взята из статьи, опубликованной Hügli и Maitre [24].

Позже Salvi и другие авторы предложили шаблон, состоящий из сетки тонких вертикальных и горизонтальных щелей [25]. Авторы утверждают, что кодирование сетки является лучшим решением, потому что точки сетки могут быть легко сегментированы. Кроме того, окрестности сетки вокруг точки могут быть найдены только с помощью отслеживания ребер сетки. Шаблон был разработан как сетка 29×29 при использовании трех различных цветов для горизонтальных щелей и более трех цветов для вертикальных щелей (рис. 9.15, *б*).



а *б*

Рис. 9.15. Шаблон с 64 вертикальными щелями, закодированными с помощью последовательности де Брёйна третьего порядка и четырех цветов (*а*); сетка из 29 × 29 щелей, которая кодируется последовательностью де Брёйна третьего порядка с тремя цветами

Назначение цвета было сделано с использованием последовательности де Брёйна третьего порядка (свойство размера окна) и для строк, и для столбцов сетки. Точки пересечения сетки восстанавливаются после расшифровки их положения в шаблоне.

В 2002 г. Zhang и другие [14] разработали метод, основанный на кодировании де Брёйна, который обеспечивал хорошее качество. Предлагаемый шаблон состоит из 125 вертикальных щелей, которые окрашены с использованием последовательности де Брёйна третьего порядка и восьми цветов (равные смежные цвета в полученной последовательности были удалены). Zhang и другие изучали проблемы, которые могут привести к неоднородностям и разрывам на измеряемой поверхности при наблюдении проецируемого шаблона. Как и другие ранее отмеченные авторы, они согласились, что удаления и нарушения могут появляться в наблюдаемой последовательности среди щелей. Чтобы согласовать наблюдаемую последовательность и спроецированную, было использовано динамическое программирование, как в работе Chen и др. Однако Zhang и другие указали, что простое динамическое программирование успешно только тогда, когда измерительная поверхность неизменна, т. е. у щелей не могут появляться дефекты. Чтобы устранить такое ограничение, они разработали мультипроходное динамическое программирование. Zhang и др. также расширили свою технику на парадигму временного мультиплексирования, проецируя шаблон несколько раз, последовательно перемещая его и определяя местонахождение щелей с субпиксельной точностью в каждой итерации. Таким образом, увеличилось общее разрешение системы.

Стратегии, основанные на М-массивах. Есть ряд авторов, которые приняли теорию идеальных карт для кодирования уникального шаблона, используя в своих интересах особые математические свойства этих матриц.

Пусть M матрица размеров $R \times V$, где каждый элемент взят из алфавита K символов. Если M обладает свойством окна, т. е. каждая отличающаяся подматрица размеров $n \times m$ появляется только один раз, то M – идеальная карта. Если M содержит все подматрицы $n \times m$, за исключением одной, заполненной нулями, то M называется М-массивом или псевдослучайным массивом [26, 27]. Этот вид матрицы широко используется в шаблонах кодирования, поскольку свойство окна позволяет каждой отличной от других подматрице быть связанной с абсолютной позицией во множестве.

М-массивы могут быть построены путем складывания псевдослучайных последовательностей. Для того чтобы создать М-массивы размером $n_1 \times n_2$, требуются псевдослучайные последовательности длиной $n = 2^{k_1 k_2} - 1$, где $n = n_1 n_2$, $n_1 = 2^{k_1} - 1$ и $n_2 = n / n_1$. Результирующий массив имеет свойство окна $k_1 \times k_2$.

Процедура заключается в следующем: первый элемент последовательности помещают в левую верхнюю вершину массива. Элементы последовательности друг за другом записываются в массиве после главной диагонали и продолжаются с противоположной стороны при достижении края. Например, учитывая двоичную псевдослучайную последовательность четвертого порядка 010011000101111, длина которой $n = 15$, хорошие параметры для построения М-массива – $n_1 = 2^2 - 1 = 3$ и $n_2 = 15/3 = 5$. Затем получается М-массив 3×5 со свойством окна 2×2. Следует отметить, что М-массивы также разделяют круговое свойство псевдослучайных последовательностей. Таким образом, необходимо закончить множество, добавляя вправо первые $k_2 - 1$ колонок и первые $k_1 - 1$ строк. Полное множество показано в формуле (9.9).

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (9.9)$$

Основным различием между методами, включенными в эту группу, является то, каким образом элементы массива представлены в шаблоне. Некоторые авторы предпочитают определять шаблон как массив цветных точек, где каждый цвет обозначает один из символов алфавита кодирования. Другие авторы предпочитают определять различные формы для каждого символа. При восприятии проецируемого шаблона алгоритмы должны выполнить восстановление максимального количества видимых окон. Это важный шаг в таких системах. Так как используется пространственное соседство, не все шаблоны будут видны с точки наблюдения камеры из-за теней и окклюзии. Надежность этих методов зависит от правильного декодирования видимых частей с использованием свойств М-массивов.

Использование массивов для кодирования шаблона означает, что используется двумерная схема кодирования, потому что каждая точка шаблона имеет отличное от других кодовое слово, которое кодирует вертикальные и горизонтальные координаты. Так как кодирование сосредоточено в одном шаблоне, эти методы пригодны для измерения динамических сцен. Тем не менее некоторые авторы предпочитают проецировать дополнительные шаблоны для того, чтобы облегчить сегментацию части системы или провести нормализацию интенсивностей или цвета. В этом случае система ограничена статическими сценами. В любом случае число проецируемых шаблонов всегда меньше по сравнению с методами временного мультиплексирования. Следующие пункты адресованы существующим моделям, основанным на М-массивах, где были рассмотрены наиболее актуальные из них.

В 1997 г. Spoelder и другие авторы начали развивать прототип для измерения формы роговицы [28] с помощью проецирования бинарного М-массива 65×63 элементов. Голубой и желтый цвета использовались для кодирования двоичных значений М-массива. Структура разработанного шаблона является шахматной, где используются белые квадраты для размещения элементов М-массива. На рис. 9.16 можно наблюдать часть шаблона.

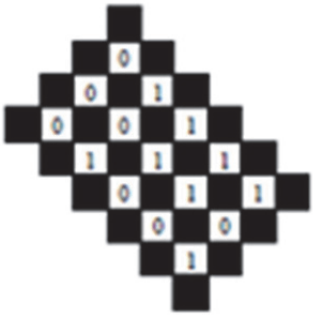


Рис. 9.16. Пример шаблона, основанного на М-массивах: двоичный М-массив с расположенными в шахматном порядке символами 0 и 1, заменяющими два разных цвета

Черные квадраты были введены для того, чтобы облегчить сегментацию шаблона с изображения камеры. Из-за сложных отражательных характеристик роговицы шаблон из изображения с камеры имеет множественные потери данных. Это потребовало проектирования сложного алгоритма сегментации. Во-первых, точки пересечения находятся путем фильтрации маски. Во-вторых, каждая обнаруженная точка пересечения маркируется путем наблюдения соседних цветов без черных квадратов,

и используется свойство окна. Затем строится граф путем связывания соседей. Этот шаг приводит к получению ряда разрозненных подшаблонов, которые должны быть согласованы с оригинальным проецируемым шаблоном. Каждый подшаблон располагается на проецируемом шаблоне в позиции, в которой достигается минимальное расстояние Хэмминга. Элементы, которые не вписываются в оригинальный шаблон, должны быть исправлены.

Одна из самых известных работ этой группы была представлена в 1992 г. Griffin и другими [29]. Авторы определили систематический процесс построения массива максимального размера $n \times m$ на основе алфавита символов b с некоторыми ограничениями: каждый элемент массива имеет уникальное кодовое слово, образованное собственным значением и значениями, соответствующими его четырем соседям (север, юг, восток и запад). Как видно, такой массив – частный случай идеальных карт, так как он имеет свойство окна 3×3, но отображены не все возможные окна. Некоторые авторы называют эти массивы идеальными подкартами. Процесс конструирования таких матриц заключается в следующем: во-первых, пусть Vhm будет последовательность на основе алфавита b, содержащего все возможные тройки символов (последовательность де Брёйна). Пусть Vvm будет вектор, выступающий последовательностью всех пар символов алфавита b. Следовательно, первая строка матрицы $f_{oi} = Vhm_i$.

Остальные матричные элементы рассчитываются по формуле (9.10). Индекс строки обозначается i и варьируется от нуля до длины Vhm, а j – это индекс столбца, который изменяется от нуля до длины Vvm:

$$f_{ij} = 1 + \left((f_{i-1j} + Vvm_j) mod\ b \right). \qquad (9.10)$$

Например, если берется алфавит $b = \{1, 2, 3\}$, то получаются следующие векторы:

$$Vhm = \left(33132131123122121113323222333 \right), \qquad (9.11)$$

$$Vvm = \left(3121132233 \right), \qquad (9.11а)$$

тогда с помощью алгоритма генерируется матрица, показанная на рис. 9.17.

Для своих экспериментов Griffin и Yee генерируют массив 18×66, используя алфавит из четырех символов {1, 2, 3, 4}. Для того чтобы спроецировать этот массив, были приняты две стратегии. Первая состояла в представлении каждого элемента алфавита отдельным цветом. Тогда проецируемая картина определялась как массив цветных точек. Второй подход состоял в определении формы набора примитивов для каждого элемента алфавита. Пример таких примитивов показан на рис. 9.17.

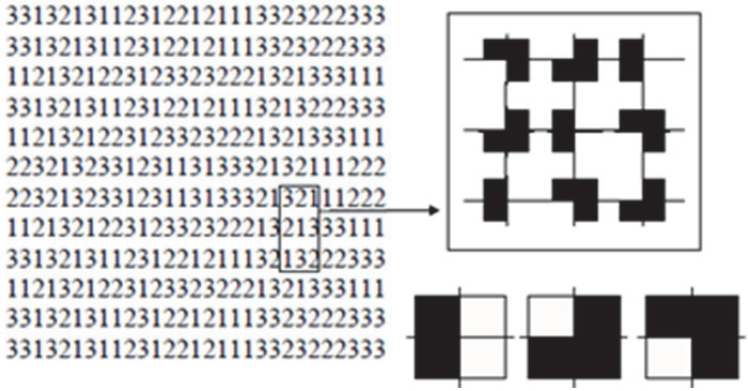


Рис. 9.17 Пример шаблона, основанного на М-массивах: *б*) пример М-массива на основе трех символов, предложенных Griffin и соавторами, три формы примитивов для представления символов алфавита {1, 2, 3}

После того как фон шаблона был окрашен в черный цвет, белый образовывал сетку 18×66 с одним из примитивов в каждой точке пересечения. Представление окна 3×3 М-массива показано на рис. 9.18. Это второе представление М-массива гораздо более надежно в присутствии цветных объектов.

Несколько лет спустя, в 2001 г. Hsieh представил аналитический метод для декодирования положения данного кодового слова массива Griffin [30], используя только простые арифметические операции с элементами окна и быстрое декодирование шаблона.

В 1998 г. Davies и Nixon [31] предложили уникальный шаблон цветных точек для получения формы в динамичных сценах. В частности, система была применена для автоматической идентификации речи

путем проецирования рисунка на лицо диктора в передаваемом видеосигнале. Эти точки кодируются следующим способом (Griffin). Голубой, желтый и пурпурный цвета были выбраны для изображения точек, расположенных шестиугольником в шаблоне. В этой технике алгоритм сегментации применяется для получения координат изображения с видимых точек. Во-первых, фильтр-детектор ребер используется для того, чтобы найти контуры предполагаемых эллипсов, соответствующих проецируемым круглым точкам. Для каждой эпиполярной линии на изображении с камеры все искомые эллипсы располагаются около линии. После этого точные позиции эллипсов ищутся с помощью адаптированного алгоритма преобразования Hough. Когда все возможные эллипсы расположены, процесс декодирования, используя свойство окна, проводит соответствие между изображением с камеры и проецируемым шаблоном.

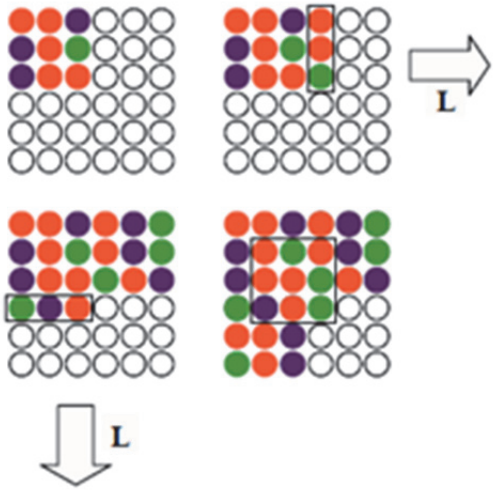


Рис. 9.18. Примеры шаблонов, основанных на М-массивах: алгоритм Morano для генерации М-массивов с представлением цветных пятен

Один из наиболее интересных методов из этой группы был дан Morano и другими авторами [32]. Они предложили алгоритм для построения М-массива, фиксируя длину алфавита, свойство размера

окна, размеры массива и расстояние Хэмминга между каждым окном. Ранее все методы работали с единичным расстоянием Хэмминга, которое не позволяло корректировать ошибки. Фактически массивы, используемые Morano и другими, являются просто идеальными подкартами, поскольку включены не все возможные окна.

Алгоритм, используемый для генерации массивов фиксированных свойств, основан на подходе грубой силы. Например, при построении М-массива на основе трех цветов со свойством окна 3×3 существуют следующие шаги: во-первых, подмассив 3×3 выбирается случайным образом, и строятся вершины, находящиеся в левом верхнем углу М-массива. После этого последовательно добавляются случайные столбцы 1×3 справа от этого начального подмассива, поддерживая целостность свойства окна массива и расстояние Хэмминга между окнами. После этого строки 3×1 добавляются ниже начального подмассива аналогичным образом.

Затем как горизонтальные, так и вертикальные процессы повторяются, увеличивая начальные координаты на единицу, пока весь массив не будет заполнен. Всякий раз, когда процесс достигает состояния, в котором нет возможных элементов, которые могут быть размещены для достижения глобального свойства окна, массив очищается и алгоритм начинает работу снова с другим начальным подмассивом. Основные этапы алгоритма представлены на рис. 9.18, результат генерации шаблона на – рис. 9.19. Исследование производительности данного алгоритма показало, что с помощью М-массивов из 45×45 пикселей со свойством окна 3×3 с использованием трех или более цветов могут быть получены основные расстояния Хэмминга между окнами от 1 до 4. Кроме того, в большинстве случаев может быть найдено несколько решений.

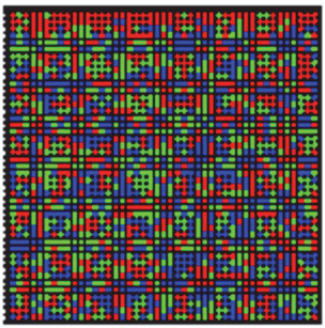


Рис. 9.19. Шаблон, состоящий из цветных точек, закодированных с помощью М-массива 45 × 45 элементов и трех цветов

После того как на измерительную поверхность проецируется генерируемый шаблон, она должна быть восстановлена и должны быть хорошо обозначены точки для того, чтобы найти соответствия между камерой и проектором. К каждой точке, содержащейся в девяти окнах, авторы применили алгоритм голосования, где каждое окно предлагает кодовое слово длиной 9 (которое указывает свою позицию в шаблоне) для каждого из его элементов. Тогда каждая наблюдаемая точка имеет до девяти кодовых слов, предложенных каждым окном, к которому она принадлежит. Кодовое слово с максимальным количеством голосов является более надежным, поэтому оно и используется для обозначения точки. Результаты показали, что при использовании расстояния Хемминга, равного 3 вместо 1, количество неверно маркированных точек уменьшается из-за возможности исправления одной ошибки для каждого окна.

9.5. ПРЯМОЕ КОДИРОВАНИЕ

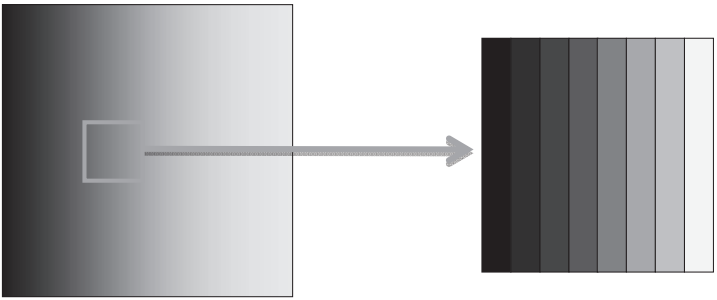
Существуют определенные способы создания шаблона таким образом, что каждый пиксель может быть промаркирован с помощью информации, представленной в нем. Таким образом, полное кодовое слово для данной точки содержится в уникальном пикселе. Для того чтобы достичь этого, необходимо использовать либо большой диапазон значений цвета, либо вводить периодичность.

Далее рассматриваются две группы методов, использующие прямое кодирование:

- кодирование на основе уровней серого: спектр серого используется для кодирования точки рисунка;
- кодирование на основе цвета: эти методы пользуются широким спектром цветов.

Кодирование на основе уровней серого. Carrihill и Hummel [33] разработали систему под названием «Относительная интенсивность датчика глубины». Она состоит из линейного клина, расположенного вдоль вертикальных столбцов, содержащих шкалу уровней серого. Шаблон можно увидеть на рис. 9.19. Коэффициент рассчитывается между каждым пикселем воспринимаемого клина и значением того же пикселя при постоянном освещении. Это соотношение связано с колонкой шаблона, который был спроецирован в пикселе. Авторы использовали диапроектор и монохромную камеру с восемью битами интенсивности на пиксель. Цель авторов настроить установку так, чтобы зависимость между

коэффициентом и номером столбца изображения была почти линейной. Тем не менее точность в их измерениях низкая, средняя погрешность около 1 см (Carrihill и Hummel). Это вызвано высокой чувствительностью камеры к шуму и нелинейностью проектора.



Датчик соотношения интенсивности: плавное изменение от черного к белому

Каждая полоса определяется ее собственной интенсивностью

Рис. 9.19. Прямое кодирование в оттенках серого

В 2000 г. Miyasaka и другие авторы [34] воспроизвели датчик глубины относительной интенсивности с помощью ЖК-проектора и 3CCD камеры. При таком подключении были получены более точные результаты. Авторы учли, что коэффициент отражения точек поверхности не являлся постоянным для всех частот света и каждый канал RGB камеры обрабатывался независимо.

В 1995 г. Chazan и Kiryati [35] провели эксперименты с использованием расширения метода Carrihil и Hummel, называемого датчиком глубины пирамидальной относительной интенсивности, также известным как пилообразный датчик. Мотивацией этого нового подхода стала высокая чувствительность к шуму оригинального метода. Широкий спектр интенсивностей проецируется только в одном кадре, камера должна иметь возможность воспринимать такой спектр почти линейно, что очень трудно достичь с помощью ЖК-проектора. Новый метод заключался в последовательном проецировании линейного клина, увеличивая его период. Таким образом, первый шаблон является клином с простым периодом от черного до белого. Второй содержит два линейных клина, третий содержит четыре клина и т. д. В конце модель содержит $2n$ линейных клиньев. Так как каждый период линейного клина является переходом от черного до белого, то в каждом периоде по-

следнего шаблона используется меньше уровней серого. Это означает, что соседние уровни серого в последнем шаблоне менее похожи и легко различимы. Однако, поскольку присутствует периодичность, уровней серого некоторого пикселя в последнем воспринимаемом шаблоне не достаточно, чтобы восстановить его положение. Для разрешения неоднозначности рассматривались ранее используемые модели. Эта стратегия очень похожа на метод временного мультиплексирования, но в этом случае точные кодовые слова не восстанавливаются. Кроме того, поскольку резкие переходы между периодами могут привести к большим ошибкам, каждая периодическая структура проецируется дважды, сдвигаясь на половину периода. При чтении уровней серого, близких к переходному периоду (черный или белый), используется соответствующий смещающийся шаблон. Для каждого проецируемого шаблона захватывается (фиксируется) изображение сцены. Затем вычисляется отношение интенсивностей для каждого изображения по отношению к постоянной светового изображения. Пилообразный датчик более точный, чем классический коэффициент интенсивности датчика глубины. Эксперименты, проведенные авторами на расстоянии около 80 см, показывают, что типичные ошибки в 1 см при использовании датчика глубины отношения интенсивности могут быть снижены до 1 мм с использованием пирамидального отношения интенсивности. Тем не менее количество проецируемых шаблонов существенно возрастает.

Кодирование на основе цвета. Методы, принадлежащие этой группе, используют тот же принцип, что рассмотренные в предыдущем пункте. Тем не менее для кодирования пикселей вместо уровней серого используется цвет. Например, Tajima и Iwakawa [36] представили модель радуги. Большой набор вертикальных узких щелей был закодирован с различными длинами волн так, что проецировалась большая выборка спектра от красного до синего. Для того чтобы спроецировать этот спектр, используется нематический жидкий кристалл для дифракции белого света.

Изображения захватываются монохроматической камерой с 11 битами глубины интенсивности. Были взяты два изображения сцены с двумя различными цветовыми фильтрами. Вычислив соотношение между двумя изображениями, получаем индекс для каждого пикселя, который не зависит ни от освещения, ни от цвета сцены.

В 1999 г. Sato представил мультиспектральные проецируемые шаблоны [37]. В этой работе автор обсуждал сложную оптическую систему, необходимую для поиска диапазона радуги Tajima. Sato предложил

новый метод, который нуждается только в ЖК-проекторе и CCD камере. Кроме того, новая методика может устранить цвет измерительной поверхности так, чтобы результаты не пострадали от спектральной отражательной способности поверхности. Техника состояла в проецировании периодического радужного шаблона три раза, сдвигая фазу на 1/3 своего периода в каждой проекции (рис. 9.20). Дополнительные изображения был синтезированы некоторой линейной комбинацией из трех захваченных изображений.

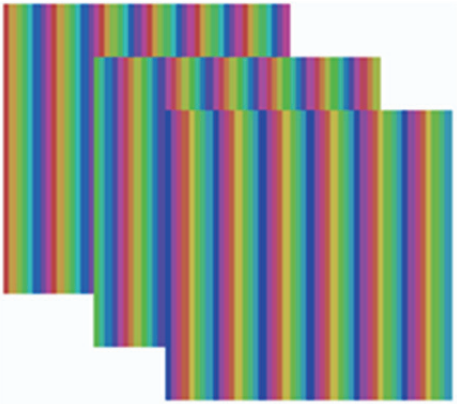


Рис. 9.20. Три периодические картины, предложенные Sato

Затем Sato показал, что значение оттенка каждого пикселя синтезированного изображения равно проецируемому значению оттенка в первом шаблоне. Таким образом, может быть сделано соответствие между синтезированными пикселями изображения и прогнозируемыми столбцами радуги. Для того чтобы получить хорошее разрешение, шаблон должен быть периодическим, так как идентификация периодов является ключевым моментом на стадии декодирования.

Сравнение стратегий кодирования

Временное мультиплексирование было первым способом кодированного структурированного освещения, которое используется для получения 3D данных о неизвестной поверхности. Преимущества методов этой группы: простота реализации, высокое пространственное разрешение и высокая точность 3D измерений, которые могут быть достигнуты. Основным недостатком является их неприменимость к ди-

намическим поверхностям, так как должны быть спроецированы несколько шаблонов.

Пространственное кодирование окрестности – вторая большая группа кодированных структурированных легких методов. Преимущество по сравнению с временным мультиплексированием заключается в том, что такие стратегии в большинстве случаев позволяют измерять движущиеся поверхности. Однако, поскольку кодирование должно быть сконцентрировано в уникальной пространственной комбинации, пространственное разрешение ниже.

Прямые методы кодирования могут быть использованы для достижения большого пространственного разрешения. Тем не менее эти методы имеют множество недостатков: во-первых, ограниченный динамический диапазон проектора вызывает интеграцию интенсивностей смежных пикселей; во-вторых, ошибки появляются вследствие нелинейности изменения интенсивности света различных проецируемых цветов и глубины измерительной поверхности. Наконец, ошибки квантования, вносимые в камеру, очень чувствительны к шуму. Таким образом, нелегко достичь точного определения каждой проецируемой интенсивности или цвета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хорн Б.К.П.* Зрение роботов: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 487с., ил.

2. *Грузман И.С.*, *Киричук В.С.*, *Косых В.П.*, *Перетягин Г.И.*, *Спектор А.А.* Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.

3. *Юрин Д.В.* К вопросу о точности восстановления трехмерной сцены при стереоизмерениях. Сайт imaging.cs.msu.su [Электронный ресурс] – Режим доступа – imaging.cs.msu.su/~yurin/stereo_accuracy.pdf (Дата обращения: 6.07.2015)

4. *Витриченко Э.А.* Методы исследования астрономической оптики. – М.: Наука, 1980. – 152 с.

5. *Song Zhang*. High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement. – Abstract of the Dissertation. – Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. – Stony Brook University. – 2005. – Pp. 127.

6. *Скворцов А.В*. Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002.

7. *J. Salvi*, *J.i Pages*, *J. Batlle*. Pattern codification strategies in structured light systems // Pattern Recognition 37 (2004). – Pp. 827–848.

8. *Posdamer J.L.* Surface measurement by space-encoded projected beam systems / J.L. Posdamer, M.D. Altschuler // Comput. Graph. Image Process. – 1982. – Vol. 18. – № 1. – Pp. 1–17.

9. Increasing of Accuracy of Definition of Coordinates in Robotic Vision / V.I. Guzhov, S.P. Ilinykh, A.R. Vagizov, R.A. Kuznetsov // PROCEEDINGS RFBR and DST Sponsored «The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics» 10–13 September, 2011. – Pp. 184–187.

10. *Inokuchi S.* Range imaging system for 3-D object recognition / S. Inokuchi, K. Sato, F. Matsuda // Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition. – 1984. – Pp. 806–808.

11. *Trobina M.* Error model of a coded-light range sensor, Technical Report, Communication Technology Laboratory, ETH Zentrum, Zurich, 1995.

12. *Rocchini C.* A low cost 3D scanner based on structured light / C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno // A. Chalmers, T.-M. Rhyne (Eds.), EG 2001 Proceedings, Blackwell Publishing, Oxford. – 2001. – Vol. 20. – № 3. – Pp. 299–308.

13. *Caspi D.* Range imaging with adaptive color structured light / D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir // Pattern Anal. Mach. Intell. – 1998. – Vol. 20, № 5. – Pp. 470–480.

14. *Zhang L*. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming / L. Zhang, B. Curless, S.M. Seitz // International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, Padova, Italy – 2002. – Pp. 24–26.

15. *Horn E*. Toward optimal structured light patterns / E. Horn, N. Kiryati // Image Vision Comput. – 1999. – Vol. 17. – № 2. – Pp. 87–97.

16. *Gühring J.* Dense 3-d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components / J. Gühring // Videometrics Opt. Meth. 3D Shape Meas. – 2001. – Vol. 4309. – Pp. 220–231.

17. *Sato K*. Range imaging based on moving pattern light and spatio-temporal matched filter / K. Sato // IEEE International Conference on Image Processing – 1996. – Vol. 1. – Pp. 33–36.

18. *Maruyama M.* Range sensing by projecting multiple slits with random cuts / M. Maruyama, S. Abe // Pattern Analy. Mach. Intell. – 1993. – Vol. 15. – № 6. – Pp. 647–651.

19. *Ito M*. A three-level checkerboard pattern (tcp) projection method for curved surface measurement / M. Ito, A. Ishii // Pattern Recognition. – 1995. – Vol. 28, №1. – Pp. 27–40.

20. Boyer K.L. Color-encoded structured light for rapid active ranging / K.L. Boyer, A.C. Kak // IEEE Trans. Pattern Analy. Mach. Intell. – 1987. – Vol. 9. – № 1. – Pp. 14–28.

21. *MacWilliams F.J.* Pseudorandom sequences and arrays / F.J. MacWilliams, N.J.A. Sloane // Proc. IEEE. – 1976. – Vol. 64. – № 12. – Pp. 1715–1729.

22. *Fredricksen H.* A survey of full length nonlinear shift register cycle algorithms / H. Fredricksen // Soc. Ind. Appl. Math. Rev. – 1982. – Vol. 24. – № 2. – Pp. 195–221.

23. *Monks T*. Improved stripe matching for colour encoded structured light / T. Monks, J. Carter // Fifth International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns. – 1993. – P. 476 – 485.

24. *Hügli H.* Generation and use of color pseudo random sequences for coding structured light in active ranging / H. Hügli, G. Maitre // Proceedings of Industrial Inspection. – 1989. – Vol. 1010. – Pp. 75–82.

25. *Salvi J.* A robust-coded pattern projection for dynamic 3d scene measurement / J. Salvi, J. Batlle, E. Mouaddib // Pattern Recognition Lett. – 1998. – Vol. 19. – Pp. 1055–1065.

26. *MacWilliams F.J.* Pseudorandom sequences and arrays / F.J. MacWilliams, N.J.A. Sloane // Proc. IEEE. – 1976. – Vol. 64, №12. – Pp. 1715–1729.

27. *Etzion T.* Constructions for perfect maps and pseudorandom arrays / T. Etzion // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1988. – Vol. 34. – № 5. – Pp. 1308–1316.

28. *Spoelder H.J.W*. Some aspects of pseudo random binary array-based surface characterization / H.J.W. Spoelder, F.M. Vos, E.M. Petriu, F.C.A. Groen // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2000. – Vol. 49. – № 6. – Pp. 1331–1336.

29. *Griffin P.* Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition / P. Griffin, L. Narasimhan, S. Yee // Pattern Recognition. – 1992. – Vol. 25. – № 6. – Pp. 609–616.

30. *Hsieh Y.C.* Decoding structured light patterns for three-dimensional imaging systems / Y.C. Hsieh // Pattern Recognition. – 2001. – Vol. 34. – Pp. 343–349.

31. *Davies C.J.* A hough transform for detecting the location and orientation of 3-dimensional surfaces via color encoded spots / C.J. Davies, M.S. Nixon // IEEE Trans. systems, man cybernet. – 1998. – Vol. 28. – № 1. – Pp. 90–95.

32. *Morano R.A.* Structured light using pseudorandom codes / R.A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, J. Nissanov // Pattern Analy. Mach. Intell. – 1998. – Vol. 20. – № 3. – Pp. 322–327.

33. *Carrihill B.* Experiments with the intensity ratio depth sensor / B. Carrihill, R. Hummel // Computer Vision, Graphics and Image Processing, Academic Press, New York. – 1993. – Vol. 32. – Pp. 337–358.

34. *Miyasaka T.* High speed 3-D measurement system using incoherent light source for human performance analysis / T. Miyasaka, K. Kuroda, M. Hirose, K. Araki // Proceedings of the 19th Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, The Netherlands, Amsterdam. – 2000. – Pp. 65–69.

35. *Chazan G.* Pyramidal intensity-ratio depth sensor / G. Chazan, N. Kiryati // Technical Report 121, Center for Communication and Information Technologies, Department of Electrical Engineering, Technion, Haifa, Israel. – October 1995.

36. *Tajima J.* 3-D data acquisition by rainbow range finder / J. Tajima, M. Iwakawa // International Conference on Pattern Recognition. – 1990. – Pp. 309–313.

37. *Sato T.* Multispectral pattern projection range finder / T. Sato // Proceedings of the Conference on Three-Dimensional Image Capture and Applications II, Vol. SPIE, San Jose, California. – 1999. – Vol. 3640. – Pp. 28–37.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
1. Классификация методов 4
2. Восстановление 3D-объекта по срезам (slicing) 7
3. Контактные 3D-сканеры 11
4. Использование датчиков 14
5. Определение времени прохождения световой волны 19
5.1. Устройства на основе лазерных дальномеров 19
5.2. Устройства на основе фотодиодных матриц 24
6. Триангуляционные лазерные сканеры 27
7. Пассивные стереосистемы 31
8. Погрешность измерения рельефа с помощью триангуляционных методов 41
9. Структурированная подсветка 45
9.1. Преобразование координат 47
9.2. Проецирование точек, линий, сеток 49
9.3. Стратегия временного мультиплексирования 52
9.4. Пространственное соседство 62
9.5. Прямое кодирование 73
Библиографический список 78

Гужов Владимир Иванович

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
3D-ПРОФИЛЯ ОБЪЕКТОВ

КОНТАКТНЫЕ, ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ
СТРУКТУРИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Учебное пособие

Выпускающий редактор *И.П. Бровановa*
Корректор *Л.Н. Киншт*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 04.09.2015. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.
Уч.-изд. л. 4,88. Печ. л. 5,25. Изд. № 166. Заказ № 1251. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20