

Общая характеристика работы

Описание фундаментальной научной задачи

Задача извлечения информации о трехмерной структуре сцены с использованием одно- и многокамерной съемки является одной из ключевых задач компьютерного зрения и имеет огромное число научных и инженерных областей применения. Среди прикладных задач особый интерес представляют задачи промышленного визуального контроля и бесконтактных измерений. В настоящее время, теория компьютерного зрения предлагает целый ряд различных 3D моделей наблюдаемых объектов, которые могут быть использованы для обнаружения и реконструкции элементов сцены по двумерным изображениям. В литературе описано довольно большое количество таких объектов, удовлетворяющих заранее известному описанию – от простейших признаков структур до высокоуровневых и сложных моделей. Однако многие такие методологии ориентированы на определенный класс объектов и их использование в большинстве случаев ограничено анализом заранее подготовленных (размеченных) данных. В этой связи, важной проблемой является задача предварительной идентификации объектов интереса (распознавания образов), без решения которой нельзя корректно перейти к решению вопроса оценки отдельных элементов сцены.

В ряде задач, в которых исходные данные представляют собой набор изображений или видеопоследовательностей, а задача реконструкции связана не только с обнаружением трехмерных структур, но и с высокоточным измерением параметров сцены, известные методологии оказываются неэффективными. Из-за наличия практических ограничений, обусловленных точностью и робастностью, данные решения не всегда позволяют выявить значимую для анализа информацию, либо при их реализации требуются чрезмерные вычислительные ресурсы. С данными проблемами в первую очередь сталкиваются при создании промышленных систем визуального контроля, работающих в сложных условиях: с динамически меняющимися сценами, в присутствии искажений и шумов. Поскольку построение таких систем в решающей степени основано на точности применяемых методов распознавания, существует потребность в получении их оценок, теоретическом и технико-экономическом обосновании применимости этих методов в составе бесконтактных измерительных систем. Однако в настоящее время вопросы, связанные с требованиями к исходным данным, правилами сбора и оценкой точности методов, практически не отражены в литературе, либо носят общетеоретический характер.

Во многих случаях для выбора правильного варианта решения поставленной задачи необходимо не только иметь достоверную информацию о точности используемых методов, но и адекватную оценку их вычислительной реализуемости. Вычислительная реализуемость алгоритмов компьютерного зрения относится к числу наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать при их разработке. И в этом плане возникает очевидная необходимость применения качественно новых методов по организации процесса анализа зрительных данных. Наиболее логичным развитием таких методов является использование специальных моделей и инструментов параллельного программирования с использованием графических ускорителей.

Таким образом, настоящий Проект посвящен исследованию известных и разработке новых методов анализа сцен и построения трехмерных компьютерных моделей для бесконтактных измерительных систем реального времени. При этом особое внимание уделяется трем основным типам требований, налагаемых на алгоритмы и методы: робастность, точность и скорость. Несмотря на широкий круг обозначенных проблем, данный Проект не ставит задачу

понимания любой измерительной сцены. Развитие теоретических основ обнаружения и описания трехмерных структур направлено в первую очередь на решение инженерных задач, связанных с пониманием сцены для определенного класса моделей. Особое внимание в данном Проекте уделяется разработке быстрых методов на базе гибридных вычислительных систем с применением графических процессоров. Также ставится цель применения разрабатываемых методов для существующих промышленных систем визуального контроля, характеристики и свойства которых все еще далеки от желаемых.

Актуальность исследования

Для металлургической промышленности актуальной является задача сокращения материальных и энергетических издержек, например, за счет стабилизации состава и свойств сырья. Один из вариантов стабилизации технологического процесса связан с оптическим определением гранулометрического состава сырых железнорудных окатышей в режиме реального времени. Однако большинство методов распознавания гранул используют статистические характеристики функции распределения интенсивности двумерных данных (изображений), аппарат морфологического анализа изображений и контурного анализа, что не всегда позволяет строить адекватные модели наблюдаемых объектов и получать требуемый результат. Техническое зрение является трехмерной проблемой, поэтому определение и использование третьей координаты может существенно повысить информативность изображения (рис. 1в). И в этом плане целесообразно привлечение аппарата стереофотометрического анализа, который в достаточной мере отражает свойства трехмерного пространства по данным наблюдаемой сцены.

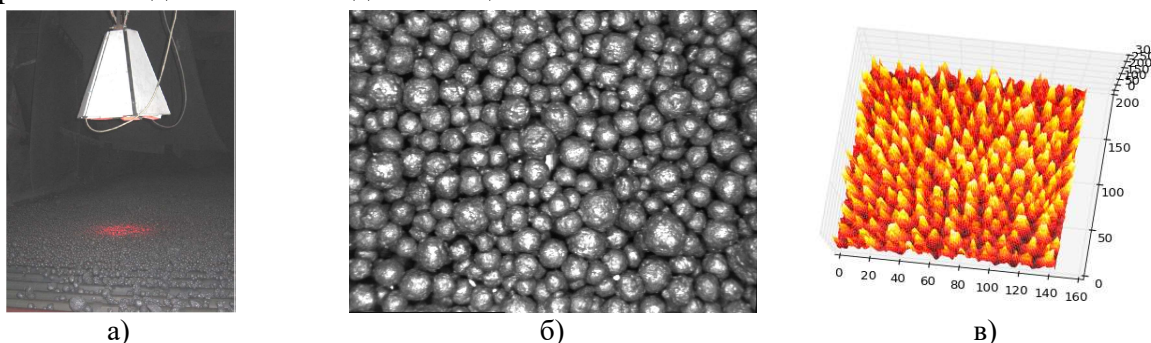


Рисунок 1 Система технического зрения определения гранулометрического состава железнорудных окатышей а) расположение видеодатчика над роликовым грохотом б) пример анализируемого изображения в) 3D изображение

Для формирования полной и достоверной информации о наличии, движении и сохранности производственных запасов на предприятиях лесозаготовительной и деревообрабатывающей отрасли важной задачей является автоматизация учета сырья и готовой продукции. Здесь актуальной является задача, связанная с автоматическим определением геометрических характеристик бревен в процессе их движения по конвейеру (рис. 2а) или определением кубатуры бревен, уложенных в штабель (рис. 2б). Решение этих задач возможно при помощи систем технического зрения, когда положение, форма и размеры срезов определяются специализированным программным обеспечением по их фотоизображениям.

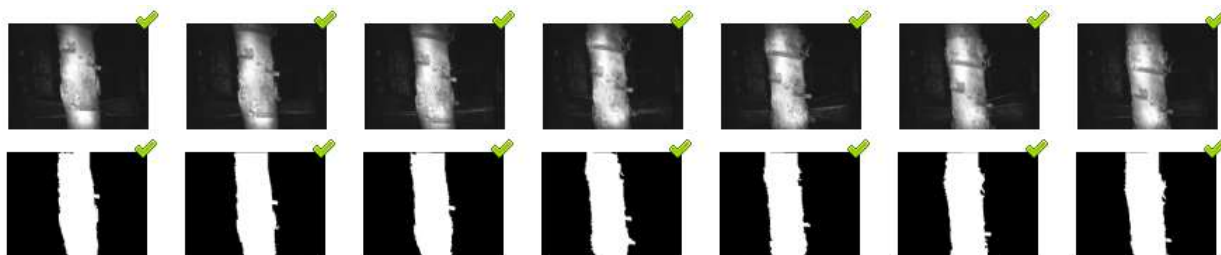


Рисунок 2 Примеры изображений и видеопоследовательностей, обрабатываемых СТЗ для определения геометрических характеристик бревен а) движущихся по конвейеру; б) уложенные в штабель

Рисунок 3 Трехмерные модели бревен а) движущихся по конвейеру; б) уложенные в штабель

- 1) анализ свойств существующих методов построения трехмерных сцен, теоретическое и экспериментальное обоснование применимости данных методов для прикладных задач инспекционного контроля;
- 2) получение оценок для ошибок построения параметрических моделей при использовании данных методов;
- 3) разработку быстрого алгоритма оценки параметров модели, робастного к уровню шума, который может быть применен в системах технического зрения реального времени.

3

количество экспериментальных данных: со всеми неприятными ситуациями. В связи с тем, что отработать алгоритм в реальных условиях (на производстве) не представляется возможным, более того, не всегда удастся даже получить всех необходимых данных, актуальной становится задача компьютерного моделирования наблюдаемых объектов в условиях, приближенных к реальным. Создание и визуализация таких моделей позволит гибко задавать необходимые условия съемки, изменять параметры объектов и алгоритмов, и тем самым позволит провести численные эксперименты без лишних производственных затрат. Такая задача, например, актуальна при реализации и отладки алгоритмов для системы технического зрения по оценке производительности плавильного агрегата, когда необходима большая выборка зрительных данных, условий и параметров истечения струи расплава (рис. 4).

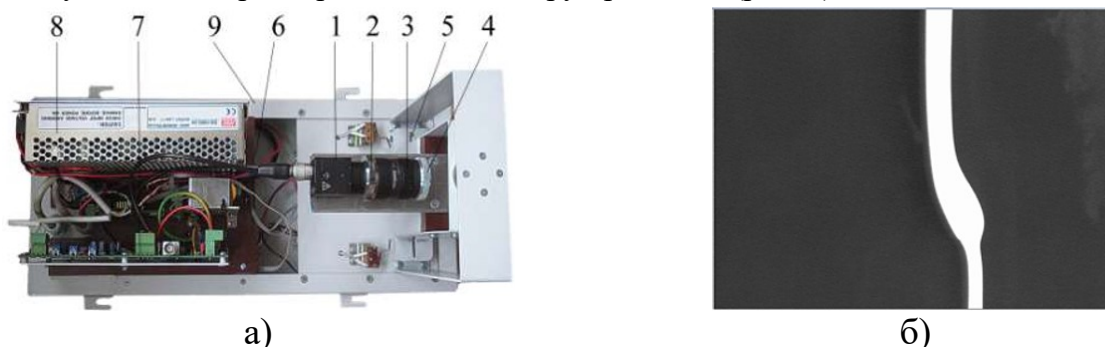


Рисунок 4 Многофункциональный прибор оценки дебита расплава а) компоновка устройств (1 – видеокамера; 2 – объектив; 3 – светофильтр; 4 – экстендер; 5 – шаговый двигатель; 6 – блок управления; 7 – усилитель видеосигнала; 8 – источник питания; 9 – защитный кожух) б) изображение струи расплава

Кроме того, применение этого подхода позволит не только обеспечить наглядность эксперимента, но и упростить решение типичных прикладных задач инспекционного контроля за счет возможности быстрого прототипирования алгоритмов путем модификации базовых методов обработки зрительных данных на основе использования новых геометрических моделей объектов или внешних условий среды.

Цель и задачи Проекта

Целью работы является развитие и совершенствование методов построения трехмерных компьютерных моделей на базе гетерогенных систем с использованием графических ускорителей, для высокоточных и быстрых вычислений; апробация предложенных решений на реальных (промышленных) и искусственных данных; а также применение данных методов для решения прикладных задач.

В соответствии с обозначенной целью решаются следующие задачи:

1. Проверка и исследование точностных характеристик, быстродействия и вычислительной реализуемости алгоритмов выделения 3D особенностей сцены и параметрической реконструкции элементов сцены;
2. Программная реализация системы компьютерного моделирования и реконструкции наблюдаемых объектов. Программное обеспечение должно осуществлять: построение визуализацию трехмерных объектов сцены, моделирование свойств объектов и измерение их параметров с заданной точностью;
3. Разработка и экспериментальные исследования методов параметрической реконструкции наблюдаемой сцены с использованием моделей синтетических объектов и реальных данных, полученных при решении конкретных задач (контроля гранулометрического состава и расчета характеристик лесоматериалов), на основе гетерогенных вычислений и технологии CUDA.

Научная новизна исследования

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Разработан пакет прикладных программ для моделирования внешних характеристик и внутренних свойств наблюдаемых объектов. Он может быть использован в самых различных областях науки и техники: металлургической, горной, фармацевтической, строительной, лесной промышленности и т.п. для проектирования систем технического зрения, контролирующего производственный процесс.
2. Разработаны новые быстрые алгоритмы обработки измерительной информации, для которых нет аналогов среди методов ручных и автоматических измерений. Например, алгоритмы определения характеристик лесоматериалов, движущихся по конвейеру, или уложенных в пачки – оказываются принципиально новыми.
3. Усовершенствованы методы построения трехмерных компьютерных моделей, получен новый вид продукции, который может быть внедрен на промышленном предприятии

Предлагаемые подходы и методы

Для решения поставленных задач используются следующие общие подходы компьютерного зрения: методы математического моделирования, методы обработки сигналов и изображений, кластерного анализа, теории вероятностей, математической статистики и линейной алгебры.

Для решения задач восстановления зависимостей по некомплектным и зашумленным данным (подгонки параметрических моделей) используются методы на основе случайных выборок (RANSAC) и их модификаций, а также статистические методы оценки максимального правдоподобия параметров моделей на основе ЕМ-алгоритма.

Для построения трехмерных моделей по изображениям и видеопоследовательностям используются два подхода: с использованием методов восстановления формы по данным о движении сцены (англ. shape from motion) и на основе отражательной способности сцены (англ. shape from shading)

Для программной реализации применяются подходы объектно-ориентированного и функционального программирования.

Ожидаемые результаты научного исследования и их научная и прикладная значимость

1. Получены точностные и вычислительные характеристики существующих алгоритмов прослеживания и построения 3D особенностей объектов сцены на изображениях и видеопоследовательностях, дано технико-экономическое обоснование их применения в составе систем технического зрения реального времени.
2. Разработаны и доведены до практической реализации новые быстрые методы цифровой обработки сигналов и систем технического зрения для контроля за технологическими процессами с улучшенными метрологическими характеристиками.
3. Другим важным аспектом, характеризующим цельность, завершенность научного исследования, является структурированная система полученных в ходе Проекта теоретических сведений. Целью такой системы является распространение знаний и опыта в области разработки систем технического зрения, цифровой обработки изображений и распознавания образов в научной среде, ведь свободный доступ к результатам новых исследований и обуславливает динамичное развитие данной научной отрасли. Ключевая роль в

распространении знаний отводится публикациям в научных журналах, а также докладам авторов о результатах исследования на конференциях и форумах. Полученные в ходе выполнения Проекта результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК и приравненных к ним журналах и трудах конференций, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus.

4. Завершающий этап реализации Проекта «Развитие методов и средств построения 3D моделей наблюдаемых объектов применительно к задаче построения бесконтактных измерительных систем реального времени» включает работы по подготовке и представлению диссертации руководителя Проекта в диссертационный совет на соискание ученой степени кандидата технических наук.

5. Практическая ценность работы состоит в том, что ее результаты могут являться основой разработки широкого класса систем технического зрения.

Общий план работ на весь срок реализации Проекта

План работ на первый год реализации Проекта включает:

1. Сбор и анализ наборов данных (изображений и видеопоследовательностей), включая данные реальных технологических процессов производств. Математическое описание исследуемых объектов и разработка методологий построения их трехмерных компьютерных моделей;
2. Программную реализацию системы моделирования и реконструкции трехмерных структур на основе реальных и искусственно сгенерированных данных. Разработка алгоритмов бесконтактного определения геометрических размеров и форм объектов на основе построенных моделей;
3. Получение данных натурных экспериментов о временных, вычислительных и точностных параметрах исследуемых методов;
4. Подготовку публикаций, представление результатов на конференциях. Оценку успешности выполнения проекта за первый год, корректировку задач проекта на второй год.

План работ на второй год реализации Проекта включает:

1. Программную реализацию быстрых методов построения 3D сцены с применением средств массивно-параллельного программирования (CUDA);
2. Программную реализацию алгоритмов параметрической реконструкции на основе случайных выборок и вероятностных моделей с применением средств массивно-параллельного программирования (CUDA);
3. Разработку новых методов алгоритмов бесконтактного определения геометрических размеров и форм объектов, которые позволят добиться более высокой точности и скорости работы по сравнению с существующими методами.
4. Разработку метрологического обеспечения измерительных систем, включающего в себя методы оценки неопределенности получаемых результатов и методику поверки и калибровки видеосенсоров.
5. Подготовку публикаций, представление результатов на конференциях. Оценка успешности выполнения проекта. Защита полученных результатов интеллектуальной деятельности.

План работ на первый год реализации Проекта

1. Предварительный сбор и анализ наборов данных (изображений и видеопоследовательностей), включая данные с реальных технологических процессов производств Свердловской области. (Чирышев Ю.В., Чирышев А.В.);
2. Программная реализация системы моделирования и реконструкции трехмерных объектов, проведение экспериментов (Чирышев Ю.В., Чирышев А.В.)
3. Подготовка трех публикаций (Чирышев Ю.В., Чирышев А.В.);
4. Представление результатов исследований на конференциях (Чирышев Ю.В., Чирышев А.В.).

Ожидаемые научные результаты за первый год реализации Проекта

1. Выполнен сбор и анализ наборов данных (изображений и видеопоследовательностей), включая данные с реальных технологических процессов производств. Тем самым сформирована уникальная репрезентативная выборка тестовых данных для моделирования наблюдаемых объектов;
2. Проведено исследование существующих алгоритмов распознавания образов, анализ и сравнительная оценка существующих методов реализации фотометрического и фотограмметрического подходов для задач обнаружения и изменения объектов в сцене наблюдения;
3. Выполнено математическое описание исследуемых объектов и разработана программная система моделирования и реконструкции трехмерных структур реальных и сгенерированных объектов. Здесь рассматривается два типа моделей наблюдаемых объектов: модели, полученные на основе подгонки объектов по зашумленному облаку точек (с использованием методов восстановления формы по данным о движении сцены, рис. 5), и модели, полученные на основе анализа яркостных признаков сцены;
4. На основе моделирования получены оценки скорости, точности и устойчивости к шумам для известных алгоритмов параметрической реконструкции на основе случайных выборок (RANSAC) и вероятностных моделей (ЕМ-алгоритм);
5. Результаты исследования опубликованы в трех рецензируемых научных изданиях.



Рисунок 5 Внешний вид приложения для параметрической реконструкции бревен по зашумленному облаку точек

Имеющийся у коллектива научный задел по Проекту

В последние два десятилетия в Институте радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета (УрФУ) активно развивается машинное зрение. За это время коллективом авторов были успешно выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные в первую очередь на автоматизацию производственных процессов для нужд предприятий Уральского федерального округа. Эти работы проводились под руководством д.т.н. Доросинского Л.Г., и к.т.н. Круглова В.Н.

В рамках НИР по контракту № 02.740.11.0512 группой авторов с участием Чирышева Ю.В. и Чирышева А.В. были успешно решены следующие задачи:

- 1) разработана система оценки дебита струи расплава плавильной печи. Данная система предназначена для использования на металлургических предприятиях строительной индустрии;
- 2) разработан пакет прикладных программ SARCS-system, реализующий основные алгоритмы предварительной обработки изображений. Данный пакет может быть использован в самых различных областях науки и техники: металлургической, горной, фармацевтической, строительной, лесной промышленности и т.п. для проектирования систем технического зрения, контролирующих производственный процесс;
- 3) разработан алгоритм совмещения изображений, основанный на принципе развязки двумерного движения на два одномерных. Такой алгоритм, безусловно, востребован при разработке высокоскоростных систем оценки перемещения контролируемого объекта;
- 4) создан комплекс практических и лабораторных работ по программированию алгоритмов обработки многомерных массивов данных в среде CUDA на графическом адаптере. Он послужил основой для лабораторного практикума по курсу «Цифровая обработка сигналов»;
- 5) в результате был создан уникальный прибор для оценки температуры и дебита струи расплава плавильной печи. Автор идеи Круглов В.Н. к.т.н., доцент кафедры информационных технологий. Экспериментальный образец прибора прошел успешные промышленные испытания на предприятии ОАО «АКСИ» г.Челябинск.

В рамках проекта, поддержанного Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, группой авторов с участием Чирышева Ю.В. и Чирышева А.В. успешно выполнен НИОКР по теме «Исследование и разработка комплекса для расчета характеристик лесоматериалов на базе специализированного вычислительного устройства. Разработка программного обеспечения для мобильной оценки кубатуры круглого леса на основе анализа изображений». Основные результаты проделанной работы состоят в следующем:

- 1) спроектирована и реализована система компьютерного зрения для решения задачи определения геометрических характеристик бревен с использованием нескольких зрительных датчиков;
- 2) разработана архитектура программных компонент для ввода зрительных данных с нескольких видео датчиков. На основе этой архитектуры были реализованы программные компоненты, используемые в программном обеспечении прикладной системы компьютерного зрения;
- 3) разработан комплекс алгоритмов и их параллельные реализации для архитектуры GPU для определения геометрических параметров движущегося круглого лесоматериала по последовательности видеоизображений;
- 4) разработан алгоритм автоматического детектирования срезов бревен на изображениях с пачками бревен. На его основе разработан алгоритм расчета кубатуры штабеля бревен;

- 5) разработана программа для мобильного расчета кубатуры круглого леса. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014611152 на программу «FoRest»(Круглов А.В., Круглов В.Н., Чирышев Ю.В.);
- 6) получен патент на изобретение № 2553714 «Способ измерения кубатуры круглого леса»(Круглов А.В., Круглов В.Н., Чирышев Ю.В.);
- 7) получен патент на полезную модель №171133 «Устройство для измерения геометрических характеристик круглого лес»(Круглов А.В., Круглов В.Н., Чирышев А.В.).

Анализ современного состояния исследований

Исследования в области понимания и обработки изображений имеют многолетнюю историю. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов компьютерного и машинного зрения внесли работы У. Прэтта, Б.К.П. Хорна, Дж. Стокмана, Харалика, Е. Дэвиса, Л. Шапиро, К. Ту. Во многом благодаря их заслуге в последнее десятилетие создано множество успешных систем машинного зрения, которые в том или ином виде реализуют методы, связанные с пониманием и измерением элементов сцены.

Трехмерному моделированию наблюдаемой сцены посвящено довольно много работ зарубежных ученых. По этой тематике работают и отечественные ученые. Наиболее значимыми и схожими с тематикой данного Проекта являются следующие направления:

- развитие робастных алгоритмов оценки параметров моделей на основе случайных выборок [1,2,9], их модификаций [3-8] и применение данных методов к решению прикладных задач [11-19].
- реконструкция трехмерных объектов фотометрическими методами [20-30];
- реконструкция трехмерных объектов стереофотограмметрическими методами [32-37,43];
- развитие алгоритмов полной автоматизации моделирования 3D-объектов по результатам 2,5D-измерений без интерактивной доработки [31,43].

Наиболее близким к заявленной теме являются исследования, проводимые в лаборатории компьютерной графики и мультимедиа факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова. В них отражены методологии выделения трехмерных сцен, которые позволяют добиться более высокой точности определения траектории движения камеры [42] и алгоритмы оценки параметров объектов на основе случайных вероятностных моделей, которые адаптируются к уровню шума и позволяют добиться высокой точности и устойчивости к шуму и ложных данных [9]. В целом исследование этой группы ученых в значительной части посвящено построению трехмерных моделей для систем виртуальной реальности [41,42] и трехмерного моделирования застроенных территорий и городских сцен [38-40]. Данный Проект посвящен промышленным системам реального времени, для методов которых важна не только точность, но и скорость работы. Однако вопросам построения таких систем в настоящее время уделяется недостаточно внимания.

В дополнение необходимо привести основные исследования, в которых всецело рассматриваются аспекты и методы решения отдельных подзадач, которые используются при решении в данной области. Это в первую очередь классический труд «Multiple View Geometry in Computer Vision» американских ученых [43], который содержит фундаментальные основы алгоритмов и методов извлечения информации с использованием одно, стерео и многокамерной съемки. А также труд «Pattern Recognition and Machine Learning» английского ученого С. М. Bishop [44] – один из лучших учебников по современным методам статистического обучения и алгоритмам оценки плотности распределения данных.

Список литературы

1. Martin A. Fischler and Robert C. Bolles (June 1981). «Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography». Comm. Of the ACM 24: 381–395.
2. Anders Hast, Johan Nysjö, Andrea Marchetti (2013). "Optimal RANSAC – Towards a Repeatable Algorithm for Finding the Optimal Set". Journal of WSCG 21 (1): 21–30.
3. P.H.S. Torr and A. Zisserman, MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry, Journal of Computer Vision and Image Understanding 78 (2000), no. 1, 138–156.
4. B. Tordoff and D. W. Murray. Guided sampling and consensus for motion estimation. In Proc. European Conf. on Computer Vision, 2002.
5. D. Nistér, Preemptive RANSAC for live structure and motion estimation, IEEE International Conference on Computer Vision (Nice, France), October 2003, pp. 199–206.
6. R. Toldo and A. Fusiello, Robust multiple structures estimation with jlinkage, European Conference on Computer Vision (Marseille, France), October 2008, pp. 537–547.
7. A. Vedaldi, H. Jin, P. Favaro, and S. Soatto, KALMANSAC: Robust filtering by consensus, Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV), vol. 1, 2005, pp. 633–640
8. O. Chum and J. Matas. Matching with PROSAC – progressive sampleconsensus. In Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
9. T. Sattler, B. Leibe, and L. Kobbelt. SCRAMSAC: Improving RANSAC's efficiency with a spacial consistency filter. In Proc. IEEE Intl. Conf. on Computer Vision, 2009
10. A.S. Konouchine, V.A. Gaganov, V.P. Vezhnevets, "Extending RANSAC-based estimators to handle unknown and varying noise level", Sib. Zh. Vychisl. Mat., 9:3 (2006), 263–277
11. Sample Applications: Mathematics URL: <https://www.geometrictools.com/Samples/Mathematics.html>
12. S. Obwald, J.S. Gutmann, A. Hornung, M. Bennewitz. From 3D point clouds to climbing stairs: A comparison of plane segmentation approaches for humanoids. Humanoids, 2011.
13. R. Qiu and U. Neumann. Pipe-run Extraction and Reconstruction from Point Clouds. ECCV, 2014.
14. G. Pang and U. Neumann. Training-based Object Recognition in Cluttered 3D Point Clouds. Int. Conf. on 3D Vision (3DV), 2013.
15. Juho Kannala, Sami S. Brandt, and Janne Heikkilä (2008). Measuring and Modelling Sewer Pipes from Video. Machine Vision and Applications, 19(2):73-83, March.
16. Helmut Pottmann. Line Geometry for 3D Shape Understanding and Reconstruction. Conference: Computer Vision - ECCV 2004, 8th European Conference on Computer Vision, Prague, Czech Republic, May 11-14, 2004.
17. Yang Zhou, Kangxue Yin, Hui Huang, Hao(Richard) Zhang Generalized Cylinder Decomposition. ACM Transactions on Graphics 34(6) Special Issue of SIGGRAPH ASIA 2015 .
18. O. Ruiz, S. Arroyave and D. Acosta, "Fitting of Analytic Surfaces to Noisy Point Clouds," American Journal of Computational Mathematics, Vol. 3 No. 1A, 2013, pp. 18-26.
19. G. Lukács, A.D. Marshall, R.R. Martin, "Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation", In: Computer Vision-ECCV 98, Lecture Notes in Computer Science, Eds: H. Burkhardt and B. Neumann, Springer-Verlag, 1998.
20. Jia, Pengcheng, "FITTING A PARAMETRIC MODEL TO A CLOUD OF POINTS VIA OPTIMIZATION METHODS" (2017). Dissertations - ALL. 673.

20. Zhang, R., Tsai, P.-S., Cryer, J.E., Shah, M. Shape from shading: A survey (1999) IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21 (8), pp. 690-706.
21. Sethian, J.A. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts (1996) Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 93 (4), pp.
22. Frankot, R.T., Chellappa, R. A Method for Enforcing Integrability in Shape from Shading Algorithms (1988) IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10 (4), pp. 439-451.
23. Healey, G.E., Kondepudy, R. Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation (1994) IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16 (3), pp. 267-276.
24. Rouy, Elisabeth, Tourin, Agnes Viscosity solutions approach to shape-from-shading (1992) SIAM Journal on Numerical Analysis, 29 (3), pp. 867-884.
25. Ikeuchi, K., Horn, B.K.P. Numerical shape from shading and occluding boundaries (1981) Artificial Intelligence, 17 (1-3), pp. 141-184
26. Horn, B.K.P., Brooks, M.J. The variational approach to shape from shading (1986) Computer Vision, Graphics and Image Processing, 33 (2), pp. 174-208.
27. Horn, B.K.P. Height and gradient from shading (1990) International Journal of Computer Vision, 5 (1), pp. 37-75.
28. Zheng, Qinfen, Chellappa, Rama Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading (1991) IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13 (7), pp. 680-702.
29. Oren, M., Nayar, S.K. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision (1995) International Journal of Computer Vision, 14 (3), pp. 227-251.
30. Ping-Sing, T., Shah, M. Shape from shading using linear approximation (1994) Image and Vision Computing, 12 (8), pp. 487-498.
31. Linda G. Shapiro; George C. Stockman (2001). Computer Vision. Prentice Hall. ISBN 0-13-030796-3.
32. D. G. Lowe (2004). "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". International Journal of Computer Vision. 60: 91–110. doi:10.1023/b:visi.0000029664.99615.94.
33. H. Bay; T. Tuytelaars & L. Van Gool (2006). "Surf: Speeded up robust features". 9th European Conference on Computer Vision.
34. K. Häming & G. Peters (2010). "The structure-from-motion reconstruction pipeline – a survey with focus on short image sequences". Kybernetika.
35. B. D. Lucas & T. Kanade. "An iterative image registration technique with an application to stereo vision". IJCAI81.
36. M. A. Fischler & R. C. Bolles (1981). "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography". Commun. ACM. 24: 381–395. doi:10.1145/358669.358692.
37. F. Dellaert; S. Seitz; C. Thorpe & S. Thrun (2000). "Structure from Motion without Correspondence" (PDF). IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
38. Barinova O, Shapovalov R, Sudakov S, Velizhev A, Konushin A. Efficient Road Mapping via Interactive Image Segmentation. In: Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring (CMRT). Vol XXXVIII.; 2009.
39. Barinova O, Konushin V, Yakubenko A, Lim H, Lee KC, Konushin A. Fast automatic single-view 3-d reconstruction of urban scenes. In: Proceedings of European Conference of Computer Vision.; 2008.

40. Vezhnevets V, Konushin A, Ignatenko A. Interactive image-based urban modeling. In: PIA-2007. Munich, Germany; 2007. p. 63-8.
41. Park IK, Bayakovskii YM, Levkovich-Maslyuk L, Han M, Ignatenko A, Zhirkov A, et al. Depth Image-Based Representation and Compression for Static and Animated 3-D Objects. IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY. 2004;14(7):1032-45.
42. Ignatenko A, Konushin A. A Framework for Depth Image-Based Modeling and Rendering. In: GraphiCon'2003. Moscow, Russia; 2003. p. 169-72.
43. Hartley, R. I. and Zisserman, A., Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press
44. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. — Springer, 2006. — 738 p.