

Т. Луманн, С. Робсон, С. Кайл, Я. Бом

БЛИЖНЯЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ И

3D · ЗРЕНИЕ

**CLOSE-RANGE
PHOTOGRAMMETRY
AND 3D IMAGING**

*Thomas Luhmann
Stuart Robson
Stephen Kyle
Jan Boehm*

Перевод
с английского
В. А. Князя и В. В. Князя



IURSS

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Автомобильная, станкостроительная и судостроительная промышленность · Аэрокосмическая промышленность · Архитектура, археология · Проектирование · Медицина и психология · Следственные и судебно-медицинские исследования · Мультипликация и кинематография · Информационные системы · Рост кристаллов · Материаловедение · Движение ледников и почв · и др.

Thomas Luhmann, Stuart Robson, Stephen Kyle, Jan Boehm
CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY AND 3D IMAGING

Т. Луманн, С. Робсон, С. Кайл, Я. Бом

БЛИЖНЯЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ И 3D-ЗРЕНИЕ

Перевод с английского
В. А. Князя и В. В. Князя



URSS
МОСКВА

Луманн Томас, Робсон Стюарт, Кайл Стефан, Бом Ян

Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение: Пер. с англ.

М.: ЛЕНАНД, 2018. — 704 с.

В предлагаемой читателю книге представлено глубокое и развернутое описание принципов и методов ближней фотограмметрии, а также основные необходимые сведения из смежных областей знания, таких как математические и физические основы предмета, метрологические аспекты фотограмметрических измерений, принципы формирования цифровых изображений и современные методы их обработки и другие. Приведены как математические модели и обоснования методов, так и практические рекомендации по проектированию, планированию и обработке результатов фотограмметрической съемки, являющиеся результатом большого практического опыта в решении широкого спектра научных и прикладных задач.

Книга будет интересна и полезна студентам, изучающим фотограмметрию и компьютерное зрение, исследователям и специалистам, работающим в области бесконтактных трехмерных измерений, построения точных компьютерных 3D-моделей реальных объектов и сцен, цифровой обработки изображений и машинного зрения.

4

ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.

Формат 70×100/16. Печ. л. 44. Зак. №

Отпечатано в АО «Т 8 Издательские Технологии».

109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

ISBN 978–5–9710–5298–2

© ЛЕНАНД, 2018

19055 ID 222647



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Оглавление

Предисловие автора к русскому изданию	14
Глава 1. Введение	15
1.1. Обзор	15
1.1.1. Содержание	15
1.1.2. Библиография.....	16
1.2. Основные методы	16
1.2.1. Фотограмметрический процесс.....	16
1.2.2. Разделы фотограмметрии.....	18
1.2.3. Модель формирования изображения	21
1.2.4. Фотограмметрические системы и процессы	24
1.2.4.1. Аналоговые системы (24); 1.2.4.2. Цифровые системы (25);	
1.2.4.3. Процедуры получения и анализа снимков (26)	
1.2.5. Фотограмметрические продукты	27
1.3. Области применения	29
1.4. История развития	32
Глава 2. Математические основы	45
2.1. Системы координат	45
2.1.1. Системы координат камеры и снимка.....	45
2.1.2. Пиксельная система координат	46
2.1.3. Модельная система координат.....	47
2.1.4. Система координат объекта	47
2.2. Преобразования координат.....	49
2.2.1. Преобразования на плоскости	49
2.2.1.1. Преобразования подобия (49); 2.2.1.2. Аффинное	
преобразование (50); 2.2.1.3. Полиномиальное преобразование (52);	
2.2.1.4. Билинейное преобразование (53); 2.2.1.5. Проективное	
преобразование (54)	
2.2.2. Пространственные преобразования.....	57
2.2.2.1. Пространственное вращение (57); 2.2.2.2. Пространственное	
преобразование подобия (64); 2.2.2.3. Преобразования однородных	
координат (69)	
2.3. Элементы линейной алгебры	74
2.3.1. Аналитическая геометрия на плоскости.....	75
2.3.1.1. Прямая (75); 2.3.1.2. Окружность (79); 2.3.1.3. Эллипс (80);	
2.3.1.4. Кривые (83)	

2.3.2.	Аналитическая геометрия в трехмерном пространстве	88
2.3.2.1.	Прямая (88); 2.3.2.2. Плоскость (91); 2.3.2.3. Фигуры, обладающие вращательной симметрией (93)	
2.3.3.	Поверхности.....	98
2.3.3.1.	Цифровая модель поверхности (99); 2.3.3.2. В-сплайны и поверхности Безье (102)	
2.3.4.	Соответствие заданным требованиям.....	103
2.4.	Методы уравнивания.....	104
2.4.1.	Постановка задачи.....	104
2.4.1.1.	Функциональная модель (104); 2.4.1.2. Стохастическая модель (106)	
2.4.2.	Метод наименьших квадратов (линейная модель Гаусса—Маркова).....	107
2.4.2.1.	Уравнивание прямых наблюдений (107); 2.4.2.2. Общий случай метода наименьших квадратов (108); 2.4.2.3. Алгоритм Левенберга—Марквардта (110); 2.4.2.4. Метод связей с ограничениями (111)	
2.4.3.	Меры качества.....	112
2.4.3.1.	Точность и внутренняя точность измерений (113);	
2.4.3.2.	Доверительный интервал (114); 2.4.3.3. Корреляция (117);	
2.4.3.4.	Достоверность (118)	
2.4.4.	Отбраковка ошибок на практике	121
2.4.4.1.	Снупинг данных (122); 2.4.4.2. Дисперсионный анализ (122);	
2.4.4.3.	Робастная оценка с весовыми функциями (123); 2.4.4.4. Робастное оценивание по норме L1 (124); 2.4.4.5. RANSAC (125)	
2.4.5.	Вычислительные аспекты.....	126
2.4.5.1.	Линеаризация (126); 2.4.5.2. Нормальная система уравнений (126);	
2.4.5.3.	Методы обращения разреженных матриц и оптимизация (127)	
Глава 3.	Технологии съемки	129
3.1.	Физические основы формирования изображений.....	129
3.1.1.	Волновая оптика	129
3.1.1.1.	Электромагнитный спектр (129); 3.1.1.2. Радиометрия (130);	
3.1.1.3.	Преломление и отражение (132); 3.1.1.4. Дифракция (133)	
3.1.2.	Оптическая съемка	135
3.1.2.1.	Геометрическая оптика (135); 3.1.2.2. Апертура и границы (137);	
3.1.2.3.	Фокусировка (138); 3.1.2.4. Принцип Шаймплюга (141)	
3.1.3.	Аберрации	143
3.1.3.1.	Дисторсия (143); 3.1.3.2. Хроматические аберрации (144);	
3.1.3.3.	Сферические аберрации (146); 3.1.3.4. Астигматизм и искривление поля зрения (146); 3.1.3.5. Кома (148); 3.1.3.6. Падение яркости и виньетирование (148)	
3.1.4.	Разрешение.....	149
3.1.4.1.	Разрешающая способность линзы (149); 3.1.4.2. Геометрический предел разрешения (150); 3.1.4.3. Частотно-контрастная характеристика (152)	
3.1.5.	Основы цифровой обработки сигналов	154
3.1.5.1.	Теорема отсчетов (Котельникова, Найквиста—Шеннона) (154);	
3.1.5.2.	Характеристики детектора (156)	

3.2. Концепция фотограмметрической съемки	158
3.2.1. Офлайн- и онлайн-системы	158
3.2.1.1. Офлайн-фотограмметрия (159); 3.2.1.2. Онлайн-фотограмметрия (159)	
3.2.2. Конфигурация съемки	160
3.2.2.1. Съемка единичного снимка (160); 3.2.2.2. Стереосъемка (160);	
3.2.2.3. Съемка многих разноразмерных снимков (162)	
3.3. Геометрия камеры как измерительного устройства	163
3.3.1. Масштаб изображения и точность	163
3.3.1.1. Масштаб изображения (163); 3.3.1.2. Оценка точности (165)	
3.3.2. Внутреннее ориентирование камеры	167
3.3.2.1. Физическое задание системы координат снимка (168); 3.3.2.2. Центр перспективы и дисторсия (169); 3.3.2.3. Параметры внутреннего ориентирования (172); 3.3.2.4. Метрические и полуметрические камеры (173); 3.3.2.5. Определение внутреннего ориентирования (калибровка) (175)	
3.3.3. Стандартизованные функции коррекции	177
3.3.3.1. Симметричная радиальная дисторсия (177);	
3.3.3.2. Тангенциальная дисторсия (183); 3.3.3.3. Аффинные искажения (183); 3.3.3.4. Полная коррекция искажений (183)	
3.3.4. Другие формы корректирующих уравнений	184
3.3.4.1. Упрощенные модели (184); 3.3.4.2. Дополнительные параметры (185); 3.3.4.3. Коррекция дисторсии, зависящей от дальности съемки (187); 3.3.4.4. Калибровка каждого изображения (189); 3.3.4.5. Коррекция локальных деформаций снимка (189)	
3.3.5. Итеративная коррекция ошибок съемки	192
3.3.6. Сверхширокоугольные проекции	195
3.4. Компоненты системы	196
3.4.1. Оптико-электронные сенсоры	198
3.4.1.1. Принцип работы CCD-сенсора (198); 3.4.1.2. Кадровые CCD-сенсоры (200); 3.4.1.3. Матричные сенсоры CMOS-типа (204); 3.4.1.4. Цветные камеры (205); 3.4.1.5. Геометрические свойства (209); 3.4.1.6. Радиометрические свойства (211)	
3.4.2. Технологии производства камер	214
3.4.2.1. Типы камер (214); 3.4.2.2. Затвор (216); 3.4.2.3. Стабилизация изображения (218)	
3.4.3. Объективы	218
3.4.3.1. Относительное отверстие и число диафрагмы f/number (218);	
3.4.3.2. Поле зрения (219); 3.4.3.3. Суперширокоугольные и сверхширокоугольные объективы (220); 3.4.3.4. Варифокальные объективы (221); 3.4.3.5. Тилт-шифт объективы (223); 3.4.3.6. Телецентрические объективы (224); 3.4.3.7. Разделение стереоизображений (224)	
3.4.4. Фильтры	226
3.5. Съёмочные системы	227
3.5.1. Аналоговые камеры	229
3.5.1.1. Аналоговые видеокамеры (229); 3.5.1.2. Технологии аналоговых камер (231); 3.5.1.3. Оцифровка аналогового видеосигнала (232)	

3.5.2.	Цифровые камеры	235
3.5.3.	Высокоскоростные камеры.....	240
3.5.4.	Сtereo- и мультикамерные системы	244
3.5.5.	Микро- и макросканирующие камеры.....	246
	3.5.5.1. Микросканирование (246); 3.5.5.2. Макросканирование (247)	
3.5.6.	Панорамные камеры.....	248
	3.5.6.1. Линейные сканирующие системы (248); 3.5.6.2. Построение панорам из отдельных снимков (250); 3.5.6.3. Панорамы с объективами «рыбий глаз» (251); 3.5.6.4. Видеотеодолиты и тахеометры (252)	
3.5.7.	Тепловизоры.....	254
3.6.	Установка меток и освещение объекта.....	255
3.6.1.	Расстановка меток на объекте	255
	3.6.1.1. Материал меток (255); 3.6.1.2. Круговые метки (259); 3.6.1.3. Сферические метки (262); 3.6.1.4. Метки-шаблоны (265); 3.6.1.5. Кодированные метки (265); 3.6.1.6. Щупы и устройства измерения скрытых точек (266)	
3.6.2.	Освещение и методы подсвета объекта	269
	3.6.2.1. Электронная вспышка (269); 3.6.2.2. Структурированный подсвет (271); 3.6.2.3. Лазерный подсвет (272); 3.6.2.4. Направленный подсвет (274)	
3.7.	3D-камеры и дальномерные системы.....	275
3.7.1.	Лазерные системы	275
	3.7.1.1. Лазерная триангуляция (275); 3.7.1.2. Лазерные сканирующие дальнометры (276); 3.7.1.3. Лазерные трекеры (280)	
3.7.2.	Системы проекции полос.....	282
	3.7.2.1. Проекция стационарных полос (282); 3.7.2.2. Проекция динамических полос (метод фазового сдвига) (284); 3.7.2.3. Кодированный подсвет (код Грея) (285); 3.7.2.4. Системы проекции полос с одной камерой (286); 3.7.2.5. Системы проекции полос со многими камерами (288)	
3.7.3.	Недорогие дальномерные 3D-камеры.....	289
Глава 4.	Аналитические методы	292
4.1.	Обзор содержания главы.....	292
4.2.	Обработка единичных снимков.....	294
4.2.1.	Внешнее ориентирование	294
	4.2.1.1. Стандартный случай (294); 4.2.1.2. Специальный случай наземной фотограмметрии (296)	
4.2.2.	Уравнения коллинеарности.....	297
4.2.3.	Обратная засечка	300
	4.2.3.1. Обратная засечка при известном внутреннем ориентировании (301); 4.2.3.2. Обратная засечка при неизвестном внутреннем ориентировании (304); 4.2.3.3. Начальные приближения для обратной засечки (304); 4.2.3.4. Засечка при минимуме информации об объекте (305); 4.2.3.5. Меры качества (308)	

4.2.4.	Линейные методы ориентирования	308
4.2.4.1.	Прямое линейное преобразование (DLT) (308);	
4.2.4.2.	Матрица перспективной проекции (311)	
4.2.5.	Оценка положения и ориентации объекта методом обратной засечки	312
4.2.5.1.	Положение и ориентация объекта относительно камеры (312);	
4.2.5.2.	Положение и ориентация одного объекта относительно другого (313)	
4.2.6.	Проективное преобразование плоскости.....	316
4.2.6.1.	Математическая модель (316);	
4.2.6.2.	Влияние внутреннего ориентирования (319);	
4.2.6.3.	Влияние некопланарных точек объекта (319);	
4.2.6.4.	Ректификация на плоскость (320);	
4.2.6.5.	Измерения плоских объектов (321)	
4.2.7.	Оценка трехмерных моделей объектов по одному изображению	322
4.2.7.1.	Плоские элементы объекта (322);	
4.2.7.2.	Цифровые модели поверхности (323);	
4.2.7.3.	Дифференциальная ректификация (325)	
4.3.	Обработка стереопар изображений.....	328
4.3.1.	Принцип стереоскопического зрения	328
4.3.1.1.	Стереоскопическое сопоставление (328);	
4.3.1.2.	Связующие точки (329);	
4.3.1.3.	Ориентирование стереопар снимков (330);	
4.3.1.4.	Нормальный случай стереофотограмметрии (331)	
4.3.2.	Эпиполярная геометрия	332
4.3.3.	Относительное ориентирование.....	334
4.3.3.1.	Условия компланарности (336);	
4.3.3.2.	Оценка параметров (337);	
4.3.3.3.	Модельные координаты (338);	
4.3.3.4.	Расчет эпиполярных прямых (339);	
4.3.3.5.	Вычисления для нормального случая съемки (340);	
4.3.3.6.	Качество относительного ориентирования (342);	
4.3.3.7.	Особые случаи относительного ориентирования (344)	
4.3.4.	Фундаментальная матрица и основная матрица.....	346
4.3.5.	Абсолютное ориентирование	348
4.3.5.1.	Математическая модель (348);	
4.3.5.2.	Определение исходных данных (350);	
4.3.5.3.	Вычисление внешнего ориентирования (350);	
4.3.5.4.	Вычисление относительного ориентирования по известному внешнему ориентированию (350)	
4.3.6.	Стереоскопическая обработка	351
4.3.6.1.	Принципы стереоскопической обработки снимков (351);	
4.3.6.2.	Расчет 3D-координат точек по координатам изображений (353);	
4.3.6.3.	Определение точек с помощью измерительной марки (359)	
4.4.	Обработка многих снимков и метод связей	360
4.4.1.	Основные идеи.....	360
4.4.1.1.	Цели (360);	
4.4.1.2.	Потоки данных (364)	
4.4.2.	Математическая модель	365
4.4.2.1.	Модель уравнивания (365);	
4.4.2.2.	Система нормальных уравнений (367);	
4.4.2.3.	Комбинированное уравнивание фотограмметрических и независимых наблюдений (371);	
4.4.2.4.	Оценка дополнительных параметров (375)	

4.4.3.	Система координат объекта	378
4.4.3.1.	Ранг и дефект данных (378); 4.4.3.2. Опорные точки (379);	
4.4.3.3.	Уравнивание свободной сети (382)	
4.4.4.	Задание приближенных значений	386
4.4.4.1.	Стратегии для автоматического вычисления приближенных значений (387); 4.4.4.2. Формирование начальных значений путем автоматического измерения точек (392); 4.4.4.3. Практические аспекты формирования приближенных значений (394)	
4.4.5.	Критерии качества и анализ результатов.....	395
4.4.5.1.	Выходной отчет (395); 4.4.5.2. Точность измерений координат изображения (396); 4.4.5.3. Точность координат объекта (397);	
4.4.5.4.	Качество самокалибровки (398)	
4.4.6.	Стратегии процедуры уравнивания методом связей	400
4.4.6.1.	Моделирование (400); 4.4.6.2. Расходимость (401);	
4.4.6.3.	Отбраковка грубых ошибок (402)	
4.4.7.	Обработка многих снимков	403
4.4.7.1.	Основная прямая засечка (403); 4.4.7.2. Прямое определение геометрических элементов (405); 4.4.7.3. Определение пространственных кривых («змейки») (413)	
4.5.	Панорамная фотограмметрия.....	414
4.5.1.	Цилиндрическая модель панорамной съемки.....	415
4.5.2.	Ориентирование панорамных снимков	417
4.5.2.1.	Приближенные значения (417); 4.5.2.2. Обратная засечка (418);	
4.5.2.3.	Метод связей (418)	
4.5.3.	Эпиполярная геометрия	419
4.5.4.	Прямая засечка.....	421
4.5.5.	Ректификация панорамных изображений.....	422
4.5.5.1.	Ортогональная ректификация (422); 4.5.5.2. Тангенциальные снимки (422)	
4.6.	Фотограмметрия различных оптических сред.....	423
4.6.1.	Преломление света на границах оптических сред.....	423
4.6.1.1.	Границы оптических сред (423); 4.6.1.2. Границы оптических сред, параллельные плоскости снимка (424); 4.6.1.3. Прохождение лучей через поверхности преломления (427)	
4.6.2.	Расширенная модель метода связей.....	428
4.6.2.1.	Объектно-инвариантная граница сред (428);	
4.6.2.2.	Съемочно-инвариантная граница сред (430)	
Глава 5.	Цифровая обработка изображений	431
5.1.	Основы	431
5.1.1.	Процедура обработки изображений.....	431
5.1.2.	Пиксельная система координат изображения	433
5.1.3.	Обработка изображений.....	434
5.1.3.1.	Пирамиды изображений (434); 5.1.3.2. Форматы данных (435);	
5.1.3.3.	Сжатие изображений (438)	

5.2. Предобработка изображений	440
5.2.1. Точечные операции	440
5.2.1.1. Гистограмма (440); 5.2.1.2. Таблицы поиска (442);	
5.2.1.3. Повышение контраста (443); 5.2.1.4. Пороговая обработка (445);	
5.2.1.5. Арифметические действия над изображениями (447)	
5.2.2. Операции с цветными изображениями	448
5.2.2.1. Цветовые пространства (448); 5.2.2.2. Цветовые преобразования (451); 5.2.2.3. Цветовые представления (453)	
5.2.3. Операторы фильтрации изображений	455
5.2.3.1. Пространственная и частотная области (455);	
5.2.3.2. Сглаживающие фильтры (459); 5.2.3.3. Морфологические операции (460); 5.2.3.4. Фильтр Уоллиса (463)	
5.2.4. Выделение границ	464
5.2.4.1. Дифференциальные фильтры первого порядка (465);	
5.2.4.2. Дифференциальные фильтры второго порядка (467);	
5.2.4.3. Лапласиан фильтра Гаусса (469); 5.2.4.4. Повышение резкости изображения (470); 5.2.4.5. Преобразование Хафа (471); 5.2.4.6. Операторы усиления границ (472); 5.2.4.7. Субпиксельная интерполяция (474)	
5.3. Геометрические преобразования изображения	477
5.3.1. Основы ректификации	478
5.3.2. Интерполяция значений интенсивности	479
5.3.3. 3D-визуализация	482
5.3.3.1. Обзор (482); 5.3.3.2. Отражение и освещение (484);	
5.3.3.3. Текстурирование (487)	
5.4. Цифровая обработка одиночных снимков	490
5.4.1. Приближенные величины	490
5.4.1.1. Возможности (490); 5.4.1.2. Сегментация точечных структур (491)	
5.4.2. Измерения отдельных точечных особенностей	493
5.4.2.1. Ручные измерения на экране (493); 5.4.2.2. Методы оценки центра «масс» (центроид) (494); 5.4.2.3. Корреляционные методы (495);	
5.4.2.4. Сопоставление методом наименьших квадратов (497); 5.4.2.5. Структурные методы измерений (502); 5.4.2.6. Вопросы точности (505)	
5.4.3. Прослеживание контуров	507
5.4.3.1. Прослеживание контура на основе анализа сечений (508);	
5.4.3.2. Прослеживание контура на основе градиентного анализа (508)	
5.5. Сопоставление изображений и 3D-реконструкция объектов	510
5.5.1. Обзор	510
5.5.2. Процедуры сопоставления на основе схожих элементов	512
5.5.2.1. Операторы интереса (512); 5.5.2.2. Детекторы особенностей (517);	
5.5.2.3. Анализ соответствия (520)	
5.5.3. Анализ соответствия на основе эпиполярной геометрии	523
5.5.3.1. Сопоставление для стереопары изображений (523);	
5.5.3.2. Сопоставление для триплетов изображений (525);	
5.5.3.3. Сопоставление для неограниченного числа изображений (526)	

5.5.4.	Сопоставление многих снимков по областям изображений.....	526
5.5.4.1.	Сопоставление многих изображений (527); 5.5.4.2. Геометрические ограничения (527)	
5.5.5.	Полуглобальное сопоставление	531
5.5.6.	Методы сопоставления, использующие модели объекта	533
5.5.6.1.	Сопоставление многих снимков, использующее модели объектов (533); 5.5.6.2. Сопоставление многих снимков с использованием матрицы высот поверхности (537)	
5.6.	Дальностные изображения и облака точек	539
5.6.1.	Представление данных.....	539
5.6.2.	Регистрация.....	541
5.6.2.1.	Распознавание 3D-меток (541); 5.6.2.2. Распознавание 2D-меток (542); 5.6.2.3. Автоматический анализ соответствия (542); 5.6.2.4. Регистрация «облаков» точек — алгоритм итеративного поиска ближайших точек (543)	
5.6.3.	Обработка дальностных изображений.....	544
Глава 6.	Задачи и системы измерений.....	547
6.1.	Краткий обзор содержания главы	547
6.2.	Системы с одной камерой.....	547
6.2.1.	Камера с ручным фотограмметрическим щупом.....	547
6.2.2.	Измерительная система с интегрированной камерой.....	548
6.2.3.	Системы для калибровки роботов.....	549
6.2.4.	Высокоскоростные системы с 6 степенями свободы	550
6.3.	Стереоскопические системы	551
6.3.1.	Цифровые стереоплоттеры	551
6.3.1.1.	Принципы работы стереоплоттеров (551); 6.3.1.2. Процесс ориентирования (552); 6.3.1.3. Восстановление формы поверхности объекта (553)	
6.3.2.	Цифровые системы стереоотображения.....	553
6.3.3.	Системы стереозрения	557
6.4.	Системы многих снимков	558
6.4.1.	Интерактивные системы обработки.....	558
6.4.2.	Мобильные промышленные системы точечных измерений.....	561
6.4.2.1.	Фотограмметрические офлайн-системы (561); 6.4.2.2. Фотограмметрические онлайн-системы (563)	
6.4.3.	Стационарные промышленные онлайн-системы.....	567
6.4.3.1.	Системы проверки качества труб (568); 6.4.3.2. Система позиционирования стальных пластин (569)	
6.5.	Пассивные системы измерения формы поверхности.....	570
6.5.1.	Подсвет точками и сетками линий	571
6.5.1.1.	Многокамерные системы с подсветом решетками точек (571); 6.5.1.2. Многокамерные системы с подсветом решетками меток (572); 6.5.1.3. Многокамерные системы со структурированным подсветом сетками линий (573)	

6.5.2. Корреляция цифровых изображений при подсвете поверхности случайными текстурами.....	574
6.5.2.1. Способы создания текстур (574); 6.5.2.2. Обработка данных (575); 6.5.2.3. Многокамерная система для измерения динамических изменений формы поверхности (577)	
6.5.3. Измерение сложных поверхностей.....	579
6.5.3.1. Самопозиционирующиеся системы — внешнее ориентирование по точкам объекта (579); 6.5.3.2. Определение положения сканера с помощью оптической следящей системы (581); 6.5.3.3. Механическое определение положения сканера (581)	
6.6. Динамическая фотограмметрия.....	582
6.6.1. Относительное движение объекта и съемочной системы.....	582
6.6.1.1. Неподвижный объект (582); 6.6.1.2. Движущийся объект (583)	
6.6.2. Динамическая запись последовательностей изображений.....	585
6.6.3. Захват движения.....	588
6.7. Мобильные измерительные платформы.....	589
6.7.1. Мобильные системы съемки.....	589
6.7.2. Ближняя аэрофотосъемка.....	590
Глава 7. Проектирование и качество измерений.....	594
7.1. Планирование проекта.....	594
7.1.1. Критерии планирования.....	594
7.1.2. Вопросы точности измерений.....	595
7.1.3. Ограничения на параметры съемки.....	596
7.1.4. Моделирование по методу Монте-Карло.....	599
7.1.5. Автоматизированное проектирование фотограмметрической сети.....	601
7.2. Меры качества и оценка эффективности.....	604
7.2.1. Параметры качества.....	604
7.2.1.1. Погрешность измерений (604); 7.2.1.2. Опорные величины (605); 7.2.1.3. Ошибка измерения (605); 7.2.1.4. Точность (606); 7.2.1.5. Статистическая достоверность (607); 7.2.1.6. Параметры точности и статистической достоверности, получаемые в результате уравнивания (607); 7.2.1.7. Относительная точность (608); 7.2.1.8. Допустимая погрешность (608); 7.2.1.9. Разрешение (610)	
7.2.2. Сертификация и проверка измерительных систем.....	610
7.2.2.1. Основные термины (610); 7.2.2.2. Отличие от координатно-измерительных машин (КИМ) (612); 7.2.2.3. Эталонные образцы (613); 7.2.2.4. Тестирование систем поточечных измерений (615); 7.2.2.5. Тестирование сканирующих систем (617)	
7.3. Стратегии калибровки камеры.....	620
7.3.1. Методы калибровки.....	620
7.3.1.1. Лабораторная калибровка (621); 7.3.1.2. Калибровка по тестовому полю (621); 7.3.1.3. Калибровка по вертикальным линиям (624); 7.3.1.4. Калибровка в процессе измерений (624); 7.3.1.5. Самокалибровка (625); 7.3.1.6. Калибровка системы (625)	

7.3.2. Конфигурации съемки.....	626
7.3.2.1. Калибровка по плоскому полю (626); 7.3.2.2. Калибровка по пространственному полю (628); 7.3.2.3. Калибровка с перемещаемой масштабной рейкой (628)	
7.3.3. Проблемы методов самокалибровки.....	629
Глава 8. Примеры приложений	632
8.1. Архитектура, археология и культурное наследие.....	632
8.1.1. Фотограмметрическое документирование зданий.....	632
8.1.1.1. Сиенский собор (633); 8.1.1.2. Пороховая башня, Ольденбург (635); 8.1.1.3. Гадербургский замок (635)	
8.1.2. 3D-модели городов и рельефа	636
8.1.2.1. Визуализация зданий (636); 8.1.2.2. Модели городов (638); 8.1.2.3. 3D-документирование Помпей (639)	
8.1.3. Поверхности произвольной формы	641
8.1.3.1. Статуи и скульптуры (641); 8.1.3.2. Большие объекты произвольной формы (643); 8.1.3.3. Съемка Бременского кога (средневекового корабля) (644)	
8.1.4. Мозаики изображений.....	645
8.1.4.1. Мозаики изображений для картографирования следов динозавров (645); 8.1.4.2. Мозаика изображений центральной проекции (646)	
8.2. Инженерная съемка и гражданское строительство	647
8.2.1. 3D-моделирование сложных объектов.....	647
8.2.1.1. Исполнительная документация (647); 8.2.1.2. Измерение лестничных клеток (649)	
8.2.2. Анализ деформаций	649
8.2.2.1. Измерение формы больших бессемеровских конвертеров стали (650); 8.2.2.2. Деформации бетонных баков (651)	
8.2.3. Испытания материалов	652
8.2.3.1. Измерения формы известковых швов в кирпичной кладке (652); 8.2.3.2. Структурные нагрузочные испытания (654);	
8.2.4. Измерение крыш и фасадов зданий	655
8.3. Промышленные (индустриальные) приложения.....	656
8.3.1. Электростанции и промышленные предприятия.....	656
8.3.1.1. Ветроэлектрическая установка (656); 8.3.1.2. Ускорители элементарных частиц (658)	
8.3.2. Аэрокосмическая промышленность	659
8.3.2.1. Контроль оснастки (660); 8.3.2.2. Контроль производственного процесса (660); 8.3.2.3. Измерение параболической антенны (662)	
8.3.3. Автомобильная промышленность.....	664
8.3.3.1. Быстрое прототипирование и обратный инжиниринг (664); 8.3.3.2. Тесты на безопасность (666); 8.3.3.3. Деформации кузова (668)	
8.3.4. Судостроительная промышленность	669

4. Медицина	670
8.4.1. Измерения поверхности	670
8.4.2. Онлайн-системы навигации	672
5. Различные приложения	673
8.5.1. Судебная фотограмметрия	673
8.5.1.1. Съёмка дорожных происшествий (674); 8.5.1.2. Съёмка места преступления (675)	
8.5.2. Научные приложения	676
8.5.2.1. Мониторинг движения ледников (676); 8.5.2.2. Науки о Земле (678)	
Список литературы	681
Предметный указатель	698