

Thomas Luhmann

Nahbereichs- photogrammetrie

Grundlagen – Methoden – Beispiele

4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage



Wichmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	23
1.1	Übersicht	23
1.1.1	Inhalt	23
1.1.2	Literatur.....	24
1.2	Prinzipielle Methoden	24
1.2.1	Der photogrammetrische Prozess.....	24
1.2.2	Einteilungen der Photogrammetrie.....	26
1.2.3	Abbildungsmodell	29
1.2.4	Photogrammetrische Systeme und Prozesse.....	31
1.2.4.1	Digitales System.....	31
1.2.4.2	Aufnahme- und Auswerteprozess.....	32
1.2.5	Photogrammetrische Produkte.....	34
1.3	Anwendungsbereiche	35
1.4	Geschichtliche Entwicklung.....	39
2	Mathematische Grundlagen	48
2.1	Koordinatensysteme	48
2.1.1	Pixel- und Sensorkoordinatensystem.....	48
2.1.2	Bildkoordinatensystem.....	48
2.1.3	Modellkoordinatensystem	50
2.1.4	Objektkoordinatensystem.....	50
2.2	Koordinatentransformationen.....	52
2.2.1	Ebene Transformationen	52
2.2.1.1	Homogene Koordinaten.....	52
2.2.1.2	Ähnlichkeitstransformation	52
2.2.1.3	Affintransformation.....	54
2.2.1.4	Polynomtransformation	55
2.2.1.5	Bilineare Transformation.....	56
2.2.1.6	Projektivtransformation	57
2.2.2	Drehungen im 3D-Raum	60
2.2.2.1	Drehmatrix mit trigonometrischen Funktionen	60
2.2.2.2	Drehmatrix mit Quaternionen.....	63
2.2.2.3	Drehmatrix nach Rodrigues.....	66
2.2.2.4	Drehmatrix mit Richtungskosinus	66
2.2.2.5	Normalisierung von Rotationsmatrizen.....	67
2.2.2.6	Koeffizientenvergleich	68
2.2.3	Räumliche Transformationen	68
2.2.3.1	Allgemeine Transformationen.....	68
2.2.3.2	Zentralprojektion	70
2.2.4	Räumliche Ähnlichkeitstransformation.....	71
2.2.4.1	Mathematisches Modell.....	71
2.2.4.2	Näherungswerte.....	74
2.2.4.3	Berechnung mit Eigenwerten und Quaternionen.....	76
2.3	Geometrische Elemente.....	78
2.3.1	Analytische Geometrie der Ebene	79

2.3.1.1	Gerade	79
2.3.1.2	Kreis	82
2.3.1.3	Ellipse	83
2.3.1.4	Kurvendarstellung	87
2.3.2	Analytische Geometrie des Raumes	91
2.3.2.1	Gerade	91
2.3.2.2	Ebene	94
2.3.2.3	Rotationskörper	96
2.3.3	Oberflächen	101
2.3.3.1	Digitales Oberflächenmodell	102
2.3.3.2	Digitales Volumenmodell (Voxel)	105
2.3.3.3	Distanzbilder	105
2.3.3.4	B-Spline- und Bézier-Flächen	106
2.4	Ausgleichungsverfahren	107
2.4.1	Problemstellung	107
2.4.1.1	Funktionales Modell	107
2.4.1.2	Stochastisches Modell	109
2.4.2	Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell)	110
2.4.2.1	Ausgleichung direkter Beobachtungen	111
2.4.2.2	Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen	112
2.4.2.3	Levenberg-Marquardt-Algorithmus	113
2.4.2.4	Ausgleichung mit Bedingungen zwischen Unbekannten	114
2.4.3	Qualitätsmaße	116
2.4.3.1	Genauigkeitsmaße	116
2.4.3.2	Vertrauensbereiche	118
2.4.3.3	Korrelationen	121
2.4.3.4	Zuverlässigkeit	121
2.4.3.5	Präzision berechneter Koordinaten	125
2.4.4	Erkennung von Ausreißern	127
2.4.4.1	Fehlersuche ohne Ausgleichung	128
2.4.4.2	Data Snooping	128
2.4.4.3	Varianzkomponentenschätzung	129
2.4.4.4	Robuste Schätzung durch Gewichtsfunktionen	129
2.4.4.5	Robuste Schätzung nach der L1-Norm	131
2.4.4.6	RANSAC	131
2.4.5	Hinweise zur Rechentechnik	132
2.4.5.1	Linearisierung	132
2.4.5.2	Normalgleichungssysteme	133
2.4.5.3	Profilspeichertechnik und Optimierung	134
3	Aufnahmetechnik	135
3.1	Physikalische Grundlagen	135
3.1.1	Wellenoptik	135
3.1.1.1	Elektromagnetisches Spektrum	135
3.1.1.2	Strahlungsleistung	136
3.1.1.3	Brechung und Reflexion	137
3.1.1.4	Beugung	139
3.1.1.5	Polarisation	141

3.1.2	Optische Abbildung.....	142
3.1.2.1	Konstruktion der optischen Abbildung.....	142
3.1.2.2	Bündelbegrenzung.....	143
3.1.2.3	Scharfabbildung.....	144
3.1.2.4	Scheimpflug-Bedingung.....	147
3.1.3	Abbildungsfehler.....	148
3.1.3.1	Verzeichnung.....	149
3.1.3.2	Chromatische Aberration.....	150
3.1.3.3	Sphärische Aberration.....	151
3.1.3.4	Astigmatismus und Bildfeldwölbung.....	152
3.1.3.5	Lichtabfall und Vignettierung.....	153
3.1.4	Auflösungsvermögen.....	154
3.1.4.1	Auflösungsvermögen von Objektiven.....	154
3.1.4.2	Geometrisches Auflösungsvermögen.....	155
3.1.4.3	Kontrast- und Modulationsübertragung.....	157
3.1.5	Grundlagen der Abtasttheorie.....	159
3.1.5.1	Abtasttheorem.....	159
3.1.5.2	Detektoreigenschaften.....	161
3.2	Aufnahmekonzepte.....	162
3.2.1	Offline- und Online-Systeme.....	162
3.2.1.1	Offline-Photogrammetrie.....	163
3.2.1.2	Online-Photogrammetrie.....	163
3.2.2	Aufnahmekonfigurationen.....	164
3.2.2.1	Einzelbildaufnahme.....	164
3.2.2.2	Stereobildaufnahme.....	164
3.2.2.3	Mehrbildaufnahme.....	165
3.3	Geometrische Grundlagen.....	166
3.3.1	Abbildungsmaßstab und Genauigkeit.....	166
3.3.1.1	Bildmaßstab.....	166
3.3.1.2	Genauigkeitsabschätzung.....	168
3.3.2	Innere Orientierung einer Aufnahmekamera.....	170
3.3.2.1	Verkörperung des Bildkoordinatensystems.....	171
3.3.2.2	Projektionszentrum und Verzeichnung.....	172
3.3.2.3	Parameter der inneren Orientierung.....	175
3.3.2.4	Mess- und Teilmesskamera.....	176
3.3.2.5	Bestimmung der inneren Orientierung (Kalibrierung).....	178
3.3.3	Standardisierte Korrekturfunktionen.....	179
3.3.3.1	Radial-symmetrische Verzeichnung.....	179
3.3.3.2	Radial-asyymetrische und tangentiale Verzeichnung.....	184
3.3.3.3	Affinität und Scherung.....	185
3.3.3.4	Gesamtkorrektur.....	186
3.3.4	Alternative Korrekturansätze.....	187
3.3.4.1	Vereinfachte Ansätze.....	187
3.3.4.2	Erweiterte Funktionen.....	187
3.3.4.3	Entfernungsabhängige Verzeichnungskorrektur.....	189
3.3.4.4	Bildvariante Kalibrierung.....	191
3.3.4.5	Korrektur lokaler Bilddeformationen.....	192
3.3.4.6	Chromatische Aberration.....	194

3.3.5	Iterative Korrektur von Abbildungsfehlern	195
3.3.6	Umrechnungen der inneren Orientierung	197
3.3.7	Fisheye-Projektionen.....	198
3.4	Komponenten zur Bilderfassung	199
3.4.1	Optoelektronische Bildsensoren.....	201
3.4.1.1	CCD-Sensorprinzip	201
3.4.1.2	CCD-Flächensensoren.....	203
3.4.1.3	CMOS-Bildsensoren.....	205
3.4.1.4	Sensorformate.....	206
3.4.1.5	Mikrolinsen	208
3.4.1.6	Farbsensoren.....	208
3.4.1.7	Gesamtaufbau.....	211
3.4.1.8	Geometrische Eigenschaften	212
3.4.1.9	Radiometrische Eigenschaften	215
3.4.2	Kameratechnik	217
3.4.2.1	Kameratypen	217
3.4.2.2	Verschluss	219
3.4.2.3	Bildstabilisation.....	222
3.4.2.4	Auflagemaß	222
3.4.3	Objektive	223
3.4.3.1	Lichtstärke und Blendenzahl	223
3.4.3.2	Öffnungswinkel und Formatwinkel.....	224
3.4.3.3	Bildkreis und Sensorformat	225
3.4.3.4	Überweitwinkel- und Fisheye-Objektive.....	225
3.4.3.5	Vario-Objektive.....	226
3.4.3.6	Shift-Tilt-Objektive	228
3.4.3.7	Telezentrische Objektive	230
3.4.3.8	Reflektive Optiken.....	230
3.4.3.9	Stereostrahlteilung.....	231
3.4.4	Filter	232
3.5	Aufnahmesysteme	234
3.5.1	Industriekameras	234
3.5.2	Digitalkameras	235
3.5.3	Hochfrequenzkameras	238
3.5.4	Stereo- und Multikamerasysteme	241
3.5.5	Scanning-Kameras.....	243
3.5.5.1	Micro-Scanning.....	243
3.5.5.2	Macro-Scanning	243
3.5.6	Panoramakameras.....	245
3.5.6.1	Zeilenscanner.....	245
3.5.6.2	Panorama-Stitching	246
3.5.6.3	Panoramen mit Fisheye-Objektiven	247
3.5.7	Thermographiekameras	249
3.5.8	3D-Kameras	250
3.5.8.1	Time-of-Flight-Kameras.....	250
3.5.8.2	Lichtfeld-Kameras.....	250
3.6	Signalisierung und Beleuchtung.....	252
3.6.1	Objektsignalisierung.....	252

3.6.1.1	Signalisierungsmaterial	252
3.6.1.2	Kreisförmige Zielmarken	255
3.6.1.3	Kugelförmige Zielmarken	258
3.6.1.4	Linienhafte Zielmarken	260
3.6.1.5	Marken mit codierter Punktnummer.....	260
3.6.1.6	Exzentrische Signalisierungsmittel.....	261
3.6.2	Beleuchtungs- und Projektionstechniken	264
3.6.2.1	Blitzgeräte	264
3.6.2.2	Projektoren	265
3.6.2.3	Laser	266
3.6.2.4	Gerichtete Beleuchtung	268
4	Analytische Auswerteverfahren	269
4.1	Übersicht	269
4.2	Auswertung von Einzelbildern.....	271
4.2.1	Äußere Orientierung.....	271
4.2.1.1	Standardfall	271
4.2.1.2	Spezialfall der terrestrischen Photogrammetrie.....	273
4.2.2	Kollinearitätsgleichungen.....	274
4.2.3	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	277
4.2.3.1	Rückwärtsschnitt bei bekannter innerer Orientierung	278
4.2.3.2	Rückwärtsschnitt bei unbekannter innerer Orientierung	280
4.2.3.3	Näherungswerte für den Rückwärtsschnitt	281
4.2.3.4	Rückwärtsschnitt mit minimaler Objektinformation	281
4.2.3.5	Gütekriterien.....	284
4.2.4	Lineare Orientierungsverfahren.....	285
4.2.4.1	Direkte Lineare Transformation (DLT).....	285
4.2.4.2	Perspektive Projektionsmatrix	287
4.2.5	Inverser räumlicher Rückwärtsschnitt	289
4.2.5.1	Position und Orientierung eines Objektes relativ zur Kamera.....	289
4.2.5.2	Relative Position und Orientierung von Objekten	289
4.2.6	Ebene projektive Transformation	292
4.2.6.1	Mathematisches Modell.....	292
4.2.6.2	Einfluss der inneren Orientierung.....	295
4.2.6.3	Einfluss nicht ebener Objektpunkte.....	295
4.2.6.4	Vermessung ebener Objekte	296
4.2.7	Monoplotting.....	297
4.2.7.1	Regelkörper	297
4.2.7.2	Digitale Oberflächenmodelle.....	298
4.2.8	Entzerrung	300
4.2.8.1	Ebene Entzerrung	300
4.2.8.2	Differenzielle Entzerrung (Orthophoto)	302
4.2.8.3	Bildmosaike.....	306
4.3	Auswertung von Stereobildern	307
4.3.1	Stereoskopisches Verfahren	307
4.3.1.1	Stereoskopische Zuordnung	307
4.3.1.2	Verknüpfungspunkte	308
4.3.1.3	Orientierungsverfahren.....	309

4.3.1.4	Stereonormalfall	310
4.3.2	Epipolargeometrie	311
4.3.3	Relative Orientierung	312
4.3.3.1	Koplanaritätsbedingung.....	315
4.3.3.2	Berechnung.....	316
4.3.3.3	Modellkoordinaten	318
4.3.3.4	Berechnung der Epipolarlinien.....	319
4.3.3.5	Berechnung von Normalbildern	320
4.3.3.6	Qualitätskriterien	321
4.3.3.7	Besondere Fälle der relativen Orientierung.....	324
4.3.4	Fundamentalmatrix und Essentielle Matrix.....	326
4.3.5	Absolute Orientierung	327
4.3.5.1	Mathematisches Modell.....	327
4.3.5.2	Datumsfestlegung	328
4.3.5.3	Berechnung der äußeren Orientierungen	329
4.3.5.4	Berechnung der relativen Orientierung aus äußeren Orientierungen....	329
4.3.6	Stereoskopische Auswertung.....	330
4.3.6.1	Prinzip der Stereobildmessung	330
4.3.6.2	Punktbestimmung mit Bildkoordinaten.....	332
4.3.6.3	Punktbestimmung mit räumlicher Messmarke	338
4.4	Mehrbildauswertung und Bündeltriangulation.....	340
4.4.1	Allgemeines.....	340
4.4.1.1	Zielsetzung	340
4.4.1.2	Entwicklung.....	341
4.4.1.3	Datenfluss.....	343
4.4.2	Mathematisches Modell	345
4.4.2.1	Ausgleichungsansatz	345
4.4.2.2	Normalgleichungen	347
4.4.2.3	Kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen	350
4.4.2.4	Ausgleichung zusätzlicher Parameter (Kalibrierung).....	355
4.4.3	Objektkoordinatensystem (Datumsfestlegung)	357
4.4.3.1	Rang- und Datumsdefekt	357
4.4.3.2	Passpunkte	358
4.4.3.3	Direkte Georeferenzierung	361
4.4.3.4	Freie Netzausgleichung	362
4.4.4	Beschaffung von Näherungswerten.....	365
4.4.4.1	Strategien zur automatischen Berechnung von Näherungswerten.....	367
4.4.4.2	Näherungswertbestimmung mit automatischer Punktmessung	371
4.4.4.3	Praktische Aspekte bei der Näherungswertbeschaffung.....	373
4.4.5	Qualitätsmaße und Ergebnisanalyse	374
4.4.5.1	Ausgabeprotokoll	374
4.4.5.2	Sigma 0 und Rückprojektionsfehler	375
4.4.5.3	Genauigkeit der Bildkoordinaten.....	375
4.4.5.4	Genauigkeit der Objektkoordinaten.....	376
4.4.5.5	Genauigkeit der Simultankalibrierung.....	378
4.4.6	Strategien zur Bündelausgleichung	379
4.4.6.1	Simulation	379

4.4.6.2	Divergenz	380
4.4.6.3	Elimination grober Datenfehler	381
4.4.7	Mehrbildauswertung.....	382
4.4.7.1	Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt	382
4.4.7.2	Direkte Bestimmung geometrischer Elemente	385
4.4.7.3	Bestimmung räumlicher Kurven (Snakes).....	392
4.5	Panoramaphotogrammetrie	394
4.5.1	Abbildungsmodell für zylindrische Panoramabilder	394
4.5.2	Orientierung von Panoramabildern	396
4.5.2.1	Näherungswerte.....	396
4.5.2.2	Räumlicher Rückwärtsschnitt.....	397
4.5.2.3	Bündelausgleichung	397
4.5.3	Epipolargeometrie	399
4.5.4	Räumlicher Vorwärtsschnitt.....	400
4.5.5	Entzerrung von Panoramabildern	401
4.5.5.1	Orthogonale Bildentzerrung	401
4.5.5.2	Tangentialbilder.....	401
4.6	Mehrmedienphotogrammetrie	402
4.6.1	Lichtbrechung an Trennflächen.....	402
4.6.1.1	Trennflächen.....	402
4.6.1.2	Parallele ebene Trennflächen.....	403
4.6.1.3	Sphärische Trennflächen	406
4.6.1.4	Strahlverfolgung durch beliebige lichtbrechende Flächen	407
4.6.2	Erweitertes Modell der Bündeltriangulation	409
4.6.2.1	Objektinvariante Trennflächen	409
4.6.2.2	Bündelinvariante Trennflächen	410
5	Digitale Bildanalyse.....	411
5.1	Grundlagen.....	411
5.1.1	Bildanalyseprozess	411
5.1.2	Pixelkoordinatensystem.....	413
5.1.3	Bilddatenverwaltung	414
5.1.3.1	Bildpyramiden	414
5.1.3.2	Datenformate	415
5.1.3.3	Bildkompression.....	417
5.1.3.4	Integralbilder	419
5.2	Bildvorverarbeitung	420
5.2.1	Punktoperationen.....	420
5.2.1.1	Histogramm	420
5.2.1.2	Lookup-Tabellen	421
5.2.1.3	Kontrastverarbeitung	422
5.2.1.4	Schwellwertoperationen	424
5.2.1.5	Verknüpfungen von Bildern	426
5.2.2	Farbverarbeitung	427
5.2.2.1	Farbräume.....	427
5.2.2.2	Farbtransformationen	429
5.2.2.3	Farbkombinationen.....	432
5.2.3	Filterverfahren.....	434

5.2.3.1	Orts- und Frequenzraum.....	434
5.2.3.2	Glättungsfilter.....	437
5.2.3.3	Morphologische Operationen	439
5.2.3.4	Wallis-Filter.....	441
5.2.4	Kantenextraktion	442
5.2.4.1	Ableitungsfilter 1. Ordnung.....	443
5.2.4.2	Ableitungsfilter 2. Ordnung.....	445
5.2.4.3	Laplace-of-Gaussian-Filter.....	447
5.2.4.4	Schärfefilter	448
5.2.4.5	Hough-Transformation	448
5.2.4.6	Erweiterte Kanten-Operatoren.....	450
5.2.4.7	Subpixel-Interpolation	452
5.3	Geometrische Umbildung.....	455
5.3.1	Grundlagen der Umbildung	456
5.3.2	Grauwertinterpolation	457
5.3.3	Texturierte Darstellungen.....	459
5.3.3.1	Texturprojektion	459
5.3.3.2	Synthetische Bilder.....	461
5.4	Digitale Einzelbildauswertung	462
5.4.1	Näherungswerte für Zielmarken.....	462
5.4.1.1	Möglichkeiten.....	462
5.4.1.2	Segmentierung punktförmiger Muster.....	463
5.4.2	Messung punktförmiger Merkmale	465
5.4.2.1	Bildschirmmessung	465
5.4.2.2	Schwerpunktverfahren.....	465
5.4.2.3	Korrelationsverfahren.....	466
5.4.2.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung.....	469
5.4.2.5	Strukturelle Messverfahren.....	473
5.4.2.6	Genauigkeitsbetrachtungen	477
5.4.3	Merkmalsextraktion.....	478
5.4.3.1	Interest-Operatoren.....	478
5.4.3.2	Förstner-Operator	479
5.4.3.3	SUSAN-Operator	481
5.4.3.4	FAST-Operator.....	482
5.4.3.5	SIFT-Operator	483
5.4.3.6	Affine invariant SIFT (ASIFT).....	485
5.4.3.7	SURF-Operator.....	486
5.5	Bildzuordnung und 3D-Objektrekonstruktion.....	487
5.5.1	Übersicht	487
5.5.2	Strategien zur Zuordnung nicht orientierter Bilder	491
5.5.2.1	Codierte Messmarken.....	491
5.5.2.2	Structure-from-Motion	491
5.5.3	Ähnlichkeitsmaße.....	492
5.5.3.1	Summen von Differenzen.....	492
5.5.3.2	Census und Hamming-Distanz	493
5.5.3.3	Hashing.....	493
5.5.3.4	Normierte Kreuzkorrelation	494
5.5.3.5	Least-squares matching	495

5.5.3.6	Euklidische Distanz von Merkmalsvektoren	495
5.5.4	Zuordnungsverfahren im Stereobildpaar	496
5.5.4.1	Zuordnung mit Epipolarbedingungen	496
5.5.4.2	Semi-globales Matching	498
5.5.5	Mehrbildzuordnung	501
5.5.5.1	Multi-view Stereo	502
5.5.5.2	Zuordnung im orientierten Bildtripel	502
5.5.5.3	Zuordnung in beliebig vielen Bildern	504
5.5.5.4	Mehrbildzuordnung nach kleinsten Quadraten	505
5.5.6	Objektraumbasierte Zuordnungsverfahren	509
5.5.6.1	Objektgestützte Mehrbildzuordnung	510
5.5.6.2	Mehrbildzuordnung mit Oberflächenrastern	514
5.5.6.3	Objektbasiertes semi-globales Mehrbildmatching (OSGM)	516
5.5.6.4	Weitere objektbasierte Zuordnungsverfahren	518
5.5.7	Zuordnung in Bildsequenzen	521
5.5.7.1	2D-Objektverfolgung in Einzelbildsequenzen	523
5.5.7.2	3D-Objektrekonstruktion aus Einzelbildsequenzen	526
5.5.7.3	Objektverfolgung in Mehrkamera-Bildsequenzen	527
5.5.7.4	Prädiktion von Folgepunkten (Kalman-Filter)	528
5.5.7.5	Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)	530
6	Messaufgaben und Messsysteme	532
6.1	Übersicht	532
6.2	Interaktive Mess- und Auswertesysteme	532
6.2.1	Stereoskopische Messsysteme	532
6.2.1.1	Digitale Stereoauswertegeräte	532
6.2.1.2	Digitale Stereobetrachtungssysteme	535
6.2.2	Interaktive Mehrbildauswertesysteme	537
6.2.2.1	Programme mit CAD-Funktionen	537
6.2.2.2	Structure-from-Motion-Programme	539
6.2.2.3	Industrielle Offline-Auswertesysteme	540
6.2.2.4	E-Learning-Programme	541
6.3	Taktil antastende Systeme	543
6.3.1	Messprinzip	543
6.3.2	Einkamerasysteme	544
6.3.2.1	Einkamerasysteme mit Handtaster	544
6.3.2.2	Messtaster mit integrierter Kamera	545
6.3.3	Zwei- und Mehrkamerasysteme	546
6.4	Laserbasierte Messsysteme	548
6.4.1	Lasertriangulation	548
6.4.2	3D-Laserscanner	548
6.4.3	2D- und 1D-Laserscanning	553
6.4.4	Videotachymeter und Multistationen	554
6.4.5	Lasertracker	555
6.4.6	Panoramasysteme mit Laserdistanzmessung	557
6.5	Industrielle Systeme zur Messung punktförmiger Merkmale	558
6.5.1	Mobile industrielle Punktmesssysteme	558
6.5.1.1	Offline-Photogrammetriesysteme	558

6.5.1.2	Online-Photogrammetriesysteme	561
6.5.1.3	Stereokamerasysteme	563
6.5.2	Stationäre industrielle Online-Messsysteme.....	565
6.5.2.1	System zur Vermessung von Rohrleitungen.....	565
6.5.2.2	Positioniersystem für Stahlplatten	566
6.5.2.3	Mehrkamerasystem mit Punktprojektion.....	567
6.6	Industrielle Systeme zur Oberflächenmessung.....	568
6.6.1	Überblick.....	568
6.6.1.1	Aktive und passive Systeme	568
6.6.1.2	Oberflächenstrukturen	569
6.6.2	Streifenprojektionssysteme.....	570
6.6.2.1	Statische Streifenprojektion.....	570
6.6.2.2	Dynamische Streifenprojektion (Phasen-Schiebe-Verfahren)	571
6.6.2.3	Codiertes Lichtschnittverfahren	573
6.6.2.4	Aperiodische Streifenprojektion.....	574
6.6.2.5	Einkamerasysteme mit Streifenprojektion.....	575
6.6.2.6	Mehrkamerasysteme mit Streifenprojektion.....	576
6.6.2.7	Phasogrammetrische Systeme	579
6.6.3	Systeme mit punktförmigen Mustern	581
6.6.3.1	Mehrkamerasysteme mit Rasterprojektion	581
6.6.3.2	Mehrkamerasystem mit Gitterprojektion.....	581
6.6.3.3	Mehrkamerasysteme mit Mustervergrößerung	582
6.6.4	Systeme mit stochastischen Mustern.....	583
6.6.4.1	Zweikamerasysteme mit Zufallsmusterprojektion.....	583
6.6.4.2	Oberflächenerfassung mit Texturfolien.....	583
6.6.4.3	Messung dynamischer Oberflächenänderungen	584
6.6.5	3D-Projektionssysteme.....	587
6.7	Erfassung komplexer Oberflächen	588
6.7.1	Orientierungsmessung mit Objektpunkten	588
6.7.2	Orientierungsmessung mit externem Kamerasystem	589
6.7.3	Orientierungsmessung mit mechanischen Systemen.....	589
6.7.4	Orientierungsmessung mit mechanischen Systemen und Passpunkten	590
6.7.5	Verknüpfung von Punktwolken.....	592
6.8	Low-Cost-3D-Sensoren.....	594
6.8.1	Messsystem zur Gestenerkennung	594
6.8.2	3D-Handscanner.....	595
6.8.3	Messsysteme in mobilen Endgeräten	595
6.9	Systeme zur Messung dynamischer Vorgänge.....	596
6.9.1	Relativbewegungen zwischen Objekt und Aufnahmesystem.....	597
6.9.1.1	Ruhendes Objekt	597
6.9.1.2	Bewegtes Objekt.....	599
6.9.2	Aufnahme von kinematischen Vorgängen	600
6.9.2.1	Kamerasystem zur Roboterkalibrierung.....	600
6.9.2.2	Highspeed-6DOF-System.....	601
6.9.2.3	Aufnahme mit Highspeedkameras.....	602
6.9.2.4	Particle Image Velocimetry	603
6.9.3	Bewegungsanalyse	604
6.10	Messsysteme auf mobilen Plattformen.....	605

6.10.1	Mobile-Mapping-Systeme.....	605
6.10.2	Luftbildaufnahmen im Nahbereich.....	606
6.10.2.1	Flugsysteme.....	606
6.10.2.2	Sensortechnik.....	608
6.10.2.3	Flugplanung.....	609
6.10.2.4	Photogrammetrische Auswertung.....	611
7	Projektplanung und Optimierung.....	613
7.1	Projektplanung.....	613
7.1.1	Planungskriterien.....	613
7.1.2	Genauigkeitsfragen.....	614
7.1.3	Restriktionen der Aufnahmekonfiguration.....	615
7.1.4	Genauigkeitsabschätzung durch Simulation.....	618
7.1.4.1	Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung.....	618
7.1.4.2	Monte-Carlo-Simulation.....	620
7.1.4.3	Unscented Transformation.....	622
7.1.4.4	Bootstrap-Simulation.....	623
7.1.5	Design der Aufnahmeanordnung.....	624
7.1.5.1	Netzoptimierung.....	624
7.1.5.2	Maßstab.....	627
7.2	Qualitätskriterien und Genauigkeitsanalyse.....	629
7.2.1	Statistische Kenngrößen.....	629
7.2.1.1	Innere Genauigkeit.....	629
7.2.1.2	Äußere Genauigkeit.....	630
7.2.1.3	Relative Genauigkeit.....	631
7.2.2	Messtechnische Kenngrößen.....	632
7.2.2.1	Messunsicherheit.....	632
7.2.2.2	Messabweichung.....	632
7.2.2.3	Referenzwert, richtiger Wert und wahrer Wert.....	633
7.2.2.4	Genauigkeit.....	633
7.2.2.5	Präzision.....	633
7.2.2.6	Toleranz.....	634
7.2.2.7	Auflösung.....	634
7.2.3	Prüfung optischer 3D-Messsysteme.....	635
7.2.3.1	Begriffsdefinitionen.....	635
7.2.3.2	Abgrenzung zu mechanischen Koordinatenmessgeräten.....	637
7.2.3.3	Prüfkörper.....	638
7.2.3.4	Prüfung punktförmig antastender Systeme.....	640
7.2.3.5	Prüfung flächenhaft antastender Systeme.....	644
7.3	Strategien zur Kamerakalibrierung.....	647
7.3.1	Kalibrierverfahren.....	647
7.3.1.1	Testfeldkalibrierung.....	648
7.3.1.2	Plumbline-Kalibrierung.....	650
7.3.1.3	Simultankalibrierung.....	651
7.3.1.4	Systemkalibrierung.....	652
7.3.2	Aufnahmekonfigurationen.....	652
7.3.2.1	Kalibrierung mit ebenem Punktfeld.....	653
7.3.2.2	Kalibrierung mit räumlichem Punktfeld.....	653

7.3.2.3	Kalibrierung mit bewegtem Maßstab	654
7.3.3	Kalibrierung spezieller Aufnahmesysteme	655
7.3.3.1	Kalibrierung von Stereo- und Mehrkameranystemen	655
7.3.3.2	Kalibrierung von Fisheye-Kameras	656
7.3.3.3	Kalibrierung von Unterwasser-Kameras	657
7.3.4	Qualitätskriterien für die Kamerakalibrierung	658
7.3.5	Probleme bei der Simultankalibrierung	659
8	Anwendungsbeispiele	662
8.1	Architektur, Archäologie und Denkmalpflege	662
8.1.1	Photogrammetrische Bauaufnahme	662
8.1.1.1	Strichzeichnungen	663
8.1.1.2	3D-Gebäudemodelle	664
8.1.1.3	Bildpläne und Orthophotos	665
8.1.2	3D-Stadt- und Landschaftsmodelle	666
8.1.2.1	Stadtmodelle	666
8.1.2.2	Ableitung von Geländemodellen aus multispektralen Bilddaten	667
8.1.2.3	Landschaftsmodell aus Laserscanning und Photogrammetrie	669
8.1.3	Skulpturen und Museumsobjekte	670
8.1.3.1	Statuen und Skulpturen	671
8.1.3.2	Vermessung der Bremer Hanse-Kogge	674
8.1.4	Archäologische Ausgrabungen	676
8.1.4.1	3D-Dokumentation von Pompeji	676
8.1.4.2	Hadrianstempel	677
8.1.4.3	Grabkammer Otzing	678
8.1.5	Bildmosaike	679
8.1.5.1	Bildmosaike zur Kartierung von Dinosaurierspuren	679
8.1.5.2	Zentralperspektive Bildmosaike	680
8.2	Ingenieurvermessung und Bauwesen	681
8.2.1	3D-Erfassung komplexer Objekte	681
8.2.1.1	As-Built-Dokumentation	681
8.2.1.2	Building Information Modeling	682
8.2.1.3	Treppenvermessung	683
8.2.2	Deformationsmessungen	684
8.2.2.1	Deformationsmessungen an Betonwannen	685
8.2.2.2	Erfassung von Rotorblättern an Windenergieanlagen	686
8.2.3	Materialprüfung	688
8.2.3.1	Oberflächenmessung an Mauerfugen	688
8.2.3.2	Bauphysikalische Belastungsversuche	689
8.2.4	Dach- und Fassadenvermessung	690
8.3	Industrielle Messtechnik	691
8.3.1	Kraftwerks- und Anlagenbau	691
8.3.1.1	Windkraftanlagen	691
8.3.1.2	Teilchenbeschleuniger	693
8.3.2	Luft- und Raumfahrtindustrie	694
8.3.2.1	Vorrichtungsbau	694
8.3.2.2	Fertigungskontrolle	695
8.3.2.3	Antennenvermessung	695

8.3.3	Automobil- und Fahrzeugbau.....	697
8.3.3.1	Rapid Prototyping und Reverse Engineering.....	697
8.3.3.2	Fahrzeugsicherheitsversuch.....	698
8.3.3.3	Fahrzeugdeformationen.....	701
8.3.4	Schiffbau.....	701
8.4	Mehrmedienphotogrammetrie.....	702
8.4.1	Vermessung von Wasseroberflächen.....	702
8.4.2	Unterwasser-Schweißnahtmessung.....	704
8.5	Medizin.....	705
8.5.1	Flächenhafte Objekterfassung.....	706
8.5.2	Navigationsysteme.....	707
8.6	Sonstige Anwendungsbereiche.....	709
8.6.1	Forensische Anwendungen.....	709
8.6.1.1	Unfallvermessung.....	709
8.6.1.2	Tatrekonstruktion.....	711
8.6.2	Naturwissenschaftliche Anwendungen.....	711
8.6.2.1	Beobachtung von Gletscherbewegungen.....	712
8.6.2.2	Erdwissenschaften.....	713
8.6.2.3	Entomologie (Insektenkunde).....	715
8.6.2.4	Vermessung einer Seifenblase.....	717
9	Literaturverzeichnis.....	718
9.0	Lehrbücher und Monographien.....	718
9.0.1	Photogrammetrie.....	718
9.0.2	Optik, Kamera- und Aufnahmetechnik.....	718
9.0.3	Digitale Bildverarbeitung, Computer Vision und Mustererkennung.....	719
9.0.4	Mathematik und 3D-Computergrafik.....	720
9.0.5	Ausgleichsrechnung und Statistik.....	721
9.0.6	Industriemesstechnik, Optische 3D-Messtechnik, Qualitätssicherung.....	721
9.0.7	Anwendungen.....	722
9.1	Kap. 1 Einführung.....	722
9.2	Kap. 2 Mathematische Grundlagen.....	724
9.2.1	Transformationen und Geometrie.....	724
9.2.2	Ausgleichsrechnung.....	725
9.3	Kap. 3 Aufnahmetechnik.....	726
9.3.1	Optik und Abtastung.....	726
9.3.2	Modellierung und Kalibrierung.....	726
9.3.3	Sensoren und Kameras.....	730
9.3.4	Signalisierung und Beleuchtung.....	732
9.4	Kap. 4 Analytische Auswerteverfahren.....	733
9.4.1	Analytische Photogrammetrie.....	733
9.4.2	Bündelausgleichung.....	735
9.4.3	Mehrmedienphotogrammetrie.....	737
9.4.4	Panoramaphotogrammetrie.....	737
9.5	Kap. 5 Digitale Bildanalyse.....	738
9.5.1	Grundlagen und Bildverarbeitung.....	738
9.5.2	Mustererkennung und Bildzuordnung.....	739
9.6	Kap. 6 Messaufgaben und Messsysteme.....	743

9.6.1	Interaktive Mess- und Auswertesysteme	743
9.6.2	Messung von Punkten und Konturen.....	744
9.6.3	Laserbasierte Messsysteme	745
9.6.4	Messung von Oberflächen.....	746
9.6.5	Low-Cost-3D-Systeme	748
9.6.6	Dynamische und mobile Systeme	748
9.7	Kap. 7 Projektplanung und Optimierung.....	750
9.7.1	Projektplanung und Simulation	750
9.7.2	Qualitätskriterien und Genauigkeitsanalyse	751
9.7.3	Kamerakalibrierung.....	752
9.8	Kap. 8 Anwendungsbeispiele	753
9.8.1	Architektur, Archäologie, Stadtmodelle.....	753
9.8.2	Ingenieur- und Industrieanwendungen	755
9.8.3	Medizin, Forensik, Naturwissenschaften.....	757
9.9	Sonstige Informationsquellen.....	758
9.9.1	Normen und Richtlinien	758
9.9.2	Arbeitsgruppen und Konferenzen.....	758
	Abkürzungsverzeichnis	760
	Bildnachweis	763
	Stichwortverzeichnis	766