

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
1.1	Übersicht.....	1
1.1.1	Inhalt.....	1
1.1.2	Literatur.....	2
1.2	Prinzipielle Methoden.....	3
1.2.1	Der photogrammetrische Prozess.....	3
1.2.2	Einteilungen der Photogrammetrie.....	5
1.2.3	Abbildungsmodell.....	8
1.2.4	Photogrammetrische Systeme.....	10
1.2.4.1	Analoges System.....	10
1.2.4.2	Digitales System.....	11
1.2.4.3	Aufnahme- und Auswerteprozess.....	12
1.2.5	Photogrammetrische Produkte.....	14
1.3	Anwendungsbereiche.....	15
1.4	Geschichtliche Entwicklung.....	18
2	Mathematische Grundlagen.....	26
2.1	Koordinatensysteme.....	26
2.1.1	Bildkoordinatensystem.....	26
2.1.2	Komparatorkoordinatensystem.....	27
2.1.3	Modellkoordinatensystem.....	27
2.1.4	Objektkoordinatensystem.....	28
2.2	Koordinatentransformationen.....	29
2.2.1	Ebene Transformationen.....	29
2.2.1.1	Ähnlichkeitstransformation.....	29
2.2.1.2	Affintransformation.....	30
2.2.1.3	Polynomtransformation.....	32
2.2.1.4	Bilineare Transformation.....	32
2.2.1.5	Projektivtransformation.....	33
2.2.2	Räumliche Transformationen.....	35
2.2.2.1	Räumliche Drehungen.....	35
2.2.2.2	Räumliche Ähnlichkeitstransformation.....	41
2.2.2.3	Grafische Transformationen.....	45
2.3	Ausgleichungsverfahren.....	50
2.3.1	Problemstellung.....	50
2.3.1.1	Funktionales Modell.....	50
2.3.1.1	Stochastisches Modell.....	52
2.3.2	Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell).....	53
2.3.2.1	Ausgleichung direkter Beobachtungen.....	54
2.3.2.2	Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen.....	55
2.3.2.3	Ausgleichung mit Bedingungen zwischen Unbekannten.....	57
2.3.3	Qualitätsmaße.....	59
2.3.3.1	Genauigkeitsmaße.....	59
2.3.3.2	Vertrauensbereiche.....	61
2.3.3.3	Korrelationen.....	63
2.3.3.4	Zuverlässigkeit.....	64
2.3.4	Erkennung von Ausreißern.....	68
2.3.4.1	Fehlersuche ohne Ausgleichung.....	68

2.3.4.2	Data Snooping	69
2.3.4.3	Varianzkomponentenschätzung	69
2.3.4.4	Robuste Schätzung durch Gewichtsfunktionen	70
2.3.4.5	Robuste Schätzung nach der L1-Norm	71
2.3.5	Hinweise zur Rechentechnik	72
2.3.5.1	Linearisierung	72
2.3.5.2	Normalgleichungssysteme	73
2.3.5.3	Profilspeichertechnik und Optimierung	73
2.4	Geometrische Elemente	75
2.4.1	Analytische Geometrie der Ebene	76
2.4.1.1	Gerade	76
2.4.1.2	Kreis	79
2.4.1.3	Ellipse	80
2.4.1.4	Kurvendarstellung	83
2.4.2	Analytische Geometrie des Raumes	87
2.4.2.1	Gerade	87
2.4.2.2	Ebene	90
2.4.2.3	Rotationskörper	92
2.4.3	Oberflächen	97
2.4.3.1	Digitales Oberflächenmodell	98
2.4.3.2	B-Spline- und Bezier-Flächen	100
2.4.4	Funktionsgerechte Elemente	100
3	Aufnahmetechnik	102
3.1	Aufnahmekonzepte	102
3.1.1	Methoden der Bilderfassung	102
3.1.2	Aufnahmekonfigurationen	103
3.1.2.1	Einzelbildaufnahme	103
3.1.2.2	Stereobildaufnahme	103
3.1.2.3	Mehrbildaufnahme	104
3.2	Geometrische Grundlagen	105
3.2.1	Abbildungsmaßstab und Genauigkeit	105
3.2.1.1	Bildmaßstab	105
3.2.1.2	Genauigkeitsabschätzung	107
3.2.2	Optische Abbildung	110
3.2.2.1	Konstruktion der optischen Abbildung	110
3.2.2.2	Brechung und Reflexion	111
3.2.2.3	Beugung	112
3.2.2.4	Projektionszentrum und Verzeichnung	113
3.2.2.5	Scharfabbildung	116
3.2.2.6	Lichtabfall und Vignettierung	118
3.2.3	Innere Orientierung einer Aufnahmekamera	118
3.2.3.1	Parameter der inneren Orientierung	118
3.2.3.2	Bildfehler beschreibende Funktionen	120
3.2.3.3	Iterative Korrektur von Abbildungsfehlern	127
3.2.3.4	Verkörperung des Bildkoordinatensystems	129
3.2.3.5	Transformationen für die innere Orientierung	130
3.2.3.6	Mess- und Teilmesskamera	132
3.2.3.7	Bestimmung der inneren Orientierung (Kalibrierung)	133
3.2.4	Auflösungsvermögen	135
3.2.4.1	Geometrisches Auflösungsvermögen	135

3.2.4.2	Kontrast- oder Modulationsübertragung.....	137
3.2.5	Grundlagen der Abtasttheorie.....	138
3.2.5.1	Abtasttheorem.....	138
3.2.5.2	Detektoreigenschaften	140
3.3	Aufnahmesysteme.....	142
3.3.1	Analoge Aufnahmesysteme.....	142
3.3.1.1	Fotografische Grundlagen	142
3.3.1.2	Kameratechnik.....	146
3.3.1.3	Objektive	148
3.3.1.4	Kameras mit mechanischer Bildverebnung (Messkameras).....	152
3.3.1.5	Kameras mit optisch-numerischer Bildverebnung (Réseaukameras).....	154
3.3.1.6	Sonstige Aufnahmesysteme.....	160
3.3.2	Digitale Aufnahmesysteme.....	164
3.3.2.1	Systemkomponenten.....	164
3.3.2.2	Opto-elektronische Bildsensoren.....	165
3.3.2.3	Geometrische und radiometrische Eigenschaften	171
3.3.2.4	CCD-Videokameras	175
3.3.2.5	Hochauflösende Digitalkameras	182
3.3.2.6	Scanning-Kameras.....	187
3.3.2.7	Panoramakameras.....	190
3.3.2.8	Farbkameras	191
3.3.2.9	Hochfrequenzkameras	193
3.3.2.10	Ausblick	195
3.3.3	Hybride Bilderfassung.....	196
3.3.3.1	Abtastrate	196
3.3.3.2	Quantisierung	199
3.3.3.3	Gerätetypen	200
3.3.3.4	Geometrische Korrektur von Bildscannern	203
3.3.4	Lasermesssysteme	206
3.3.4.1	3D-Laserscanner.....	206
3.3.4.2	Laser-Tracker	209
3.3.4.3	Laser-Radar	210
3.3.5	Sonstige Aufnahmesysteme.....	212
3.3.5.1	Videotheodolit	212
3.3.5.2	Schwenk-Neige-Kamera.....	213
3.3.5.3	Kameras mit Positionsbestimmung	214
3.3.5.4	Rasterelektronenmikroskop.....	215
3.4	Signalisierung und Beleuchtung	218
3.4.1	Objektsignalisierung.....	218
3.4.1.1	Kreisförmige Zielmarken	218
3.4.1.2	Linienhafte Zielmarken	223
3.4.1.3	Marken mit codierter Punktnummer.....	224
3.4.1.4	Exzentrische Signalisierungsmittel.....	225
3.4.2	Beleuchtungstechniken.....	227
3.4.2.1	Blitzgeräte	227
3.4.2.2	Projektoren	228
3.4.2.3	Laser	230
3.4.2.4	Gerichtete Beleuchtung	232
4	Analytische Auswerteverfahren	233
4.1	Übersicht.....	233

4.2	Orientierungsverfahren	235
4.2.1	Äußere Orientierung	235
4.2.1.1	Standardfall	235
4.2.1.2	Spezialfall der terrestrischen Photogrammetrie	236
4.2.2	Kollinearitätsgleichungen	237
4.2.3	Orientierung eines Einzelbildes	239
4.2.3.1	Räumlicher Rückwärtsschnitt	239
4.2.3.2	Direkte Lineare Transformation (DLT)	246
4.2.4	Orientierung eines Stereobildpaares	249
4.2.4.1	Verknüpfungspunkte	249
4.2.4.2	Kern- oder Epipolareometrie	250
4.2.4.3	Relative Orientierung	252
4.2.4.4	Absolute Orientierung	263
4.3	Bündeltriangulation	266
4.3.1	Allgemeines	266
4.3.1.1	Zielsetzung	266
4.3.1.2	Entwicklung	267
4.3.1.3	Datenfluss	269
4.3.2	Mathematisches Modell	271
4.3.2.1	Ausgleichungsansatz	271
4.3.2.2	Normalgleichungen	273
4.3.2.3	Kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen	276
4.3.2.4	Ausgleichung zusätzlicher Parameter	280
4.3.3	Objektkoordinatensystem (Datumsfestlegung)	283
4.3.3.1	Rang- und Datumsdefekt	283
4.3.3.2	Passpunkte	284
4.3.3.3	Freie Netzausgleichung	287
4.3.4	Beschaffung von Näherungswerten	291
4.3.4.1	Strategien zur automatischen Berechnung von Näherungswerten	293
4.3.4.2	Näherungswertbestimmung mit automatischer Punktmessung	298
4.3.4.3	Sonstige Verfahren	299
4.3.4.4	Praktische Aspekte bei der Näherungswertbeschaffung	301
4.3.5	Qualitätsmaße und Ergebnisanalyse	302
4.3.5.1	Ausgabeprotokoll	302
4.3.5.2	Genauigkeit der Bildkoordinaten	303
4.3.5.3	Genauigkeit der Objektkoordinaten	304
4.3.5.4	Genauigkeit der Simultankalibrierung	305
4.3.6	Strategien zur Bündelausgleichung	307
4.3.6.1	Simulation	307
4.3.6.2	Divergenz	308
4.3.6.3	Elimination grober Datenfehler	309
4.4	Objektrekonstruktion	310
4.4.1	Einzelbildauswertung	310
4.4.1.1	Projektive Transformation	310
4.4.1.2	Auswertung mit dreidimensionalen Objektmodellen	315
4.4.2	Stereoskopische Auswertung	320
4.4.2.1	Prinzip der Stereobildmessung	320
4.4.2.2	Punktbestimmung mit Bildkoordinaten	321
4.4.2.3	Punktbestimmung mit räumlicher Messmarke	327
4.4.3	Mehrbildauswertung	329

4.4.3.1	Allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt	329
4.4.3.2	Direkte Bestimmung geometrischer Elemente	331
4.4.3.3	Bestimmung räumlicher Kurven (Snakes).....	339
4.5	Linienphotogrammetrie.....	341
4.5.1	Rückwärtsschnitt mit parallelen Objektgeraden	341
4.5.2	Kollinearitätsgleichungen für Geraden	344
4.5.3	Relative Orientierung mit Geraden.....	346
4.5.4	3D-Ähnlichkeitstransformation mit Geraden.....	348
4.5.5	Bündelausgleichung mit Geraden.....	349
4.5.6	Bündelausgleichung mit geometrischen Elementen	350
4.6	Mehrmedienphotogrammetrie.....	352
4.6.1	Lichtbrechung an Trennflächen	352
4.6.1.1	Trennflächen.....	352
4.6.1.2	Parallele ebene Trennflächen.....	352
4.6.1.3	Strahlverfolgung durch lichtbrechende Flächen	355
4.6.2	Erweitertes Modell der Bündeltriangulation.....	357
4.6.2.1	Objektinvariante Trennflächen	357
4.6.2.2	Bündelinvariante Trennflächen	358
5	Digitale Bildverarbeitung	359
5.1	Grundlagen	359
5.1.1	Bildverarbeitungsprozess.....	359
5.1.2	Pixelkoordinatensystem.....	361
5.1.3	Bilddatenverwaltung.....	362
5.1.3.1	Bildpyramiden	362
5.1.3.2	Datenformate	364
5.1.3.3	Bildkompression.....	365
5.2	Bildvorverarbeitung	368
5.2.1	Punktoperationen	368
5.2.1.1	Histogramm	368
5.2.1.2	Lookup-Tabellen	369
5.2.1.3	Kontrastverarbeitung	370
5.2.1.4	Schwellwertoperationen	372
5.2.1.5	Verknüpfungen von Bildern	374
5.2.2	Filterverfahren	375
5.2.2.1	Orts- und Frequenzraum.....	375
5.2.2.2	Glättungsfilter.....	378
5.2.2.3	Morphologische Operationen	380
5.2.3	Kantenextraktion	382
5.2.3.1	Ableitungsfilter 1. Ordnung.....	383
5.2.3.2	Ableitungsfilter 2. Ordnung.....	385
5.2.3.3	Laplace-of-Gaussian Filter	387
5.2.3.4	Hough-Transformation	388
5.2.3.5	Erweiterte Kanten-Operatoren.....	389
5.2.3.6	Subpixel-Interpolation	391
5.3	Geometrische Umbildung	395
5.3.1	Grundlagen der Entzerrung.....	396
5.3.2	Grauwertinterpolation.....	397
5.3.3	3D-Visualisierung.....	399
5.3.3.1	Übersicht	399
5.3.3.2	Reflexion und Beleuchtung	401

5.3.3.3	Texturprojektion	405
5.4	Digitale Einzelbildauswertung	408
5.4.1	Näherungswerte	408
5.4.1.1	Möglichkeiten	408
5.4.1.2	Segmentierung punktförmiger Muster	408
5.4.2	Messung punktförmiger Merkmale	411
5.4.2.1	Bildschirmmessung	411
5.4.2.2	Schwerpunktverfahren	412
5.4.2.3	Korrelationsverfahren	413
5.4.2.4	Kleinste-Quadrate-Anpassung	415
5.4.2.5	Strukturelle Messverfahren	420
5.4.2.6	Genauigkeitsbetrachtungen	423
5.4.3	Konturverfolgung	426
5.4.3.1	Profilgesteuerte Konturverfolgung	426
5.4.3.2	Konturverfolgung mit Gradientenanalyse	427
5.5	Bildzuordnung und 3D-Objektrekonstruktion	428
5.5.1	Übersicht	428
5.5.2	Merkmalgestützte Zuordnungsverfahren	431
5.5.2.1	Interest-Operatoren	431
5.5.2.2	Korrespondenzanalyse	435
5.5.3	Korrespondenzanalyse mit Epipolargeometrie	436
5.5.3.1	Zuordnung im Bildpaar	437
5.5.3.2	Zuordnung im Bildtripel	438
5.5.3.3	Zuordnung in beliebig vielen Bildern	439
5.5.4	Flächenbasierte Mehrbildzuordnung	440
5.5.4.1	Mehrbildzuordnung	440
5.5.4.2	Geometrische Bedingungen	441
5.5.5	Zuordnungsverfahren mit Objektmodellen	445
5.5.5.1	Objektgestützte Mehrbildzuordnung	445
5.5.5.2	Mehrbildzuordnung mit Oberflächenrastern	449
6	Photogrammetrische Messsysteme	452
6.1	Komparatoren	452
6.1.1	Prinzipieller Aufbau	452
6.1.2	Analoge Bildkomparatoren	453
6.1.3	Digitale Bildkomparatoren	453
6.1.3.1	Komparator mit mechanischer Sensororientierung	454
6.1.3.2	Komparator mit optisch-numerischer Sensororientierung	454
6.2	Stereoskopische Auswertesysteme	456
6.2.1	Analytische Stereoauswertegeräte	456
6.2.1.1	Prinzip des Analytischen Plotters	456
6.2.1.2	Orientierungsvorgänge	457
6.2.1.3	Objektauswertung	458
6.2.2	Digitale Stereoauswertesysteme	459
6.2.3	Stereovisionsysteme	461
6.3	Mehrbildmesssysteme	462
6.3.1	Interaktive Auswertesysteme	462
6.3.1.1	Auswertesysteme mit Digitizertablett	462
6.3.1.2	Digitale Auswertesysteme	463
6.3.2	Mobile industrielle Punktmesssysteme	465
6.3.2.1	Offline-Photogrammetriesysteme	465

6.3.2.2	Online-Photogrammetriesysteme.....	467
6.3.3	Stationäre industrielle Online-Messsysteme.....	470
6.3.3.1	Mehrbildsysteme zur Produktionskontrolle.....	470
6.3.3.2	Mehrbildsystem mit Rundtisch.....	473
6.3.4	Selbstorientierende Messsysteme.....	475
6.3.4.1	Selbstorientierender Messtaster.....	475
6.3.4.2	Kamerasystem zur Roboterkalibrierung.....	476
6.4	Systeme zur Oberflächenmessung.....	477
6.4.1	Aktive Musterprojektion.....	478
6.4.1.1	Statische Streifenprojektion.....	478
6.4.1.2	Dynamische Streifenprojektion (Phasen-Schiebe-Verfahren).....	479
6.4.1.3	Codiertes Lichtschnittverfahren.....	480
6.4.1.4	Mehrkamerasysteme mit Streifenprojektion.....	481
6.4.1.5	Phasogrammetrie.....	483
6.4.2	Passive Musterprojektion.....	485
6.4.2.1	Mehrkamerasystem mit Punktprojektion.....	485
6.4.2.2	Mehrkamerasysteme mit Rasterprojektion.....	486
6.4.2.3	Mehrkamerasysteme mit Zufallsmusterprojektion.....	486
6.5	Annahme und Überwachung von Messsystemen.....	488
6.5.1	Begriffsdefinitionen.....	488
6.5.2	Abgrenzung zu Koordinatenmessgeräten.....	489
6.5.3	Längenmessabweichung.....	491
7	Messanordnungen und Lösungskonzepte.....	493
7.1	Projektplanung.....	493
7.1.1	Planungskriterien.....	493
7.1.2	Genauigkeitsfragen.....	494
7.1.3	Restriktionen der Aufnahmeconfiguration.....	495
7.1.4	Rechnergestützte Aufnahmeplanung.....	497
7.1.4.1	Optimierung.....	498
7.1.4.2	Berechnung von Aufnahmeparametern.....	501
7.2	Anordnungen zur Kalibrierung.....	502
7.2.1	Kalibrierungsmethoden.....	502
7.2.1.1	Laborkalibrierung.....	502
7.2.1.2	Testfeldkalibrierung.....	503
7.2.1.3	Plumblinie-Kalibrierung.....	504
7.2.1.4	On-the-job-Kalibrierung.....	505
7.2.1.5	Simultankalibrierung.....	506
7.2.1.6	Systemkalibrierung.....	506
7.2.2	Aufnahmeconfigurationen.....	507
7.2.2.1	Kalibrierung mit ebenem Punktfeld.....	507
7.2.2.2	Kalibrierung mit räumlichem Punktfeld.....	508
7.2.2.3	Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung.....	510
7.2.2.4	Kalibrierung mit erweiterter Einzelbildorientierung.....	511
7.2.2.5	Probleme bei der Simultankalibrierung.....	512
7.3	Dynamische Photogrammetrie.....	514
7.3.1	Relativbewegungen zwischen Objekt und Aufnahmesystem.....	514
7.3.1.1	Ruhendes Objekt.....	514
7.3.1.2	Bewegtes Objekt.....	515
7.3.2	Aufnahme von kinematischen Vorgängen.....	517
7.3.2.1	Bildfolgen.....	517

7.3.2.2	Zeitfolgen, Motografie.....	519
7.4	Luftbildaufnahmen im Nahbereich	520
8	Anwendungsbeispiele.....	523
8.1	Architektur und Denkmalpflege.....	523
8.1.1	Photogrammetrische Bauaufnahme	523
8.1.1.1	Dom von Siena	524
8.1.1.2	Pulverturm Oldenburg	526
8.1.2	3D-Modelle.....	528
8.1.2.1	Visualisierung von Gebäuden.....	528
8.1.2.2	Stadtmodelle.....	529
8.1.3	Freiformflächen	530
8.2	Ingenieurvermessung, Bauwesen.....	532
8.2.1	Deformationsmessungen	532
8.2.1.1	Formerfassung großer Stahlkonverter	532
8.2.1.2	St. Michaeliskirche Lüneburg.....	534
8.2.2	Tunnelaufnahmen	536
8.3	Industrielle Anwendungen	537
8.3.1	Kraftwerks- und Anlagenbau.....	537
8.3.2	Luft- und Raumfahrtindustrie	538
8.3.3	Automobilindustrie.....	541
8.3.4	Schiffbau	543
8.4	Forensische Anwendungen	544
8.5	Medizin	545
8.5.1	Flächenhafte Objekterfassung	545
8.5.2	Online-Messsysteme.....	547
	Literaturverzeichnis	549
	Abkürzungsverzeichnis	568
	Bildnachweis	571
	Sachwörterverzeichnis.....	574