

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Grundlegende Begriffe	1
1.2	Spektrum der Darstellung von Bilddaten	2
1.3	Spektrum der Bilddatenverarbeitung und Eingriffsplanung	3
1.4	Spektrum der Bildnutzung zur bildgestützten Intervention	4
1.5	Aufbau und Gliederung des Lehrbuchs	4
1.6	Entstehung des Fachgebiets	4
1.7	Gliederung der Verfahren	5
1.8	Konzept des Buches und Matlab-Beispiele	7
	Literatur	8
<b>2</b>	<b>Anwendungen der Navigation in der Kopf-Chirurgie</b>	<b>9</b>
2.1	Geschichtliche Entwicklung	9
2.2	Bestandteile eines Navigationssystems	12
2.3	Ablauf der bildgestützten Navigation	14
2.4	Ablauf der Echtzeitbild-Navigation	18
2.5	Ablauf der planungsbasierten Navigation	21
2.6	Planung und Navigation für die dentale Implantologie	22
2.6.1	Planung der Prothetik	23
2.6.2	Präoperative Bildgebung	24
2.6.3	Präoperative Eingriffsplanung	25
2.6.4	Kameraausrichtung und Registrierung	27
2.6.5	Bildgestützte Navigation und Bohrerwechsel	29
2.6.6	Automatische Eingriffsdokumentation	30
2.7	Navigated Control und Robotik	31
2.7.1	Navigated Control	31
2.7.2	Chirurgische Roboter	33
	Literatur	35

<b>3</b>	<b>Mathematische Modellierung</b>	37
3.1	Modelle und Darstellung volumetrischer Bilddaten	38
3.1.1	Modelle und Grundlagen zweidimensionaler Bilder und Bildanzeigen.	38
3.1.2	Modelle und Grundlagen volumetomographischer Bilddaten	41
3.1.3	Grundlagen der Bildanzeige volumetomographischer Bilddaten	46
3.1.4	Grundlagen der dreidimensionalen Partikel- und Oberflächenbilder.	52
3.2	Grundlagen der Koordinatentransformation	56
3.2.1	Modelle für die Beschreibung von Position und Orientierung	56
3.2.2	Kurzdarstellung von Koordinaten und Koordinatensysteme	57
3.2.3	Kurzdarstellung von Einheitsvektoren und Vektorprodukten	65
3.2.4	Umrechnung einer Rotationsmatrix in echte Raumwinkel	67
3.2.5	Zerlegung einer Rotationsmatrix in Nicken-Gieren-Rollen Matrizen	69
3.2.6	Quaternionen	71
3.2.7	Rotationen mit Drehachse und Drehwinkel	74
3.3	Geometrische Berechnungen in Koordinatensystemen	75
3.3.1	HT-Matrizen zur Definition von Koordinatensystemen, Ebenen und Geraden	75
3.3.2	Abstände zu Geraden und Ebenen	80
3.3.3	Schnitte von Geraden und Ebenen	83
3.3.4	Geometrische Figuren und Körper.	87
3.4	Hintergründe zu Messungen, Messfehlern und Fehlerpropagierung	90
3.4.1	Grundlagen und Modelle zu Messungen und statistischen Bewertungen.	90
3.4.2	Fehler durch Diskretisierung oder Quantisierung von Größen	93
3.5	Einlesen und Anzeigen eines DIC OM-Datensatzes in Matlab	96
	Literatur.	99
<b>4</b>	<b>Modelle und Grundlagen der Navigation</b>	101
4.1	Modelle und Koordinatensysteme für die Navigation	101
4.2	Grundlagen und Messprinzipien einer Stereokamera	103
4.3	Modelle und Koordinatensysteme von Stereokamera und Messmarken	106
4.3.1	Modelle und Koordinatensysteme der Stereokamera.	106
4.3.2	Modelle und Koordinatensysteme der Tracker	107
4.3.3	Einmessen neuer Messmarken-Tracker und neuer Instrumente.	111
4.3.4	Grundlagen und Modelle zur Ausrichtung von Kamera und Tracker	112
4.3.5	Ausrichtung der Kamera vor der Registrierung	115

4.4	Grundlagen der Registrierung mit Landmarken . . . . .	117
4.4.1	Grundlage der Registrierung von Koordinatensystemen . . . . .	117
4.4.2	Grundlagen der Registrierung von Patient und Bilddatensatz . . . . .	119
4.4.3	Grundlagen und Modelle zu Landmarken für die Registrierung . . . . .	121
4.4.4	Grundlagen und Modelle der Landmarken-Kupplung . . . . .	123
4.5	Grundlage der Visualisierung von Projektionsbildern . . . . .	126
4.5.1	Grundlagen und Modelle für Projektionen in Bildansichten . . . . .	126
4.5.2	Grundlagen und Modelle für Schnittpunktberechnungen im Raum . . . . .	128
4.6	Grundlagen der Registrierung und Kalibrierung von Instrumenten . . . . .	131
4.6.1	Modelle und Koordinatensysteme für Instrumente und Werkzeuge . . . . .	131
4.6.2	Registrierung der Position von starren Instrumenten . . . . .	132
4.6.3	Kalibrierung: Registrierung der Pose starrer Instrumente . . . . .	133
4.6.4	Kalibrierung von Werkzeuglänge und Werkzeugdurchmesser . . . . .	135
4.6.5	Grundlage und Modelle der Instrumententracker-Kupplung . . . . .	137
4.7	Verfahren zur Kontrolle und Risikominimierung . . . . .	140
4.7.1	Angaben von Fehlergrößen als Genauigkeitskriterien . . . . .	140
4.7.2	Kontrolle und Sicherheit der Registrierung von Instrument und Patient . . . . .	142
4.7.3	Kontrolle und Sicherheit der Registrierung von Patient und Bild . . . . .	143
4.7.4	Grundlagen und Modelle der automatischen Registrierung . . . . .	145
4.7.5	Grundlagen und Modelle der automatisierten Instrumentenkalibrierung . . . . .	147
4.8	Navigationssystem zur intraoperativen Orientierung . . . . .	148
4.8.1	Anzeigen der Schnittbilder an der Position der Instrumentenprobe . . . . .	148
4.8.2	Anzeigen der Position der Instrumentenprobe in festen Schnittbildern . . . . .	153
4.8.3	Orientierungsnavigation mit mehreren unterschiedlichen Instrumenten . . . . .	154
4.8.4	Navigation mit Instrumentenhandstücken und Wechselwerkzeugen . . . . .	156
4.9	Bildfreie Navigation in der Orthopädie . . . . .	158
	Literatur . . . . .	160
5	<b>Navigierte Bildgebung und Bildbetrachtung . . . . .</b>	<b>161</b>
5.1	Modelle und Koordinatensysteme der Bildgebung . . . . .	161
5.1.1	Registrierung von tomographischer Bildgebung und Bilddatensätzen . . . . .	163

5.1.2	Registrierung von Röntgenbildgebung und Durchleuchtungsbild .....	165
5.2	Mathematische Modelle und Verfahren der Bildbetrachtung .....	169
5.2.1	Skalieren von Flächenbildern und Voxelvolumen .....	169
5.2.2	Röntgen-Projektionsbilder und Berechnung von Abstandsinformationen .....	170
5.2.3	Kamera-Projektionsbilder und Berechnung von Abstandsinformationen .....	173
5.2.4	Darstellung von Voxelschichten und Bildern .....	174
5.2.5	Virtuelle Bildgebung .....	177
5.2.6	Virtuelle 2D-Auflichtbildgebung als Kamera, Mikroskop oder Endoskop .....	178
5.2.7	Virtuelle 2D-Durchleuchtungsbildgebung als Röntgenbildgebung .....	179
5.2.8	Virtuelle 2D-Schnittbilder als Tomographie und Ultraschall. ....	179
5.2.9	Anordnen unterschiedlicher Bildmodalitäten .....	180
5.3	Augmented Reality .....	181
5.3.1	Augmentierte Endoskopie .....	182
5.3.2	Navigierter Röntgen-Bildbetrachter als Bildschirm oder Durchsichtbrille .....	184
5.3.3	Navigierte Bildprojektion .....	187
5.4	Navigation mit 2D-Projektionsbildern und 3D-Bildregistrierung .....	188
5.5	Navigation mit 2D/3D Ultraschallbildern .....	193
	Literatur. ....	196
<b>6</b>	<b>Leistungsgesteuerte navigierte Instrumente. ....</b>	<b>197</b>
6.1	Navigated-Control und Navigated-Control-Functional .....	197
6.1.1	Modelle und Koordinatensysteme für Navigated-Control .....	198
6.1.2	Modellierung von Zeit und Signalen .....	199
6.1.3	Leistungsbegrenzung durch einfache Sprungfunktionen .....	200
6.1.4	Leistungsbegrenzung durch die Arkustangensfunktion .....	202
6.1.5	Leistungsbegrenzung mit Übergangsbereichen .....	205
6.1.6	Zeitdiskrete Modellierung einer motorisierten Fräse .....	207
6.1.7	Abstandsberechnung zu einem Voxel (Distance-Control) .....	209
6.1.8	Einfache Sicherheitsabschaltung (Navigated-Control) .....	210
6.1.9	Analyse von Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit .....	211
6.1.10	Komplexere Risiko-Metriken .....	212
6.1.11	Navigated-Control-Functional (NCF) .....	213
6.2	Grundlagen der Signalverarbeitung und Regelungstechnik .....	214
6.2.1	Beispielhafte Anwendungen .....	214
6.2.2	Zeitdiskrete Darstellung kontinuierlicher Signale .....	216
6.2.3	Strukturmodell des Systemverhaltens .....	217

6.2.4	Differenzgleichung des Systemverhaltens . . . . .	218
6.2.5	Endliche und unendliche Systemantworten (FIR und IIR) . . . . .	219
6.2.6	Impulsfolgen und Übertragungsfunktionen mit der z-Transformation . . . . .	220
6.2.7	Systemidentifikation. . . . .	221
6.2.8	Frequenzverhalten des Systems . . . . .	222
6.2.9	Entwurf eines Systems als Filter . . . . .	223
6.2.10	Berechnung der Übertragungsfunktion von Steuerung und Regelung . . . . .	224
6.3	Matlab-Übung . . . . .	226
	Literatur. . . . .	229
<b>7</b>	<b>Roboter in der Chirurgie und Intervention . . . . .</b>	<b>231</b>
7.1	Einsatz und Anwendung von Robotern in der Chirurgie und Intervention. . . . .	231
7.1.1	Entwicklung der Medizinrobotik von 1990 bis 2021. . . . .	232
7.1.2	Klinische Anwendungsgebiete. . . . .	232
7.1.3	Technische Aufgabenstellung. . . . .	239
7.1.4	Prinzipien der Bedienkonzepte beim Robotereinsatz . . . . .	240
7.2	Aufbau und Funktionsweise von Robotern und Robotersteuerungen . . . . .	241
7.2.1	Aktorprinzipien und Roboterkinematiken . . . . .	242
7.2.2	Roboter- und Winkelsteuerung. . . . .	243
7.2.3	Modell eines Gelenks nach Denavit-Hartenberg . . . . .	244
7.2.4	Robotersteuerung mit Vorwärtskinematik und Rückwärtskinematik. . . . .	245
7.2.5	Offline Positionsprogrammierung . . . . .	246
7.2.6	Online Positionsregelung . . . . .	248
7.2.7	Online Lösung der Positionsoptimierung. . . . .	248
7.3	Modellierung von Roboter, Eingabegerät, Sensoren und Aufgabenstellung. . . . .	249
7.3.1	Modelle und Koordinatensysteme für die Robotik . . . . .	249
7.3.2	Nutzung der Koordinatensysteme für die Programmierung des Roboters. . . . .	251
7.3.3	Kalibrierung von Robotersystem und Werkzeug . . . . .	252
7.3.4	Vergleich der Aufgabenstellungen von Robotik und Navigation. . . . .	253
7.3.5	Beschreibung einer Rotation des TCP ohne Positionsänderung des TCP . . . . .	253
7.3.6	Ausrichtung des Roboters ohne Positionsänderung des TCP . . . . .	256
7.3.7	Drehung des TCP um einen Pivot-Punkt . . . . .	257
7.4	Bahnprogrammierte Robotersysteme. . . . .	258
7.5	Telemanipulierte Robotersysteme . . . . .	260

7.5.1	Absolute Positionierung der Stellwinkel mittels Telemanipulation .....	260
7.5.2	Relative Positionierung der Stellwinkel mittels Telemanipulation .....	261
7.5.3	Absolute Positionierung des TCP mittels Telemanipulation .....	261
7.5.4	Absolute Ausrichtung des TCP mittels Telemanipulation .....	262
7.5.5	Geschwindigkeitssteuerung des TCP .....	263
7.5.6	Konfigurationsraum und kartesischer Konfigurationsraum .....	263
7.6	Interaktive Robotersysteme durch Compliant-Motion .....	263
7.7	Active-Constraint Robotersysteme .....	265
7.8	Kraft-rückgekoppelte Telemanipulation .....	266
7.9	Skills und teilautonome Robotersysteme .....	266
7.10	Fragen der Sicherheit, Architektur und der Zulassung .....	266
	Literatur .....	267
<b>8</b>	<b>Entwicklungs-, Dokumentations- und Zulassungsprozesse .....</b>	<b>269</b>
8.1	Prinzipien von Entwicklung, Herstellung und Betrieb von Medizinprodukten .....	271
8.1.1	Prinzip der Anwendung aller geltenden harmonisierten Normen .....	271
8.1.2	Prinzip der Risikoklasse und Klassifizierung eines Medizinprodukts .....	272
8.1.3	Prinzip der Prüfung von Dokumentation, Produkt und Produktion .....	275
8.1.4	Prinzip der Kennzeichnung geprüfter Medizinprodukte und Unternehmen .....	276
8.1.5	Prinzip der Anmeldung von Medizinprodukten und Unternehmen .....	277
8.1.6	Prinzip der lebenslangen Überwachung von Produkt und Unternehmen .....	279
8.2	Entwicklung .....	280
8.2.1	Stufen der Entwicklung von Medizingeräten .....	282
8.2.2	Entwicklungsmethodik .....	284
8.3	CE-konforme Dokumentation mit einer Produktakte .....	286
8.3.1	Funktionsbeschreibung .....	287
8.3.2	Klassifikation und Zweckbestimmung .....	288
8.3.3	Systembeschreibung und Softwaredokumentation .....	288
8.3.4	Konstruktions- und Fertigungszeichnungen .....	291
8.3.5	Gebrauchsanweisung .....	291
8.3.6	Montagehandbuch .....	292
8.3.7	Risikomanagement .....	292
8.3.8	Testbeschreibung zur Verifizierung der Risikominimierung .....	296

8.3.9	Liste der harmonisierten Normen und gemeinsamen Spezifikationen zur Erfüllung der grundlegenden Sicherheits- und Leistungsanforderungen . . . . .	297
8.3.10	Weitere Dokumente zur Produktakte . . . . .	298
8.3.11	Liste zentraler Richtlinien, Verordnungen und Gesetzestexte . . . .	300
	Literatur. . . . .	301
<b>9</b>	<b>Wissenschaftliche Messungen und Experimente . . . . .</b>	<b>305</b>
9.1	Richtlinien zur wissenschaftlichen Arbeitsweise und Dokumentation . . . .	306
9.1.1	Richtlinien zur guten wissenschaftlichen Praxis . . . . .	306
9.1.2	Evidenzbasierte Medizin . . . . .	307
9.1.3	Goldstandard der Ingenieurwissenschaften . . . . .	309
9.2	Beschreibung von Eigenschaften und Nachweis der vorteilhaften Wirkung . . . . .	311
9.2.1	Qualitative Aussagen und quantitative Größen . . . . .	312
9.2.2	Ergebnis einer Messung gegenüber einem Referenzwert . . . . .	313
9.2.3	Abweichende Messergebnisse, Mittelwert und Median . . . . .	313
9.2.4	Genauigkeit, Richtigkeit, Präzision und Auflösung. . . . .	318
9.2.5	Signifikantes Ergebnis einer Messung gegenüber einem Referenzwert (Einstichproben-t-Test) . . . . .	319
9.2.6	Signifikantes Ergebnis einer Messung gegenüber einer Referenzmessung (Zweistichproben-t-Test) . . . . .	325
9.2.7	Vergleich mehrerer Serien-Messungen untereinander (F-Test) . . .	327
9.2.8	Ergebnis eines Klassifikationsverfahrens gegenüber eines Referenzverfahrens. . . . .	330
9.2.9	Implizite Angabe von Auflösung und Präzision. . . . .	332
9.3	Genauigkeit der Koordinatenmesstechnik . . . . .	332
9.3.1	Genauigkeit einer Stereokamera in Bezug auf eine Messmarke . . . . .	333
9.3.2	Die Präzision eines Messmarken-Trackers . . . . .	335
9.3.3	Darstellung der Nicken-Gieren-Rollen Matrizen. . . . .	339
9.3.4	Die Positions- und Rotationspräzision eines unbewegten Instruments. . . . .	340
9.3.5	Die Positions- und Rotationspräzision eines bewegten Instruments. . . . .	342
9.3.6	Einfluss zeitlicher Verzögerung der Auswertung auf die Genauigkeit . . . . .	343
9.3.7	Genauigkeitsanforderungen an Navigation, Navigated Control und Robotik . . . . .	344
9.4	Analyse der Fehlerquellen computergestützter Systeme . . . . .	345
9.4.1	Fehlerquellen des technischen Messsystems . . . . .	345
9.4.2	Fehlerquellen der Bildgebung . . . . .	348

---

9.4.3	Fehlerquellen des Navigationsverfahrens . . . . .	349
9.4.4	Fehlerquellen der computergestützten Planung . . . . .	350
9.4.5	Fehlerquellen durch die Instrumentenführung . . . . .	350
9.5	Entwicklung von Messkörpern, Prüfkörpern und Phantomen . . . . .	351
9.5.1	Messkörper und Prüfkörper . . . . .	352
9.5.2	Der technische Messkörper . . . . .	353
9.5.3	Anatomisch geformte Messkörper mit dreidimensionalem Datensatz . . . . .	354
9.5.4	Anatomisch geformte Messkörper mit anatomischem Bilddatensatz . . . . .	356
9.5.5	Der technische Prüfkörper . . . . .	357
9.5.6	Messverfahren und Prüfkörper zur Überprüfung der Gesamtgenauigkeit. . . . .	358
9.5.7	Kombination von Mess- und Prüfkörper für Serienuntersuchungen . . . . .	360
9.5.8	Patientenphantom und Arbeitsplatz zur realitätsnahen Evaluierung . . . . .	362
9.5.9	Protokollaufzeichnung und Modellbildung während des Messvorgangs. . . . .	363
9.6	Trainingssysteme in der Chirurgie. . . . .	363
9.6.1	Einfache Trainingssysteme für konventionelle Eingriffe . . . . .	364
9.6.2	Computergestützte Trainingssysteme für konventionelle Eingriffe . . . . .	365
9.6.3	Einfache Trainingssysteme für computergestützte Eingriffe . . . . .	366
9.6.4	Computergestützte Trainingssysteme für computergestützte Eingriffe . . . . .	366
	Literatur. . . . .	368
	<b>Erratum zu: Leistungsgesteuerte navigierte Instrumente . . . . .</b>	<b>E1</b>
	<b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>	<b>371</b>