

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Überblick	2
1.3	Danksagung	3
2	Stand der Technik	5
2.1	Computerunterstützung in der Orthopädie	5
2.1.1	Vollständiger Hüftgelenkersatz	7
2.1.2	Vollständiger Kniegelenkersatz (Knieendoprothetik)	8
2.1.3	Osteotomie	9
2.1.4	Einsatz von Pedikel-Schrauben	9
2.1.5	Kreuzbandersatz	10
2.2	Registrierung von verschiedenen Signalmodalitäten	11
2.2.1	Registrierung: 3D-3D und 2.5D-3D	11
2.2.1.1	Relevante Signalgeber	11
2.2.1.2	Registrierungstechniken	13
2.2.2	Registrierung: 2D-3D	15
2.2.2.1	Relevante Signalgeber	15
2.2.2.2	Registrierungstechniken	15
2.3	Kalibrierung von C-Bogensystemen mit Röntgenbildverstärkern	18
3	Das Navigationssystem	23
3.1	Überblick	23
3.2	Systemvarianten	23
3.2.1	Navigation mit Computer-Tomographie-Datensätzen	24
3.2.2	Navigation ausschließlich mit Röntgenbildern	25
3.2.3	Navigation mit IR-Verfolgungssystem	25
3.2.4	Navigation mit röntgendichtem Zeigeinstrument	25
3.3	Systemkomponenten	26
3.3.1	Das Infrarot-Verfolgungssystem	26
3.3.1.1	Funktionsweise	26

3.3.1.2	Genauigkeit	27
3.3.2	Der Röntgenbildverstärker	27
3.3.2.1	Funktionsweise	28
3.3.2.2	Berechnung der Elektronenbahnen innerhalb des Bildverstärkers	28
3.3.2.3	Aufbau einer Röntgenanlage mit Bildverstärker	29
3.3.2.4	Besonderheiten des C-Bogensystems mit Röntgen- bildverstärker	30
3.3.2.5	Röntgenbild und Computer-Tomographie	30
4	Kalibrierung des C-Bogen-Röntgensystems	35
4.1	Überblick	35
4.2	Kameramodell	36
4.2.1	Positionierung	37
4.2.2	Projektionsgeometrie	39
4.2.3	Transformation in die Pixeldarstellung	39
4.3	Berechnung der internen Kameraparameter	40
4.3.1	Verzeichnungsadaption mit Kreuzgitter	41
4.3.1.1	Verzeichnungsberechnung	41
4.3.2	Verzeichnungsadaption mit reduzierter Referenzmarkenzahl	42
4.3.2.1	Reduktion der Parameterzahl	43
4.3.2.2	Berechnung der Parameter	44
4.3.2.3	Verfahren der reduzierten Referenzmarken	47
4.3.3	Orientierungsabhängiges Parametertraining	49
4.3.3.1	Motivation	49
4.3.3.2	Lineare Interpolation	49
4.3.3.3	Neuronales Training	52
4.3.3.4	Trainierte Verzeichnungsadaption	53
4.4	Berechnung der Projektionsgeometrie	53
4.4.1	Überblick	53
4.4.2	Iterative nichtlineare Berechnung	53
4.4.2.1	Prinzip	53
4.4.2.2	Grundlagen	54
4.4.2.3	Die Kalibrierplatte	55
4.4.2.4	Die Kombination aus Kalibrierplatte und IR- Verfolgungssystem	55
4.4.2.5	Der Kalibrierturm	57
4.4.3	Geschlossene Berechnung	57
4.5	Berechnung der Kameraposition	58
4.5.1	Verwendung von Verzeichnungs- und Positionskalibrierkörpern	59
4.5.1.1	Koordinatensysteme	59

4.5.1.2	Beweglicher Kalibrierkörper	59
4.5.1.3	Stereo-Triangulierung	60
4.5.2	Verbindung von IR-Verfolgungssystem und Röntgenbildverstärker	62
4.5.2.1	Aufbau und Vorkalibrierung	63
4.5.2.2	Koordinatentransformation	63
4.5.2.3	Mechanische Verwindung des C-Bogens (Flex)	64
4.6	Ergebnisse	69
4.6.1	Polynomiales Kameramodell	69
4.6.1.1	Wahl des Polynomgrades	69
4.6.1.2	Wahl der Stützstellen	70
4.6.2	Reduziertes Kameramodell	70
4.6.2.1	Wahl der Parameterzahl	70
4.6.2.2	Genauigkeit mit reduzierter Markenzahl	72
4.6.3	Ergebnisse der interpolierten und trainierten Verzeichnungsadaptation	72
4.6.4	Genauigkeitsvergleich der Methoden zur Berechnung der Projektionsgeometrie	73
4.6.5	Genauigkeit der Kalibrierung mit intraoperativen Kalibrierkörpern	75
4.6.6	Genauigkeit der Kalibrierung ohne intraoperative Kalibrierkörper	78
5	Navigation mit Computer-Tomographie	83
5.1	Überblick	83
5.2	Modellgenerierung aus dem CT-Datensatz	84
5.2.1	Segmentierung der Schichtaufnahmen	84
5.2.2	Modellgenerierung	84
5.2.3	Datenreduktion	85
5.3	Registrierung von Röntgen mit CT	86
5.3.1	Markenbasierte Registrierung	86
5.3.2	Konturbasierte Registrierung	87
5.3.2.1	Modifikation eines Standardverfahrens	87
5.3.2.2	Initialposition	94
5.3.2.3	Berechnung der Objektkontur	101
5.3.2.4	Fehlerdefinition in der Bildebene	107
5.3.2.5	Lineare Positionsberechnung	113
5.3.2.6	Genauigkeitsvergleiche in der Realität	116
5.4	Visualisierung	122
5.4.1	Verwendung des IR-Verfolgungssystems	122
5.4.2	Verwendung eines röntgendichten Werkzeugadapters	126

5.4.2.1	Funktionsweise	126
5.4.2.2	Vermessung	127
5.4.2.3	Navigation	128

6 Navigation ohne Computer-Tomographie 131

6.1	Motivation	131
6.2	Oberflächenmodell aus Röntgenaufnahmen	132
6.2.1	Modell aus zwei Aufnahmerichtungen	133
6.2.1.1	Schnitt zwischen zwei Dreiecken	133
6.2.1.2	Schnitt eines Dreiecks mit einer geordneten Dreiecks- menge	134
6.2.1.3	Schnitt zweier geordneten Dreiecksmengen	135
6.2.2	Modell aus mehreren Aufnahmerichtungen	135
6.3	Visualisierung	136

7 Klinischer Versuch 141

7.1	Versuchsvorbereitung	141
7.2	Der Versuch	142

8 Zusammenfassung 145

A Mathematischer Anhang 159

A.1	Kardan und Quaternion	159
A.1.1	Kardan-Winkel aus Rotationsmatrix	159
A.1.2	Quaternion-Parameter aus Rotationsmatrix	159
A.2	Relative Orientierung 3D-3D	160

B Algorithmen 163

B.1	Kontursegmentierung	163
B.2	Verfeinerung der Hülle	164

C Datensätze 165

C.1	Femur mit zwei Kalibrierkörpern	166
C.2	Femur ohne Kalibrierkörper	167

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einsatzgebiete für die computergestützte Orthopädie	6
3.1	Systemüberblick	24
3.2	Infrarot-Verfolgungssysteme	26
3.3	Bildverstärker	28
3.4	Elektronenbahnen	29
3.5	C-Bogensystem	30
3.6	Verzeichnungsvariationen	31
3.7	Differenzbild aus zwei Blickrichtungen	31
3.8	Mechanische Verwindung des C-Bogensystems	32
4.1	Kamerasystem	37
4.2	Kubische Verzeichnung	39
4.3	Kalibrierscheibe	40
4.4	Eigenwertanteile	45
4.5	Reduzierte Parameterzahl	46
4.6	Reduzierte Marken	47
4.7	Interpolation des Arbeitsraumes	48
4.8	Interpolation 2D	52
4.9	Kalibrierkörper	55
4.10	Mittelpunktbestimmung einer Kugel	56
4.11	Ausmaße Kalibrierturm	57
4.12	Marken auf der Quelle	58
4.13	Geschlossene Berechnung der Brennweite	59
4.14	Kamera- und Weltkoordinaten	60
4.15	Beweglicher Kalibrierkörper	61
4.16	Integration des IR-Verfolgungssystems	62
4.17	Kalibrierturm	63
4.18	Zusätzliche Referenzmarken	66
4.19	Polynomiale Entzerrung	67
4.20	Fehlerverteilung	68
4.21	Referenzkörper	68

4.22	Kalibrieraufnahmen	76
4.23	Zwei Kalibrierkörper	77
4.24	Kalibrieraufnahmen für die Triangulierung	80
4.25	Kalibrierung mit IR-Verfolgungssystem	81
5.1	CT-Schichtsegmentierung	85
5.2	Datenreduktion	86
5.3	Orginal Standardverfahren (Femurkopf)	89
5.4	Orginal Standardverfahren (Femurknie)	90
5.5	Orginal Standardverfahren (Wirbelkörper)	91
5.6	Histogramm - Keine Ausreißer	92
5.7	Histogramm - Mit Ausreißer	93
5.8	Modifiziertes Standardverfahren	95
5.9	Modifiziertes Standardverfahren (Femurknie)	96
5.10	Modifiziertes Standardverfahren (Wirbelkörper)	97
5.11	Interaktive Positionsberechnung	98
5.12	Initiale Position	100
5.13	Drehung des Modells um die Hauptachse	100
5.14	Konturkandidaten	102
5.15	Schritte der Hüllenberechnung	103
5.16	Konturpfad	104
5.17	Konturschätzung	107
5.18	Fehlerdefinition auf der Bildebene (Femurkopf)	109
5.19	Fehlerdefinition auf der Bildebene (Femurknie)	110
5.20	Fehlerdefinition auf der Bildebene (Wirbelkörper)	111
5.21	Lineare Positionsberechnung (Femurkopf)	117
5.22	Lineare Positionsberechnung (Femurknie)	118
5.23	Lineare Positionsberechnung (Wirbelkörper)	119
5.24	Knochenmodelle	120
5.25	Verifizierungsmarken am Knochen	122
5.26	Röntgendichter Werkzeugadapter	126
5.27	Genauigkeitstest bei der Vermessung	127
5.28	Visualisierung der Navigation	129
6.1	Objektraum	132
6.2	Schnittvolumen aus zwei Aufnahmen	133
6.3	Schnittmenge Polygone	134
6.4	Schnittvolumen aus drei Aufnahmen	135
6.5	Tumorphantom	136
6.6	2D Visualisierung	138
6.7	3D Visualisierung	139

7.1	Versuch: Phantom und CT	141
7.2	Versuch: IR-Probe am Bildverstärker	142
7.3	Versuch: Segmentierung und Registrierung	142
7.4	Versuch: Navigation	143
7.5	Versuch: Bildschirm	143

Tabellenverzeichnis

2.1	Stand der Technik Registrierung	19
2.2	Stand der Technik Kalibrierung	21
3.1	Messung der Genauigkeit von Flashpoint 3000	27
4.1	Eigenwertanteile bei Polynomgrad 3	44
4.2	Eigenwertanteile bei Polynomgrad 4	46
4.3	Polynomiale Entzerrung	66
4.4	Polynomiale Entzerrung mit zusätzlichen Stützpunkten	70
4.5	Polynomiale Entzerrung mit reduzierten Parametern	71
4.6	Entzerrung mit reduzierter Markenzahl	72
4.7	Interpolierte Entzerrung	73
4.8	Trainierte Entzerrung	73
4.9	Interpolationsgitter	73
4.10	Ergebnisse zur Berechnung der Brennweite (grobe Anfangsschätzung)	74
4.11	Ergebnisse zur Berechnung der Brennweite (gute Anfangsschätzung)	74
4.12	Genauigkeitsmessung unter Verwendung von Kalibrierkörper	77
4.13	Absolute Genauigkeit der Kalibrierung	78
4.14	IR-basierte Kalibrierung ohne Berücksichtigung der mech. Verwindung	80
4.15	IR-basierte Kalibrierung mit Berücksichtigung der mech. Verwindung	81
4.16	Triangulierung der Spitze des IR-Zeigeelements	82
5.1	Vergleich der Konturalgorithmen	106
5.2	Kontur vs. Basri-Ullmann	114
5.3	Reale Registrierung des Femurkopfes (zwei Kalibrierkörper) Teil 1	123
5.4	Reale Registrierung des Femurkopfes (zwei Kalibrierkörper) Teil 2	124
5.5	Reale Registrierung des Femurkopfes (kein Kalibrierkörper) Teil 1	124
5.6	Reale Registrierung des Femurkopfes (kein Kalibrierkörper) Teil 2	125