

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XIX
Notation	XXI
Akronyme	XXVII
1 Einleitung	1
1.1 Grundlagen des Uncanny Valley Phänomens	5
1.2 Detaillierte Betrachtung des Uncanny Valley Phänomens	6
1.3 Das Uncanny Valley Phänomen in der humanoiden Robotik	8
1.4 Zielsetzung und Thesis	11
2 Stand der Forschung	17
2.1 Akzeptanzprobleme von virtuellen Charakteren	17
2.2 Das Berner System	19
2.3 Untersuchung von Methoden zur Bewegungstranskription	21
2.4 Differenzierter Vergleich untersuchter Verfahren zur Bewegungskodierung	23
2.5 Anatomische Grundlagen des menschlichen Bewegungsapparats	28
2.5.1 Beispiel 1: Die menschliche Schulter	30
2.5.2 Beispiel 2: Das menschliche Hüftgelenk	31
2.6 Der menschliche Körper als Vorbild in der humanoiden Robotik	33
2.7 Bewegungsdynamik der Gelenke des menschlichen Bewegungsapparats	34

2.8	Betrachtung konventionell aufgebauter humanoider Roboterprototypen	36
2.9	Neubetrachtung des Entwicklungsprozesses humanoider Roboterprototypen.....	41
3	Reengineering-Ansatz übertragen auf die humanoide Robotik	45
3.1	Grundlagen des Reengineering	45
3.2	Abstrahierung des menschlichen Körperskeletts in ein virtuelles Funktionsskelett	48
3.3	Features des Programms zur Bewegungstranskription ScanimFBX	51
3.4	Erweiterte Verwendungsmöglichkeiten der transkribierten Bewegungsdatensätze	55
3.5	Modifizierung des Funktionsskeletts zur Überwindung des Uncanny Valley	58
3.6	Versuchsreihe 1: Überwindung des Uncanny Valley Phänomens.....	61
3.7	Identifizierung grundlegender Features der menschlichen Bewegung	64
4	Systemmodellierung	69
4.1	Kinematik.....	70
4.2	Transformation homogener Koordinaten	70
4.3	Freiheitsgrade im Versuchsaufbau.....	72
4.4	Vorwärtstransformation (Vorwärtskinematik)	74
4.4.1	Auftretende Singularitäten der Transformationskette bei der Verwendung von Euler-Winkeln.....	78
4.5	Versuchsreihe 2: Arbeitsraumvergleich	81
4.5.1	Das Denavit-Hartenberg-Verfahren	81
4.5.2	Analyse der korrespondierenden Vorwärtstransformation des menschlichen Arms am Beispiel des traditionellen Roboterprototyps und HUMECH	85
4.5.3	Herleitung der Vorwärtstransformation anhand der anatomischen Abstrahierung des menschlichen Arms	86
4.5.4	Herleitung der Vorwärtstransformation am Beispiel des Arm-manipulators eines konventionell konstruierten humanoiden Roboterprototyps.....	88
4.5.5	Herleitung der Vorwärtstransformation am Beispiel des Arm-manipulators des humanoiden Roboterprototyps HUMECH	90
4.5.6	Vorwärtskinematik des Manipulators	93
4.5.7	Herleitung der expliziten Lösung der inversen Kinematik des HUMECH-Manipulators.....	97
4.6	Numerischer Lösungsansatz	102
4.7	Betrachtung auftretender Singularitäten	103
4.7.1	Vereinfachte Berechnung über die Vektormethode.....	108

4.7.2	Arbeitsraumvergleich Mensch, humanoider Roboterprototyp HUMECH und traditionelle Roboterstruktur	112
4.8	Erweiterung der Bewegungsmöglichkeiten am humanoiden Roboter	119
4.8.1	Betrachtung des Kugelgelenkprototyps im Belastungszustand ..	123
5	Simulative Untersuchung geeigneter Aktuatorvarianten	129
5.1	Versuchsreihe 3: Simulation konventioneller Aktuatorkonzepte	133
5.1.1	Manipulatoraktuierung über entkoppelte seilgetriebene Gelenke.....	134
5.1.2	Einheitliches Modell zur Validierung der Antriebskonzepte mit Dymola®	138
5.1.3	Implementierung und Simulation des Armmodells.....	140
5.1.4	Herleitung der Grundlagen des Seilmodells.....	143
5.1.5	Analyse und Auswertung Simulationsergebnisse.....	154
6	Prototypische Implementierung der Simulationsergebnisse	161
6.1	Modellaufbau des humanoiden Roboterprototyps.....	161
6.1.1	Hard- und Softwarestruktur des humanoiden Roboters HU-MECH	164
6.1.2	Externe Referenzierung der Manipulatorgelenke.....	168
6.2	Versuchsreihe 4: Validierung der Bewegungstranskription am realen Prototyp.....	173
6.3	Benutzerinterface und Programmstruktur der dSpace Echtzeitumgebung	175
6.4	Versuchsauswertung.....	178
6.5	Benutzerinteraktion	182
6.5.1	Konstruktiver Ansatz zur Beseitigung von Gefährdungspotenzialen in der Mensch-Maschine-Kommunikation	184
6.5.2	Beseitigung von Gefährdungspotenzialen über die Implementierung einer umfassenden softwareseitigen Sicherheitsarchitektur	185
6.5.3	Struktureller Aufbau und Funktionalitäten des Benutzerinterface	191
6.5.4	Experimentelle Verifikation des zugrundeliegenden Sicherheitskonzepts beim humanoiden Roboter HUMECH	197
6.6	Implementierung eines Modus zur Remotesteuerung	201
7	Schlussbetrachtung	207
7.1	Diskussion der Ergebnisse.....	209
7.2	Ausblick	210
	Literaturverzeichnis	217
A	Diskussion auftretender Singularitäten der DH-Transformation	227

B	Simulationsmodelle Dymola	233
B.1	Detaillierte Darstellung des DC-Motormodells in Dymola	234
B.2	Strukturelles Simulationsmodell des rechten Arms	235
B.3	Strukturelles Simulationsmodell des rechten Arms HUMECH- Elektrische Zylinderantriebe, Dymola	236
B.4	Strukturelles Simulationsmodell des rechten Arms HUMECH- seilgetriebene Aktuatoren, Dymola	237
B.5	Strukturelles Simulationsmodell des HUMECH-Torsos, Dymola	238
C	Kennwerte PA2200-Kunststoff	239
D	Steuerungslogik des humanoiden Roboterprototyps HUMECH	241
D.1	Simulink Programmstruktur	242
D.2	Simulink Steuerungslogik	243
E	Repräsentation des Steuerungs-GUI	245
E.1	Darstellung des dSpace® Benutzerinterfaces in Control-Desk	246