

# 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 Armmanipulators eines konventionell konstruierten humanoiden Roboterprototyps.....	88
4.5.5	Herleitung der Vorwärtstransformation am Beispiel des Armmanipulators 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 Aktorkonzepte .....	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 Echtzeitumge- bung .....	175
6.4	Versuchsauswertung .....	178
6.5	Benutzerinteraktion .....	182
6.5.1	Konstruktiver Ansatz zur Beseitigung von Gefährdungspoten- zialen in der Mensch-Maschine-Kommunikation .....	184
6.5.2	Beseitigung von Gefährdungspotenzialen über die Implemen- tierung einer umfassenden softwareseitigen Sicherheitsarchitek- tur .....	185
6.5.3	Struktureller Aufbau und Funktionalitäten des Benutzerinter- face .....	191
6.5.4	Experimentelle Verifikation des zugrundeliegenden Sicherheits- konzepts 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