

RESEARCH

Christian Schlette

Anthropomorphe Multi-Agenten- systeme

Simulation, Analyse und Steuerung

 Springer Vieweg

Anthropomorphe Multi-Agentensysteme

Christian Schlette

Anthropomorphe Multi-Agentensysteme

Simulation, Analyse und Steuerung

Mit einem Geleitwort von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann

Christian Schlette
Aachen, Deutschland

D82 (Diss. RWTH Aachen, 2012)

ISBN 978-3-658-02518-2
DOI 10.1007/978-3-658-02519-9

ISBN 978-3-658-02519-9 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Geleitwort

Das zentrale Thema der Arbeit, die „Multi-Agentensysteme“, erlaubt die systematische und vereinheitlichte Simulation, Steuerung und Analyse vielfältiger komplexer Kinematiken in aktuellen Anwendungen der Robotertechnik.

Die hier entwickelte Generalisierung der Kinematiken auf der Basis sogenannter Multi-Agentensysteme bildet dazu die hierarchischen und heterarchischen Aspekte komplexer Roboterkinematiken in neuartiger Weise auf effiziente Softwarestrukturen ab. Um Multi-Agentensysteme gemäß der hierarchischen Aspekte dieser Kinematiken zu strukturieren, werden in den kinematischen Bäumen zumeist Pfade identifiziert, die den Extremitäten entsprechen und jeweils durch Agenten gesteuert werden. Diese Basisagenten, die de-facto das aktuelle Know-how moderner Industrierobotik in sich konzentrieren, werden dann in der entwickelten neuen Struktur applikationsspezifisch zu neuen hierarchisch und heterarchisch organisierten Gelenkstrukturen zusammengefasst.

Im Rahmen dieser Studie erfolgt eine Fokussierung auf anthropomorphe Kinematiken; für diese auf anthropomorphe Kinematiken konzentrierte Rekombination der Multi-Agentensysteme wird der Begriff „Anthropomorphe Multi-Agentensysteme“ geprägt.

In der Studie wird der Simulation der menschlichen Kinematik in Form des „Virtuellen Menschen“ ein Schwerpunkt eingeräumt, anhand derer zwei wesentliche Entwicklungsrichtungen verfolgt werden, die beide die Leistungsfähigkeit des zugrunde liegenden Konzepts der Multi-Agentensysteme unterstreichen: Die erste Entwicklungsrichtung demonstriert am Beispiel des „Virtuellen Menschen“, wie die Strukturen der Multi-Agentensysteme etablierte Basistechniken der Robotik geeignet erweitern und zur Bildung anthropomorpher Multi-Agentensysteme rekombinieren. Simulationen des „Virtuellen Menschen“ erlauben es dann, menschliche Tätigkeiten nachzubilden und dabei insbesondere nach ergonomischen Kriterien zu analysieren. Darauf aufbauend demonstriert die zweite Entwicklungsrichtung am Beispiel „Ergonomie“, wie aufgrund der Generalisierung durch die Multi-Agentensysteme ein Methodentransfer ermöglicht wird – auf Basis der Multi-Agentensysteme werden die Methoden zur Simulation, Analyse und Steuerung des „Virtuellen Menschen“ auch für humanoide Roboter und anthropomorphe Mehrrobotersysteme bereitgestellt.

Dieser modernen, interessanten und sehr gut strukturierten Arbeit wünsche ich die ihr gebührende Aufmerksamkeit der Fachwelt – aber auch die Aufmerksamkeit der Studierenden, die z.B. in den didaktisch sehr gut aufbereiteten Kapiteln zum Thema Roboter-Kinematik einen effizienten Einstieg in die Thematik finden.

Vorwort

Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation erlauben die systematische und vereinheitlichte Simulation, Steuerung und Analyse vielfältiger komplexer Kinematiken in aktuellen Anwendungen der Forschung und Industrie. Die notwendige Generalisierung der Kinematiken wird auf Basis von Multi-Agentensystemen hergestellt, die dazu in ihren Strukturen die hierarchischen und heterarchischen Aspekte komplexer Kinematiken nachbilden.

Als wesentliches Merkmal weisen zahlreiche aktuelle Roboter in Forschung und Industrie die Struktur kinematischer Bäume auf, d.h. ihre Bewegungsapparate verzweigen ausgehend von einem Rumpf in Extremitäten bzw. serielle Teilkinematiken. Um die Multi-Agentensysteme gemäß der hierarchischen Aspekte dieser Kinematiken zu strukturieren, werden in den kinematischen Bäumen Pfade identifiziert, die den Extremitäten entsprechen. Diese kinematischen Pfade werden jeweils durch einen Agenten repräsentiert und gesteuert. Da die einzelnen Pfade des Baumes in erster Annäherung wohlbekannten, seriellen kinematischen Ketten entsprechen, weisen die Agenten zunächst die Funktionalitäten und Eigenschaften von Bewegungssteuerungen für Industrieroboter auf, wodurch ihr Aufbau und ihre Analyse auf bekannten Methoden der Robotik fußt. Die in diesem strukturell grundlegenden kinematischen Baum beteiligten Agenten sind in einem ersten, grundlegenden Agentenset organisiert. Heterarchisch betrachtet sind die seriellen kinematischen Ketten teilweise in zusätzliche organisatorische Zusammenhänge eingebunden, die unabhängig von der kinematischen Hierarchie stattfinden. Um die Multi-Agentensysteme gemäß dieser heterarchischen Aspekte einer Kinematik zu strukturieren, können Agenten in zusätzlichen, anwendungsspezifischen Agentensets gruppiert werden. In diesen Agentensets werden dann Duplikate oder Auszüge des kinematischen Baumes eingesetzt, für die übergeordnete Steuerungen ausgewählte weiterführende Anforderungen, Koordinationen und Kopplungen umsetzen, wie z.B. die Koordination von Gehbewegungen, übergeordnete Reglerverfahren, kinematische Schleifen oder Algorithmen zur Kollisionsvermeidung.

Die Kinematiken, die prinzipiell mit den Multi-Agentensystemen adressiert werden können, reichen dann von seriellen redundanten Kinematiken, über mehrrarmige Mehrrobotersysteme und humanoide Roboter, bis zu vielbeinigen, insektenartigen Kinematiken.

Im Rahmen der Dissertation findet eine Konzentration auf anthropomorphe Kinematiken statt, die ganz oder in Teilen dem Bewegungsapparat des Menschen nachempfunden sind. Dazu werden die Basiselemente der Multi-Agentensysteme geeignet rekombiniert, so dass sich so genannte *anthropomorphe Multi-Agentensysteme* ergeben. Auf Basis der anthropomorphen Multi-Agentensysteme werden hier dann neue Methoden zur Simulation, Analyse und Steuerung anthropomorpher Kinematiken entwickelt. Dabei erlaubt es die Generalisierung, diese neuen Methoden gleichermaßen für ein Simulationsmodell des menschlichen Be-

wegungsapparates, humanoide Roboter und industrielle Mehrrobotersysteme bereitzustellen und darüber hinausgehend Erfahrungen und Lösungen zwischen diesen Arten anthropomorpher Kinematiken zu übertragen.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann gilt mein besonderer Dank für seine stete Förderung und dem Angebot ausgezeichnete Rahmenbedingungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Florentin Wörgötter danke ich sehr für die freundliche Übernahme des Korreferats und für sein Interesse an der Arbeit.

Bei allen Kollegen am MMI – und insbesondere bei Herrn Dr.-Ing. Michael Schluse – bedanke ich mich für die freundschaftliche Unterstützung in Form zahlreicher Diskussionen, Anregungen, Hilfestellungen und Tipps und für die immer gute Zusammenarbeit.

Ich gedenke an dieser Stelle auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Freund († 2005), dem ehemaligen Leiter des Instituts für Roboterforschung (IRF) der Technischen Universität Dortmund, der die ersten Schritte dieser Arbeit betreute.

Schließlich und innig danke ich meiner Frau Eleni Cotti für ihr Verständnis, ihren Zuspruch und ihre große Geduld.

Christian Schlette

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Definition der Begriffe	5
2.2	Anthropomorphe Kinematiken als Schlüsselentwicklung der Robotik	6
2.2.1	Anthropomorphe Roboter in der Forschung	6
2.2.2	Anthropomorphe Mehrrobotersysteme in der Industrie	16
2.3	Simulation manueller Arbeitsplätze in der „Virtuellen Produktion“	21
2.3.1	Der Begriff der „Virtuellen Produktion“	21
2.3.2	Simulation manueller Arbeitsplätze	23
2.4	Multi-Agentensysteme als Steuerungsansatz in der Robotik	25
2.4.1	Koordination von Multi-Agentensystemen	26
2.4.2	Kommunikation in Multi-Agentensystemen	27
2.4.3	Kooperation und Konkurrenz in Multi-Agentensystemen	28
2.5	Auswahl des Simulations- und Visualisierungssystems	29
2.5.1	Überblick über Simulations- und Visualisierungssysteme	30
2.5.2	Überblick über VEROSIM	31
2.5.3	Struktur der Datenhaltung	33
2.5.4	Programmierung in C/C++ und SOML++	35
3	Konzept	37
3.1	Grundidee der anthropomorphen Multi-Agentensysteme	37
3.2	Matrixarchitektur der übergreifenden Steuerung	39
3.2.1	Steuerung der anthropomorphen Multi-Agentensysteme	39
3.2.2	Simulation der anthropomorphen Multi-Agentensysteme	43
3.2.3	Programmierung der anthropomorphen Multi-Agentensysteme	45
3.3	Weitere Aspekte des Konzeptes der anthropomorphen Multi-Agentensysteme	49
3.3.1	Eingliederung der Matrixarchitektur in das IRCS	49
3.3.2	Erweiterte Analyse anthropomorpher Kinematiken	51
3.3.3	Trennung von Steuerung und Visualisierung	53
3.3.4	Interaktion der Multi-Agentensysteme mit der Umwelt	55
4	Bewegungssteuerung	57
4.1	Bewegungssteuerung des einzelnen Agenten	57
4.1.1	Definition von Trajektorien zur Bahninterpolation	58
4.1.2	Parametrisierung und Aufbau des einzelnen Agenten	79

4.1.3	Bahninterpolation für anthropomorphe Kinematiken	95
4.2	Konzept der „Multiplen Redundanz“	106
4.2.1	Kinematische Kopplungen in anthropomorphen Kinematiken	107
4.2.2	Bewegungskoordination mittels mehrfach-redundanter Kinematiken	108
4.2.3	Praktische Realisierung der „Multiplen Redundanz“	109
4.3	Kinematische Koordination von Gehbewegungen	115
4.3.1	Berechnung von Bein- und Körperbewegungen	116
4.3.2	Praktische Realisierung der Gehbewegungen	121
5	Simulation und Programmierung	125
5.1	Integration in das umgebende Simulationssystem	125
5.1.1	Analyse der Multi-Agentensysteme als ereignisdiskrete Systeme	126
5.1.2	Zustandsorientierte Modellierung im Sinne der „Supervisory Control“	128
5.1.3	Modellierung von Umwelt und Ressourcen	131
5.2	Programmierung der anthropomorphen Multi-Agentensysteme	135
5.2.1	Konzept der Aktionen und Aktionsnetze	136
5.2.2	Ebenen der Programmierung mit Aktionsnetzen	142
6	Steuerung realer Mehrrobotersysteme	149
6.1	Rekombination des Steuerungskonzeptes für reale Mehrrobotersysteme	149
6.1.1	Anforderungen an Mehrrobotersteuerungen	149
6.1.2	Konzept zur Herstellung der Echtzeitfähigkeit	151
6.1.3	Konzept zur Integration von Simulation und Steuerung	153
6.2	Anwendung des Steuerungskonzeptes auf reale Mehrrobotersysteme	155
6.2.1	Beschreibung des Versuchsstandes CIROS	155
6.2.2	Beschreibung der Architektur IRCS	156
6.2.3	Einsatz des Steuerungskonzeptes im Versuchsstand CIROS	157
7	Analyse und Anwendungen	161
7.1	Ergonomische Analysen des „Virtuellen Menschen“	161
7.1.1	Statische ergonomische Untersuchungen	161
7.1.2	Dynamische ergonomische Untersuchungen	170
7.2	Ergonomische Anwendungen für anthropomorphe Roboter	175
7.2.1	Zusammenhang von Ergonomie und anthropomorpher Robotik	176
7.2.2	Ergonomisch motivierte Bewegungssteuerung von JUSTIN	178
7.3	Weitere Anwendungen der erzielten Ergebnisse	188
7.3.1	PRODEMO – Roboterprogrammierung „by Demonstration“	188
7.3.2	INVENTOR – „Addin“ zur Roboterprogrammierung	189
7.3.3	FASTMAP – Vorbereitungen zur Planetenexploration	189
7.3.4	DASA – Exponat der „Arbeitswelt Ausstellung“	190
7.3.5	SCALAB – Skalierbare Automation durch MAS	192
8	Zusammenfassung	195
	Literaturverzeichnis	201

Abkürzungen

ABA	Articulated Body Algorithm
AI	Artificial Intelligence
BREP	Boundary Representation
CAD	Computer-Aided Design
CAED	Computer-Aided Ergonomic Design
CIR	Circular
CIROS	Control of Intelligent Robots in Space
COM	Center of Mass
COORD	Coordination
CP	Continuous Path
CRBA	Composite Rigid Body Algorithm
CTRL	Control
CWM	Central World Model
DES	Discrete Event System
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DH	Denavit-Hartenberg
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DOF	Degree of Freedom
E/A	Eingang/Ausgang
EAS	Einzel-Agentensystem
FIFO	First In, First Out
GUI	Graphical User Interface
GWS	Greiferwechselsystem
HMI	Human Machine Interface
IPO	Interpolation
IRF	Institut für Roboterforschung, TU Dortmund
ISS	International Space Station
IRCS	Intelligent Robot Control System
KIR	Kooperierende Industrieroboter
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
LERP	Linear Interpolation
LIN	Linear
MAS	Multi-Agentensystem
MMI	Institut für Mensch-Maschine-Interaktion, RWTH Aachen
MR	Multiple Redundanz

NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline
ODE	Open Dynamics Engine
OOP	Objektorientierte Programmierung
OP	Operation
OWAS	Ovako Working Posture Analysing System
PLM	Product Lifecycle Management
PRM	Probabilistic Road Map
PTP	Point-To-Point
PVR	Projective Virtual Reality
REAL	Reales System
RIF	RIF e.V. Institut für Forschung und Transfer
RNEA	Recursive Newton-Euler Algorithm
RPP	Randomized Path Planner
RRT	Rapidly-Exploring Random Tree
RT	Real-Time
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
S-PTP	Synchro-Point-To-Point
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SIM	Simuliertes System
SLERP	Spherical Linear Interpolation
SOML++	State-Oriented Modeling Language ++
SVD	Singular Value Decomposition
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
VEROSIM	Virtual Environments and Robotics Simulation System
VISU	Visualization
VR	Virtual Reality
ZMP	Zero Moment Point

Formelzeichen

$\underline{F}, \underline{M} \in \mathbb{R}^3$	Kraft-/Momentenvektor
$F_{x,y,z}, M_{x,y,z} \in \mathbb{R}$	Kraft-/Momentenkomponenten
$\underline{r} \in \mathbb{R}^n$	Allg. Vektor der Dimension $n \in \mathbb{N}$
$ \underline{r} \in \mathbb{R}^n$	Länge eines allg. Vektor
$\ \underline{r}\ \in \mathbb{R}^n$	(Euklidische) Norm eines allg. Vektors
$\underline{r}(t) \in \mathbb{R}^n$	Allg. Vektor als Funktion der Zeit $t \in \mathbb{R}$
$\dot{\underline{r}} = \frac{d}{dt}\underline{r}(t) \in \mathbb{R}^n$	1. Ableitung eines allg. Vektors nach Zeit t
$\ddot{\underline{r}} = \frac{d^2}{dt^2}\underline{r}(t) \in \mathbb{R}^n$	2. Ableitung eines allg. Vektors nach Zeit t
$\underline{r}(u) \in \mathbb{R}^n$	Allg. Vektor als Funktion einer Größe $u \in \mathbb{R}$
$\underline{r}' = \frac{d}{du}\underline{r}(u) \in \mathbb{R}^n$	1. Ableitung eines allg. Vektors nach Größe u
$\underline{r}'' = \frac{d^2}{du^2}\underline{r}(u) \in \mathbb{R}^n$	2. Ableitung eines allg. Vektors nach Größe u
$K(\zeta) \in \mathbb{R}^n$	Kurve im \mathbb{R}^n mit beliebigem Kurvenparameter $\zeta \in \mathbb{R}$
$K(\lambda) \in \mathbb{R}^n$	Kurve im \mathbb{R}^n mit natürlichem Kurvenparameter $\lambda \in \mathbb{R}$
$\underline{q} \in \mathbb{R}^n$	Gelenkwertvektor über $n \in \mathbb{N}$ Gelenke
$\underline{\dot{q}} \in \mathbb{R}^n$	Vektor der Gelenkgeschwindigkeiten über n Gelenke
$\underline{\ddot{q}} \in \mathbb{R}^n$	Vektor der Gelenkbeschleunigungen über n Gelenke
$\underline{q}(t) \in \mathbb{R}^n$	Trajektorie in Gelenkkoordinaten
$\underline{p} \in \mathbb{R}^3$	Kartesischer Positionsvektor
$\underline{v} \in \mathbb{R}^3$	Vektor der translatorischen kartesischen Geschwindigkeiten
$\underline{a} \in \mathbb{R}^3$	Vektor der translatorischen kartesischen Beschleunigungen
$\underline{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	Kartesische Orientierungsmatrix
$\underline{\omega} \in \mathbb{R}^3$	Vektor der rotatorischen kartesischen Geschwindigkeiten
$\underline{\alpha} \in \mathbb{R}^3$	Vektor der rotatorischen kartesischen Beschleunigungen
$\underline{T}(t) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$	Trajektorie in homogenen Koordinaten
${}^A T_B \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$	Homogene Transformationsmatrix des KS B relativ zu KS A
$q \in \mathbb{H}$	Quaternion
$\underline{l} \in \mathbb{R}^6$	Lagevektor in Plücker-Koordinaten
$\underline{\dot{l}} \in \mathbb{R}^6$	Vektor der Geschwindigkeiten in Plücker-Koordinaten
$\underline{\ddot{l}} \in \mathbb{R}^6$	Vektor der Beschleunigungen in Plücker-Koordinaten
${}^A X_B \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$	Plücker-Transformationsmatrix des KS B relativ zu KS A
$\underline{J} = J_{[m \times n]} \in \mathbb{R}^{m \times n}$	(Jacobi-)Matrix mit $m \in \mathbb{N}$ Zeilen und $n \in \mathbb{N}$ Spalten
$\underline{J}^{-1} \in \mathbb{R}^{m \times m}$	Inverse einer quadratischen Matrix $\underline{J}_{[m \times m]}$, $m \in \mathbb{N}$
$\underline{J}^+ \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Pseudoinverse einer beliebigen Matrix $\underline{J}_{[m \times n]}$, $m, n \in \mathbb{N}$
$\underline{J}_i \in \mathbb{R}^m$	i -te Spalte der Matrix $\underline{J}_{[m \times n]}$, $m, n \in \mathbb{N}$

$\mathcal{R}(\underline{J})$ Abbild der Matrix \underline{J} $\mathcal{N}(\underline{J})$ Nullraum der Matrix \underline{J}

Kapitel 1

Einleitung

Das Ziel dieser Dissertation ist es, vielfältige aktuelle Kinematiken in Forschung und Industrie systematisch und vereinheitlicht zu simulieren, zu analysieren und zu steuern. Die notwendige Generalisierung wird auf Basis von Multi-Agentensystemen realisiert, die dazu in ihren Strukturen die hierarchischen und heterarchischen Aspekte komplexer Kinematiken nachbilden.

Als wesentliches Merkmal weisen zahlreiche aktuelle Roboter in Forschung und Industrie die Struktur kinematischer Bäume auf, d.h. ihre Bewegungsapparate verzweigen ausgehend von einem Rumpf in Extremitäten bzw. serielle Teilkinematiken (siehe Bild 1.1). *Hierarchisch* betrachtet werden diese Extremitäten anhand ihrer Tiefe im kinematischen Baum klassifiziert. So werden z.B. im Fall humanoider Roboter die Rollen des Rumpfes, der Arme, der Hände und der Finger unterschieden, die jeweils durch zunehmende Tiefen im kinematischen Baum gekennzeichnet sind. Für die Teilkinematiken resultieren aus der Hierarchie kinematische und dynamische Kopplungen, die entsprechend berücksichtigt werden müssen. *Heterarchisch* betrachtet sind die seriellen kinematischen Ketten teilweise in zusätzliche organisatorische Zusammenhänge eingebunden, die unabhängig von der kinematischen Hierarchie stattfinden. Diese kontextabhängigen Zusammenhänge sind durch weitere Anforderungen, Kooperationen und Kopplungen gegeben; so sind z.B. in der Koordination von Gehbewegungen, in übergeordneten Reglerverfahren, in kinematischen Schleifen oder in der Kollisionsvermeidung unter Umständen jeweils andere Teilkinematiken involviert.

Um die Multi-Agentensysteme gemäß der hierarchischen Aspekte der Gesamtkinematik zu strukturieren, werden in den kinematischen Bäumen Pfade identifiziert, die den Extremitäten entsprechen. Diese kinematischen Pfade werden jeweils durch einen Agenten repräsentiert und gesteuert. Da die einzelnen Pfade des Baumes in erster Annäherung wohlbekannt, seriellen kinematischen Ketten entsprechen, weisen die Agenten zunächst die Funktionalitäten und Eigenschaften von Bewegungssteuerungen für Industrieroboter auf, wodurch ihr Aufbau und ihre Analyse auf bekannten Methoden der Robotik fußt. Die in diesem strukturell grundlegenden kinematischen Baum beteiligten Agenten sind in einem ersten, grundlegenden Agentenset organisiert, dem *Steuerungssset*. Um die Multi-Agentensysteme außerdem gemäß den heterarchischen Aspekten der Gesamtkinematik zu strukturieren, können Agenten in zusätzlichen, anwendungsspezifischen Agentensets gruppiert werden, den *Koordinationssets*. In diesen Agentensets werden dann Duplikate oder Auszüge des kinematischen Baumes eingesetzt, für die übergeordnete Steuerungen ausgewählte weiterführende Anforderungen, Koordinationen und Kopplungen umsetzen.

Zum einen werden durch diese Strukturierung der Multi-Agentensysteme unsinnige Kopplungen eliminiert, während sinnvolle Kopplungen bewusst eingeführt und mit übergeordneten

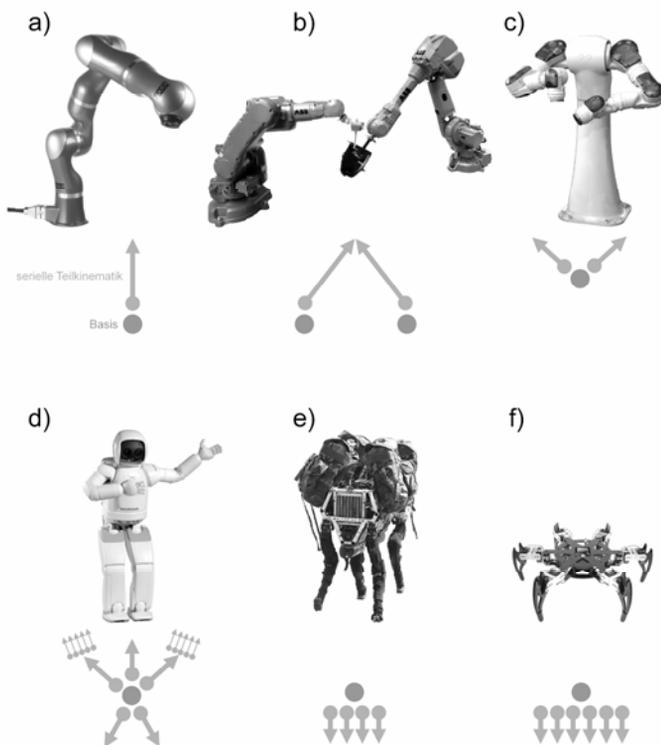


Abb. 1.1 Beispiele für Kinematiken, die mit den Multi-Agentensystemen adressierbar sind: a) redundante Manipulatorarme (LBR 4+ der Firma KUKA Roboter GmbH [178]) b) industrielle Mehrrobotersysteme (MULTIMOVE der Firma ABB Ltd. [11]) c) mehrarmige Manipulatorsysteme (SDA10D der Firma Yasakawa Electric Corp. [348]) d) humanoide Roboter (ASIMO der Firma Honda Motor Co., Ltd. [148]) e) vierbeinige Plattformen (BIGDOG der Firma Boston Dynamics [39]) f) vielbeinige Plattformen (CH3-R der Firma Lynxmotion Inc. [196])

Steuerungen für Agentensets adressiert werden können. Zum anderen ist die Grundidee der Multi-Agentensysteme damit ein „divide & conquer“-Ansatz – abstrakte Aufgaben der Simulation, Analyse und Steuerung werden in den Strukturen der Multi-Agentensysteme schrittweise konkretisiert und delegiert, so dass schließlich die Agenten wohlbekannte Teilprobleme lösen können, darunter insbesondere die Bewegungssteuerung serieller kinematischer Ketten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Konzept der Multi-Agentensysteme insbesondere im Hinblick auf anthropomorphe Kinematiken untersucht, d.h. Bewegungsapparate, die ganz oder in Teilen dem Menschen nachempfunden sind. Diese auf anthropomorphe Kinematiken konzentrierte Rekombination der Multi-Agentensysteme wird hier *anthropomorphe Multi-Agentensysteme* genannt.

Die Klasse der anthropomorphen Kinematiken stellt eine Schlüsselentwicklung der Robotik und Automatisierung dar, da sie in einer Vielzahl aktueller Problemstellungen in Forschung und Industrie eine zentrale Rolle spielen. In der Forschung treten anthropomorphe Kinematiken bei der Simulation und Steuerung humanoider Roboter auf [148][130][20][228][38] (siehe Bild 1.1 b)). In ihren Proportionen und Bewegungsmöglichkeiten sind humanoide Roboter wie der Bewegungsapparat des Menschen strukturiert, um Plattformen zu entwickeln, die zukünftig im Bereich der Servicerobotik im direkten Umfeld des Menschen eingesetzt werden können. Doch auch in neueren Entwicklungen der industriellen Robotik sind anthropomorphe Kinematiken zu erkennen [11][348][177] (siehe Bild 1.1 d)). Um zunehmend komplexere Tätigkeiten in der Produktion zu automatisieren, werden Industrieroboter zu Mehrrobotersystemen verkoppelt, die dann z.B. wie menschliche Arme die koordinierte Handhabung sperriger Lasten erlauben (siehe Bild 1.1 c)).

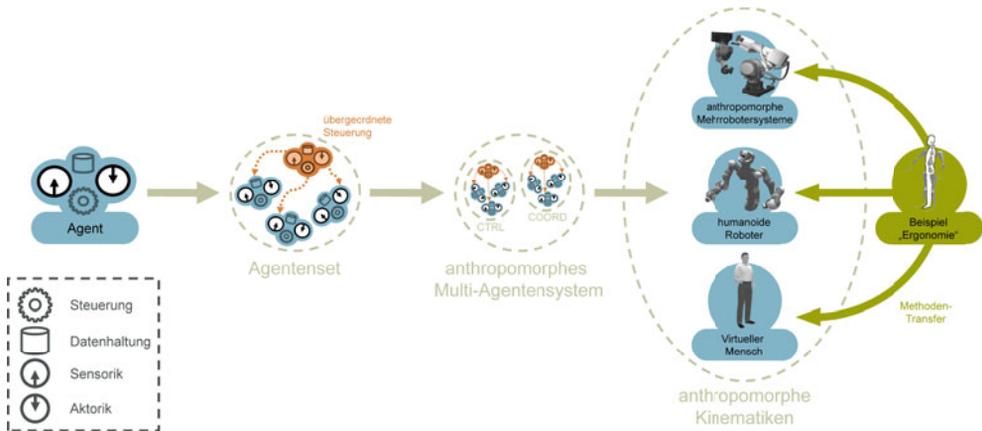


Abb. 1.2 Vereinheitlichter Umgang mit der Klasse der anthropomorphen Kinematiken durch das Konzept der anthropomorphen Multi-Agentensysteme am Beispiel „Ergonomie“

Die Realisierung humanoider Roboter und anthropomorpher Mehrrobotersysteme ist eng mit der Analyse und dem Verständnis des menschlichen Bewegungsapparates verknüpft. In diesem Sinne ist das kinematische Modell des Menschen selbst ebenfalls als anthropomorphe Kinematik zu klassifizieren. In dieser Arbeit wird daher neben Robotern einer Simulation der menschlichen Kinematik in Form des „Virtuellen Menschen“ eine besondere Wichtigkeit eingeräumt. Anhand des „Virtuellen Menschen“ werden zwei wesentliche Entwicklungsrichtungen dieser Arbeit verfolgt, die beide die Reichweite des zugrunde liegenden Konzeptes der Multi-Agentensysteme unterstreichen:

Die erste Entwicklungsrichtung demonstriert am Beispiel des „Virtuellen Menschen“, wie die Strukturen der Multi-Agentensysteme etablierte Basistechniken der Robotik geeignet erweitern und zur Bildung anthropomorpher Multi-Agentensysteme rekombinieren. Wie geschildert, wird der „Virtuelle Mensch“ zur hierarchischen Strukturierung als kinematischer Baum modelliert, in dem den Extremitäten entsprechende kinematische Pfade jeweils durch einen Agenten im Steuerungsset gesteuert werden. Als Beispiele der heterarchischen Strukturierung in Koordinationssets werden u.a. übergeordnete Steuerungen eingeführt, die die menschenähnliche Koordination von Rumpf- und Armbewegungen und die kinematischen Abläufe beim Gehen herausarbeiten (siehe Bild 1.2). Simulationen des „Virtuellen Menschen“ erlauben es dann, menschliche Tätigkeiten nachzubilden und dabei insbesondere nach ergonomischen Kriterien zu analysieren.

Darauf aufbauend demonstriert die zweite Entwicklungsrichtung am Beispiel „Ergonomie“, wie aufgrund der Generalisierung durch die Multi-Agentensysteme ein Methodentransfer zwischen Arten von Kinematiken ermöglicht wird (siehe Bild 1.2). Auf Basis der Multi-Agentensysteme stehen die Methoden zur Simulation, Analyse und Steuerung des „Virtuellen Menschen“ auch für humanoide Roboter und anthropomorphe Mehrrobotersysteme zur Verfügung. Als Beispiel des Methodentransfers wird in der Arbeit eine ergonomisch motivierte Bewegungssteuerung (und -planung) entworfen, die für humanoide Roboter zu verbesserten menschenähnlichen Bewegungen führt. Dieses Ergebnis ist insbesondere im Bereich der Servicerobotik von Interesse, wo Menschen im direkten Umgang mit Robotern hohe Ansprüche an vorhersagbare bzw. nachvollziehbare Bewegungsmuster stellen.

Die systematische Anwendung der Multi-Agentensysteme wird mittels eines modularen Frameworks zur Verfügung gestellt, das in einer Matrixarchitektur organisiert ist und sich dabei an den Anforderungen des erfolgreich eingesetzten Steuerungskonzeptes „Intelligent Ro-

bot Control System“ [IRCS] [116] für Mehrrobotersysteme orientiert. Ein Überblick über das IRCS und eine Beschreibung der Matrixarchitektur des Frameworks wird in Kapitel 3 gegeben. In Kapitel 4 werden die Bewegungssteuerung der Agenten, ihre Verschaltung zu Multi-Agentensystemen, sowie die übergeordneten Steuerungen von Agentensets vorgestellt. Darauf aufbauend erörtert Kapitel 5 die Details der Simulation und Programmierung anthropomorpher Multi-Agentensysteme. Das Konzept dieser wissenschaftlichen Untersuchung wurde zudem an einem Versuchsstand mit zwei menschenähnlich strukturierten Industrierobotern auf seine Fähigkeit zur Steuerung realer Mehrrobotersysteme erprobt, wie in Kapitel 6 dargestellt wird. Beispiele des genannten Methodentransfers von der Robotik in die Ergonomie und von der Ergonomie in die Robotik werden im Kapitel 7 gegeben. Zusätzlich zeigt das Kapitel auch auf, wie Multi-Agentensysteme über das Kernthema der Arbeit hinaus in verschiedenen Industrie- und Forschungsprojekten der allgemeinen Robotik und Automatisierung eingesetzt werden.

Kapitel 2

Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik und die aktuellen Forschungsziele und -inhalte der Bereiche, die in dieser Arbeit adressiert werden. Zunächst werden die verwendeten Begriffe definiert (Abschnitt 2.1). Dann wird die Bedeutung anthropomorpher Kinematiken in der Robotik (Abschnitt 2.2) und in Simulationen zur „Virtuellen Produktion“ (Abschnitt 2.3 auf Seite 21) herausgestellt und der Einsatz von Multi-Agentensystemen zur Steuerung beschrieben (Abschnitt 2.4 auf Seite 25). Abschließend werden die Kriterien der Auswahl des Simulations- und Visualisierungssystems erläutert, das als Entwicklungsumgebung die Basis der Implementierung dieser Arbeit bildet (Abschnitt 2.5 auf Seite 29).

2.1 Definition der Begriffe

Die Lehre der *Kinematik* befasst sich mit der Beschreibung von Bewegungsapparaten und Bewegungen anhand ihrer geometrischen und zeitabhängigen Eigenschaften, jedoch ohne die dynamischen Aspekte der Bewegungserzeugung zu betrachten [74].

Ein Bewegungsapparat heißt *anthropomorphe Kinematik*, falls er allgemein „dem Menschen nachempfunden“ ist [254][117]. Während serielle Kinematiken als offene kinematische Ketten modelliert sind, ist es ein charakteristisches Merkmal anthropomorpher Kinematiken, dass sie den menschlichen Bewegungsapparat ganz oder in Teilen auf eine kinematische Baumstruktur abbilden [163].

Ein Roboter heißt *humanoider Roboter* oder *anthropomorpher Roboter*, falls er eine anthropomorphe Kinematik realisiert. In einigen Zusammenhängen werden allerdings auch Roboter als anthropomorph beschrieben, bei denen andere ausgewählte Aspekte menschenähnlich sind, wie z.B. die Proportionen, die Mimik oder das Verhalten in der Interaktion [194][197][302].

Auf Grundlage der strengen Definition des Industrieroboters [324] ist ein *Mehrrobotersystem* ein aus mehreren Industrierobotern bestehendes System. Allerdings werden insbesondere im Bereich der mobilen Robotik [19] auch aus Robotern anderer Arten bestehende Systeme als Mehrrobotersysteme bezeichnet.

Ein Mehrrobotersystem heißt hier *anthropomorphes Mehrrobotersystem*, falls ein aus mehreren Industrierobotern bestehendes System Handhabungs- und Fertigungsaufgaben löst, indem es wie der menschliche Bewegungsapparat strukturiert ist.

2.2 Anthropomorphe Kinematiken als Schlüsselentwicklung der Robotik

Aktuelle Entwicklungen in der Robotik zielen darauf ab, die Effizienz von Robotern im industriellen Einsatz zu erhöhen und neue Einsatzgebiete von Robotern im Servicebereich vorzubereiten. Als Schlüssel zur Realisierung dieser Effizienzsteigerung und dieser Erschließung neuer Anwendungsfelder für Roboter wird das Verständnis von anthropomorphen Kinematiken angesehen. Im industriellen Sektor steht dabei die menschenähnliche Koordination der etablierten und leistungsstarken Industrieroboter im Vordergrund, um auf Basis der existierenden Technik zunehmend komplexere Aufgaben realisieren zu können. In der Forschung dagegen werden auch gänzlich neue kinematische Konfigurationen erprobt – humanoide Roboter sind wie der Bewegungsapparat des Menschen strukturiert und werden geeignet gesteuert, um mit menschenähnlichen Bewegungsmöglichkeiten den Einsatz von Robotern im Servicebereich auszuweiten.

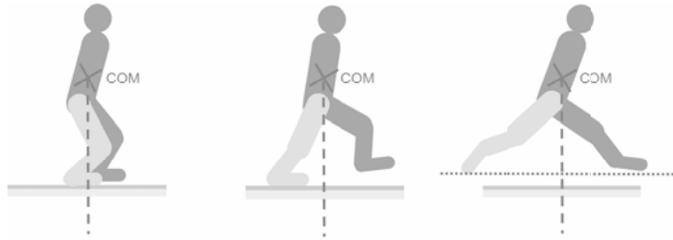
2.2.1 Anthropomorphe Roboter in der Forschung

Die Steuerung anthropomorpher Roboter stellt ein wesentliches Ziel der Forschung in der Robotik dar [289][327]. Im idealen Fall weisen anthropomorphe Roboter ähnliche Bewegungsmöglichkeiten und Proportionen wie der Mensch auf und sind daher besonders für die freie Bewegung in der direkten Umgebung des Menschen geeignet. Werden auch die Bewegungsabläufe dieser Roboter menschenähnlich gestaltet, kann zudem von einer richtiggehenden „Körpersprache“ anthropomorpher Robotern gesprochen werden [220][253], aus der menschliche Interaktionspartner Rückschlüsse auf die Beweggründe und Pläne des Roboters ziehen können. Das Ziel der Forschung ist es, in schrittweisen Annäherungen an das beschriebene Ideal die notwendigen technischen und konzeptionellen Voraussetzungen zu schaffen, um zukünftig humanoide Roboter als vielseitige Plattform einsetzen zu können. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind humanoide Roboter dann besonders für Anwendungen der Service-robotik geeignet.

2.2.1.1 Bewegungssteuerung von anthropomorphen Robotern

Die Aufgabe der Bewegungssteuerung von Robotern besteht in der Generierung von Steuerbefehlen für ihre Aktoren, um vorgegebene Bewegungsfolgen umzusetzen. Die Ursprünge von Bewegungssteuerungen anthropomorpher Roboter liegen in der Betrachtung kinematischer Baumstrukturen [163]. Darauf basierende, so genannte „Open Loop“-Steuerungen führen Bewegungen ohne Rückführung der Ergebnisse und folglich ohne Regelung aus. Erst in weiterführenden, so genannten „Closed Loop“-Steuerungen wurden diese Steuerungen systematisch um die Rückführung kinematischer und dynamischer Bewegungsgrößen und deren Regelung ergänzt [195][103][165][256]. Aufbauend auf diesen grundsätzlichen Ansatz der Bewegungssteuerung findet in der aktuellen Forschung häufig eine Konzentration auf spezielle, abgegrenzte Aspekte der Bewegungssteuerung statt, wie z.B. das Gehen. Innerhalb dieser Aspekte ist jeweils eine Weiterentwicklung von Lösungsansätzen einzelner Details festzustellen, wohingegen nur vergleichsweise wenige allgemeine Ansätze zur Bewegungssteuerung anthropomorpher Roboter existieren, die eine geschlossene Behandlung vollständiger humanoider Roboter vorsehen [285][224][166].

Abb. 2.1 Charakteristische Momente beim statischen Gehen (l.), dynamischen Gehen (m.) und beim dynamischen Laufen (r.); jeweils mit Massenzentrum COM („Center of Mass“)



Im Folgenden werden aktuelle Verfahren und Forschungsrichtungen der Bewegungssteuerung anthropomorpher Roboter am Beispiel zweibeinig gehender (bipedaler) Plattformen erörtert. Eine grundsätzliche Klassifizierung der Verfahren zur bipedalen Fortbewegung wird anhand der Stabilität der Gangart vorgenommen. Verfahren zum *statischen Gehen* führen einen Roboter derart, dass zu jedem Zeitpunkt der Bewegung seine statische Stabilität gesichert ist (siehe Bild 2.1 (l.)). Dabei wird die Lage eines bipedalen Roboters als statisch stabil bezeichnet, wenn er sich zu jedem Zeitpunkt und ohne Steuerungsmaßnahmen in einem statischen Gleichgewicht befindet und nicht umkippt oder fällt. Die zweite Klasse von Verfahren beschreibt das *dynamische Gehen*, bei dem zyklisch abwechselnd ein Fuß für eine Schrittbewegung vom Boden gelöst wird, während der jeweils andere Fuß den Bodenkontakt hält. Jeder Schrittzklus beginnt und endet mit einer Phase statischer Stabilität, in der zwischenzeitig beide Füße Bodenkontakt haben. Während der Schrittbewegung durchläuft der Roboter eine Phase dynamischer Stabilität (siehe Bild 2.1 (m.)). Die Lage eines bipedalen Roboters wird als dynamisch stabil bezeichnet, wenn er durch Steuerungsmaßnahmen in einem labilen Gleichgewicht gehalten wird und sonst umkippen oder fallen würde. Im Vergleich dazu entfallen bei der dritten Form der bipedalen Fortbewegung, dem *dynamischen Laufen*, die Phasen statischer Stabilität, da ein Schrittzklus jeweils mit nur einem einseitigen Bodenkontakt beginnt bzw. endet und die eigentliche Schrittbewegung durch eine schnelle Gangart gänzlich ohne Bodenkontakt erfolgt (siehe Bild 2.1 (r.)). Entsprechend ist es im Fall des Laufens notwendig, den bipedalen Roboter durch eine Regelung durchgängig dynamisch zu stabilisieren [289].

Die Aufgabe der Bewegungssteuerung bipedaler Roboter besteht darin, die gewünschte Gangart umzusetzen und dabei die Stabilität des Roboters zu gewährleisten. Als wichtigster Indikator der Stabilität gilt dabei die Berechnung der Lage des „Zero Moment Point“ [ZMP]. Die Beschreibung des ZMP erfolgt für die so genannte „Single Support Phase“, in der ein einzelner Fuß mit seiner „Support Polygon“ genannten Kontaktfläche auf den Boden aufgesetzt ist (siehe Bild 2.2 a)). In Bild 2.2 b) ist die dynamische Situation des aufgesetzten Fußes dargestellt. Alle am Roboter wirkenden Kräfte und Momente werden überhalb des Fußgelenkes als eine dort im Punkt A eingepreßte Kraft \underline{F}_A und ein eingepreßtes Moment \underline{M}_A modelliert. Die Zusammensetzung von \underline{F}_A und \underline{M}_A umfasst zum einen die Gewichtskräfte aller Gelenkkörper und die dadurch induzierten Versatzmomente; zum anderen müssen alle in den Gelenken des Roboters eingepreßten Antriebsmomente betrachtet werden, da jede Bewegung, insbesondere auch die der Arme, Einfluss auf das Gleichgewicht hat [237]. Am Kontaktpunkt P des aufgesetzten Fußes greifen die Reaktionskraft \underline{R}_P und das Reaktionsmoment \underline{M}_P des Bodens an. Zusätzlich wird der Fuß als Masse m_C in seinem Schwerpunkt C modelliert; g bezeichnet die Gravitationskraft.

Aus dem Impulserhaltungssatz [128] folgt für die Stabilisierung des Roboters in der „Single Support Phase“, dass durch die Reaktionskräfte und -momente des Bodenkontakts alle anderen am Roboter wirkenden Kräfte und Momente kompensiert werden, so dass sich bezüglich des Schwerpunktes C folgende Kräfte- und Momentensummen ergeben:

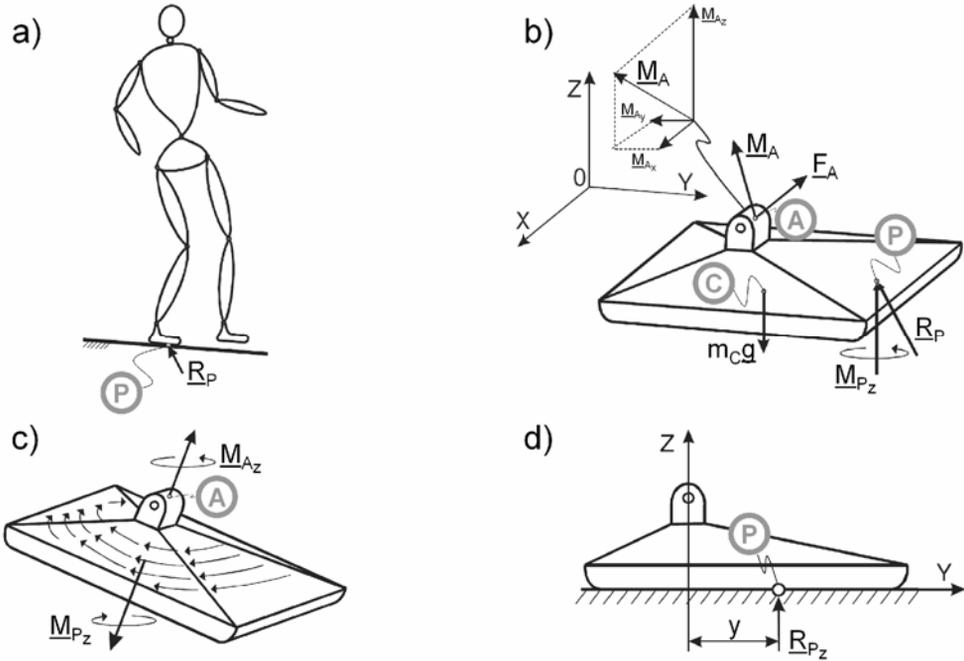


Abb. 2.2 a) Reaktionskraft am Kontaktpunkt, b) Kräfte und Momente am Fuß, c) Kompensation der Momente in Z-Richtung und d) Kompensation der Kräfte in Z-Richtung; nach [328]

$$\sum \underline{F}_C = 0 = \underline{R}_P + \underline{F}_A + (m_C \underline{g}) \quad (2.1)$$

$$\sum \underline{M}_C = 0 = (\underline{p} \times \underline{R}_P) + (\underline{c} \times (m_C \underline{g})) + \underline{M}_A + \underline{M}_P + (\underline{a} \times \underline{F}_A), \quad (2.2)$$

mit \underline{p} , \underline{a} und \underline{c} als Ortsvektoren zum Kontaktpunkt P , bzw. zum Ansatz des Fußgelenkes A und zum Schwerpunkt C .

Gemäß dem Ansatz des ZMP wird dann der Fall des dynamisch stabil ruhenden Fußes analysiert [328]. Da der Fuß ruht und keine horizontalen translatorischen Bewegungen ausführt, kann geschlossen werden, dass die Haftreibung die eingprägten horizontalen Kraftkomponenten F_{Ax} und F_{Ay} kompensiert und damit R_{Px} und R_{Py} gerade diesen horizontalen Reibungskräften entsprechen. Da der Fuß keine rotatorische Bewegung um die Z -Richtung ausführt, kann außerdem geschlossen werden, dass aufgrund der Haftreibung zudem M_{Pz} die eingprägte vertikale Momentkomponente M_{Az} (sowie ferner die Z -Komponenten der durch \underline{F}_A induzierten Versatzmomente) kompensiert (siehe Bild 2.2 c)). Weiter folgt aus der Kräfte- und Momentensumme (2.1), dass die vertikale Komponente der Reaktionskraft R_{Pz} den vertikal aufsetzenden Kräften F_{Az} und $m_C g$ entgegenwirkt.

Damit konzentriert sich die Analyse auf die Kompensation der eingprägten horizontalen Momentkomponenten M_{Ax} und M_{Ay} (sowie ferner der X - und Y -Komponenten der durch \underline{F}_A induzierten Versatzmomente). Die Reaktion des dynamischen Systems des Fußes zur Kompensation dieser eingprägten horizontalen Momentkomponenten besteht in der Verschiebung des Kontaktpunktes P im „Support Polygon“ und einem Anstieg von R_{Pz} . In Bild 2.2 d) ist eine derartige Verschiebung des Kontaktpunktes P um eine Distanz y dargestellt, die aus der Kompensation eines Anteils M_{Ax} resultiert. Sind die eingprägten horizontalen Momentenkomponenten zu groß, wird der Kontaktpunkt P schließlich an den Rand des „Support Polygon“ verschoben, so dass die kompensierende Wirkung der Haftreibung wegfällt und der

Fuß rutscht. Außerdem greift die Z-Komponente R_{P_z} der Reaktionskraft am Rand der Fußfläche an und resultiert in einem Kippen des Fußes über seine Kante – was in der Regel den Sturz des bipedalen Roboters zur Folge hat. Eine wesentliche Bedingung für das dynamische Gleichgewicht des bipedalen Roboters ist es daher, dass alle eingepprägten horizontalen Momentkomponenten kompensiert sind und sich die horizontalen Komponenten des Reaktionsmomentes gerade zu Null ergeben,

$$M_{P_x} = 0 \wedge M_{P_y} = 0 \quad (2.3)$$

Derjenige Punkt im „Support Polygon“, für den die Bedingung (2.3) gilt, stellt folglich einen dynamisch stabilen Kontaktpunkt dar und wird als „Zero Moment Point“ bezeichnet [329][328][327].

Beim Gehen bipedaler Roboter ist es dann das Ziel, die eingepprägte Kraft F_A und das eingepprägte Moment M_A durch die Vorgabe entsprechender Gelenkbewegungen der Gesamtkinematik derart zu regeln, dass der resultierende Kontaktpunkt den Gleichgewichtsbedingungen (2.3) des ZMP genügt. Eine Gruppe von Ansätzen orientiert sich dazu an geeigneten Referenztrajektorien des ZMP, in deren Nähe der tatsächliche Kontaktpunkt geführt werden muss, um den Roboter dynamisch zu stabilisieren. Dazu werden „Walking Patterns“, Schrittbewegungen der Beine und der Füße vorgegeben, so dass die Trajektorien der Kontaktflächen bekannt sind, und damit wiederum Trajektorien in den Kontaktflächen liegender, sicherer ZMPs berechnet werden können. Alle anderen Bewegungen des Körpers werden dann dazu eingesetzt, den tatsächlichen Kontaktpunkt entlang dieser Referenztrajektorien des ZMP zu führen [346][156][232][210].

In der Regel erschwert die Komplexität der dynamischen Modelle die Herleitung einer gewünschten Dynamik des gesamten Roboters aus Referenztrajektorien des ZMP, so dass verschiedene Modellvereinfachungen vorgeschlagen werden. Häufige Vereinfachungen bestehen darin, den Oberkörper des Roboters insgesamt als dreidimensionales inverses Pendel zu betrachten [233][307][98] oder das Gesamtproblem mittels „Dynamischer Filter“ in besser und schneller zu berechnende Einzelprobleme zu zerlegen [222][223]. Weitere Verfeinerungen und Abwandlungen der ZMP-basierten Verfahren adressieren Themen, wie das Laufen [157][316], die Fortbewegung in rauhem Gelände [144][311] oder die Objektmanipulation während des Gehens [200].

Neben den ZMP-basierten Verfahren existieren alternative Ansätze zum dynamischen Gehen und Laufen, in denen die geometrischen und die dynamischen Anforderungen an eine Schrittfolge zugleich und eng gekoppelt ermittelt werden. Diese so genannten „Position/Force“- oder kinodynamischen Verfahren wurden zur allgemeinen Bewegungssteuerung von Robotern entwickelt (siehe Abschnitt 2.2.1.3 auf Seite 11) und werden zunehmend auch für die Fortbewegung bipedaler Roboter zur Anwendung gebracht [173][136][57].

2.2.1.2 Bewegungsplanung für anthropomorphe Roboter

Die Bewegungsplanung dient der Ermittlung einer geeigneten Bewegungsfolge, die einen Roboter ausgehend von der aktuellen Konfiguration kollisionsfrei in eine gegebene Zielkonfiguration überführt. Es stehen dabei unterschiedliche Verfahren zur Auswahl, um Hindernisse, bzw. kollisionsfreie Gebiete der Arbeitsumgebung eines Roboters zum Zweck der Bewegungsplanung zu kartieren. Im Fall der *kartesischen Modellierung* wird die Umgebung des Roboters mittels „Boundary Representations“ [BREPs] [5][305] geometrisch modelliert. Ansätze zur Bewegungsplanung, die kartesische Modellierungen der Umgebung als Planungsgrundlage nutzen [172][227][64], sind nachweislich bereits für einfache Situationen mit we-

nigen BREPs durch die resultierende Komplexität des Planungsproblems in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt [283]. Eine für Roboter angepasste Transformation des geometrischen Planungsproblems stellt der Übergang auf den *Konfigurationsraum* dar [191]. Bei dieser Abbildung der Umgebung eines Roboters mit n Gelenken entspricht eine n -dimensionale Koordinate des Konfigurationsraumes einer Gelenkstellung q_n des Roboters. Karten des Konfigurationsraumes werden gebildet, indem die möglichen Gelenkstellungen des Roboters in gegebenen Diskretisierungsschritten abgetastet werden. Treten dabei Gelenkstellungen auf, die eine Kollision des Roboters mit der Umgebung bedeuten, werden die entsprechenden Wertebereiche des Konfigurationsraumes zur Durchfahrt gesperrt.

Auf Karten des Konfigurationsraumes basierend wurde eine Vielzahl von Bewegungsplanern für Roboter entwickelt, die – insofern eine hinreichende Abdeckung und Genauigkeit der Diskretisierung des Konfigurationsraumes gegeben ist – als *globale Verfahren* klassifiziert werden und exakte Lösungen des Planungsproblems ermitteln, indem stets die gesamte Karte auf einen kollisionsfreien Pfad untersucht wird. Wie im Fall der kartesischen Modellierung ist es eine wesentliche Eigenschaft globaler Planungsverfahren im Konfigurationsraum, dass die Komplexität des Planungsproblems mit dem Detailgrad der Modellierung der Umgebung zunimmt, die hier durch die Genauigkeit der Diskretisierung bestimmt wird. Zusätzlich steigt die Komplexität des Planungsproblems exponentiell mit der Anzahl n der Dimensionen des Konfigurationsraumes, d.h. der Anzahl der Gelenke des Roboters [59]. Vornehmliches Ziel globaler Planungsverfahren im Konfigurationsraum ist es daher, die Komplexität des Planungsproblems durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren und den Zeitbedarf für die Planung einer Bewegung auch für reale Arbeitsumgebungen von Robotern online-fähig zu machen oder zumindest in annehmbaren Grenzen zu halten [52][101][192].

In Abgrenzung zu den globalen Verfahren existiert daneben die Klasse der *lokalen Verfahren*, die der Komplexität des Planungsproblems begegnen, indem jeweils nur eine enge, lokale Umgebung des Roboters auf Kollisionsfreiheit untersucht wird. Lokale Bewegungsplaner ermitteln eine Gesamtlösung des Planungsproblems dann durch die inkrementelle Aneinanderreihung der örtlich begrenzten Teillösungen. Die grundlegende Idee der lokalen Bewegungsplanung wird z.B. durch den Ansatz der Potenzialfelder wiedergegeben [164]. Dazu wird die Umgebung als „goal attractive“ modelliert, indem das einzunehmende Ziel den Roboter aus seiner Ausgangsstellung heraus im Sinne eines Potentials anzieht, während Hindernisse in der Umgebung den Roboter abstoßen. In einem derart definierten Potenzialfeld kann mittels eines Gradientenabstiegsverfahrens ein kollisionsfreier Pfad in die Zielkonfiguration sukzessive entwickelt werden, wobei jeweils nur ein örtlich begrenzter Ausschnitt des Feldes untersucht werden muss. Die primäre Herausforderung bei der Umsetzung einer Bewegungsplanung gemäß dem Ansatz der Potenzialfelder besteht in lokalen Minima, aus denen ein einfaches Abstiegsverfahren mangels der globalen Sicht auf die Situation nicht entkommen kann, so dass der entwickelte Pfad die Zielkonfiguration nicht erreicht. Im Gegensatz zu globalen Planungsverfahren, die vollständig genannt werden, da sie die Findung eines Pfades erlauben, sofern er existiert, ist der lokale Ansatz der Potenzialfelder und darauf aufbauende Verfahren nicht vollständig [102].

Das Problem der lokalen Minima kann umgangen werden, indem die lokale Suche des Bewegungsplaners Minima erkennt und ihnen entkommen kann. Eine Strategie, lokalen Minima zu entkommen, besteht in einer begrenzten Randomisierung der Suche – im einfachsten Fall wird dem Gradientenabstiegsverfahren dabei eine Art „Brownsche Bewegung“ überlagert, um tendenziell dem globalen Ziel näher zu kommen, aber andererseits durch sporadische Sprünge im Suchraum einem Verharren in lokalen Minima zu begegnen [27][28][182]. Anlässlich derartiger „Randomized Path Planners“ [RPPs] wird zusätzlich der Begriff der Vollständigkeit detaillierter gefasst. Es liegt dann die so genannte probabilistische Vollständigkeit