

Entwicklung eines markerbasierten Motion Capturing-Systems für Echtzeitanwendungen

Diplomarbeit
aus dem Fachgebiet
Graphische Datenverarbeitung
von
Christian Weisel

Durchgeführt am
Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V., Darmstadt

Fachhochschule Gießen-Friedberg
Bereich Friedberg
Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Datenverarbeitung

Referentin: Prof. Dr. Monika Lutz
Korreferent und Betreuer: Dipl.-Math. (FH) Cornelius Malerczyk

Oktober 2004

Hiermit erkläre ich, Christian Weisel, an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und unter ausschließlicher Verwendung der im Quellenverzeichnis angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Friedberg, den 18. Oktober 2004

Christian Weisel

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Motion Capturing	10
2.1. Begriffe	10
2.2. Anwendungen für Motion Capturing	11
2.2.1. Medizin	12
2.2.2. Sport	12
2.2.3. Virtuelle Realität	13
2.2.4. Unterhaltung	13
2.2.4.1. Film und Fernsehen	14
2.2.4.2. Computerspiele	16
2.3. Geschichte	16
2.4. Prinzipielle Funktionsweise von Motion Capturing-Systemen	19
3. Stand der Technik	21
3.1. Tracking-Systeme	21
3.1.1. Unterscheidung der Systeme	21
3.1.2. Mechanische Tracking-Systeme	24
3.1.2.1. Aufbau und Funktionsweise	24
3.1.2.2. Mechanische digitale Armaturen	25
3.1.2.3. Vor- und Nachteile	26
3.1.3. Magnetische Tracking-Systeme	27
3.1.3.1. Aufbau und Funktionsweise	27
3.1.3.2. Vor- und Nachteile	27
3.1.4. Optische Tracking-Systeme	28
3.1.4.1. Aufbau	28
3.1.4.2. Passive optische Systeme	30
3.1.4.3. Aktive optische Systeme	31
3.1.4.4. Funktionsweise	31
3.1.4.5. Vor- bzw. Nachteile	33
3.1.5. Akustische Systeme	34
3.1.5.1. Aufbau und Funktionsweise	34
3.1.5.2. Vor- und Nachteile	35
3.1.6. Funk-Systeme	35

3.1.7.	Biegesensor-Systeme	36
3.1.7.1.	Aufbau und Funktionsweise	36
3.1.7.2.	Vor- und Nachteile	37
3.1.8.	Hybrid-Systeme	37
3.2.	Marktübersicht	37
3.2.1.	Hardware-Anbieter	38
3.2.2.	Software-Anbieter	38
3.2.3.	Service-Anbieter	39
3.3.	Aktuelle Forschung	39
3.3.1.	Markerloses Motion Capturing	39
3.3.2.	Erkennung dynamischer Modelle	40
3.3.3.	Skeleton Fitting	40
3.3.4.	Echtzeitfähigkeit	40
4.	Aufgabenstellung und Planung	41
4.1.	Analyse	41
4.2.	Ziele und Aufbau des Systems	41
4.3.	Beschränkungen des Systems	42
4.4.	Anwendungsmöglichkeiten des Systems	44
5.	Implementierung	45
5.1.	Überblick	45
5.2.	Einsatz von EOS	46
5.3.	Der Motion Capturing-Anzug	47
5.3.1.	Einsatz der EOS-Modelle	47
5.3.2.	Das Kopfmodell	47
5.3.3.	Das Körpermodell	49
5.3.3.1.	Das lokale Koordinatensystem	50
5.3.3.2.	Anmerkungen	51
5.3.4.	Bänder für Arme und Beine	52
5.3.4.1.	Anmerkung	52
5.4.	Das Skelett	54
5.5.	Das Motion Capturing Software-Modul	57
5.5.1.	Einführung	57
5.5.2.	Skeleton Fitting	58
5.5.3.	Konfiguration	59
5.5.4.	Datenexport	60
5.5.5.	Graphische Benutzerschnittstelle	61
5.5.5.1.	Einlesen einer Konfigurationsdatei	61
5.5.5.2.	Speichern einer Konfiguration	62
5.5.5.3.	Reset der Konfiguration auf Standardwerte	62
5.5.5.4.	Exportieren von Bewegungsdatensätzen	62
5.5.5.5.	Einsehen aller Parameter	62
5.5.5.6.	Veränderung der Genauigkeitseinstellung	63

Inhaltsverzeichnis

5.5.5.7.	Setzen einer Kopforientierung	64
5.5.5.8.	Einstellung und Veränderung der Markerabstände	65
5.5.6.	Behandlung EOS spezifischer Probleme	65
5.5.6.1.	EOS liefert kein Kopfmodell	66
5.5.6.2.	EOS liefert kein Körper-Modell	66
5.5.6.3.	EOS liefert ein falsches Körpermodell	66
5.5.6.4.	Probleme der Modellerkennung	67
5.6.	Algorithmen	67
5.6.1.	Bestimmung der Kopfdaten	67
5.6.2.	Bestimmung von Schulter- und Hüftpositionen	68
5.6.3.	Berechnung der Wirbelpositionen	68
5.6.4.	Erfassung von Armen und Beinen	69
5.6.4.1.	Das Kugelschalenmodell	69
5.6.4.2.	Datenstruktur für Arme und Beine	71
5.6.4.3.	Finden möglicher Kandidaten	72
5.6.4.4.	Reduktion der Kandidatenanzahl	73
5.6.4.5.	Endgültige Auswahl	73
5.6.5.	Skelettvalidierung	74
5.6.5.1.	Inverse Kinematik	74
5.6.5.2.	Einsatz von Vergangenheitsdaten	76
5.6.6.	Hilfsalgorithmen	77
6.	Ergebnisse	78
6.1.	Güte von Motion Capturing-Systemen	78
6.2.	Mögliche Bewegungen	78
6.3.	Probleme	80
6.3.1.	Verdeckung von Markern	80
6.3.2.	Marker-Gelenk-Problematik	80
6.4.	Bewertung der Echtzeitfähigkeit	80
7.	Zusammenfassung und Ausblicke	82
7.1.	Zusammenfassung	82
7.2.	Erweiterungen und Ausblicke	82
7.2.1.	EOS-Modelle für Arm- und Beingelenke	83
7.2.2.	Unterscheidung zwischen Oberkörper und Rumpf	83
7.2.3.	Initialpose zur Abstandsmessung	84
A.	EOS	85
A.1.	Überblick	85
A.2.	Aufbau	85
A.2.1.	Passive Marker	86
A.2.2.	Aktive Marker	87
A.3.	EOS-Modelle	88
A.4.	Funktionsweise	89

Inhaltsverzeichnis

A.5. Technische Spezifikationen	90
A.6. Konfiguration	90
A.6.1. Kalibrieren	90
A.6.2. Einrichten des Referenzkoordinatensystems	91
A.6.3. Anlernen von Modellen	91
B. Epipolargeometrie	93
B.1. Was ist Epipolargeometrie?	93
B.2. Problem des Verfahrens im praktischen Einsatz	93
C. Inverse Kinematik	96
D. Kommerzielle Motion Capturing-Systeme	98
D.1. Magnetische Systeme	98
D.1.1. Ascension Technology Corporation	98
D.2. Mechanische Systeme	101
D.2.1. Meta Motion	101
D.3. Optische Systeme	101
D.3.1. Motion Analysis	101
D.3.2. Vicon	103
D.3.3. Ascension Technology Corporation	104
E. Datenformate	107
E.1. Acclaim	107
E.2. Biovision	108
E.3. CSM	108
E.4. TRC	108
E.5. C3D	108
E.6. FBX	109
E.7. Rohdaten	109
F. Glossar	110
F.1. Avatar	110
F.2. DoF - Degrees Of Freedom	110
F.3. Charakter Animation	110
F.4. Frame-Grabber	111
F.5. Gyroskop	112
F.6. Kinematische Kette	113
F.7. Virtuelle Realität (Virtual Reality)	113
Literaturverzeichnis	116
Abbildungsverzeichnis	126
Tabellenverzeichnis	128

1. Einleitung

Ein wichtiges Themengebiet der graphischen Datenverarbeitung ist die Darstellung von Menschen. Mit den heutigen Möglichkeiten der Charakter Animation lassen sich realistische Darstellungen von Menschen und Tieren oder sonstigen Objekten realisieren. Die animierten, virtuellen Charaktere wirken so realistisch, dass sie von der realen Umgebung nur schwer zu unterscheiden sind (siehe Abbildung 1.1). Damit ein virtueller Charakter möglichst natürlich wirkt, müssen sowohl Aussehen und als auch Bewegungen möglichst realistisch sein.

Ermöglicht wird der real wirkende Eindruck durch die Trennung von Aussehen und Bewegung des virtuellen Charakters. Die Trennung dieser Eigenschaften ermöglicht eine realistische Darstellung des Charakters unabhängig von dessen Bewegung. Bei traditioneller Animation muss hingegen das Aussehen des Charakters an die gerade ausgeführte Bewegung manuell angepasst werden.

Während die Methoden zur graphischen Darstellung eines virtuellen Charakters weit fortgeschritten sind und mit Standard-Modellierungssoftware realisiert werden können, ist die Erfassung komplexer Bewegungen nur mit sehr teurer Spezialhard- und Software möglich. Einfache Bewegungen wirken meist schon mit der manuellen Modellierung sehr real. Soll der virtuelle Charakter allerdings komplexere Bewegungen ausführen, stößt dieses Vorgehen an seine Grenzen.

Leider ist es keine Lösung, auf komplexe Bewegungen zu verzichten, denn gerade durch diese wirken die Charaktere realer. Ein Lösungsansatz liegt in der automatischen Erfassung von echten Bewegungen.



Abbildung 1.1.: Akteur bei Aufnahmen für den Film „Herr der Ringe“. Akteur im Motion Capturing-Anzug und animierte Darstellung der Kreatur Gollum (aus [Ser04])

Das automatische Erfassen von Bewegungen wird in der graphischen Datenverarbeitung mit den Begriff **Motion Capturing** umschrieben. Wie viele Begriffe der IT-Welt

1. Einleitung

stammt auch Motion Capturing aus dem englischen Sprachraum. Der Begriff ist aus den zwei Wörtern *motion* und *to capture* zusammengesetzt. Die beiden Begriffe können mit Bewegung (*motion*) und einfangen bzw. aufnehmen (*to capture*) übersetzt werden. In der Literatur wird für den Begriff Motion Capturing oft die Abkürzung *MoCap* verwendet.

Doch was bedeutet Motion Capturing im Detail? Die Definition von Motion Capturing nach [DMZ95] und [Fur99] besagt: Motion Capturing beschreibt einen Vorgang, mit dessen Hilfe Bewegungen von Objekten und insbesondere von Menschen erfasst werden. Dabei werden die für die Bewegung wichtigen Daten extrahiert und in eine maschinenlesbare Form (*computer-usable form*) überführt. Das Resultat nennt man **Bewegungsdaten** (engl.: *motion data*).

Diese Definition von Motion Capturing sagt nur, dass Bewegungsdaten erfasst werden. Mit welchem Verfahren dies geschieht, wird offen gelassen. Während der Entwicklung der Motion Capturing-Technologie wurden verschiedene Systeme entwickelt, die Bewegungsdaten auf unterschiedlichste Art und Weise erfassen.

Auch wenn die Definition allgemein von Objekten spricht, war das Entwicklungsziel meistens die Erfassung von menschlichen Bewegungsdaten. Das Erfassen von *menschlichen* Bewegungen wird auch als **Human Motion Capturing** bezeichnet. Auch in dieser Arbeit wird mit Motion Capturing das Erfassen von menschlichen Bewegungsdaten bezeichnet.

Die heute zur Verfügung stehenden Motion Capturing-Systeme leisten gute Arbeit bei der Erfassung von Bewegungsdaten. Allerdings haben diese Systeme auch einen großen Nachteil: Die meisten Systeme sind außerordentlich teuer (mehrere zehntausend Euro). Dies liegt vor allem an der Verwendung von spezieller Hard- und Software, hohen Entwicklungskosten sowie an dem kleinen Absatzmarkt. Die Verwendung solcher Systeme ist zudem meist sehr kompliziert. Neben den enormen Kosten für das System selbst entstehen also noch zusätzliche Kosten für die Schulung des Personals. Motion Capturing-Systeme werden deshalb meist nur in professionellem Umfeld eingesetzt.

Durch den Einsatz vor allem im professionellen Bereich sind die Systeme so entworfen, dass sie möglichst viele und möglichst genaue Bewegungsdaten liefern. Es wird eine solche Flut an Daten erzeugt, dass zur Verarbeitung sehr leistungsstarke Computer notwendig sind. Trotz teuerster Computer ist eine Verarbeitung der Daten in Echtzeit¹ allerdings kaum möglich. Sollen die Bewegungsdaten gleichzeitig mittels Animationstechnik graphisch dargestellt werden, reicht die zur Verfügung stehende Rechenleistung nicht mehr aus. Lediglich die Darstellung eines reduzierten Datensatzes ist möglich.

Neben dem professionellen Einsatz von Motion Capturing-Systemen gäbe es im Massenmarkt durchaus Anwendungsgebiete für Motion Capturing. Vor allem für Computerspiele würde sich der Einsatz dieser Technologie lohnen. Allerdings werden mögliche Interessenten vor allem durch den hohen Preis der Systeme abgeschreckt.

In Rahmen dieser Arbeit wurde ein Motion Capturing-System entwickelt, das mit einem geringeren Einsatz an Hardware und Rechenleistung arbeitet. Zusätzlich soll das hier entwickelte System Bewegungsdaten in Echtzeit liefern. Bei der Entwicklung wurde

¹Man spricht von Echtzeitanwendungen, wenn die Systeme in der Lage sind mindestens 20 bis 30 mal pro Sekunde Bewegungsdaten zu erfassen.

1. Einleitung

vor allem darauf geachtet, dass möglichst viele standardisierte und getestete Komponenten zum Einsatz kommen. Das entwickelte System setzt dazu auf optische Methoden zur Erfassung der menschlichen Bewegungsdaten.

Nach diesem einführenden Kapitel führt **Kapitel 2** in die Begriffswelt des Motion Capturing ein. Es werden die Anwendungen sowie der geschichtliche Werdegang erläutert. Es folgt eine Beschreibung der Funktionsweise von Motion Capturing-Systemen. Das Kapitel endet mit der Beschreibung einer typischen Motion Capturing-Session. **In Kapitel 3** wird ein Überblick über den Stand der Technik sowie über derzeitige Forschungsarbeiten gegeben. **Kapitel 4** beinhaltet die Analyse der Aufgabenstellung sowie die daraus entwickelte Vision des Motion Capturing-Systems. **Kapitel 5** beschreibt die Umsetzung des entworfenen Systems und geht dabei auf die Lösung der einzelnen Arbeitsschritte ein. **Kapitel 6** beschreibt das Resultat der Entwicklungsarbeit und geht auf Probleme ein, die während der Realisierung des Projekts entstanden sind. Schließlich fasst **Kapitel 7** den Inhalt der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche Erweiterungen des Systems. Im Anhang befindet sich eine Beschreibung wichtiger Komponenten des Systems sowie die Erläuterung der benötigten Grundlagen. Ein Glossar schließt die Arbeit ab.

2. Motion Capturing

In der Einleitung zu dieser Arbeit wurde bereits erwähnt, dass Motion Capturing das Aufzeichnen von Bewegungsdaten beschreibt. Im folgenden Kapitel soll nun der Begriff Motion Capturing näher beleuchtet werden. Dazu werden im Folgenden einige wichtige Begriffe geklärt. Nach der Darstellung der Anwendungsgebiete wird der Werdegang von Motion Capturing beschrieben. Das Kapitel endet mit der Beschreibung der prinzipiellen Funktionsweise von Motion Capturing-Systemen.

2.1. Begriffe

Wie in der IT-Welt und in anderen Fachgebieten existieren auch im Bereich der graphischen Datenverarbeitung viele Spezialbegriffe. Auch der Bereich des Motion Capturing verwendet viele fachspezifische Begriffe. Teilweise stammen die Begriffe aber aus ganz anderen Bereichen. Dies liegt an den verschiedenen Verfahren zur Erfassung der Bewegungen. So sind vor allem Begriffe aus der Filmindustrie oder der Elektrotechnik anzutreffen. Allerdings haben diese übernommenen Begriffe teilweise eine veränderte Bedeutung erlangt.

Fachbegriffe, die nicht speziell dem Motion Capturing zugerechnet werden, werden in einem Glossar am Ende dieser Arbeit erläutert. Eine weiterreichende Auflistung von Fachbegriffen findet sich in [DMZ95].

Motion Capturing-Systeme sind Systeme zum Erfassen vom Bewegungsdaten. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden die Systeme hauptsächlich zur Erfassung menschlicher Bewegungsdaten verwendet.

Der Begriff **Bewegungsdaten** beschreibt alle Informationen, die notwendig sind, um die Bewegung eines Objekts zu beschreiben. Dazu zählen neben Positionsangaben und Winkeln zwischen Segmenten des Objekts auch die Information, um welches Objekt es sich handelt. Zu den Bewegungsdaten eines Menschen zählen z.B. die Positionen der einzelnen Gelenke zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Der eingedeutschte Begriff **capturen** hat seinen Ursprung im englischen Wort *to capture* (engl.: fangen, einfangen). Wird im Motion Capturing Bereich von *capturen* gesprochen, bedeutet dies, dass Bewegungsdaten aufgenommen werden.

Motion Capturing kann sich auf Bewegungsdaten von beliebigen Objekten beziehen. Handelt es sich bei dem zu erfassenden Objekt um einem Menschen, so spricht man

vom **Akteur**.

Alle verfügbaren Motion Capturing-Systeme sind auf einen festgelegten Bereich zur Datenerfassung beschränkt. Dieser Bereich wird als **Capturing Volume** bzw. als **Aktionsbereich** bezeichnet. Nur wenn der Akteur sich innerhalb dieses Bereichs aufhält, können seine Bewegungsdaten erfasst werden. Je nachdem, welches Verfahren zur Erfassung der Bewegungsdaten eingesetzt wird, kann der Aktionsbereich unterschiedliche Abmessungen haben.

Ein Begriff, der im Bereich des Motion Capturing häufig fällt, ist **Tracking**. Tracking ist der englische Begriff für zuordnen bzw. verfolgen. Speziell bei optischen Motion Capturing-Systemen wird der Begriff verwendet. Dort beschreibt es den Vorgang, Bewegungsdaten aus Videobildern zu erzeugen.

Tracking-Systeme sind in der Lage, bestimmte Objekte in Videobildern zu erkennen und anhand der Bildinformation deren Position sowie Orientierung im Raum zu bestimmen. Neben der Positionsbestimmung bieten die Systeme zusätzlich eine Verfolgung der Objekte. Tracking-Systeme sind ein wesentlicher Bestandteil von Motion Capturing-Systemen.

Diese strikte Trennung der Begriffe Tracking-System und Motion Capturing-System spiegelt sich leider nicht immer in der Literatur wieder. Manche Autoren verwenden die Begriffe synonym. Tracking-Systeme allein stellen allerdings keine vollständigen Motion Capturing-Systeme dar, denn sie bieten meist lediglich das Verfolgen starrer Objekte.

In dieser Arbeit werden Tracking-Systeme als ein Teil der Motion Capturing-Systeme betrachtet. Sie repräsentieren die Komponente des Gesamtsystems, die sich um die Bestimmung von Sensor- bzw. Emitterpositionen kümmert.

Der Begriff **Session** (engl.: Sitzung) im Bezug auf Motion Capturing beschreibt die Aufnahme einer einzelnen bzw. einer fest vorgegebenen Folge von Bewegungen.

Der Begriff **Frame** (engl.: Rahmen) beschreibt, eine Momentaufnahme während einer Session. Aus einem Frame lässt sich die Position aller zu verfolgenden Objekte berechnen bzw. die momentane Körperhaltung (Pose) des Akteurs erfassen.

Die **Framerate** beschreibt, wie oft eine Abtastung aller Sensoren pro Zeiteinheit realisiert werden kann. Bei videobasierten Systemen wird diese Abtastrate in Bilder pro Sekunde angegeben.

2.2. Anwendungen für Motion Capturing

Motion Capturing hat eine Vielzahl von Anwendungsgebieten. Jeder Bereich, der Bewegungsdaten verwendet, bietet sich zur Arbeit mit entsprechenden Systemen an. Das

2. Motion Capturing

wohl bekannteste Einsatzgebiet stellt dabei die Unterhaltungsindustrie dar. Der folgende Abschnitt beschreibt die wichtigsten Einsatzgebiete von Motion Capturing.

Weiterführende Informationen zu Anwendungsgebieten sind in [Hip02], [Int04a] und [Mot04a] oder im Artikel [WF02] zu finden.

2.2.1. Medizin

In der Medizin spielt die Analyse der Bewegung eine große Rolle. Neben dem Einsatz für therapeutische Zwecke ist hier besonders der biomechanische Aspekt wichtig. Die Biomechanik beschäftigt sich mit Körpern und deren Bewegungen, wobei diese mit mechanischen Prinzipien untersucht werden. Mit Hilfe der durch Motion Capturing erfassten Daten können die Bewegungsabläufe und das Zusammenspiel der einzelnen Gelenke untersucht werden. Wie in [Mot04d] beschrieben, lassen sich Abnormalitäten im Bewegungsablauf feststellen. Aus den gewonnen Erkenntnissen über den Bewegungsapparat können Heilmethoden entwickelt werden.



Abbildung 2.1.: Ganganalyse mittels Motion Capturing (aus [Mot04d])

Die Medizin und insbesondere die Bewegungsanalyse können als die Ahnen der modernen Motion Capturing-Methoden angesehen werden. Wie in [Hip02] nachzulesen ist, wurden bereits 1876 erste Bewegungsanalysen durchgeführt. Die grundlegenden Ideen, die damals zur Erfassung der Bewegungsdaten entstanden sind, sind auch noch in modernen Motion Capturing-Systemen wiederzufinden.

2.2.2. Sport

Vor allem die Sportmedizin hat großen Nutzen aus der Verwendung der Bewegungsdaten gezogen. Stehen die Bewegungsdaten einer sportlichen Übung zur Verfügung, können sie analysiert werden. Durch eine Zerlegung der Bewegungen in einzelne Komponenten ist es möglich, spezielle Trainingseinheiten zu entwickeln. Auch die Kontrolle der Trainingseinheiten kann mittels Motion Capturing erfolgen. Erfolge und Misserfolge können im Detail anhand der erfassten Daten gemessen und analysiert werden. Der Artikel unter [Pau02b] beschreibt diesen Vorgang für den Golfsport.



Abbildung 2.2.: Motion Capturing in der Sportmedizin: Optimierung des Schwungs beim Golfspiel (aus [Mot04h])

2.2.3. Virtuelle Realität

Motion Capturing ist eine optimale Ergänzung für Anwendungen der virtuellen Realität. Dabei übernimmt das Motion Capturing die Aufgabe der Interaktion mit der virtuellen Welt. Statt mit Hilfsmitteln wie Joystick oder Space-Maus in der virtuellen Welt zu navigieren bzw. zu interagieren, kann der Akteur wie in der Realität seinen eigenen Körper (z.B. Hände zum Greifen, oder Zeigen; Beine zum Fortbewegen) einsetzen.

Die Bewegungsdaten, die von dem System erfasst werden, werden in die virtuelle Welt eingespeist, um dort Aktionen auszulösen oder einen Avatar (vgl. Glossar) zu steuern.

Eingesetzt wird virtuelle Realität für Simulationen in der Industrie [Int04b] und dort vor allem in der Autoindustrie [Int04d]. Auch das Militär benutzt Motion Capturing-Techniken für die Simulation seiner Einsätze [Int04c].

Insbesondere bei Anwendungen, welche die Realität mit der virtuellen Welt verbindet, wird Motion Capturing verwendet. Der Einsatz der Technik in dieser erweiterten Realität erfolgt wie bei der virtuellen Realität zur natürlicheren Interaktion mit der erweiterten Umgebung. Ein Beispiel hierzu ist das am Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V. entwickelte Medarpa-System [Zen04b].

2.2.4. Unterhaltung

Wie bereits am Anfang dieses Kapitels erwähnt wurde, ist der Unterhaltungsbereich das zur Zeit größte Einsatzgebiet von Motion Capturing. Dieses Gebiet lässt sich noch einmal in zwei Anwendungsbereiche unterteilen. Zum einen findet Motion Capturing Einsatz in Film und Fernsehen, zum anderen dient es zur Entwicklung von Computerspielen.

Da diese beiden Bereiche die Haupteinsatzgebiete von Motion Capturing darstellen, werden ihnen im Folgenden besondere Aufmerksamkeit geschenkt.



Abbildung 2.3.: Simulation in der Autoindustrie: Designstudie eines neuen Autos. Ein Akteur kann im virtuellen Fahrzeug Platz nehmen (aus [Int04d])

2.2.4.1. Film und Fernsehen

Autoren und Regisseure möchten dem Publikum immer spektakulärere Szenen bieten. Die Filme überbieten sich mit immer besseren Effekten oder atemberaubenderen Szenen. Um diese Szenen zu verwirklichen, arbeiten die Filmproduzenten immer häufiger mit Animationen. Die Kombination der Animation mit Motion Capturing bietet der Filmindustrie ein Menge neuer Möglichkeiten:

Bei gefährlichen Szenen wird der Darsteller durch einen virtuellen Charakter ersetzt. Der virtuelle Charakter wird dazu von einem Darsteller mittels Motion Capturing gesteuert. Damit die Szene möglichst natürlich wirkt, wird der virtuelle Charakter dem Aussehen des Darstellers möglichst detailgetreu angepasst.

Neben der Möglichkeit Akteure durch Motion Capturing gefährliche Szenen darstellen zu lassen, existiert noch ein weiterer Vorteil. Wie in der Einleitung beschrieben wurde, ist ein Grundgedanke des Motion Capturing die Trennung von Aussehen und Bewegung. Dies eröffnet die Möglichkeit, dass die Filmfigur Dinge machen kann, zu denen der Darsteller selbst nicht fähig ist. Statt der oft aufwendigen Dreharbeiten mit einem Double erfasst man mittels Motion Capturing dessen Bewegungen. Die Bewegungsdaten werden genutzt, um den virtuellen Charakter zu steuern.

Die gleiche Idee wird auch verwendet, um Fabelwesen zu steuern. Ein Akteur führt die Bewegungen durch. Die erfassten Bewegungsdaten steuern das virtuelle Fabelwesen (siehe Abbildung 2.4). Der Artikel [Bie04] beschreibt ebenfalls, wie mit Hilfe von Motion Capturing der Film *I, Robot* entstanden ist.

Wie in [Vic04a] berichtet wird, ist es mit Motion Capturing nicht nur möglich

2. Motion Capturing



Abbildung 2.4.: Motion Capturing in der Filmindustrie: Andy Serkis als Gollum im Motion Capture-Anzug (aus [Fre04])

einzelne Charaktere zu steuern. Für den Kinofilm *Troja* wurden die Steuerung vieler Charaktere realisiert. Mittels Motion Capturing wurde eine Sammlung von Bewegungen angelegt, die genutzt werden, um eine natürliche Bewegung der Charaktere zu realisieren.

Eine ganz neue Art Kinofilm ist ebenfalls erst durch die gerade beschriebene Technikkombination möglich, geworden. Mittels Einsatzes von Motion Capturing ist es möglich Filme komplett zu animieren. Dies war vorher nicht möglich, da die manuelle Bewegung der einzelnen Charaktere viel zu lange gedauert hätte.

Ein Film, der mit Hilfe von Motion Capturing animiert wurde, ist z.B. der Film *Final Fantasy*. In [Gru01] wird im Detail beschrieben, wie mittels Motion Capturing der Film produziert wurde.



Abbildung 2.5.: Virtuelle Darstellerin Aki Ross im Film Final Fantasy (aus [CIN04])

Ein weiterer wichtiger Aspekt die Tatsache, dass sich durch Motion Capturing enorme Kosten sparen lassen: Gefährliche Szenen oder Massenszenen werden durch Animationen ersetzt. Musste früher jedes einzelne Bild für eine Bewegung mit viel Zeitaufwand animiert werden, können jetzt die Bewegungen durch Motion Capturing realisiert werden.

2.2.4.2. Computerspiele

Auch für Computerspiele findet Motion Capturing immer mehr Verwendung, da der Markt nach immer realistischeren Spielen fragt.

In Spielen gibt es zwei Arten von Einsatzmöglichkeiten. Man unterscheidet zum einen Real-Time Playback (Echtzeit-Wiedergabe) und zum Anderen die sogenannten Cinematics [Met04d].

Bei der Echtzeitwiedergabe handelt es sich um Bewegungen die eine Spielfigur in Echtzeit ausführt. Dabei liegt es in der Hand des Spielers, welche Bewegung die Spielfigur ausführt. Die Bewegungsdaten wurden dazu vorher mittels Motion Capturing aufgezeichnet und in das Spiel aufgenommen. Ein Beispiel für diese Anwendungsart ist der spezielle Schuss eines Fußball-Spielers, der auf Wunsch durch die Spielfigur ausgeführt wird. Ziel ist es auch hier, die Bewegungen der Spielfigur so realistisch wie möglich zu gestalten. Die Abbildung 2.6 zeigt L. Matthäus bei Motion Capturing Aufnahmen für ein Computerspiel.

Diese Technik ist bereits soweit entwickelt, dass besonders bei Sportspielen eine ganze Mannschaft von Spielfiguren individuelle Bewegungen auf Spielerwunsch ausführt. Der betriebene Aufwand kennt dabei kaum Grenzen. Um einen möglichst realen Eindruck zu vermitteln, wird sogar darauf verzichtet, die Bewegungen der Spielfiguren in getrennten Sessions aufzuzeichnen. Statt dessen werden die Spielzüge kompletter Sportmannschaften mittels Motion Capturing in Bewegungsdaten umgesetzt [Swi04].



Abbildung 2.6.: L. Matthäus als Vorlage für einen virtuellen Fußballspieler (aus [RP 00])

Bei den Cinematics handelt es sich im wesentlichen um die filmischen Zwischenszenen eines Computerspiels. Diese sollen die Handlung des Spiels erzählen bzw. fortführen oder dem Spieler Hinweise zum Fortlauf des Spiels geben. Motion Capturing wird hier im Prinzip genauso wie in der Filmindustrie eingesetzt.

2.3. Geschichte

Die Geschichte des Motion Capturing lässt sich von heute bis ins späte 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Der Begriff des Motion Capturing entstand allerdings erst Mitte der 90er Jahre in den USA. Einen detaillierten geschichtlichen Überblick findet sich unter [Stu94] und [Rui03] sowie in der Präsentation unter [Win04].

2. Motion Capturing

Bereits in den späten Jahren des 19. Jahrhunderts haben erste wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema Bewegungsanalyse statt gefunden (vgl [Hip02]). Der Franzose Etienne Jules Marey entwickelte einen Motion Capturing-Anzug (siehe Abbildung 2.7). Mit einer Fotokamera und einer Folge von einzelnen Bildern konnte er die Bewegung der Gelenke verfolgen. Dazu entwickelte er spezielle Kameras [Aus00].

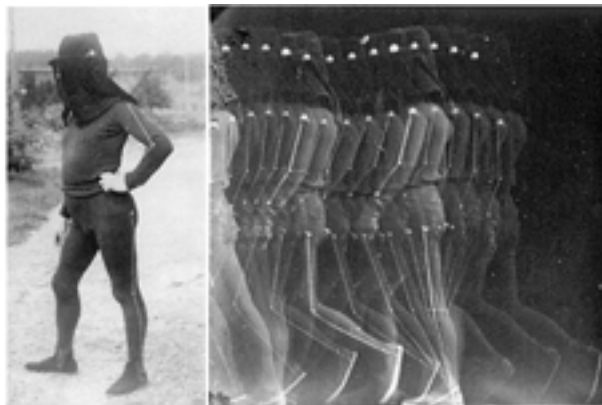


Abbildung 2.7.: Motion Capturing Suit von Marey (aus [Aus00])

Auch der Engländer Eadweard Muybridge befasste sich mit der Analyse von Bewegungen. Wie auch Marey nutzte er die Fototechnik, um die Bewegungen festzuhalten. Muybridge entwickelte spezielle Kameras zur Aufnahme von Reihen fotografieren und Serienaufnahmen. Seine Studien befassten sich mit dem Bewegungsablauf bei Menschen und Tieren (siehe Abbildung 2.8, vgl. [Chr04]).

Laut [Wik04c] gelten beide als Begründer der Hochgeschwindigkeitsfotografie. Besonders optische Motion Capturing-Systeme basieren auf der Grundlage dieser Technik zur Datenerfassung.



Abbildung 2.8.: Muybridges Fotoreihe *Animals in Motion* (aus [Mas04])

Laut [Hip02] wurden die Resultate der beiden Forscher sowohl für medizinische als auch militärische Zwecke verwendet.

In den frühen zwanziger Jahren entdeckte die Filmindustrie die Vorarbeiten von Marey und Muybridge für sich. In Hollywood wurde bei Walt Disney die Technik für animierte

2. Motion Capturing

Charaktere in Trickfilmen verwendet, um den Eindruck der menschlichen Bewegungen zu verbessern.

Bei dem Disney Klassiker „Schneewittchen“ bediente man sich der Technik des Rotoscoping. Bei diesem Verfahren wurden echte Schauspieler dabei gefilmt, wie sie die Szenen der Zeichentrickfiguren spielen. Danach wurden die Positionen von Kopf, Körper, Armen und Beinen, Bild für Bild auf die Zeichentrickfiguren übertragen. Die Schauspieler gaben den Figuren also lediglich die Bewegung, während die Animation auf traditionelle Weise gezeichnet wurde [Hip02]. Obwohl dieses Verfahren sehr zeitaufwendig ist, hat es doch geholfen, die gemalten Figuren realistischer wirken zu lassen.

Eine weitere Verbesserung der Filmtechnik gelang in den 70er Jahren, als es möglich wurde, Zeichentrickfilme mittels Computer zu animieren. Trotzdem wurde auch hier noch das Rotoscoping verwendet. Mittels Spiegel wurden z.B. Filmsequenzen von Tänzern über den Computerbildschirm gelegt, um einen animierten Tänzer darzustellen. Der Computer konnte mittels einiger vom Operator angegebener Positionen eine annähernd menschliche Bewegungen erzeugen [Stu94].

Die Angaben von Schlüsselpositionen, um daraus eine Bewegung zu erzeugen, nennt man Keyframing.

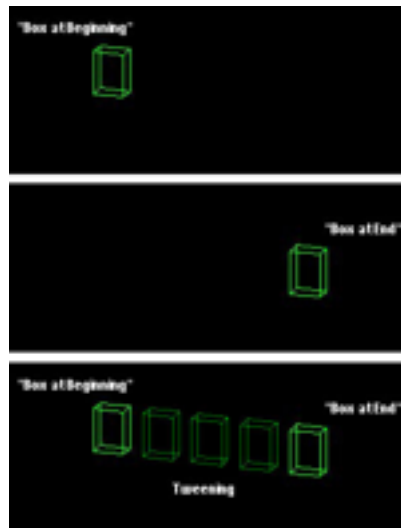


Abbildung 2.9.: Schema Keyframing - Das oberste Bild zeigt die Ausgangs- und die Endposition. Die berechneten Zwischenschritte sind im dritten Bild zu sehen. (aus [Mar97])

Ab 1980 interessierten sich Biomechaniker an der Simon Fraser Universität in Burnaby, Kanada für Motion Capturing, um choreographische bzw. medizinische Studien an computeranimierten Figuren durchzuführen [Stu94].

Die Animation der Figuren erreichten sie, indem sie den zu testenden Personen eine Art zusätzliches Skelett anlegten. An die Gelenke dieses Exoskeletts wurden Potentiometer zur Messung der Gelenkrotationen angebracht. 1982/83 entstanden so die ersten kommerziellen optischen Motion Capturing-Systeme.

2. Motion Capturing

Weitere Meilensteine sind z.B. 1988 *Mike the Talking Head*. Dem animierten Gesicht war es möglich die verschiedenen Gesichtszüge einer Person zu imitieren. Diese wurden dazu mechanisch vom Gesicht der echten Person abgetastet [Per03a]. Eine detaillierte Beschreibung der geschichtlichen Meilensteine findet sich in [Stu94].



Abbildung 2.10.: Mike The Talking Head (aus [Per03a])

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Motion Capturing-Systeme schreitet kontinuierlich voran. 1993 beeindruckte die Firma Acclaim die Öffentlichkeit mit einem optischen Motion Capturing-System, das erstmals in der Lage war, zwei Akteure gleichzeitig aufzunehmen. Das System entspricht im Wesentlichen den heute verwendeten Systemen [Tra94].

2.4. Prinzipielle Funktionsweise von Motion Capturing-Systemen

Um Motion Capturing zu ermöglichen, müssen die Bewegungen des Akteurs erfasst werden. Doch wie kann man Bewegung erfassen? Bei der Bewegung eines Menschen werden Knochen und Gelenke bewegt. Bestimmt man die Position aller Gelenke zu einem Zeitpunkt, so ist es möglich, die momentane Körperhaltung des Akteurs zu erfassen. Möglich ist dies allerdings nur, wenn die geometrischen Beziehungen der Gelenke untereinander bekannt ist. Ohne diese Information handelt es sich nur um eine Punktwolke im Raum. Eine Beziehung der erfassten Positionen gibt das menschliche Skelett vor. Das Skelett ordnet die Gelenke in eine Hierarchie ein. Richtet man ein Skelett entsprechend der erfassten Positionsdaten aus, dann kann die Körperhaltung des Akteurs exakt nachgebildet werden.

Bei Motion Capturing geht es allerdings nicht nur um die aktuelle Körperhaltung. Vielmehr geht es um die Bewegung des Akteurs. Wiederholt man die Erfassung der Körperposition oft genug in kurzen, gleichmäßigen Abständen, so entsteht wie bei einem Film der Eindruck der Bewegung.

Motion Capturing-Systeme lassen sich grob in zwei Komponenten unterteilen: Eine Komponente erfasst die nötigen Positionen im Raum. Diese Komponente bezeichnet man als Tracking-System. Die zweite Komponente nimmt eine Zuordnung der Positionsdaten zu den jeweiligen Skelett-Gelenken vor. Je nach Art des Tracking-Systems ist die Zuordnung der Positionsdaten zur Skelett-Information mehr oder weniger aufwendig.

2. Motion Capturing

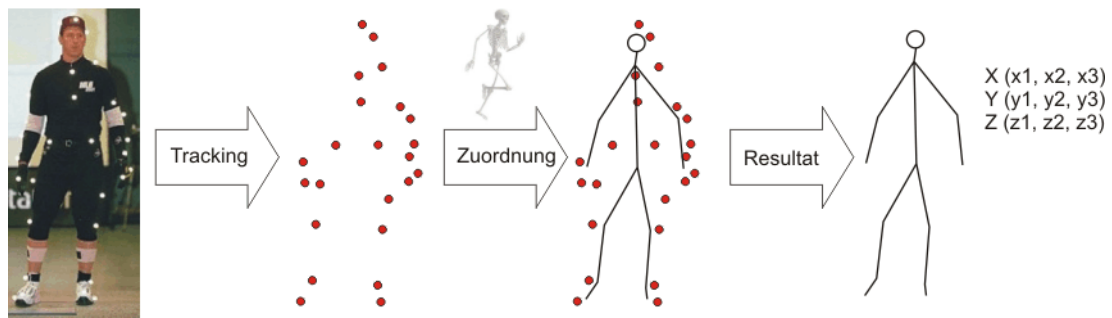


Abbildung 2.11.: Prinzipielle Funktionsweise von Motion Capturing: Erst werden Positionen erfasst. Danach werden die Positionen einem Skelett zugeordnet. Das Ergebnis ist die Information bezüglich der Gelenke

Die Ausgabe eines Motion Capturing-Systems ist damit eine Folge von Positionsangaben für die jeweiligen Gelenke des Skeletts.

Wie in [Phi99] festgestellt wird, handelt es sich also bei Motion Capturing-Systemen um eine Art Bewegungsrekorder.

3. Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet des Motion Capturing. Bevor einzelne Systeme vorgestellt werden, wird eine Möglichkeit zur Einteilung der Systeme vorgestellt. Es folgt eine Übersicht über den Markt kommerzieller Motion Capturing-Systeme und zugehöriger Software- und Dienstleistungsanbieter. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Einblick in aktuelle Forschungen im Bereich des Motion Capturing.

3.1. Tracking-Systeme

Tracking-Systeme sind eine der Hauptkomponenten von Motion Capturing-Systemen. Sie liefern die Positionsdaten, die benötigt werden, um Bewegungsdaten zu ermitteln. Die unterschiedlichen Tracking-Systeme arbeiten mit verschiedenen Sensoren bzw. Emittern um eine Positionsbestimmung vornehmen zu können. Wie bereits beschrieben, ermittelt erst eine nachgeschaltete Komponente des Motion Capturing-Systems die eigentlich gesuchten Gelenkpositionen.

Um Positionen eines Objekts bestimmen zu können, benötigt man ein Koordinatensystem als Referenz. Die Erfassung der gesuchten Positionsangaben erfolgt über eine Messung des Abstands der Sensoren zum Ursprung des Weltkoordinatensystem (Referenzpunkt). Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Positionsangabe für jeden Sensor bzw. Emitter des Tracking-Systems.

3.1.1. Unterscheidung der Systeme

Je nach Definition des Weltkoordinatensystems und der Sensoren bzw. Emitter können Tracking-Systeme nach [Mul94] in drei verschiedene Klassen unterteilt werden. Dabei dient als Unterscheidungskriterium, ob sich Weltkoordinatensystem und Sensoren bzw. Emitter am Akteur selbst befinden, oder ob eine getrennte Anordnung vorliegt:

Inside-In-Systeme: Sowohl Sensoren und Emitter sind am Akteur befestigt. Auch die Referenz zur Positionsbestimmung befindet sich am Akteur. Solche Tracking-Systeme werden eingesetzt, um feinkörnige Bewegungen von einzelnen Körperteilen aufzunehmen. Sensoren und Emitter sind meist sehr klein und lassen sich gut überall anbringen, ohne den Akteur bei seinen Bewegungen zu behindern. Da sowohl Sensoren bzw. Emitter und Referenzpunkt sich am Akteur befinden, ist es nicht möglich, eine Positionsangabe bezüglich der Umwelt anzugeben. Eine Aussage zur Position kann lediglich in lokalen Koordinaten gemacht werden. Ein Beispiel für ein solches System ist der Datenhandschuh (siehe Abbildung 3.1).

3. Stand der Technik



Abbildung 3.1.: Datenhandschuh als Beispiel für ein Inside-In Tracking-System (aus [Fif02])

Anmerkung: Inside-In-Systeme werden selten für Ganzkörper-Motion Capturing eingesetzt. Häufiger werden sie mit anderen Systemen kombiniert, um die Bewegungen z.B. der Finger einer Hand detailliert zu erfassen.

Inside-Out-Systeme : Bei Inside-Out-Systemen werden die Sensoren am Akteur angebracht und Emitter in dessen Umgebung fest montiert. Der Referenzpunkt befindet sich wie die Emitter an einem Punkt in der Umgebung des Akteurs. Bei den Emitttern kann es sich um natürliche Quellen (z.B. das Erdmagnetfeld oder der Horizont) oder auch künstliche Quellen wie eine Lichtschranke oder ein Magnetfeldgenerator handeln. Da die absolute Position der Emitter und des Referenzpunkts bekannt sind, lässt sich mit Hilfe der Inside-Out-Systeme die Position bezüglich der Umwelt bestimmen. Im Falle des Erdmagnetfeldes kann sogar eine globale Position ermittelt werden. Nachteile dieser Systeme sind neben der größeren Bauform auch die Anbindung der Sensoren per Kabel zum verarbeitenden Computersystem. Abbildung 3.2 zeigt den schematischen Aufbau eines Inside-Out-Systems.

Magnetische Tracking-Systeme arbeiten nach diesem Prinzip.

Outside-In-Systeme : Bei der dritten Variante, den Outside-In-Systemen werden die Sensoren in der Umgebung angebracht. Diese tasten die Bewegung der Emitter ab, die am Akteur angebracht sind. Auch dieses Verfahren liefert Positionsdaten relativ zur Umgebung, da der Referenzpunkt in der Umgebung des Akteurs ist. Ein Vorteil liegt darin, dass man kleine Emitter am Körper des Akteurs befestigen kann. Ein Nachteil ist allerdings, dass eine Verdeckung der Emitter gegenüber den Sensoren sich negativ auf die Qualität der aufgenommenen Bewegungsdaten auswirkt. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

Optische und akustische Systeme verwenden meist dieses Funktionsprinzip.

Ein anderes Kriterium zur Unterscheidung der Tracking-Systeme ist Art und Weise, wie diese Systeme die Positionsdaten erfassen. Die wichtigsten Systeme basieren auf folgenden physikalischen Merkmalen: Mechanische, magnetische und optische Erfassung der

3. Stand der Technik

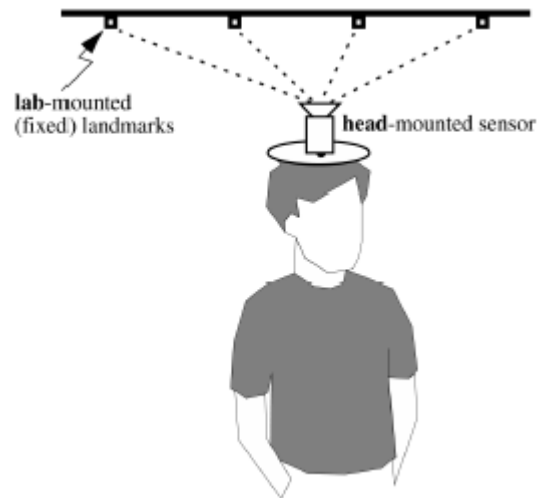


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung eines Inside-Out-Systems (aus [WBV⁺01])

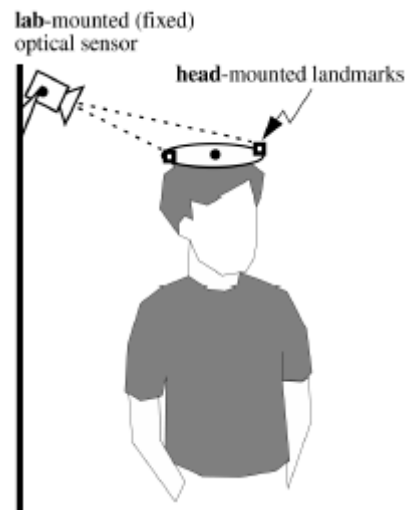


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung eines Outside-In-Systems (aus [WBV⁺01])

Positionsdaten. Zusätzlich existieren noch weitere Methoden, die hier nur kurz erwähnt werden. Dazu zählen akustische und funkbasierte Systeme, Systeme mit Biegesensoren oder auch Hybridsysteme. Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Systeme ist in [DMZ95], [Fur99] und [Tra94] zu finden.

3.1.2. Mechanische Tracking-Systeme

3.1.2.1. Aufbau und Funktionsweise

Mechanische Tracking-Systeme sind die einfachsten Systeme, um Bewegungs- bzw. Positionsdaten zu erfassen. Dabei wird der Körper oder nur ein Teil davon mit einem künstlichen starren Skelett umgeben. Da das Skelett den Akteur von außen umfasst, wird es als **Exoskelett** bezeichnet. Das Skelett ist eine Konstruktion aus starren Segmenten, die mit beweglichen Elementen verbunden sind. Die Verbindungsstangen und die Gelenke lassen sich so bewegen, dass sie die Bewegung des Akteurs so wenig wie möglich beeinflussen. Bewegt sich nun der Akteur, so wird das künstliche Skelett ebenfalls bewegt.

Die Gelenke des Exosketts sind mit elektrischen Sensoren (Potentiometern) ausgerüstet. Diese Potentiometer wandeln die Bewegung in den Gelenken in elektrische Signale um. Da die mechanischen Gelenke des Exosketts so angeordnet sind, dass sie den echten Gelenken des Akteurs entsprechen, lässt sich mit Hilfe der elektrischen Signale die Stellung der Gelenke berechnen. Da auch die Länge der einzelnen Skelettsegmente und damit auch die relative Position der Gelenke zueinander bekannt ist, ist es möglich die Körperhaltung des Exosketts und annähernd auch die des Akteurs zu bestimmen. Die Berechnung der Gelenkpositionen aus den elektrischen Signalen der Potentiometer ist mit einigem Aufwand verbunden. Um die Daten der Sensoren verarbeiten zu können, ist das Exoskelett über einen Kabelbaum mit einem Computersystem verbunden.

Damit eine möglichst genaue Aufzeichnung der Bewegungen erfolgt, muss das Skelett dem Körper des Akteurs anpassbar sein. Trotzdem muss es möglichst ergonomisch geformt sein, damit der Akteur nicht bei seinen Bewegungen eingeschränkt wird. Bei dem Exoskelett handelt es sich entweder um eine Spezialanfertigung für den jeweiligen Akteur oder um eine verstellbare Variante.

Um das System zu kalibrieren, müssen die starren Segmente vermessen werden. Zusätzlich muss der Abstand der Potentiometer zu den Gelenken ermittelt werden.

Da mechanische Systeme nach dem Inside-In-Prinzip arbeiten, muss man auf die Verfügbarkeit von globalen Positionsangaben verzichten. Um doch Informationen bezüglich eines ausserhalb definierten Referenzpunktes zu erhalten, gibt es die Möglichkeit, das Exoskelett mit einem Referenzpunkt zu verbinden. Die Verbindung erfolgt mit einem beweglichen mechanischen Arm, an dessen Gelenken ebenfalls Potentiometer angebracht sind. Solch eine Lösung behindert allerdings den Akteur in seinen Bewegungen. Auch der mögliche Aktionsbereich wird durch eine solche Lösung eingeschränkt.

Eine weitaus komfortablere Lösung ist die Zuhilfenahme eines Gyroskops. Befestigt man solch ein Gerät am Schwerpunkt des Körpers, so lässt sich eine Positionsänderung des Skeletts im Raum bestimmen. Mit Hilfe einer solchen Navigationshilfe ist zumindest

3. Stand der Technik

eine Positionsangabe bezüglich des Ausgangspunktes möglich.

Will man die Bewegungen mehr als einer Person aufzeichnen, steigt der Aufwand immens. Jeder Akteur benötigt einen ihm angepasstes Exoskelett und eine Kabelverbindung zum aufzeichnenden Computer.



Abbildung 3.4.: Akteur mit mechanischem Exoskelett in gestreckter Pose (aus [Met04b])

3.1.2.2. Mechanische digitale Armaturen

Digitale Armaturen sind eine besondere Ausführung der mechanischen Tracking-Systeme. Statt eines Exoskeletts, dass von einem Akteur getragen wird, handelt es sich um eine Art selbsttragendes Skelett. Wie bei einem Exoskelett werden auch bei digitalen Armaturen die Bewegungsdaten mittels Potentiometer erfasst. Allerdings trägt niemand das Skelett, sondern die Armatur wird von außen in die gewünschte Position gebracht. In Abbildung 3.5 ist eine digitale Armatur der Firma Digital Image Design zu sehen.

Da das Skelett einer digitalen Armatur modular ist, kann es nicht nur menschliche Bewegungsdaten liefern. Wird das Skelett umgebaut, so können auch die Bewegungen von Tieren oder auch von Fabelwesen dargestellt werden.

Das System ist sehr flexibel und wird häufig in der Filmproduktion verwendet. Die verfügbaren Armaturen lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Es gibt *Stop-Motion-Armaturen* und *Echtzeitarmaturen*.

Stop-Motion-Armaturen: Bei diesen Armaturen wird das Skelett in die gewünschte Position gebracht und danach die Position und Ausrichtung der Gelenke bestimmt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis eine komplette Bewegung entsteht. Dieses Verfahren ist vergleichbar mit der Technik von traditionellen Zeichentrickfilmen. Jedes Bild stellt eine Pose der Figur da. Erst die schnelle Abfolge der Bilder



Abbildung 3.5.: Mechanische Armatur in menschenähnlicher Gestalt (aus [Dig04a])

realisiert eine Bewegung. Wie auch bei Zeichentrickfilmen ist die Arbeit mit dieser Art der Armaturen sehr zeitaufwendig.

Echtzeitarmaturen: Diese Systeme arbeiten nach dem Puppenspielerprinzip. Wie bei den Stop-Motion-Armaturen wird das Skelett in die jeweilige Pose gebracht. Allerdings wird hier nicht Bild für Bild einzeln bearbeitet, sondern die Daten werden kontinuierlich aufgezeichnet. Die Steuerung der einzelnen Gelenke stellt sich dabei als äußerst schwierig da. Meist werden mehrere Akteure benötigt, die mit Hilfe von Steuerknüppeln den gewünschten Bewegungsablauf erzeugen.

3.1.2.3. Vor- und Nachteile

Grundlagen der folgenden Bewertungen von mechanischen Systemen, sind die Ausführungen in [DMZ95] und [Ulb01].

- + Sehr akkurate Daten durch hohe Abtastrate und genaue Sensoren
- + Kein Verdecken der Sensoren
- + Unabhängig von der Umgebung
- + Kostengünstig (bei verstellbaren Systemen)
- + Datenaufzeichnung mehrerer Akteure ohne viel Aufwand möglich

- Einschränkung der Bewegungsfreiheit
- Gewicht des Skeletts
- Aktionsradius begrenzt (mechanischer Arm)
- Keine freie Wahl der Gelenke
- Kaum Systeme für Objekttracking verfügbar

3.1.3. Magnetische Tracking-Systeme

3.1.3.1. Aufbau und Funktionsweise

Magnetische Motion Tracking-Systeme sind Inside-Out-Systeme. Sie beruhen auf der Tatsache, dass ein Sensor seine räumliche Ausrichtung gegenüber einem magnetischen Feld ermitteln kann. Dabei besteht der Sensor eigentlich aus drei einzelnen Empfängern. Diese sind orthogonal gegeneinander ausgerichtet und ermöglichen eine dreidimensionale Positionsbestimmung im Raum. Der fest installierte Magnetfeldgenerator wird hierfür als Referenzpunkt verwendet. Alternativ können statt dreigeteilten Sensoren auch einfache Sensoren verwendet werden. Allerdings muss dann der Magnetfeldgenerator in der Lage sein, nacheinander drei orthogonal ausgerichtete Magnetfelder zu erzeugen. Durch drei aufeinanderfolgende Messungen ist es so ebenfalls möglich, eine Position zu bestimmen. Zusätzlicher Aufwand entsteht bei diesem Verfahren dadurch, dass Sensoren und Magnetfeldgenerator synchronisiert werden müssen.

Wie auch bei den mechanischen Systemen werden die Sensoren an Gelenken und zusätzlich an wichtigen Körperstellen angebracht. Die Kalibrierung magnetischer Tracking-Systeme erfolgt ebenfalls durch eine Vermessung des Akteurs sowie einer festen Zuordnung der Sensoren zu den entsprechenden Gelenken.

Zwar schränkt diese Methode die Bewegung des Akteurs nicht besonders ein, doch es fällt eine große Menge an Information in den Sensoren an. Um diese Information zu verarbeiten, sind magnetische Tracking-Systeme meist per Kabel mit einer Rechenanlage verbunden. Dies verkleinert den möglichen Aktionsbereich. Abbildung 3.6 zeigt einen Akteur mit kabelgebundenen Sensoren.

Im Gegensatz zu mechanischen Systemen sind magnetische Systeme keinesfalls frei von Umwelteinflüssen. Stahlträger, wie sie sich oft in Betondecken oder Wänden befinden, oder andere magnetische Gegenstände verändern das erzeugte magnetische Feld. Dies kann die Ergebnisse der Positionsbestimmung negativ beeinflussen. Aus diesem Grund werden für magnetische Tracking-Systeme oft spezielle Umgebungen geschaffen. Dort ist sichergestellt, dass störende Materialien weitestgehend durch Holz- oder Plastikbauteile ersetzt wurden.

3.1.3.2. Vor- und Nachteile

Auch Magnetische Tracking-Systeme haben Vor- und Nachteile. Die folgende Zusammenstellung basiert auf den Aussagen in [DMZ95], [Fox02] und [Hor02].

- + Relativ hohe Genauigkeit
- + Hohe Abtastrate
- + Tracking von mehreren Akteuren und Objekten möglich
- + Keine Verdeckungsprobleme
- + Bewegungsfreiheit kaum eingeschränkt
- + Relative geringe Kosten im Vergleich zu optischen Systemen

- Teurer als mechanische Systeme
- Kabel zur Rechenanlage verkleinert den Aktionsbereich



Abbildung 3.6.: Akteur mit magnetischem kabelgebundenen Tracking-System (aus [Bod02])

- Störung durch Umwelteinflüsse
- Verzicht auf Daten bei Funkübertragung

3.1.4. Optische Tracking-Systeme

Der folgende Abschnitt befasst sich mit optischen Tracking-Systemen. Da im Rahmen dieser Arbeit ein optisches Tracking-System zur Positionsbestimmung verwendet wird, werden die optischen Systeme ausführlicher beschrieben.

3.1.4.1. Aufbau

Optische Tracking-Systeme sind Outside-In-Systeme. Der Referenzpunkt sowie die Sensoren befinden sich in der Umgebung des Akteurs. Die Emitter sind am Akteur befestigt.

Bei den Sensoren handelt es sich um Kameras. Es werden mindestens zwei Kameras benötigt. Kommerzielle Systeme arbeiten mit 20 oder mehr Kameras. Die Kameras werden so ausgerichtet, dass sie den Aktionsbereich von verschiedenen Perspektiven aus erfassen. Abbildung 3.7 zeigt die schematische Darstellung eines Systems mit acht Kameras. Durch die Anzahl der Kameras wird der Aktionsbereich für den Akteur festgelegt. Je mehr Kameras eingesetzt werden, desto größer ist der mögliche Aktionsbereich.

Die Emitter nennt man bei optischen Systemen Marker. Sie senden Lichtsignale aus, die in den Bildern der Kameras als Markierungen sichtbar werden. Bei den Lichtsignalen

3. Stand der Technik

handelt es sich allerdings oft nicht um sichtbares Licht, sondern um Licht im infraroten Spektrum. Die Kameras sind deshalb mit speziellen Filtern versehen.

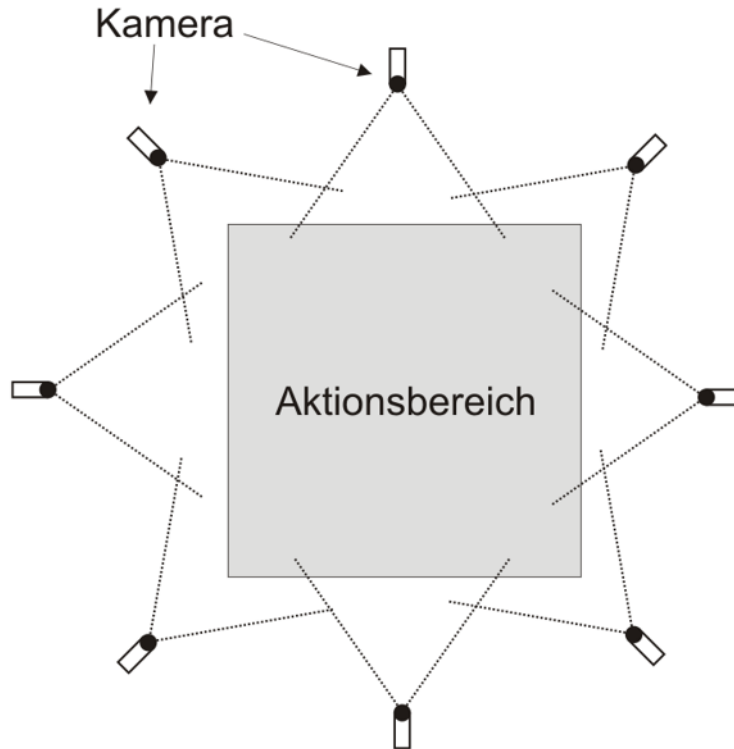


Abbildung 3.7.: Schematische Darstellung eines optischen Tracking-Systems mit acht Kameras in der Aufsicht

Um die Marker besser am Akteur befestigen zu können, tragen die Akteure einen speziellen Anzug. Dieser liegt sehr eng an, damit die Marker dicht an wichtigen Körperpunkten oder Gelenken befestigt werden können. Zusätzlich verhindert das enge Anliegen des Anzuges die Entstehung von Kleiderfalten. Dies ist wichtig, da die Falten die Marker verdecken könnten. Sollen besonders akkurate Bewegungsdaten erfasst werden, verwendet man für die Anzüge Spezialanfertigungen. Bei diesen Spezialanfertigungen ist es möglich, die Marker fest mit dem Anzug zu verbinden. Dies vereinfacht die Kalibrierung des Systems, da nicht vor jeder Session der Akteur neu vermessen werden muss. Bei preisgünstigen optischen Systemen wird auf die Verwendung eines solchen Anzuges verzichtet. Stattdessen werden die Marker z.B. mit Klettbindern befestigt. Die Abbildung 3.8 zeigt einen Akteur in einem Motion Capturing-Anzug.

Bei optischen Systemen kann man prinzipiell zwei verschiedene Typen unterscheiden. Als Unterscheidungsmerkmal dient die Art der verwendeten Marker: Man unterscheidet Systeme mit aktiven und Systeme mit passiven Markern. Im kommerziellen Einsatz finden sich vor allem die passiven Systeme, da sie die Bewegungsfreiheit der Akteure am wenigsten einschränken.

3. Stand der Technik



Abbildung 3.8.: Akteur mit einem markerbestückten Motion Capturing-Anzug (aus [Tei03])

3.1.4.2. Passive optische Systeme

Bei den passiven Systemen sind die Marker keine Emittter. Stattdessen reflektieren sie lediglich die Lichtsignale. Die Oberfläche der Marker ist so beschaffen, dass einfallendes Licht wieder zu dessen Ausgangspunkt zurückgeworfen wird. In Abbildung 3.9 ist eine Sammlung passiver Marker zu sehen.



Abbildung 3.9.: Passive Marker (aus [Uni04])

Damit die Marker in den Kameras zu sehen sind, werden Infrarotstrahler eingesetzt. Um in jedem Kamerabild die Markierung zu erfassen, wird aufgrund der besonderen Reflektionseigenschaften der Marker ein Strahler neben jeder Kamera aufgestellt. Sind

3. Stand der Technik

die Marker nicht verdeckt, reflektieren sie das Licht des Strahlers in die entsprechende Kamera. Dabei ist das Ergebnis umso besser, je dichter Infrarotstrahler und Kamera besammen montiert sind. Einige kommerzielle Hersteller haben Kameras und Strahler kombiniert, um ein optimales Resultat zu gewährleisten. Abbildung 3.10 zeigt eine solche Kombination.



Abbildung 3.10.: Kamera mit leuchtendem LED-Kranz (aus [Uni04])

Abschließend ist in Bild 3.11 ein Aufbau eines passiven optischen Motion Capturing-Systems dargestellt. Das dargestellte System ist in der Lage, die Bewegungen mehrerer Akteure zu erfassen.

3.1.4.3. Aktive optische Systeme

Im Gegensatz zu den passiven Markern senden aktive Marker selbst Lichtsignale aus. Aktive Marker sind mit LEDs oder anderen Lichtquellen ausgestattet, die infrarotes Licht aussenden. Optische Marker haben oft das Problem, dass der Abstrahlwinkel des ausgesendeten Lichts nicht optimal ist. Daher kann die Situation eintreten, dass der Marker zwar im Blickwinkel der Kamera liegt, aber kein Lichtsignal in die entsprechende Kamera gesendet wird. Dafür haben aktive Systeme für das Tracking-System unterscheidbare Marker. Dazu sendet jeder Marker ein eigenes Blitzmuster aus. Gegenüber passiven Systemen benötigen diese Systeme dann allerdings einen Synchronisationsmechanismus.

In Bild 3.12 ist ein aktiver Marker abgebildet, wie er am Zentrum für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt eingesetzt wird. Im Gegensatz zu den passiven Markern, sind aktive Marker größer und benötigen eine Stromversorgung.

3.1.4.4. Funktionsweise

Befindet sich der Akteur innerhalb des Aktionsbereichs, so können die Kameras die Marker des Anzugs erfassen. Um eine Positionsbestimmung der einzelnen Marker durchführen zu können, muss das Tracking-Systeme folgende Schritte durchführen:

Verwendet das System keine digitalen Kameras, so müssen die Bilder digitalisiert werden. Zur Digitalisierung wird ein so genannter Frame-Grabber verwendet. Neben der Digitalisierung kümmert sich der Frame-Grabber auch um eine Synchronisation

3. Stand der Technik



Abbildung 3.11.: Passives optisches Motion Capturing-System: Um den Aktionsbereich sind Kombinationen von Kamera-Strahlern aufgestellt, die beiden Akteure tragen reflektierende Marker (aus [Tei03])

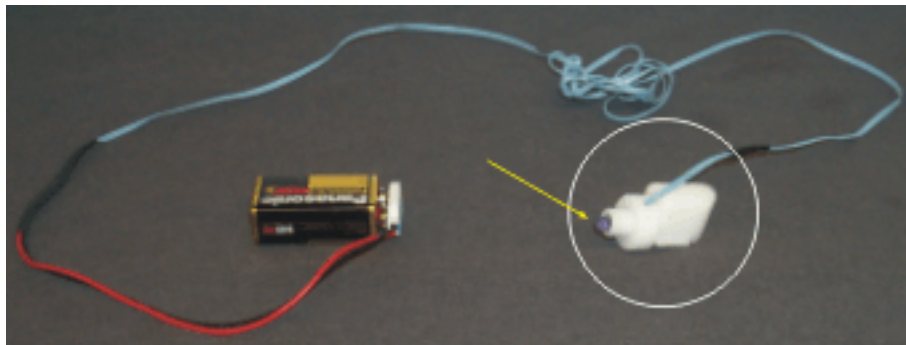


Abbildung 3.12.: Aktiver Marker: Links ist die benötigte Stromversorgung zu sehen; im Kreis ist der Marker dargestellt; an der Spitze des Markers ist die Lichtquelle zu sehen (Pfeil)

3. Stand der Technik

der einzelnen Bilder. Er garantiert, dass die Bilder den identischen Zeitpunkt aus den unterschiedlichen Kameraperspektiven zeigen.

Liegen die einzelnen Bilder der Kameras in digitaler Form vor, müssen die zweidimensionalen Positionen der Marker in den einzelnen Bildern ermittelt werden. Da die Kameras nur infrarotes Licht aufnehmen, sind auf den Bildern im Idealfall nur die Marker zu sehen.

Nachdem zweidimensionale Koordinaten jedes Markers in mindestens zwei Kamerabildern segmentiert wurden, kann eine dreidimensionale Position jedes dieser Marker rekonstruiert werden. Die Rekonstruktion der Position geschieht mit Hilfe der *Epipolargeometrie*. Damit eine Rekonstruktion einer dreidimensionalen Markerposition möglich ist, muss der jeweilige Marker mindestens in den Bildern zweier verschiedener Kameras zu sehen sein. Ist er in mehr als zwei Bildern sichtbar, kann die zusätzliche Information zu Qualitätsverbesserung verwendet werden.

Die dreidimensionalen Positionsdaten werden vom Motion Capturing-System zu Bewegungsdaten weiterverarbeitet. Diese Arbeit wird vereinfacht, wenn aktive Marker mit der Möglichkeit der Markerunterscheidung genutzt wird. Vor allem die Zuordnung der einzelnen Marker ist ein sehr aufwendiger Prozess.

3.1.4.5. Vor- bzw. Nachteile

Grundlage der nachfolgenden Bewertungen sind die Ausführungen in [DMZ95], [Ul01] und [Hor02]:

- + Große Bewegungsfreiheit
- + Großer Aktionsbereich
- + Marker frei konfigurierbar
- + Tracking von Objekten möglich
- + Kalibrierung sehr einfach
- + Schnell einsetzbar

- Verdeckung von Markern
- Falscherkennung möglich
- Keine Zuordnung der Marker
- Nicht Echtzeitfähig
- Teuer (Kameras; leistungsstarke Computer)
- Empfindlich gegenüber Reflexionen
- Empfindlich gegenüber Erschütterungen der Kameras

3.1.5. Akustische Systeme

3.1.5.1. Aufbau und Funktionsweise

Bei akustischen Systemen wird mit Ultraschall gearbeitet. Dem Akteur werden bei diesem Verfahren entweder kleine Mikrofone (Sensoren) oder spezielle Lautsprecher (Emitter) angelegt. Es ist also möglich, entweder ein Outside-In- oder ein Inside-Out-System zu realisieren. Da allerdings zur Bestimmung der Position im Raum drei Sensoren notwendig sind, ist ein Inside-Out-System schwieriger zu realisieren. Eingesetzt werden meist Systeme, deren Sensoren in der Umgebung verteilt sind und deren Emitter am Akteur angebracht werden (Inside-Out-Systeme).

Das Verfahren basiert auf dem Prinzip der Abstandsmessung durch die Laufzeitverzögerung des akustischen Signals. Dies wird als *time of flight* bezeichnet. Jeder Sender erzeugt in regelmäßigen Abständen ein Signal, welches von den Sensoren empfangen wird. Aus den unterschiedlichen Laufzeiten des Signals zwischen dem Emitter und den Sensoren kann die Position bestimmt werden. Da so allerdings jeweils nur die Position eines Emitters zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden kann, müssen alle Emitter nach einer zeitlich festgelegten Reihenfolge senden. Schwierigkeiten bestehen hierbei natürlich in der Sequenzierung der einzelnen Emitter untereinander bzw. mit der Synchronisation von Emitter und Sensoren.

Da die akustischen Signale eine gewisse Zeit brauchen, um die Strecke von Emitter zu Sensor zu überwinden, ist es mit dieser Methode nicht möglich eine Momentaufnahme von allen Punkten aufzunehmen. Das System liefert zeitversetzte Positionsbestimmungen. Begrenzt man allerdings den Bewegungsraum des Akteurs, ist dieses Problem vernachlässigbar.

Abhilfe für dieses Problem schafft die so genannte *Phase Coherence-Methode*. Hierbei senden die Emitter ständig eine bestimmte Frequenz aus. Durch die Laufzeit des Signals wird die Wellenlänge des Signals verändert. Durch die Veränderung des Signals lassen sich relative Abstandsänderungen errechnen. Die gewünschte absolute Position kann man mit dieser Methode nur erhalten, wenn man eine absolute Anfangsposition kennt und diese mit den relativen Positionsänderungen kombiniert.

Ein prinzipielles Problem der Phase Coherence-Methode besteht in der maximal möglichen Abstandsänderung pro Messzyklus. Bewegt sich ein Sender pro Messung um mehr als die halbe Wellenlänge des Signals, so ist eine eindeutige Positionsbestimmung nicht mehr möglich. Die Abbildung 3.13 zeigt, dass es zwei gültige Lösungen gibt [Hip02].

Ein Problem beider Methoden ist das so genannte Multipfad-Problem. Es kann bei beiden Methoden nicht garantiert werden, dass das akustische Signal durch Reflexion an Hindernissen oder Seitenwänden die Messung verzögert bzw. die akustische Welle verändert. Dies führt zu Messfehlern, die sich nur schwer erkennen bzw. beseitigen lassen [Fox02].

Besonders zu erwähnen ist hier, dass ein solches System für durchaus ungewöhnliche Umgebungen verwendet werden kann; z.B. ist eine Nutzung unter Wasser möglich.

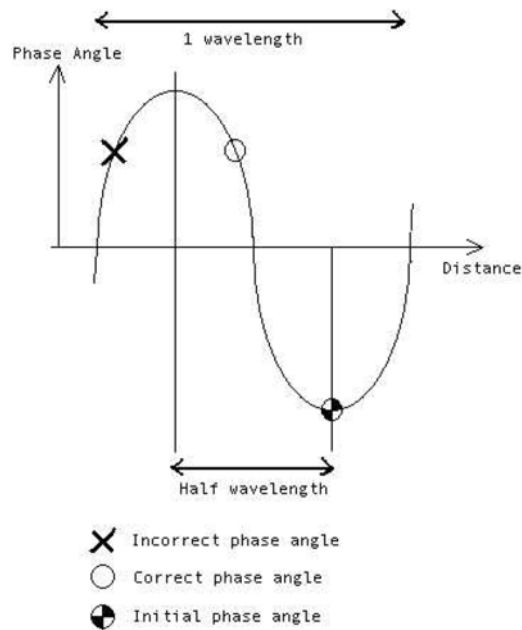


Abbildung 3.13.: Problematik der Coherence-Methode: Es gibt rechnerisch zwei gültige Lösungen. Nur der rechte Wert ist richtig (aus [Hip02])

3.1.5.2. Vor- und Nachteile

Die hier genannten Vor- und Nachteile dieser Systeme basieren auf den Darstellungen aus [Fox02] und [DMZ95].

- + Keine Verdeckung
- + Kaum Einschränkung der Bewegungsfreiheit
- + Preiswert
- Störanfällig gegenüber Geräuschen
- Probleme durch Schallreflexion
- Keine echte Momentaufnahme

3.1.6. Funk-Systeme

Dieses Verfahren zur Aufnahme der Positionsdaten entspricht im Prinzip dem der akustischen Positionsbestimmung. Statt der Laufzeit des akustischen Signals wird die Laufzeit eines Funksignals gemessen.

Beide Systeme teilen sich dadurch auch ihre Vor- und Nachteile. Statt der akustischen Störgeräusche gehen Störungen nun von Geräten aus, die ebenfalls elektrische Felder erzeugen, wie zum Beispiel Funktelefone.

3.1.7. Biegesensor-Systeme

3.1.7.1. Aufbau und Funktionsweise

Bei dieser Form der Tracking-Systeme handelt es sich um eine den mechanischen Tracking-Systemen verwandte Art. Körper und Extremitäten des Akteurs werden zur Positionsberechnung mit biegbaren Bändern ausgestattet. Durch verschiedene Methoden wird die Biegung der Bänder gemessen. Zwar kann man mit dieser Methode nicht alle sechs Freiheitsgrade bestimmen, doch kann man aus dem Zusammenspiel der einzelnen Bänder und dem Wissen über die Körperstruktur eine Haltung des Körpers berechnen. Da es sich bei diesen Systemen um Inside-In-Systeme handelt, gibt es keine Möglichkeit zur absoluten Positionsbestimmung. Wie bei den mechanischen Systemen, kann eine Positionsbestimmung bezüglich der Umgebung durch die zusätzliche Verwendung anderer Systeme erreicht werden.

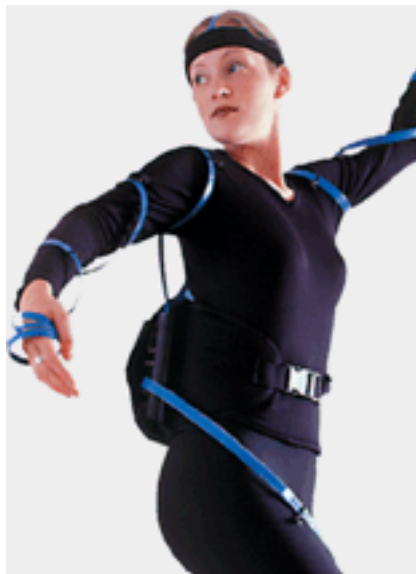


Abbildung 3.14.: Akteur mit Biegesensoren (aus [Mea04])

Es gibt zwei verschiedene Methoden, wie sich die Biegung der Bänder bestimmen lässt. Bei der optischen Methode werden Bänder aus Fieberglas eingesetzt. Durch diese Bänder wird Licht gesendet. Biegen sich die Bänder, so wird nur ein Teil des Lichts durchgeleitet. Je stärker sich die Bänder biegen, desto schwächer wird das ankommende Lichtsignal. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein Sensor, der die Lichtstärke misst. Die gemessenen Werte lassen Rückschlüsse auf die Biegung zu.

Das zweite Verfahren benutzt metallische Bänder. Die Bänder sind so konstruiert, dass sich bei einer Verbiegung der elektrische Widerstand ändert. Dieser Widerstand wird gemessen. Wie bei den optischen Systemen sind so Rückschlüsse auf die Art der Biegung möglich.

3.1.7.2. Vor- und Nachteile

Die folgende Bewertung resultiert aus den Angaben aus [Mea02] sowie dem Vergleich mit anderen Systemen:

- + Keine Verdeckungsprobleme
- + Preisgünstig
- + Kaum Einschränkung der Bewegungsfreiheit

- Keine Verfolgung von Objekten möglich
- Schwer zu handhaben
- Keine absoluten Positionsangaben

3.1.8. Hybrid-Systeme

Hybrid-Systeme sind keine eigenständigen Systeme. Stattdessen werden verschiedene Systeme miteinander kombiniert. Ziel dieser Kombination ist, die Vorteile der unterschiedlichen Systeme zu nutzen. Leider werden nicht nur die Vorteile der Systeme kombiniert, auch die Nachteile können sich summieren:

Ein gutes Beispiel für eine solche Kombination von Tracking-Systemen ist das am ZGDV entwickelte Projekt *Medarpa* [Zen04b]. Bei *Medarpa* soll es dem Arzt ermöglicht werden, bei einer minimal-inversiven Operation bestimmte Geweberegionen computer-gestützt zu operieren. Dazu wurde die gesuchte Region bereits in einem virtuellen Datensatz des Patienten markiert. Während sich der Arzt mit der Operationsnadel der Region nähert, bekommt er auf einem halbtransparenten Bildschirm Informationen über die Lage und Ausrichtung seines Instruments sowie über die Entfernung zur gesuchten Geweberegion.

Die Kombination von Tracking-Systemen funktioniert hier wie folgt: Um dem Arzt die richtige Sicht auf das Display zu ermöglichen, muss sein Kopf verfolgt werden. Schaut der Arzt schräg auf das Display, so muss die Ansicht entsprechend des Blickwinkels korrigiert werden. Allerdings soll der Arzt bei seiner Arbeit nicht behindert werden. Hierfür bietet sich ein optisches Tracking-System an.

Um die Bewegungen und Ausrichtung des Instrumentes bestimmen zu können, kann kein optisches System verwendet werden. Die Marker würden durch den Körper des Patienten verdeckt. Das verwendete magnetische System kann den Körper des Patienten allerdings durchdringen.

3.2. Marktübersicht

Der Markt für Motion Capturing-Systeme unterteilt sich in drei Teile: Hardware-Anbieter, Software-Anbieter und Service-Anbieter. Dabei ist eine Ausrichtung vor allem auf die Unterhaltungsindustrie festzustellen.

3.2.1. Hardware-Anbieter

Bis auf wenige Ausnahmen haben sich die Hersteller jeweils auf ein Verfahren zur Gewinnung von Bewegungsdaten spezialisiert. Die bekanntesten Hersteller sind Vicon [Vic04e] und Motion Analysis [Mot04i].

Ein Überblick über die wichtigsten Hardware-Anbieter und deren Produkte findet sich im Anhang dieser Arbeit.

Neben der Produktion unterhalten einige Firmen zusätzlich noch eine Dienstleistungsabteilung. Hier können Kunden statt das System zu kaufen, ein fertiges System mit samt Personal mieten. Teilweise stellen somit die Hersteller der Motion Capturing-Systeme eine gewisse Konkurrenz zu den reinen Dienstleistern dar. Beispielsweise bietet Motion Analysis mit seinem Tochterunternehmen Motion Analysis Studios [Mot04j] alle Arbeitsschritte bis hin zur Vorproduktion eines Films oder Computerspiels im eigenen Haus an.

3.2.2. Software-Anbieter

Kommerzielle Software-Produkte sind meist auf den Gebieten Film- bzw. Spieleindustrie anzutreffen. Die Programme entstammen allesamt dem Animationsbereich. Schon bevor Motion Capturing-Systeme zur Animation eingesetzt wurden, wurden mit Hilfe solcher Anwendungen virtuelle Charaktere animiert. Allerdings wurde die Bewegung der Charaktere mittels Keyframing oder Rotoscoping realisiert.

Je nach Anwendung wird ein direkter Import der Bewegungsdaten ermöglicht. Dadurch lassen sich die von dem Motion Capturing-System erzeugte Bewegungsdaten direkt ohne vorherige Konvertierung nutzen.

Die bekanntesten Vertreter dieser Animationssoftware sind:

- Softimage XSI [Sof04]
- 3ds max von Discreet [Dis04]
- LightWave 3D von NewTek [New04]
- Maya von Alias [Ali04]
- Kaydara MOCAP [Kay04] (seit August 2004 unter dem Dach von Alias)
- Poser von Curious Labs [Cur04]

Neben der Animationssoftware gibt es auch noch Software zur Datenanalyse. Allerdings gibt es hier wenige kommerzielle Anbieter. Diese Art von Software wird meist von den Anwendern wie z.B. medizinischen Instituten oder Designfirmen selbst entwickelt. Eine Ausnahme ist die Firma Motion Analysis. Sie vertreibt neben den Hardware Motion Capturing-Systemen auch Software in den Bereichen Bewegungsanalyse [Mot04g] und industrielles Produktdesign [Mot04f].

3.2.3. Service-Anbieter

Wie der Name schon sagt, stellen diese Anbieter weder eigene Hardware her noch entwickeln sie ihre eigene Analyse- bzw. Animationssoftware. Sie haben sich darauf spezialisiert, eine komplette Dienstleistung anzubieten. Die meisten Firmen haben sich auf den Bereich der Film- oder Computerspieleindustrie spezialisiert.

In ihren Studios setzen sie Motion Capturing-Hardware anderer Firmen ein. Sie liefern für ihre Kunden „schlüsselfertiges“ Film- bzw. Spielmateriale.

Ein Nachteil der Dienstleister ist, dass sie ihre Systeme nicht so flexibel den Kundenwünschen anpassen können wie die Hardware-Hersteller. Allerdings können sie durch diese Einschränkungen einfachere Preismodelle für ihre Dienstleistung anbieten [Koc01].

Exemplarisch sind hier drei solcher Anbieter aufgeführt: Artem Digital [Art04], Avatar [Ava02], Peak Performance [Pea04]. Eine Liste weiterer Anbieter ist in [Gam97] zu finden.

3.3. Aktuelle Forschung

Aktuelle Forschungen im Bereich von Motion Capturing finden zur Zeit kaum in der Entwicklung neuer Systeme statt. Der Entwicklungsstand der Systeme ist bereits so weit fortgeschritten, dass es möglich ist, kommerzielle Produkte zu produzieren und zu vermarkten. Wie die momentanen Einsatzgebiete für Motion Capturing zeigen, genügen die erzielten Ergebnisse durchaus den Erfordernissen für den professionellen Einsatz. Die Hersteller beschränken ihre Forschungsarbeit meist auf die Optimierung ihrer Systeme. Selten fließen dabei ganz neue Ideen in die entwickelten Produkte ein.

Die Forschung im Bereich des Motion Capturing hat sich im wesentlichen in zwei Bereiche unterteilt.

- Optimierung der verwendeten Systeme
- Entwicklung neuer Möglichkeiten zur Nutzung der Bewegungsdaten

Da es eine Vielzahl an Optimierungsmöglichkeiten gibt, werden im Folgenden exemplarisch vier bedeutende Forschungsgebiete beschrieben.

3.3.1. Markerloses Motion Capturing

Ein großer Entwicklungsbedarf besteht darin, Motion Capturing benutzerfreundlicher zu gestalten. Zur Zeit basieren alle Systeme auf der Tatsache, dass die Akteure mit Sensoren oder Emitttern ausgestattet werden müssen. Könnte man die Bewegung direkt aus den Aufzeichnungen normaler Video-Kameras übernehmen, so wäre dies ein großer Fortschritt.

Forschungen auf diesem Gebiet sind z. B. unter [CJM02], [DDR01], [FGDP02] und [Mam04] beschrieben. Eine guter Überblick über diese spezielle Forschungsgebiet ist in [Bra00] dargestellt.

3.3.2. Erkennung dynamischer Modelle

Optische Tracking-Systeme können nicht nur Positionen einzelner Marker bestimmen. Zusätzlich sind einige dieser Systeme in der Lage, bestimmte Markieranordnungen zu verfolgen. Werden solche Anordnungen verwendet, spricht man von Modellen. Verändert sich die starre Anordnung der Marker, so kann das Modell nicht mehr identifiziert werden. Weitere Ausführungen zu Modellen in optischen Tracking-Systemen finden sich im Anhang A.

Statt starrer Markieranordnungen zur Modellerkennung zu verwenden, versuchen Wissenschaftler die Modellerkennung auf dynamische Markieranordnungen auszuweiten. Sie versprechen sich dadurch eine höhere Erkennungsrate. Forschungen in diesem Bereich sind unter [TYAB01] zu finden.

3.3.3. Skeleton Fitting

Der Begriff Skeleton Fitting wird hauptsächlich bei optischen Motion Capturing-Systemen verwendet. Hierbei handelt es sich um die Einpassung einer Skelettstruktur in eine Wolke von Markern.

Ein Einblick in diese Forschungen bieten die folgenden Forschungsberichte: [SPRBT98], [BFH⁺98] und [BRRP97],

Damit die Forschungen in diesem Bereich erfolgreich sind, müssen die technischen Voraussetzungen geschaffen werden. Stehen nur begrenzte Hardware-Ressourcen zur Verfügung, müssen diese optimal eingesetzt werden. Besonders beim Einsatz weniger Sensoren, ist es wichtig, dass diese optimal ausgenutzt werden, um bestmögliche Resultate zu gewährleisten. Mit der Ausrichtung der Kameras beschäftigt sich der Report [CD02] der Forscher X. Chen und J. Davis.

3.3.4. Echtzeitfähigkeit

Die meisten der vorhandenen Motion Capturing-Systeme liefern die Ergebnisse nicht in Echtzeit. Vor allem solche Systeme, bei denen die Zuordnung von Sensoren bzw. Emitter zu den Gelenken nicht bereits durch die Tracking-Systeme durchgeführt wird, benötigen viel Zeit für die Zuordnung durch die Software-Algorithmen.

Ein Weg, die Echtzeitfähigkeit von Motion Capturing-Systemen zu erreichen, ist durch die Begrenzung von Sensoren und Emittlern. Je weniger Daten die Sensoren ermitteln, umso schneller können alle Daten eines Frames abgearbeitet werden. Allerdings sind durch die Maßnahme Qualitätseinbußen zu erwarten. Ein Teil der Forschungsarbeit richtet sich in diesem Gebiet auf einen optimierten Einsatz von möglichst wenigen Hardwarekomponenten. Durch die zu erwarteten Qualitätseinbußen, sind solche Systeme nicht mehr universell einsetzbar. Anwendungsgebiet und Motion Capturing-System müssen daher aufeinander abgestimmt werden.

Auch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Motion Capturing-System musste einen Mittelweg im Einsatz von Hardware, Rechenleistung für das Einsatzgebiet finden.

4. Aufgabenstellung und Planung

Nach einer einführenden Analyse werden Ziele und Aufbau des entwickelten Motion Capturing-Systems beschrieben. Es wird in einem eigenen Abschnitt auf die Einschränkungen aufgrund des geringen Ressourcen-Einsatzes eingegangen. Das Kapitel schließt mit einer Definition der möglichen Anwendungsgebiete des Systems.

4.1. Analyse

Wie die Ausführungen der Kapitel *Motion Capturing* und *Stand der Technik* gezeigt haben, sind Motion Capturing-Systeme durchaus im professionellen Umfeld einsetzbar. Auch wurde bereits festgestellt, dass solche Systeme sehr teuer sind und einiges Fachwissen nötig ist, um die Systeme zu bedienen. Ein Einsatz im semiprofessionellen Umfeld ist nur sehr eingeschränkt möglich. Im Amateurbereich oder im alltäglichen Einsatz sind solche Systeme nicht einsetzbar. Da die am Markt verfügbaren Systeme darauf abgestimmt wurden, bestmögliche Ergebnisse zu liefern, benötigen sie enorm leistungsfähige Computer zur Verarbeitung der Daten. Trotz moderner und leistungsfähiger Hardware sind diese Systeme aber dennoch nicht in der Lage, Daten in Echtzeit zu liefern.

Wie bereits beschrieben wurde, gibt es verschiedene Verfahren zur Erfassung von Bewegungsdaten. Die unterschiedlichen Systeme bieten unterschiedliche Bedienerfreundlichkeit. Die Entscheidung zur Entwicklung eines optischen Systems ist vor allem darin zu finden, dass diese Systeme den besten Komfort für den Nutzer bieten. Vor allem passive optische Systeme sind hardwaretechnisch vergleichsweise einfach zu konstruieren.

In dieser Arbeit wurde ein optisches Motion Capturing-System entwickelt, das zur Bewegungserfassung auf passive Marker setzt. Um den Preis des Systems möglichst niedrig zu halten, wird das System mit geringem Hardwareeinsatz betrieben. Trotzdem soll es möglich sein, das System in Echtzeitanwendungen einzusetzen.

4.2. Ziele und Aufbau des Systems

Das entwickelte System ist nicht universell verwendbar. Vor allem der Einsatz von nur zwei Kameras zur Aufnahme des Aktionsbereichs verlangt nach genauer Definition der vorgesehenen Anwendungsmöglichkeiten.

Mit einem Zwei-Kamera-System ist es zwar möglich, den Aktionsbereich von allen Seiten aufzunehmen (siehe Abbildung 4.1, Teil A), doch eine Positionsbestimmung ist dann nicht für alle Marker möglich. In Teil A der Abbildung ist lediglich ein Marker in beiden Kameras zu sehen. Wie bereits erwähnt, muss aber ein Marker zur Positionsbestimmung in mindestens zwei unterschiedlichen Kameras zu sehen sein. Teil B

der Abbildung zeigt eine praktikable Lösung. Die Marker können von beiden Kameras gleichzeitig gesehen werden. In dem hier vorgestellten System werden die Kameras wie in Teil B der Abbildung 4.1 angeordnet.

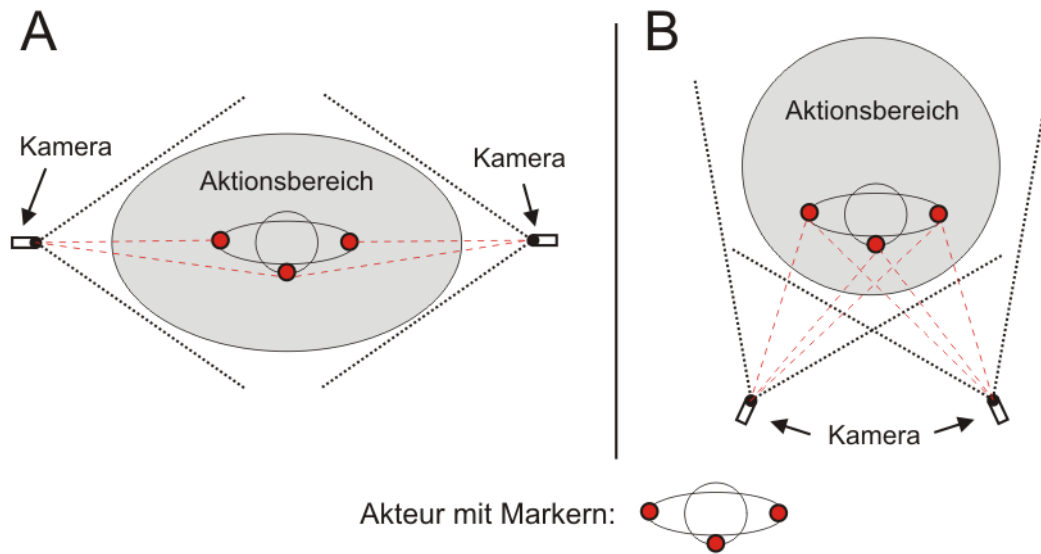


Abbildung 4.1.: Zwei Möglichkeiten der Kameraanordnung (schematische Darstellung); Die Lösung in A ist nicht praktikabel; B zeigt eine praktikable Anordnung

Ziel der Entwicklung ist eine Ausrichtung des Akteurs in eine Richtung. Das System soll hauptsächlich zur Interaktion mit anderen Anwendungen verwendet werden. Die Ausgabe der Anwendung wird statt auf einem Monitor auf einer großen Leinwand dargestellt. Die Leinwand und Kameras werden so ausgerichtet, dass der Akteur sich zwangsläufig passend ausrichtet (siehe Abbildung 4.2). Eine Nutzung wie z.B. in der Filmindustrie zur Erfassung jeglicher Bewegung ist nicht nötig und aufgrund der Voraussetzungen auch nicht möglich. Trotzdem soll das System in der Lage sein, die Bewegungen des Akteurs möglichst akkurat zu erfassen.

Durch den Einsatz der Leinwand erhält der Akteur sofort Rückmeldung. Beispielsweise könnte ein virtueller Avatar die Bewegungen des Akteurs ausführen. Die Darstellung kann von dem Akteur direkt beobachtet und beeinflusst werden.

Um die Kosten und Entwicklungszeit zu senken, wird das System so weit wie möglich aus bereits vorhandenen Komponenten zusammengestellt.

4.3. Beschränkungen des Systems

Aufgrund des geringen Hardwareaufwands ist das Systemen einigen Beschränkungen unterworfen:

Durch die geringe Anzahl an verwendeten Kameras wird der mögliche Aktionsbereich stark eingeschränkt. Da die Kameras einen begrenzten Aufnahmewinkel besitzen kann

4. Aufgabenstellung und Planung

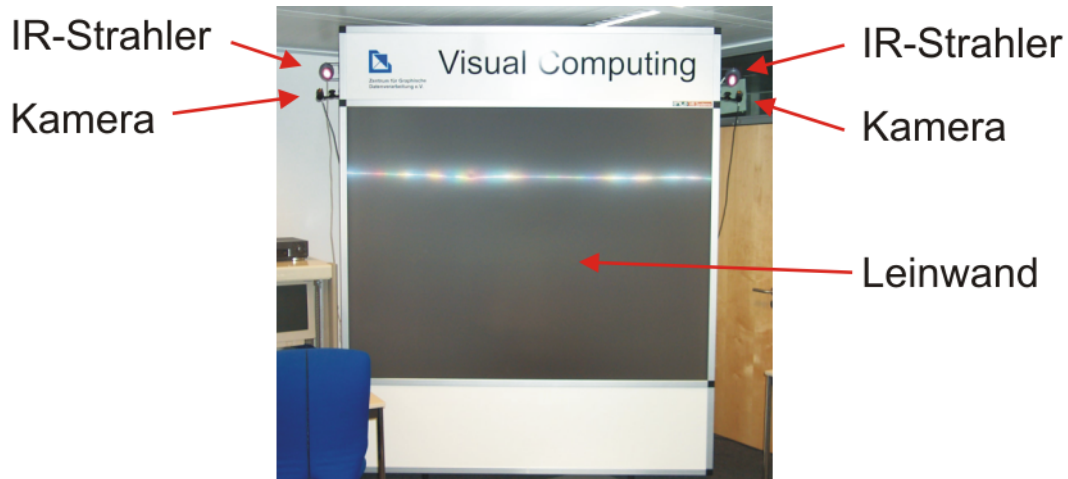


Abbildung 4.2.: Anordnung von Leinwand, IR-Strahler und Kameras

sich der Akteur nicht sehr weit von links nach rechts bewegen. Zwar ist durch die fast parallele Ausrichtung der Kameras ein Blick in die Tiefe des Raums möglich. Die Auflösung der Kameras verhindert allerdings, dass die Position weit entfernter Marker richtig erkannt wird. Der mögliche Aktionsbereich ist daher auch nach hinten begrenzt. In Abbildung 4.1 Teil B, ist der zu erwartende Aktionsbereich schematisch dargestellt.

Durch den Einsatz lediglich zweier Kameras treten vermehrt Verdeckungen der Marker auf. Aufgrund der Tatsache, dass jeder Marker zu Positionsbestimmung in mindestens zwei Kameras sichtbar sein muss, ist damit zu rechnen, dass nicht alle Marker erkannt werden. Dieser Tatsache wurde bei der Realisierung des Systems durch Entwicklung geeigneter Algorithmen Rechnung getragen.

Das System sieht nicht vor, dass sich der Akteur um seine eigene Achse dreht. Aufgrund der Kameraausrichtung wären bei einer Drehung zu viele Marker verdeckt. Auf diese Möglichkeit konnte verzichtet werden, da die Interaktion mit der Darstellung auf der Leinwand die Hauptanwendung sein soll. Dementsprechend wird der Akteur auch nur von vorne mit Markern bestückt.

Arme und Beine des Akteurs werden mit Hilfe von Markern erfasst. Aus den Markerpositionen werden die Positionen der echten Gelenke ermittelt. Das hier entwickelte System verzichtet allerdings auf die Bestimmung der genauen Gelenkpositionen aus den Markerpositionen. Stattdessen werden für diese Gelenke die Markerpositionen verwendet. Daher ist es notwendig, die Marker an Armen und Beinen möglichst dicht an den Gelenken zu platzieren.

Für den geplanten Anwendungszweck besteht kaum ein Unterschied, ob es sich bei einer Gelenkposition z.B. um das Handgelenk oder den dazugehörigen Marker handelt. Der Akteur erhält ein sofortiges Feedback auf der Leinwand und kann z.B. die Hand neu ausrichten. Vorteil ist vor allem, dass einige Berechnungen entfallen, die zur Bestimmung der echten Gelenkposition nötig sind, was kostbare Rechenzeit spart.

4.4. Anwendungsmöglichkeiten des Systems

Im Folgenden sind die wichtigsten Anwendungsmöglichkeiten des Systems aufgeführt:

Lernanwendungen: Mit dem System soll es möglich sein, interessierten Personen das Thema Motion Capturing näher zu bringen. Durch die einfache Anwendung des Systems wird es sogar möglich sein, das System an „öffentlichen“ Plätzen aufzubauen. Dort kann das System von interessierten Personen live getestet werden. Mit Hilfe der erlangten Bewegungsdaten kann im nachhinein ein kurzer Film mit verschiedenen virtuellen Charakteren erstellt werden.

Bewegungsanalyse: Wie mit jedem Motion Capturing-System kann auch das hier entwickelte System zur Bewegungsanalyse eingesetzt werden. Auf Grund der verwendeten Komponenten muss allerdings mit Einschränkungen bezüglich Art und Genauigkeit der zu analysierenden Bewegung gerechnet werden.

Datengewinnung: Mehrere Projekte des ZGDV verarbeiten Bewegungsdaten von Menschen. Dieses System soll die Grundlage liefern, möglichst einfach Testdaten zu erhalten. Die Notwendigkeit des Erwerbs von teuren Testdatensätzen kann entfallen oder zumindest reduziert werden.

5. Implementierung

Dieses Kapitel beschreibt die wichtigsten Überlegungen zur Implementierung des Motion Capturing-Systems. Weiter werden in vier Abschnitten die einzelnen Komponenten des Systems beschrieben. Das Kapitel wird mit einer Erläuterung zu den entwickelten Algorithmen abgeschlossen.

5.1. Überblick

Wie in der Einführung bereits beschrieben wurde, ist es für die Entwicklung von Animationen wesentlich eine Trennung von Bewegung und Aussehen vorzunehmen. Für Motion Capturing ist nur die Erfassung der Bewegung wichtig. Bei menschlichen Akteuren ist es möglich, die Bewegung durch Erfassen der Gelenkpositionen zu beschreiben. Der erste Schritt ist also die Definition einer Datenstruktur zur Speicherung der Gelenkpositionen. Zur Speicherung der Gelenkpositionen bietet sich eine Nachbildung des menschlichen Skeletts an. Die für das Motion Capturing-System entwickelte Datenstruktur (virtuelles Skelett) wird im Abschnitt 5.4 beschrieben.

Um die Datenstruktur mit Positionsdaten füllen zu können, muss das System diese erst ermitteln. Bei optischen Systemen werden für diesen Zweck Marker eingesetzt. Die verschiedenen Motion Capturing-Systeme verwenden unterschiedliche Techniken, um aus den Markerpositionen die Gelenkpositionen für des Skelett zu ermitteln. Für Arme und Beine gilt im Allgemeinen systemübergreifend die Regel, dass Marker an den Gelenken platziert werden, um deren Position zu bestimmen. Auch das hier entwickelte System arbeitet auf diese Weise. An Kopf, Körper, Armen und Beinen werden Marker angebracht. Damit die Marker nicht direkt an der Kleidung des Akteurs befestigt werden müssen, wird ein spezieller Motion Capturing-Anzug entworfen (siehe Abschnitt 5.3).

Um die Positionen der einzelnen Marker bestimmen zu können, wird ein Tracking-System benötigt. Da das hier entwickelte Motion Capturing-System soweit möglich auf bestehende Komponenten aufbauen soll, wird auf ein bereits vorhandenes System zurückgegriffen. Verwendet wird das im Zentrum für Graphische Datenverarbeitung entwickelte Tracking-System namens EOS. Informationen zu EOS finden sich in Anhang A. Als nützlich hat sich erwiesen, dass EOS verschiedene Markeranordnungen erkennen kann und diese als Modelle behandelt. Das hier entwickelte System nutzt solche Modelle für die Bestimmung von Kopf- und Körperposition sowie zur Bestimmung deren Orientierung im Raum. Bezüglich EOS sei hier noch erwähnt, dass EOS die Positionen der Marker sowie die Modelle in Echtzeit liefert. In Abschnitt 5.2 wird die Verwendung von EOS, als Bestandteil des Motion Capturing-Systems, genauer beschrieben.

Bevor das System eingesetzt werden kann, muss die Zuordnung der Marker zur Skelett-Information vorgenommen werden. Diese Aufgabe übernimmt ein speziell für diese Aufgabe entwickeltes Modul (MoCap-Modul genannt). Das Modul ist eine Erweiterung von EOS. Es wird für jedes einzelne von EOS bearbeitete Frame aufgerufen und erstellt dabei ein virtuelles Skelett mit allen Gelenkpositionen. Zum Abschluss kann die Skelett-Information zur Verwendung in anderen Anwendungen versendet bzw. exportiert werden.

Während der Entwicklung des Motion Capturing-Prototyps stellte sich allerdings heraus, dass die Betrachtung des aktuellen Frames nicht ausreicht. Durch Verdeckungen konnte zu häufig kein komplettes virtuelles Skelett erfasst werden. Um bessere Resultate erzielen zu können, wurde die Funktionalität des MoCap-Moduls um die Validierung des virtuellen Skeletts sowie eine Berücksichtigung von Vergangenheitsdaten erweitert. Inverse Kinematik wurde speziell für eine gleichmäßigere Armerfassung eingesetzt. Die Beschreibung der Funktionen findet sich in Abschnitt 5.6.5. Bei der Erweiterung des Moduls wurde besonders darauf geachtet worden, dass die Echtzeitfähigkeit des Systems erhalten bleibt.

Anmerkung: Es soll hier nochmals klargestellt werden, dass das EOS-Tracking-System bereits vorhanden war. Im Rahmen dieser Arbeit wurde EOS um die Motion Capturing-Funktionalität erweitert.

5.2. Einsatz von EOS

EOS wird im hier entwickelten System weitestgehend unverändert eingesetzt. An der Hardware wurden keinerlei Änderung vorgenommen. Lediglich die Platzierung Ausrichtung der Kameras und der Infrarot-Strahler wurden für die Bedürfnisse des Motion Capturing-Systems angepasst. Die Abbildung 4.2 in Kapitel 4 hat den entsprechenden Aufbau bereits vorweggenommen.

Die einzige tiefere Anpassung des EOS-Systems erfolgte in der Steuersoftware (von hier an als EOS-Software bezeichnet). Jeder Frame durchläuft in der EOS-Software eine Pipeline, wobei die Positionen der Marker berechnet und die Modelle erzeugt werden (siehe Anhang A). Der einzige Eingriff in die EOS-Software ist die Erweiterung dieser Pipeline: Als einer der letzten Stationen der Pipeline wird das MoCap-Modul mit den benötigten Parametern (Markerpositionen und Modelle) gestartet.

Das MoCap-Modul berechnet aus den übergebenen Parameter ein virtuelles Skelett (die Bewegungsdaten). Nachdem das MoCap-Modul seine Arbeit beendet hat, wird die Kontrolle an die EOS-Software zurückgegeben. Die EOS-Software arbeitet die restlichen Stationen der Pipeline ab und beginnt danach mit dem nächsten Frame.

Die restlichen Anpassungen von EOS für Motion Capturing-Zwecke sind im EOS-System einfach konfigurierbar. Wie im Anhang geschildert, wurde EOS ursprünglich zur Verfolgung von *Devices* entwickelt. Statt *Devices* (die Modelle) zu erkennen, wird das System hier so konfiguriert, dass es Teile des MoCap-Anzugs erkennt.

5.3. Der Motion Capturing-Anzug

Für optische Systeme benötigt man einen speziellen Anzug bzw. eine Möglichkeit zur Befestigung der Marker. Bei den kommerziellen Anzügen handelt es sich oft um teure Spezialanfertigungen. Das hier entwickelte System sollte möglichst preisgünstig sein. Auch die Bedienung des Systems soll möglichst einfach sein, um es schnell nutzen zu können.

Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Komponenten entwickelt, die der Akteur anlegen kann. An den Komponenten werden die Marker befestigt. Bei den Komponenten handelt es sich um eine Kopfbedeckung, eine Weste sowie Bänder für Arme und Beine. Jede einzelne Komponente kann vom Akteur schnell an- bzw. abgelegt werden.

Durch das Komponentendesign kann der Anzug für jede Körpergröße verwendet werden. Da die einzelnen Komponenten zusammen die gleiche Funktionalität wie ein Motion Capturing-Anzug erfüllen, wird im Folgenden der Begriff MoCap-Anzug verwendet. Abbildung 5.1 zeigt einen Akteur mit dem kompletten Anzug.

5.3.1. Einsatz der EOS-Modelle

Bevor in dem nächsten Abschnitt die einzelnen Komponenten des MoCap-Anzuges beschrieben werden, soll hier der Zusammenhang zwischen dem Anzug und den EOS-Modellen dargestellt werden.

Bei optischen Systemen ist die Zuordnung der Marker zu den richtigen Gelenkpunkten des virtuellen Skeletts eine der komplexesten Aufgaben. Vor allem um den Rechenaufwand zu minimieren und das System möglichst einfach zu halten, wird für die Kopf- und Körpererkennung auf EOS-Modelle zurückgegriffen. Ausgehend von diesen Modellen berechnet das MoCap-Modul die benötigten Gelenkpositionen. Daher ist es erforderlich, dass Komponenten für Kopf- und Körpererkennung bezüglich des Modelleinsatzes konstruiert werden. In den folgenden Abschnitten werden jeweils entsprechende Anmerkungen gegeben.

5.3.2. Das Kopfmodell

Zum Erfassen der Kopfposition wird eine Schildkappe verwendet. Die Schildkappe ist mit vier Markern bestückt, die so platziert sind, dass EOS zumindest drei der Marker möglichst oft erkennt. Die vier Marker werden im EOS-System als Modell konfiguriert. Da EOS nur drei der Marker zur Modellerkennung benötigt, wird die Position des Kopfes mit großer Wahrscheinlichkeit als richtig erkannt. Abbildung 5.2 zeigt die Schildkappe mit den vier Markern.

Durch die Verwendung eines EOS-Modells (im Folgenden mit Kopfmodell bezeichnet) kann auch die Orientierung des Kopfs im Raum erfasst werden. Daher ist es möglich die Blickrichtung des Akteurs zu bestimmen. Mit einem einzelnen Marker wäre die Erfassung der Blickrichtung nicht möglich. Für interaktive Anwendungen ist dies notwendig um

5. Implementierung



Abbildung 5.1.: Akteur im MoCap-Anzug



Abbildung 5.2.: Schildkappe zur Erfassung von Position und Orientierung des Kopfes

ggf. auf eine Änderung der Blickrichtung (nur wenn der ganze Kopf und nicht nur die Augen bewegt werden) reagieren zu können.

Da der Akteur die Schildkappe nicht immer gleich aufsetzen wird, verändert sich die Orientierung des Kopfmodells bei jeder Capturing-Session. Um trotzdem eine richtige Orientierung für den Kopf bestimmen zu können, bietet die Software eine einmalige manuelle Anpassung der Orientierung. Der Benutzer kann mit Hilfe der graphischen Benutzerschnittstelle (siehe Abschnitt 5.5.5) die Rotation der X-, Y- und Z-Achse beeinflussen.

5.3.3. Das Körpermodell

Eine Weste dient zur Erfassung von Körperdaten¹. Im Gegensatz zum Kopfmodell wird für den Körper nicht nur eine einzige Position benötigt (vgl. Abschnitt 5.4). Wie auch bei der Schildkappe werden die Marker zur Modellerkennung verwendet. Ein großer Nachteil ist, dass EOS lediglich starre Modelle erkennen kann. Führt der Akteur extreme Bewegungen aus, kann die Weste verrutschen. Eine Modellerkennung ist dann nicht möglich. Eine Kompensation wird dadurch erreicht, dass die Weste sehr eng am Körper anliegt.

Die Weste ist mit sieben Marken ausgestattet. Platzierung sowie Anzahl der Marker erfüllen zwei Forderungen:

¹Körper bezeichnet hier und im Folgenden ausschließlich den Torso ohne Kopf, Arme und Beine.

5. Implementierung

Erstens sind es so viele Marker, dass zur Modellerkennung zu jeder Zeit genügend (drei) Marker erkannt werden. Es sind allerdings auch so wenige Marker, dass die Anzahl der zu behandelnden Markerpositionen so gering wie möglich bleibt. Nicht als Teil des Modells erkannte Marker können zudem die Gelenkerkennung für Arme und Beine beeinträchtigen.

Zweitens werden die einzelnen Marker der Weste zur Bestimmung von Gelenkpositionen des Körpers verwendet. Der unterste Marker am Westenverschluss wird als Ursprung des lokalen Modell-Koordinatensystems definiert (Siehe Anhang A). Dies ist für die Zuordnung der Marker zu den Gelenken wichtig. Der oberste Verschlussmarker dient dazu, ein asymmetrisches Modell zu erzeugen. Ein symmetrisches Modell kann von EOS leicht spiegelverkehrt erkannt werden. Eine Zuordnung der Marker ist dann ebenfalls nicht möglich. In Abbildung 5.3 ist die Weste mit ihren Markern abgebildet.



Abbildung 5.3.: Weste zur Erfassung von der Körperbewegung

5.3.3.1. Das lokale Koordinatensystem

Jedes EOS-Modell hat sein eigenes lokales Koordinatensystem. Besonders das Koordinatensystem des Körpermodells hat für die Funktionsweise des Motion Capturing-Systems eine wichtige Bedeutung. Es wird verwendet, um die Position von Schulter-, Hüft- und Wirbelgelenken zu erfassen. Zusätzlich wird es für mehrere Validierungsvorgänge verwendet. Die Algorithmen arbeiten mit der Information über Ausrichtung und Position des lokalen Modell-Koordinatensystems.

Damit das Motion Capturing-System ordnungsgemäß funktioniert, muss das lokale Modell-Koordinatensystem wie folgt definiert werden:

5. Implementierung

- Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im zentralen Marker über den beiden Hüftmarkern.
- Die X-Achse zeigt nach links vom Körper weg.
- Die Y-Achse zeigt nach oben.
- Die Z-Achse zeigt nach vorne.

Die Ausrichtung des Koordinatensystems ist nicht frei wählbar. Sie entspricht den Vorgaben des H-Anim Standards [Hum04]. Abbildung 5.4 stellt die benötigte Ausrichtung des lokalen Modell-Koordinatensystems graphisch dar. Position und Ausrichtung des Koordinatensystems erfolgt bei der Anlernung des Modells im EOS-System.

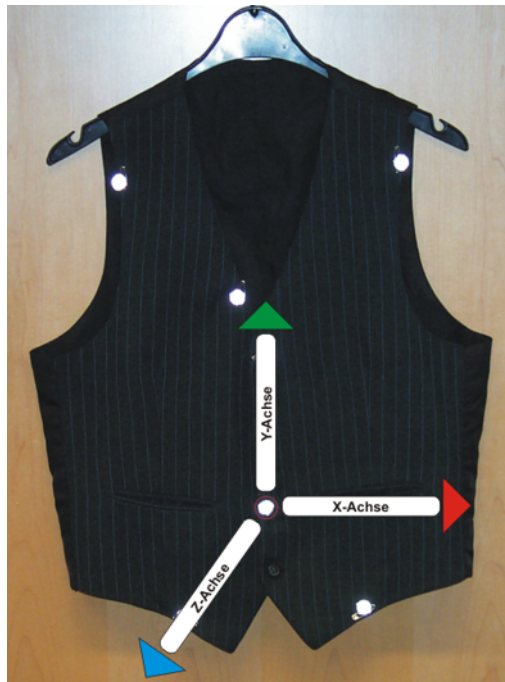


Abbildung 5.4.: Weste mit Darstellung des lokalen Koordinatensystems

5.3.3.2. Anmerkungen

Ein Vorteil der EOS-Modelle ist die Tatsache, dass sie die Position aller zum Modell gehörenden Marker bezüglich des lokalen Koordinatensystems kennen. Es wird zur Positionsbestimmung daher nicht auf die Positionsdaten der einzelnen Marker zurückgegriffen, sondern auf die Information des Modells.

Der gerade beschriebene Vorteil kann sich aber auch als Nachteil darstellen. Wird ein Marker der Weste erkannt und seine Position berechnet, kann es passieren, dass er nicht dem Körpermodell zugeordnet wird. Wie bereits beschrieben, beeinträchtigen „freie“ Markerpositionen die korrekte Erfassung von Armen und Beinen.

5.3.4. Bänder für Arme und Beine

Auch zur Erkennung von Armen und Beinen werden Marker benötigt. Da das System die Markerpositionen statt der echten Positionen für Arm- und Beingelenke verwendet, müssen die Marker möglichst dicht an den Gelenken angebracht werden. Eine Weste mit langen Ärmeln bzw. eine Hose sind daher für die Befestigung der Marker nicht akzeptabel: Die Marker würden bei der Bewegung des Akteurs verrutschen und das Resultat wäre zu ungenau. Außerdem würde sich der Abstand der Marker so sehr ändern, dass der Algorithmus für die Erfassung der Positionen von Armen und Beinen versagen würde.

Aus diesem Grund verwendet das hier entwickelte System elastische Bänder, auf denen die Marker angebracht werden.

Das Motion Capturing-System verwendet zwei verschiedene Bänder-Typen: Für Ellenbogen und Kniegelenke gibt es elastische Bänder mit Klettverschluss; er dient dem vereinfachten Anlegen der Bänder.

Für die dünneren Gelenke (Handgelenk und Fußgelenk) kommen Bänder ohne Klettverschluss zum Einsatz. Das Überstreifen ist problemlos möglich.

Für den Fuß hat sich die Verwendung eines kleinen Stück Klebestreifen als beste Lösung ergeben. Die Verwendung eines Gummibandes ist zwar auch möglich, allerdings ist die Gefahr groß, dieses während der Bewegungen zu verlieren. Die ordnungsgemäße Funktion des Motion Capturing-Systems ist nur gewährleistet, wenn alle Bänder verwendet werden.

Die Bestückung der Bänder mit Markern ist entsprechend der Bewegungsmöglichkeit des jeweiligen Gelenks gewählt. Die Ellenbogenbänder sind mit fünf Markern bestückt. Somit ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass mindestens ein Marker in beiden Kameras zu sehen ist. Da die Handgelenke dünner sind, reichen hier zwei Marker. Einer wird auf der Vorder-, einer auf der Rückseite befestigt.

Für die Beine reicht jeweils ein Marker pro Band. Auf Grund des Systemaufbaus ist der Akteur stets in Richtung der Leinwand ausgerichtet. Die Marker werden daher genügend oft erkannt. Ein Überkreuzen der Beine ist mit dieser Konfiguration allerdings nicht abbildbar, da eine Verdeckung der Marker relativ häufig die Folge wäre.

Abbildung 5.5 zeigt alle Bänder des Motion Capturing-Systems. Von links nach rechts sind die folgenden Bänder abgebildet: Ellenbogen-Band, Handgelenk-Band, Kniegelenk-Band, Fußgelenk-Band und der Fußmarker mit Klebestreifen.

5.3.4.1. Anmerkung

Da die Bänder nicht mit einem einzigen Marker pro Gelenk bestückt sind, kann es vorkommen, dass das Resultat „springt“. Wird im nachfolgenden Frame ein anderer Marker erkannt, dann springt das Gelenk. Da die Armbänder mit fünf Markern bestückt sind, treten solche Sprünge vor allem an den Ellenbogen auf.

5. Implementierung



Abbildung 5.5.: Markerbänder; von links nach rechts: Band für: Ellenbogen, Handgelenk, Kniegelenk, Fußgelenk sowie der Fußmarker

5.4. Das Skelett

Wie bereits beschrieben, lässt sich die menschliche Körperhaltung am besten mit einem Skelett nachbilden. Für das entwickelte Motion Capturing-System wurde eine entsprechende Datenstruktur entworfen.

Es stellt sich die Frage, welche Information zur Speicherung der menschlichen Körperhaltung notwendig sind. Das menschliche Skelett besteht aus Knochen, die mit Gelenken verbunden sind. Bildet man alle Knochen nach, so kann man die Körperhaltung speichern.

Betrachtet man sich die in Kapitel 3.1 vorgestellten Tracking-Systeme, dann erkennt man, dass keine Information über Knochen, sondern die Position der Gelenke erforderlich ist. Ein Blick in Anhang D bestätigt dies, da auch die kommerziellen Motion Capturing-Systeme mit Gelenkinformationen arbeiten.

Eine Frage die es trotzdem zu beantworten gilt, ist: Welche der Gelenke sind unbedingt notwendig, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Körperhaltung zu erfassen, ohne alle Gelenke des menschlichen Körpers einzubeziehen.

Hilfe bietet der ISO-Standard H-Anim [Hum04]. H-Anim ist ein Standard, der eine Abbildung des menschlichen Skeletts in Daten-Strukturen ermöglicht. Grundlage dieser Arbeit ist die Version 1.1 [Hum01b] des Standards. Eine Umsetzung des Standards in VRML² sowie die Version 200x der Spezifikation sind Teil des X3D [Web04] Standards zur Darstellung von 3D Informationen am Computer.

Die Spezifikation umfasst die Benennung der einzelnen Knochen und Gelenke des kompletten menschlichen Skeletts sowie deren Anordnung. Auch die Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Gelenke sind im Standard festgehalten. Zusätzlich werden Vorschläge gegeben, welche der Gelenke für eine ausreichend reale Nachbildung mindestens verwendet werden sollten. Im hier vorliegenden Motion Capturing-System wird diese Vorgabe verwendet um die Gelenkpositionen zu bestimmen sowie für Validierungszwecke. Abbildung 5.6 zeigt die graphische Darstellung der Spezifikation in der Version 1.1.

Wie man der Abbildung entnehmen kann, sollten zur Darstellung eines Menschen bzw. des menschlichen Skeletts minimal 16 Gelenke verwendet werden. Dieser Vorschlag wurde als Grundlage für die Datenstruktur des hier entwickelten Systems verwendet.

Die hier implementierte Datenstruktur kennt insgesamt 20 Gelenke. Für jedes Element kann eine globale Position in X-, Y- und Z-Koordinaten angegeben werden. Abbildung 5.7 zeigt eine schematische Darstellung der Datenstruktur. Die Abbildung zeigt zum besseren Verständnis auch die Knochen zwischen den Gelenken. Die Knochen sind in der Datenstruktur nicht abgebildet.

Die Namen der einzelnen Gelenke orientieren sich dabei ebenfalls an der Vorgabe der H-Anim Spezifikation.

Die Datenstruktur kapselt die Informationen der Gelenkpositionen. Jedes Gelenk besitzt jeweils eine Methode zum Setzen sowie zum Auslesen der Position. Zusätzlich bietet jedes Gelenk eine Statusabfrage, ob die Position bereits gesetzt wurde. Die Datenstruktur verfügt über eine weitere Statusmethode. Diese kombiniert die Statusabfragen aller

²Virtual Reality Modelling Language

5. Implementierung

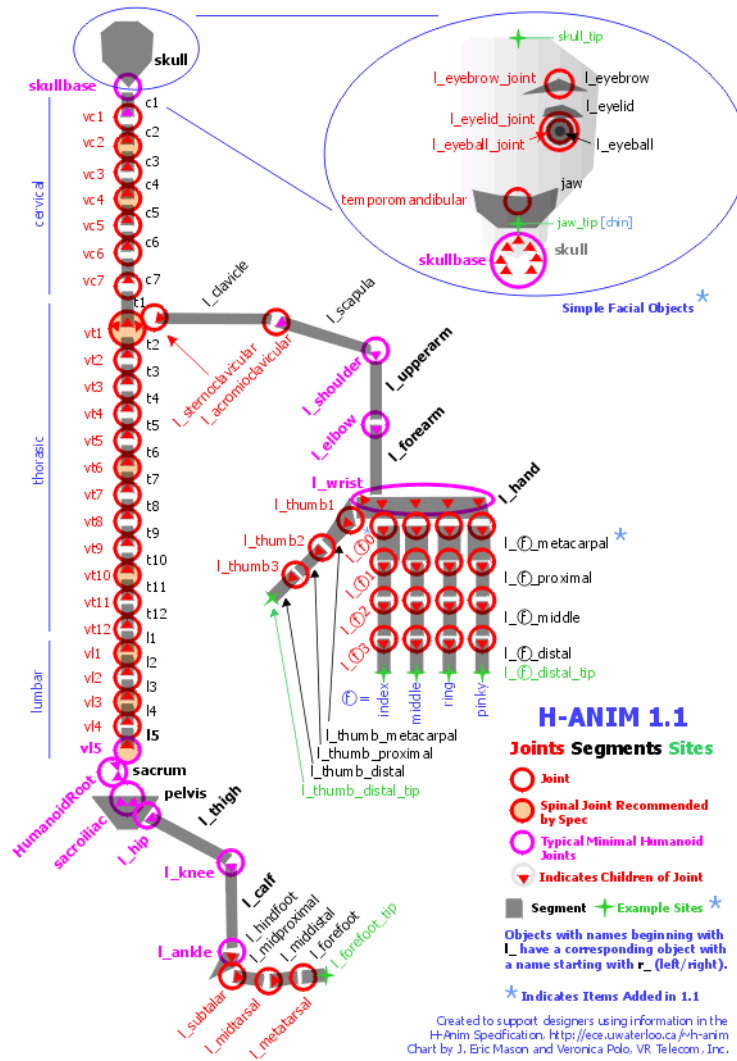


Abbildung 5.6.: Graphische Darstellung der H-Anim 1.1 Spezifikation (aus [Hum01a])

5. Implementierung

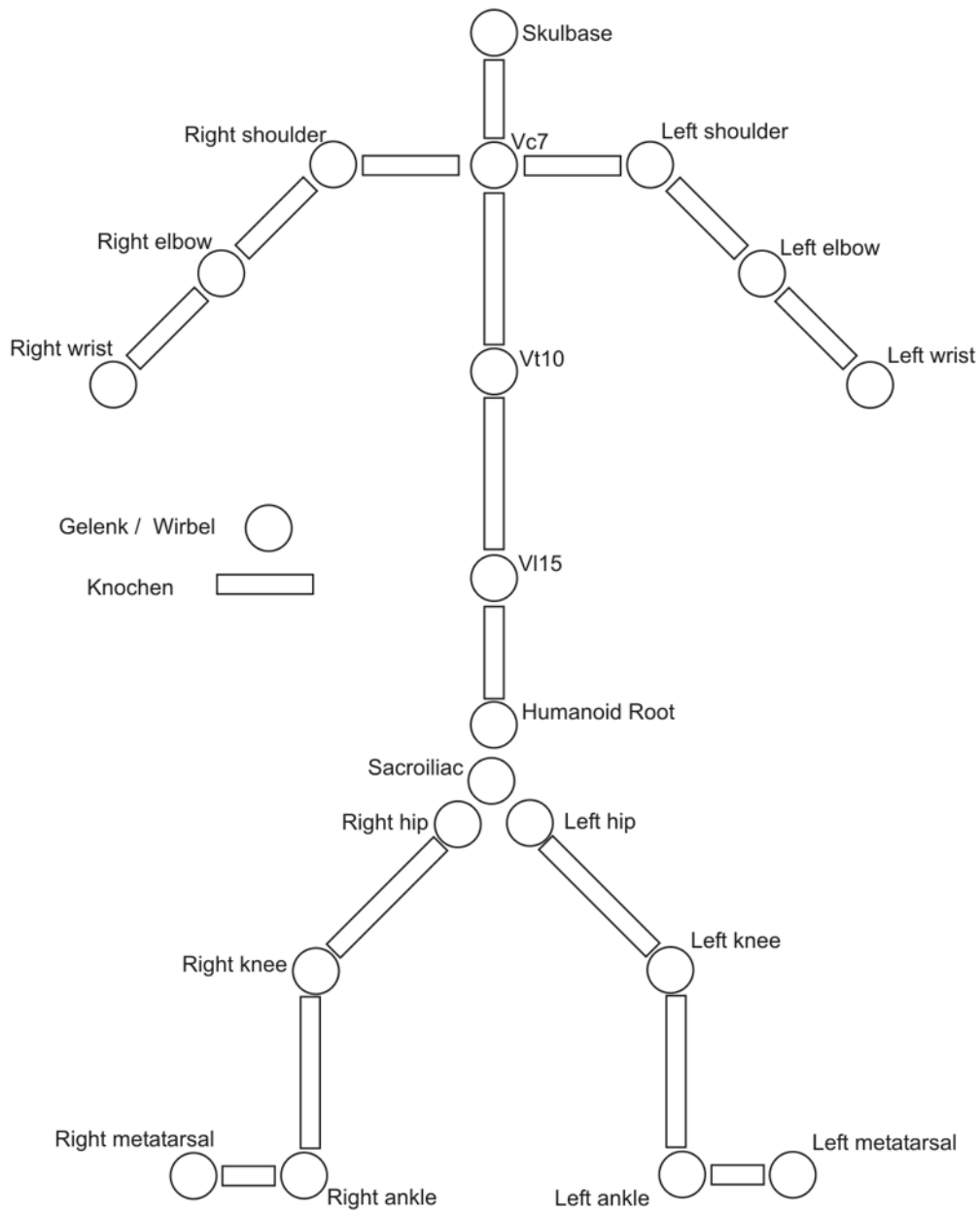


Abbildung 5.7.: Graphische Darstellung der Skelett-Datenstruktur

5. Implementierung

Systembezeichnung	H-Anim Bezeichnung	Beschreibung
Skulbase	skulbase	Kopfansatz
Vc7	vc7	Halswirbel C7
Vt10	vt10	Rückenwirbel T10
Vl15	vl15	Lendenwirbel L15
HumanoidRoot	humanoidroot	Aufhängungspunkt des Skeletts
Sacroiliac	sacroiliac	Wirbel
LeftShoulder	l_shoulder	Linkes Schultergelenk
RightShoulder	r_shoulder	Rechtes Schultergelenk
LeftElbow	l_elbow	Linkes Ellenbogengelenk
RightElbow	r_elbow	Rechtes Ellenbogengelenk
LeftWrist	l_wrist	Linkes Handgelenk
RightWrist	r_wrist	Rechtes Handgelenk
LeftHip	l_hip	Linkes Hüftgelenk
RightHip	r_hip	Rechtes Hüftgelenk
LeftKnee	l_knee	Linkes Kniegelenk
RightKnee	r_knee	Rechtes Kniegelenk
LeftAnkle	l_ankle	Linkes Fußgelenk
RightAnkle	r_ankle	Rechtes Fußgelenk
LeftMetatarsal	l_metatarsal	Wird hier als linker Fuß genutzt
RightMetatarsal	r_metatarsal	Wird hier als rechter Fuß genutzt

Tabelle 5.1.: Gelenke und Wirbel des MoCap-Skeletts

Gelenke und gibt Auskunft, ob das Skelett komplett mit Positionswerten besetzt ist.

Tabelle 5.1 zeigt eine Liste aller Gelenke der Datenstruktur. In den weiteren Spalten steht die H-Anim-Bezeichnung sowie eine kurze Erläuterung.

5.5. Das Motion Capturing Software-Modul

Der folgende Abschnitt beschreibt Aufbau und Funktion des Motion Capturing Software-Moduls (kurz MoCap-Modul).

5.5.1. Einführung

Das MoCap-Modul ist die zentrale Komponente des Systems. Erst durch dieses Modul wird aus dem Tracking-System ein Motion Capturing-System. Es kapselt alle benötigten Funktionalitäten des Motion Capturing-Systems, die über die ursprünglichen Fähigkeiten von EOS hinausreichen. Durch das Komponentendesign ist eine Weiterentwicklung sowohl von EOS als auch des Motion Capturing-Systems weitgehend unabhängig voneinander möglich. Da EOS in C++ entwickelt wird, basiert die Entwicklung des MoCap-Moduls ebenfalls auf dieser Programmiersprache. Dies trifft auch für die bereits beschriebene Skelett-Datenstruktur zu.

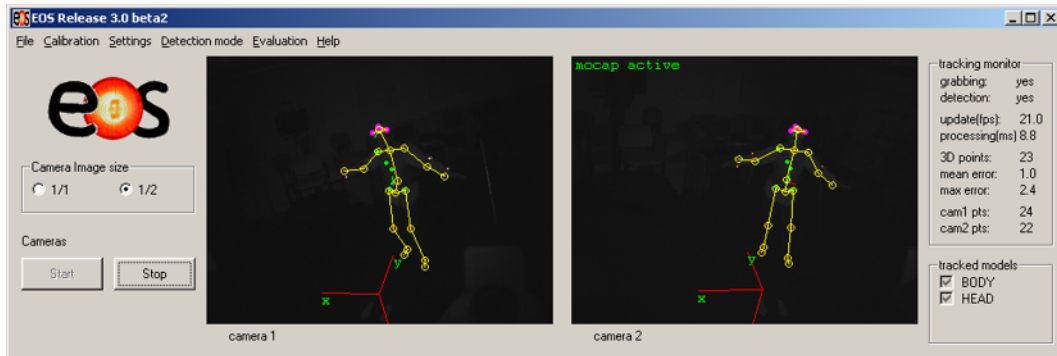


Abbildung 5.8.: Graphische Benutzerschnittstelle von EOS mit Einblendung der Resultate des MoCap-Moduls

Wie bereits dargestellt, erhält das Modul die Positionsdaten der Marker sowie die Parameter der EOS-Modelle per Parameterübergabe. Zusätzlich wird noch ein Parameter für einen graphischen Kontext übergeben. Dieser Parameter wird vom MoCap-Modul lediglich dazu verwendet, eine graphische Ausgabe der Ergebnisse in der EOS-Software zu erzeugen (siehe Abbildung 5.8). Für das Motion Capturing wird der zusätzliche Parameter nicht benötigt.

Hauptaufgabe des MoCap-Moduls ist die Erfassung der Bewegungsdaten. Dazu greift es auf die in 5.4 beschriebene Skelett-Datenstruktur zurück. Für jeden vom System verarbeiteten Frame generiert das Modul ein solches Skelett und „füllt“ es mit Gelenkpositionen. Dazu müssen aus den Markerpositionen die nötigen Gelenkpositionen bestimmt werden (skeleton fitting). Die Position der einzelnen Gelenke wird relativ zu dem Referenzkoordinatensystem von EOS gespeichert. Die erfassten Bewegungsdaten können zum Abschluss der Verarbeitungen an ein Folge-System (z.B. ein Rendering-System, das die Bewegungsdaten auf einen Avatar abbildet) versendet werden. Eine Zusatzfunktion des Moduls ist der Export der Bewegungsdaten in eine Datei.

Um ordnungsgemäß zu funktionieren, muss das System konfiguriert werden. Abschnitt 5.5.3 beschreibt die Konfigurationsmöglichkeiten des Systems. Dazu verfügt das MoCap-Modul über eine eigene Benutzerschnittstelle.

5.5.2. Skeleton Fitting

Skeleton Fitting beschreibt die Zuordnung der einzelnen Marker zu dem virtuellen Skelett. Die Abbildung 2.11 auf Seite 20 zeigt in der Mitte des Bildes, wie man sich das Einpassen (eng.: to fit) vorstellen kann.

Das MoCap-Modul ist für dieses Fitting zuständig. Um die Prozedur zu vereinfachen, sind die Marker entsprechend auf dem MoCap-Anzug befestigt. Die Verwendung von EOS-Modellen beschleunigt den Vorgang nochmals.

Das MoCap-Modul geht wie folgt vor, um die Positionen der Gelenke zu bestimmen:

Zuerst wird aus dem Kopf-Modell die Position sowie dessen Orientierung ausgelesen.

Der zweite Schritt verwendet die Informationen des Körper-Modells zur Berechnung der Schultern und Hüften. Weiter werden unter zu Hilfenahme der gerade bestimmten Positionen die Wirbel der Wirbelsäule vom Hals an abwärts bestimmt, die von der Skelett-Datenstruktur benötigt werden.

Um das Skelett zu vervollständigen, werden anschließend die Arme sowie die Beine erfasst und die Position der Gelenke bestimmt. Das Erkennen von Armen und Beinen wird nicht über EOS-Modelle realisiert. Stattdessen werden die Arme bzw. Beine als kinematische Ketten betrachtet. Mit Hilfe eines Kugelschalenmodells versuchen die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen eine vollständige Kette zu erfassen.

Zu diesem Zeitpunkt ist das Skelett theoretisch vollständig. Da sich allerdings am ersten Prototyp gezeigt hat, dass die Resultate nicht zufriedenstellend sind, wurde das System um eine Plausibilitätsprüfung für die einzelnen Gelenke des Skeletts erweitert. Falsch erkannte Gelenkpositionen können mit dieser Methode eliminiert werden.

Bei der Testphase stellte sich heraus, dass eine Betrachtung nur des aktuellen Frames nicht genügt, um ausreichend gute Resultate zu liefern. Das MoCap-Modul verfügt daher über die Fähigkeit, Gelenkpositionen aus vorangegangenen Frames zu berücksichtigen. Speziell für eine bessere Erfassung der Arme kann eine Verwendung von inverser Kinematik zugeschaltet werden.

Für die einzelnen Schritte des Zuordnungsprozess sind jeweils eigene Algorithmen entwickelt worden. Diese Algorithmen werden im Abschnitt 5.6 vorgestellt.

5.5.3. Konfiguration

Komplexe Motion Capturing Systeme funktionieren nicht „von sich aus“ („out of the box“). Stattdessen müssen sie konfiguriert werden. Da das hier entwickelte System auf Komponenten basiert, ist auch die Konfiguration komponentenbasiert. Die Konfiguration wird für die zwei Hauptkomponenten getrennt vorgenommen. Dies bedeutet, das EOS getrennt von dem MoCap-Modul konfiguriert wird.

Zur Konfiguration von EOS werden die von EOS zur Verfügung gestellten Methoden verwendet. Zu den in EOS konfigurierbaren Parameter zählen:

- Kameraparameter und deren Ausrichtung.
- Kalibrierung des Tracking-Systems.
- Definition des Referenzkoordinatensystems.
- Anlernen der Modelle von Weste und Schildkappe.
- Einstellung der Empfindlichkeitsparameter.

Um ordnungsgemäß zu funktionieren, sind im Mocap-Modul die folgenden Parameter zu konfigurieren:

- Ein Offset für die Position des Kopfes.
- Anpassen der Rotation des Kopfes.
- Der Abstand zwischen folgenden Marker jeweils für die linke und die rechte Körperseite: Schulter - Ellenbogengelenk, Ellenbogengelenk - Handgelenk, Hüfte - Kniegelenk, Kniegelenk - Fußgelenk, Fußgelenk - Fuß.
- Die Empfindlichkeit der Algorithmen getrennt für Arme und Beine.
- Empfindlichkeit für die Filterung von falschen Markerpositionen speziell für die Weste.
- Die Parameter für die Behandlung von Vergangenheitsdaten:
 - Tiefe der Vergangenheitsanalyse. Ein Wert ≤ 0 deaktiviert die Funktion.
 - Maximale Veränderung der Gelenkbewegung pro Frame; getrennt für: Kopf-, Körper-, Ellenbogengelenk-, Handgelenk-, Kniegelenk-, Fußgelenk- sowie Fußbewegung.
- Aktivieren der inversen Kinematik.

Die wichtigsten Parameter für die Nutzung des Motion Capturing-Systems können über eine graphische Benutzerschnittstelle verändert werden. Die übrigen Einstellungen können nur in der Konfigurationsdatei verändert werden und werden erst bei einem Neustart des Systems bzw. nach einem erneuten Laden der Konfiguration aktiv. Für die meisten Einsatzgebiete dieses Systems ist dies allerdings nicht nötig, da sie bereits mit brauchbaren Standardwerten vorbelegt sind.

Das System bietet die Möglichkeit, verschiedene MoCap-Modul-Konfigurationen zu laden, um zwischen verschiedenen Akteuren zu wechseln. Die Veränderung der EOS-Konfiguration wird nur benötigt, wenn sich der Aufbau (Kameraausrichtung, Referenzkoordinatensystem, Objekte im Aktionsbereich) verändert. Lediglich wenn die Akteure einen unterschiedlichen Körperbau besitzen, kann eine neue Anlernung des Körpermodells (Weste) notwendig sein.

5.5.4. Datenexport

Neben der Möglichkeit die Bewegungsdaten zu anderen Anwendungen zu versenden, bietet das MoCap-Modul den Export der Daten in eine Datei an. Vorteil des Datenexports ist eine Nutzung der Daten unabhängig von einer Motion Capturing-Session. Die Daten können in andere Anwendungen importiert und beliebig oft abgespielt werden.

Bei dem abgespeicherten Datenformat handelt sich um ein einfaches RAW-Format (siehe Anhang E.7), das dem CSM Datenformat (siehe Anhang E.3) ähnlich ist. Es werden lediglich die einzelnen Gelenkpositionen gespeichert. Auf eine Speicherung der Skeletbeschreibung wird verzichtet.

5. Implementierung

Der Aufbau der Datei ist wie folgt: Der Vorspann der Datei (header) beginnt mit einem Kommentar des MoCap-Moduls, der eine kurze Erklärung des Dateiformats enthält.

Die erste Datenzeile enthält die Information, wie viele Skelett-Datensätze exportiert wurden. Die nachfolgenden Zeilen stehen jeweils für ein Gelenk. Jede dieser Zeilen besteht aus drei Zahlenwerten, die die Position des Gelenkes gegenüber des definierten Referenzkoordinatensystems repräsentieren. Die Werte für X-, Y- sowie Z-Koordinaten sind durch ein Leerzeichen getrennt. Die Reihenfolge der Gelenke in einem Skelett-Datensatz ist fest vorgegeben und wird in der Datei automatisch dokumentiert.

Um die Echtzeitfähigkeit des Systems nicht zu beeinträchtigen, werden die Bewegungsdaten nicht kontinuierlich während des Aufnahmevorgangs auf einen Datenträger geschrieben. Statt dessen werden die einzelnen Skelett-Objekte in einem Speicherbereich der Anwendung gesammelt.

Bevor das Sammeln der Daten beginnt, kann der Nutzer den Pfad der Exportdatei bestimmen. Auch die Anzahl der zu speichernden Datensätze kann beeinflusst werden. Start sowie Konfiguration des Exportvorgangs können mit Hilfe der graphischen Benutzeroberfläche gesteuert werden.

Bei diesem Vorgehen muss allerdings eine Obergrenze für die maximal zu sammelnden Datensätze vorgegeben werden. Ist diese erreicht, werden die Daten in einem einzigen Schreibvorgang exportiert. Je nach Menge der Datensätze sowie der Art des gewählten Datenträgers kann es hier zu Verzögerungen kommen, die die Echtzeitfähigkeit beeinträchtigen. Nach dem Speichervorgang kehrt das System zur normalen Betriebsweise zurück und liefert wieder Live-Informationen.

5.5.5. Graphische Benutzerschnittstelle

Um dem Nutzer des Systems die Arbeit zu erleichtern, verfügt das MoCap-Modul über eine eigene graphische Benutzerschnittstelle. Sie ermöglicht das Einlesen sowie die Anzeige aller Parameter des MoCap-Moduls. Weiter wird die Möglichkeit geboten, die wichtigsten Parameter zu verändern. Zugunsten der Benutzerfreundlichkeit gibt es für selten zu verändernde Parameter keine graphische Änderungsmöglichkeit.

Das MoCap-Modul stellt seine graphische Benutzerschnittstelle getrennt von EOS, in einem eigenen Fenster dar. Abbildung 5.9 zeigt das Hauptfenster.

Im Folgenden werden die Funktionen der graphischen Benutzerschnittstelle beschrieben:

5.5.5.1. Einlesen einer Konfigurationsdatei

Durch das Einlesen der Konfigurationsdatei kann das System auf unterschiedliche Akteure eingestellt werden. Betätigt man den „Load from file“-Button, so öffnet sich ein standardisierter „Open“-Dialog. Es wird eine Vorauswahl der Dateien mit der Erweiterung *.mocap* getroffen.



Abbildung 5.9.: MoCap Haupt-Benutzerschnittstelle

5.5.5.2. Speichern einer Konfiguration

Durch drücken des „Save“-Buttons wird die aktuelle Konfiguration in eine Datei gespeichert. Vorgenommene Konfigurationsänderungen des Nutzers werden berücksichtigt. Es wird der standardisierte „Save“-Dialog aufgerufen. Nach der Wahl eines Dateinamens werden die Konfigurationsdaten unter dem gewählten Dateinamen gespeichert.

5.5.5.3. Reset der Konfiguration auf Standardwerte

Betätigt der Nutzer den „Reset“-Button so werden alle Parameter auf einen definierten Ausgangswert gesetzt. Auch der Bezug zu einer vorher eingelesenen Konfigurationsdatei geht verloren. Sind Parameter manuell in der Konfigurationsdatei verändert worden, so müssen diese auch wieder per Hand in einer neuen Konfigurationsdatei verändert werden.

Bevor die Konfiguration zurückgesetzt wird, erfolgt eine Sicherheitsabfrage. Hier ist es möglich, den Vorgang zu bestätigen oder abzubrechen.

5.5.5.4. Exportieren von Bewegungsdatensätzen

Diese Option ermöglicht es, Skelett-Datensätze in eine Datei zu exportieren. Zur Konfiguration und zum Start des Exportvorgangs betätigt man den „Export data“-Button.

Ein „Save“-Dialog fragt zuerst nach einem Dateinamen für den Export. Wird ein Name gewählt, folgt eine Abfrage, wie viele einzelnen Datensätze exportiert werden sollen.

5.5.5.5. Einsehen aller Parameter

Die Option öffnet ein neuen Dialog. Der Dialog präsentiert alle vom MoCap-Modul verwendeten Parameter und deren aktuellen Werte. Nach einer Veränderung von Werten durch die graphische Benutzerschnittstelle lässt sich mit Hilfe des Dialogs eine Kontrolle der Werte durchführen.

5. Implementierung

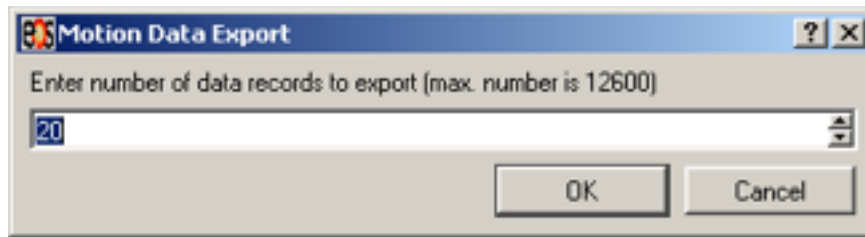


Abbildung 5.10.: Eingabe der Anzahl der zu exportierenden Datensätze. Die maximale Anzahl zu exportierender Datensätze wird vom System automatisch berechnet

Neben dem Bestätigen des Dialogs mit dem „OK“-Button, ist es auch möglich alle Parameter mit den dazugehörigen Werten an einen Drucker zu senden. In Abbildung 5.11 ist eine Darstellung mit geladener Konfigurationsdatei zu sehen.

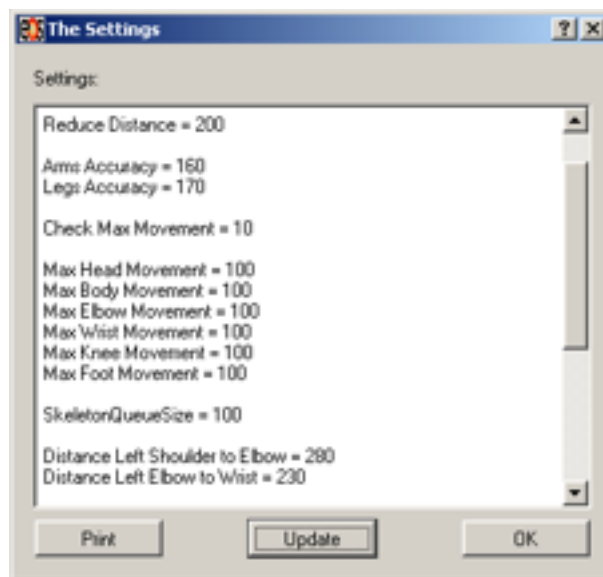


Abbildung 5.11.: Anzeige aller Konfigurationsparameter

5.5.5.6. Veränderung der Genauigkeitseinstellung

Die Parameter „arm accuracy“ und „leg accuracy“ beeinflussen die Toleranz bei der Erkennung von Armen und Beinen. Die Werte für Arme und Beine können getrennt voneinander verändert werden. Bei der Toleranz handelt es sich um eine Angabe in Millimetern.

Um den Dialog zu öffnen, muss der Button mit der Aufschrift „Adjust accuracy“ betätigt werden. Die Abbildung 5.12 zeigt den Dialog.

5. Implementierung

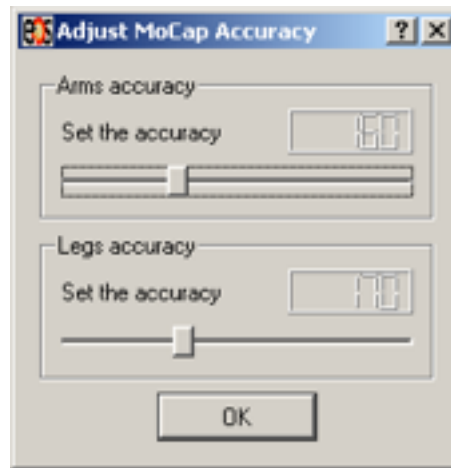


Abbildung 5.12.: Konfiguration der Algorithmen-Toleranz

5.5.5.7. Setzen einer Kopforientierung

Wie bei der Beschreibung des MoCap-Anzuges erläutert wurde, ist es ein Problem die exakte Orientierung des Kopfes festzustellen. Betätigt man den „Set head rotation“-Button, kann man in einem Dialog die Orientierung des Kopfmodells beeinflussen. Mit drei Schieberegler kann der Rotations-Offset für die X-, Y-, Z-Achse verändert werden.

Die Angaben werden als Eulerwinkel spezifiziert. Intern werden die Werte als Rotationsmatrizen gespeichert. Die Eingabe der Werte als Eulerwinkel fällt den meisten Nutzern allerdings leichter.

Eine Darstellung des Dialogs findet sich in Abbildung 5.13

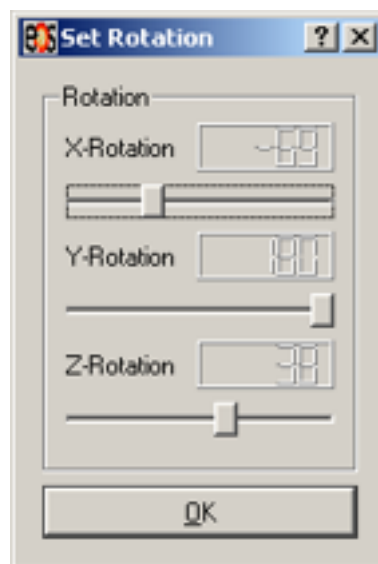


Abbildung 5.13.: Anpassen der Kopfrotation

5.5.5.8. Einstellung und Veränderung der Markerabstände

Durch Betätigen des „Adjust distances“-Buttons können die vom System benötigten Markerabstände für die Arm- und Beinerkennung eingestellt bzw. nachjustiert werden.

Es wird ein Dialog mit horizontalen Schiebereglern eingeblendet. Jeder der Schieberegler steht für einen Abstand. Statt die Werte mühsam einzutippen, genügt es die Regler zu verwenden. Da linke und rechte Körperseite meist ähnliche Werte aufweisen existiert zusätzlich die Möglichkeit, alle Wert von links nach rechts (und umgekehrt) zu kopieren. Die Distanzangaben werden in Millimetern eingegeben.

Ein Screenshot des Dialoges ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

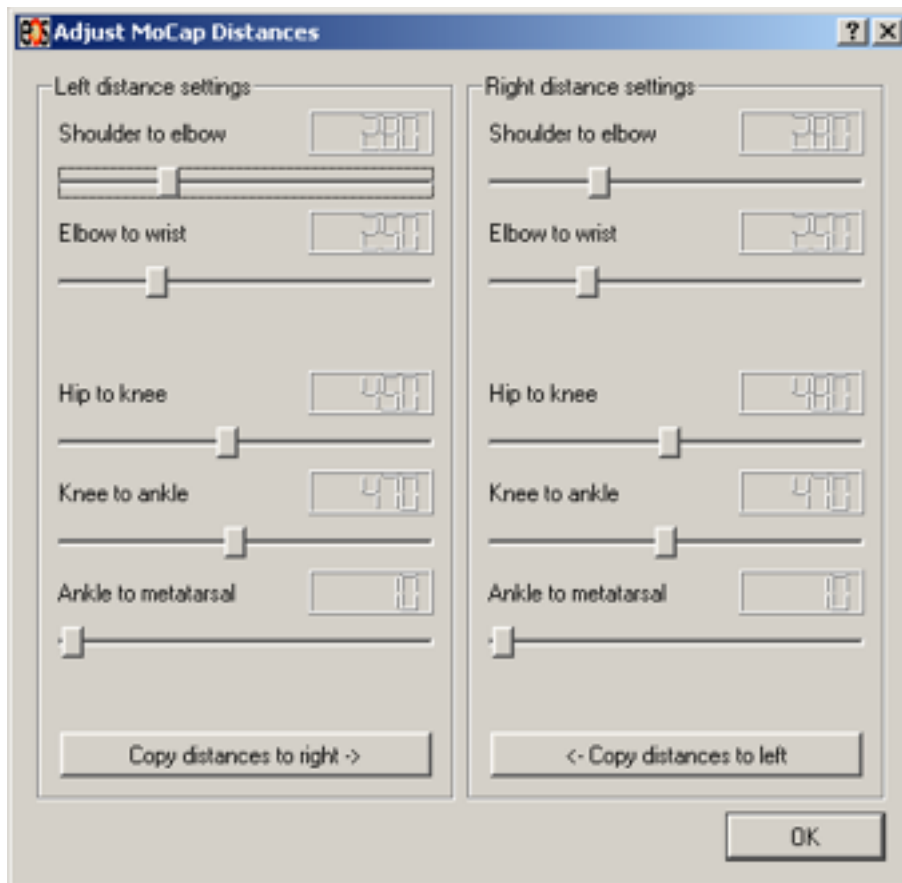


Abbildung 5.14.: Konfiguration der Markerabstände

5.5.6. Behandlung EOS spezifischer Probleme

Der Einsatz von EOS bringt nicht nur Vorteile, insbesondere Die Verwendung von EOS-Modellen hat auch Nachteile. Ein falsch erkanntes Körpermodell bereitet dem MoCap-Modul Probleme mit der Dedektion von Armen und Beinen.

Es gilt zu entscheiden, ob trotz falscher oder nicht erkannter Modelle eine weitere Verarbeitung sinnvoll ist, oder ob der Bearbeitungsvorgang abgebrochen werden soll.

Nachfolgend werden die möglichen problematischen Situationen und die gefundenen Lösungen beschrieben.

5.5.6.1. EOS liefert kein Kopfmodell

Tritt der Fall ein, das EOS das Kopfmodell nicht erkennen konnte, so wird versucht die Daten eines vorherigen Durchlaufes zu verwenden. Da diese Situation sehr selten eintritt ist die Vorgehensweise legitim.

Ein Problem können allerdings die Markerpositionen des Kopfmodells im aktuellen Frame darstellen. Wird das Modell nicht erkannt, gehen die Marker in den Erfassungsprozess für Arme und Beine ein. Diese werden in beschriebenen Fall an das MoCap-Modul übergeben, statt wie sonst ausgefiltert zu werden.

Das Problem, dass durch die zusätzlichen Marker auftreten kann, ist folgendes: Die Markerpositionen können die Erkennung der Arme stören. Dies geschieht, da die Abstände zwischen Schultermarker und Kopfmarker Konstellation eines gültigen Arm- oder Beinkandidaten ergeben können.

5.5.6.2. EOS liefert kein Körper-Modell

Ist EOS nicht in der Lage, das Körpermodell zu erkennen, muss die Verarbeitung abgebrochen werden. Ohne das Körpermodell können mit dem hier verfolgten Ansatz nicht genügend Gelenkpositionen erfasst werden. Eine Konstruktion mit vergangenen Modell-daten wäre nicht genau genug, da zu viele Gelenke des Skeletts betroffen wären.

Um dennoch die Rückgabe eines Skelettdatensatzes zu garantieren, sendet das MoCap-Modul den letzten validen Bewegungsdatensatz.

5.5.6.3. EOS liefert ein falsches Körpermodell

Eine sehr störende Situation ergibt sich, wenn EOS ein Körpermodell erkannt hat, dieses aber offensichtlich falsch ist.

EOS erkennt zwar ein Modell, allerdings wurden zur Erkennung die falschen Marker herangezogen. In dieser Situation sind die Abstände von hinreichend vielen Markern zueinander den eigentlichen Abständen der Modellmarker so ähnlich, dass sie als Modell erkannt werden. In diesem Fall berechnen die Algorithmen falsche Gelenkpositionen.

Leider konnte kein optimaler Lösungsweg für diese Situation gefunden werden. Um dem Problem aus dem Weg zu gehen, ermittelt das MoCap-Modul für jedes Körpermodell eine Bewertung. Nur wenn ein Körpermodell als valide eingestuft wird, wird die Bearbeitung des aktuellen Frames fortgesetzt.

Ein Problem besteht vor allem in der Entscheidung, wann das Modell als ungültig zu verwerfen ist. Die hier verwendete Lösung geht von einer Beschränkung der Bewegungsfreiheit des Akteurs aus. Bei Tests des System hat sich gezeigt, dass das Modell meist irrtümlich um 90 Grad oder mehr gekippt erkannt wird. Dies wird verwendet, um ein Modell als ungültig zu klassifizieren, sobald sich die Neigung der Y-Achse des lokalen Modell-Koordinatensystems um mehr als 60 Grad von der Neigung der Z-Achse

des EOS-Referenzkoordinatensystems unterscheidet. Der Akteur kann sich also nicht beliebig weit neigen.

Der Fall einer falschen Kopferkennung wird nicht gesondert behandelt, da Ausreißer durch die Analyse der Kopfposition im Zeitablauf bereinigt werden können.

5.5.6.4. Probleme der Modellerkennung

Ein Vorteil des EOS-Systems ist, dass es zur Modellerkennung lediglich drei Marker benötigt. Trotzdem kennt es Modelle mit mehr Markern. Wie in Anhang A beschrieben, ist vor allem die Tatsache, dass EOS Modelle mit mehr Markern auch dann erkennen kann, wenn lediglich drei Marker in den Kameras sichtbar sind, ein besonderer Vorteil des Systems.

Sollten solche „Modellmarker“ zur Modellerkennung nicht verwendet werden, werden die entsprechenden Markerpositionen an das MoCap-Modul übergeben. Dort stören sie bei der Erfassung der Gelenke von Armen und Beinen. Dieser Fall tritt ein, wenn z.B. die Weste bei einer Bewegung so verdreht oder gestreckt bzw. gestaucht wird, dass sich die Anordnung der Marker zu sehr verändert. Weiteres zu dieser Problematik ist ebenfalls im Anhang A beschrieben.

Die hier entwickelte Lösung beruht auf einer Filterung aller Markerpositionen vor dem eigentlichen Erkennungsprozess. Auf Grund der Eigenschaften der EOS-Modelle ist zumindest die theoretische Position des bzw. der „ausgerissenen“ Marker bekannt. Ein Filter sucht in der näheren Umgebung aller Modellmarker (Positionsangaben aus den Modellinformationen entnommen) nach einer Markerposition in der Liste der „freien“ Marker. Wird eine Markerposition gefunden, dann wird diese aus der Liste entfernt. Das MoCap-Modul bietet einen Parameter, der die Größe der zu durchsuchenden Umgebung beeinflusst.

5.6. Algorithmen

Der folgende Abschnitt beschreibt die Algorithmen, die eingesetzt werden, um die Bewegungsdaten aus den vom EOS-Tracking-System gelieferten Informationen zu ermitteln.

Bei der Anordnung der folgenden Unterabschnitte wurde die Reihenfolge so gewählt, dass sie der Reihenfolge der Bearbeitung im MoCap-Modul entspricht.

Der letzte Unterabschnitt beschreibt die entwickelte Helferklasse zur Transformation der Markerpositionen zwischen dem Koordinatensystem des Kopf- bzw. Körpermodells und dem Referenzkoordinatensystem.

5.6.1. Bestimmung der Kopfdaten

Dies ist der einfachste Algorithmus im System. Ist das Kopfmodell vorhanden, wird dessen Position abgefragt. Wurde das Modell nicht erkannt, wird ein Wert aus einem vergangenen Frame verwendet. Bei der Kopfposition handelt es sich um den geometrischen

Schwerpunkt des Modells, der mit einem Offset versehen wird. Die berechnete Position wird im virtuellen Skelett als Skulbase abgespeichert. Zusätzlich wird die Rotation des Modells im MoCap-Modul gespeichert um die Orientierung des Kopfs festzuhalten. Anpassungen der Orientierung durch den Nutzer werden berücksichtigt.

5.6.2. Bestimmung von Schulter- und Hüftpositionen

Die Positionen von Schultern und Hüften werden mit Hilfe des Körpermodells bestimmt. Wie schon erwähnt, kennen EOS-Modelle die Positionen der Marker, die das Modell bilden. Entsprechend sind Marker für Schultern und Hüften auf der Weste angebracht. Der Algorithmus durchläuft alle Marker des Modells und identifiziert die Schulter- sowie die Hüftmarker. Da zur Bestimmung von Schultern und Hüften die Markerpositionen aus dem Modell extrahiert werden, spielt es keine Rolle, ob der entsprechende Marker zur Erkennung des Modells verwendet wurde. Der letzte Schritt vor der Speicherung der Positionen der Marker als Gelenkpositionen im virtuellen Skelett, ist eine Transformation der Positionskordinaten ins Referenzkoordinatensystem³. Dies ist nötig, da EOS-Modelle die Position „ihrer“ Marker ausschließlich bezüglich ihres lokalen Koordinatensystems kennen.

Zu erwähnen bleibt noch, wie der Algorithmus die Marker von Schultern und Hüften identifiziert. Bei den Markern für die Schultern handelt es sich um die beiden obersten Marker der Weste. Die beiden untersten Marker repräsentieren die Hüften. Zur Identifizierung wird das lokale Koordinatensystem verwendet. Da dieses entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 5.3.3 ausgerichtet ist, wird davon ausgegangen, dass wie immer sich der Akteur im Raum bewegt, die Y-Koordinaten der beiden oberen Marker bezüglich des lokalen Koordinatensystems am größten sind. Der umgekehrte Fall tritt für die Marker an den Hüften ein, hier wird davon ausgegangen, dass die Y-Werte am kleinsten sind.

5.6.3. Berechnung der Wirbelpositionen

Für die Erkennung der Wirbel (siehe Tabelle 5.1) existieren auf der Weste keine Marker. Stattdessen werden deren Positionen berechnet. Da aufgrund des starren Körpermodells keine Bewegungen innerhalb des Oberkörpers erfasst werden können, wird auf eine anatomische korrekte Bestimmung der Wirbelpositionen verzichtet.

Die Bestimmung des HumanoidRoots⁴ sowie des Sacroiliac-Wirbels wird durch ein Offset vorgenommen. Dieses Offset beschreibt die Positionsdifferenz von dem Ursprung des lokalen Koordinatensystems zu den Wirbeln. In der hier vorliegenden Implementierung werden HumanoidRoot und Sacroiliac die gleiche Position zugewiesen. Beide

³Um den Text einfacher zu gestalten, wird im Folgenden das Referenzkoordinatensystem als globales und die Koordinatensysteme der Modelle als lokale Koordinatensysteme bezeichnet.

⁴HumanoidRoot ist eigentlich kein Wirbel. Die Spezifikation des H-Anim Standards verwendet diesen Punkt als Ursprungspunkt des Skeletts. Er ist laut Spezifikation der Ursprung des lokalen Koordinatensystems eines Avatars.

Punkte wurden lediglich implementiert, um der Spezifikation zu genügen und eine dahingehende Erweiterung des Systems zu ermöglichen.

Als nächstes wird die Position des Halswirbels C7 berechnet, wozu die Positionen der Schultern herangezogen werden. Da sich der Wirbel anatomisch ungefähr auf dem halben Weg von der einen zur anderen Schulter befindet, wird hier diese Näherung verwendet.

Ebenfalls aufgrund der starren EOS-Modelle können die restlichen beiden Wirbel T10 und L15 durch einfache geometrische Berechnung bestimmt werden. Die Berechnung der jeweiligen Position gelingt durch die Verbindung des Halswirbels C7 mit dem Sacroiliac mittels einer Geraden. Dabei werden die Positionen der Wirbel in X-Richtung an der Geraden ausgerichtet. Die Y-Richtung wird für jeden Wirbel durch den Abstand von C7 zu Sacroiliac, multipliziert mit einem vorgegebenen Prozentsatz angegeben. Um eine geringfügige Biegung der Wirbelsäule zu simulieren, werden die Wirbel entsprechend ihrer Position in der Wirbelsäule in Z-Richtung verschoben.

5.6.4. Erfassung von Armen und Beinen

Die Erfassung der Gelenkpositionen von Armen und Beinen ist der aufwendigste Bestandteil des Motion Capturing-Systems. Ziel der nachfolgend beschriebenen Teilalgorithmen ist eine Erfassung der folgenden Gelenkpositionen (jeweils für rechte und linke Seite des Körpers):

- Ellenbogengelenk
- Handgelenk
- Kniegelenk
- Fußgelenk
- Fußspitze⁵

An allen aufgezählten Gelenken sind Marker befestigt. Für die Erkennung der Gelenke werden die bei der Konfiguration des Motion Capturing-Systems gemessenen Abstände zwischen den entsprechenden Markern verwendet. Der Algorithmus versucht mit Kugelschalen die einzelnen Gelenke zuzuordnen. Damit dieses Prinzip funktioniert, verwendet der Algorithmus Informationen bezüglich der Anordnung der Gelenke im menschlichen Skelett.

5.6.4.1. Das Kugelschalenmodell

Eine Kugelschale wird definiert durch zwei Kugeln mit gemeinsamen Zentrum und unterschiedlichen Radien.

Das Kugelschalenobjekt verwaltet daher zwei Kugelobjekte, welche die beiden Kugeln repräsentieren.

⁵Die Fußspitze ist anatomisch natürlich kein Gelenk; der Algorithmus kann die Position als Endpunkt im Skelett genau so behandeln wie z.B. das Handgelenk.

5. Implementierung

Vorab soll noch kurz erläutert werden, wozu die Kugelschalen benötigt werden: Beispielweise wird der Ellenbogen in einer Kugelschale um die Schulter gesucht. Die Länge des Oberarms und ein Toleranzwert definieren deren Größe (inner Radius = Oberarmlänge - Toleranz; äußerer Radius= Oberarmlänge + Toleranz).

Ein Kugelobjekt hat die Möglichkeit festzustellen, ob sich eine vorgegebene 3D-Position innerhalb, außerhalb oder auf der Kugel befindet. Die Methoden *contains()* (eng.: enthält) und *isOnEdge()* (eng.: befindet sich auf dem Rand) implementieren diese Funktionalität. Beide Methoden erwarten als Parameter eine 3D-Position und liefern einen Wahrheitswert als Resultat. Der Rand der Kugel wird von *contains()* wie das Innere der Kugel bewertet. Abbildung 5.15 stellt beiden oben beschriebenen Situationen vereinfacht in Fläche dar.

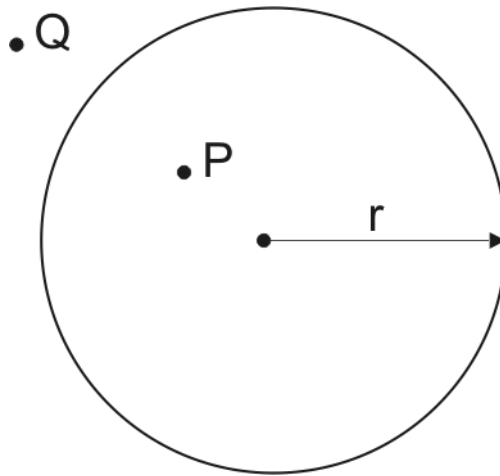


Abbildung 5.15.: Vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Kugel: Punkt *P* liegt innerhalb der Kugel (*contains(P) = true*), Punkt *Q* befindet sich außerhalb (*contains(Q) = false*)

Um ein Kugelobjekt zu erzeugen, wird eine 3D-Position für das Zentrum der Kugel sowie ein Zahlenwert für den Radius benötigt.

Das Kugelschalenobjekt verfügt ebenfalls über die beiden Methoden. Die Klasse leitet einen Aufruf von *contains()* bzw. *isOnEdge()* an die beiden Kugelobjekte weiter. Die Logik der Kugelschale wertet die jeweiligen Ergebnisse aus und liefert die entsprechenden Wahrheitswerte zurück.

Die Logik des *OnEdge*-Tests ist relativ einfach. Liegt die 3D-Position auf einer der beiden Kugelhüllen, wird von *isOnEdge()* *true*, ansonsten *false* zurückgeliefert. Die Logik der *contains()* Methode ist dagegen etwas aufwendiger: Die Kugelschale muss die folgenden drei möglichen Konstellationen bewerten (die Ränder zählen dabei zum Inneren der Kugelschale):

1. Die 3D-Position befindet sich im Inneren beider Kugeln. Es wird *false* zurückge-

5. Implementierung

- geben, da die innere Kugel (bis auf den Rand) nicht zum Inneren der Kugelschale zählt.
2. Die 3D-Position befindet sich innerhalb der äußeren, nicht aber innerhalb der inneren Kugel. In diesem Fall wird *true* zurückgeliefert.
 3. Die 3D-Position liegt außerhalb beider Kugeln und daher nicht innerhalb der Kugelschale. Die Methode liefert *false* zurück.

Abbildung 5.16 stellt die drei Konstellationen vereinfacht dar.

Um ein Kugelschalenobjekt zu erzeugen, wird eine 3D-Position für das Zentrum und zwei Zahlenwerte für die Radien der Kugeln angegeben. Die Kugelschale weist den kleineren der beiden Radien automatisch der inneren und den größeren der äußeren Kugel zu.

Zu Optimierungszwecken wurde darauf geachtet, dass erst die Konstellation bezüglich der äußeren Kugel getestet wird. Sollte die 3D-Position nicht in dieser Kugel liegen, wird die Bearbeitung abgebrochen. Erst wenn die Position innerhalb der äußeren Kugel liegt, wird auch der Test für die innere Kugel durchgeführt.

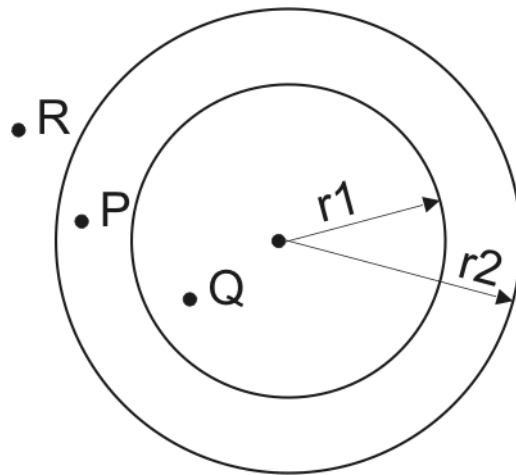


Abbildung 5.16.: Vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Kugelschalenfunktion: Punkt P liegt in der Kugelschale ($\text{contains}(P) = \text{true}$), Q und R gehören nicht zur Kugelschale ($\text{contains}(Q) = \text{contains}(R) = \text{false}$)

5.6.4.2. Datenstruktur für Arme und Beine

Zur Bestimmung der Position von Armen und Beinen müssen alle zugehörigen Gelenke korrekt erkannt werden. Um dies zu erreichen, wird die Information bezüglich der Anordnung der Gelenke im menschlichen Skelett verwendet. Für Arme und Beine wurden spezielle Datenstrukturen implementiert, die die jeweiligen Gelenkpositionen aufnehmen. Die Datenstruktur *Arm* kennt ein Schultergelenk, ein Ellenbogengelenk und ein Handgelenk. Entsprechend kann die Struktur *Leg* Positionsdaten für Hüft-, Knie und Fußgelenk sowie die Position des Fußes aufnehmen.

Eine Statusfunktion liefert erst dann den Wert *true* zurück, wenn alle Gelenke der jeweiligen Datenstruktur mit Positionsdaten besetzt sind. Die Struktur gilt dann als komplett.

5.6.4.3. Finden möglicher Kandidaten

Hilfsmittel zum Erfassen der Arm- und Beingelenke sind Kugelschalen und die beiden Datenstrukturen *Arm* und *Leg*. Aufgabe des Algorithmus ist zuallererst das Finden der Arme und Beine. Erst wenn diese gefunden sind, werden die entsprechenden Gelenkpositionen in der Skelett-Datenstruktur gespeichert.

Der Algorithmus ist so entworfen, dass zwischen Erkennung von Armen und Beinen nicht unterschieden wird. Auch eine Unterteilung in links und rechts wird nicht vorgenommen. Der Algorithmus bearbeitet ein Gelenk (linke bzw. rechte Schulter oder linkes bzw. rechtes Hüfte), das als Parameter übergeben wird. In den weiteren Ausführungen wird daher nur noch an einigen Stellen auf kleinere Unterschiede, vor allem in der Behandlung von Armen und Beinen, hingewiesen.

Der Algorithmus übernimmt einige Ideen, die hinter dem Begriff *Kinematische Kette* stecken. Ausgehend von einem Elterngelenk sucht der Algorithmus nach einem Kindgelenk.

Um das Kindgelenk zu finden, wird in einer Kugelschale gesucht. Das Zentrum der Kugelschale ist das Elterngelenk. Die beiden Radien der Kugelschale werden durch den Abstand des Markers am Elterngelenk zu dem Marker am Kindgelenk und dem Toleranzwert definiert. Für alle von EOS gelieferten Markerpositionen wird getestet, ob sie innerhalb der Kugelschale liegen. Ist dies für einen Marker der Fall, wird dieser als Kindgelenk akzeptiert. Im nächsten Schritt wird das Kindgelenk zum Elterngelenk und die Suche startet erneut.

Der Algorithmus startet jeweils am Fixgelenk (Schulter bzw. Hüfte) und endet, wenn die jeweilige Datenstruktur komplett ist. Konnte die Struktur nicht komplettiert werden, wird sie verworfen. Bei der Verarbeitung achtet der Algorithmus darauf, dass aus der Kette kein Ring entsteht. Jedes neue potentielle Kindgelenk wird darauf überprüft, ob es in der Kette bereits vorkommt. Sollte dies der Fall sein, wird es als Kandidat verworfen.

Theoretisch ist die Arbeit des Algorithmus hier beendet. Allerdings hat das Problem keine eindeutige Lösung. Aufgrund „freier“ Westen- oder Schildkappenmarker kann es vorkommen, dass bei der Suche nach einem Kindgelenk sich mehrere Kandidaten innerhalb der Kugelschale befinden. Aufgrund der anatomischen Bewegungsfreiheit des menschlichen Arms können hier keine Kandidaten a priori ausgeschlossen werden. Von hier an müssen verschiedene Pfade betrachtet werden. Für jeden neuen möglichen Pfad, wird eine neue Datenstruktur erzeugt. Die bis dahin gefundenen Elterngelenke werden entsprechend übernommen. Der Algorithmus muss jeden dieser Pfade verfolgen. Endet ein Pfad bevor die Struktur komplett ist, wird sie verworfen. Eine komplette Struktur wird hingegen akzeptiert.

Statt einem linken und einem rechten Arm (bzw. Bein) liefert der Algorithmus mehrere mögliche Kandidaten. Diese werden in vier Vektoren, jeweils einer für linken bzw. rechten Arm und jeweils einer für linkes bzw. rechtes Bein gespeichert. Im Idealfall enthält jeder

Vektor nur einen Kandidat.

5.6.4.4. Reduktion der Kandidatenanzahl

Ziel des Algorithmus ist es, jeweils nur einen linken und einen rechten Arm (bzw. Bein) zu erfassen.

Nachdem alle möglichen Kandidaten erkannt wurden, findet eine Reduktion der Anzahl der Kandidaten statt.

Leider konnte im Rahmen dieser Arbeit keine optimale Lösung zur Reduktion der Anzahl der Armkandidaten gefunden werden. Aufgrund der anatomischen Bewegungsfreiheit des Arms sind alle vom Algorithmus gefundenen Armkandidaten als gültig zu betrachten. Die Auswahl eines Arms pro Körperseite wird in 5.6.4.5 beschrieben.

Bei den Beinen kann dagegen eine Reduktion der Kandidatenanzahl erfolgen. Zur Reduktion werden zwei Informationen verwendet: Einerseits ist das menschliche Bein im Normalfall nicht so beweglich wie der Arm. Zweitens können durch den Systemaufbau Einschränkungen festgelegt werden:

- Das Kniegelenk darf nicht über dem Hüftgelenk liegen.
- Das Fußgelenk darf nicht über dem Kniegelenk liegen.
- Die Fußspitze muss vor dem Fersengelenk liegen.

Um die erforderlichen Tests durchzuführen, werden alle Positionen vom globalen ins lokale Koordinatensystem des Körpermodells transferiert. So ist gewährleistet, dass die Tests unabhängig von der Ausrichtung des globalen Koordinatensystems bzw. der Ausrichtung des Akteurs erfolgen.

5.6.4.5. Endgültige Auswahl

Letztendlich darf jeweils nur ein Arm bzw. ein Bein je Körperseite zur Bestimmung der Gelenkpositionen verwendet werden. Trotz der Reduktion der Kandidatenanzahl⁶, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht gewährleistet, dass nur noch eine Möglichkeit übrig ist.

Für Arme und Beine sind verschiedene Strategien realisiert, die jeweils einen Kandidaten pro Körperseite auswählen:

Bei den Armen wird der Kandidat ausgewählt, dessen Ellenbogen- und Handgelenk sich am weitesten vom Körper entfernt befinden.

Aus den Beinkandidaten wird der Kandidat gewählt, dessen Knie- und Fußgelenk am nächsten an der Verlängerung der Wirbelsäule nach unten liegen.

Wie auch bei der Reduzierung der Anzahl der Beinkandidaten werden die entsprechenden Positionen zum Vergleich in das lokale Koordinatensystem des Körpermodells

⁶Die Anzahl der Armkandidaten wurde nicht reduziert.

transferiert. Abschließend werden die Gelenkpositionen der einzelnen Gelenke in das virtuelle Skelett übernommen.

5.6.5. Skelettvalidierung

Bei der Erfassung der einzelnen Gelenke wird bereits darauf geachtet, dass nur gültige Gelenkpositionen gespeichert werden. Leider erweist sich diese lokale Betrachtung⁷ einer Gelenkposition als nicht ausreichend. Vor allem bei der Erfassung von Armen und Beinen werden teilweise falsche kinematische Ketten erzeugt. Die Ketten sind zwar komplett, aber nicht sinnvoll.

Um das Resultat des Algorithmus zu verbessern, werden die Gelenkpositionen des gesamten virtuellen Skeletts nachträglich untersucht. Wie bereits erwähnt, stoßen solche Tests bei den Armen aufgrund der anatomischen Bewegungsmöglichkeiten auf Grenzen. Für die Beine ließen sich dagegen geeignete Tests entwickeln.

Die zwei größten Probleme der Beinerkennung entstehen, wenn der Akteur in die Hocke geht, bzw. wenn das System für eine Körperseite kein Bein erkennt:

Geht der Akteur in die Hocke, so verändern sich sowohl die Markerabstände zwischen Hüft- und Kniegelenk, als auch zwischen Knie- und Fußgelenk (siehe zu dieser Problematik in 6.3.2). Das Resultat ist z.B. folgende komplette *Leg*-Datenstruktur: Linke Hüfte, rechtes Knie, linkes Fußgelenk und linker Fuß.

Um dieses Problem zu lösen, werden die Beine auf entsprechende Gelenkvertauschungen untersucht. Erkennt der Algorithmus eine solche Vertauschung, korrigiert er diese.

Findet das System nur ein Bein, kann es vorkommen, dass aufgrund eines hohen Toleranzwertes sowie der Reduktionskriterien des Algorithmus, die Gelenke der falschen Körperseite zugeordnet werden.

Die Lösung dieses Problems wird mit einer Einschränkung der erlaubten Bewegungsfreiheit realisiert. Um die eben beschriebene Situation auszuschließen, werden falsch zugeordnete Gelenke des Beins verworfen. Für den Test wird die Wirbelsäule imaginär nach unten verlängert⁸. Ein Gelenk wird verworfen, wenn es sich auf der anderen Seite der Wirbelsäulenverlängerung befindet als die zum Bein gehörende Hüfte.

Um auch für die übrigen Gelenke eine Möglichkeit der Gültigkeitsprüfung zu erhalten, wird auf Vergangenheitsinformationen zurückgegriffen.

Als letzte Optimierung wird speziell für die Arme inverse Kinematik eingesetzt. Ziel ist die Reduktion des „Springens“ der Ellenbogen.

5.6.5.1. Inverse Kinematik

Die Ellenbogenbänder sind mit fünf Markern ausgestattet. Dies bringt den Vorteil, dass die Ellenbogen und damit auch die Arme häufiger gefunden werden, als wenn beispiels-

⁷Betrachtung nur im jeweiligen Teilalgorithmus

⁸Genauer: Es wird eine Gerade vom Wirbel C7 durch HumanoidRoot erzeugt.

5. Implementierung

weise nur zwei Marker verwendet werden. Nachteil dieser Maßnahme ist, dass die erfasste Ellenbogenposition von einem zum anderen Marker hin und her springen kann. Um dieses Springen zu minimieren, wird inverse Kinematik eingesetzt.

Ziel ist die Berechnung der Ellenbogenposition. Pro Frame wird diese von dem hier integrierten Algorithmus berechnet. Die errechnete Position ersetzt die mittels Kugelschalen und Auswahlalgorithmus gefundene Gelenkposition.

Der benötigte Endeffektor der kinematischen Kette ist das linke bzw. rechte Handgelenk. Als Segmentabstände werden die Abstände zwischen Schulter- und Ellenbogenmarker sowie zwischen Ellenbogen- und Handgelenkmarker angegeben. Um eine eindeutige Lösung zu bestimmen, wird zusätzlich ein Zielpunkt zur Berechnung verwendet.

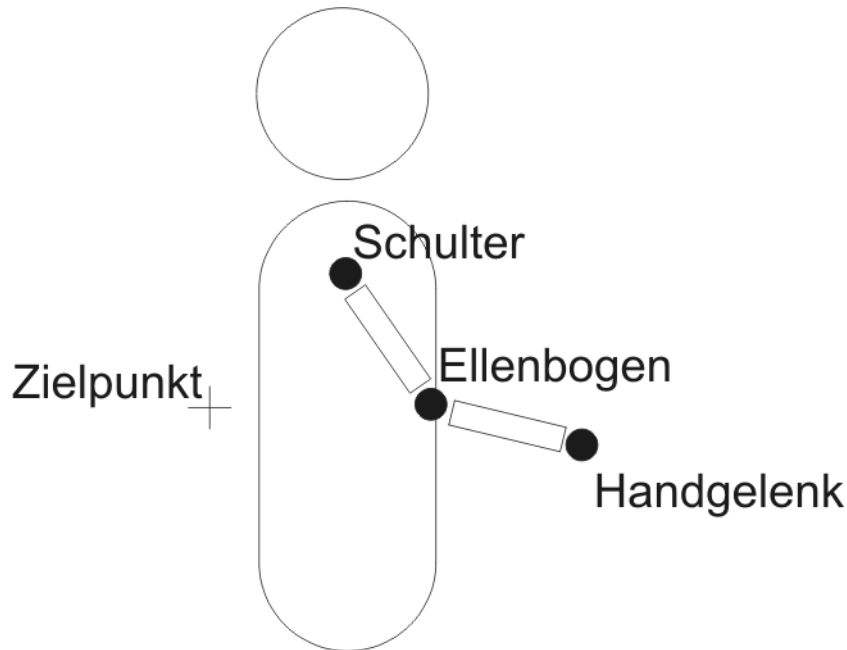


Abbildung 5.17.: Um die Position des Ellenbogengelenks zu bestimmen, wird inverse Kinematik eingesetzt; der Zielpunkt dient zur Bestimmung einer eindeutigen Lösung

Als Zielpunkt wird ein Punkt angenommen, der sich auf Höhe der bereits vorhandenen Ellenbogenposition befindet. Die beiden anderen Koordinaten sind: 30 cm hinter und 30 cm links, bzw. rechts vom Ursprung des Körpermodell-Koordinatensystems. Die Wahl dieses Punkts hat zum Ziel, eine möglichst natürliche Ellenbogenposition als Lösung zu realisieren. Abbildung 5.17 stellt die Situation schematisch dar.

Der hier verwendete Algorithmus kann keine Gelenkposition bestimmen, wenn alle drei Punkte exakt auf einer Linie im Raum liegen. In diesem Fall liegen Ellenbogen und Handgelenk auf einer Linie zum Schultergelenk. Tritt dieser Fall ein, wird die ursprüngliche ermittelte Position des Ellenbogens verwendet. Das Resultat der kinematischen Berechnung wird verworfen.

Mit dieser Lösung ist ein Springen der Ellenbogen noch möglich, tritt aber weniger oft auf als ohne den Einsatz von inverser Kinematik.

5.6.5.2. Einsatz von Vergangenheitsdaten

Vergangenheitsdaten werden verwendet, da sich die Betrachtung nur des aktuellen Frames als nicht ausreichend dargestellt hat. Ziel ist, die Gültigkeit jeder Gelenkposition zu bewerten.

Um sicherzustellen, dass genügend Vergangenheitsdaten zur Verfügung stehen, wird nicht nur die Position jedes Gelenks des letzten Frames gespeichert. Mit Hilfe einer speziellen Datenstruktur (*SkeletonQueue*) werden auch Skelett-Datensätze vergangener Frames innerhalb des MoCap-Moduls zwischengespeichert.

Die *SkeletonQueue* stellt die folgende Funktionalität zur Verfügung:

- Speichern von Skelettobjekten.
- Verwalten des „Alters“ eines Skelettobjekts.
- Zurverfügungstellung einer Warteschlange (Skelettobjekte oberhalb einer konfigurierbaren Altersgrenze werden gelöscht).

Abbildung 5.18 stellt die Datenstruktur schematisch dar.

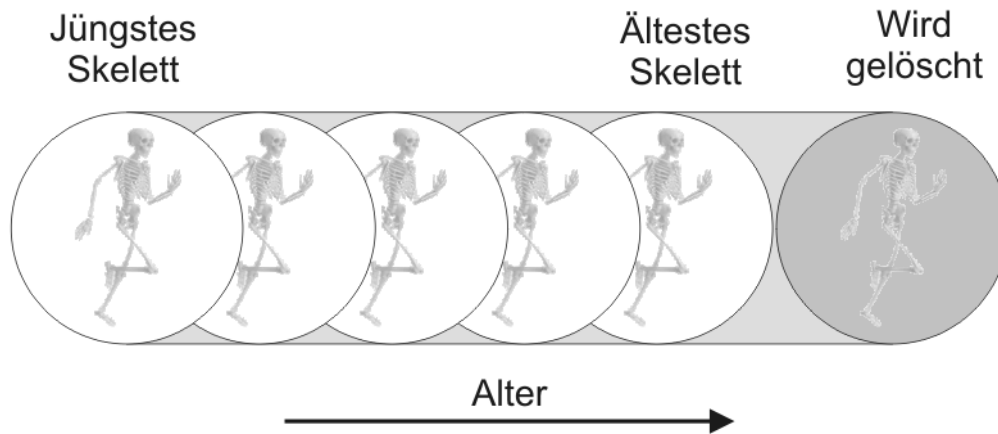


Abbildung 5.18.: Schematische Darstellung der SkeletonQueue

Der Algorithmus testet jedes Gelenk des aktuellen Skeletts gegen das gleiche Gelenk des jüngsten Skeletts in der *SkeletonQueue*. Hat das aktuelle Gelenk seine Position um mehr als einen bestimmten Wert verändert, wird es verworfen. Wurde im letzten Frame das Gelenk nicht erkannt, wird der Test mit dem nächst älteren Gelenk durchgeführt. Dies wird so oft wiederholt, bis das Ende der Warteschlange erreicht ist. Konnte bis zum Ende der Warteschlange kein Test durchgeführt werden, wird das aktuelle Gelenk akzeptiert. Wird ein Test vor dem Erreichen des ältesten Gelenks durchgeführt, endet der Algorithmus mit der Akzeptanz bzw. mit dem Verwerfen des Gelenks.

Um bei dem Test das Alter der jeweiligen Vergangenheitsdaten zu berücksichtigen, wird die maximal erlaubte Positionsänderung mit dem Alter⁹ des Skeletts multipliziert. Mittels eines Faktors kann das Ergebnis der Multiplikation beeinflusst werden.

Die unterschiedlichen Gelenke des menschlichen Körpers können ihre Position unterschiedlich schnell ändern. Um dies zu berücksichtigen, kann der Wert für die maximale Positionsänderung gelenkspezifisch konfiguriert werden (vgl. Abschnitt 5.5.3).

5.6.6. Hilfsalgorithmen

Die Algorithmen des MoCap-Moduls benötigen relativ häufig eine Koordinatentransformation zwischen dem lokalen Koordinatensystem des Modells und dem Referenzkoordinatensystem. Daher verfügt das MoCap-Modul über eine zusätzliche Klasse zur Koordinatentransformation.

Die entwickelte Klasse erhält zur Initialisierung das Kopf- als auch das Körpermodell als Parameter. Das Referenzkoordinatensystem wird als globales Weltkoordinatensystem betrachtet und braucht daher nicht übergeben zu werden.

Die Klasse bietet entsprechende Methoden, um eine 3D-Position zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen zu überführen. Alle Methoden erhalten eine 3D-Position als Parameter. Das Resultat ist die 3D-Position im Ziel-Koordinatensystem.

Die Methoden sind:

fromHCStoWCS() : Transformation einer 3D-Position vom Kopfmodell-Koordinatensystem (head) ins Weltkoordinatensystem (world).

fromWCStoHCS() : Transformation einer 3D-Position vom Weltkoordinatensystem ins Kopfmodell-Koordinatensystem.

fromBCStoWCS() : Transformation einer 3D-Position vom Körpermodell-Koordinatensystem (body) ins Weltkoordinatensystem.

fromWCStoBCS() : Transformation einer 3D-Position vom Weltkoordinatensystem ins Körpermodell-Koordinatensystem.

⁹Dies ist die Position des Skeletts in der Warteschlange.

6. Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Entwicklung. Es werden die Fähigkeiten des entwickelten Systems beschrieben, und es wird auf Probleme der Implementierung eingegangen.

6.1. Güte von Motion Capturing-Systemen

Die Güte eines Motion Capturing-Systems ist schwer messbar. Aussagen über dessen Qualität lassen sich objektiv kaum belegen. Um trotzdem aussagekräftige Werte bestimmen zu können, müsste erst ein System zur Qualitätsmessung gefunden werden.

Ein solches Maßsystem müsste viele verschiedene Aspekte berücksichtigen. Das System müsste beispielsweise die Anzahl der bearbeiteten Frames pro Zeiteinheit oder auch die Erkennungsrate der Marker berücksichtigen. Zwar sind diese Werte akkurat messbar, doch einer Aussage zur Qualität des Systems würden sie alleine nicht gerecht. Zusätzlich müssten die jeweiligen äußeren Bedingungen betrachtet oder gleiche Bedingungen für alle Systeme geschaffen werden.

Bei den äußeren Nebenbedingungen gilt zu beachten, für welchen Zweck das System entwickelt wurde. Ist das System z.B. für eine bestmögliche Erfassung von Bewegungsdaten ausgelegt, oder stehen einfache Nutzung und Echtzeitfähigkeit im Vordergrund?

Es muss ebenfalls beachtet werden, an welchem Ort das System eingesetzt wird. Können die Bewegungsdaten in optimaler Umgebung erfasst werden, oder wird eine natürliche Umgebung benötigt?

Mit Sicherheit gibt es eine Vielzahl von weiteren Aspekten, die es zu beachten gilt. Da es nicht Ziel dieser Arbeit ist, ein Qualitätsmaß für Motion Capturing-Systeme zu entwickeln, beziehen sich folgenden Aussagen auf den rein visuellen Eindruck sowie die hier vorhandenen Rahmenbedingungen.

Doch was ist der visuelle Eindruck? Der visuelle Eindruck umfasst genau die Eindrücke, die die Nutzung des Systems augenscheinlich beeinflussen: Beispielsweise ist es nicht von Bedeutung, wenn die Datenerfassung für wenige einzelne Frames überhaupt nicht erfolgt. Auch ein leichtes „Zittern“ der Gelenke stört bei der Betrachtung nicht. Ein „Springen“ der Gelenke, wird dagegen als Störung empfunden.

6.2. Mögliche Bewegungen

Das System ist in der Lage die Bewegungsdaten eines Akteurs zu erfassen, wenn Kopf und Körper gegen die Kameras ausgerichtet sind. Dreht sich der Akteur von den Kameras

6. Ergebnisse

weg, so ist eine ordnungsgemäße Erfassung der Bewegungsdaten aufgrund des Systemaufbaus nicht möglich. Durch die begrenzten Hardware-Ressourcen ist das System nicht in der Lage, jegliche menschliche Bewegungen zu erfassen.

Die folgende Liste beschreibt Bewegungen, die das System erfassen kann. Die Liste ist nicht vollständig, da das System nicht speziell zur Erfassung bestimmter einzelner Bewegungen entwickelt bzw. optimiert wurde. Schon bei dem Design des Motion Capturing-Systems wurde allerdings darauf geachtet, dass die für die Anwendungszwecke nötigen Bewegungen erfasst werden können. Bei der Auflistung wird auf problematische Situationen hingewiesen:

Stehen: Steht der Akteur im Aktionsbereich, treten keine Probleme auf und die Position aller Gelenke wird erfasst.

Gehen: Es ist möglich, sich in alle Richtungen zu bewegen. Es gilt zu beachten, dass der Akteur stets zu den Kameras ausgerichtet ist. Entfernt sich der Akteur zu weit von Leinwand, Strahlern und Kameras, können Störungen auftreten.

Zeigen: Zeigegesten werden vom System problemlos erkannt, solange nicht zu viele Marker der Weste verdeckt werden.

Schwenken der Arme: Schwenkt der Akteur die Arme neben dem Körper, können die Bewegungsdaten erfasst werden. Ein Schwenken der Arme vor dem Körper kann Verdeckungen der Westenmarker bewirken.

Winken: Wie beim Zeigen bzw. Schwenken der Arme funktioniert das System beim Winken neben dem Körper problemlos. Werden die Winkbewegungen vor dem Körper ausgeführt, treten wieder Verdeckungsprobleme auf.

Hinsetzen bzw. in die Hocke gehen: Dieser Vorgang wird erkannt, stellt aber eine besondere Schwierigkeit für das System dar. Im Unterschied zu anderen Bewegungen, wird diese Bewegung weniger von Markerverdeckungen als von der Toleranz der Erfassungsalgorithmen beeinflusst. Auch diese Bewegung ist von der Marker-Gelenk-Problematik betroffen.

Nachfolgend werden Bewegungen aufgelistet, die vom Motion Capturing-System nicht erkannt werden. Zu jeder der Bewegungen wird erläutert, weshalb sie nicht erfasst werden kann:

Drehen um die eigene Achse: Diese Bewegung ist nicht abgedeckt, da das System so entworfen wurde, Bewegungsdaten nur zu erfassen, wenn sich der Akteur in Richtung der Kameras ausgerichtet hat.

Hinlegen: Aufgrund der Validierung des Körpermodells ist eine Neigung des Körpers um mehr als 60 Grad und daher auch das Hinlegen nicht abgebildet.

Kopfstand: Auch ein Kopfstand kann aufgrund der Neigungsbeschränkung nicht erfasst werden.

Beine überkreuzen: Beim Überkreuzern der Beine wird meist ein Kniemarker verdeckt. Dadurch kann das hintere Bein nicht erfasst werden. Zusätzlich verhindert der Algorithmus ein Erkennen von überkreuzten Beinen.

Arme verschränken: Werden die Arme vor dem Körper verschränkt, dann sind zu viele Marker der Weste verdeckt. Wird das Körpermodell nicht erkannt, bricht das MoCap-Modul die Bearbeitung ab.

6.3. Probleme

Im folgenden werden die beiden Hauptprobleme des Systems angesprochen.

6.3.1. Verdeckung von Markern

Eines der Hauptprobleme des Systems liegt darin, dass die Marker relativ häufig verdeckt werden. Die Erkennung vieler möglicher Bewegungen wird vor allem von diesem Problem beeinträchtigt.

Leider ist auch der Einsatz von mehr Markern keine optimale Lösung. Es wäre zwar möglich, die Erfassung einzelner Bewegungen durch die spezielle Platzierung weiterer Marker zu verbessern. Allerdings würde das System mit den hier entwickelten Algorithmen mehr Fehler bei der Erfassung der Arme und Beine machen. Eine andere Lösung wäre der Einsatz von Prediktionstechniken, um die erwarteten Positionen der verdeckten Marker vorherzusagen. Dieser Ansatz wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt.

Die sinnvollste Lösung scheint eine Erweiterung des EOS-Systems. Wie bei kommerziellen Motion Capturing-Systemen zu beobachten ist, werden durch den Einsatz von deutlich mehr als zwei Kameras bessere Ergebnisse erzielt.

6.3.2. Marker-Gelenk-Problematik

Ein weiteres Problem des Systems besteht in der Platzierung der Marker. Da die Marker nicht genau an in den Gelenken platziert werden können, müssen sie in der unmittelbaren Nähe der Gelenke platziert werden. Vor allem bei der Bewegung von Armen und Beinen verändern sich daher die Abstände zwischen den Markern erheblich. Abbildung 6.1 stellt die Problematik graphisch dar. Um trotzdem die Erfassung der Extremitäten zu ermöglichen, muss mit großen Toleranzen gearbeitet werden.

Durch die Verwendung großer Toleranzen kommt es allerdings zu erhöhten Fehlerkennungen besonders bei den Beinen. Wie bereits beschrieben wird versucht, mittels Validierung des Skeletts die Beeinträchtigung zu minimieren.

6.4. Bewertung der Echtzeitfähigkeit

Die Geschwindigkeit eines Motion Capturing-Systems wird maßgeblich von zwei Faktoren beeinflusst. Einerseits gibt die verwendete Hardware die maximal mögliche Ab-

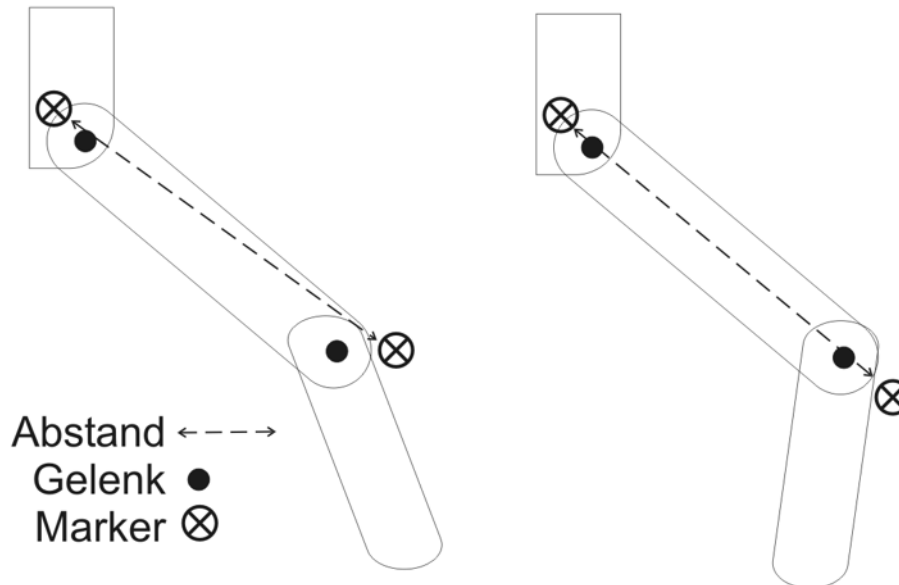


Abbildung 6.1.: Problem der unterschiedlichen Markerabstände: Das Bild zeigt den Abstand von Hüft- und Kniemarker bei fast gestrecktem und angewinkeltem Bein

tastrate vor. Andererseits benötigen die Algorithmen der Software zur Ermittlung der Gelenkpositionen eine gewisse Zeit. Diese verstrichene Zeit reduziert die maximal mögliche Abtastrate.

Das verwendete EOS-System bearbeitet maximal 21 bis 24 Bilder je Sekunde. Die theoretische Maximalleistung des Motion Capturing-System liegt also ebenfalls bei 21 bis 24 Frames je Sekunde. Tests haben gezeigt, dass das EOS-System durch das MoCap-Modul kaum beeinträchtigt wird. Je nach verwendetem Computer verarbeitet das Motion Capturing-System 20 bis zu 22 Bilder pro Sekunde.

Trotz der rechenintensiven Algorithmen¹ geht wenig Zeit verloren. Das Ziel, ein echtzeitfähiges Motion Capturing-System zu entwickeln, wurde also erreicht.

EOS misst die Zeit eines Erkennungsvorgangs. Die Dauer wird von der EOS-Software in der graphischen Benutzerschnittstelle ausgegeben. Im Folgenden werden einige Messwerte präsentiert:

Diese Messwerte entsprechen nicht wissenschaftlich genauen Messreihen. Die Werte wurden während Performancetests manuell ermittelt. Trotzdem belegen sie, dass das entwickelte System die Bewegungsdaten in Echtzeit erfassen kann.

Die Dauer eines Pipelinedurchlaufs dauert zwischen 7,3 und 9,0 Millisekunden. Während einer Session werden pro Sekunde 20,5 bis 21,1 Bilder bearbeitet.

¹Vor allem der Algorithmus für Arm- und Beinerkennung ist sehr rechenintensiv. Der Algorithmus wird sowohl für linken und rechten Arm als auch für linkes und rechtes Bein durchlaufen.

7. Zusammenfassung und Ausblicke

Das folgende Kapitel fasst die Aussagen dieser Arbeit zusammen. Anschließend folgt ein Abschnitt zu Erweiterungsmöglichkeiten des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Motion Capturing-Systems.

7.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde beschrieben, welche Fähigkeiten aktuelle Motion Capturing-Systeme besitzen. Dabei wurde auf die möglichen Einsatzgebiete sowie den Werdegang der Systeme eingegangen. Des Weiteren wurden die unterschiedlichen Verfahren zur Aufnahme von Bewegungsdaten beschrieben. Neben einer kurzen Übersicht über den Markt rings um die Motion Capturing-Technologie wurde auch ein Einblick in aktuelle Forschungen gegeben.

All diesen Betrachtungen ist zu entnehmen, dass Motion Capturing vor allem im kommerziellen Bereich Verwendung findet. Entsprechend sind die Systeme ausgelegt. Meist handelt es sich um teure, komplexe Systeme, die eine optimale Erfassung der Bewegungsdaten ermöglichen sollen. Es wurde folglich bei deren Entwicklung weniger auf einfache Bedienbarkeit oder Echtzeitfähigkeit geachtet.

Aus diesen Überlegungen heraus, sollte im Rahmen dieser Arbeit ein Motion Capturing-System entwickelt werden, das preisgünstig und einfach zu bedienen ist. Durch den Einsatz einiger weniger einzelner Komponenten sollte dieses Ziel erreicht werden. Zusätzlich sollte darauf geachtet werden, dass das System Bewegungsdaten in Echtzeit erfassen kann.

Um das Ziel zu erreichen, wurde das System mit einem möglichst geringen Hardware-Einsatz realisiert. Allerdings mussten dafür einige Einschränkungen in Kauf genommen werden. Da diese eine Entwicklung eines universellen Motion Capturing-System unmöglich machten, wurden die angedachten Einsatzgebiete im Voraus festgelegt. Auf dieser Basis wurde eine Vision des Systems entwickelt. Im Rahmen der Implementierung konnte diese weitestgehend umgesetzt werden. Das entwickelte System erfüllt die gestellten Forderungen für die angedachten Einsatzzwecke. Durch das Komponentendesign des Systems ist eine Erweiterung oder ein Ausbau des Systems relativ einfach möglich.

Der folgende Abschnitt geht auf einige der möglichen Erweiterungen ein.

7.2. Erweiterungen und Ausblicke

Das System wurde von vornherein so entwickelt, dass es möglichst einfach zu erweitern ist. Dies zeigt sich in der sehr einfach gehaltenen Einbindung des MoCap-Moduls

in die EOS-Software. Während des Systementwurfs sowie in der Implementierungsphase entstanden zusätzliche Ideen, wie das System zu erweitern wäre, um die Qualität der erfassten Bewegungsdaten zu verbessern. Auch Erweiterungen zur Steigerung der Benutzerfreundlichkeit wurden bedacht.

Im Folgenden werden die drei wichtigsten Ideen bzw. Erweiterungsmöglichkeiten beschrieben. Dabei werden auf die Vor- und Nachteile einer möglichen Implementierung eingegangen. Zuvor wird zu jeder der Ideen beschrieben, welche Situation durch die Verwirklichung der Idee verbessert werden kann.

7.2.1. EOS-Modelle für Arm- und Beingelenke

Arme und Beine des hier entworfenen Systems werden durch die Bildung kinematischer Ketten erfasst. Das System versucht, die Marker an Arm- und Beingelenken entsprechenden kinematischen Ketten zuzuordnen. Durch die Erzeugung möglicher Arm- und Beinkandidaten mittels des Kugelschalenprinzips ist dieser Prozess nicht eindeutig. Bei der Auswahl eines der Kandidaten, kann unter Umständen ein falscher Kandidat gewählt werden.

Die Idee: Statt einzelner Marker könnten an jedem Gelenk EOS-Modelle angebracht werden.

Die Vorteile liegen auf der Hand: Werden die Modelle durch das EOS-System erkannt, so braucht deren Position nur noch im virtuellen Skelett gespeichert werden. Da EOS für die Erkennung zusätzlicher Modelle keine zusätzliche Zeit benötigt, könnte sogar eine Beschleunigung des Motion Capturing-Systems erreicht werden. EOS-Modelle kennen im Gegensatz zu einem Marker¹ ihre Orientierung im Raum. Die zusätzliche Information könnte verwendet werden, um auf die echte Gelenkposition zu schließen, auf die in dieser Arbeit verzichtet wurde.

Nachteile sind vor allem in der Benutzerfreundlichkeit eines solchen Systems zu suchen. Jedes „Gelenk-Modell“ benötigt seine eigene spezielle starre Markeranordnung. Damit EOS die Modelle unterscheiden kann, müssen sie eine gewisse Größe vorweisen. Dies behindert aber den Akteur bei seiner Bewegungsfreiheit.

7.2.2. Unterscheidung zwischen Oberkörper und Rumpf

Das Motion Capturing-System verwendet EOS-Modelle zur Erfassung von Kopf und Körper. Das Körpermodell wird verwendet, um Schulter, Hüften und Elemente der Wirbelsäule zu berechnen. Werden die so erfassten Bewegungsdaten zum Rendern eines Avatars verwendet, wirkt dessen Bewegung etwas steif.

Idee: Statt der Verwendung nur eines EOS-Modells für die Erfassung des Körpers könnten zwei Modelle verwendet werden. Ein Modell für den Brustbereich und eines für

¹Ein Marker wird durch eine einzige 3D-Position, also einem Punkt, repräsentiert. Punkte haben keine Orientierung im Raum.

den Rumpf.

Vorteil: Durch zwei unterschiedliche Modelle würde die Bewegung des Körpers besser erfasst. Die Erfassung von Schultern und Hüften wäre unabhängig, eine Berechnung der Wirbel aus Schulter- und Hüftpositionen würde dynamischere Ergebnisse liefern.

Allerdings würden bei gleicher Gesamtmarkeranzahl weniger Marker für die Erkennung der Modelle zur Verfügung stehen. Die einzelnen Modelle würden aufgrund von Verdeckungen weniger oft erkannt. Die Anzahl der Marker zu erhöhen, würde allerdings die Erkennung von Armen und Beinen negativ beeinflussen.

7.2.3. Initialpose zur Abstandsmessung

Um Bewegungsdaten zu erfassen, benötigt das System die Abstände zwischen einigen Markern. Die Marker müssen per Hand vermessen und über die graphische Benutzerschnittstelle des MoCap-Moduls konfiguriert werden.

Idee: Messung der Markerabstände durch eine Initialpose.

Vor allem der Nutzer des Systems würde von dieser Maßnahme profitieren. Die manuellen Messungen und das Einpflegen ins System fallen weg. Eine automatische Messung ist in den meisten Fällen schneller.

A. EOS

EOS ist ein Hauptbestandteil des in dieser Arbeit entwickelten Motion Capturing-Systems. Die folgenden Abschnitte beschreiben die wichtigsten Aspekte des Systems.

A.1. Überblick

EOS ist ein optisches Tracking-System für den Einsatz im Inneren von Gebäuden. Das System ist in der Lage ein 6 DoF-Tracking durchzuführen. Es arbeitet mit einem sehr flexiblen Hardwareeinsatz. Neben zwei Kameras und einem Frame-Grabber wird lediglich ein handelsüblicher PC benötigt. EOS kann sowohl als aktives als auch passives System verwendet werden.

Das EOS-System ist eine Entwicklung des ZGDV in Darmstadt. Neben dem Vertrieb des aktuellen Systems wird es ständig weiterentwickelt. Hauptaufgabe des Systems ist das Verfolgen von speziellen Zeigegegeräten (in EOS *device* oder *Gerät* genannt).

Eine Beschreibung des Systems findet sich in [Zen02] und [Zen04a].

A.2. Aufbau

Das EOS-System benötigt wenige standardisierte Komponenten. Herzstück des Systems ist ein handelsüblicher PC in der 1 - 2 GHz Klasse. Dieser ist mit einem Frame-Grabber¹ der Firma Matrox ausgestattet. Zur Aufnahme der Bilder werden zwei Grauwertkameras² verwendet.

Zum System gehört neben der Hardware auch eine Software. Das Programm³ steuert den Frame-Grabber sowie die Kameras und nimmt das Erfassen und Verfolgen der Zeigegegeräte vor. Vor allem die EOS-Software unterliegt ständigen Erweiterungen bzw. Verbesserungen. Die Software des Systems ist weitestgehend plattformübergreifend programmiert. Zur Implementierung der Software wird C++ eingesetzt. Lediglich der Frame-Grabber macht momentan eine Bindung an Microsoft WindowsTM notwendig.

Zur Erkennung der *Devices* werden entweder passive oder aktive Marker verwendet. Bei der Verwendung von passiven Markern werden zusätzlich zwei Infrarotstrahler (IR-Spots) benötigt.

Abbildung A.1 zeigt eine Kamera und einen der Infrarotstrahler.

¹Matrox Meteor II [Mat04b]

²Im vorliegenden Fall handelt es sich um Kameras des Typs XC-55 von Sony[Son04]

³im Folgenden als EOS-Software bezeichnet



Abbildung A.1.: EOS: Anordnung Kamera und IR-Spot

A.2.1. Passive Marker

Die passiven Marker bestehen aus Plastikkugeln mit einem Durchmesser zwischen 1 cm und 1,5 cm. Die Kugeln besitzen eine spezielle Oberfläche, die einfallendes Licht zu dessen Ausgangspunkt zurücksendet. Abbildung A.2 zeigt eine Sammlung passiver Marker. Abbildung A.3 zeigt die Reflektion eines mit Kamerablitz aufgenommenen Markers.

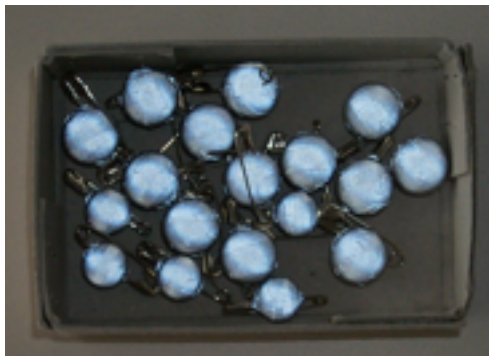


Abbildung A.2.: Sammlung EOS-Marker

Damit die Marker in beiden Kamerabildern zu sehen sind, müssen die Infrarotstrahler sowohl möglichst dicht als auch parallel zu den Kameras ausgerichtet werden. Bild A.1 zeigt die benötigte Anordnung.

Marker kommerzieller Hersteller sind aufgrund der geringen Nachfrage sehr teuer. Der Stückpreis liegt bei ca. 10 EUR. Daher werden die hier verwendeten Marker in Eigenregie

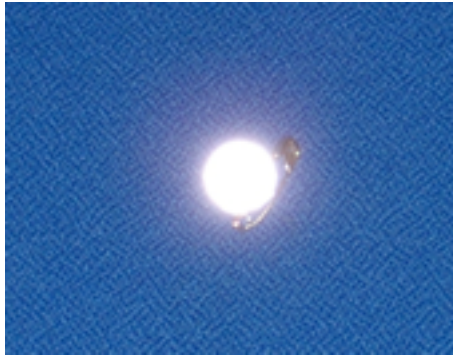


Abbildung A.3.: Einzelner passiver Marker mit Blitzlicht fotografiert

hergestellt. Bei den Plastikkugeln handelt es sich um Artikel des Bastlerbedarfs. Bei der Beschichtung handelt es sich um retroreflektierende Folie der Firma 3M [3M 04].

A.2.2. Aktive Marker

Aktive Marker brauchen keine Infrarotstrahler. Stattdessen senden sie selbst Lichtsignale aus. Im Gegensatz zu passiven Markern benötigen sie allerdings eine eigene Stromversorgung. Abbildung A.4 zeigt einen aktiven Marker, wie er am ZGDV eingesetzt wird.



Abbildung A.4.: Aktiver Infrarot-Marker

Ein prinzipielles Problem aktiver Marker ist, dass Licht nicht in alle Richtungen ausgesendet werden kann. Besonders wenn eine LED als Lichtquelle verwendet wird, ist der Abstrahlwinkel sehr begrenzt. Kann nicht gewährleistet werden, dass die Marker ihr Lichtsignal zu jeder Zeit in Richtung der Kameras senden, ist ein durchgehendes Tracking der Marker nicht möglich.

Auch die am ZGDV verwendeten Marker sind selbstgefertigte Einzelstücke. Sie bestehen aus einer Energiequelle, einem Sockel und einer Infrarot-LED.

A.3. EOS-Modelle

Um verschiedene Geräte verwenden zu können, muss EOS in der Lage sein, diese zu unterscheiden. Um die unterschiedlichsten Geräte zu unterstützen, wird in EOS das Prinzip sogenannter Modelle eingeführt. Modelle sind Objekte innerhalb der EOS-Software. Jedes Modell repräsentiert ein Gerät oder auch einen anderen zu verfolgenden Gegenstand.

Um die verschiedenen Geräte den jeweiligen Modellen zuzuordnen, werden diese mit Markern bestückt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass zwei Geräte nicht die gleiche Markieranordnung besitzen.

Bei der Konfiguration des Systems werden die Marker den Modellen einmalig zugeordnet (Anlernprozess). Ein Modell wird durch mindestens drei Marker repräsentiert. Auch Modelle mit mehr Markern sind möglich. Zur Erfassung solcher Modelle mit mehreren Markern, werden lediglich drei davon benötigt. Welche der Marker verwendet werden spielt keine Rolle. Sind von einem Modell mit fünf Markern zwei verdeckt, kann es trotzdem erkannt werden.

Da Modelle aus mindestens drei Markern bestehen, ist es im Gegensatz zu einzelnen Markern möglich, die Orientierung der Modelle im Raum zu bestimmen.

Abbildung A.5 zeigt ein Device mit drei Markern zur Modellidentifizierung.

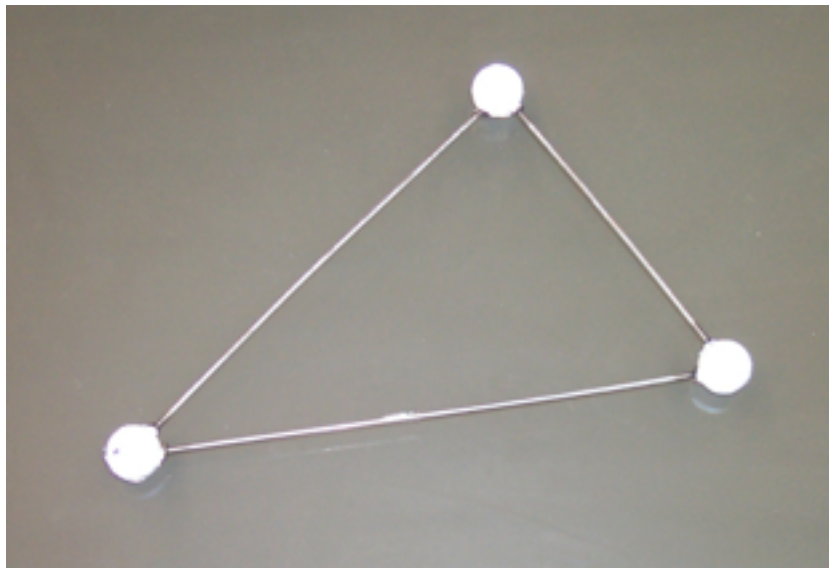


Abbildung A.5.: EOS Device mit drei Markern

Wichtig ist, dass sich die Anordnung der Marker nicht verändert. EOS ist ausschließlich in der Lage starre, sich nicht ändernde Modelle zu erkennen.

Modelle haben jeweils ein eigenes lokales Koordinatensystem. Der Ursprung des Koordinatensystems kann bei der Konfiguration auf eine der Markerpositionen gelegt werden. Die Ausrichtung von X-, Y- und Z-Achse ist ebenfalls durch die EOS-Software konfigurierbar.

Jedes Modell kennt die Positionen der Marker, die es repräsentieren. Die Position der Marker wird relativ zu dem lokalen Koordinatensystem gespeichert.

A.4. Funktionsweise

Um ein Objekt oder ein Device verfolgen zu können, wird für jeden betrachteten Zeitpunkt die Position bzw. Orientierung des Objekts oder Geräts im Raum relativ zu einem Referenzkoordinatensystem bestimmt. Da EOS keine allgemeinen Objekte kennt, werden Objekte und Geräte wie bereits erwähnt mit Markern bestückt. Die Anordnung der Marker wird in der EOS-Software als Modell angelernt.

Um diese Aufgabe zu lösen, besitzt die EOS-Software eine Verarbeitungspipeline, die folgende Schritte für jeden betrachteten Zeitpunkt abarbeitet:

Das EOS-System nimmt mittels der beiden Kameras den Aktionsbereich auf. Alle zu verfolgenden Geräte, Objekte oder einzelne Marker müssen sich innerhalb dieses Aktionsbereiches aufhalten.

Damit die Erfassung möglichst unabhängig vom Umgebungslicht ist, arbeitet das System mit infrarotem Licht. Grauwertkameras sind besonders im infraroten Bereich sehr empfindlich. Zusätzlich sind die Kameras mit speziellen Infrarotfiltern ausgestattet. Das reflektierte Infrarotlicht der Strahler bei passiven Markern bzw. das ausgestrahlte Infrarotlicht der aktiven Marker ist als heller Punkt in den Kamerabildern zu sehen.

Die Grabber-Hardware synchronisiert die beiden Kameras und sorgt somit dafür, dass die zwei Kamerabilder zur gleichen Zeit aufgenommen werden. Dies ist wichtig, um eine 3D-Positionen für die einzelnen Marker zu bestimmen. Der Frame-Grabber ist zusätzlich für die Digitalisierung der Kamerabilder zuständig.

In jedem der beiden Kamerabilder werden die 2D-Koordinaten aller sichtbaren Marker bestimmt. Vorher werden die beiden Bilder mittels Algorithmen gefiltert, um den Kontrast zu erhöhen und ggf. vorhandene Störungen⁴ zu reduzieren. Der Wirkungsgrad der Filteralgorithmen kann in EOS konfiguriert werden. In den gefilterten Bildern sind im Idealfall lediglich die Marker zu sehen.

Mittels Epipolargeometrie (siehe Anhang B) wird für jeden Marker eine 3D-Position ermittelt. Das Verfahren bedient sich dazu der 2D-Positionen der einzelnen Marker aus beiden Kamerabildern. In der weiteren Verarbeitung wird ausschließlich mit Markerpositionen gearbeitet.

Im letzten Schritt werden die Modelle erkannt. Zu jedem Modell sind Abstände zwischen den einzelnen Markern des Modells bekannt. EOS misst die Abstände zwischen allen aktuell bestimmten Markerpositionen. Passen mindestens drei Abstände zu den angelernten Modellwerten, wird dem passenden Modell die Position⁵ und die passende Orientierung⁶ zugeordnet.

⁴Hierbei handelt es sich meist um störendes Umgebungslicht oder Reflektionen der Infrarot-Strahler auf glatten Oberflächen

⁵Als Position kann entweder der geometrische Mittelpunkt oder eine Markerposition verwendet werden.

⁶Da drei Markerpositionen eine Ebene im Raum aufspannen, kann daraus die Orientierung bestimmt

Die Abfolge der einzelnen Modellpositionen ermöglicht das Verfolgen der Objekte. In [SM02] wird die Funktionsweise des Systems beschrieben.

A.5. Technische Spezifikationen

Die folgenden Angaben zu technischen Spezifikationen des Systems, sind aus [Zen02] entnommen.

- Die Kameras arbeiten mit einer Auflösung von 640 x 480 Bildpunkten.
- Die Abtastrate (Framerate) des Systems liegt bei 21 bis 23 Bilder je Sekunde.
- Die Ausrichtung der Kameras kann fast parallel sein.
- Der Aktionsbereich (capture volume) beträgt ca. 2 x 2 x 2 Meter.
- Die Genauigkeit der Positionsbestimmung liegt bei 0,5 bis 1,0 Millimeter.
- Das System kann theoretisch eine unbegrenzte Anzahl von Modellen unterscheiden und verwalten. Die Abtastrate wird durch die Anzahl der Modelle nicht beeinflusst.

A.6. Konfiguration

Die Konfigurierung des EOS-Systems besteht im wesentlichen aus drei Schritten.

Zuerst muss das System kalibriert werden. Dabei werden in der Software alle Parameter erfasst, um eine ordnungsgemäße Positionsbestimmung zu gewährleisten. Vor der erstmaligen Nutzung des Systems ist eine aufwendigere Konfigurierung notwendig.

Der zweite Schritt ist die Definition eines Referenzkoordinatensystems.

Im dritten und letzten Schritt werden die Modelle in EOS registriert und eine entsprechende Markerkonstellation angelernt.

A.6.1. Kalibrieren

Damit mittels Epipolargeometrie die 3D-Positionen der Marker aus den Kamerabildern rekonstruiert werden kann, muss die Ausrichtung der beiden Kameras zueinander genau bekannt sein. Anders ausgedrückt: Es werden die Positionen und Winkel benötigt, die die Lage und Ausrichtung der Kameras zueinander bestimmen.

Um das System zu kalibrieren, wird ein einziger Marker im Aktionsbereich bewegt. Da es sich nur um einen einzigen Marker handelt, muss der Marker im einen Kamerabild, der gleiche wie im anderen Kamerabild sein.

werden.

Das System erfasst zur Kalibrierung 100 bis 300 Positionen des einzelnen Markers. Für jedes der 100 bis 300 Bildpaare wird die Position des Markers bestimmt. Ein nichtlinearer Optimierungsalgorithmus schätzt aus dieser Punktwolke die Parameter der Kameras.

Um möglichst gute Ergebnisse für den ganzen Aktionsraum zu ermöglichen, sollte der Kalibrierungsmarker möglichst durch den gesamten Aktionsbereich geführt werden.

Kameras und Linsen sind nicht hundertprozentig genau gefertigt. Beide haben kleinste Ungenauigkeiten, die bei der Fertigung nicht ausgeschlossen werden können: Die Linsen und Objektive haben eine sogenannte Linsenverzeichnung und auch die Sensoren der Kameras haben unterschiedliche Parameter.

Diese zur genauen Positionsbestimmung notwendigen Parameter, können ebenfalls halbautomatisch erfasst werden. Der zugehörige Vorgang muss nur ein einziges mal für jede Kamera durchgeführt werden. Erst wenn andere Kameras oder Linsen verwendet werden, müssen Kamera- und Linsenparameter erneut bestimmt werden.

A.6.2. Einrichten des Referenzkoordinatensystems

Um Positionsdaten angeben zu können, braucht man ein Referenzkoordinatensystem.

In EOS wird ein spezielles Modell mit drei Markern für diesen Zweck verwendet. Die Abstände der Marker sind fest in EOS konfiguriert. Wird das Modell in den Aktionsbereich gelegt, wird dort automatisch das Referenzkoordinatensystem definiert. Die automatische Definition umfasst sowohl den Ursprung als auch die Ausrichtung der Koordinatenachsen.

Die automatische Ausrichtung der Koordinatenachsen ist wie folgt:

- X- und Y- Achsen werden parallel zur Markerebene ausgerichtet (die Marker bilden einen rechten Winkel).
- Die Z-Achse wird orthogonal zur X-Y-Ebene gerechnet.

EOS bietet auch die Möglichkeit das Referenzkoordinatensystem mittels eines einzelnen Markers zu definieren. Der Nutzer hält einen Marker in die Kameras und bestätigt nachfolgend entsprechend drei Abfragen. Bei der ersten Aufnahme wird die Position des Ursprungs erfasst. Die darauffolgend Punkte definieren das Ende der X- und Y-Achse. Durch eine letzte Aufnahme über bzw. unter der X-Y-Ebene, wird die Z-Achse definiert.

A.6.3. Anlernen von Modellen

Damit EOS Position und Orientierung eines Geräts bestimmen kann, wird ein entsprechendes Modellobjekt benötigt. Die Zuordnung von Geräten bzw. Objekten zu Modellen geschieht mittels spezieller Markieranordnungen.

Um ein Zuordnung vornehmen zu können, muss das Objekt bzw. das Gerät mit Markern ausgestattet werden. Es ist wichtig, dass sich die gewählte Markieranordnung von

A. EOS

der Anordnung anderer Objekte oder Gräte unterscheidet. Der Unterschied sollte einige Millimeter betragen, da EOS zur Modellerkennung eine gewisse Toleranz⁷ benötigt.

Der Anlernvorgang selbst ist einfach. Der Nutzer startet den Anlerndialog der graphischen Benutzerschnittstelle. Er hält das markerbestückte Objekt bzw. Gerät in die Kameras und lässt die Positionen der Marker mittels Knopfdruck bestimmen. EOS wählt drei Marker aus und erzeugt ein neues Modellobjekt. Hat das Objekt bzw. das Gerät nur drei Marker, kann mit der Definition des lokalen Koordinatensystems begonnen werden. Sind mehr Marker vorhanden, wird mittels einem Knopfdruck jeweils ein neuer Marker hinzugenommen. Die Kontrolle kehrt erst wieder an den Nutzer zurück, wenn entweder ein zusätzlicher Marker erkannt wurde oder ein Timer abgelaufen ist.

⁷Die Toleranz wird benötigt, da die Positionsbestimmung nicht im kompletten Aktionsbereich gleich genau ist. Hier spielen sowohl die Qualität der Kameras und Linsen als auch die Kalibrierung eine Rolle.

B. Epipolargeometrie

Dieser Abschnitt erläutert kurz die Funktionsweise der Epipolargeometrie. Abschließend folgt eine Abschnitt über die Probleme, die beim Einsatz des Verfahrens entstehen.

B.1. Was ist Epipolargeometrie?

Wie in [MF99] beschrieben, wird die Epipolargeometrie verwendet, um Korrespondenzprobleme in den Bildern zweier Kameras zu lösen. Normalerweise versucht man mittels Epipolargeometrie zu einem vorgegebenen zweidimensionalen Punkt in einem Bild, den dazu passenden (korrespondierenden) zweidimensionalen Punkt im zweiten Kamerabild zu finden. In der stereoskopischen graphischen Datenverarbeitung lässt sich diese Korrespondenz als ein dreidimensionaler Punkt ausdrücken. Das Verfahren kann daher genutzt werden, um aus zwei Kamerabildern die dreidimensionale Position eines Markers zu berechnen.

Jedes Kamerabild stellt eine Projektion des aufgenommenen Bereiches auf eine Ebene jeweils aus einem anderen Blickwinkel dar. Dabei werden auch alle Punkte bzw. die Abbilder der Marker in die Ebenen projiziert.

Die folgenden Ausführungen sind in Abbildung B.1 graphisch dargestellt.

Gesucht ist die dreidimensionale Position des Punktes P . Ausgehend von der zweidimensionalen Projektion x_1 des Punktes P , im einen Bild (hier links), wird der korrespondierende zweidimensionale Punkt x_2 im anderen Bild gesucht. Dazu wird eine Gerade von Punkt x_1 zu der entsprechenden Kamera C_1 (genauer dem Fokuspunkt oder optischen Zentrum der Kamera) definiert. Diese Gerade wird mittels der Kamera C_2 auf die entsprechende Bildebene projiziert. Dies ist möglich, da die relative Position der Kameras zueinander bekannt ist. Die Projektion der Gerade (x_1, C_1) durch die Kamera C_2 nennt man epipolare Gerade (hier mit E bezeichnet). Der zu x_1 passende Punkt x_2 muss zwangsläufig auf dieser Geraden E liegen. Es muss nur noch die epipolare Gerade nach dem Punkt x_2 abgesucht werden.

Mit diesem Verfahren kann eine eindeutige Zuordnung gefunden werden. Eine detailliertere Darstellung dieses Verfahrens kann in [Fau93] eingesehen werden. Eine weitere Beschreibung dieser Thematik findet sich in [MSS01].

B.2. Problem des Verfahrens im praktischen Einsatz

In der Praxis wird meist nicht nur die Position eines einzigen Markers (oder eines Punktes) gesucht. Auch bei dem Motion Capturing-System, werden mehrere Markerpositio-

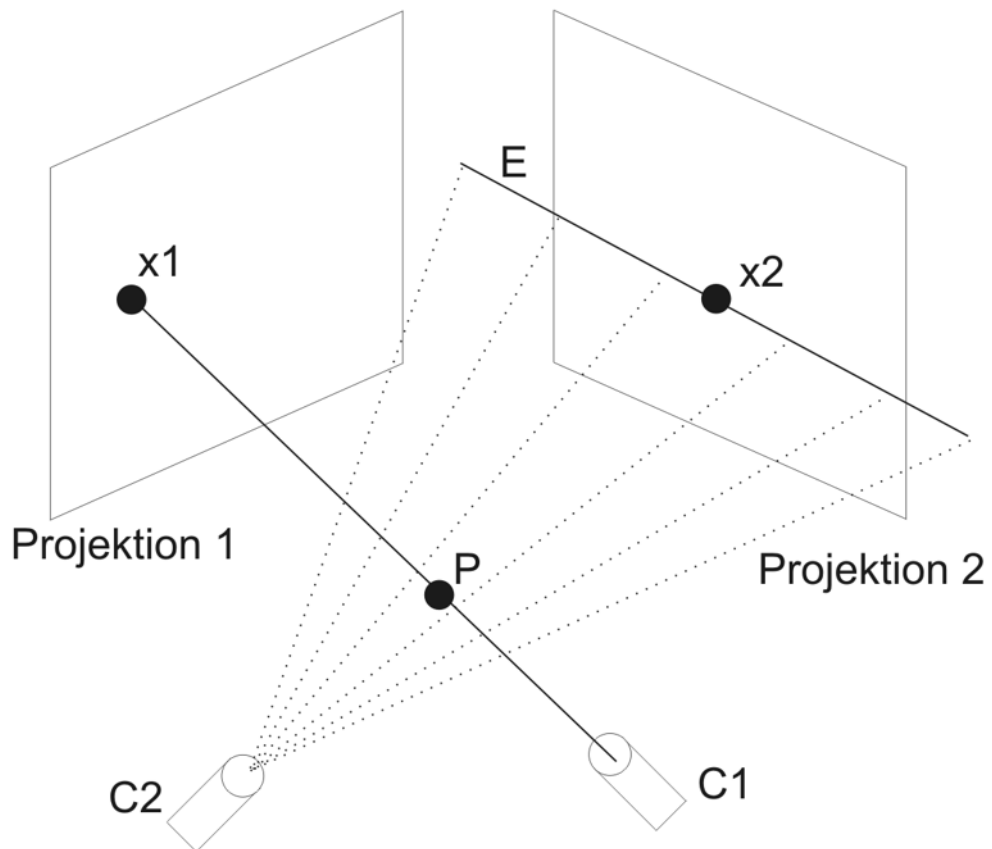


Abbildung B.1.: Epipolargeometrie für zwei Kameras: Zuordnung des Punktes x_1 in der rechten Projektion zum Punkt x_2 in der linken Projektion. Gesucht ist die dreidimensionale Position des Punktes P

B. Epipolargeometrie

nen gesucht. Wird zu einem der Punkte die Epipolargerade gebildet, kann es unter Umständen vorkommen, dass mehr als ein Punkt auf der epipolaren Geraden, oder in dessen näheren Umgebung liegt. Eine eindeutige Zuordnung kann nicht getroffen werden.

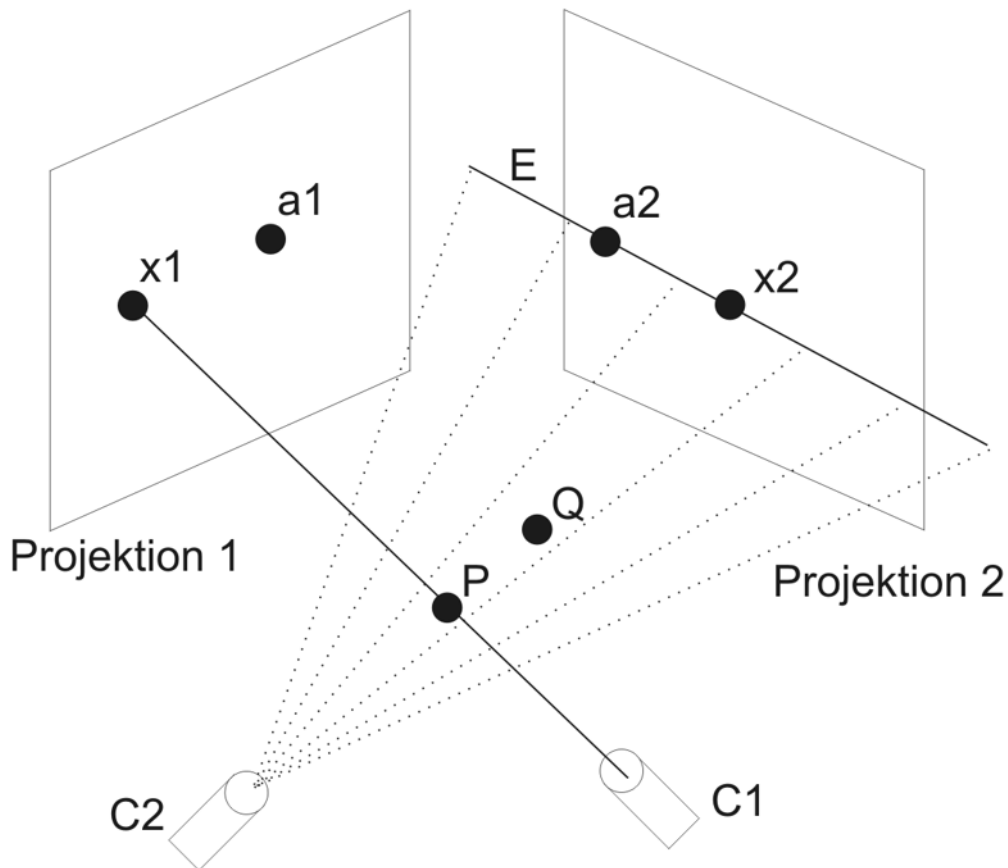


Abbildung B.2.: Problematik beim Einsatz der Epipolargeometrie: Die Projektion a_2 des Punktes Q ins rechte Bild liegt auf der Epipolargeraden des Punktes P . Mögliche Rekonstruktionen für P sind $P_1(x_1, a_2)$ und $P_2(x_1, x_2)$

Eine mögliche Lösung ist, so viele dreidimensionale Punktkandidaten zu generieren, wie Punkte auf der Epipolargeraden liegen. Es ist dann davon auszugehen, dass von diesen n generierten Punktkandidaten $n-1$ falsch sind. Mit Hilfe der Modellerkennung ist es in EOS möglich die gültigen Kandidaten zu identifizieren.

Eine dramatischere Situation entsteht, wenn der dreidimensionale Punkt zwar eine Projektion im ersten Bild, durch Überdeckung aber keine im zweiten Bild besitzt. Liegen trotzdem ein oder mehrere Punkte auf der Epipolargeraden, so werden ausschließlich ein oder mehrere ungültige dreidimensionale Punkte rekonstruiert.

C. Inverse Kinematik

Kinematik ist die Lehre von der mathematischen Berechnung der Bewegung (vgl. [Wik04g]).

Mittels kinematischer Berechnungen lässt sich die Position eines Gelenkes in einer kinematischen Kette bestimmen. Zur Berechnung werden die Längen der Kettenglieder, sowie die Stellungen der einzelnen Gelenke benötigt. In die Berechnung fließen lediglich die Daten vom Fixpunkt bis zum gesuchten Gelenk der Kette ein. Die Parameter der Folgeglieder werden nicht berücksichtigt. Das Berechnen der Gelenke wird als *Vorwärtskinematik* bezeichnet [JM98]. Interessant für den praktischen Einsatz ist vor allem die Bestimmung des Endpunktes (Endeffektor) der Kette.

Umgekehrt ist es mittels *inverser Kinematik* möglich, die Parameter der einzelnen Gelenke zu bestimmen, wenn zusätzlich zum Fixpunkt der Kette lediglich die Position des Endeffektors und die Längen der Kettenglieder bekannt sind.

Zur Berechnung der gesuchten Parameter existieren verschiedene Algorithmen. Neben einer algebraischen Methode sind auch einige iterative Methoden zur Berechnung der Parameter entwickelt worden. [BB04] gibt ein Überblick über die gebräuchlichsten Algorithmen.

Im Folgenden werden kinematische Ketten mit nur einem freien Gelenk betrachtet. Abbildung C.1 zeigt schematisch eine mögliche Anordnung der Kette. Die Position des Fixpunktes R , des Punktes P sowie die Längen der Segmente (l_1, l_2) sind bekannt. Gesucht wird der Punkt Q .

Für das Problem existiert keine eindeutige Lösung. Wie Abbildung C.2 zeigt, existieren für dieses Beispiel in 2D bereits zwei richtige Lösungen. Im dreidimensionalen Raum existiert ein ganzer Lösungsraum, der durch eine Kreislinie beschrieben wird.

Um in beiden Fällen trotzdem zu einer eindeutigen Lösung zu gelangen, wählt man die Lösung, deren errechnete Position am dichtesten an einem vorher definierten Punkt (*Zielpunkt* oder *target point* genannt) liegt.

Die inverse Kinematik wird vor allem in der Robotik und der graphischen Datenverarbeitung verwendet.

In der Robotik dient die inverse Kinematik zur Positionierung von Roboterarmen [SVS01].

In der graphischen Datenverarbeitung wird die inverse Kinematik eingesetzt, um eine automatisierte Berechnung von Gelenkpositionen bei der Charakter Animation zu ermöglichen. Der Animator legt für jeden Frame die Position des Endeffektors (z.B. das Handgelenk) fest, und der Algorithmus berechnet für jeden einzelnen Frame die Parameter der Gelenke in der kinematischen Kette (z.B. der Ellenbogen). Der Artikel [Lan98a] beschreibt den Einsatz inverser Kinematik in der graphischen Datenverarbeitung und stellt eine Implementierung eines algebraischen Algorithmus vor.

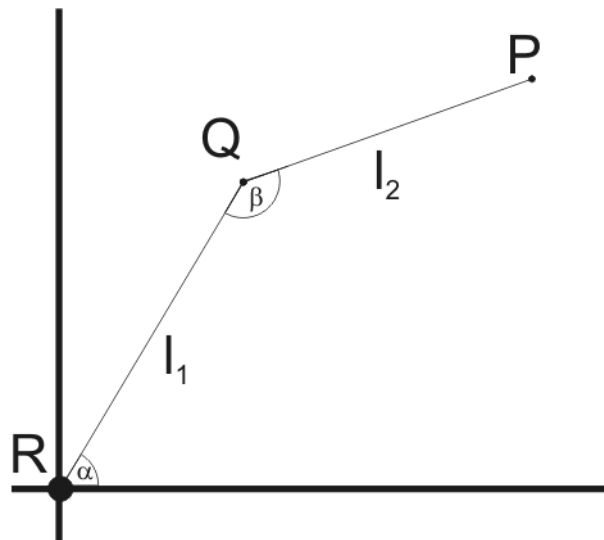


Abbildung C.1.: Schematische Darstellung: Gesucht ist der Punkt Q . Die Position des Aufhängungspunkt R , Endeffektors P , und die Segmentlängen l_1 und l_2 sind bekannt

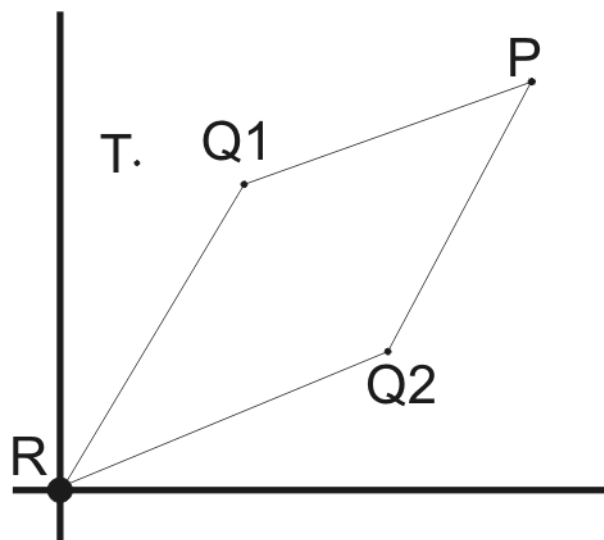


Abbildung C.2.: Es gibt zwei mögliche Lösungen $Q1$ und $Q2$. Die Auswahl einer Lösung findet mittels des Zielpunktes T statt

D. Kommerzielle Motion Capturing-Systeme

Im nun folgenden Abschnitt werden Motion Capturing-Systeme der bekanntesten Hersteller beschrieben. Wie bei der Beschreibung der Tracking-Systeme, sind die hier vorgestellten Systeme nach den Verfahren zur Datengewinnung unterteilt.

Dieses Kapitel beansprucht keineswegs eine komplette Übersicht über alle verfügbaren Systeme zu liefern. Es sollen lediglich die Systeme der bekanntesten Hersteller vorgestellt werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass in jeder der wichtigsten Kategorien mindestens ein System vorgestellt wird. Zu den wichtigsten Kategorien gehören folgende Motion Capturing-Systeme: Magnetische, mechanische sowie optische Systeme.

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit den bei optischen Systemen liegt, werden hier die optischen Systeme der vier bekanntesten Hersteller beschrieben.

D.1. Magnetische Systeme

Magnetische Systeme werden meist eingesetzt um Bewegungsdaten von Körperteilen oder auch Objekten aufzunehmen. Einige Hersteller magnetischer Motion Capturing-Systeme bieten auch Hardware für die Ganzkörperaufnahme an. Der bekannteste ist Ascension [Asc04d]. Ein weiterer Anbieter ist Polhemus [Pol04].

D.1.1. Ascension Technology Corporation

Ascension bietet unter dem Namen *Motion Star* magnetische Motion Capturing-Systeme an. Neben einer kabelgebundenen Ausführung des Systems, wird auch eine kabellose Variante angeboten. Die Daten des Systems [Asc02] sind:

- Motion Star [Asc04a] (siehe Abbildung D.2)
108 Sensoren, 18 pro Akteur (max. 6 Personen)
120 Abtastung pro Sekunde
Ausgabe von 3D-Position sowie Rotation
Genauigkeit von 0,8 bis 1,3 cm bzw. 1,3° bis 2,5°
- Motion Star Wireless [Asc04a] (siehe Abbildung D.2, D.3)
80 Sensoren, 20 pro Akteur (max. 4 Personen)
100 Abtastungen pro Sekunde
Ausgabe von 3D-Position sowie Rotation
Genauigkeit von 0,8 bis 1,3 cm bzw. 1,3° bis 2,5°

D. Kommerzielle Motion Capturing-Systeme



Abbildung D.1.: Ascensions Motion Star: Das Bild zeigt die Sensoren sowie die Steuereinheit des Systems (aus [Asc04a])



Abbildung D.2.: Ascensions Motion Star Wireless: Das Bild zeigt den Magnetfeldgenerator (links), die Steuereinheit (hinten rechts) sowie die Sensoren samt Funkeinrichtung (aus [Asc04b])

D. Kommerzielle Motion Capturing-Systeme



Abbildung D.3.: Akteur mit Motion Star Wireless (aus [Vir00])

D.2. Mechanische Systeme

Aufgrund der einfacheren Technik gibt es mehr Anbieter für mechanische als für magnetische Motion Capturing-Systeme. Der wohl bekannteste Anbieter ist Meta Motion [Met04c]. Weitere Hersteller mechanischer Systeme sind noDNA [noD04], oder Digital Image Design [Dig04b].

D.2.1. Meta Motion

Meta Motion bietet mit Gypsy [Met00] eine Serie unterschiedlicher mechanischer Motion Capturing-Systeme an. Neben *Gypsy Torso* für das Capturen des Oberkörpers bietet das Modell *Gypsy 4* [Met04a] das Capturen des gesamten Körpers an.

- Gypsy 4 Exoskelett [Met04a]
 - 5 Minuten Vorbereitung (anlegen der Sensoren)
 - Bewegungsfreiheit bis zu 800 Meter
 - Das System bietet eine Abtastrate von bis zu 120 Abtastungen pro Sekunde
 - Der Preis liegt unter 20 000 US Dollar.

D.3. Optische Systeme

Optische Systeme sind in der Industrie am weitesten verbreitet. Durch die bereits erwähnte einfache Nutzbarkeit der Systeme, sowie durch eine kurze Eingewöhnungsphase für die Akteure, haben sich mehrere Firmen dazu entschlossen, Produkte auf diesem Gebiet anzubieten. Im Folgenden werden die Produkte der Firmen Motion Analysis [Mot04i], Vicon [Vic04e] und Ascension [Asc04d] vorgestellt.

D.3.1. Motion Analysis

Die Firma Motion Analysis bietet drei Ganzkörper-Motion Capturing-Systeme an. Zwei der Systeme arbeiten mit digitalen Sensoren bzw. Kameras und eines mit analoger Technik. Alle Kameras verfügen über einen integrierten LED-Scheinwerfer, der normales bzw. infrarotes Licht aussenden kann.

Das *Eagle Digital System* [Mot04b] und das *Hawk Digital System* [Mot04e] arbeiten mit digitalen Kameras. Die Informationen der Kameras werden mittels eines Hubs gebündelt.

An einem Computer können die Bildinformationen mittels der von Motion Analysis entwickelten Software „EvaRT“ [Mot04b] weiterverarbeitet werden. Zusätzlich kann das System mit dieser Software kalibriert werden.

Das *Falcon Analog System* [Mot04c] arbeitet dagegen mit analogen Kameras. Bevor die Daten der Kameras ebenfalls mit der EvaRT-Software bearbeitet werden können, werden die analogen Bilddaten mittels eines Hardwaredigitalisierungssystems in digitale

D. Kommerzielle Motion Capturing-Systeme



Abbildung D.4.: Gypsy 4 Motion Capturing System: Akteur im Exoskelett (aus [Met04a])



Abbildung D.5.: Digitale Kameras von Motion Analysis (aus [Mot04e], [Mot04b])

D. Kommerzielle Motion Capturing-Systeme

Bildinformationen umgesetzt. Unterschied ist lediglich die verschiedenen Auflösungen der Kameras.



Abbildung D.6.: Analoge Kamera des Falcon-Systems (aus [Mot04c])

Die wichtigsten Daten der Systeme im Vergleich:

- Eagle Digital System (siehe Abbildung D.5, links)
Sensor Auflösung: 1280 x 1024 Pixel
Abtastrate: 480 Abtastungen pro Sekunde
Maximale Anzahl der Kameras: 64
Echtzeitvorschau möglich
- Hawk Digital System (siehe Abbildung D.5, rechts)
Sensor Auflösung: 640 x 480 Pixel
Abtastrate: 200 Abtastungen pro Sekunde
Maximale Anzahl der Kameras: 64
Echtzeitvorschau möglich
- Falcon Analog System (siehe Abbildung D.6)
Sensor Auflösung: 640 x 480 bei 60 und 120 Bilder pro Sekunde, 640 x 240 bei 240 Bilder pro Sekunde
Abtastrate: 60, 120 und 240 Bilder pro Sekunde
Maximale Anzahl der Kameras: 32
Keine Echtzeitvorschau möglich

D.3.2. Vicon

Vicon [Vic04e] ist ebenfalls einer der großen Hersteller. Im Gegensatz zu Motion Analysis bietet Vicon nicht mehrere unabhängige Systeme, sondern vertreibt einzelne Produkte als Baukastensystem. Der Käufer hat die Wahl zwischen 3 digitalen Kamera-Systemen die er mittels zusätzlicher Hardware verbinden kann.

Die digitalen Kameras sind, wie auch bei Motion Analysis, mit ringförmigen LED-Strahlern ausgestattet, die entweder sichtbares oder infrarotes Licht aussenden um die



Abbildung D.7.: Kamera der Vicon MX Serie mit LED-Kranz (aus [Vic04b])

Marker anzustrahlen. Es handelt sich also um passive Systeme. Die Kameras sind mit Auflösungen von 659 x 493 (MX3), 1280 x 1024 (MX13) und 2351 x 1728 Pixel (MX40) lieferbar [Vic04d]. Die dazugehörigen Abtastraten betragen 240, 484 bzw. 160 Abtastungen pro Sekunde. Abbildung D.7 zeigt eine solche Kamera.

Die restliche Hardware des Systems besteht wiederum aus drei Komponenten: Ein so genanntes *MX Net Modul* versorgt bis zu acht Kameras mit Strom und Steuerungsinformationen. Das *MX Link Modul* kann wiederum vier *MX Net Module* bündeln. Insgesamt kann das Vicon-System also mit 32 Kameras arbeiten.

Das *MX Control Modul* steuert alle anderen Module und übernimmt die Verbindung zur Software auf dem Computer. Auf diesem läuft die Kernanwendung Namens „Workstation“, die das Interface zum System bereitstellt.

Abbildung D.8 zeigt die drei Module.

D.3.3. Ascension Technology Corporation

Auch Ascension Technology [Asc04d] hat zusätzlich zu den mechanischen Systemen ein optisches System im Programm. Allerdings wird hier ein anderer Ansatz gewählt als bei allen anderen Systemen.

Statt Kameras im Raum zu verteilen wird beim *ReActor 2* [Asc04c] der Aktionsbereich mit zwölf Balken beschränkt. Diese sind wie die Kanten eines Würfels um den Aufnahmebereich angeordnet. In jedem der Balken sind, je nach Modell, 448 bzw. 512

D. Kommerzielle Motion Capturing-Systeme



Abbildung D.8.: Steuermodule der Vicon MX Serie. Von Oben: MX Net, MX Link, MX Control (aus [Vic04c])

Sensoren integriert. Diese nehmen die Bewegungsdaten der Marker auf. Die maximalen Dimensionen des Aufnahmebereichs sind daher begrenzt und betragen beim größten System 3,0 x 4,2 x 2,4 Meter.

Die Marker sind mit je 27 LEDs bestückt und blinken jeweils in einem anderen Takt. Dies bietet eine automatische Zuordnung. Das System kann bis zu 30 verschiedene dieser aktiven Marker unterscheiden.

Das Motion Capturing-System bestimmt 900 mal pro Sekunde die Position der Marker. Allerdings stehen nur 30 Positionen je Marker und Sekunde für die Weiterverarbeitung zur Verfügung.



Abbildung D.9.: Aufbau des Reactor 2 Motion Capturing-Systems. Rings um den Aktionsbereich verlaufen die Sensorstangen (aus [Asc04c])

E. Datenformate

Die Bewegungsdaten, die mittels Motion Capturing-Systemen aufgenommen wurden, können in einem weiteren Schritt analysiert bzw. weiterverarbeitet werden. Der Prozess der Nachbearbeitung kann unabhängig von der eigentlichen Aufnahme erfolgen.

Oft sollen die erzeugten Bewegungsdaten in mehreren Projekten verwendet werden.

Beide Aspekte fordern die Möglichkeit zur Speicherung der Bewegungsdaten in einer Datei. In der Praxis geschieht dies auf zwei verschiedenen Arten:

Positionsdaten : Bei Positionsdaten handelt es sich um die Angabe der X-, Y-, und Z-Koordinaten der Gelenkposition. Diese Daten werden relativ zu einem definierten Referenzkoordinatensystem angegeben.

Orientierungsdaten : Diese Daten repräsentieren die Rotationen der einzelnen Gelenke bzw. der Sensoren.

Eine Auflistung der wichtigsten Datenformate ist unter [Hin02] sowie [MM01] zu finden. Der Artikel [Lan98b] beschreibt den Aufbau und die Verwendung einiger der hier vorgestellten Datenformate.

Zum Austausch der Daten zwischen den verschiedenen Anwendungen werden hauptsächlich die im Folgenden beschriebenen Dateiformate eingesetzt. Dabei haben jeweils die größten Hersteller von Motion Capturing-Systemen ihre eigenen Formate entwickelt.

E.1. Acclaim

Acclaim war eine der ersten Firmen, die Motion Capturing kommerziell einsetzten. Die Bewegungsdaten werden in diesem Format skelettbasiert abgespeichert. Das bedeutet, dass eine hierarchische Beschreibung eines Skeletts abgespeichert wird. Dies geschieht in einer separaten Datei, dem so genannten *Acclaim skeleton file* (.asf). Diese Datei beschreibt also alle Gelenke des Skelettes. Alle Gelenke können in Bewegungsart und Bewegungsrichtung eingeschränkt werden. Die Bewegungsdaten selber werden in einer anderen Datei abgelegt. Je Abtastung werden jeweils Daten zu allen Gelenken gespeichert. Im *Acclaim motion file* (.amc) werden für einen Punkt (den root point) des Skeletts Position und Orientierung im Raum gespeichert. Für alle anderen Gelenke wird lediglich die Rotation abgelegt.

Die Idee das Skelett von den Daten zu trennen, entstand ursprünglich aus dem Mangel an Speicherplatz bei der Entwicklung des Formats. Im nachhinein erwies es sich aber sogar als Vorteil, da man schnell mehrere Datensätze zu einem einzigen Skelett verarbeiten konnte.

E.2. Biovision

Der Hersteller Biovision entwickelte ebenfalls ein eigenes Datenformat mit Namen *Biovision Hierachical* (.bvh). Ähnlich dem Format von Acclaim wird hier für den root point jeweils Position und Orientierung, und für die übrigen Gelenke nur die Orientierung gespeichert. Im Gegensatz zu Acclaims Ansatz speichert das Biovision-Format allerdings die Struktur des Skeletts in der Datei, die auch die Bewegungsdaten aufnimmt. Auch dieses Format erlaubt es, die Bewegungen der einzelnen Gelenke einzuschränken.

E.3. CSM

CSM ist das Format des Softwareherstellers Discreet (Hersteller von 3ds max). Im Gegensatz zu Acclaim und Biovision speichert dieses Format lediglich die Positionen der einzelnen Gelenke. Das Format kennt kein Skelett, und auch die Beschränkung einzelner Gelenke ist nicht vorgesehen.

Ziel dieses Formates ist es, lediglich die Positionen der Animations-Software zur Verfügung zu stellen, um dort direkt computeranimierte Figuren zu steuern. Die einzelnen Positionen müssen dazu in der Software mit den Gelenkpunkten der Figur manuell verbunden werden. Dies geschieht einmalig beim Einlesen der Daten.

E.4. TRC

TRC ist das Format von Motion Analysis. Die Art der gespeicherten Daten entspricht dem CSM-Format. Es werden nur Marker Positionen gespeichert. Dieses Format wird fast ausschließlich von den Produkten der Firma selbst eingesetzt. Da diese aber weit verbreitet sind, soll es hier auch erwähnt werden.

E.5. C3D

Im Gegensatz zu allen bisher erwähnten Dateiformaten ist C3D kein Format, das die Daten in textueller Form abspeichert. Es handelt sich um ein Binärformat, wodurch die Datenmenge gegenüber den anderen Formaten reduziert ist. C3D bietet die Möglichkeit beliebige Daten auszutauschen und wird als offener Standard zum Austausch jeglicher 3D-Daten verwendet. Dazu zählen unter anderem auch Texturen. Meistens wird es aber verwendet, um ähnlich wie CSM und TRC, ausschließlich Positionen von Gelenken zu übertragen.

Die Spezifikation zum C3D-Format ist offengelegt und kann im World Wide Web unter [C3D04] eingesehen werden.

E.6. FBX

Dieses Format ist eigentlich das Dateiformat der Animationssoftware Kaydara Motionbuilder. Dieses Format ist wie C3D ebenfalls in der Lage alle relevanten Daten binär zu speichern. Es enthält also außer den Motion Capturing Daten auch alle für eine Animation wichtigen Informationen wie Drahtmodelle, Texturen usw. Der Vorteil gegenüber C3D liegt vor allem darin, dass Kaydara nicht nur die Spezifikation des Formates, sondern auch Quellcode für den Import bzw. Export der Daten zur Verfügung stellt. Die Popularität dieses Dateiformats nimmt daher stetig zu.

E.7. Rohdaten

Neben den etablierten Datenformaten der einzelnen Hersteller gibt es aber noch die Möglichkeit die Daten in Roh-Formaten (RAW) abzuspeichern.

Bei optischen Systemen wird hierbei einfach die globale Position aller Marker abgespeichert. Bei magnetischen Systemen erhält man zusätzlich noch die Orientierung der einzelnen Sensoren. Jedes der Systeme speichert dabei eine eigene Struktur der Daten. Eine Nutzung der Daten in anderen Systemen ist nicht, oder nur eingeschränkt möglich.

F. Glossar

Im Folgenden werden Begriffe erklärt, die indirekt mit Motion Capturing in Verbindung stehen. Die Begriffe stammen aus dem Themengebiet der graphischen Datenverarbeitung. Die nachstehenden Erläuterungen dienen der besseren Verständnis, der vorliegenden Arbeit.

F.1. Avatar

Wie in [Wik04a] berichtet, stammt das Wort Avatar ursprünglich aus dem Hinduismus. Dort steht es für die Inkarnation von Gottheiten. Hauptsächlich die Verkörperung des Gottes „Vishnu“ wird als Avatar bezeichnet.

In der graphischen Datenverarbeitung steht der Begriff Avatar für die Repräsentation eines Anwenders in einer virtuellen Umgebung (virtual Reality) mit mehreren Anwendern [Wik04b].

Im modernen Sprachgebrauch steht Avatar üblicherweise für eine Repräsentation eines Menschen. Dementsprechend wird auch unter der graphischen Darstellung des Avatars ein Abbildung eines Menschen verstanden. Dies beginnt bei einfachen stilisierten Abbildungen, und endet bei fast natürlichen Darstellungen (siehe Abbildungen F.1 und 2.5).

F.2. DoF - Degrees Of Freedom

DoF ist die Abkürzung für den englischen Begriff *degrees of freedom*. (engl.: Freiheitsgrade).

Die Anzahl der Freiheitsgrade gibt an, mit wie vielen Parameter ein Objekt beschrieben wird [Wik04d].

Die sechs Freiheitsgrade (6 DOF) von EOS, stehen beispielsweise für die X-, Y-, Z-Parameter für die Positionsbestimmung sowie drei Werte (Eulerwinkel) für die Orientierung.

F.3. Charakter Animation

Eine eindeutige Definition des Begriffs Charakter Animation ist schwer zu finden. In [Fis04] beschreiben Mitarbeiter verschiedener Animationsfirmen, was Charakter Animation für sie bedeutet. Zusammenfassend decken sich alle Definitionen in dem Punkt, dass es sich um eine Darstellung von menschenähnlichen Figuren und deren möglichst natürliche Bewegung handelt.



Abbildung F.1.: Avatar: Graphische Darstellung eines menschlichen Avatars (aus [Mon04])

In [And98] wird Charakter Animation als ein Ausdruck von Gefühlen bzw. Verhalten eines Lebewesens oder auch eines leblosen Objekts mittels Bewegung definiert.

In dieser Arbeit wird Charakter Animation als die graphische Darstellung von Avataren und deren Bewegung betrachtet.

Nach [HO99] gibt es drei Möglichkeiten die benötigten Bewegungsdaten für die Darstellung zu erzeugen.

Bei Keyframing Verfahren, werden einige Schlüsselpositionen der Bewegung manuell festgelegt. Durch Interpolation zwischen diesen Schlüsselbildern, entsteht die Animation.

Prozedurale Methoden: Algorithmen berechnen die Bewegungen. Durch Kombination von verschiedenen Bewegungsalgorithmen sind komplexe Bewegungen möglich.

Bei der dritten Methode handelt es sich um Motion Capturing.

F.4. Frame-Grabber

Frame-Grabber ist der englische Fachausdruck für einen Analog-Digital-Wandler für Filme bzw. bewegte Bilder. Meistens handelt es sich um eine Erweiterungskarte für einen Computer.

An die Karte wird, je nach Bauart, eine oder mehrere analoge Kameras angeschlossen. Die Frame-Grabber-Karte wandelt jedes der analogen Bilder in ein digitales Bild um. Erst die digitalen Bilder können von Computern verarbeitet werden. Werden mehrere

Kameras verwendet, stellt die Hardware sicher, dass die gelieferten Bilder synchronisiert, also zeitgleich entstanden sind.

Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise eines Frame-Grabbers ist unter [Ima03] zu finden. Ein Hersteller für solche Hardware ist z.B. die Firma Matrox [Mat04a].

F.5. Gyroskop

Ein Gyroskop ([Wik04e], [Pau02a]) ist ein Gerät mit dem man die Trägheit, sich bewegendere Massen zeigen kann.

Der Hauptbestandteil eines Gyroskops ist eine Scheibe bzw. ein Rad, das auf einer Achse gelagert ist. Wird die Scheibe bzw. das Rad in Bewegung gesetzt, so wird durch die Trägheit der Masse eine Positionsänderung des Gyroskops verhindert bzw. erschwert. Wie bei einem Kreisel (ein Kreisel ist die einfachste Form eines Gyroskops) versucht das Gyroskop seine Position zu halten.

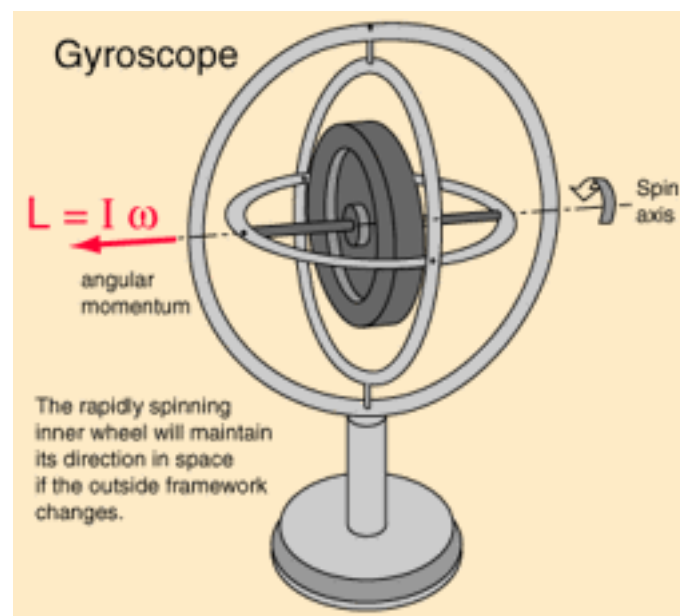


Abbildung F.2.: Schematische Darstellung eines Gyroskops (aus [Dep01])

Ein Gyroskop kann auch zur Navigation eingesetzt werden. Das Gyroskop wird im sich bewegendem Objekt mitgeführt. Ändert sich die Position des Objekts, wird das Gyroskop ebenfalls mitbewegt. Durch die Beschleunigung entstehen Kräfte, die mittels Sensoren messbar sind. Sind die Beschleunigungskräfte bekannt, ist ein Rückschluss auf die zurückgelegte Strecke möglich. Ist zusätzlich die Ausgangsposition bekannt, ist es möglich, eine globale Positionsbestimmung durchzuführen. Eine detailliertere Beschreibung der Funktionsweise eines solchen Navigationssystems findet sich in [Wik04f].

Ein System, das zur Positionsbestimmung auf Beschleunigungsänderungen zurückgreift wird als *Inertiales Navigationssystem* bezeichnet.

Solch ein System kann eingesetzt werden, um bei Inside-In-Systemen eine Positionsbestimmung vornehmen zu können.

F.6. Kinematische Kette

Der Begriff stammt aus der Mechanik. Wie in [Net04] beschrieben, ist eine kinematische Kette ein System aus starren Körpern, die durch Gelenke verbunden sind.

Die Kette beginnt mit einem Körper (als Elternteil oder engl. parent bezeichnet). Das durch ein Gelenk angehängte nächste Glied, wird als Kind (engl.: child) bezeichnet. Es ist möglich, an ein Kind-Segment ein oder mehrere weitere Kind-Segmente anzuhängen. Für diese wird das vorherige Kind-Segment zum Eltern-Segment. Handelt es sich um mehre Kind-Segmente an einem Eltern-Segment, spricht man von einer verzweigten kinematischen Kette.

Die wichtigste Eigenschaft einer kinematischen Kette besteht daran, dass eine Bewegung eines Eltern-Segments alle folgenden Kind- sowie deren Kind-Segmente usw. mitbewegt. Umgekehrt wird eine Bewegung eines Kind-Segmentes von dessen Eltern-Segment nicht ausgeführt.

Man unterscheidet eine offene und eine geschlossene kinematische Kette. Bei der offenen kinematischen Kette ist nur der erste Körper befestigt und die restlichen können sich frei bewegen. Das freie Ende der Kette wird als *Endeffektor* bezeichnet. Die Gelenke können die freie Beweglichkeit der Segmente einschränken. Bei der geschlossenen kinematischen Kette sind hingegen Anfang und Ende fest. Nur die mittleren Glieder können sich entsprechend der Freiheitsgrade der einzelnen Gelenke frei bewegen.

Außer in der Mechanik wird der Begriff oft in der Medizin verwendet, um die Beziehungen zwischen den Gelenken und Segmenten der Extremitäten darzustellen. Einen Einblick in dieses spezielle Themengebiet bietet der Artikel in [Blu04].

Kinematische Ketten spielen neben der Medizin auch eine wichtige Rolle in der Charakter Animation sowie in der Robotik.

F.7. Virtuelle Realität (Virtual Reality)

Die virtuelle Realität (engl.: virtual reality, kurz VR) ist eine von Computern simulierte Umgebung. Die meisten virtuellen Umgebungen werden auf optische Weise dem Betrachter bzw. Anwender dargestellt. Meist versucht man mit virtuellen Umgebungen die Wirklichkeit so realitätsnah wie möglich zu simulieren. Neben der visuellen Darstellung kommen auch akustische Hilfsmittel oder Geräte für eine mechanische Rückkopplung zum Einsatz.

Mit virtuellen Charakteren kann ein Anwender mit der virtuellen Realität interagieren.

Wird von virtueller Realität gesprochen, wird meist eine originalgetreue Nachbildung der menschlichen Umgebung gemeint. In Computerspielen wird dies oft verwendet, um dem Spieler eine möglichst reale Umgebung zu präsentieren. Dabei reagiert die Umgebung auf die Handlungen des Spielers, so wie er es aus der Realität gewohnt ist.

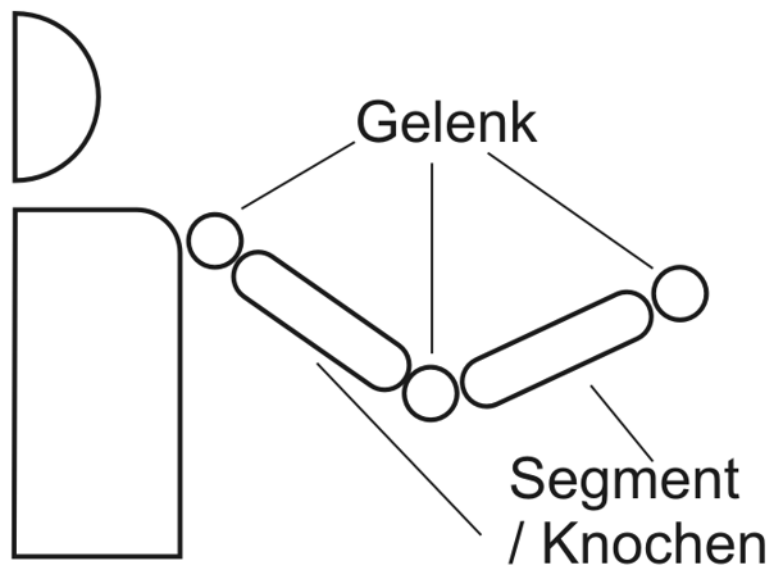


Abbildung F.3.: Kinematische Kette: Offene kinematische Kette des Arms. Das feste Segment ist die Schulter, das Ende der Kette ist das Handgelenk

Besonders die physikalischen Eigenschaften der realen Welt, werden in die virtuelle Welt übernommen. Virtuelle Realitäten werden daher auch für Simulatoren eingesetzt.



Abbildung F.4.: Anwendung der virtuellen Realität:Screenshot aus Microsofts Flugsimulator (aus [Per03b])

Literaturverzeichnis

- [3M 04] 3M Deutschland GmbH: *R3M Scotchlite™ Reflective Material*. 2004. – <http://www.scotchlite.de/>
- [Ali04] Alias: *Maya*. 2004. – <http://www.alias.com/eng/products-services/maya/index.shtml>
- [And98] ANDOH, Y.: *The Character Animation FAQ*. 1998. – <http://www.gimlay.org/~andoh/cg/faq/charfaq.html>
- [Art04] Artem Digital: *Website*. 2004. – <http://www.artem-digital.com>
- [Asc02] Ascension Technology Corporation: *Motion Star product brochure*. 2002. – <http://www.ascension-tech.com/products/motionstar.pdf>
- [Asc04a] Ascension Technology Corporation: *Motion Star*. 2004. – <http://www.ascension-tech.com/products/motionstar.php>
- [Asc04b] Ascension Technology Corporation: *Motion Star Wireless*. 2004. – <http://www.ascension-tech.com/products/motionstarwireless.php>
- [Asc04c] Ascension Technology Corporation: *Reactor 2*. 2004. – <http://www.ascension-tech.com/products/reactor.php>
- [Asc04d] Ascension Technology Corporation: *Website*. 2004. – <http://www.ascension-tech.com>
- [Aus00] Australian Centre For Moving Image: *ADVENTURES in CYBERSOUND, Étienne-Jules Marey : 1830 - 1904*. Januar 2000. – http://www.acmi.net.au/AIC/MAREY_BIO.html
- [Ava02] Avatar Motion Capture Studios: *Website*. 2002. – <http://www.avatarmocap.com/index.html>
- [BB04] BARINKA, L. ; BERKA, R.: *Inverse Kinematics - Basic Methods*. 2004. – Forschungsbericht. <http://www.cg.tuwien.ac.at/studentwork/CESCG/CESCG-2002/LBarinka/paper.pdf>

- [BFH⁺98] BOULIC, R. ; FUA, P. ; HERDA, L. ; SILAGHI, M. ; MONZANI, JS. ; NEDEL, L. ; THALMANN, D.: An Anatomic Human Body for Motion Capture. In: *EMMSEC'98*. Computer Graphics Laboratory, EPFL CH-1015 Lausanne, Switzerland, 1998. – <http://ligwww.epfl.ch/~thalmann/papers.dir/EMMSEC98.pdf>
- [Bie04] BIELIK, A.: I, Robot and the Future of Digital Effects. In: *VFX-World* (2004), Juli. – <http://vfxworld.com/?sa=adv\&code=57c5ed8a\&atype=articles\&id=2162>
- [Blu04] BLUMENTRITT, S.: Biomechanische Aspekte zur Indikation von Prothesenkniegelenken. In: *Orthopädie-Technik Magazin* (2004), Nr. 6, S. 512, 512. – http://www.ot-forum.de/archiv/d_ot/blumentritt.pdf
- [Bod02] BODENHEIMER, B.: *Typical Motion Capture Setup*. School of Engineering, Vanderbilt University. Januar 2002. – <http://www.vuse.vanderbilt.edu/~bobbyb/images/Linda.html>
- [Bra00] BRAY, J.: Markerless Based Human Motion Capture: A Survey / Vision and VR Group, Dept Systems Engineering, Brunel University. 2000. – Forschungsbericht. <http://www.visicast.co.uk/members/move/Partners/Papers/MarkerlessSurvey.pdf>
- [BRRP97] BODENHEIMER, B. ; ROSE, C. ; ROSENTHAL, S. ; PELLA, J.: The Process of Motion Capture: Dealing with the Data. In: *Eurographics CAS'97*, 1997. – <http://www.vuse.vanderbilt.edu/~bobbyb/pubs/dealingdata97.pdf>
- [C3D04] C3D.org: *C3D File Format*. 2004. – <http://www.c3d.org>
- [CD02] CHEN, X. ; DAVIS, J.: Camera Placement Considering Occlusion for Robust Motion Capture / Computer Graphics Laboratory, Stanford University. 2002. – Forschungsbericht. http://graphics.stanford.edu/papers/OcclusionMetric/occlusion_metric.pdf
- [Chr04] Chronophotographical Projections: *Eadweard Muybridge*. 2004. – <http://web.inter.nl.net/users/anima/chronoph/muybridge>
- [CIN04] CINEMAN: *Final Fantasy: The Spirits Within*. 2004. – <http://www.cineman.ch/movie/2001/FinalFantasyTheSpiritsWithin/>
- [CJM02] CHU, C. ; JENKINS, O. ; MATARI'C, M.: Towards Model-free Markerless Motion Capture / Center for Robotics and Embedded Systems, Robotics Research Laboratories, Department of Computer Science, University of Southern California. 2002. – Forschungsbericht. http://www-scf.usc.edu/~chuc/volcap/volcap_icra.pdf
- [Cur04] Currious Labs Inc.: *Currious Labs - Poser*. 2004. – <http://www.curriouslabs.com/article/articleview/1156/1/281>

- [DDR01] DAVISON, A. ; DEUTSCHER, J. ; REID, I.: Markerless Motion Capture of Complex Full-Body Movement for Character Animation / Robotics Research Group, Department of Engineering Science, University of Oxford. 2001. – Forschungsbericht
- [Dep01] Department of Physics & Astronomy, Georgia State University: *Gyroscope*. 2001. – <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/gyr.html>
- [Dig04a] Digital Image Design Inc.: *Monkey 2*. 2004. – <http://www.didi.com/www/areas/products/monkey2/>
- [Dig04b] Digital Image Design Inc.: *Website*. 2004. – <http://www.didi.com>
- [Dis04] Discreet: *Discreet 3ds max*. 2004. – <http://www4.discreet.com/3dsmax>
- [DMZ95] DYER, S. ; MARTIN, J. ; ZULAUF, J.: Motion Capture White Paper / Silicon Graphics Inc. 1995. – Forschungsbericht. http://reality.sgi.com/jam_sb/mocap/MoCapWP_v2.0.html
- [Fau93] FAUGERAS, O.: *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*. Cambridge MA, London 1993 : The MIT Press, 1993
- [FGDP02] FUAU, P. ; GRUENB, A. ; D'APUZZO, N. ; PLÄNKERSA, R.: MARKERLESS FULL BODY SHAPE AND MOTION CAPTURE FROM VIDEO SEQUENCES / VrLab, EPFL, Lausanne / IGP, ETH-Hönggerberg, Zürich. 2002. – Forschungsbericht. <http://cvlab.epfl.ch/publications/fua-et-al-isprs02.pdf>
- [Fif02] Fifth Dimension Technologies: *5DT Data Glove 5 / 5DT Data Glove 5-W*. September 2002. – <http://www.5dt.com/products/pdataglove5.html>
- [Fis04] FISHER, A.: Character Animation. In: *Post Magazine* (2004), Mai. – <http://www.postmagazine.com/post/article/articleDetail.jsp?id=87655>
- [Fox02] Kap. Motion Tracking Requirements and Technologies In: FOXLIN, E.: *Handbook of Virtual Environment Technology*. Lawrence Erlbaum Associates, 2002. – <http://www.isense.com/company/papers/Motion%20Tracking%20Survey%20Chapter.pdf>
- [Fre04] Freenet.de: *So entstand Nemo*. August 2004. – 2 S. – http://www.freenet.de/freenet/computer_und_technik/software/3d/findet_nemo/index.html
- [Fur99] FURNISS, M.: Motion Capture / MIT Communications Forum. 1999. – Forschungsbericht. <http://web.mit.edu/comm-forum/papers.html>
- [Gam97] GameProgrammer.Com: *Motion Capture Tools and Studios*. 1997. – <http://www.gameprogrammer.com/links/motioncapture.html>

- [Gru01] GRUMMET, T.: The look of fantasy. In: *Popular Mechanics* (2001), August. – http://popularmechanics.com/technology/television/2001/8/look_of_fantasy/
- [Hin02] HINCE, R.: artemdigital, Data formats / Artem Digital Ltd. 2002. – Forschungsbericht. <http://www.artem-digital.com/pdf/0n%20data%20formats%20V1.0.pdf>
- [Hip02] HIPPE, Cornelia: *Motion Capture*. Proseminar Computergrafik, Universität Ulm. 2002. – <http://medien.informatik.uni-ulm.de/lehre/courses/ss02/Computergrafik/CorneliaHipp.pdf>
- [HO99] HODGINS ; O’BRIEN: Computer Animation / Computer Science Division, University of California, Berkeley. 1999. – Forschungsbericht. <http://www.cs.berkeley.edu/~job/Papers/hodgins-1999-CA.pdf>
- [Hor02] HORBER, E.: *Motion Capturing*. Seminararbeit Modelling & Rendering, Medieninformatik, Universität Ulm. 2002. – <http://medien.informatik.uni-ulm.de/lehre/courses/ss02/ModellingAndRendering/07-motion-capturing.pdf>
- [Hum01a] Humanoid Animation Working Group: *H-ANIM 1.1 Spezifaction Graphic*. 2001. – <http://h-anim.org/Specifications/H-Anim1.1/h-anim1.1g.gif>
- [Hum01b] Humanoid Animation Working Group: *Specification for a Standard Humanoid, Version 1.1*. 2001. – <http://www.h-anim.org/Specifications/H-Anim1.1>
- [Hum04] Humanoid Animation Working Group: *Website*. 2004. – <http://www.h-anim.org>
- [Ima03] The Imaging Source: *Frame Grabbers*. 2003. – http://www.theimagingsource.com/prod/grab/grabintro_2.htm
- [Int04a] Intersense Inc.: *Applications for Motion Tracking*. 2004. – <http://www.isense.com/apps/>
- [Int04b] Intersense Inc.: *Industrial Simulation & Training*. 2004. – <http://www.isense.com/apps/industrial.htm>
- [Int04c] Intersense Inc.: *Military Simulation & Training Applications*. 2004. – <http://www.intersense.com/apps/military.htm>
- [Int04d] Intersense Inc.: *Virtual Automotive Design & Crash Testing*. 2004. – <http://www.isense.com/apps/auto.htm>

- [JM98] JUNG, B. ; MILDE, JT. *Lebendige Welten in VRML+JAVA: Kinematik*. 1998
- [Kay04] Kaydara: *Kaydara MOCAP*. 2004. – <http://www.kaydara.com/products/mocap/index.php>
- [Koc01] KOCH, M.: Motion Capturing in Deutschland. In: *Digital Production* (2001), Nr. 3/01, S. 166 – 169. – http://www.mynetcologne.de/~nc-kochmi2/download/DPArtikel_3_01.pdf
- [Lan98a] LANDER, J.: Oh My God, I Inverted Kine! In: *Game Developer Magazine* (1998), September. – <http://www.darwin3d.com/gamedev/articles/col0998.pdf>
- [Lan98b] LANDER, J.: Working with motion capture file formats. In: *Game Developer Magazine* (1998), Januar, S. 30 – 77. – <http://www.cs.berkeley.edu/~daf/games/webpage/motionpapers/col0198.pdf>
- [Mam04] MAMANIA, V.: *Markerless Motion Capture using Monocular Videos: A Case Study for Bharatanatyam*. Bombay, Department of Computer Science and Engineering Indian Institute of Technology, Diss., 2004. – <http://www.cse.iitb.ac.in/~vishalm/mtp/stage3/report.pdf>
- [Mar97] MARK, E.: *3D Animation: Keyframing*. University of Virginia School of Architecture. Februar 1997. – <http://urban.arch.virginia.edu/~ejm9k/arch545/handouts/keyframing.html>
- [Mas04] Masters of Photography: *Eadweard Muybridge, Galloping Horse (1878)*. 2004. – http://www.masters-of-photography.com/M/muybridge/muybridge_galloping%_horse.html
- [Mat04a] Matrox Electronic Systems Ltd.: *Frame Grabbers*. 2004. – http://www.matrox.com/imaging/products/frame_grabbers.cfm
- [Mat04b] Matrox Electronic Systems Ltd.: *Matrox Meteor II, Frame Grabber*. 2004. – <http://www.matrox.com/imaging/products/meteor2/home.cfm>
- [Mea02] Measurand, Inc.: *ShapeSensor and ShapeTape Technology*. 2002. – <http://www.measurand.com/manuals/SENSOR-TECHNOLOGY.pdf>
- [Mea04] Measurand, Inc.: *ShapeWrap II*. 2004. – <http://www.measurand.com/products/shapewrap.html>
- [Met00] Meta Motion Inc.: *Gypsy Motion capture system technology explained*. 2000. – <http://www.metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system-mocap.htm>

- [Met04a] Meta Motion Inc.: *Gypsy 4 motion capture system*. 2004. – <http://www.metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm>
- [Met04b] Meta Motion Inc.: *Gypsy Motion Capture System*. 2004. – <http://metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm>
- [Met04c] Meta Motion Inc.: *Website*. 2004. – <http://www.metamotion.com>
- [Met04d] Meta Motion Inc.: *Who Uses Motion Capture?* 2004. – <http://www.metamotion.com/motion-capture/motion-capture-who-1.htm>
- [MF99] MERY, D. ; FILBERT, D.: The Epipolar Geometry in Radioscopic Images. In: *Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology*. Berlin : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, 1999. – <http://iea.tu-berlin.de/~mery/papers/CTIP99.pdf>, S. 181 – 187
- [MM01] MEREDITH, M. ; MADDOCK, S.: Motion Capture File Formats Explained / Department of Computer Science, University of Sheffield. 2001. – Forschungsbericht. <http://www.dcs.shef.ac.uk/~mikem/fileformats/mocapff.pdf>
- [Mon04] Monumedia: *Miss Digital World*. 2004. – <http://www.missdigitalworld.com/>
- [Mot04a] Motion Analysis Inc.: *Applications*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/applications.html>
- [Mot04b] Motion Analysis Inc.: *Eagle Digital System*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/animation/games/eaglesystem.html>
- [Mot04c] Motion Analysis Inc.: *Falcon Analog System*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/animation/games/eaglesystem.html>
- [Mot04d] Motion Analysis Inc.: *Gait analysis*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/movement/gait/gait.html>
- [Mot04e] Motion Analysis Inc.: *Hawk Digital System*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/animation/games/eaglesystem.html>
- [Mot04f] Motion Analysis Inc.: *KinTrak Software*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/movement/engineer/kintrak.html>
- [Mot04g] Motion Analysis Inc.: *OrthoTrak Software*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/movement/gait/orthotrak.html>

- [Mot04h] Motion Analysis Inc.: *Sports Medicine & Performance*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com/applications/movement/sports/sports.html>
- [Mot04i] Motion Analysis Inc.: *Website*. 2004. – <http://www.motionanalysis.com>
- [Mot04j] Motion Analysis Studios: *Website*. 2004. – <http://www.mastudios.com/>
- [MSS01] MALERCZYK, C. ; SA, V. ; SCHNAIDER, M.: Vision Based Interaction within a Multimodal Framework. Lisabon, 2001. – http://home.t-online.de/home/malerczyk/publications/10EPCG_Lisboa.pdf
- [Mul94] MULDER, A.: Human movement tracking technology / School of Kinesiology, Simon Fraser University. 1994. – Forschungsbericht. <http://www.cs.sfu.ca/~amulder/personal/vmi/HMTT.pub.html>
- [Net04] Netlexikon (akademie.de): *Kinematische Kette, Definition, Bedeutung, Erklärung im Lexikon*. 2004. – <http://www.lexikon-definition.de/Kinematische-Kette.html>
- [New04] NewTek Inc.: *LightWave 3D*. 2004. – <http://www.newtek.com/products/lightwave/index.php>
- [noD04] noDNA: *Website*. 2004. – <http://www.nodna.com>
- [Pau02a] PAULKOWSKI, D.: *Das Gyroskop*. 2002. – <http://home.t-online.de/home/Paulkowski/gyroskop.html>
- [Pau02b] PAULT, J.: *The Biomechanics of Golf*. November 2002. – <http://www.kpbsd.k12.ak.us/kchs/JimDavis/CalculusWeb/Homepage.htm>
- [Pea04] Peak Performance Technologies, Inc.: *Website*. 2004. – <http://www.peakperform.com>
- [Per03a] Perceptual Science Lab, University of California Santa Cruz: *Mike the talking Head*. Januar 2003. – <http://mambo.ucsc.edu/psl/mike.html>
- [Per03b] Perfect Flight 2000 Project: *MS Flight Simulator Extension*. 2003. – <http://www.fs2000.org/UA>
- [Phi99] PHILIPPSEN, N.: Motion Capture. In: *Virtuelle Realität*. 1999. – http://www.it.fht-esslingen.de/~schmidt/vorlesungen/vr/seminar/ws9899/seminar_vr_ws9899.a5.twoup.pdf, S. 139 – 143
- [Pol04] Polhemus: *Website*. 2004. – <http://www.polhemus.com>
- [RP 00] RP Online: *Matthäus per Motion-Capture zum Cyber-Kicker*. 2000. – http://www.rp-online.de/news/multimedia/games/news/2000-0613/lothar_fifa_2001.html

- [Rui03] RUIZ, K.: *Experimental Motion Capture Systems Development*. Rensselaer Polytechnic Institute. Februar 2003. – <http://www.rpi.edu/~ruiz/research/research2/krmkmocap.htm>
- [Ser04] SERKIS, A.: *Photogallery: Lord of the Rings*. 2004. – <http://www.serkis.com/galleries/c.htm>
- [SM02] SCHWALD, B. ; MALERCZYK, C.: *Controlling Virtual Worlds Using Interaction Spheres*. 2002. – http://home.t-online.de/home/malerczyk/publications/SVR02_InteractionSpheres.pdf
- [Sof04] Softimage Co.: *Softimage, XSI*. 2004. – <http://www.softimage.com/products/xsi/v4>
- [Son04] Sony Corporation: *Progressive Scan Camera Module XC-55*. 2004. – <http://www.sony.net/Products/ISP/products/nontv/XC55.html>
- [SPRBT98] SILAGHI, M. ; PLÄNKERS, R. ; R. BOULIC, P. F. ; THALMANN, D.: Local and Global Skeleton Fitting Techniques for Optical Motion Capture. In: *IFIP CapTech'98*. Computer Graphics Lab, Swiss Federal Institute of Technology, CH-1015 Lausanne, Switzerland : LNCS Springer Verlag Heidelberg, 1998. – <http://ligwww.epfl.ch/~thalmann/papers.dir/Captech98.pdf>
- [Stu94] STURMAN, D.: A Brief History of Motion Capture for Computer Character Animation. In: *Character Motion Systems SIGGRAPH*, Course 9, 1994. – http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/animation/character_animation/motion_capture/history1.htm
- [SVS01] ANS S. VIJAYAKUMAR, A. D. ; SCHAAL, S.: Learning Inverse Kinematics. In: *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ, International Conference of Intelligent Robots and Systems*, 2001. – <http://www-clmc.usc.edu/~adsouza/papers/dsouza-IROS2001.pdf>, S. 298 – 303
- [Swi04] SWIDERSKI, A.: EA Sports 2005 - NBA Live 2005. In: *UnderGroundOnline* (2004). – http://www.ugo.com/channels/games/features/easports_2005/nbalive.asp
- [Tei03] TEITTINEN, J.: *3D-modeler Jonni Teittinen*. 2003. – <http://susi.nu/jonni/Chili/Html/photos.htm>
- [Tra94] TRAGER, W.: A Practical Approach to Motion Capture: Acclaim's optical motion capture system. In: *Character Motion Systems SIGGRAPH*, Course 9, 1994. – http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/animation/character_animation/motion_capture/motion_optical.htm

- [TYAB01] TORRESANI, L. ; YANG, D. ; ALEXANDER, E. ; BREGLER, C.: Tracking and Modeling Non-Rigid Objects with Rank Constraints / Computer Science Department, Mechanical Engineering Department, Stanford University. 2001. – Forschungsbericht. <http://movement.stanford.edu/nonrig/tyab-cvpr01.pdf>
- [Ul01] ULBRICHT, C.: *Human Motion Capturing*. Seminar Informatik, Universität Wien. 2001. – <http://www.cg.tuwien.ac.at/courses/Seminar/SS2001/mocap/moCap.pdf>
- [Uni04] University of Washington: *mocap lab*. 2004. – <http://grail.cs.washington.edu/mocap-lab/>
- [Vic04a] Vicon Motion Systems Ltd.: *VICON MOTION CAPTURE USED TO POPULATE TROY WITH LIFELIKE DIGITAL SOLDIERS AND CROWDS*. 2004. – <http://www.vicon.com/pressarticle.jsp?id=127>
- [Vic04b] Vicon Motion Systems Ltd.: *Vicon Product Detail: MX Camera*. 2004. – <http://www.vicon.com/proddetail.jsp?id=167>
- [Vic04c] Vicon Motion Systems Ltd.: *Vicon Product Detail: MX Modules*. 2004. – <http://www.vicon.com/proddetail.jsp?id=179>
- [Vic04d] Vicon Motion Systems Ltd.: *Vicon Products*. 2004. – <http://www.vicon.com/home.jsp?q=1>
- [Vic04e] Vicon Motion Systems Ltd.: *Website*. 2004. – <http://www.vicon.com>
- [Vir00] Virtual Reality: *Réalité Virtuelle*. 2000. – <http://rvirtual.free.fr/interfaces/motrice/traqueur.htm>
- [WBV⁺01] WELCH, G. ; BISHOP, G. ; VICCI, L. ; BRUMBACK, S. ; KELLER, K. ; COLUCCI, D.: High-Performance Wide-Area Optical Tracking, The HiBall Tracking System. In: *Presence, Massachusetts Institute of Technology* 10 (2001), Februar, Nr. 1. – http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/PRES101_Welch_etal.pdf
- [Web04] Web 3D Consortium: *Open Standards for Real-Time 3D Communication*. 2004. – <http://www.web3d.org>
- [WF02] WELCH, G. ; FOXLIN, E.: Motion Tracking: No Silver Bullet, but a Respectable Arsenal. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* (2002), Dezember, Nr. 11 / 12, S. 24 – 38. – http://www.cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/cga02_welch_tracking.pdf
- [Wik04a] Wikipedia.org: *Avatar*. 2004. – <http://en.wikipedia.org/wiki/Avatar>

Literaturverzeichnis

- [Wik04b] Wikipedia.org: *Avatar (virtual reality)*. 2004. – [http://en.wikipedia.org/wiki/Avatar_\(virtual_reality\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Avatar_(virtual_reality))
- [Wik04c] Wikipedia.org: *Chronofotografie*. 2004. – <http://de.wikipedia.org/wiki/Hochgeschwindigkeitsfotografie>
- [Wik04d] Wikipedia.org: *Degrees of freedom*. 2004. – http://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom
- [Wik04e] Wikipedia.org: *Gyroscope*. 2004. – <http://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscopic>
- [Wik04f] Wikipedia.org: *Inertiales Navigationssystem*. 2004. – http://de.wikipedia.org/wiki/Inertiales_Navigationssystem
- [Wik04g] Wikipedia.org: *Kinematik*. 2004. – <http://de.wikipedia.org/wiki/Kinematik>
- [Win04] WINDSOR, B.: *Motion Capture History and Pipeline*. Advanced Computing Center for the Arts and Design, Ohio State University. Februar 2004. – http://accad.osu.edu/~bwindsor/AC694Z_Spring2004/Class1_brian_bw.pdf
- [Zen02] Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V.: *EOS product description*. 2002. – http://www.zgdv.de/zgdv/files/zgdv/departments/z2/Z2Projects/EOS/EosFlyer_eng.pdf
- [Zen04a] Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V.: *EOS*. 2004. – <http://www.zgdv.de/zgdv/departments/z2/Z2Projects/EOS>
- [Zen04b] Zentrum für Graphische Datenverarbeitung e.V.: *MEDical Augmented Reality for PATients*. 2004. – <http://www.medarpa.de>

Abbildungsverzeichnis

1.1. Motion Capturing in der Filmindustrie	7
2.1. Ganganalyse mittels Motion Capturing	12
2.2. Optimierung des Schwungs beim Golfspiel	13
2.3. Simulation in der Autoindustrie	14
2.4. Motion Capturing in der Filmindustrie	15
2.5. Virtuelle Darstellerin Aki Ross im Film Final Fantasy	15
2.6. Motion Capturing im Einsatz für Computerspiele	16
2.7. Motion Capturing Suit von Marey	17
2.8. Muybridges Fotoreihe Animals in motion	17
2.9. Schema: Keyframing	18
2.10. Mike The Talking Head	19
2.11. Prinzipielle Funktionsweise von Motion Capturing	20
3.1. Beispiel für ein Inside-In Tracking-System	22
3.2. Schematische Darstellung eines Inside-Out-Systems	23
3.3. Schematische Darstellung eines Outside-In-Systems	23
3.4. Mechanisches Exoskelett	25
3.5. Mechanische Armatur	26
3.6. Magnetisches kabelgebundenes Tracking-System	28
3.7. Schematische Darstellung eines optischen Tracking-Systems	29
3.8. Akteur mit MoCap-Anzug	30
3.9. Passive Marker	30
3.10. Kamera mit LED-Ring	31
3.11. Passives optisches Motion Capturing-System	32
3.12. Aktiver Marker	32
3.13. Problematik der Coherence-Methode	35
3.14. Akteur mit Biegesensoren	36
4.1. Ausrichtung der Kameras (Schema)	42
4.2. Anordnung von Leinwand, IR-Strahler und Kameras	43
5.1. Akteur im MoCap-Anzug	48
5.2. Schildkappe zur Erfassung von Position und Orientierung des Kopfes	49
5.3. Weste zur Erfassung von der Körperbewegung	50

Abbildungsverzeichnis

5.4.	Weste mit Darstellung des lokalen Koordinatensystems	51
5.5.	Markerbänder	53
5.6.	Graphische Darstellung der H-Anim Spezifikation	55
5.7.	Graphische Darstellung der Skelett-Datenstruktur	56
5.8.	EOS GUI mit MoCap-Ausgabe	58
5.9.	MoCap Haupt-Benutzerschnittstelle	62
5.10.	Eingabe der Anzahl der zu exportierenden Datensätze	63
5.11.	Anzeige aller Konfigurationsparameter	63
5.12.	Konfiguration der Algorithmen-Toleranz	64
5.13.	Anpassen der Kopfrotation	64
5.14.	Konfiguration der Markerabstände	65
5.15.	Vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Kugel	70
5.16.	Vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Kugelschalenfunktion	71
5.17.	Schema: Einsatz von inverser Kinematik zur Gelenkbestimmung	75
5.18.	Schematische Darstellung der SkeletonQueue	76
6.1.	Problem der unterschiedlichen Markerabstände	81
A.1.	EOS: Anordnung Kamera und IR-Spot	86
A.2.	Sammlung EOS-Marker	86
A.3.	Einzelner passiver Marker mit Blitzlicht fotografiert	87
A.4.	Aktiver Infrarot-Marker	87
A.5.	EOS Device mit drei Markern	88
B.1.	Epipolargeometrie für zwei Kameras	94
B.2.	Problematik beim Einsatz von Epipolargeometrie	95
C.1.	Inverse Kinematik: Schematische Darstellung	97
C.2.	Inverse Kinematik: Zwei Lösungen	97
D.1.	Ascensions Motion Star	99
D.2.	Ascensions Motion Star Wireless	99
D.3.	Akteur mit Motion Star Wireless	100
D.4.	Gypsy 4 Motion Capturing System	102
D.5.	Digitale Kameras von Motion Analysis	102
D.6.	Analoge Kamera von Motion Analysis	103
D.7.	Vicon MX Kamera	104
D.8.	Vicon MX Steuermodule	105
D.9.	Aufbau des Reactor 2 Motion Capturing-Systems	106
F.1.	Avatar: Graphische Darstellung von eines menschlichen Avatars	111
F.2.	Schematische Darstellung eines Gyroskops	112
F.3.	Kinematische Kette	114
F.4.	Anwendung der virtuellen Realität	115

Tabellenverzeichnis

5.1. Gelenke und Wirbel des MoCap-Skeletts 57