

Virtual Reality Trainingssystem für Aufschlag und Return im Tischtennis

Guido Brunnett¹, Stephan Rusdorf¹, Tobias Winkler¹, Stephan Odenwald²,
Alexander Kraus² & Isabel Riesner²

¹Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Informatik

²Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau



Einleitung

Die Professur für Graphische Datenverarbeitung und Visualisierung der TU-Chemnitz entwickelte den Prototyp „V-Pong“ einer auf VR-Technologie basierenden Tischtennissimulation. Dabei wird unter Nutzung eines realen Schlägers in Verbindung mit optischem Infrarottracking ein virtueller Ball auf eine virtuelle Platte gespielt. Der gegnerische Part wird dabei computertechnisch simuliert und dreidimensional visualisiert. Der Schwerpunkt der bisherigen Arbeiten lag in der Erfassung und Verarbeitung von schnellen Bewegungen zur Realisierung von Echtzeitinteraktion.

Der Inhalt dieses Projektes war es, den vorhandenen Software-Prototyp um reale Aufschläge und die Möglichkeit des Returns auf diese Aufschläge zu erweitern. Hierzu sollten Bewegungsdaten und Ballflugbahnen synchron aufgezeichnet werden. Das V-Pong-System sollte so erweitert werden, dass die aufgezeichneten Aufschläge beliebig oft „abgespielt“ werden können. Dabei sollte ein Avatar die aufgezeichneten Bewegungen nachvollziehen, was für die Antizipation im Spiel von zentraler Bedeutung ist. Zur Analyse des Returns sollten verschiedene Auswerte- und Visualisierungsfunktionen entwickelt werden.

Methodik

Vermessung menschlicher Bewegungsdaten und Integration in die Simulationsumgebung

Grundlegend für die nachfolgenden Arbeiten war die Erfassung der Bewegungsdaten geübter Tischtennispieler und -spielerinnen beim Aufschlag und Return. Parallel zur Aufzeichnung der Aufschlagsbewegung musste die Flugbahn des Balles erfasst werden, um hinreichende Informationen über den ausgeführten Schlag zu erhalten. Darüber hinaus galt es Möglichkeiten zu entwickeln, diese Daten in das Simulationssystem von V-Pong zu integrieren.

Die Erfassung der Bewegung erfolgte mittels des optischen Bewegungsanalyse-systems der Firma VICON-Peak. Hierzu wurde der Spieler mit einem Markersatz für optisches Infrarot-Tracking ausgestattet (vgl. Abb. links). Das Motioncapturing basiert auf der Erfassung einzelner Marker und liefert die Raumkoordinaten der Marker für jeden erfassten Zeitpunkt.

Die Ausführung der Bewegungsabläufe übernahm ein Vereinsspieler. Die Versuche unterteilten sich nach statischen und dynamischen Aufnahmen. Statische Aufnahmen wurden vom Schläger sowie vom ruhig stehenden Probanden ohne und mit Schläger in der rechten Hand aufgezeichnet. Dynamische Aufnahmen von typischen Bewegungen für Aufschläge und Returns des Spielers erfolgten mit und ohne Tischtennisplatte.

Neben der eigentlichen Messung stellte die aufwändige Nachbereitung einen Großteil der durchgeführten Arbeit dar. Für die Integration in die Tischtennis-Simulation ist es erforderlich, die Markerdaten in ein Skelettmodell zu überführen. Mittels anthropometrischer Angaben über die Probandengruppe wurde die Lage der relevanten Gelenke berechnet. Dieser Vorgang basiert auf einem Optimierungsverfahren und erfordert zusätzliche Software. Zudem ist die Berechnung relativ zeitaufwändig.

Nach der Generierung des Skelettmodells können die Winkel zwischen den Segmenten ausgegeben werden, die für die rotatorischen Freiheitsgrade jedes Gelenkes gemäß der Bewegungsarten, wie sie in Anlage 3 erläutert sind, unterteilt werden. Somit lassen sich beispielsweise Flexions-, Abduktions- und Innenrotationswinkel im Schultergelenk zwischen Thorax und Humerus exportieren.

Die resultierenden Skelett- und Animationsdaten liegen im Acclaim-Format vor, wobei die Daten in zwei getrennten Dateien gespeichert werden. In der ASF-Datei sind die anthropometrischen, zeitunabhängigen Daten des Skelettes abgelegt. Im Wesentlichen sind das die Struktur (Knochen-Hierarchie) des Skelettes, die Festlegung der Segmentlängen und sämtliche Winkelangaben für die Ausgangspose. Die zeitabhängigen Bewegungsdaten sind in der AMC-Datei in Form von Gelenkwinkeln pro Frame gespeichert.

Die notwendige Kombination der MoCap-Daten mit den Daten der Schlägerbewegung und der Ballflugbahn stellten besondere Schwierigkeiten bei der Realisierung dieses Arbeitspunktes dar. Da das VICON-System ausschließlich in der Lage ist Markerpositionen aufzuzeichnen, sind für die Erfassung des Schlägers und des Balls weitere Maßnahmen erforderlich.

Für die Erfassung der Bewegung des Schlägers konnte das Vicon-System eingesetzt werden. Allerdings war es dazu notwendig, auch den Schläger mit Markern auszustatten. Darüber hinaus musste das Standardmodell des Vicon-Systems, das nur körperbezogene Marker verwendet, um die Möglichkeit erweitert werden, die Schlägermarker aufzunehmen.

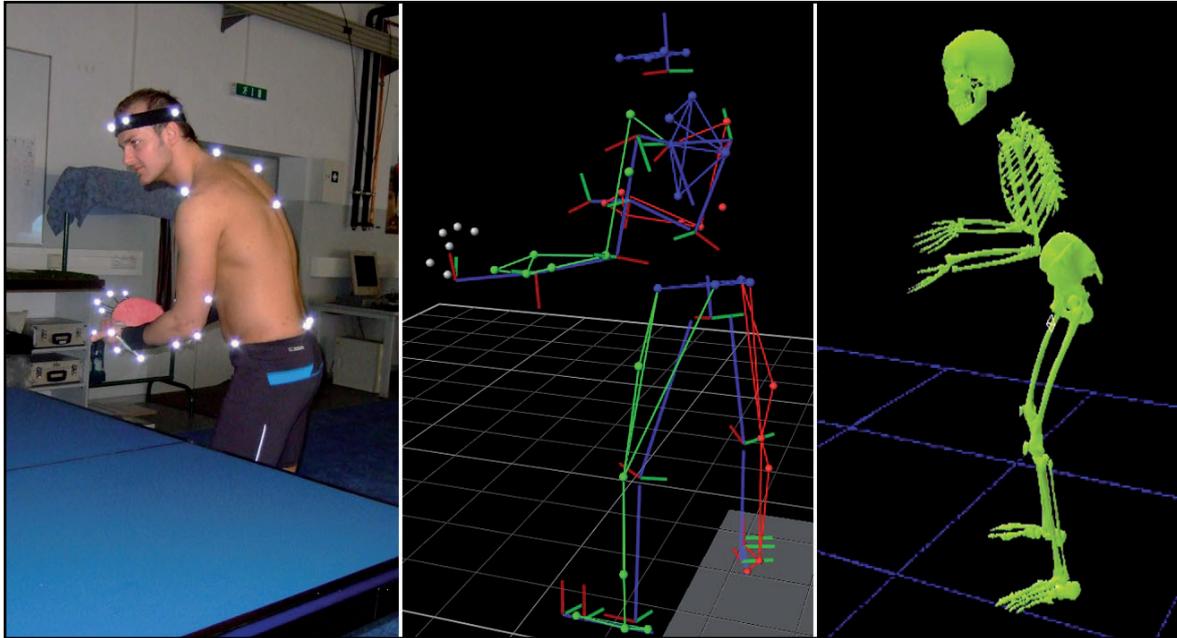


Abb. 1. Proband beim Aufschlag (links), zugehöriges PIG Ganzkörpermodell (Mitte), generiertes Skelettmodell (rechts)

Der Ball konnte jedoch nicht mittels des im Infrarotbereich arbeitenden Vicon-Kamerasystems erfasst werden. Um eine synchrone Erfassung aller benötigten Daten zu gewährleisten wurden zusätzlich zwei Basler-Kameras installiert, welche sich mit dem Viconsystem synchronisieren lassen. Die gewünschte Erfassung der Balltrajektorie mit einer hohen Aufnahme Frequenz im Bereich von 200 Hz oder mehr erwies sich jedoch als schwierig, da die für die kurzen Belichtungszeiten notwendige starke Zusatzbeleuchtung einen negativen Einfluss auf das Vicon-System ausübte. Die Aufnahme Frequenz der Basler-Kameras musste daher auf 60 Hz festgelegt werden. Dies ergab eine ausreichende Bildqualität bei noch funktionierendem Infrarot-Tracking. Damit wurde das Ziel erreicht, sowohl die Bewegungsdaten als auch die Ballflugbahn zeitgleich und synchronisiert zu erfassen. Aufgrund der längeren Belichtungszeiten der Baslerkameras ergab sich jedoch ein deutlicher Qualitätsverlust der Videodaten. Somit konnte das entwickelte Modul zur automatischen Analyse der Videodaten und der nachfolgenden Extraktion der Ballflug- und Spindaten nicht eingesetzt werden.

Daraus ergab sich, dass die Parameter der Ballbewegung (Richtung, Geschwindigkeit und Spin = Startbedingungen) durch alternative Methoden ermittelt werden mussten. Die erfassten Bewegungen wurden anschließend aufgearbeitet und liegen als Motioncapturedaten bzw. im Standard Animationsformat (AVI) vor. Diese Daten besitzen drei unterschiedliche Anteile. Dies sind die Motioncapturedaten des

Menschmodells, die Markerdaten des geführten Schlägers (Bestandteil der Rohdaten aller Marker) und die Balltrajektorie (implizit in 2D-Videodaten).

Um die Daten in der Simulation nutzen zu können, waren weitere Nachbearbeitungsschritte erforderlich. Da die Tischtennissimulation auch synthetische Bewegungsdaten verwendet, war es notwendig, Möglichkeiten zu entwickeln, aufgezeichnete Realdaten und synthetische Daten zu kombinieren.

Da die Daten des geführten Schlägers nicht Bestandteil der Motioncapturedaten sind, müssen diese gesondert behandelt werden. Um die Position und Orientierung des Schlägers zu jedem Erfassungszeitpunkt ermitteln zu können, war es notwendig die Rohdaten des Viconsystems auszuwerten, die neben den Markern des Spielers auch die Marker des Schlägers enthalten.

Für die weitere Datenintegration war es erforderlich, die für den Aufschlag benötigte Trajektorie des Tischtennisballs aus den AVI-Daten der Basler-Kameras zu gewinnen. Im Anschluss daran mussten die Daten der Trajektorie mit den Motioncapturedaten des Spielers und den Daten des Schlägers synchronisiert werden.

Anpassung und Synthese

Das V-Pong System beinhaltet eine komplexe Algorithmik zur Erzeugung synthetischer Bewegungen des virtuellen Tischtennisspielers. Dieses Modul ermöglicht einen interaktiven Spielmodus, der über das Abspielen aufgezeichneter Bewegungsdaten hinausgeht. Von zukünftigen Tischtennissimulatoren wird erwartet, dass sie sowohl reale als auch synthetische Bewegungsdaten verarbeiten können. Es wurden daher Möglichkeiten entwickelt, die aufgezeichneten Bewegungsdaten durch synthetische Bewegungen möglichst ohne sichtbare Übergänge in einander zu überführen.

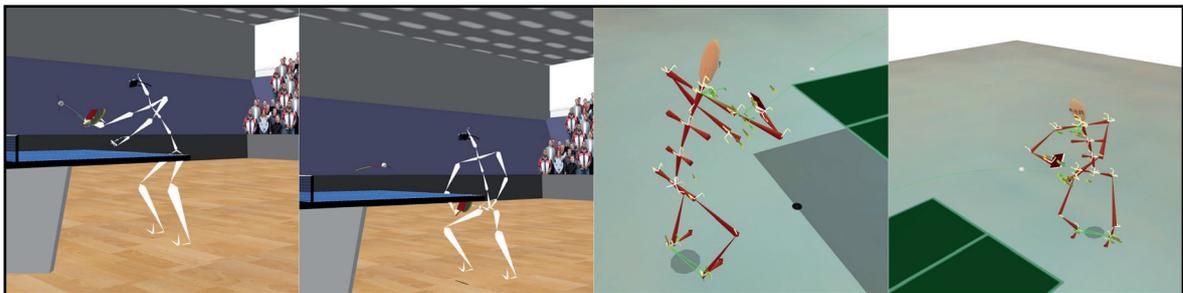


Abb. 2. synthetisierte Ganzkörperskelettstellungen (1 und 2), mit Visualisierung von Kontrollinformationen (3 und 4)

Im Rahmen der Integration der Motioncapturedaten in das V-Pong System wurde das bisher verwendete Skelettmodell für die Bewegungssynthese an das Vicon-Skelettmodell angepasst. Hierdurch wurde der Übergang zwischen der Verwendung von realen Motioncapturedaten für den Aufschlag und den synthetischen Bewegungen für den weiteren Spielverlauf ermöglicht. Der virtuelle Gegenspieler wurde um menschliche Beschränkungen (Constraints) erweitert. Dies betrifft nicht die schon eingesetzte Beschränkung der Gelenkwinkel sondern vielmehr die Begrenzung der Bewegungsgeschwindigkeit, die Bevorzugung bestimmter Gelenke und die

Beachtung von potenziell auftretenden Kollisionen (z. B.: mit der Tischtennisplatte). Beispielsweise bewegt sich der Avatar nun um die Platte herum, anstatt hindurch zu gehen. Der Anspruch der Echtzeitfähigkeit limitiert die verfügbare Rechenzeit, wodurch die erreichbare Qualität der Bewegung begrenzt wird.

Der von uns entwickelte Bewegungsgenerator arbeitet rein synthetisch (ohne Verwendung realer Bewegungsdaten) auf Basis von Schlüsselstellungen des Skeletts. Diese werden von der angestrebten Spieltaktik vorgegeben und in einem C2-stufigen Interpolationsverfahren eingesetzt, unter Beachtung bestimmter Zielpositionen und -geschwindigkeiten von Schläger und Füßen. Die aktuelle Version des Systems erlaubt die Bewegungssynthese eines Ganzkörpermodells (inkl. Beine und Wirbelsäule). Damit ist das verwendete Körpermodell zu dem bei der Bewegungsvermessung verwendeten Skelettmodell weitestgehend kompatibel.

Vermessung von Ballflugbahnen für die Optimierung des Physikmodells

Mittels Hochgeschwindigkeitskameras wurden von einer Ballmaschine erzeugte Ballflugbahnen, Flugbahnen von Aufschlägen und von kontrollierten Returns aufgezeichnet. Diese Aufnahmen werden zur Optimierung der physikalischen Modelle der Flug- bzw. Kontaktp Physik des Tischtennisballs beim Aufprall auf die Platte bzw. den Schläger genutzt.

Die verbesserte Physiksimulation wurde anschließend in die Testumgebung integriert. Des Weiteren musste das Backend, welches die Steuerung des virtuellen Avatars übernimmt und das eigentliche Simulations- und Visualisierungssystem entsprechend angepasst werden. In beiden Komponenten müssen die Berechnungen auf den gleichen Modellen erfolgen, um eine synchrone Arbeitsweise gewährleisten zu können. Die Simulation benötigt eine Vorwärtsdynamik, bei welcher der nachfolgende Zustand aus dem aktuellen bzw. den Startbedingungen errechnet wird. Im Backend hingegen ist zusätzlich die umgekehrte Berechnung durchzuführen. Hier sind die Startbedingungen gesucht, für welche ein gewünschtes Ziel erreicht werden kann.

Monitoring-Tools und Auswertefunktion

Als erste Schritte zur Implementierung von umfassenden Funktionen zur Auswertung des Spielgeschehens und der Spielerbewegungen wurden Möglichkeiten zur Visualisierung und Analyse der Schlagkurven des menschlichen Spielers realisiert. Außerdem wurde die Entwicklung von einer Monitorfunktion zur Beobachtung des laufenden Spielgeschehens aus einer beliebigen Betrachtungsposition integriert. Des Weiteren wurden erste Ansätze entwickelt, um die Bewegung des menschlichen Spielers vollständig zu erfassen, ohne diesen mit einem Markersatz zu versehen. Hierzu werden die erfassten Schläger- und Kopfpositionen mit Videodaten kombiniert. Es konnten bereits erfolgreiche Tests dieses Moduls durchgeführt werden. Für eine sinnvolle Einbindung in die Simulationsumgebung sind jedoch unter dem Gesichtspunkt der Echtzeitfähigkeit weitere Arbeiten notwendig. Auch die Robustheit erreicht derzeit noch nicht das notwendige Level.

Die eingangs erwähnte Analyse der Bewegungskurven des vom menschlichen Spieler bewegten Schlägers, inklusive nachträglicher erneuter Wiedergabe, erlaubt die

Auswertung bestimmter Schlagcharakteristiken und Spielarten. Dabei muss unterschieden werden zwischen der tatsächlich ausgeführten Bewegung und der vom System zum jeweiligen Zeitpunkt extrapolierten Bewegung. Letztere ist notwendig, da auf Grund der Latenzen des verwendeten Trackingsystems die tatsächliche Lage des Schlägers nur mit einer zeitlichen Verzögerung bekannt ist. Ein genauer Abgleich dieser beiden verschiedenen Schlagkurven mit den neuen Analysemöglichkeiten hat bereits zu einer Verbesserung der Extrapolation geführt, die in einem besseren Spielgefühl resultiert.

In die Testumgebung wurden diverse Analysemöglichkeiten integriert. Diese umfassen derzeit die Visualisierung der Ballflugbahn und die Analyse der Flugbahnparameter wie beispielsweise Geschwindigkeit und Rotationsfrequenz vor und nach dem Kontakt.

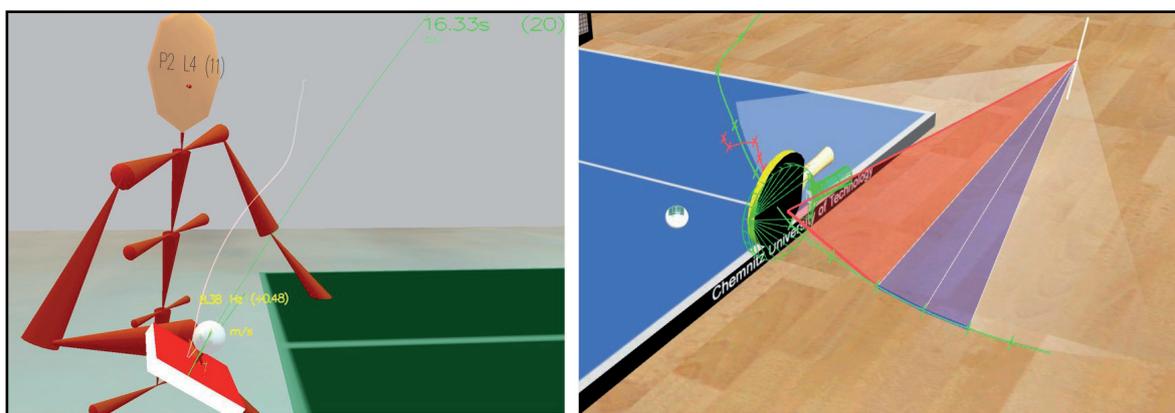


Abb. 3. Visualisierung von Daten und Trajektorie des Balls (links), Schlagbewegung (rechts)

Weitere Möglichkeiten betreffen die Analyse der Schlagbewegung selbst. Hier kann die Ist-Bewegung mit einer Sollbewegung überlagert werden, um dem Spieler mögliche Verbesserungen visuell ansprechend zu verdeutlichen. Um diese Möglichkeit zu einem sinnvollen Werkzeug weiter zu entwickeln, sollte zukünftig eine Datenbank korrekt ausgeführter Schläge angelegt werden.

In das System wurde eine Visualisierung des Spielgeschehens aus einer frei definierbaren Perspektive integriert. Zu diesem Zweck muss ein zweiter Visualisierungsrechner per Netzwerk in das System eingebunden werden. Es entsteht somit ein frei wählbares „Fenster“ in die virtuelle Welt. Diese Variante erlaubt das Anhalten einer aktuellen Situation zur detaillierten Analyse des Spielgeschehens.

Taktiler Feedback bei Ballkontakt

Einer der größten Nachteile bei der Interaktion mit virtuellen Objekten ist das Fehlen eines fühlbaren, sogenannten haptischen bzw. taktilen Feedbacks. Im Fall eines virtuellen Tischtennisspiels betrifft dies das haptische Feedback beim Kontakt des realen Schlägers mit dem virtuellen Ball. Um dies ein wenig zu kompensieren wurde ein adäquates akustisches Feedback in das System integriert. Es hat sich gezeigt, dass dies bereits eine wesentliche Verbesserung des Spiels erlaubt. Der Spieler

erkennt genau, wann er den Ball getroffen hat und passt sein weiteres Spiel an diese Erfahrung an. Wird das akustische Feedback deaktiviert, sinkt die Erfolgsquote des Spielers deutlich.

Eine weitere Verbesserung verspricht die Integration eines haptischen Feedbacks. Das bedeutet, es soll ein Schläger entwickelt werden, welcher beim Kontakt mit dem virtuellen Ball eine fühlbare Rückkopplung erzeugen kann.

Bei der Entwicklung ergaben sich mehrere Probleme. Es soll ein ausreichend starkes Feedback erzeugt werden, jedoch darf sich das Gewicht des Schlägers nicht wesentlich erhöhen. Auch darf die „träge Masse“ der Mechanik nicht von allein bei schnellen Bewegungen des Schlägers gegen diesen schlagen. Um dem Tischtennisspieler eine taktile Rückmeldung zu geben, wenn er den virtuellen Tischtennisball getroffen hat, wurde ein ForceFeedback-System für den Schläger entwickelt, welches den Impuls, der beim Auftreffen des Balls auf den Schläger auftritt, reproduziert.

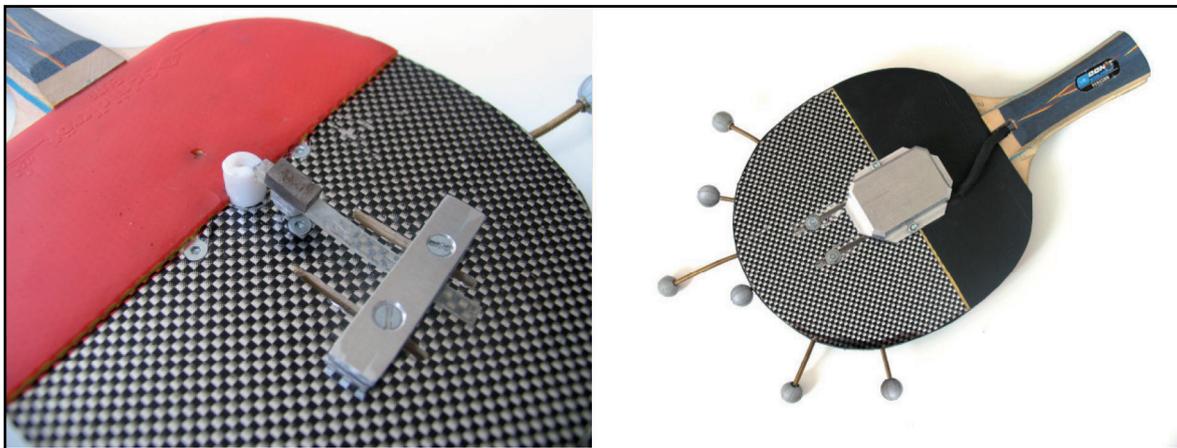


Abb. 4. Vorderseite der Mechanik (links), geschützter Antrieb auf der Rückseite (rechts)

Aus elektromagnetischen, mechanischen und pneumatisch/hydraulischen Wirkprinzipien wurde aus energetischen Betrachtungen heraus das mechanische ausgewählt. Die Wahl des Antriebs fiel auf einen Schrittmotor (Nanotec SP 2575 M0206), der in zukünftigen Entwicklungen in den Schläger eingesenkt wird. Die Aktorik zur Impulserzeugung besteht aus einer Feder aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit einem Schlagelement aus Aluminium. Eine spiralförmige Aluminiumscheibe bewirkt die Auslenkung der Feder und den anschließenden Aufprall des Hämmerchens auf den Schläger. Das gesamte Aktorsystem aus Schrittmotor, Feder, Aufnahme und Schlagelement wiegt weniger als 50 g. Durch Entfernung des Schlägerbelags auf einer Seite des Schlägers kann das Systemgewicht beibehalten werden. Der Schläger wiegt somit ca. 200 g, was dem Gewicht des ursprünglich verwendeten Schlägers entspricht.

Um den Feedbackschläger nutzen zu können, musste neben der Hardware auch eine Softwarekomponente zur exakten Ansteuerung entwickelt werden. Der aktuelle Hardware-Prototyp unterstützt ein konstantes Feedback. Hier besteht noch Potential

um einen nachfolgenden Prototyp mit variabler Feedbackstärke auszustatten. Das Feedback kann dann an die wirkenden Kräfte bei Ballkontakt angepasst werden. Das Feedbacksystem wird über den USB-Anschluss mit dem Rechner verbunden. Somit kann das Feedback bei Erkennung der virtuellen Kollision des Balls mit dem Schläger ausgelöst werden.

Ein kritischer Punkt war die Latenz (Reaktionszeit) des Feedbacksystems. Diese wurde zunächst mit ca. 150 ms gemessen. Dieser hohe Wert würde kein realistisches Feedback ermöglichen, da die Kraft viel zu spät am Schläger wirkt. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Ursache für diese großer Verzögerung in der verwendeten Software zu suchen ist. Diese scheint wohl in Bezug auf die Latenz nicht sonderlich effektiv zu arbeiten. Die im Rahmen der Integration entwickelte Treiberkomponente arbeitet hingegen mit einer Latenz im Bereich von wenigen Millisekunden. Das bedeutet, dass das taktile Feedback ohne merkliche Verzögerung zum akustischen Feedback ausgelöst wird. Da die visuelle Ausgabe mittels Projektoren eine Latenz in ähnlicher Größenordnung aufweist, erfolgt die Ansteuerung synchron zur Bildausgabe. Das Feedback erfolgt zuverlässig und vermittelt den Eindruck des Ballkontaktes.

Ergebnisse und Ausblick

Die in diesem Projekt entwickelten und überarbeiteten Module wurden in die Simulationsumgebung V-Pong integriert. Im Ergebnis ist es nun möglich, einen aufgezeichneten Aufschlag einer realen Spielerin bzw. eines realen Spielers in die Simulation einzulesen und diesen Aufschlag abzuspielen. Die aufgenommenen Bewegungen werden auf einen virtuellen Spieler übertragen. Der Nutzer des Systems sieht also wie sein Gegner den Schlag ausführt und kann einen Return spielen. Damit der Ballwechsel nach dem Return nicht zwangsläufig abbricht, wird die weitere Bewegung des Avatars synthetisch fortgesetzt. Diese Möglichkeit dient der Vorausschau auf eine weitere Entwicklung des Spiels auf Grund des gewählten Returns.

Einen großen Vorteil stellt die Reproduzierbarkeit des Aufschlages dar. Ein einmal erfasster Aufschlag kann beliebig oft abgespielt werden, um diese Situation zu analysieren. Unabhängig vom Erfolg des gespielten Returns können die Daten im Anschluss genauer betrachtet werden. Beispielsweise kann die Bewegung des Schlägers noch mal abgespielt werden und in diesem Zusammenhang der genaue Auftreffpunkt des Balls auf dem Schläger ermittelt werden. Im derzeitigen System wird nur der Schläger und der Kopf der realen Spielerin bzw. des realen Spielers getrackt, folglich können auch nur diese Daten visualisiert werden. Eine Visualisierung des gesamten Körpermodells könnte die Analysefunktion weiter aufwerten. Dies erfordert jedoch entweder ein komplettes Motioncapturing der Spielerin oder des Spielers oder eine algorithmische Methode, um die fehlenden Bewegungsdaten zu approximieren. Hierfür wurde ein algorithmischer Ansatz entwickelt.

Um eine realistische Simulation zu ermöglichen, wurden die Physikberechnungen nochmals überprüft und verbessert. Dies erfolgte auf der Grundlage der gewonnenen Daten der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines definierten Ballfluges. Mittels einer speziell dafür entwickelten Software wurden die Flugbahn und die Rotation

eines realen Balls analysiert. Die gewonnenen Informationen wurden dann in die Tischtennissimulation integriert. Es stellte sich so heraus, dass der Luftwiderstand nicht linear wirkt und auch die Geschwindigkeit quadratischen Einfluss hat. Durch die überarbeitete Physiksimulation konnte die Realitätsnähe des Spiels deutlich gesteigert werden.

Zur weiteren Verbesserung der Realitätsnähe der Simulation wurde der Tischtennisschläger um ein taktiler Feedback erweitert. Hierfür war es notwendig neue Hard- und Software zu entwickeln. Im Ergebnis entstand ein neues prototypisches Interaktionsgerät, welches es der Spielerin bzw. dem Spieler ermöglicht, den Ballkontakt zu fühlen. Da der Schläger kabelgebunden arbeitet und nur konstantes Feedback erlaubt, ergeben sich hier Möglichkeiten für weitere Entwicklungen.

Bei der Vermessung von Tischtennispielerinnen bzw. -spielern und der damit verbundenen Erfassung der Bewegungsdaten zeigte sich, dass die existierenden Systeme noch Probleme haben, die gesamten Daten zu erfassen. Es war daher erforderlich mehrere Messsysteme zu kombinieren und die drei benötigten Arten der Bewegungsdaten aufzuzeichnen. Dazu gehören die Bewegung der Spielerin bzw. des Spielers, die Bewegung des Schlägers und die Ballflugbahn. Hier wurden eigene Verfahren entwickelt, um alle Daten gleichzeitig erfassen zu können. Zusätzlich wurde es erforderlich diese Daten sowohl zeitlich als auch räumlich zu synchronisieren. Dies erfolgt teilweise manuell. Hier ist Spielraum für mögliche Verbesserung erkennbar.

Die rasante Entwicklung der Trackingsysteme wird in naher Zukunft die Bewegungserfassung sowohl einfacher als auch genauer ermöglichen, wodurch die Anzahl der verfügbaren Datensätze sprunghaft steigen wird. Die Kombination realer und synthetischer Bewegungsfolgen wird an Bedeutung gewinnen, um nicht nur Aufschläge, sondern längere Ballwechsel am Computer zu simulieren. Die geringere Latenz zukünftiger Trackingsysteme wird die hochrealistische Simulation des Tischtennispiels ermöglichen.

Die in diesem Projekt entwickelte Software bietet die Grundlage für die Realisierung einer neuen Generation von Simulatoren im Tischtennis, die in Zusammenarbeit mit Tischtennispielerinnen bzw. -spielern sowie Tischtennistrainerinnen und -trainern zu konkreten Trainingswerkzeugen weiterentwickelt werden können.

Literatur

- Rhijn, A.v., Liere, R.v. & Mulder, J.D. (2005). An Analysis of Orientation Prediction and Filtering Methods for VR/AR. In B. Fröhlich (Ed.), *Proceedings of IEEE Virtual Reality 2005*, Bonn/Germany, (pp. 67-74).
- Winkler, T. (2006). *Echtzeit-Bewegungssynthese für interaktive VR-Anwendungen*, Studienarbeit, TU-Chemnitz.
- Ishii, H., Wisneski, C., Orbanes, J., Chun, B. & Paradiso, J. (1999). *PingPongPlus: Design of an Athletic-Tangible Interface for Computer-Supported Cooperative Play*. Proceedings of CHI'99, May 15-20, 1999 (pp. 394-401). New York: ACM-Press.
- Wulf, V., Moritz, E.F., Henneke, C., Al-Zubaidi, K. & Stevens, G. (2004). Computer Supported Collaborative Sports: Creating Social Spaces Filled with Sports Activities. Proceedings of the Third International Conference on Educational Computing (ICEC 2004), September 1-3, 2004, Eindhoven/NL (pp. 80-89). Lecture Notes in Computer Science, 3166. Berlin: Springer.
- Bouma, W.J. & Vanecek, Jr. G. (1991). *Collision Detection and Analysis in a Physically based Simulation*. Proceedings of the Eurographics Workshop on Animation and Simulation, Vienna/Austria (pp. 191-203).
- Rusdorf, R. & Brunnett, G. (2005). *Real Time Tracking of High Speed Movements in the Context of a Table Tennis Application*. Proceedings of ACM VRST, Monterey, 2005 (pp.192-200). ISBN:1-59593-098-1.
- Rusdorf, S., Brunnett, G., & Lorenz, M. (2006). V-Pong: An Immersive Table Tennis Simulation. *IEEE Computer Graphics and Application*, 24 (4), 10-13, ISSN 0272-1716.
- Rusdorf, R., Brunnett, G., Lorenz, M. & Winkler, T. (2007). Real Time Interaction with a Humanoid Avatar in an Immersive Table Tennis Simulation, *Journal: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)*, 13, 15-25, ISSN 1077-2626.
- Meredith, M. & Maddock, S. (2004). *Real-Time Inverse Kinematics: The Return of the Jacobian*. Technical Report No. CS-04-06, Department of Computer Science, University of Sheffield.
- McDonald, J., Alkoby, K. et. al. (2002). *A Direct Method for Positioning the Arms of a Human Model*. Graphics Interface 2002, Proceedings.