

Anwendungen digitaler Hochgeschwindigkeitsvideokameras

Margrit Gelautz⁽¹⁾, Wolfgang Vogl⁽²⁾ und Manfred Schmutz⁽¹⁾

⁽¹⁾Institut für Softwaretechnik und Interaktive Systeme, Technische Universität Wien,
Favoritenstrasse 9-11/188/2, A-1040 Wien

<http://www.ims.tuwien.ac.at>, E-mail: gelautz@ims.tuwien.ac.at

⁽²⁾Selbstständiger Technischer Berater
Neulerchenfelderstrasse 27/1/22, A-1160 Wien

E-mail: wolfgang.vogl@aon.at

Zusammenfassung

Bedingt durch sinkende Preise und vergrößertes Angebot seitens der Kamerahersteller gewinnt der Einsatz digitaler Hochgeschwindigkeitsvideokameras in der Bildverarbeitung und Photogrammetrie zunehmend an Bedeutung. Am Institut für Softwaretechnik und Interaktive Systeme der Technischen Universität Wien wurde eine MotionPro 2000 Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Redlake angeschafft, welche Aufnahmeleistungen bis zu 2000 Frames/sec ermöglicht. Die hohe zeitliche Auflösung erlaubt neue Einblicke in dynamische Vorgänge, welche bisher mit photogrammetrischen Verfahren nur unzureichend erfasst werden konnten. In diesem Artikel beschreiben wir einige ausgewählte Anwendungsbeispiele von Hochgeschwindigkeitsvideoanalysen aus den Bereichen Musikinstrumentenbau, Biomechanik und Tanz, welche von Wiener Universitätsinstituten und Firmen in derzeit laufenden Forschungsprojekten durchgeführt werden. Die vorgestellten Anwendungsbereiche werden durch Präsentation von aufgenommenem Videobildmaterial anschaulich illustriert.

Abstract

The growing availability and affordability of digital high-speed video cameras opens the door to new applications in the areas of digital image processing and photogrammetry. The Institute for Software Technology and Interactive Systems at Vienna University of Technology operates a MotionPro 2000 digital high-speed video camera (Redlake), which allows frame rates up to 2000 frames/sec. The high temporal resolution gives new insight into dynamic processes that could not be observed with sufficient quality by conventional video analysis. In this paper, we present selected examples of high-speed video analyses in the areas of musical instrument manufacturing, biomechanics, and dance, which are related to ongoing research projects at academic institutions and companies in the Vienna area. The presented applications are illustrated by recorded high-speed video material.

1. Einleitung

Mit dem zunehmenden Angebot digitaler Hochgeschwindigkeitsvideokameras, wie sie zum Beispiel von den Firmen Redlake [1], Weinberger [2] oder Mikromak [3] vertrieben werden, eröffnen sich neue Anwendungsmöglichkeiten für die photogrammetrische Messung und Analyse von dynamischen Vorgängen, welche bei herkömmlichen Videoframeraten von 25 Frames/sec nur unzureichend erfasst werden konnten. Von der Arbeitsgruppe für Interaktive Mediensysteme (IMS) [4] der Technischen Universität Wien wurde kürzlich eine MotionPro 2000 Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Redlake erworben, welche nun in universitärer Forschung und industriellen Anwendungen zum Einsatz kommt. In diesem Zusammenhang wird derzeit am Institut auch eine Hochgeschwindigkeitsvideo-Website [5] aufgebaut, welche Hintergrundinformationen zum Kameratyp, Anwendungsmöglichkeiten und Verleihmodalitäten, sowie Verweise auf weiterführende Literatur und aufgenommene Videobeispiele beinhaltet.

Erste Untersuchungen mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, anfangs mit sehr aufwendigen Spezialfilmkameras auf normalem Filmmaterial hergestellt, wurden vor allem in der Automobilindustrie (Crashtests) und im militärischen Bereich (Ballistik) durchgeführt. Erst die Verfügbarkeit von Hochgeschwindigkeitsvideokameras ermöglichte einen breiteren Einsatz. Die zu Beginn noch sehr schlechte Bildqualität dieser Kameras wurde und wird laufend verbessert. Die Leistungsfähigkeit der am Markt verfügbaren Geräte nimmt von Jahr zu Jahr zu, und der Bedienungskomfort sowie das Preis/Leistungsverhältnis verbessern sich ständig. Der Einsatz digitaler Hochgeschwindigkeitsvideokameras in Kombination mit leistungsfähigen Computern eröffnet neue und vielfältige Einsatzgebiete.

Ein sehr interessantes Einsatzgebiet für Hochgeschwindigkeitskameras ist die Fehlerbehebung und Optimierung schneller Prozesse in Maschinenbau, Fertigung und Automatisierung. Häufig geht es darum, das Verständnis für die Vorgänge zu verbessern, in der Entwicklungsphase oder bei der Fehlersuche, aber auch zur Optischen Kontrolle der laufenden Produktion und für Regelungsaufgaben kommt diese Technologie zum Einsatz. Die Einsatzmöglichkeiten von digitalen Hochgeschwindigkeitskameras zur visuellen Regelung von Schweißprozessen werden zum Beispiel am Institut für Automatisierungstechnik der Universität Bremen untersucht [6].

Auch im Bereich medizinischer Diagnoseverfahren gewinnen Hochgeschwindigkeitsvideokameras zunehmend an Bedeutung. Beispiele dafür sind Untersuchungen zur automatischen Verfolgung von Augenlidbewegungen [7] sowie die Entwicklung videogestützter Verfahren zur Bewegungsanalyse von Stimmlippen [8].

Im folgenden werden nach einer kurzen Einführung in die Aufnahmetechnik einige ausgewählte Anwendungsmöglichkeiten digitaler Hochgeschwindigkeitsvideoanalyse vorgestellt und durch begleitendes Bildmaterial illustriert. Im Gegensatz zu klassischen Anwendungsgebieten wie Crashtests, zu denen auf den Websites der Kamerahersteller

(z.B. [2]) häufig Bildmaterial gefunden werden kann, berichten wir von Forschungsarbeiten in den Bereichen Musikinstrumentenbau, Biomechanik und Tanz, die derzeit von Wiener Universitätsinstituten bzw. Firmen durchgeführt werden, und deren Bildmaterial bisher noch kaum veröffentlicht wurde.

2. Hochgeschwindigkeitskamera und Aufnahmetechnik

Bei der MotionPro 2000 der TU Wien handelt es sich um eine monochrome Hochgeschwindigkeitsvideokamera mit einer radiometrischen Auflösung von 8 Bit, mit der Aufnahmegeschwindigkeiten bis zu 2000 Frames/sec möglich sind. Die räumliche Auflösung des CMOS Bildsensors beträgt 1280 x 1024 Pixel, wobei wahlweise auch ein kleinerer Bildausschnitt selektiert werden kann, um die zu speichernde Datenmenge zu reduzieren. Die Kamera ist mit einem 6 GB großen Bildspeicher, Trigger- und Synchronisationseinrichtungen sowie Software zur Ansteuerung und nachfolgenden Verarbeitung der aufgenommenen Bilddaten ausgestattet. Die Bilddaten können sowohl als Einzelbilddateien als auch als AVI-Files direkt von der Interfacekarte auf dem Computer archiviert werden.

Die Aufnahmetechnik bei der Arbeit mit Hochgeschwindigkeitskameras unterscheidet sich nicht wesentlich von der traditionellen (Studio-)Fotografie. Perspektive, Brennweite und Beleuchtung müssen gewählt werden um das Objekt bestmöglich zu erfassen. Im Gegensatz zur traditionellen Fotografie, wo man weitestgehend Freiheit in der Wahl der Belichtungszeit hat, ist diese Freiheit hier sehr eingeschränkt. Bedingt durch die rasche Bildfolge (Framerate) der Hochgeschwindigkeitskameras sind nur sehr kurze Belichtungszeiten möglich.

Die längste mögliche Belichtungszeit pro Einzelbild (Frame) ergibt sich mit $1/\text{Framerate}$ (Anzahl der Bilder pro Sekunde). Diese Belichtungszeit kommt üblicherweise zum Einsatz, sie bestimmt auch die Bewegungsunschärfe (motion blur). Je höher die Framerate, desto schärfer wird die Bewegung abgebildet. Die Bewegungsunschärfe kann jedoch auch ohne Erhöhung der Framerate reduziert werden, indem man entweder mit einem elektronischen Shutter arbeitet oder mit einem synchronisierten Blitzgerät. Beides verkürzt die effektive Belichtungszeit pro Frame und verringert somit die Bewegungsunschärfe.

Eine Verkürzung der Belichtungszeit muss jedoch durch stärkere Beleuchtung des Objektes ausgeglichen werden, wodurch die Beleuchtung einen limitierenden Faktor für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen darstellt. Die Intensität des Lichtes, die gleichmäßige Ausleuchtung und der richtige Kontrast sind entscheidend für die Qualität und Verwertbarkeit der Aufnahmen. Mehr Licht ermöglicht kürzere Belichtungszeiten und damit eine schärfere Darstellung der Bewegung. Je mehr Licht zur Verfügung steht, desto kleiner kann die Blende gewählt werden, was wiederum eine größere Schärfentiefe zur Folge hat. Der mögliche Schärfebereich (zeitlich und räumlich) ist also direkt von der Beleuchtungsintensität abhängig. Der Kontrast hängt von der Lichtführung ab, aber auch

von der Wahl des Hintergrundes, vor dem sich eine Bewegung abspielt. Das Licht spielt also eine entscheidende Rolle, besonders wenn es darum geht, verwendbare Messdaten aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme zu gewinnen.

3. Anwendungsbeispiele

3.1. Instrumentenbau

Von der Wiener Firma Thomastik-Infeld [9] wurden Hochgeschwindigkeitskameras bereits erfolgreich bei Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Musiksaitenerzeugung eingesetzt. Durch die zeitlich hochauflösenden Aufnahmen wurde es weltweit zum ersten Mal möglich, die Helmholtz-Schwingung einer Saite tatsächlich zu beobachten. Theoretisch ist die im 19. Jahrhundert von Hermann von Helmholtz entdeckte und nach ihm benannte Saitenschwingung zwar bekannt [10], tatsächlich läuft sie bei realen Saiten allerdings so schnell ab, dass es unmöglich ist, sie mit freiem Auge zu verfolgen. Derartige Untersuchungen geben neue Einblicke in das Schwingungsverhalten von Saiten, speziell in nichtstationäre Zustände, welche nur schwer zu simulieren sind. Die Untersuchungen liefern wertvolle Erkenntnisse für Qualitätskontrolle und Weiterentwicklung in der Musiksaitenerzeugung.

Auf Abb. 1 ist eine Cello-Saite auf einem Monocord zu sehen, sie hat eine Länge von 70 cm und einen Durchmesser von gut einem Millimeter. Im Vordergrund der Aufnahmen ist ein Steg zu sehen, der zweite Steg am oberen Bildrand ist nur als dunkle Stelle zu erkennen. Zwischen diesen beiden Stegen ist eine Saite gespannt. Gleich hinter dem ersten Steg kann man gut die weißen Bogenhaare des Cellobogens erkennen, mit dem die Saite von unten gestrichen wird. Um die Saite über die gesamte Länge gut sichtbar zu machen, wurde sie mit weißen Querstreifen versehen. Der Hintergrund, eine Art Millimeterpapier, ermöglicht es, die Saitenschwingung von nur wenigen Millimetern gut wahrzunehmen.

Die Sequenz in Abb. 1 zeigt die Helmholtzbewegung einer gestrichenen Saite, die, wie bereits erwähnt, von Helmholtz erstmals beschrieben und nach ihm benannt wurde. In der Bewegung zeigt sich die Saite immer wie aus zwei geraden Stücken bestehend, die sich an einer Stelle treffen. Man kann den Knick in der Saite erkennen, der sich zunächst links von der Mitte auf den Betrachter zu bewegt, am Steg reflektiert wird, um sich dann, rechts der Mittellinie, wieder vom Betrachter weg zu bewegen. Dieser Knick (Helmholtz Corner) läuft mit der Grundfrequenz der Saite um, bei einer Violin-a-Saite 440 Mal pro Sekunde. Zweck dieser Aufnahmen war es, die Schwingung einer Saite sichtbar zu machen und die Vorgänge dabei zu untersuchen und zu vermessen. Dabei wurden auch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durch ein Mikroskop gemacht, um die feinen Details der Bewegung zu erfassen (Abb. 2).

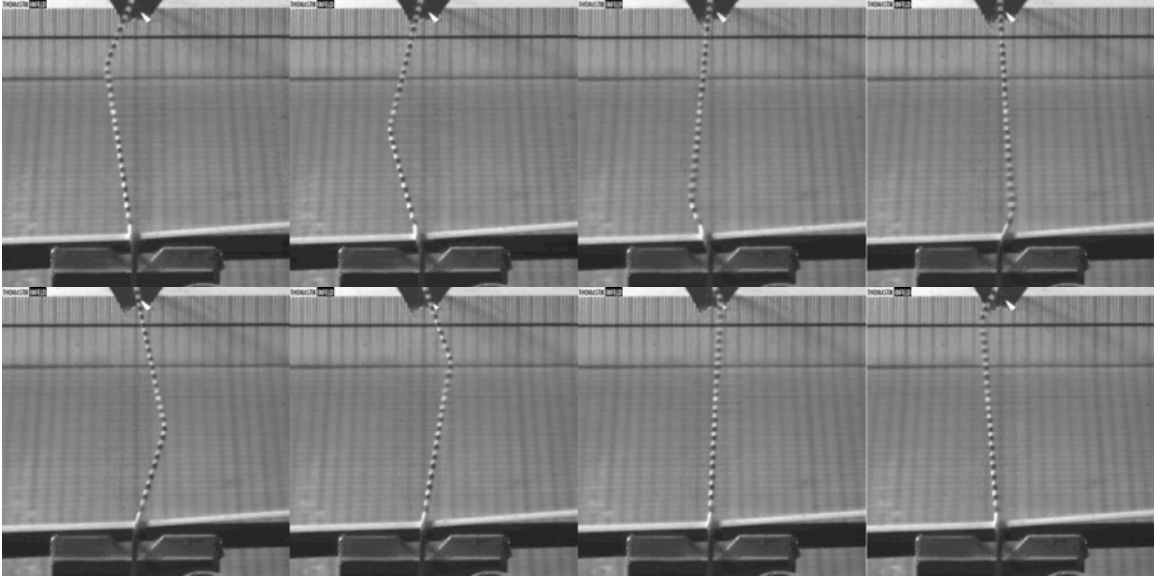
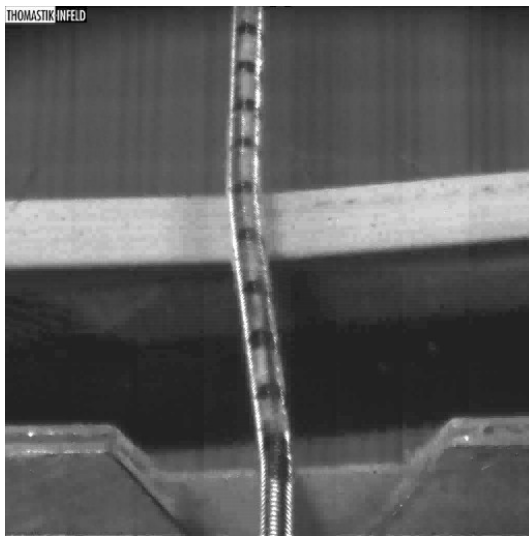
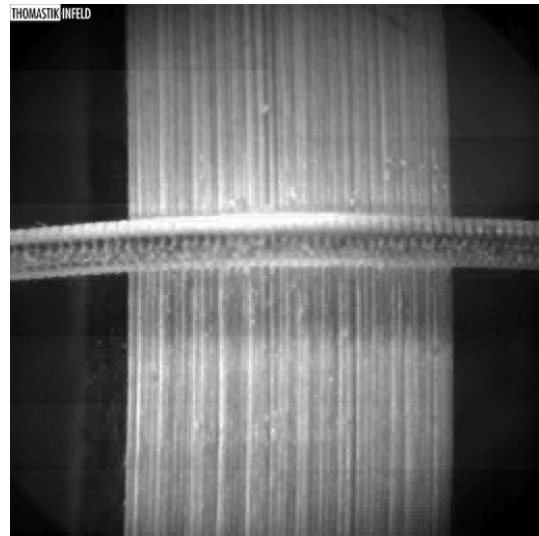


Abb. 1 Bewegung einer gestrichenen Cello-Saite. Jeder 4. Frame der aufgenommenen Sequenz ist dargestellt (von links oben nach rechts unten). (© Thomastik-Infeld)



(a)



(b)

Abb. 2 Beispiele für Mikroskopaufnahmen von Saitenbewegungen. Unter der Saite sind die Haare des Bogens zu sehen, mit welcher die Saite angestrichen wurde. (© Thomastik-Infeld)

3.2. Biomechanik

An der Abteilung für Biomechanik/Bewegungswissenschaft und Sportinformatik [11] der Universität Wien werden Untersuchungen zur videogestützten Erfassung und Analyse menschlicher Bewegung mittels Hochgeschwindigkeitskameras durchgeführt [12]. Ein Forschungsschwerpunkt ist dabei die Entwicklung von möglichst automatischen Verfahren zur Erfassung, Messung und Verfolgung (tracking) von Körpersegmenten aus Videos. Abb. 3 zeigt eine markergestützte Aufnahme eines Teils einer Sprungbewegung mittels MotionPro Hochgeschwindigkeitskamera.

Ein Anwendungsbeispiel von Bildverarbeitungsoperationen auf markerloses Videomaterial ist in Abb. 4 illustriert. Abb. 4 (a) zeigt den aufgenommenen Ausschnitt eines Unterschenkels bei aufrechter Körperhaltung. Die zugehörige schematische Darstellung eines Beines mittels eines Körpermodells (siehe z.B. [13]) ist in (b) gegeben. Die tatsächlichen Segmentumfänge bzw. -querschnitte wurden bei dem Probanden von (a) durch Messung ermittelt und ergaben für den Abschnitt des Unterschenkels die in Abb. (c) gezeigte Maske. Mittels geeigneter Bildverarbeitungsmethoden wie lokaler Schwellwertbildung, Kantenextraktion und morphologischer Filter wurde der Unterschenkel aus (a) vom Hintergrund extrahiert. Die extrahierte Körperform ist in Abb. (d) schwarz dargestellt. Die durch Vermessung der Versuchsperson ermittelte Maske aus (c) wurde in (d) eingepasst (graue Darstellung). Abweichungen zwischen den beiden Masken sind unter anderem durch nicht perfekte Segmentierung von (a) und vereinfachte Annahmen bei der Erstellung des Körpermodells (Modellierung der Querschnitte als Ellipsen) bedingt.

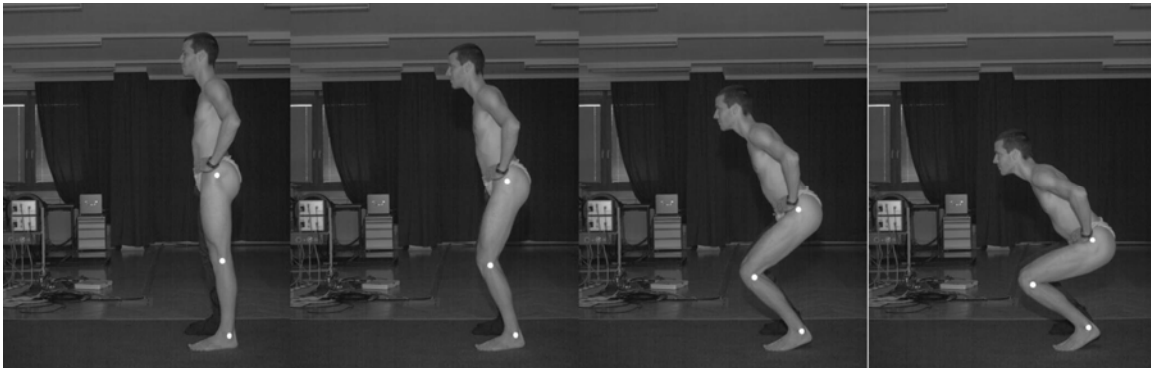


Abb. 3 Beispiel einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme im Rahmen von biomechanischen Bewegungsanalysen. Die Endpunkte von Ober- und Unterschenkel sind durch Marker gekennzeichnet. Die Bildfolge zeigt die Frames 1, 50, 100 und 150 der aufgenommenen Sequenz.

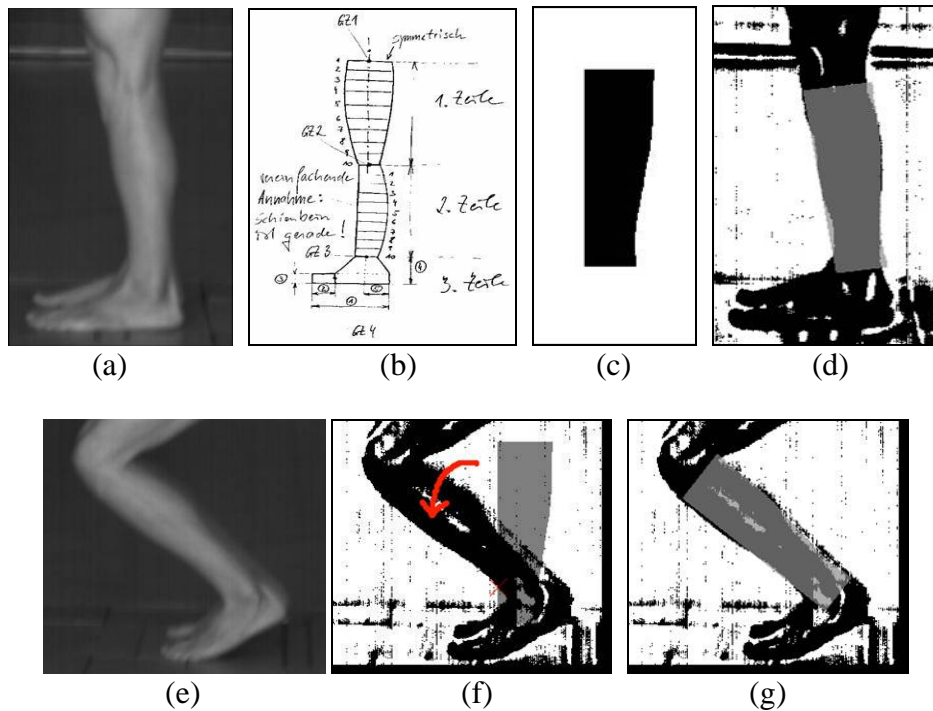


Abb. 4 Einpassung von Körpersegmenten in das aufgenommene Bildmaterial: (a) und (e) zeigen Ausschnitte aus den Videoaufnahmen, (b) skizziert die Vermessung eines Körpersegments, und (c) zeigt die abgeleitete Maske. Die Überlagerung von gemessener und aus dem Video extrahierter Maske ist in (d), (f) und (g) zu sehen.

Abb. 4 (e) zeigt einen späteren Frame der aufgenommenen Videosequenz mit verändertem Winkel zwischen Ober- und Unterschenkel. Abbildungen 4 (f) and (g) demonstrieren die automatische Auffindung der neuen Lage des Unterschenkels durch Bestimmung jenes Drehwinkels, welcher der maximalen Überlagerung zwischen gemessener und extrahierter Maske entspricht.

3.3. Tanz

Im Rahmen von Untersuchungen zur videogestützten Aufnahme, Archivierung und Analyse von Ballett-Choreografien wurden von der Forschungsgruppe für Interaktive Mediensysteme [4] der TU Wien im Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe für Multimediale Informationssysteme [14] der Universität Wien experimentelle Aufnahmen mit einem Sony DCF-VX2000 Camcorder und einer HCC1000 Hochgeschwindigkeitsvideokamera der Firma Mikromak durchgeführt. Komplexe Ganzkörperbewegungen, wie sie im klassischen Tanz (Ballett) auftreten, stellen wesentlich höhere Anforderungen an die Aufnahmeverfahren als die meisten der in der vorhandenen Bildverarbeitungsliteratur beschriebenen Bewegungsstudien [15], welche sich in vielen Fällen auf menschliches Gehen beschränken. Die Verfolgung und Klassifikation der mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Tanzbewegung

bildet die Basis für die Entwicklung von computergestützten Verfahren zur automatischen Archivierung und Annotation von Choreografie-Material, wodurch eine Reduktion der Zeit und Kosten für die Wiederaufnahme bereits bestehender Choreografien ermöglicht wird [16].

Abb. 5 zeigt die Aufnahme eines Ballettsprung (Grand jeté) mit dem verwendeten Sony Camcorder bei einer herkömmlichen Framerate von 25 Frames/sec (50 Halbframes/sec), wobei acht unmittelbar aufeinander folgende Frames der aufgenommenen Bildfolge dargestellt sind. Die auftretende Bewegungsunschärfe als Folge der raschen Sprungbewegung ist auf mehreren Frames insbesondere im Bereich des rechten Fußes erkennbar. Derselbe Ballettsprung wurde mit der monochromen Hochgeschwindigkeitskamera HCC1000 aufgenommen, wobei die Frameraten in mehreren Schritten von 25 Frames/sec auf 462 Frames/sec erhöht wurden. Das Ergebnis der Aufnahme mit 462 Frames/sec ist in Abb. 6 gezeigt. Beim Vergleich der Abbildungen 5 und 6 ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Normalgeschwindigkeitsaufnahme von Abb. 5 bei der Hochgeschwindigkeitsaufnahme von Abb. 6 aus Platzgründen nur jeder 10. Frame der aufgenommenen Serie gezeigt ist. Neben der höheren zeitlichen Auflösung der Sprungsequenz wurde durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeitskamera die Bewegungsunschärfe stark reduziert, wie in der vergleichenden Darstellung eines Szenendetails in Abb. 7 deutlich erkennbar ist.



Abb. 5 Aufnahme eines Ballettsprungs (Grand jeté) mit einem Sony Camcorder DCR-VX2000 mit 25 Frames/sec. Die Darstellung zeigt aufeinander folgende Frames der aufgenommenen Sequenz.

Mit demselben Bildmaterial wurde in weiterer Folge eine Reihe von Versuchen durchgeführt, bei denen Bildpunkte über mehrere Frames hindurch bei verschiedenen

Fraseraten automatisch verfolgt wurden. Abb. 8 illustriert eine Anwendung des Kanade-Kucas-Tomasi (KLT) [17] Tracking-Verfahrens auf die Hochgeschwindigkeitssequenz. Der erste und der letzte Frame der untersuchten Testsequenz sind abgebildet, wobei die verfolgten Punkte in Farbe markiert sind. Im ersten Frame wurden die Ausgangspunkte für das Tracking vom Algorithmus automatisch selektiert. Jene Punkte, welche der KLT Algorithmus durch die ganze Testsequenz hindurch erfolgreich verfolgen konnte, sind in Abb. 8 grün markiert. Blau dargestellt sind jene Punkte, welche der automatischen Algorithmus zwar als Ergebnis lieferte, die aber in einer nachfolgenden händischen Qualitätsanalyse als von unzureichender Qualität klassifiziert wurden. Punkte, die dem statischen Hintergrund angehören, wurden rot markiert. Man erkennt in Abb. 8, dass die meisten der erfolgreich detektierten (d.h., grün markierten) Punkte im Bereich des Oberkörpers und Kopfes liegen, welche während der Bewegung relativ stabil blieben. Einige Punkte konnten jedoch auch im Bereich der Extremitäten richtig verfolgt werden, trotz der starken Dynamik dieser Teile. Eine ähnliche Untersuchung wurde auch mit niedrigeren Frameraten durchgeführt, wobei die Rate der richtig verfolgten Punkte erwartungsgemäß absank.

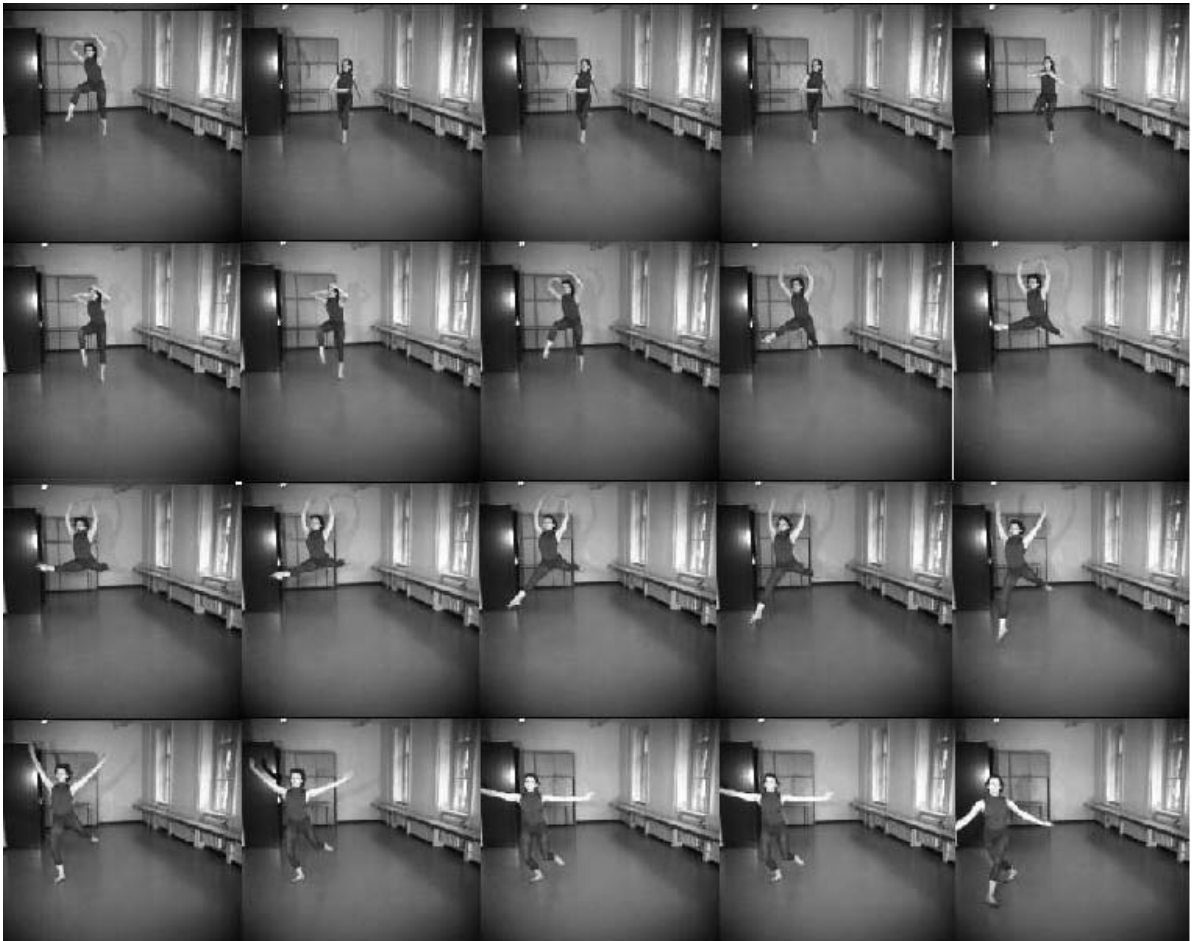


Abb. 6 Grand jeté von Abb. 5 aufgenommen mit der HCC1000 Hochgeschwindigkeitsvideokamera. Die Darstellung zeigt jeden 10. Frame der mit 462 Frames/sec aufgenommenen Sequenz.

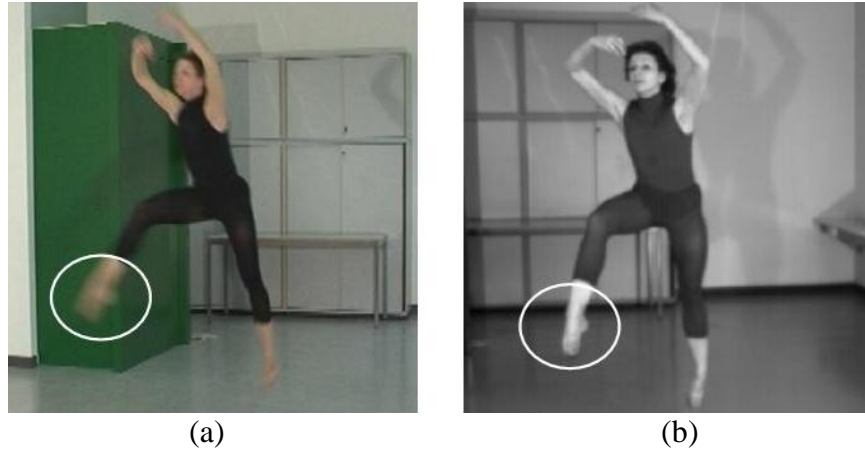


Abb. 7 Vergleich der Bewegungsunschärfe (motion blur) bei (a) 25 Frames/sec und (b) 462 Frames/sec.

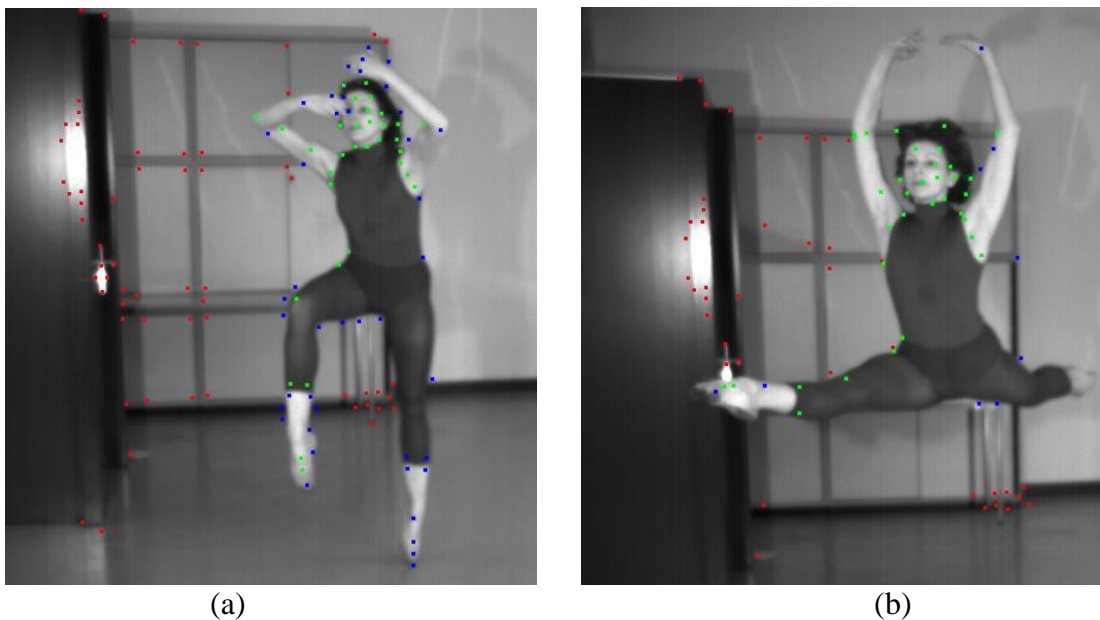


Abb. 8 Anwendung des KLT feature trackers auf die Hochgeschwindigkeitsframes von Abb. 6. Dargestellt sind der (a) erste und (b) letzte Frame der untersuchten Teilsequenz.

3.4. Weiteres Bildmaterial

Einige weitere Aufnahmen von Hochgeschwindigkeitsszenen, diesmal unter der Verwendung von Alltagsgegenständen, sind in Abbildungen 9, 10 und 11 gezeigt. Diese Aufnahmen wurden mit einer Framerate von 1000 Bildern pro Sekunde gemacht, als Beleuchtung dienten zwei 500W Lampen. Diese Aufnahmegeschwindigkeit ist

ausreichend, um das Bersten des Eis Abb. 9 sichtbar zu machen. Das Projektil des Luftdruckgewehres dagegen ist bei dieser zeitlichen Auflösung noch nicht zu sehen.

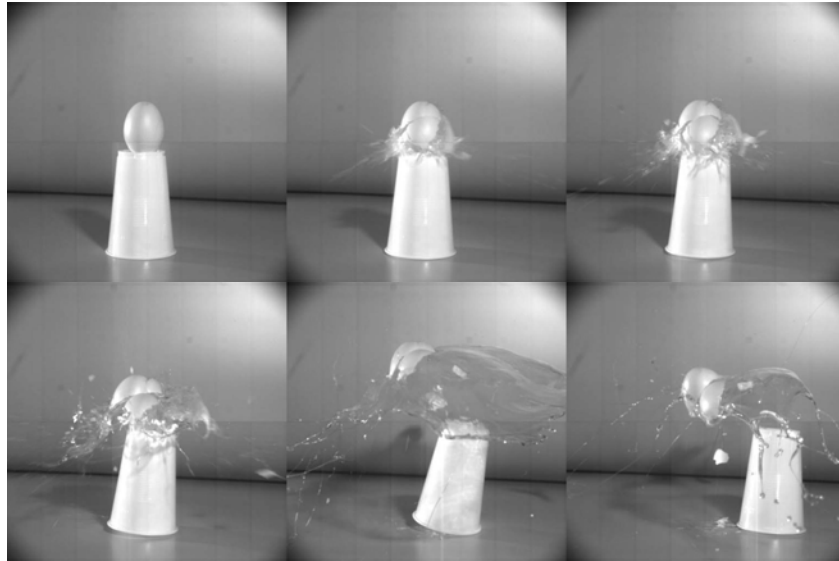


Abb. 9 Bersten eines Eis, ausgelöst durch ein Luftdruckgewehr. Dargestellt sind die Frames 12, 16, 18, 24, 40 und 180 der aufgenommenen Sequenz. (© W. Vogl)



Abb. 10 „Kartoffelbrei“ (Frames 12, 16, 18, 20, 24 und 30) (© W. Vogl)

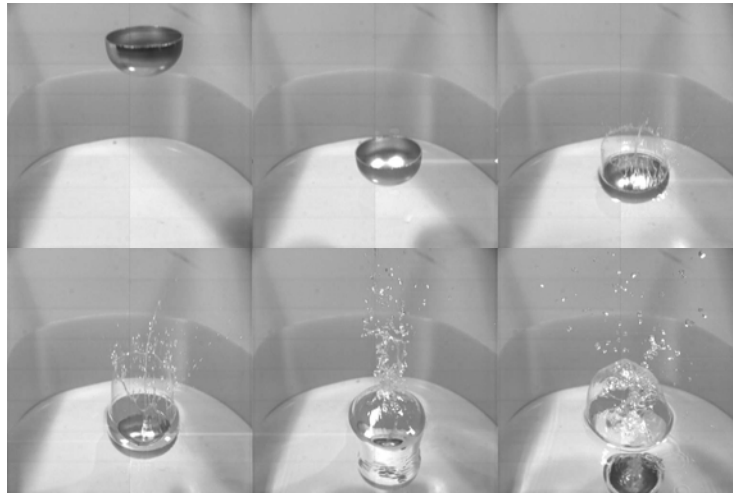


Abb. 11 Die Glocke einer Klingel beim Eintauchen in Wasser (Frames 33, 73, 83, 93, 130 und 170) (© W. Vogl)

4. Zusammenfassung

In diesem Artikel haben wir einige ausgewählte Anwendungsbeispiele digitaler Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen präsentiert. Das gezeigte Bildmaterial von Saitenschwingungen, Tanzbewegungen und „Alltagsaufnahmen“ demonstrierte, dass durch die zeitlich hochauflösenden Aufnahmen neue Einblicke in dynamische Vorgänge ermöglicht werden, welche sich bei herkömmlichen Frameraten der Beobachtung und photogrammetrischen Analyse entziehen. Auf einer Hochgeschwindigkeits-Website [5], die sich derzeit im Aufbau befindet, wird zugehöriges Bildmaterial in Form von Videos präsentiert sowie zusätzliche Information zu laufenden Projekten und weiterführenden Weblinks gegeben.

Danksagung

Wir danken der Firma Thomastik-Infeld für ihre Kooperation und die zur Verfügung gestellten Aufnahmen der schwingenden Saiten. Weiters bedanken wir uns bei Pascale Chevroton, der Tänzerin des Grand jeté, und bei Dr. Arnold Baca vom Sportinstitut der Universität Wien für die Bereitstellung der Bilder vom Biomechanik-Labor. Teile der Untersuchungen wurden im Rahmen des FWF-Projektes P15663 durchgeführt.

Literaturverzeichnis

[1] Redlake MASD Inc., Stuttgart, Deutschland, <http://www.redlake.de>

[2] Weinberger Vision, Dieticon, Schweiz, <http://www.weinbergervision.com>

- [3] Mikromak GmbH, Erlangen, Deutschland, <http://www.mikromak.com>
- [4] Forschungsgruppe Interaktive Mediensysteme, Institut für Softwaretechnik und Interaktive Systeme, Technische Universität Wien, <http://www.ims.tuwien.ac.at>
- [5] High-speed Video Recording Website, <http://www.ims.tuwien.ac.at/research/highspeedvideo>
- [6] Nordbruch, S., Visuelle Regelung von elektrischen Schweissprozessen, Institut für Automatisierungstechnik, Universität Bremen, Vortrag, 19. Kolloquium der Automatisierungstechnik, Salzhausen, Deutschland, 1997, Vortragsunterlagen unter http://www.iat.uni-bremen.de/mitarbeiter/nordbruch/publications/frame_publication.html
- [7] Wittenberg, T., R. Frischholz, S. Wolf, M. Tigges, B. Suchy, and S. Schneider, Automatische Verfolgung von Augenlidbewegungen und Korrelation mit EMG-Daten. Bildverarbeitung für die Medizin 2000 (Herausgeber A. Horsch and T. Lehmann), Springer, pp. 43-47, 2000
- [8] Hoppe, U., F. Rosanowski, J. Lohscheller, M. Döllinger, and U. Eysholdt, Visualisierung und Interpretation von Stimmlippenschwingungen, Bildverarbeitung für die Medizin 2003, pp. 240-243, <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/Publications/CEUR-WS/Vol-80/p240.pdf>
- [9] Thomastik-Infeld, Wien, <http://www.thomastik-infeld.com>
- [10] Bows and Strings, The University of New South Wales, Sydney, Australia, <http://www.phys.unsw.edu.au/~jw/Bows.html>
- [11] Abteilung für Biomechanik/Bewegungswissenschaft und Sportinformatik, Universität Wien, <http://www.univie.ac.at/biomech/>
- [12] Baca, A., Spatial marker trajectory reconstruction from high speed video image sequences. Med. Eng. Phys. 19 (4), pp. 367-374, 1997
- [13] Hatze, H., Progression of musculoskeletal models toward large-scale cybernetic myoskeletal models, in: Winters, J.M., Crago, P. (eds.), Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement. Springer, New York, pp. 425-437, 2000
- [14] Abteilung Multimediale Informationssysteme, Institut für Informatik und Wirtschaftsinformatik, Universität Wien, http://www.ifs.univie.ac.at/hp/inst_ie.htm
- [15] Gavrilu, D., The visual analysis of human movement, Computer Vision and Image Understanding, 73 (1), pp. 82-98, 1999

[16] Zillner, S., M. Gelautz, and M. Kallinger, "The Right Move" – a concept for a video-based choreography tool, Proceedings ISPRS Commission III Symposium (Photogrammetric Computer Vision), Graz, Austria, pp. 313-317 (part B), 2002

[17] Shi, J. and C. Tomasi, Good features to track, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Jerusalem, Israel, pp. 593-600, 1994