

Werkzeuge und Anwendungen der photogrammetrischen 3D-Bewegungsanalyse

Hans-Gerd Maas

Zusammenfassung

Systeme und Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie eignen sich aufgrund der Charakteristik der Photogrammetrie als simultanes Messverfahren und der inhärenten Tauglichkeit von Halbleiterkameras zur Akquisition von Bildsequenzen besonders für zeitaufgelöste Messungen. Multiokulare Bilddatenakquisitionssysteme und Verfahren der Bildsequenzanalyse erlauben die Lösung vielfältiger Messaufgaben und haben der Photogrammetrie eine Reihe vielfältiger neuer Anwendungsgebiete im Bereich der 3D-Bewegungsanalyse erschlossen.

Der Beitrag geht zunächst kurz auf die technischen Anforderungen an photogrammetrische Datenakquisitionssysteme der 3D-Bewegungsanalyse ein. Danach wird in der Datenverarbeitung auf die Notwendigkeit und das Potential der Kombination von räumlichen und zeitlichen Zuordnungsprozessen (spatio-temporale Zuordnung) sowie auf bildsequenzbasierte Kalibrierverfahren eingegangen. Abschließend zeigen Anwendungsbeispiele aus unterschiedlichen Bereichen das Leistungsvermögen und die Vielseitigkeit photogrammetrischer 3D-Bewegungsanalyseverfahren.

1 Einleitung

Die Nahbereichsphotogrammetrie hat sich im Laufe der letzten 10 - 20 Jahre eine Vielzahl neuer Anwendungsgebiete in Bereichen wie der industriellen Messtechnik, der medizinischen Bildverarbeitung und der Generierung von Virtual-Reality Modellen erschlossen. Neben Anwendungen der statischen 3D-Koordinatenmesstechnik und Oberflächenmodellgenerierung sind hier vor allem Anwendungen der 3D-Bewegungsanalyse zu nennen. Die Anwendungsbereiche reichen dabei von der quasi-statischen Deformationsanalyse in stufenweisen Belastungstests über medizinische Ganganalyse und die Bestimmung komplexer Bewegungsfelder in der Strömungsmesstechnik bis hin zu hoch dynamischen Anwendungen in der Ballistik.

Die Stärken der Photogrammetrie als simultanes Messverfahren kommen in Anwendungen der 3D-Bewegungsanalyse in besonderem Maße zum Tragen. Die Verwendung synchronisierter Mehrkamerasysteme erlaubt Deformationsmessungen in hoch-dynamischen Anwendungen oder die 3D-Bewegungsbestimmung einer großen Anzahl von Objekten. Je nach Komplexität der Anwendung kann die Auswertung in Echtzeit oder auf Basis von temporär abgespeicherten multi-okularen Bildsequenzen erfolgen.

Im Folgenden wird zunächst die Eignung von Halbleiterkameras zur Bildsequenzakquisition kurz beleuchtet. Darauf werden einige algorithmische Aspekte der 3D-Bewegungsanalyse, soweit die Auswertung von herkömmlichen Auswerteprozeduren in der digitalen

Nahbereichsphotogrammetrie abweicht, angesprochen. Abschließend werden einige Anwendungsbeispiele aus unterschiedlichen Bereichen gezeigt. Die Darstellungen beschränken sich dabei auf Aufgabenstellungen der Aufnahme und Analyse bewegter Objekte mit statischen Kameras. Verfahren und Anwendungen der mobilen Robotik und der autonomen Navigation anhand von Bildsequenzen bleiben außer Betracht.

2 Datenakquisition

Die Konfiguration von Systemen zur Datenakquisition in Anwendungen der photogrammetrischen 3D-Bewegungsanalyse baut auf der Tatsache, dass sich die meisten handelsüblichen Halbleiterkameras prinzipbedingt zur Akquisition von Bildsequenzen eignen. Da in Anwendungen der 3D-Bewegungsanalyse im Gegensatz zu statischen Anwendungen die Aufnahme von Bildverbänden als Voraussetzung für eine stereoskopischen Auswertung mit einer Einzelkamera meist nicht möglich ist, bestehen photogrammetrische Bewegungsanalysesysteme aus mehreren Kameras, welche zwecks simultaner Bildaufnahme synchronisiert werden müssen. Dazu eignen sich vor allem CCD-Kameras für industrielle Anwendungen, welche synchronisiert und über eine geeignete Rechnerschnittstelle simultan ausgelesen werden. Diese Kameras liefern häufig Bildraten von 25Hz oder 50Hz bei einem Bildformat von 640x480 bis 1280x1024 Pixeln. Videokameras oder Webcams liefern vergleichbare Bildraten zu sehr geringen Systemkosten, sind jedoch mangels Synchronisierbarkeit zunächst für 3D-Anwendungen nicht geeignet. Bei deutlich höheren Anforderungen hinsichtlich der zeitlichen Auflösung bietet sich die Verwendung von Hochgeschwindigkeitskameras mit Bildraten von 1000Hz und mehr an. Eine Option der stereoskopischen Datenakquisition mit einer einzelnen Hochgeschwindigkeitskamera oder einer Videokamera bietet sich durch den Einsatz einer Prismenoptik (z.B. Putze, 2004).

Ein System zur stereoskopischen Bildsequenzdatenakquisition sollte aus Gründen der Zuverlässigkeit der Datenverarbeitung aus mindestens drei Kameras bestehen (vgl. Kap. 3.1). Dies kann auch in der Datenakquisition bei moderatem technischen Aufwand unterstützt werden, indem drei schwarz-weiß Kameras an einen RGB-framegrabber angeschlossen werden (Abb. 1).

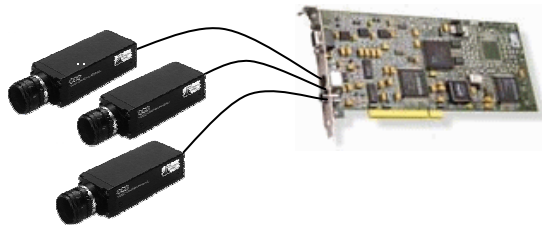


Abb. 1: Synchronisiertes Dreikamerasystem

Für anspruchsvollere Anwendungen werden mittlerweile synchronisierte Mehrkamerasysteme mit bis zu 32 Kameras angeboten (vgl. Kap. 4.2).

3 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitungskette von den Rohdaten eines Mehrkamerasystems bis zum gesuchten Endergebnis der 3D-Bewegungsanalyse, beispielsweise in Form von 3D-Trajektorien, wird in Abb. 2 schematisch dargestellt. Die Bildvorverarbeitung wird in vielen Anwendungen die Subtraktion eines Hintergrundbildes mit dem Ziel der Vereinfachung der Segmentierung beinhalten. Die beiden wichtigsten und aufwendigsten Schritte sind die Herstellung von Mehrbildkorrespondenzen (räumliche Zuordnung) und die Objektverfolgung (zeitliche Zuordnung). Je nach Ziel und Randbedingungen der Anwendung kann die Reihenfolge dieser Verarbeitungsschritte auch vertauscht werden (z.B. Netzsch, 1995). Beide Zuordnungsschritte lassen sich auch in Verfahren der spatio-temporalen Zuordnung vereinen (z.B. Willneff/Grün, 2002). Die Systemkalibrierung stellt eine entscheidende Voraussetzung für die Zuverlässigkeit der Mehrbildzuordnung und die Genauigkeit der 3D-Koordinatenbestimmung dar.

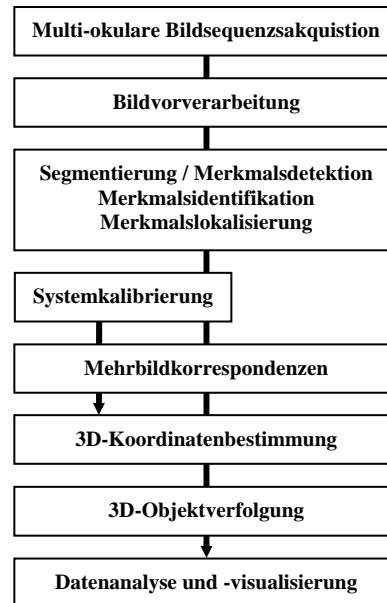


Abb. 2: Ablaufschema

3.1 Spatio-temporale Zuordnung

Das in Abb. 2 dargestellte Ablaufschema erlaubt Variationen in der Reihenfolge der räumlichen und zeitlichen Zuordnung. Die Komplexität der zeitlichen Zuordnung (Tracking) hängt dabei von der zeitlichen Auflösung des Datenakquisitionssystems und dem Vorhandensein von Modellwissen über den zu analysierenden Bewegungsablauf ab. Die Komplexität der räumlichen Zuordnung (Herstellung von Mehrbildkorrespondenzen) hängt von der Anzahl der zu verfolgenden Objekte und der Geometrie des Objektraums ab. In Anwendungen, in denen gutes Modellwissen über die zu analysierende Bewegung vorliegt und Bildsequenzen mit hoher zeitlicher Auflösung aufgenommen wurden, wird die 2D-Zuordnung aufgrund kleiner und prädizierbarer Bewegungen im Bildraum trivial. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, wird die zeitliche Zuordnung im Bildraum eine große Anzahl nicht auflösbarer Mehrdeutigkeiten produzieren. In diesem Fall bietet die zeitliche Zuordnung im Objektraum eine deutlich höhere Zuverlässigkeit, da durch die dritte Dimension viele Mehrdeutigkeiten des 2D-Tracking gelöst werden. Dies bedingt allerdings zunächst die Herstellung von Mehrbildkorrespondenzen als Voraussetzung zur Bestimmung von 3D-Koordinaten.

Ein wichtiges Werkzeug bei der stereoskopischen Zuordnung ist die Epipolargeometrie. Bei bekannter innerer und relativer Orientierung zweier Kameras erlaubt die Nutzung der Kernlinie die Reduktion des Suchraums für korrespondierende Merkmale auf eine Linie im

Bild. Bei Vorhandensein von Wissen über die Tiefenkoordinate im Objektraum lässt sich die Länge des Suchbereichs auf der Kernlinie zusätzlich einschränken. Es lässt sich zeigen, dass im allgemeinen Fall die Komplexität der Zuordnung auf der Kernlinie mit dem Quadrat der zuzuordnenden Merkmale und linear mit der Tiefenausdehnung im Objektraum zunimmt (Maas, 1992a). Bei der binokularen Zuordnung entstehende Mehrdeutigkeiten können durch die Verwendung einer dritten Kamera weitgehend gelöst werden. Ein trinokulares System erlaubt die Reduktion des Suchraums für korrespondierende Bildmerkmale auf die Schnittpunkte von Kernlinien (Abb. 3), was in der Praxis eine Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der stereoskopischen Zuordnung um ein bis zwei Größenordnungen bewirkt. Eventuell verbleibende Mehrdeutigkeiten können durch die Verwendung weiterer Kameras gelöst werden (Maas, 1997). Generell sollten Systeme der photogrammetrischen 3D-Bewegungsanalyse unter dem Aspekt der Zuverlässigkeit in automatischen Messsystemen grundsätzlich mit mindestens drei Kameras ausgestattet sein.

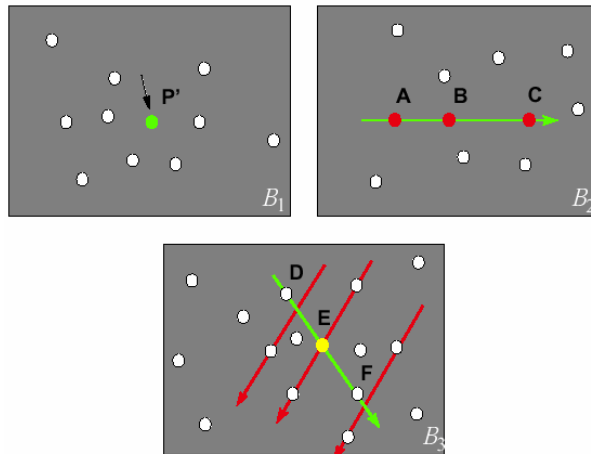


Abb. 3: Grundprinzip des trinokularen Sehens (Maas, 1992a)

Die beiden Prozesse der räumlichen und zeitlichen Zuordnung in multi-okularen Bildsequenzen sind durch Redundanzen gekennzeichnet. Dies ist qualitativ in Abb. 4 dargestellt: Hier sind alle erstellbaren Mehrbildzuordnungen Q_{spat} und Zuordnungen auf der Zeitachse im Bildraum Q_{temp} als Linien angegeben. Aus der Abbildung wird deutlich, dass nicht alle Verbindungen zwischen Punkten notwendig sind, um eine 3D-Trajektorie zu generieren. Aufgrund nicht-lösbarer Mehrdeutigkeiten oder temporärer partieller Verdeckungen fehlende Zuordnungen können durch Kombinationen gültiger Zuordnungen ersetzt werden.

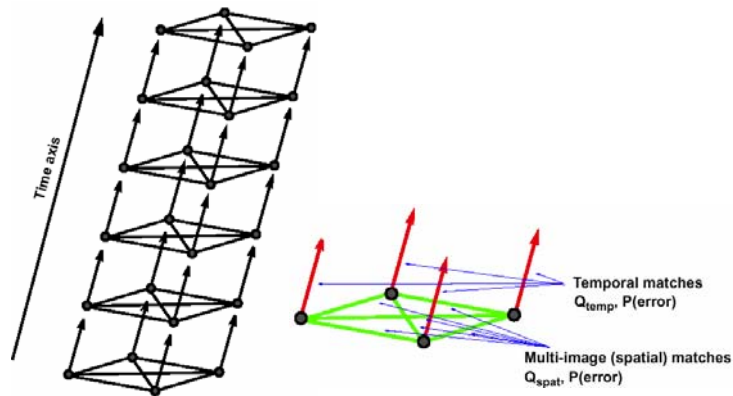


Abb. 4: Darstellung der Redundanz im spatio-temporalen Zuordnungsprozess

Die einfachste Nutzung dieser Redundanz ist die Bestimmung eines Schleifenschlussfehlers über räumliche und zeitliche Zuordnungen bei der Anwendung flächenbasierter Zuordnungsverfahren in binokularen Bildsequenzen (Baker/Bolles, 1994). In (Willneff/Grün, 2002) wird ein Ansatz gezeigt, bei dem fehlende Verbindungen aufgrund von aus dem redundanten Zuordnungsbaum abgeleiteten Hypothesen mit veränderten Steuerparametern gezielt gesucht werden. Eine konsequente Verwendung der redundanten Information ergibt sich durch die Definition von Wahrscheinlichkeitsmaßen für jede räumliche und zeitliche Zuordnungshypothese. Die optimale spatio-temporale Zuordnung wird aus der Kombination der Wahrscheinlichkeitsmasse räumlich und zeitlich benachbarter Zuordnungshypothesen und der Kongruenz mit eventuell vorhandener Vorkenntnis über das Bewegungsfeld bestimmt.

3.2 Bildsequenzbasierte Kalibrierverfahren

Photogrammetrische 3D-Messsysteme für Anwendung in statischen oder quasi-statischen Messaufgaben erzielen ihr hohes Genauigkeitspotential in den meisten Fällen durch integrierte Verfahren der Selbstkalibrierung. Diese Verfahren basieren häufig auf der Aufnahme einer größeren Anzahl von Bildern eines temporär stabilen Punktfeldes unbekannter Geometrie (z.B. Godding, 1993). Dabei werden zur Verbesserung der Bestimmbarkeit der Parameter der inneren Orientierung Rotationsstrategien angewandt, bei denen mit der zu kalibrierenden Kamera mehrere Aufnahmen bei unterschiedlichen Rotationen um die Aufnahmeachse gemacht werden. Übertragen auf Mehrkamerasysteme in Bewegungsanalyse-systemen würde dies bedeuten, dass mit jeder beteiligten Kamera mehrere Aufnahmen bei unterschiedlicher Orientierung gemacht werden müssten. Dies kann sich u.U. als unpraktikabel erweisen, wenn Systemkonfigurationen häufig geändert werden das System danach jeweils einer Rekalibrierung bedarf. Stattdessen wird in vielen Anwendungen ein Kalibrierkörper in Form eines Punktfeldes mit bekannter Geometrie verwendet, über welchen die Orientierungs- und Kalibrierungsparameter aller beteiligten Kameras im räumlichen Rückwärtsschnitt auf Basis einer Einzelaufnahme bestimmt werden. Diese Vorgehensweise schränkt jedoch den abdeckbaren Skalenbereich ein und nutzt das Genauigkeitspotential der Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung nicht voll aus.

Als Alternative zu herkömmlichen Verfahren der Selbstkalibrierung bietet sich die Aufnahme von Bildsequenzen eines bewegten Referenzstabs bekannter Länge an (Abb. 5). Dieser Ansatz wird z.B. in (Heikkilä, 1990) beschrieben und in (Maas, 1999) systematisch analysiert. Das Prinzip des Ansatzes basiert auf der Simulation eines Punktfeldes durch ca. 20 - 50 über den Objektraum und die Raumrichtungen verteilte Posen des Referenzstabs. An jeder der Posen wird durch jede beteiligte Kamera eine Aufnahme gemacht, wobei - im Gegensatz zur konventionellen Vorgehensweise bei der Selbstkalibrierung - keine Orientierungsänderung der Kameras notwendig wird. Bei geeigneter Markierung der Endpunkte des Referenzstabs reduziert sich die Aufgabe der Punktzuordnung auf eine einfache Punktverfolgung der Endpunkte in den Bildsequenzen der einzelnen Kameras. Durch die Einführung der bekannten Länge des Referenzstabs für jede der Posen und die Variation der Orientierung des Referenzstabs über alle Raumrichtungen ergibt sich bei Verwendung von drei oder mehr Kameras eine Stabilisierung der Bündelblockausgleichung, welche den Verzicht auf Änderungen der Kameraorientierung kompensiert.



Abb. 5: Bewegter Referenzstab in einer Pilotstudie zur Roboterkalibrierung (Maas, 1996)

Inwieweit die Systemkalibrierung in Anwendungen der Bewegungsanalyse letztlich für die Qualität des Endprodukts entscheidend ist, hängt in starkem Maße von Zielen und Randbedingungen der jeweiligen Anwendung ab. Bei hoher Komplexität der Mehrbildzuordnung stellt eine korrekte Systemkalibrierung eine entscheidende Voraussetzung für die erfolgreiche Zuordnung im Kernlinienschnittverfahren dar. Andererseits liegt das Ziel der 3D-Bewegungsanalyse in der Regel nicht primär in einer 3D-Koordinatenbestimmung, sondern in der Bestimmung von Bewegungsinformation, welche sich im einfachsten Fall aus Koordinatendifferenzen ergibt. Bei geringen Bewegungen, wie sie beispielsweise häufig in Anwendungen der Deformationsmessung auftreten, wird das Resultat aufgrund der hohen lokalen Korrelation systematischer Fehler durch die Qualität der Kalibrierung nur wenig beeinflusst.

4 Anwendungsbeispiele

Die genannten Vorteile der vierdimensionalen Datenakquisition mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung haben der Photogrammetrie eine Reihe von Anwendungsgebieten in der 3D-Bewegungsanalyse eröffnet. Darunter sind viele Messaufgaben, die überhaupt erst mit Hilfe photogrammetrischer Methoden unter realistischem Aufwand lösbar geworden sind. Die 3D-Bewegungsanalyse stellt damit ein gutes Beispiel für die Erschließung neuer Marktpotentiale und Arbeitsfelder durch eine weitest gehende Automatisierung photogrammetrischer Auswerteprozesse dar. Im Folgenden seien aus der Vielzahl der im Laufe der letzten 10-15 Jahre vorgestellten Anwendungen einige Beispiele kurz vorgestellt.

4.1 Deformationsmessung

Photogrammetrische Verfahren werden häufig in Verfahren der Deformationsanalyse eingesetzt. Bei Anwendungen, welche die Überwachung einer großen Anzahl von Punkten

durch viele Messepochen verlangen, kommen die Vorteile der Effizienz einer weitestgehend automatisierten Auswertung besonders zum Tragen. Viele der in der Literatur publizierten Ansätze sind eher als quasi-statische Verfahren zu betrachten, bei denen sich die Lösung der zeitlichen Zuordnungen aufgrund der geringen Bewegung trivial darstellt und die in ihrer Komplexität daher eher mit statischen Anwendungen vergleichbar sind (z.B. Fraser/Brizzi, 2003). Abb. 6 zeigt ein Deformationsbild eines durch 5000 aufprojizierte Punkte markierten und durch ein Vierkamerasystem aufgenommenen Carbonbauteils in der letzten von 10 Laststufen (Maas, 1992b).

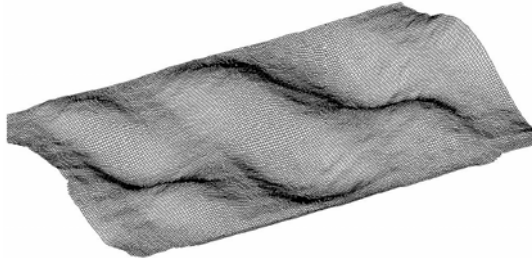


Abb. 6: Deformationsbild eines Carbonbauteils im Belastungstest (Maas, 1992b)

Das Genauigkeitspotential bei der Deformationsmessung ist in der Regel höher als das der absoluten Koordinatenbestimmung. Dies liegt primär in der bereits in Kapitel 3.2 erwähnten lokalen Korrelation systematischer Fehler begründet. Die Genauigkeit von aus Koordinatendifferenzen bestimmter Bewegungsinformation ist nur in geringem Maße durch in der geometrischen Modellierung nicht erfasste Restfehler der Kalibrierung beeinflusst, da aufeinanderfolgende Bilder einer Bildsequenz eine lokal sehr hohe Korrelation aufweisen. In (Albert et al., 2002) wird am Beispiel einer Deformationsmessung an einer Brücke eine durch externe Referenzmessungen verifizierte Messgenauigkeit im Bildraum von etwa $\frac{1}{160}$ Pixel erreicht. In (Niederöst/Maas, 1997) wird bei der Deformationsmessung an Betonbauteilen mit einer 1,5 Megapixelkamera eine ebenfalls extern verifizierte Relativgenauigkeit von 1 : 250'000 der Objektausdehnung erreicht.

Über die reine geometrische Verformungsmessung hinaus erlaubt die Anwendung von Verfahren der Bewegungsanalyse beispielsweise auch die Überwachung von Rissbildungen bei Belastungsversuchen in der Materialprüfung. In (Hampel/Maas, 2003) wird ein Ansatz zur Generierung räumlich/zeitlich aufgelöster Rissbilder durch die Auswertung von Verschiebungsfeldern als Resultat einer photogrammetrischen Auswertung gezeigt. Durch den Einsatz von Bildanalyseverfahren mit Subpixelgenauigkeit ist es dabei möglich, sogar Risse zu detektieren, deren Breite weniger als 0,1 Pixel beträgt, und die visuell im Bild überhaupt nicht wahrnehmbar sind.

4.2 Menschliche Bewegungsanalyse

Photogrammetrische Mehrkamerasysteme stellen ein unverzichtbares Werkzeug für die 3D-Analyse menschlicher Bewegungen dar. Zukunftsträchtige Anwendungsgebiete liegen hier beispielsweise auf dem Gebiet der medizinischen Ganganalyse, der Analyse und Optimierung von Bewegungsabläufen in der Sportwissenschaft (Abb. 8) sowie in der Unterhaltungsindustrie. Gerade letztere weist einen stark steigenden Bedarf an Werkzeugen der 3D-Bewegungsanalyse für die Generierung realistischer Bewegungsabläufe für Charaktere in animierten Filmen und für Computerspiele auf.

Die Firma Motion Analysis verwendet Systeme mit bis zu 32 Kameras zur Bestimmung der 3D-Trajektorien von mit retro-reflektierenden Zielmarken signalisierten Punkten (Abb. 7). Durch die Beleuchtung mit roten Leuchtdioden-Ringblitzen und die Verwendung darauf abgestimmter Interferenzfilter werden quasi-binäre Bilder erzeugt. Dadurch wird eine Bildkoordinatenbestimmung in der Kamera möglich, was eine extreme Reduktion der Datenrate mit sich bringt und die Verfolgung von etwa 20-30 Punkten bei einer Bildrate von 480 Hz ermöglicht.



Abb. 7: Bewegungsanalyse für die Unterhaltungsindustrie (© Motion Analysis CA)

Die Datenverarbeitung nach der Bildmessung beinhaltet neben der räumlichen und zeitlichen Zuordnung auch die Herstellung der Topologie. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung wird bei der Verarbeitung zunächst die zeitliche Zuordnung im Bildraum gelöst. Danach erfolgt die Bestimmung von 3D-Trajektorien durch die Mehrbildzuordnung von 2D-Trajektorien. Während hier eine zuverlässige automatische Lösung möglich ist, verlangt die Erstellung der Topologie sowie die Überbrückung von temporären Verdeckungen punktuell interaktive Nachbearbeitung. Auf diese Weise generierte 3D-Trajektorien für den Bewegungsablauf repräsentativer Punkte können dann für Zwecke der Bewegungsanalyse verwendet oder auf animierte Charaktere übertragen werden.

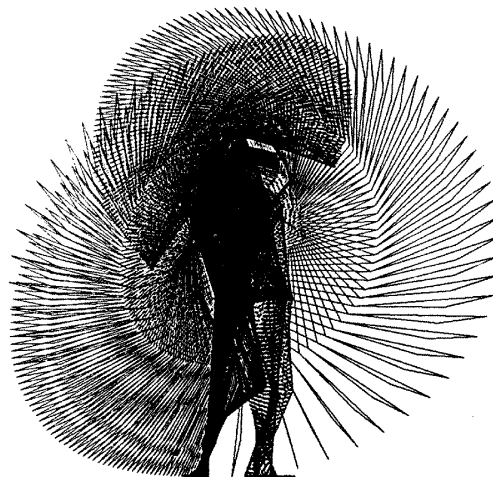


Abb. 8: Golfspieler beim Abschlag, 2D-Visualisierung (© Motion Analysis CA)

Anwendungen der Bewegungsanalyse durch Bildzuordnung und Verfolgung natürlicher Textur zeigt (d'Apuzzo, 2002). Dem offensichtlichen Vorteil des Wegfalls der Notwendigkeit der Signalisierung zu verfolgender Punkte steht hier ein wesentlich höherer Rechenaufwand gegenüber, welcher eine Echtzeitauswertung verunmöglicht.

4.3 3D-Strömungsmesstechnik

Ein weiteres vergleichsweise junges Anwendungsgebiet der Photogrammetrie ist die dreidimensionale Strömungsmesstechnik. Das Ziel liegt hier in der Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Geschwindigkeitsfelder. 3D-PTV (particle tracking velocimetry) beruht auf der Visualisierung von Strömungen durch eine große Anzahl auftriebsneutraler Partikel und der Aufnahme und Auswertung stereoskopischer Bildsequenzen zur Bestimmung dreidimensionaler Partikeltrajektorien. Es wurde bislang primär in Flüssigkeitsströmungen angewandt (z.B. Maas 1992a, Netzsch 1995), eignet sich aber bei geeigneter Visualisierungs- und Aufnahmetechnik auch für die Anwendung in Gasströmungen (Putze, 2004). Die automatische Auswertung von 3D-PTV Rohdaten basiert auf der Detektion und Koordinatenbestimmung diskreter Partikel in Einzelbildern durch Methoden der Bildanalyse, gefolgt von Verfahren der spatio-temporalen Zuordnung zur Generierung dreidimensionaler Partikeltrajektorien (Abb. 9). Das Verfahren erlaubt bei Einsatz eines Vierkamerasystems die Trajektorienbestimmung von ca. 1000 Partikeln.

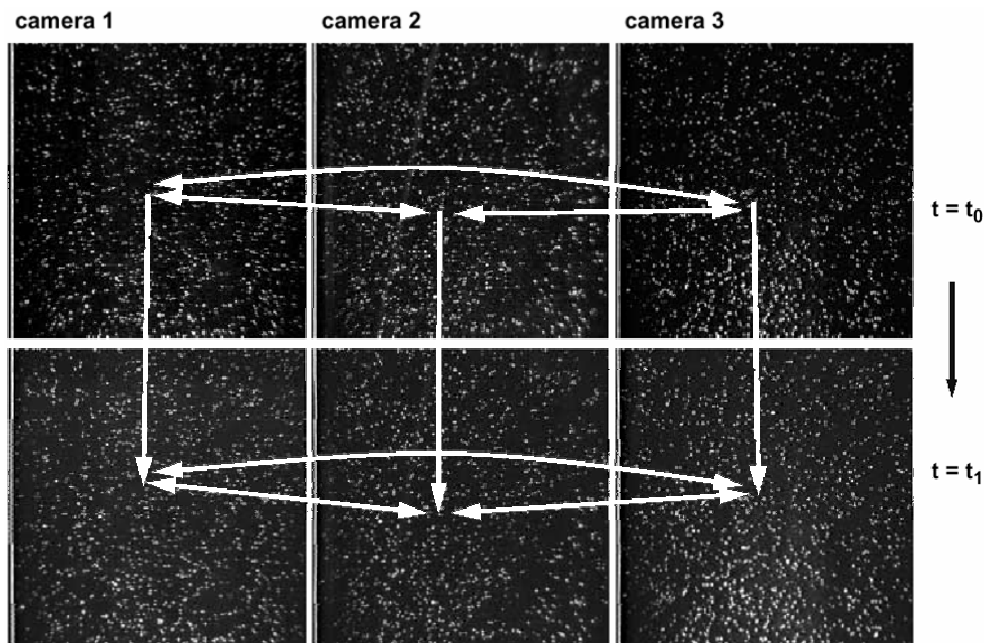


Abb. 9: Prinzip der spatio-temporalen Zuordnung in 3D-PTV

Literatur

- Albert, J., Maas, H.-G., Schade, A., Schwarz, W., 2002: *Pilot studies on photogrammetric bridge deformation measurement*. 2nd IAG Com. IV Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, May 21-24, 2002, Berlin, Germany
- Baker, H., Bolles, R., 1994: Realtime stereo and motion integration for navigation. IAPRS Vol. 30, Part 3/1, pp. 17-24
- D'Apuzzo, N., 2002: *Surface measurement and tracking of human body parts from multi image video sequences*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 56 (5-6), pp. 360-375
- Fraser C., Brizzi D., 2003: *Photogrammetric monitoring of structural deformation: The federation square atrium project*. Grün, A.; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VI. Vol. II, pp. 89-95
- Godding, R., 1993: *Ein photogrammetrisches System zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme*. ZPF 2/93
- Hampel, U., Maas, H.-G., 2003: *Application of digital Photogrammetry for measuring deformation and cracks during load tests in civil engineering material testing*. Grün, A.; Kahmen H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VI. Vol. II, pp. 80-88
- Heikkilä, J., 1990: *Update calibration of a photogrammetric station*. IAPRS Vol. 28, Part 5/2, pp. 1234-1241
- Maas, H.-G., 1992a: *Complexity analysis for the determination of image correspondences in dense spatial target fields*. IAPRS, Vol. 29, Part B5, pp. 102-107
- Maas, H.-G., 1992b: *Robust automatic surface reconstruction with structured light*. IAPRS, Vol. 29, Part B5, pp. 709-713
- Maas, H.-G., 1996: *Photogrammetrische Kalibrierung von Industrierobotern*. Ingenieurvermessung 96 (Hrsg. G. Brandstätter, F. Brunner, G. Schelling), Dümmler Verlag, Bonn, Band 2/A6
- Maas, H.-G., 1997: *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. Habilitation thesis at ETH Zurich, Publications of the Institute of Geodesy and Photogrammetry, Vol. 62
- Maas, H.-G., 1999: *Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No. 5-6, pp. 352-359
- Netzsch, Th., 1995: *Dreidimensionale Particel Tracking Velocimetry*. PhD thesis, University of Heidelberg, Germany
- Niederöst, M., Maas, H.-G., 1997: *Accurate deformation measurement with a digital still-video camera*. Optical 3-D Measurement Techniques IV (Eds.: A. Grün, H. Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe
- Putze, T., 2004: *Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 13, S. 325-332
- Willneff, J., Grün, A., 2002: *A new spatio-temporal matching algorithm for 3D-Particle Tracking Velocimetry*. The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, Hawaii, USA, February 10-14, 2002