



## „Intelligente“ Steuerung bildgebender Sensoren in der Ingenieurgeodäsie

Alexander Reiterer, Wien

### Kurzfassung

In der Vergangenheit benötigten Messsysteme meist künstliche Messmarken für die online Erfassung relevanter Messpunkte. In der modernen Bauindustrie sind solche Messmarken aus ästhetischen Gründen meist nicht erwünscht bzw. deren Anbringung häufig zu kostspielig. Bildgebende Sensorsysteme sind heute in der Lage, Messungen ohne signalisierte Messpunkte durchzuführen. Solche Messsysteme nutzen die Oberflächentextur des Objektes, um die künstlichen Messmarken zu ersetzen. An der Technischen Universität Wien wird seit geraumer Zeit an der Erforschung und Entwicklung solcher Messsysteme gearbeitet. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Automatisierung des Messprozesses gelegt.

Dieser Beitrag bildet eine Zusammenfassung des Vortrages, der anlässlich der Karl-Rinner Preisverleihung an der TU-Graz gehalten wurde. Zudem stellt er eine gekürzte Fassung des in [17] veröffentlichten Papers dar – für eine detaillierte Beschreibung sei auf den ungekürzten Text verwiesen.

**Schlüsselwörter:** Bildgebende Sensoren, Tachymeter, künstliche Intelligenz, wissensbasierte Systeme

### Abstract

In the past, high-precision online 3D-measuring required artificial targets defining the points on the objects to be monitored. For many tasks like monitoring of displacements of buildings, artificial targets are undesired. Image-based measurement systems can perform their measurements even without targeting. Such systems use the texture on the surface of the object to find "interesting points" which can replace the artificial targets. At the Vienna University of Technology a team has focused the work on the research of such a image-based measurement system. Main goal of this process is the automation of the measurement procedure.

This paper is a summary of the presentation held for the Karl-Rinner Awarding at the TU-Graz. It is notable, that the research results have already been published in a more detailed form in [17].

**Keywords:** Image-based Sensors, Tacheometer, Artificial Intelligence, Knowledge-Based Systems

### 1. Einleitung

In der Ingenieurgeodäsie stellt die hochgenaue Erfassung und Repräsentation verschiedenster Objekte eine der wichtigsten Aufgaben dar. Dabei spielt in jüngster Zeit vor allem die berührungslose Vermessung (Senkung des Gefahrenpotentials für den Vermessenden, Senkung der Kosten durch das Wegfallen aufwändiger Markierungsarbeiten, usw.) eine immer wichtigere Rolle. Optische 3D-Messtechniken wie z.B. 3D-Laserscanner, photogrammetrische Verfahren oder Messroboter gewinnen daher auch in der Ingenieurgeodäsie zunehmend an Bedeutung.

*3D-Laserscanning Verfahren* bestechen durch eine schnelle Datenerfassung, sind jedoch für viele Einsatzbereiche (noch) zu ungenau. Des Weiteren ist die Einzelpunktinterpretation schwierig – ein aufwändiges Postprocessing ist die Folge. *Photogrammetrische Verfahren* verfügen über die Möglichkeit, konkrete Objektpunkte zu selektieren, jedoch ist eine Automatisierung dieser Verfahren durch mangelnde bzw. einge-

schränkte Online-Fähigkeit schwierig. Als mögliche „Zwischenstufe“ können *theodolit- bzw. tachymeterbasierte Verfahren* betrachtet werden.

Rasante Fortschritte bei der Miniaturisierung von Sensoren lassen es inzwischen zu, eine Vielzahl von Sensoren – elektronische Distanzmesser, CCD-Kamera, u.a. – in den Strahlengang des Tachymeterfernrohres zu integrieren [9]. Das Tachymeter ist auf diese Weise Basiskomponente eines komplexen Multi-Sensor Systems geworden. Durch die Integration einer digitalen Kamera und eines Autofokussystems können georeferenzierte Richtungsbuschel gemessen werden, die sich auf einzelne Bildelemente des CCD-Sensors beziehen [24]. Diese Entwicklungen lassen bereits vermuten, dass zukünftig auch Laserscanner-Elemente in das Tachymeter integriert werden können [8].

Alle bisherigen Arbeiten in diesem Bereich (siehe [13, 16, 19, 20, 24, 25]) zeigen auf, dass eines der Hauptprobleme für die wirtschaftliche Nutzung bildgebender online Messsysteme die

Komplexität der verschiedenen Auswahl- und Entscheidungsprozesse darstellt. Werden dem Benutzer sämtliche Entscheidungen überlassen, führt dies zu einer ineffizienten Arbeitsweise des Gesamtsystems (vergleiche [23]). Für einen verbreiteten und produktiven Einsatz solcher Messsysteme bedarf es daher einer Steigerung von Flexibilität und Effizienz. Dies kann durch die Integration eines durchdachten Entscheidungssystems erreicht werden.

Am Institut für Geodäsie und Geophysik (IGG) der Technischen Universität Wien wurde in zwei Projekten erforscht, wie der Benutzer bei diversen Entscheidungsprozessen durch den Einsatz moderner Techniken aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (wissensbasierte Systeme, neuronale Netze, u.a.) unterstützt werden kann. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die Ergebnisse der letzten Jahre. Wie in der Zusammenfassung bereits erwähnt, stellt dieser Artikel eine gekürzte Version des in [16] veröffentlichten Beitrages dar. Für eine ausführliche Beschreibung der technischen Hintergründe sei auf den Originalbeitrag verwiesen.

**2. Bildgebendes Messsystem**

Das am IGG neu entwickelte Messsystem basiert auf der „Image Assisted Total Station“ (IATS), einer Entwicklung von Leica Geosystems [24]. Bei der IATS handelt es sich um ein Tachymeter der Baureihe TPS 1100, welches durch eine in den optischen Strahlengang integrierte Kamera erweitert wurde (die Kamera verfügt über eine motorgesteuerte Fokussierung). Die Funktionen der Winkel- und Streckenmessung wurden von diesem Umbau nicht beeinflusst. Ergänzt wird dieses System durch eine am Fernrohr angebrachte Weitwinkelkamera, welche zur Aufnahme eines Überblickbildes dient. Einen Schnitt durch das Fernrohr zeigt Abb. 1.

Das Fernrohr ist auf ein Zweilinsensystem reduziert, bestehend aus Frontlinse und Fokulinse. Anstelle des Okulars wurde ein CCD-Sensor integriert, welcher das Auslesen des Sehfeldinhaltes ermöglicht. Die Bilddaten können über einen synchronisierten Framegrabber online an ein Computersystem übergeben werden.

Die Entwicklung von Leica ist nur ein Teil des in jüngster Zeit immer intensiver betriebenen Forschungsgebietes der bildgebenden Tachymetersysteme. Des weiteren erwähnenswert sind Entwicklungen an der Technischen Universität München [25], der Ruhr-Universität Bochum [20] und die langjährige Entwicklungsarbeit am Institut

für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien [13, 16, 17, 19, 23]. Als erste kommerzielle Erfolge dieser neuen Messverfahren/techniken können die Produkte von Trimble (VX) und Topcon (GPT-7000i und GPT-9000) [21, 22] gesehen werden.

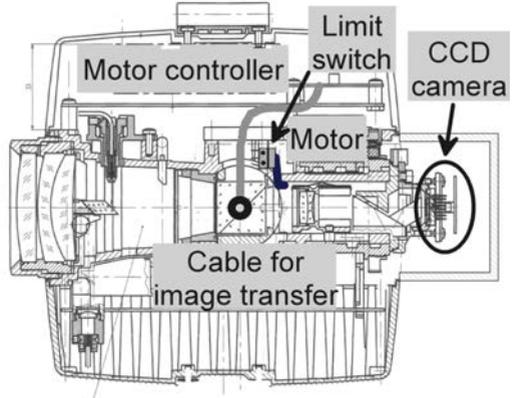


Abb. 1: Schnitt durch das modifizierte Tachymeterfernrohr [24]

Der Messsensor bildet jedoch nur die Grundlage für ein komplexes Multi-Sensor-System bzw. einen hochkomplexen Messablauf. Prinzipiell kann das System in mehrere Sub-Systeme zerlegt werden. Beispielfhaft sei hier auf das am IGG entwickelte Messsystem verwiesen. Zentrales Element dieses Systems ist dabei die **Kontrollkomponente**. Sie ist für die Ansteuerung sämtlicher Systemteile verantwortlich. An die Kontrollkomponente sind einerseits die **Sensoren** und andererseits sämtliche **Softwaremodule (SM)** angedockt. Die Schnittstelle zum Benutzer hin bildet das Graphische User Interface (GUI). Neben der Kontrollkomponente bildet das **Entscheidungssystem** einen der fundamentalsten Teile des Gesamtkonzeptes. Eine schematische Darstellung der Architektur zeigt Abb. 2.

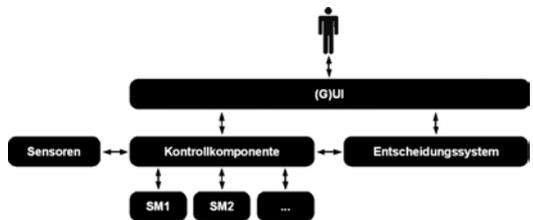


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung der Systemarchitektur

Da vor allem das Entscheidungssystem bzw. der Entscheidungsprozess den großen Unterschied zu konventionellen Programmsystemen darstellt, seien im Folgenden ein paar Details hierzu angeführt.

In der Literatur finden sich eine Unzahl von unterschiedlichen Techniken zur Realisierung von Entscheidungssystemen. Neben konventionellen Programmiersprachen wie C++ oder Java zählen wohl künstliche neuronale Netze und wissensbasierte Systeme zu den bekanntesten Vertretern solcher Techniken.

Prinzipiell besteht jedes dieser Systeme in seiner Grundform aus drei Hauptkomponenten: (1) geeigneten Eingangsdaten, (2) einem Entscheidungsalgorithmus und (3) entsprechenden Ausgangsdaten.

Die Eingangsdaten bilden die Grundlage für den Entscheidungsprozess und müssen entsprechend mit Sorgfalt gewählt werden. Für ein Messsystem, welches auf Bilddaten basiert, bieten sich als Eingangsdaten die Grauwerte / Farbwerte der Bildmatrix bzw. Werte, welche diese in geeigneter Form repräsentieren, an. Für ein online Messsystem, bei dem Entscheidungen möglichst in Echtzeit erfolgen sollen, stellen extrahierte Bildmerkmale die beste Lösung dar. Sie können im Gegensatz zu den Rohdaten der Bildmatrix wesentlich leichter und schneller verarbeitet werden. Bildmerkmale können durch Integration eines geeigneten Bildanalyseprozesses gewonnen werden.

Um eine möglichst schnelle (online) Berechnung der Bildinformation zu ermöglichen, arbeitet das Messsystem, welches am IGG entwickelt wurde, mit folgenden Bildmerkmalen (Extraktion erfolgt direkt aus der Grauwertmatrix):

- statistische Momente erster bis dritter Ordnung [15],
- Haralick Momente<sup>1)</sup> [5].

Anschließend an die Berechnung der Bildmerkmale werden diese in qualitative Werte umgerechnet, gemeinsam mit den Ursprungswerten als so genannte Entscheidungsmatrix zusammenge-

fasst und in geeigneter Form gespeichert. Bei dieser Umrechnung werden numerische, metrisch skalierte Werte in symbolische, nominal skalierte Werte konvertiert (z.B. der Wert eines statistischen Moments in einen der symbolischen Werte „sehr klein“, „klein“, „mittel“, usw.). Dies ermöglicht es, bei der Implementierung des Entscheidungssystems (z.B. in Form eines regelbasierten Systems) abstrakte Werte heranzuziehen. Die Umrechnung ist ein Spezialfall einer „Fuzzifizierung“ der metrischen Werte, die den Grad der Zugehörigkeit eines metrischen Wertes zu jedem der symbolischen Werte festlegt. Diese symbolischen Werte werden daher im weiteren als *Fuzzy-Werte* bezeichnet.

Damit stehen für die automatisierte Entscheidungsfindung insgesamt 68 numerische Werte, deren Fuzzy-Werte und die durch Benutzerrückfragen gesammelten Informationen (z.B. über das Objekt) zur Verfügung. Eine Auflistung des Formelwerkes und eine vollständige Beschreibung der entwickelten Bild- bzw. Objektanalyse findet sich in [16].

Der eigentliche Entscheidungsalgorithmus wurde in Form eines wissensbasierten Ansatzes umgesetzt. Nähere Details hierzu finden sich in [7]. Vorteil eines wissensbasierten gegenüber einem herkömmlichen Ansatz ist vor allem die klare Trennung von Problemwissen und Wissensverarbeitung, d.h. dem Programmcode an sich. Dadurch kann eine Erweiterung bzw. Modifikation der Wissensbasis wesentlich leichter erfolgen – sogar der Austausch der gesamten Wissensbasis durch eine andere ist ohne größere Probleme durchführbar. Ein weiterer Vorteil ist, dass Expertenwissen häufig in Form von Regeln vorhanden ist. Dieses Wissen kann ohne Konvertierung in prozedurale Formen in die Wissensbasis eingebracht werden.

Für die praktische Implementierung wissensbasierter Systeme existieren verschiedene Ansätze (prozedurale Methoden, objektorientierte Methoden, logikbasierte Methoden, u.a.) und verschiedene Softwarehilfsmittel [1, 7].

<sup>1)</sup> Die 13 Haralick Momente [5] ermöglichen es, aus der Grauwert-Abhängigkeits-Matrix  $p(i, j)$  (grey-level co-occurrence matrix) statistische Merkmale zu berechnen. In der Grauwert-Abhängigkeits-Matrix werden die Auftrittshäufigkeiten von Grauwertkombinationen (für einen festgelegten Abstand und Winkel) eingetragen. Die Größe der Matrix entspricht demnach der Anzahl der unterschiedlichen Grauwerte im Bild (bei einem Grauwertbild mit 256 Grauwerten einer Matrix mit 256 Zeilen und 256 Spalten). Die Operationen zur Erstellung der Matrix beschränken sich somit auf das Zählen von Grauwertkombinationen, was sich sehr positiv auf die Rechenzeit auswirkt. Für das hier vorgestellte Verfahren wurden die Grauwert-Abhängigkeits-Matrix und die daraus resultierenden Haralick-Momente für einen Pixelabstand von 1 und die vier Richtungen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  berechnet (zusätzlich wird der arithmetische Mittelwert für jede Richtung berechnet).

### 3. Messprozedur

Der Messablauf kann auf Grundlage der formulierten Messsystemarchitektur folgendermaßen untergegliedert werden (entspricht der im IGG Messsystems implementierten Prozedur):

- Erfassung eines Übersichtsbildes (im Normalfall mit Hilfe der vorhandenen Weitwinkelkamera),
- Aufbereitung sämtlicher erfasster Bilder (Prozess erfolgt sequenziell),
- Strukturierung und Einteilung des Objektes in Interessensbereiche,
- Erfassung relevanter Punkte im Bild bzw. in Bildausschnitten (mit Hilfe der Okulkamera) und anschließende Erfassung der Punkte im Objektraum (3D),
- Weiterverarbeitung der Daten (z.B. Deformationsanalyse und -klassifizierung, Objektrekonstruktion, usw.)<sup>2)</sup>

Die entwickelte Automatisierung zielt im Wesentlichen auf drei Grundprozesse des Messablaufes ab: Bildvorverarbeitung, Punkterfassung und Datenverarbeitung.

#### 3.1 Bildvorverarbeitung

Eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung von Punkterfassungsalgorithmen ist eine ausreichende Bildqualität. Oft ist es im praktischen Einsatz nötig, die Qualität vorliegender digitaler Bilder durch entsprechende Bildbearbeitungsverfahren zu verbessern.

In [18] wurden verschiedene Bildbearbeitungsverfahren vorgestellt und deren Notwendigkeit bei der Anwendung von Punkterfassungsalgorithmen diskutiert. Konkret wurden für das vorliegende Messsystem folgende Algorithmen implementiert: Medianfilter, Gaußfilter, Kantenextraktionsverfahren (Sobel-, Prewitt-, Roberts Operator), Histogrammstreckung, Aufhellung, Abdunkelung.

Der Zusammenhang zwischen extrahierten Bildmerkmalen / Objektmerkmalen und Bildbearbeitungsalgorithmen wurde in Form von Regeln in eine eigene Wissensbasis implementiert. Für die wissensbasierte Bildbearbeitung sei hier beispielhaft die sehr einfache Regel für die Auswahl einer Bildaufhellung angeführt (Clips-Syntax):

```
(defrule Aufhellung
(Stat_Momente (M1_f s_klein | klein)
(Stat_Momente (M3_f mittel_positiv |
gross_positiv | s_gross_positiv))
=>
(assert (Zustand (Aufhellung JA))))
```

Grundsätzlich ist eine Regel in zwei Teile unterteilt, nämlich in den *Bedingungsteil* (*lefthand side – LHS*) und den *Aktionsteil* (*righthand side – RHS*); das Symbol „=>“ trennt die beiden Teile. Im Bedingungsteil stehen die sogenannten *Vorbedingungen*, welche für eine Ausführung der Regel erfüllt sein müssen. Erst wenn alle Vorbedingungen erfüllt sind, wird der Aktionsteil der Regel ausführbar. Unsere Beispielformel enthält zwei Vorbedingungen: (1) das statistische Moment erster Ordnung (M1) muss einen Fuzzy-Wert von *s\_klein* oder *klein* haben; (2) das statistische Moment dritter Ordnung (M3) muss einen Fuzzy-Wert von *mittel\_positiv*, *gross\_positiv* oder *s\_gross\_positiv* haben. Sind beide Vorbedingungen erfüllt, wird dem „working memory element“<sup>3)</sup> *Zustand (Aufhellung)* der Wert *JA* zugewiesen; eine Aufhellung kann durchgeführt werden.

Der Ablauf der wissensbasierten Bildbearbeitung gliedert sich in mehrere Schritte. Nach der Extraktion der Bildmerkmale werden die notwendigen Bildbearbeitungsalgorithmen ausgewählt. Im nächsten Schritt wird dem Benutzer die Möglichkeit gegeben, kritische Bearbeitungsschritte (z.B. informationsreduzierende Filter) aus dieser Auswahlliste zu entfernen. Anschließend werden für sämtliche Bearbeitungsschritte die notwendigen Parameter bestimmt und in einem letzten Schritt die Reihenfolge ihrer Anwendung festgelegt. Die getroffene Auswahl wird in eine sog. *Taskliste* geschrieben und der Systemkontrollkomponente übergeben, welche die einzelnen Algorithmen ausführt und die Ergebnisse in geeigneter Form speichert. Eine Neuberechnung der Bildmerkmale rundet diesen Systemprozess ab.

Ergebnis dieses ersten Teilsystems stellt ein für die nachfolgende automatisierte Punkterfassung besser geeignetes Bild (bzw. Bildfolge) dar.

#### 3.2 Punkterfassung

Den zweiten großen Teilschritt im Gesamtprozess stellt die Auswahl und Anwendung geeigneter

<sup>2)</sup> Bei der Durchführung einer Deformationsanalyse müssen korrespondierende Objektpunkte erfasst werden (erfolgt mit einem geeigneten Matchingverfahren – siehe [14]).

<sup>3)</sup> Die „working memory“ stellt neben den eigentlichen Regeln („rule memory“) den zweiten Teil eines regelbasierten Systems dar. Sie ist eine Sammlung von einzelnen *Typen* sowie deren *Instanzen*. Vergleichbare Formen sind *record* in Pascal oder *struct* in C. Die eigentlichen Elemente des Arbeitsspeichers („working memory elements“) sind dann *konkrete Instanzierungen*.

Punkterfassungs-Algorithmen (sog. *Interest Operatoren*) dar. Angewandt werden diese Algorithmen nun nicht mehr auf das Gesamt-Weitwinkelfeld, sondern auf einzelne Bildern, welche mit der Okularkamera erfasst wurden. Dies hat den Vorteil, dass das Laufzeitverhalten verbessert (Anzahl der Punkte wird vorab stark reduziert / eine spätere mühevoll Filterung der Punkte entfällt – vergleiche [16]), die Verzeichnung in den Bildern nieder gehalten und die erzielte Genauigkeit aufgrund der höheren Bildauflösung gesteigert werden kann. Für diese Erfassung bedarf es einer Einteilung des Objektes in Interessensbereiche. Für diese Objektstrukturierung wurde in einem derzeit noch laufenden Forschungsprojekt ein eigener Algorithmus entwickelt, der im Wesentlichen auf der Interpretation des vertikalen und horizontalen Bildhistogramms beruht. Nähere Details hierzu finden sich in [12]. Da das Ergebnis von Objektstrukturierung und Punkterfassung eine strukturierte Menge von Punkten darstellt, kann in diesem Zusammenhang von *Punktgruppe* und nicht von *Punktwolke* – wie vom Laserscanning bekannt – gesprochen werden.

*Interest Operatoren* identifizieren markante Punkte anhand der Farb- bzw. Helligkeitsänderungen im erfassten Bild. Bei der Auswahl markanter Punkte sind eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen [4]: Deutlichkeit, Invarianz, Stabilität, Interpretierbarkeit.

In der Literatur findet man eine Unzahl von verschiedenen *Interest Operatoren* [4, 6, 14]; keiner dieser Algorithmen ist jedoch geeignet, um

unterschiedlichste Punktarten mit ausreichender Zuverlässigkeit zu erfassen. Daher wurden im vorliegenden Messsystem drei verschiedene Algorithmen implementiert: Förstner Operator, Harris Operator und Hierarchical Feature Vector Matching Operator (HFVM). Für eine Erklärung der allgemeinen Funktionsweise eines *Interest Operators* sei auf die Literatur verwiesen.

Ziel der wissensbasierten Punkterfassung ist es, die für nachfolgende Bearbeitungsschritte (z.B. Deformationsanalyse) am besten geeigneten Objektpunkte zu erfassen. Das Wissen, welches für die Implementierung des Entscheidungssystems notwendig ist, wurde im Zuge umfangreicher Tests [16] gesammelt<sup>4</sup>. Exemplarisch sei die Entscheidungsregel (Clips-Syntax) für den Förstner Operator (Abb. 3) angeführt.

Die Regel für die Auswahl des Förstner Operators beinhaltet eine ganze Reihe von Vorbedingungen, welche mit logischen UND und ODER verknüpft sind. Sind sämtliche Vorbedingungen bzw. deren Verknüpfungen erfüllt, so werden in weiterer Folge die erforderlichen Parameter bestimmt.

Werden neben dem Förstner Operator auch noch ein zweiter bzw. ein dritter *Interest Operator* als geeignet selektiert (gleiche *Interest Operatoren* mit unterschiedlichen Parametereinstellungen werden in diesem Kontext als „unterschiedliche Operatoren“ betrachtet), so wird zusätzlich die Reihenfolge ihrer Anwendung regelbasiert gesteuert.

```
(defrule foerstner
(or (or (or (and (1_Haralick_Moment (H1_0_f klein | s_klein | mittel))
(5_Haralick_Moment (H5_0_f klein | s_klein | mittel)))
(and (1_Haralick_Moment (H1_90_f klein | s_klein | mittel))
(5_Haralick_Moment (H5_90_f klein | s_klein | mittel))))
(and (and (1_Haralick_Moment (H1_0_f klein | s_klein))
(1_Haralick_Moment (H1_90_f klein | sehr_klein)))
(not (Stat_Moments (M3_f s_gross_negativ))))))
(and (and (5_Haralick_Moment (H5_0_f klein | s_klein))
(5_Haralick_Moment (H5_90_f klein | s_klein)))
(not (Stat_Moments (M3_f s_gross_negativ))))))
=>
(assert (IOP (Foerstner JA)))
```

Abb. 3: Entscheidungsregel für den Förstner Operator

<sup>4</sup> Um die „Qualität“ der *Interest Operatoren* bzw. der erfassten Bildpunkte für die jeweilige Situation zu beurteilen, wurden drei unterschiedliche Testverfahren eingesetzt: (1) rein visuelle Beurteilung der erfassten Punkte; (2) Beurteilung mit Hilfe vordefinierter Bereiche, welche vom Benutzer als geeignet bzw. ungeeignet für die Punktfindung klassifiziert wurden und (3) Beurteilung mit Hilfe vordefinierter „Soll-Koordinaten“.

Aufgenommenes Bild  
(Weitwinkel-Kamera)Automatisierte Bild/Objekt-  
strukturierungErfasste Punkte (innerhalb  
von Interessensbereichen)

Abb. 4: Messprozedur (Aufnahme mit Hilfe der Weitwinkelkamera, Strukturierung des Objektes und Punkterfassung im Bild)

Ähnlich wie bei der wissensbasierten Bildbearbeitung werden auch hier sämtliche getroffene Entscheidungen in eine *Taskliste* geschrieben und der Systemkontrollkomponente übergeben. Nach Anwendung der ausgewählten Algorithmen liegen die Bild- bzw. Objektkoordinaten<sup>5)</sup> in einzelnen Punktlisten vor.

Ein Beispiel für die beschriebenen Prozessschritte (ohne Bildaufbereitung) findet sich in Abb. 4.

### 3.3 Datenverarbeitung

Das nun vorliegende Ergebnis (3D Punkte) kann für diverse weiterfolgende Bearbeitungsschritte verwendet werden. Am IGG wird derzeit an der Integration einer automatisierten Deformationsanalyse gearbeitet.

Im Wesentlichen gliedert sich der Prozess der entwickelten Deformationsanalyse in zwei Schritte: Deformationsanalyse auf Basis einer klassischen Mehrepochenanalyse und Charakterisierung der Punktbeziehung. Ergebnis des ersten Schrittes ist eine Liste signifikant bewegter Punkte (Koordinaten sämtlicher Epochen) inklusive deren zugehöriger mittlerer Fehler. Ausgehend von diesen Informationen wird die festgestellte Deformation durch eine Zerlegung in elementare Bewegungen charakterisiert. Die Bewegung eines Punktes  $(x,y,z \rightarrow x', y', z')$  wird dabei mit Hilfe einer affinen Transformation<sup>6)</sup> beschrieben. Nähere Details zu diesem Bearbeitungsschritt finden sich in [11]. Als Ergebnis erhält man somit eine parametrische Beschreibung der einzelnen Objektteile (dies bezieht sich hierbei auf die unter Abschnitt 3.2 erfassten Objektstruktur).

Ziel ist es, auf Basis dieser „Beschreibung“ eine Interpretation der auftretenden Deformationen durchführen zu können. Hierzu bedarf es aber auch der Nutzung zusätzlicher Informationen über das Objekt – die Kombination mit einem „Finite Elemente Tool“ scheint hier der zielführendste Weg zu sein.

Des Weiteren sei erwähnt, dass auch die automatisierte Objektrekonstruktion ein Ziel für die Nutzung der strukturierten Punktgruppen sein muss. Hierbei können ähnliche Ansätze wie in der Photogrammetrie verwendet werden. Verwiesen sei vor allem auf die Arbeiten der Ruhr-Universität Bochum [20].

### 4. Ausblick

Bildgebende Tachymeter verfügen über ein großes Potential für zukünftige Entwicklungen. Abgesehen von der Verbesserung der einzelnen technischen Komponenten solcher Messsysteme, wird die Erhöhung des Automatisierungsgrades eine wichtige Rolle spielen. Eine solche könnte durch die Integration weiterer Messkomponenten, z.B. eines 3D Laserscannermodules (darunter sollte nicht fälschlicherweise die Kombination mit einem Laserscanner verstanden werden) oder eines Photonic Mixing Device (PMD) erreicht werden.

Der Auswahlprozess geeigneter Objektpunkte (Filterungsprozess) würde neuer Techniken bedürfen, welche auf Basis von „*Cognitive Vision*“ arbeiten könnten. Ein möglicher Ansatz könnte auf einem zweistufigen Arbeitsprozess beruhen:

- die erfassten Daten (Bild- und 3D Laserscannerdaten) werden für die Generierung

<sup>5)</sup> Objektkoordinaten können durch Bestimmung der „Ablageparameter“ und der daraus resultierenden Richtungsmessungen berechnet werden. Details zur Objektpunktbestimmung mit bildgebenden Tachymetern finden sich in [13].

<sup>6)</sup> Da zu diesem Zeitpunkt nur Translationen und Rotationen berücksichtigt werden, könnte hier auch von einer isometrischen Transformation gesprochen werden. In Hinblick auf eine spätere Erweiterung wird der Begriff der affinen Transformation beibehalten.

einer Szenenbeschreibung benutzt. Dies kann durch die Erkennung gewisser Objektteile und die Zuordnung dieser zu Objektklassen erfolgen. Ergebnis dieses Prozesses ist ein räumliches Informationssystem der erfassten Szene.

- diese Information kann für diverse Entscheidungsprozesse genutzt werden, z.B. der Steuerung des Messablaufes („Welcher Objektteil soll gemessen werden?“ oder „Welches Messintervall soll gewählt werden?“)

Eine weitere Flexibilisierung des Messprozesses würde die Integration eines mobilen digitalen Kamerasystems (z.B. in Form einer digitalen Spiegelreflexkamera) bringen (eine schematische Darstellung findet sich in Abb. 5). Derzeit wird am IGG an Teilen eines solchen Multi-Sensor Systems gearbeitet.



Abb. 5: Schematische Darstellung eines möglichen Multi-Sensor Systems bestehend aus bildgebendem Tachymeter, Laserscanning Modul, PMD und mobilem Bildsensor

Ein solches Messsystem wird von der effizienten Datenerfassung des 3D Laserscanners, von der erfassten Bildinformation durch Tachymeter und mobilen Bildsensor und von der Automatisierung der Entscheidungsfindung durch Cognitive Vision profitieren. Das Resultat wäre ein (semi-)automatisches Messsystem, welches in einer bekannten Umgebung auf neue Situationen reagieren und agieren könnte.

## 5. Schlussbemerkung

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick der in den letzten Jahren am IGG im Bereich bildge-

bende Sensorsysteme erbrachten Forschungsleistungen. Bildaufnahme, Bildaufbereitung und Punkterfassung im Objektraum wurden vollständig automatisiert. Die Nutzung der erfassten Punktgruppe befindet sich derzeit im Stadium intensiver Forschung und Entwicklung.

In Zukunft könnte ein höherer Grad an Automatisierung erreicht werden, indem zusätzliche Sensorelemente und Bildanalyseprozesse miteinbezogen werden bzw. der Bildinhalt selbst für die online Entscheidungsfindung genutzt wird. Angedacht ist zudem die Integration eines sog. Cognitive Vision Systems.

## Danksagung

Die hier vorgestellten Forschungsergebnisse entstanden im Rahmen von zwei FWF Forschungsprojekten (P14664 „Knowledge-Based Object Reconstruction“ und P18286 „Multi-Sensor Deformation Measurement System Supported by Knowledge Based and Cognitive Vision Techniques“). Ein besonderer Dank sei hier den Projektpartnern vom Institut für Informationssysteme der Technischen Universität Wien (Prof. Eiter und Prof. Egly) und dem Institut für digitale Bildverarbeitung des Joanneum Research Graz (DI Paar) ausgesprochen. Des Weiteren sei dem Fond Wissenschaftlicher Forschung (FWF) und der Jubiläumsstiftung der Stadt Wien für die finanzielle Unterstützung der diversen Forschungsprojekte gedankt. Leica Geosystems sei für die gute und fruchtbare Zusammenarbeit ausgesprochen besonders gedankt.

## Literaturverzeichnis

- [1] CLIPS: <http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html>, (letzter Zugriff 01/2008).
- [2] Christensen, H.I.: Cognitive Vision – Cognitive vision systems. Sampling the spectrum of approaches. Springer-Verlag, 2006.
- [3] Eiter, T., Mannila, H.: Distance Measures for Point Sets and Their Computation. Acta Informatica, Vol. 34/2, S. 109-133, 1997.
- [4] Förstner, W.: Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung, DGK, Vol. C, Nr. 370, München, 1991.
- [5] Haralick, R., Shapiro, L.: Computer and Robot Vision, 1. Auflage, Addison-Wesley, New York, 1993.
- [6] Harris, C., Stephens, M.: A combined corner and edge detector. In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> ALVEY vision conference, Matthews (Hrsg.), University of Manchester, 1998.
- [7] ILOG – White Paper: <http://www.ilog.com>, (letzter Zugriff 01/2008).
- [8] Kahlmann, T., Ingensand, H.: Investigation of the 3D-Range-Image-Camera Swissranger™. In Grün/Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques VII, Wien, 2005.
- [9] Kahmen, H.: Angewandte Geodäsie, Vermessungskunde. Walter de Gruyter, Berlin, 2006.
- [10] Kahmen, H., Niessner, A., De Seixas, A.: 3D Object Sensing Using Rotating CCD Cameras. In: Kropatsch/Bischof (Hrsg.), Digital Image Analysis, 1. Auflage, Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2001.

- [11] *Lehmann, M., Reiterer, A., Kahmen, H.*: Deformation Classification in High Density Point Clouds. In: Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Grün and Kahmen (Hrsg.), Zürich, 2007.
- [12] *Miljanovic, M.*: Object Structuring for Deformation Analysis. Paper in preparation, 2008.
- [13] *Mischke, A., Kahmen, H.*: A New Kind of Measurement Robot System for Surveying of non Signalized Targets. In: Optical 3-D Measurement Techniques IV, Grün and Kahmen (Hrsg.), Herbert Wichmann, Karlsruhe, 1997.
- [14] *Paar, G., Rottensteiner, F., Pötzleitner, W.*: Image Matching Strategies. In: Kropatsch / Bischof (Hrsg.), Digital Image Analysis, 1. Auflage, Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2001.
- [15] *Pratt, W.*: Digital Image Processing, 1. Auflage, John Wiley and Sons, New York/Chichester/Brisbane/Toronto, 1978.
- [16] *Reiterer, A.*: A Knowledge-Based Decision System for an On-line Videotheodolite-based Multisensor System. Dissertation, Technische Universität Wien, 2004.
- [17] *Reiterer, A.*: The development of an online knowledge-based videotheodolite measurement system. Knowledge-Based Systems Journal, Nr. 20, S. 73-85, 2007.
- [18] *Reiterer, A., Kahmen, H., Egly, U., Eiter, T.*: Knowledge-Based Image Preprocessing for a Theodolite Measurement System, In: Optical 3-D Measurement Techniques VI – Vol. I, S. 183-190, Grün and Kahmen (Hrsg.), Zürich, 2003.
- [19] *Roic, M.*: Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten. Dissertation, Technische Universität Wien, 1996.
- [20] *Scherer, M.*: Intelligentes Tachymeter und Digitalkamera; Low-Cost aber High-Tech, Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 10/2004, S. 150-156, Herbert Wichmann Verlag, 2004.
- [21] *Topcon*: [www.topcon.com](http://www.topcon.com), (letzter Zugriff 01/2008).
- [22] *Trimble*: [www.trimble.com](http://www.trimble.com), (letzter Zugriff 01/2008).
- [23] *Vicovac, T.*: Evaluierung der Leica IATS für den Anwendungsfall der Objektrekonstruktion. Diplomarbeit in Vorbereitung, 2008.
- [24] *Walser, B.*: Development and Calibration of an Image Assisted Total Station, Dissertation, ETH-Zürich, 2004.
- [25] *Wasmeier, P.*: The Potential of Object Recognition Using a Servo-Tacheometer TCA2003. In: Optical 3-D Measurement Techniques VI – Vol. II, S. 48-54, Grün and Kahmen (Hrsg.), Zürich, 2003.

#### **Anschrift des Autors**

Dr. Alexander Reiterer: Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27–29, A-1040 Wien.  
E-mail: [alexander.reiterer@tuwien.ac.at](mailto:alexander.reiterer@tuwien.ac.at)