



Christoph Munkelt



Peter Kühmstedt



Matthias Heinze



Christian
Bräuer-Burchardt



Gunther Notni

Stereobasierte Streifenprojektion

Bei der Entwicklung der 3D-Digitalisierungssysteme »kolibri« zur Vermessung komplexer Objektgeometrien stand die Erhöhung der Messgenauigkeit und Fehlertoleranz bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl der benötigten Kameras im Vordergrund. Diese Vorgaben werden mit der stereobasierten Streifenprojektion erreicht. Dabei werden die herausragenden Eigenschaften des bisherigen messtechnischen Ansatzes der Phasogrammetrie /1,2/, wie z. B. die Selbstkalibrierung und der Verzicht auf extra anzubringende Marker auf dem Messobjekt, beibehalten. Das Neuartige an dem Ansatz der stereobasierten Streifenprojektion ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

Für die Berechnung wird eine Phasenkorrelation zwischen Phasenwerten in den Bildern von zwei Messkameras verwendet. Dies steht im Gegensatz zur bisherigen Nutzung von ausschließlich Phasenmesswerten (Phasogrammetrie) oder der klassischen Triangulation (Phasenmesswerte und Kamerarasterdaten) zur Koordinatenberechnung. Die Methodik der Phasenkorrelation bewirkt, dass sich Phasenmessfehler nicht mehr direkt auf die Koordinatenberechnung auswirken und weitgehend kompensiert werden. Dies ergibt eine deutlich größere Robustheit gegenüber Gegenbeleuchtungsartefakten und Intensitätsinhomogenitäten, die bei der Vermessung technischer Objekte nicht vermeidbar sind.

Technisch von Vorteil ist, dass die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion von der stagnierenden Auflösungserhöhung bei digitalen Projektoren entkoppelt ist. Umgekehrt wird dadurch der Weg bereitet, von fortschreitenden Verbesserungen bei der Kameraentwicklung zu partizipieren. Somit kann die erreichbare Güte der 3D-Rekonstruktion gezielt durch die Verwendung hochwertiger, industriell verfügbarer Kameraobjektive gesteigert werden. Die Qualitätswerte der Projektionsoptik (insbesondere die Verzeichnung) hingegen besitzen nahezu keine Wirkung mehr auf die Koordinatenmessgenauigkeit. Damit entfällt die Kalibrierung der Optik der eingesetzten digitalen Projektoren.

Aufbau des modularen Sensorkopfes

Eine entscheidende Rolle bei der Realisierung stereobasierter Streifenprojektion kommt dem sogenannten Sensorkopf zu. Bei der Entwicklung des Sensorkopfes, der Einheit aus digitalem Streifenprojektor und typischerweise zwei Messkameras K_p (Abb. 1), standen Modularität und Skalierbarkeit der Lösung im Vordergrund.

Stereo based fringe projection – 3D digitization systems for industrial applications

Stereo based fringe projection

During the development of the “kolibri” 3D digitization systems for the measurement of complex object geometries, the focus was directed on the improvement of the measurement accuracy and error tolerance together with the reduction of the number of cameras used. These requirements can be achieved by stereo based fringe projection. Here, the advanced properties of the previous phasogrammetric measurement method, e.g. the self-calibration and the avoidance of additional markers on the measuring object, are retained.

The novelty in the approach of the stereo based fringe projection is characterized by the following features: A phase correlation between the values of the images of two measuring cameras is used for the calculation. This

works contrary to the usage of only phase values (phasogrammetry) or classical triangulation (phase values and camera raster values) for the determination of the co-ordinates. The method of phase correlation causes a compensation of the phase value errors and thus prevents errors in the determination of the co-ordinates. Hence a considerably improved robustness is achieved with regard to reflection artefacts and inhomogeneous regions of intensity, which cannot be avoided in the measurement of technical objects. A technical advantage is the fact that the accuracy of the 3D reconstruction does not depend on the slow development of the projection resolution. This also means that one can participate in improvements in modern camera technologies. Thus the achievable quality of the 3D reconstruction can be selectively improved by the use of high quality industrial lenses. The quality

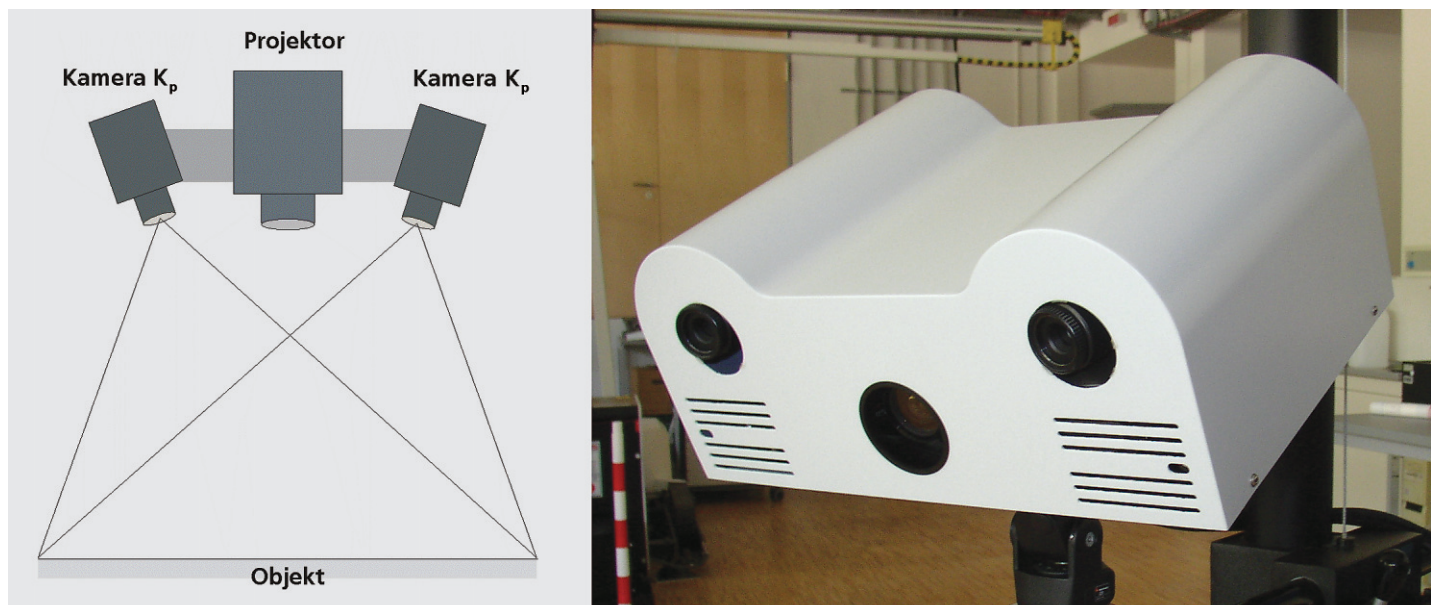
values of the projection optics (especially lens distortion) have almost no influence on the accuracy of the coordinate measurement. The calibration of the optics of the digital projectors used can therefore be omitted.

Composition of the modular sensor head

As the sensor head we denote the connected unit of a digital fringe projector and typically two measuring cameras K_p (Fig. 1). It plays an important role in the realization of stereo based fringe projection. Modularity and the scalability of the solution were main aspects in the development of the sensor head.

Abb. 1:
Grundanordnung und Foto des stereobasierten Streifenprojektions-Sensorkopfes.

Fig. 1:
Basic configuration and photograph of the stereo based fringe projection sensor head.



Systemlösung »kolibri MOVE« im Detail

Eine Umsetzungsform des Messprinzips stellt das Messsystem »kolibri MOVE« dar (Abb. 2 und 3). Die mobile Anordnung besteht aus einem frei beweglichen Sensorkopf und einer sogenannten Verknüpfungskamera K_V (beide sind jeweils auf einem Stativ gelagert). Um das Objekt rundum zu erfassen, wird im Messablauf der Sensorkopf mittels des beweglichen Stativs an verschiedene Positionen in Bezug zum Objekt positioniert. Weiterhin wird die Verknüpfungskamera K_V einmalig so in Bezug zum Messobjekt positioniert, dass sie eine Übersicht über die Messszene aufnehmen kann. Während des Messablaufs projiziert der Projektor die Streifensequenzen. Diese werden von den Messkameras simultan mit der Verknüpfungskamera K_V aufgenommen.

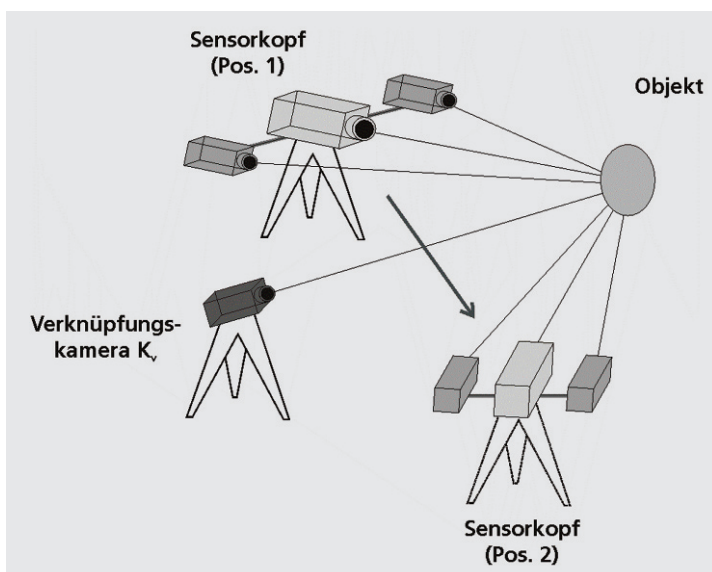
Hiernach erfolgt das Umpositionieren des Sensorkopfes mit dem beweglichen Stativ und die Messwertaufnahme wird aus dieser neuen Richtung wiederholt. Dies erfolgt so lange, bis das Objekt aus allen erforderlichen Richtungen erfasst worden ist.

Nach abgeschlossener Messwertaufnahme erfolgen die Koordinatenberechnung mittels Phasenkorrelation zwischen den Messkameras und die Systemkalibrierung in einem gemeinsamen Prozessschritt. Die Kamerapixel der Verknüpfungskamera bilden hierbei »virtuelle Passmarken« zur Registrierung der Einzelansichten zum Gesamtbild. Dadurch können in der Koordinatenberechnung alle Einzelansichten in einem gemeinsamen Weltkoordinatensystem berechnet werden. Als Besonderheit des Systemkonzepts ergibt sich somit, dass keine Passmarken, externe eingemessene Referenzrahmen oder andere Einmessvorrichtungen (Tracker) verwendet werden müssen. Dies führt zu einer hohen Flexibilität und Nutzerfreundlichkeit. Damit wird ein flexibles passmarkenfreies Vermessen großflächiger Objekte (z. B. PKW-Teile, Clay-Modelle, Skulpturen etc.) möglich. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch Hinzufügen von weiteren Verknüpfungskameras K_V das Messvolumen um das von ihnen zusätzlich beobachtete Gebiet bis auf einige m^2 zu erweitern.

Für den Einsatz in Industrieumgebungen sind eine Reihe von hard- und softwarespezifischen Detaillösungen integriert. Um fehlerhaften Messungen durch Störeinflüsse, wie z. B. Erschütterungen oder Helligkeitsschwankungen, zu vermeiden, identifiziert eine online-Überprüfung der Messdaten gestörte Aufnahmen und ermöglicht eine automatische Wiederholung.

Abb. 2:
Grundanordnung eines Stativmesssystems »kolibri MOVE«.

Fig. 2:
Basic configuration of a tripod measuring system "kolibri MOVE".



System solution "kolibri MOVE" in detail

One realization of the measuring principle is the measuring system "kolibri MOVE" (see Figs. 2 and 3). The mobile configuration consists of a freely moveable sensor head and a so-called connecting camera K_V (both are mounted on tripods). In order to measure the whole body of the object in the measuring process, the sensor head is positioned in several positions relative to the object using a moveable tripod. Furthermore, the connecting camera K_V is uniquely positioned relative to the measuring object such that it can record an overview of the complete measuring scene. The projector generates fringe sequences during the measuring process, which are recorded simultaneously by the connecting camera K_V and the measuring cameras. After that the sensor head is repositioned by the moveable tripod and the measurement is repeated from this new direction. The whole process is repeated until the object is recorded from all required directions.

The calculation of the co-ordinates is carried out by means of phase correlation between the measuring cameras and system calibration in a common step after the complete recording of the image sequences. The pixel of the connecting camera form 'virtual landmarks' for the registration of the single views in order to obtain a complete common image. By this the calculation of the co-ordinates of all single views is realized in a common world co-ordinate system. Thus the avoidance of physical landmarks, extrinsic calibrated reference frames, and other calibration devices (tracker) becomes a special property of the system concept.

This leads to high flexibility and convenience. Thus a flexible measurement of large objects (e.g. car parts, clay models, sculptures, etc.) becomes possible without landmarks.

Additionally, the measuring volume can be increased up to several square meters by adding more connecting cameras.

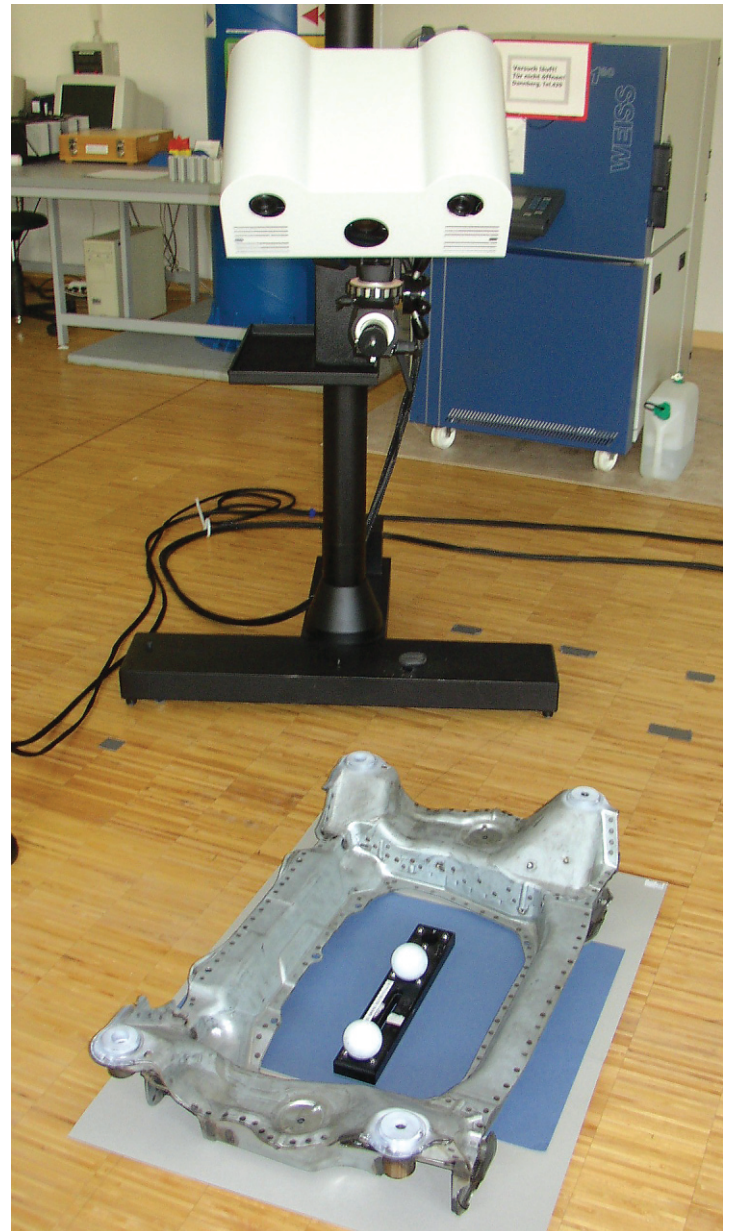


Abb. 3:
Messanordnung »kolibri MOVE«.

Fig. 3:
Measuring configuration "kolibri MOVE".

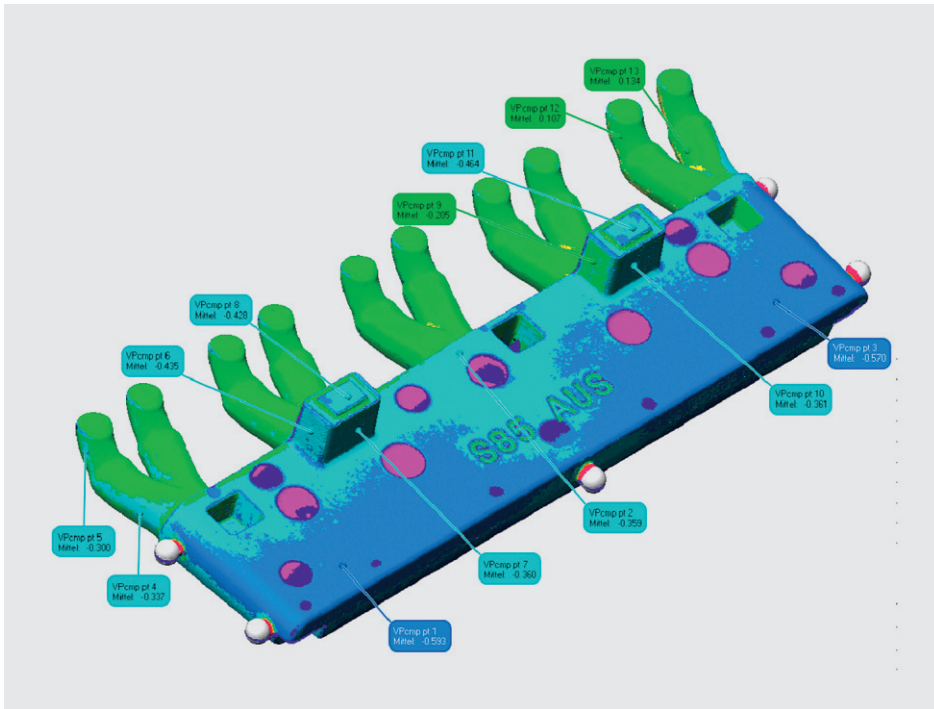


Abb. 4:
3D-CAD-Vergleich eines Lufteinlasskanals (Sandkern), »kolibri 900«.

Fig. 4:
3D CAD comparison of an air flushing channel (sand core), "kolibri 900".

Der Bediener des Gerätes wird während der Messung aktiv bei der Planung weiterer Aufnahmen unterstützt, indem jederzeit der aktuelle Messfortschritt in die Live-Anzeige der Kameras eingeblendet werden kann. Eine Schnellansicht des Rekonstruktionsergebnisses ist abrufbar, um selbst an schwierig zu vermessenden Objektregionen die Vollständigkeit der Daten durch entsprechende Aufnahmepositionen zu ermöglichen.

Zu der hohen Flexibilität durch den manuell und zielgenau steuerbaren Sensorkopf kommt jedoch die im Industriumfeld wichtige weitgehende Automatisierung hinzu. Nachdem die Messdatenaufnahme abgeschlossen wurde, erfolgt eine Ausgabe der Messresultate als CAD-Datei (STL). Um eine hohe Geschwindigkeit auch bei den hohen Punktdichten und den daraus resultierenden Datenmengen zu ge-

währleisten, wird die verfügbare Parallelität auf zeitgemäßen Workstations softwareseitig bestmöglich genutzt. Bis zu 100 Teilansichten können aufgenommen werden, um selbst anspruchsvolle Messobjekte vollständig mit einer Messunsicherheit (1σ) von $50\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$ in Messfeldern bis zu mehreren Quadratmetern zu vermessen. Die Gesamtmesszeit (Messdatenaufnahme plus Datenberechnungszeit) liegt dabei je nach notwendiger Anzahl der Teilansichten zwischen 10 und 60 Minuten. Ein Beispiel der Vermessung eines Sandkernes zeigt Abb. 4 (BMW-Motorenwerk Landshut) /3/.

Abgeleitete Systemlösungen

Insgesamt ist die aus dem Ansatz der stereobasierten Streifenprojektion entwickelte Software-Basis der Grundstein für die Skalierbarkeit des Lösungsansatzes für verschiedenste Messgeräterealisierungen. Durch die gezielte Anpassung der verwendeten Optiken, aber unter Beibehaltung der generellen Geometrie und Algorithmik, konnte das neue Messprinzip sowohl in Systemen zur Zahndigitalisierung (Messfelddurchmesser $90\ \text{mm}$) als auch zur Vermessung großer Industrieteile (bis zu einigen m^2 Fläche) erfolgreich eingesetzt werden. Die Flexibilität dieser Lösung ermöglicht auch eine schnelle Anpassung der Messsysteme an neue Einsatzgebiete, wie z. B. dem Einsatz in robotergeführten 3D-Scannern wie dem »kolibri ROBOT« (Abb. 5).

Zusammenfassung

Die vorgestellte neue Lösung der stereobasierten Streifenprojektion mit Phasenkorrelation ermöglicht eine fehlertolerante, flexible Ausführung von Messsystemen für verschiedene Messfelder. Hierauf basierend sind sehr robuste, industrietaugliche Anordnungen umgesetzt worden. Die Genauigkeit wird weitgehend durch die Kameraoptik bestimmt. Die Wirkung von Phasenmessfehlern wird weitgehend kompensiert.

Literatur:

- /1/ Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Notni, G.: Phasogrammetric optical 3D-Sensor for the measurement of large objects, Proc. SPIE 5457 (2004) S. 56-64.
- /2/ Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Himmelreich, M.; Bräuer-Burchardt, Ch.; Brakhage, P.; Notni, G.: Optical 3D sensor for large objects in industrial applications, Proc. SPIE 5856 (2005) S. 118 – 127.
- /3/ Notni, G.: Einsatz von 3D-Messsystemen in der Produktionsumgebung, Fachmagazin Gießerei Erfahrungsaustausch 8 (2006) S. 10-13.

A number of hardware and software detail solutions are integrated for use in industrial environments. In order to avoid erroneous measurements due to disturbances like vibrations or illumination artifacts, an online check of the measuring data is performed, which detects impaired recordings and initializes an automatic repetition. The user of the device is supported actively in the planning of further recordings, as the measuring progress can be shown at any time on the live display of the cameras. A quick view of the reconstruction result may be accessed in order to facilitate the integrity of the data in object regions which are difficult to measure, by means of relevant recording positions.

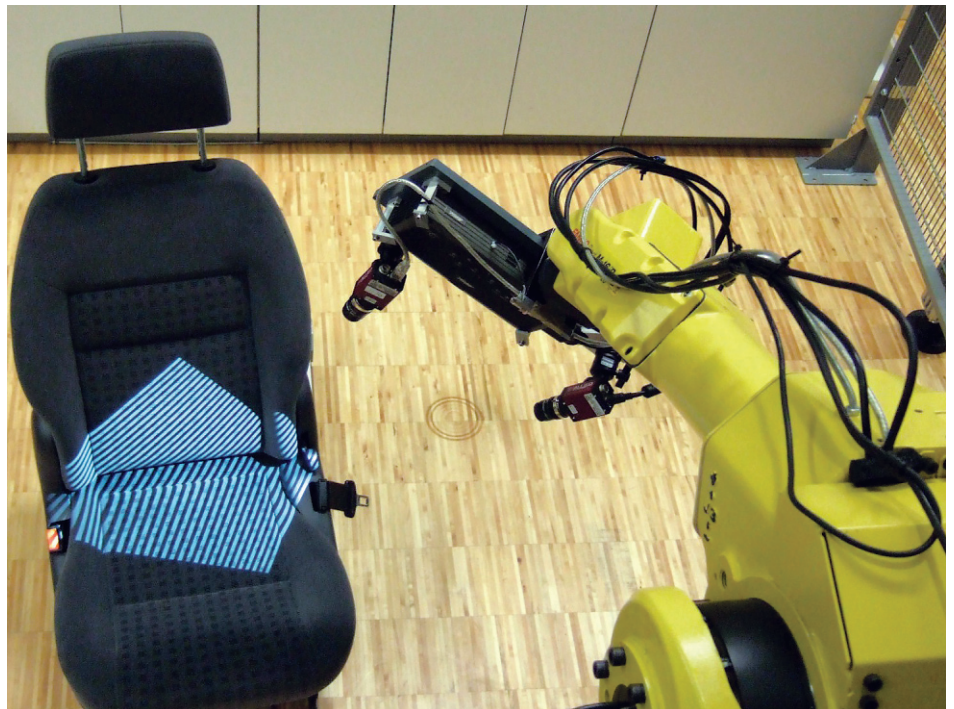
In addition to the high flexibility of the manually controlled sensor head the system possesses extensive automation which is important in industrial environments. After completion of the measuring value recording, the output of the measuring results is realized as CAD files in the STL format. In order to achieve high speed of the measurement even with high point density and the resulting high volume of output data, the available parallelism of modern workstations is utilized in the best possible way by the software. Up to 100 partial views may be recorded in order to measure even sophisticated measuring objects with a measuring uncertainty (1σ) of 50-100 μm in measuring fields of up to several square meters. The complete measuring time including the recording of the measuring values and the calculation of the data is between 10 and 60 minutes depending on the number of necessary partial views. An example of the measurement of a sand core is shown in Fig. 4 (BMW engine works Landshut)/3/.

Derived system solutions

The software basis developed from the stereo based fringe projection approach is the initial point for the possibility of the scalability of the solution approach for the most diverse realizations of the measuring devices. The new measuring principle was successfully applied in systems for tooth digitization (measuring field diameter 90 mm) as well as for the measurement of large industrial parts (up to several square meters in area) by the selective adaptation of the optics used and the retention of the general geometry and algorithms. The high flexibility of the solution also facilitates a rapid adaptation of the measuring systems to new application fields, e.g. the use in robot-driven 3D scanners ("kolibri ROBOT" – see Fig. 5).

Abb. 5:
Messsystem »kolibri ROBOT«.

Fig. 5:
Measurement system "kolibri ROBOT".



Summary

The presented new solution of the stereo based fringe projection with phase correlation makes a flexible, error-tolerant realization of measuring systems with different measuring fields possible. Based on this, very robust configurations for industrial applications were realized. The accuracy is mainly determined by the camera optics. The influence of phase errors is mostly compensated.

References:

- /1/ Kühmstedt P., Heinze M., Notni G.: Phasogrammetric optical 3D-Sensor for the measurement of large objects, Proc. SPIE 5457 (2004) p. 56-64.
- /2/ Kühmstedt P., Heinze M., Himmelreich M., Bräuer-Burchardt Ch., Brakhage P., Notni G.: Optical 3D sensor for large objects in industrial applications, Proc. SPIE 5856 (2005) p. 118 – 127.
- /3/ Notni G.: Einsatz von 3D-Messsystemen in der Produktionsumgebung, Fachmagazin Giesserei Erfahrungsaustausch 8 (2006) p. 10-13.