



(10) **DE 10 2016 119 819 B3** 2017.05.04

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 119 819.6**
(22) Anmeldetag: **18.10.2016**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **04.05.2017**

(51) Int Cl.: **G01B 11/25 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106
Magdeburg, DE**

(72) Erfinder:
**Lilienblum, Erik, 39114 Magdeburg, DE; Al-
Hamadi, Ayoub Kassim Mahmod, Prof. Dr., 39104
Magdeburg, DE**

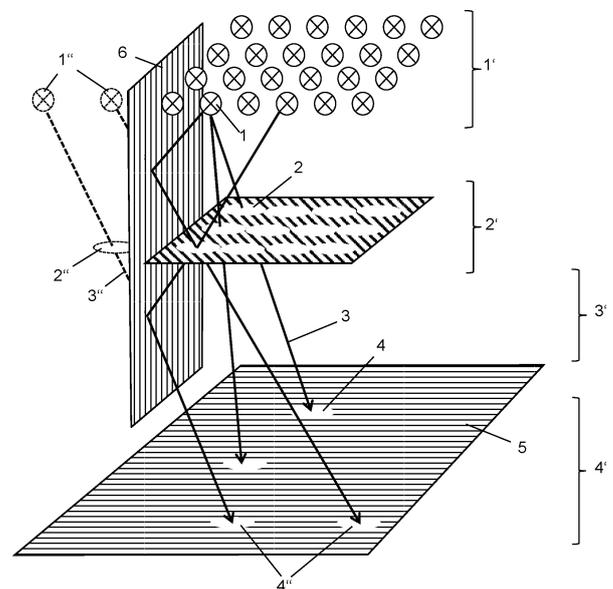
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	44 02 414	C2
DE	199 28 341	C2
DE	10 2011 082 349	B3
DE	10 2012 002 161	A1
DE	10 2013 002 399	A1
DE	10 2013 212 409	A1
DE	20 2008 017 729	U1
US	2007 / 0 263 903	A1
US	2009 / 0 185 157	A1

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen**

(57) Hauptanspruch: Vorrichtung (V) zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen, umfassend zumindest eine Kamera und mehrere räumlich verteilte Lichtprojektionen, wobei jede Lichtprojektion zumindest umfasst:

- eine Lichtquelle (1) zur Erzeugung von Licht,
- eine Linse (2) zur Fokussierung des Lichts, wobei aus der Lichtquelle (1) direkt über die Linse (2) ein Lichtstrahl (3) auf eine Messoberfläche (5) treffen kann, derart dass ein einzelner Lichtfleck (4) auf der Messoberfläche (5) abbildbar ist und wobei eine Überlagerung aller Lichtstrahlen (3') eine räumliche Helligkeitsverteilung ergibt, wodurch auf der gesamten Messoberfläche (5) ein statistisches Lichtmuster (4') erzeugbar ist, und
- ein Lichtquellen-Array (1') und ein Linsen-Array (2'), wobei über jede Lichtquelle des Lichtquellen-Arrays (1') mit jeder Linse des Linsenarrays (2') eine Lichtprojektion erzeugbar ist, und
- umfassend zumindest einen Spiegel (6), der zur Erhöhung der Anzahl der erzeugbaren Lichtprojektionen oder Lichtflecken (3') dient, wobei der Spiegel (6) vorzugsweise seitlich benachbart zwischen dem Lichtquellenarray (1') und der Messoberfläche (5) angeordnet ist, derart dass entweder das von den Lichtquellen seitlich abgestrahlte Licht über den Spiegel (6) auf das Linsenarray (2') reflektierbar ist, oder dass seitlich abgestrahlte Projektionen auf das Messfeld (5) umgelenkt werden und
- wobei eine durch m teilbare Anzahl von n unterschiedlichen Lichtmustern (4'') dadurch erzeugbar ist, dass jede Lichtquelle (1) in genau n/m Lichtmustern (4') eingeschaltet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen.

[0002] Im Allgemeinen kommen bei Photogrammetrie mit aktiver Beleuchtung handelsübliche Videoprojektoren oder Beamer oder auch spezielle OEM-Projektoren zum Einsatz, wie z. B. in DE 44 02 414 C2 offenbart. Die Ergebnisse, die hier insbesondere mit mehrschrittigen Verfahren, z. B. Zeitkorrelation, wie in DE 199 28 341 C2 offenbart, erzielt werden, sind für viele praktische Anwendungen ausreichend. Die Verfahrensgrundlagen werden in aktuellen Standardwerken zu Photogrammetrie und Computer Vision beschrieben. Derzeit werden Messsysteme mit ein oder zwei Kameras und einem Projektor von vielen Unternehmen kommerziell angeboten.

[0003] Zur Lösung messtechnischer Probleme in industriellen Anwendungen stoßen Projektoren bezüglich ihrer maximalen Lichtintensität schnell an ihre Grenzen. Aus der geringen Lichtintensität resultieren verhältnismäßig lange Integrationszeiten zur Bildaufnahme, was zu langen Messzeiten und geringerer Messgenauigkeit, z. B. bei Schwingungen, führt. Wegen der konstanten Maximalleistung eines Projektors kann das Messfeld nur auf Kosten einer geringeren Lichtintensität vergrößert werden. Der gleichzeitige Einsatz mehrerer Projektoren ist im Allgemeinen aus verfahrenstechnischen Gründen nicht möglich und zudem sehr kostenintensiv, so dass auch damit eine entsprechende Skalierung der Beleuchtungsstärke nicht praktikabel ist.

[0004] Eine Alternative zur Verwendung von Projektoren bietet der Einsatz von Lasern. Laserlicht hat aber den Nachteil, dass es Speckleeffekte verursacht und bei großer Intensität entsprechende Sicherheitsstandards eingehalten werden müssen. Bei Applikationen werden häufig Laserlichtschnittverfahren oder Lasertriangulationsverfahren eingesetzt. Die Verfahren sind auch im industriellen Einsatz verhältnismäßig robust, die Messzeiten sind aber häufig länger als beim Einsatz von Projektoren.

[0005] Laserlicht kann auch indirekt eingesetzt werden. In DE 10 2012 002 161 A1 wird ein System vorgestellt, dass objektive Specklemuster generiert und sie über ein Objektiv auf das Messfeld projiziert. Mit dem System werden sehr schnelle Umschaltzeiten und große Lichtintensitäten erreicht. Allerdings wird bei höherer Intensität auch schnell eine hohe Laserschutzklasse notwendig, was für viele Applikationen problematisch ist. Außerdem entstehen auch subjektive Specklemuster, die zu nicht unerheblichen Messfehlern führen.

[0006] Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Lichtmustern besteht in der Verwendung einzelner Lichtspots. In DE 10 2013 212 409 A1 wird ein Messsystem mit Zeilenkameras beschrieben, das Lichtspots auf eine Zeile fokussiert, was prinzipiell auch zur Erzeugung flächiger Lichtmuster geeignet ist. Die technische Aufgabe könnte damit bezüglich Lichtintensität, Skalierbarkeit und Umschaltgeschwindigkeit gelöst werden, allerdings sind die generierten Lichtmuster vergleichsweise grob. Dies erlaubt eine photogrammetrische Auswertung der Muster nur in einem sehr eingeschränkten Messbereich und die grob strukturierten Muster können bei ungeeigneten Oberflächen zu großen systematischen Messfehlern führen.

[0007] In DE 10 2013 002 399 A1 wird eine Zeilenbeleuchtung zur Generierung unterschiedlicher Lichtmuster mit sehr hoher Intensität beschrieben. Da hierbei das von einer LED-Zeile emittierte Licht in einer Dimension durch einen Reflektor auf eine Zeile fokussiert wird, eignet es sich nicht zur flächigen Verwendung mit Matrixkameras.

[0008] US 2007/0 263 903 A1 offenbart ein Messverfahren zur Charakterisierung einer Oberfläche, bei dem durch die Korrelation verschiedener statistischer Lichtmuster, die durch eine oder mehrere Beleuchtungseinheiten generiert werden, eine eindeutige Korrespondenz der Punkte in den Kamerabildern der Messoberfläche ermöglicht wird. Da die Beleuchtungseinheit technisch nicht näher beschrieben wird, ist hier von einer üblichen Zentralprojektion auszugehen, die vermutlich die oben beschriebenen Defizite bezüglich der Beleuchtungsstärke aufweist.

[0009] Aus DE 10 2011 082 349 B3 ist ein Verfahren und Vorrichtung zur dreidimensionalen konfokalen Vermessung mit mehreren konfokalen Kanälen bekannt, mit jeweils einer Kollimatorlinse und einer Lochblende. Die konfokalen Kanäle verwenden Beleuchtungsstrahlen einer gemeinsamen Laserquelle. Alternativ dazu kann jeder konfokale Kanal eine eigene Laserquelle aufweisen. Die Kollimatorlinsen sind in einem Linsen-Array in einer Ebene angeordnet. Die Lochblenden sind in einem Lochblenden-Array in einer Ebene angeordnet. Durch den dargestellten optischen Aufbau wird jeweils ein Bündel von Messpunkten des jeweiligen konfokalen Kanals auf die Oberfläche des Objekts projiziert. Wie bereits oben erwähnt sind auch hier entsprechende Laserschutzklassen zu beachten und es wird vermutlich zu Messfehlern durch subjektive Speckle kommen.

[0010] DE 20 2008 017 729 U1 offenbart eine 3D-Sicherheitskamera zur Überwachung und Absicherung eines Raumbereichs, wobei ein oder mehrere Halbleiterlichtquellen vorzugsweise SMD-Lasermodule auf einer Leiterplatte vorgesehen sind. Dabei werden Lichtstrahlen über individuelle Linsen und/

oder eine gemeinsame Linse gebündelt und durchstrahlen dann ein mustererzeugendes Element. Beim Einsatz von Lasermodulen sind auch hier wieder Laserschutzklassen und subjektive Speckleeffekte zu beachten. Bei Verwendung anderen Lichtes wirkt vermutlich die individuelle Bündelung und anschließende zentrale Mustererzeugung effizienzmindernd.

[0011] US 2009/0185157 A1 offenbart eine Vorrichtung zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen mit einem optischen Stereosystem zu Bildaufnahme und einer Beleuchtungseinheit bestehend aus mehreren räumlich verteilten Lichtprojektionen. Jede Lichtprojektion besteht vorzugsweise aus einer Lichtquelle, einem Musterelement und einer Projektionslinse. Auch hier erfolgt eine individuelle Bündelung, die sich vermutlich effizienzmindernd auswirkt. Wird wie ebenfalls vorgeschlagen das Licht verschiedener Lichtquellen durch mehrere Projektionslinsen und Musterelemente projiziert, verliert das System an Effizienz, da in diesem Fall keine Fokussierung der Beleuchtung auf ein begrenztes Messfeld erfolgen kann.

[0012] Vor diesem Hintergrund besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen zur Verfügung zu stellen, um die zuvor genannten Nachteile überwinden zu können.

[0013] Gelöst wird diese Aufgabe durch eine Vorrichtung gemäß Anspruch 1, ein Verfahren gemäß Anspruch 8, sowie den weiteren vorteilhaften Ausführungsformen gemäß den Unteransprüchen.

[0014] Vorgeschlagen wird eine Vorrichtung (V) zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen, umfassend zumindest eine Kamera und mehrere räumlich verteilte Lichtprojektionen. Jede einzelne Lichtprojektion umfasst zumindest:

- eine Lichtquelle (1) zur Erzeugung von Licht,
- eine Linse (2) zur Fokussierung des Lichts, wobei von der Lichtquelle (1) über die Linse (2) ein Lichtstrahl (3) auf eine Messoberfläche (5) treffen kann, derart dass ein einzelner Lichtfleck (4) auf der Messoberfläche (5) abbildbar ist. Die Überlagerung aller Lichtstrahlen (3) ergibt eine räumliche Helligkeitsverteilung, wodurch auf der gesamten Messoberfläche (5) ein statistisches Lichtmuster (4') erzeugbar ist und
- umfassend zumindest einen Spiegel (6), der zur Erhöhung der Anzahl der erzeugbaren Lichtprojektionen bzw. Lichtflecken (3') dient, wobei der Spiegel (6) vorzugsweise seitlich benachbart zwischen dem Lichtquellenarray (1') und der Messoberfläche (5) angeordnet ist, derart dass entweder das von den Lichtquellen seitlich abgestrahlte Licht über den Spiegel (6) auf das Linsenarray (2') reflektierbar ist, oder dass seitlich abgestrahlte

Projektionen auf das Messfeld (5) umgelenkt werden und

– wobei eine durch m teilbare Anzahl von n unterschiedlichen Lichtmustern (4'') dadurch erzeugbar ist, dass jede Lichtquelle (1) in genau n/m Lichtmustern (4') eingeschaltet ist.

[0015] Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Lichtquellen (1') separat ein oder ausschaltbar sind und so unterschiedliche statistische Lichtmuster (4') bzw. unterschiedliche räumliche Helligkeitsverteilungen (3') erzeugbar sind.

[0016] Vorteilhafterweise umfasst die Vorrichtung in einer weiteren Ausführungsform der Erfindung eine große Anzahl räumlich verteilter Lichtquellen, im Folgenden bezeichnet als Lichtquellen-Array (1'), und eine große Anzahl räumlich verteilter Linsen, im Folgenden bezeichnet als Linsen-Array (2'), wobei über jede Lichtquelle des Lichtquellenarrays (1') mit jeder Linse des Linsenarray (2') eine einzelne Lichtprojektion erzeugbar ist.

[0017] Die Vorrichtung ermöglicht, dass eine räumliche Helligkeitsverteilung verschiedener Lichtmuster, die durch die Überlagerung von Lichtstrahlen räumlich verteilter Lichtquellen durch räumlich verteilte Projektionslinsen entstehen, dazu verwendet werden kann, unabhängig von der Eigentextur einer Messoberfläche eindeutige Korrespondenzen in Kamerabildern dieser Messfläche durch die Korrelation von Lichtmustern zu bestimmen.

[0018] Die Erfindung betrifft somit eine Vorrichtung, mit der Oberflächen ohne die Verwendung eines auf Zentralprojektion basierenden Musterprojektors photogrammetrisch vermessen werden können.

[0019] Auf die Generierung von Lichtmuster darf dabei aber nicht verzichtet werden, um bei auch bei homogener bzw. fehlender Oberflächentextur eindeutige Korrespondenzen zu finden.

[0020] Zusätzlich wird durch eine Vielzahl an Lichtquellen eine hohe Lichtintensität erreicht, die Voraussetzung für kurze Integrations- und Messzeiten ist. Für die Anwendung mehrschrittiger Messverfahren können auch unterschiedliche Muster generiert werden. Dabei sollte die Umschaltzeit zwischen verschiedenen Mustern kurz sein, um auch kurze Messzeiten über mehrere Schritte zu gewährleisten.

[0021] Bei großen Messfeldern sollten außerdem die generierten Lichtmuster eine entsprechend große Fläche überdecken ohne dabei aber an Intensität zu verlieren. Voraussetzung hierfür ist es, dass bei einer Skalierung des Messfeldes auch eine entsprechende Skalierung der Beleuchtungsstärke durch zusätzliche Lichtquellen möglich ist.

[0022] Beispielsweise können die Lichtquellen (1) zum Erhalt kurzer Schaltzeiten und einem schnellen Lichtmusterwechsel auch als LED's (1) ausgebildet sein.

[0023] Erfindungsgemäß kann die Vorrichtung (V) zumindest einen Spiegel (6) umfassen, der zur Erhöhung der Anzahl der erzeugbaren Lichtstrahlen (3') bzw. Lichtflecken (4') dient. Der Spiegel (6) ist vorzugsweise seitlich benachbart, d. h. zwischen dem Lichtquellenarray (1') und dem Messfeld (5) positioniert, so dass entweder das von den Lichtquellen seitlich abgestrahlte Licht über den Spiegel (6) auf das Linsenarray (2') reflektierbar ist, oder dass seitlich abgestrahlte Projektionen auf das Messfeld (5) umgelenkt werden.

[0024] Es entstehen sogenannte virtuelle Lichtquellen (1'') bzw. virtuelle Linsen (2'') die für zusätzliche Lichtstrahlen (3'') bzw. Lichtflecken (4'') verantwortlich sind. Insgesamt wird durch derartige Spiegelkonstruktionen die Lichtintensität nochmals erhöht.

[0025] Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass eine durch m teilbare Anzahl von n unterschiedlichen Lichtmustern (3') dadurch erzeugbar ist, dass jede einzelne Lichtquelle (1) in genau n/m Lichtmustern (3') eingeschaltet ist.

[0026] Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn kn verschiedene Lichtmuster (3') in der Form verwendbar sind, dass ein globaler Näherungswert über alle kn Muster berechenbar ist und an dieser Stelle k mal eine lokale Suche des Korrelationsmaximums über jeweils n Muster ausführbar ist.

[0027] Vorgeschlagen wird ein Verfahren zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen, umfassend zumindest folgende Schritte:

- Bereitstellung einer Vielzahl räumlich verteilter Lichtprojektionen, wobei jede einzelne Lichtprojektion zumindest eine Lichtquelle (1) mittels der Licht erzeugt wird, und eine Linse (2) zur Fokussierung des Lichts umfasst, wobei von der Lichtquelle (1) über die Linse (2) ein Lichtstrahl (3) auf eine Messoberfläche (5) treffen kann, derart dass ein einzelner Lichtfleck (4) auf der Messoberfläche (5) abgebildet wird. Die Überlagerung aller Lichtstrahlen (3') ergibt eine räumliche Helligkeitsverteilung, die auf der gesamten Messoberfläche (5) ein statistisches Lichtmuster (4') hinterlässt.
- Berechnung eindeutiger Korrespondenzen in den Kamerabildern der Messoberfläche durch die Korrelation verschiedener statistischer Lichtmuster und
- Bereitstellung zumindest eines Spiegels (6), der zur Erhöhung der Anzahl der erzeugbaren Lichtprojektionen bzw. Lichtflecken (3') dient, wobei der Spiegel (6) vorzugsweise seitlich benachbart zwischen dem Lichtquellenarray (1') und der

Messoberfläche (5) angeordnet wird, derart dass entweder das von den Lichtquellen seitlich abgestrahlte Licht über den Spiegel (6) auf das Linsenarray (2') reflektierbar ist, oder dass seitlich abgestrahlte Projektionen auf das Messfeld (5) umgelenkt werden und

- wobei eine durch m teilbare Anzahl von n unterschiedlichen Lichtmustern (4'') dadurch erzeugt wird, dass jede Lichtquelle (1) in genau n/m Lichtmustern (4') eingeschaltet wird.

[0028] Die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Verfahren sind zudem durch folgende Vorteile gekennzeichnet:

- hohe Lichtintensität bei verbesserter Effizienz,
- kurze Integrationszeiten für die Gesamtmessung,
- erhebliche Reduzierung von Abschattungen,
- direkte 360° Rekonstruktion mit Multikamerasystemen.

[0029] Beispielhaft wird die Erfindung anhand nachfolgend dargestellter Figuren und Ausführungsbeispiele näher beschrieben, ist jedoch nicht darauf beschränkt.

[0030] Es zeigen:

[0031] Fig. 1: schematisch eine Vorrichtung (V) zur Generierung von Lichtmustern mittels räumlich verteilter Lichtprojektionen und

[0032] Fig. 2: schematisch Beispiele von Helligkeitsverteilungen, erzeugt mit der Vorrichtung (V) aus Fig. 1, in einer eindimensionalen Darstellung.

[0033] In Fig. 1 wird schematisch eine Vorrichtung (V) zur Generierung von Lichtmustern mittels räumlich verteilter Lichtprojektionen gezeigt.

[0034] Grundlegender Gedanke der Mustergenerierung ist es, die zentrale Musterprojektion durch eine Vielzahl räumlich verteilter Lichtprojektionen zu ersetzen. Dabei besteht im einfachsten Fall eine einzelne Lichtprojektion aus einer Lichtquelle (1), z. B. einer LED, die direkt über eine Linse (2) einen Lichtstrahl (3) auf die Messoberfläche (5) wirft und dort einen einzelnen Lichtfleck (4), d. h. ein globales Lichtmaximum, entstehen lässt.

[0035] Durch die Verwendung vieler Lichtquellen, z. B. ein Lichtquellen-Array (1'), und vieler Projektionslinsen, z. B. ein Linsenarray (2'), entstehen an vielen verschiedenen Positionen auf der Messobjekttoberfläche (5) Lichtflecken, die zusammen genommen ein statistisches Muster (4') ergeben. Unterschiedliche Muster können ohne zusätzliche mechanische oder optische Bauelemente allein durch das ein- bzw. ausschalten einzelner Lichtquellen (1) erzeugt werden.

[0036] Bei Verwendung von LED's als Lichtquellen können die geforderten schnellen Umschaltzeiten erzielt werden.

[0037] Grundlage der erfindungsgemäßen Muster-generierung ist es, das homogene Licht einer Lichtquelle (1) durch Fokussierung mit einer Linse (2) zu bündeln. Für jedes Paar, bestehend aus einer Lichtquelle (1) und einer Linse (2), entsteht so ein Lichtstrahl (3) im Raum. Die Summe der lokalen Helligkeiten über alle möglichen Lichtstrahlen (3') ergibt dann eine spezifische Helligkeitsverteilung im Raum.

[0038] Durch die gezielte Auswahl einer Teilmenge von Lichtquellen, die eingeschaltet sind, ändert sich offensichtlich auch die spezifische Helligkeitsverteilung im Raum.

[0039] Dies ist die Grundlage zur Generierung unterschiedlicher Lichtmuster auf der Messoberfläche.

[0040] In Fig. 2 werden schematisch Beispiele für verschiedene Helligkeitsverteilungen, erzeugt mit der Vorrichtung (V) aus Fig. 1, in einer eindimensionalen Darstellung gezeigt.

[0041] Die Helligkeit (7) ist dabei als Grauwert nur in Abhängigkeit der geometrischen Position in x (8) dargestellt, wobei den zugehörigen Raumkoordinaten in y und z jeweils konstante Positionen zugewiesen sind. Die Graphen (9) stellen die einzelnen Helligkeiten verschiedener Lichtquellen p_1, p_2, \dots, p_{27} mit ihrem jeweiligen lokalen Maximum dar. Darüber sind die Summen s_1, s_2, s_3 der lokalen Helligkeiten über alle Lichtquellen (10) bzw. über zwei disjunkten Teilmengen von Lichtquellen $\{p_2, p_3, p_5, p_6, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{15}, p_{16}, p_{17}, p_{21}, p_{22}, p_{24}, p_{26}\}$ (11) und $\{p_1, p_4, p_5, p_8, p_9, p_{13}, p_{14}, p_{18}, p_{19}, p_{20}, p_{23}, p_{25}, p_{27}\}$ (12) dargestellt.

[0042] Die Teilmengen bei unterschiedlichen Mustern müssen nicht disjunkt sein, allerdings gilt für n disjunkte Teilmengen $s_1(x) = \sum_{i=1}^n s_i(x)$, woraus ein maximaler Signalabstand folgt, der von Vorteil bei der Suche nach Korrespondenzen sein kann. Eine weitere vorteilhafte Zerlegung der Gesamtmenge von Lichtquellen in eine durch m teilbare Anzahl von n unterschiedlichen Teilmengen besteht darin, dass jede Lichtquelle in genau n/m Teilmengen eingeschaltet ist. Es gilt in diesem Fall $n/m \cdot s_1(x) = \sum_{i=1}^n s_i(x)$. Der disjunkte Fall tritt offensichtlich bei $n = m$ ein, da dann jede Lichtquelle in genau einem Teilmuster enthalten sein darf.

[0043] Die hohe Lichtintensität der Beleuchtungskonstruktion sowie deren Skalierbarkeit bei Vergrößerung des Messfeldes ergibt sich aus der Möglichkeit eine Vielzahl an Lichtquellen im Raum zu platzieren.

[0044] Zudem können Abschattungen dadurch vermieden werden, dass das Licht prinzipiell aus vielen unterschiedlichen Richtungen projiziert wird.

[0045] Um die Lichteffizienz des Systems noch zu steigern, können auch seitliche Spiegel (6) eingesetzt werden, wobei sich die Anzahl von Projektionen durch entstehende virtuelle Lichtquellen (1'') entsprechend erhöht. Wird zusätzlich ein Multikamerasystem um das Objekt herum platziert, sind auch 360°-Rekonstruktionen ohne Mehrfachmessungen und Drehteller möglich.

[0046] Dies hat eine hohe Relevanz zur Vermessung komplexer Teile in der Produktion, kann aber auch bei Ausleuchtung ganzer Räume z. B. zur Raumüberwachung mit präziser Menschen- bzw. Maschinenlokalisierung genutzt werden. Hohe Frequenzen (> 100 Hz) bei der Musterabfolge führen dabei sogar zu irritationsfreien Systemen. Bei entsprechender Ansteuerungselektronik erreichen LED's Mustersequenzen von über 100 kHz. Zusammen mit Hochgeschwindigkeitskameras können so auch hochdynamische Oberflächenänderungen dreidimensional rekonstruiert werden.

[0047] Um lokale Unsicherheiten bei der Bildkorrelation zu vermeiden, sollte das Beleuchtungssystem optimiert werden. Als wichtigste Parameter gehen ein: Position und Abstrahlverhalten der LEDs; Position, Brennweite und Größe der Linsen; sowie Linsenabstand und Objektabstand. Die Optimierung kann durch Simulation der Helligkeitsverteilungen erfolgen. Das Ergebnis der Optimierung besteht aus den geometrischen und optischen Parametern zur Konstruktion des Beleuchtungssystems sowie einer Menge von optimalen Binärmustern, die jeweils eine Teilmenge von eingeschalteten Lichtquellen vorgeben.

[0048] Das elektronische Aufnahmesystem besteht aus einem Speicher für n optimale Binärmuster, einem Mustergenerator, einem Trigger, einem Lichtquellen-Array (1') und einer Anzahl von Kameras. Der Trigger liefert für eine Messung n Steuersignale, wobei mit jedem Steuersignal der Mustergenerator das nächste Muster aus dem Speicher lädt und die entsprechenden Lichtquellen an- bzw. ausschaltet. Mit jedem Steuersignal werden dann die auf der Messoberfläche (5) entstehenden Muster mit allen Kameras gleichzeitig aufgenommen, so dass bei jeder Messung pro Kamera eine Bildsequenz von n Bildern aufgenommen wird.

[0049] Die Auswertung der aufgenommenen Bilder erfolgt zunächst durch die Suche korrespondierender Bildpunkte in allen Kamerabildern, wobei die spezifische Helligkeitsverteilung unterschiedlicher Lichtmuster ausgenutzt wird. Bei Messsystemen bestehend aus nur einer Kamera, muss hierfür die räum-

liche Helligkeitsverteilung der Beleuchtungsvorrichtung bekannt, d. h. kalibriert, sein.

[0050] Als Suchkriterium kann eine Korrelationsfunktion, wie z. B. die normierte mittelwertfreie Kreuzkorrelation, verwendet werden, wobei die entsprechenden Bildpunkte über alle Bilder der Bildsequenzen miteinander korreliert werden. Wurden korrespondierende Bildpunkte gefunden, dann können daraus mittels Triangulation dreidimensionale Oberflächenpunkte berechnet und zu einer Oberflächenrekonstruktion zusammengesetzt werden.

[0051] Für dynamische Messungen sollte n im Allgemeinen möglichst klein sein, um kurze Einzelmesszeiten zu gewährleisten. In einem lokalen Suchbereich kann stellenweise sogar bei $n = 2$ mit guten Ergebnissen korreliert werden. Um flächendeckend in einem globalen Suchbereich Messwerte zu erhalten wird vorgeschlagen kn verschiedenartige Muster einzusetzen. Die globale Suche erfolgt dann über allen Mustern, wobei Näherungswerte für die lokale Suche berechnet werden. Die lokale Suche erfolgt dann jeweils über n Muster, wobei im Ergebnis k zeitlich hochaufgelöste Messwerte entstehen.

[0052] Da die Qualität jedes einzelnen Messwertes stark von der lokalen Musterqualität abhängt, müssen die berechneten Messwerte in Abhängigkeit von Aufnahmezeitpunkt und Messqualität gemittelt bzw. geglättet werden.

[0053] Die Vorrichtung und das Verfahren sind vorrangig für den industriellen Einsatz in der Qualitätskontrolle komplexer Bauteile bei kurzen Taktzeiten und hoher Präzision bestimmt. Darüber hinaus sind aber auch Anwendungen in allen anderen Bereichen möglich, in denen derzeit 3D-Oberflächenrekonstruktionen durch Projektor basierte photogrammetrische Messsysteme erzeugt werden.

[0054] Ein gänzlich neues Anwendungsfeld eröffnet sich bei Ausleuchtung ganzer Räume, wobei eine hochdynamische Raumüberwachung mit präziser Menschen- bzw. Maschinenlokalisierung als typisches Anwendungsszenario vorstellbar ist.

Patentansprüche

1. Vorrichtung (V) zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen, umfassend zumindest eine Kamera und mehrere räumlich verteilte Lichtprojektionen, wobei jede Lichtprojektion zumindest umfasst:

- eine Lichtquelle (1) zur Erzeugung von Licht,
- eine Linse (2) zur Fokussierung des Lichts, wobei aus der Lichtquelle (1) direkt über die Linse (2) ein Lichtstrahl (3) auf eine Messoberfläche (5) treffen kann, derart dass ein einzelner Lichtfleck (4) auf der Messoberfläche (5) abbildbar ist und wobei eine

Überlagerung aller Lichtstrahlen (3') eine räumliche Helligkeitsverteilung ergibt, wodurch auf der gesamten Messoberfläche (5) ein statistisches Lichtmuster (4') erzeugbar ist, und

- ein Lichtquellen-Array (1') und ein Linsen-Array (2'), wobei über jede Lichtquelle des Lichtquellen-Arrays (1') mit jeder Linse des Linsenarrays (2') eine Lichtprojektion erzeugbar ist, und

- umfassend zumindest einen Spiegel (6), der zur Erhöhung der Anzahl der erzeugbaren Lichtprojektionen oder Lichtflecken (3') dient, wobei der Spiegel (6) vorzugsweise seitlich benachbart zwischen dem Lichtquellenarray (1') und der Messoberfläche (5) angeordnet ist, derart dass entweder das von den Lichtquellen seitlich abgestrahlte Licht über den Spiegel (6) auf das Linsenarray (2') reflektierbar ist, oder dass seitlich abgestrahlte Projektionen auf das Messfeld (5) umgelenkt werden und

- wobei eine durch m teilbare Anzahl von n unterschiedlichen Lichtmustern (4'') dadurch erzeugbar ist, dass jede Lichtquelle (1) in genau n/m Lichtmustern (4') eingeschaltet ist.

2. Vorrichtung (V) nach Anspruch 1, umfassend mehrere Lichtquellen (1) und Linsen (2), derart, dass unterschiedliche Lichtquellen ein oder ausschaltbar sind und damit unterschiedliche Lichtmuster (3') erzeugbar sind.

3. Vorrichtung (V) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Lichtquellen als LED's (1) ausgebildet sind, die kurze Schaltzeiten und schnelle Lichtmusterwechsel ermöglichen.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei kn verschiedene Lichtmuster (4') in der Form verwendbar sind, dass ein globaler Näherungswert über alle kn Muster berechenbar ist und an dieser Stelle k mal eine lokale Suche des Korrelationsmaximums über jeweils n Muster ausführbar ist.

5. Verfahren zur optischen Vermessung von dreidimensionalen Oberflächen, umfassend zumindest folgende Schritte:

- Bereitstellung einer Vielzahl räumlich verteilter Lichtprojektionen, wobei jede einzelne Lichtprojektion zumindest eine Lichtquelle (1) mittels der Licht erzeugt wird, und eine Linse (2) zur Fokussierung des Lichts umfasst, wobei von der Lichtquelle (1) über die Linse (2) ein Lichtstrahl (3) auf eine Messoberfläche (5) treffen kann, derart dass ein einzelner Lichtfleck (4) auf der Messoberfläche (5) abgebildet wird, wobei die Überlagerung aller Lichtstrahlen (3') eine räumliche Helligkeitsverteilung ergibt, die auf der gesamten Messoberfläche (5) ein statistisches Lichtmuster (4') hinterlässt, wobei die Lichtquelle als ein Lichtquellen-Array (1') und die Linse als ein Linsen-Array (2') ausgebildet ist, wobei über jede Lichtquelle des Lichtquellen-Arrays (1') mit jeder Linse des Linsenarrays (2') eine Lichtprojektion erzeugbar ist, und

- Berechnung eindeutiger Korrespondenzen in den Kamerabildern der Messoberfläche durch die Korrelation verschiedener statistischer Lichtmuster, und
- Bereitstellung zumindest eines Spiegels (6), der zur Erhöhung der Anzahl der erzeugbaren Lichtprojektionen oder Lichtflecken (3') dient, wobei der Spiegel (6) vorzugsweise seitlich benachbart zwischen dem Lichtquellenarray (1') und der Messoberfläche (5) angeordnet wird, derart dass entweder das von den Lichtquellen seitlich abgestrahlte Licht über den Spiegel (6) auf das Linsenarray (2') reflektierbar ist, oder dass seitlich abgestrahlte Projektionen auf das Messfeld (5) umgelenkt werden und
- wobei eine durch m teilbare Anzahl von n unterschiedlichen Lichtmustern (4'') dadurch erzeugt wird, dass jede Lichtquelle (1) in genau n/m Lichtmustern (4') eingeschaltet wird.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

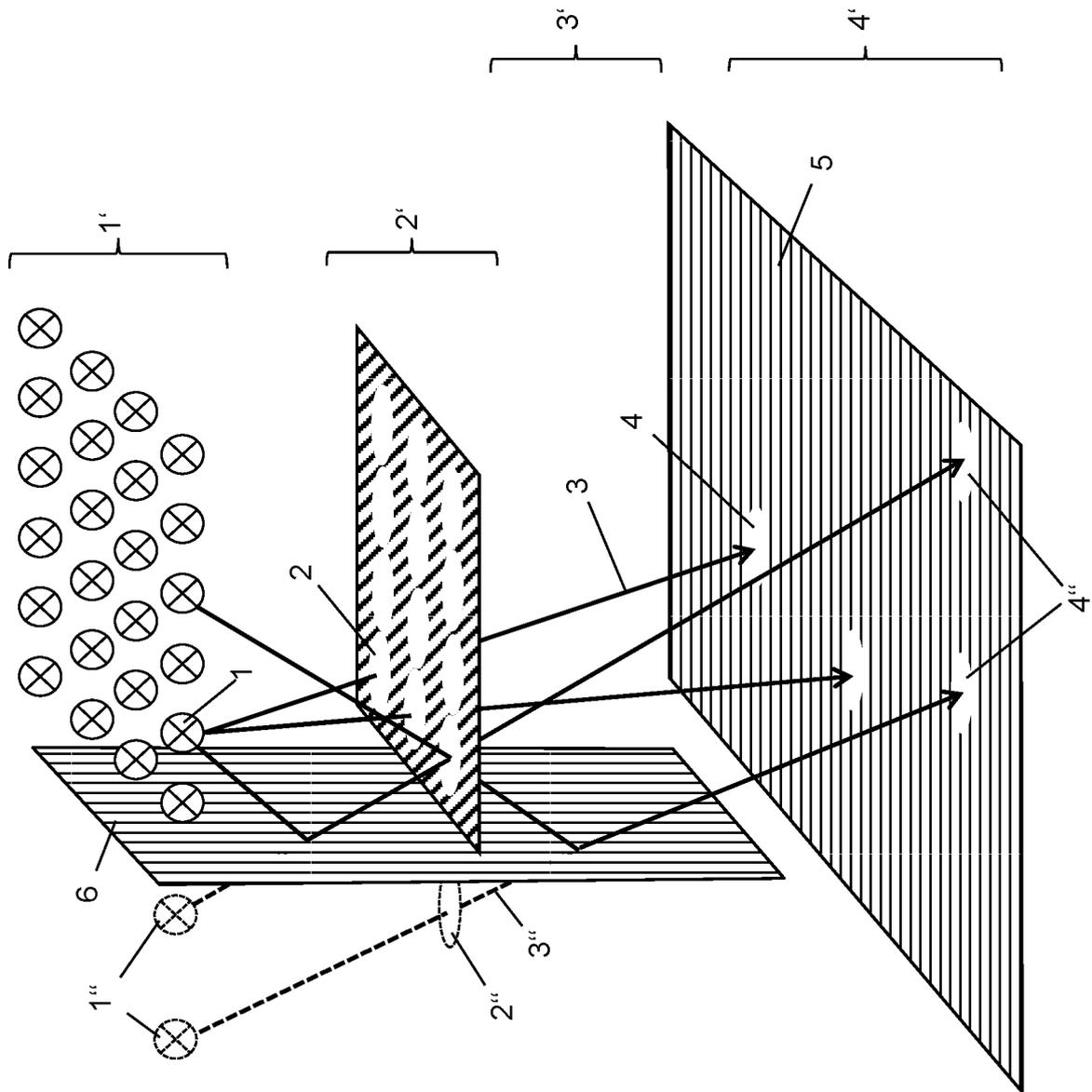


Fig. 1

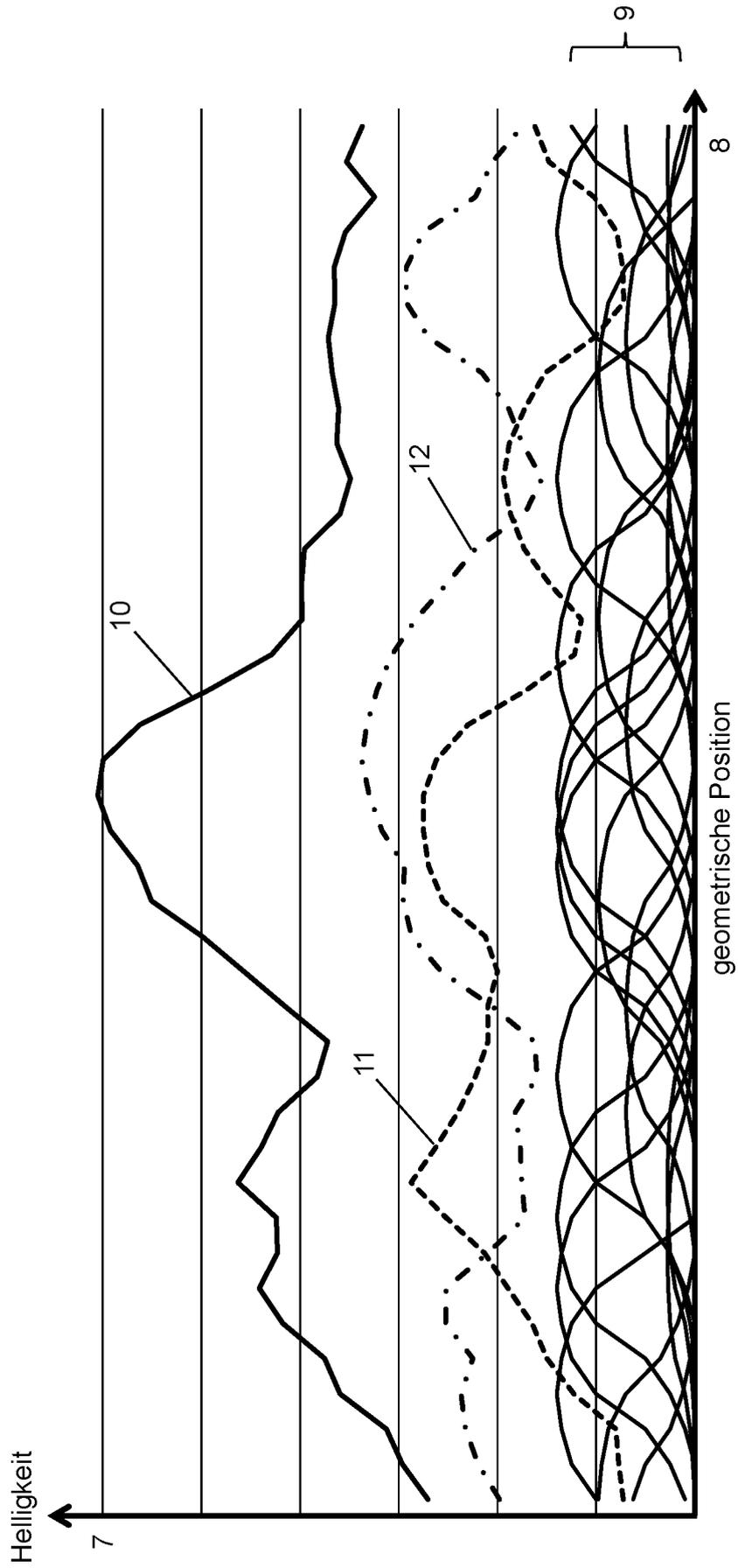


Fig. 2