



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 199 47 374 B4 2005.11.03**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **199 47 374.9**
 (22) Anmeldetag: **01.10.1999**
 (43) Offenlegungstag: **03.05.2001**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **03.11.2005**

(51) Int Cl.7: **G01B 11/03**
B23Q 17/24, G05B 19/21

Innerhalb von drei 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. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Bundesrepublik Deutschland, vertr. d. d.
 Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit,
 dieses vertr. d. d. Präsidenten der
 Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
 Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:

**Schwenke, Heinrich Iven, Dr., 38106
 Braunschweig, DE; Wendt, Klaus, Dr., 38536
 Meinersen, DE**

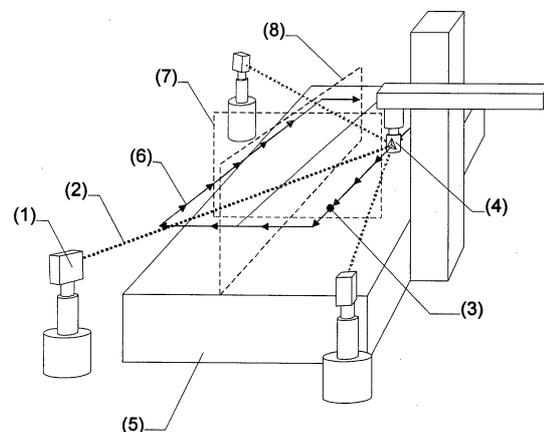
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

**T. Takatsuji et al.: The first measurement of a
 three-dimensional coordinate by use of a laser
 tracking interferometer system based on trila-
 teration, in: Meas. Sci. Technol. 9(1998)38-41;
 O. Nakamura et al.: A laser tracking robot-per-
 formance calibration system using ball-seated
 bearing mechanisms and a spherically shaped
 cat's-eye retroreflector, in: Rev. Sci. Instrum.
 65(4)1994, S.1006-1011;**

**O. Nakamura, M. Goto: Four-beam laser inter-
 ferometry for three-dimensional microscopic
 coordinate measurement, in: Applied Optics,
 33(1994)1, S.31-36;
 Busch, K., Kunzmann, H., Wäldele, F., "Numerical
 error-correction of a coordinate measuring
 machine
 proceedings of the international symposium on
 metrology for quality control in production",
 Tokyo 1984, S. 278-282;
 Trapet, E., Wäldele, F., A reference objekt based
 method to determine the parametric error
 components of coordinate measuring machines
 and
 machine tools", Measurement Vol. 9 No. 1,
 Jan-Mar
 1991, S. 17-21;
 Loser, R., "Laser-Tracking-System für
 3D-Messungen
 bewegter Objekte", Technisches Messen
 Jahrgang 60,
 Nr. 5, 1993, S. 198-202;**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Ermittlung geometrischer Abweichungen von Koordinatenmeßgeräten oder Werkzeugmaschinen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Ermittlung von geometrischen Abweichungen von Koordinatenmessgeräten oder Werkzeugmaschinen durch den Einsatz eines schwenkbaren optischen Längenmessgerätes, bei dem
 a) von dem Koordinatenmessgerät oder der Werkzeugmaschine in mindestens zwei Durchläufen eine gleiche Serie von Soll-Positionen angefahren wird, wobei in jeder Soll-Position der Abstand zu einem während des jeweiligen Durchlaufs ortsfesten, vom Standpunkt des Längenmessgeräts bestimmten Bezugspunkt ermittelt wird,
 b) der Bezugspunkt nach jedem Durchlauf versetzt wird,
 c) aus diesen gemessenen Abständen ein geometrisches Netz durch Trilateration aufgespannt wird,
 d) dieses Netz zur Ermittlung der Messabweichungen des betrachteten Gerätes verwendet wird.



Beschreibung

Anwendungsgebiet

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von geometrischen Abweichungen in den Führungen von Koordinatenmessgeräten oder Werkzeugmaschinen. Die Mess- bzw. Fertigungsgenauigkeit dieser Geräte hängt entscheidend von der geometrischen Genauigkeit ab, mit der die Führungen in diesen Geräten Koordinatensysteme verkörpern. Es ist notwendig, die geometrischen Abweichungen in den Führungen der Systeme gegenüber einem idealen Koordinatensystem zu ermitteln, um zum einen die Mess- und Fertigungsgenauigkeit beurteilen zu können. Zudem kann bei bekannten systematischen Abweichungen durch mathematische Korrektur die geometrische Genauigkeit der Geräte gesteigert werden.

Stand der Technik

Stand der Technik

[0002] Stand der Technik ist die Bestimmung von geometrischen Abweichungen von Koordinatenmessgeräten und Werkzeugmaschinen durch

- a) spezielle Messanordnungen, die die geometrischen Abweichungen einzeln und für jede Verfahrachse getrennt erfassen,
- b) zweidimensionale, kalibrierte Prüfkörper, die in mehreren Lagen im Messvolumen positioniert und gemessen werden.

[0003] Kennzeichnend für die Verfahren nach a) ist, dass die Abweichungen in jedem Freiheitsgrad und jeder Achse durch gesonderte Messeinrichtungen aufgenommen werden. Dazu müssen verschiedene Messmittel verwendet werden [1]. Für die Ermittlung der Positionsabweichungen werden Michelson-Laserinterferometer oder Maßstäbe eingesetzt, für die Ermittlung der Geradheitsabweichungen Lineale oder Interferometer in Wollaston-Anordnung und für die Ermittlung der rotatorischen Abweichungen Neigungsmesser oder Winkellaser. Die Rechtwinkligkeit der Verfahrachsen kann durch Messungen an Winkelnormalen bestimmt werden. Die große Anzahl verschiedener Messmittel und die zeitaufwendigen Umbau- und Justierarbeiten machen Verfahren nach a) sehr unwirtschaftlich. Außerdem eignet sich das Verfahren nicht zur Prüfung von Maschinen, deren bekannte systematische Abweichungen bereits bei der Positionierung oder Messung kompensiert werden, da nur tatsächliche (physikalische) Führungsabweichungen und nicht solche, die nach einer numerischen Korrektur verblieben sind, erfasst werden.

[0004] Aus den genannten Gründen werden verstärkt Verfahren nach b) angewendet, die durch die Messung von zweidimensionalen kalibrierten Norma-

len eine vollständige Ermittlung der überlagerten Geometrieabweichungen gestatten. Das Normal ist dabei im Allgemeinen mit kugel- oder zylinderförmigen Antastformelementen versehen. Die Messabweichungen, d. h. die Differenzen zwischen den angezeigten Messwerten und den kalibrierten Werten des Normals, resultieren dabei vornehmlich aus einer Überlagerung der geometrischen Abweichungen. Stand der Technik ist die Analyse der ermittelten Messabweichungen in der Art, dass die einzelnen geometrischen Abweichungen der Führungsbahnen daraus durch rechnergestützte mathematische Verfahren bestimmt werden [2]. Diese Verfahren sind im wissenschaftlichen Rahmen erprobt und bei Koordinatenmessgeräten kleiner und mittlerer Baugröße vielfach im industriellen Einsatz. Bei großen Koordinatenmessgeräten (mit Längen der Bewegungsachsen weit über 1 Meter) sind diese Verfahren jedoch schwer einsetzbar, weil geeignete Normale ausreichender Genauigkeit technisch kaum mehr realisierbar sind. Normale dieser Größenordnung sind unhandlich, und es lässt sich mit ihnen keine ausreichende Stabilität der verkörperten Maße erreichen.

[0005] In den letzten Jahren wurden in verschiedenen Forschungseinrichtungen Verfahren entwickelt und erprobt, die durch das Messprinzip Trilateration (manchmal auch Multilateration genannt) die Messgenauigkeit von Koordinatenmessungen erhöhen sollen [4, 5, 6]. Dabei werden mehrere schwenkbare Interferometer gleichzeitig einem gemeinsamen Retroreflektor automatisch nachgeführt. Durch gleichzeitige Auswertung der Längenmessungen aller Interferometer lässt sich dann die Position des Reflektors im Raum bestimmen. Diese Verfahren können auch zur Aufnahme von Abweichungen von Koordinatenmessgeräten [4] oder Industrierobotern [5] verwendet werden. Die in [4, 5, 6] beschriebenen Verfahren weisen jedoch für diese Zweck entscheidende Nachteile auf:

1. Die gleichzeitige Verwendung von drei oder mehr Interferometern auf einem Retroreflektor beschränkt die mögliche Position der Interferometer durch den im Allgemeinen limitierten Reflektionswinkel des Reflektors [5]. Um eine bestmögliche Genauigkeit im Raum zu erreichen, müssen alle Messstrahlen möglichst senkrecht aufeinander stehen. Dieser Forderung steht der limitierte Reflektionswinkel technisch üblicher Retroreflektoren entgegen.
2. Die gleichzeitige Verwendung von drei oder mehr Interferometern erfordert erhebliche Investitionen und erschwert die Handhabung des Systems deutlich.
3. Selbst bei Verwendung eines sogenannten "Full angle cateye"-Retroreflektors [5] lassen sich beim Einsatz von nur drei bis vier schwenkbaren Interferometern keine gleichmäßigen räumlichen Positionsunsicherheiten erzielen, da der Schnittwinkel der Messstrahlen stark mit der Relativposi-

Das Referenzelement kann in verschiedenen Positionen an dem Koordinatenmessgerät oder der Werkzeugmaschine angebracht werden (Bild 4).

[0015] Bei nur zwei Durchläufen (und damit nur zwei Bezugspunkten) müssen die Positionen des Messgeräts zueinander eingemessen sein und die Positionen des Längenmessgeräts müssen relativ genau in der jeweiligen Ebene (**6**, **7**, **8**) der Verfahrensbewegung liegen. Die Abstände des Längenmessgeräts von der jeweiligen Messebene gehen dann proportional zum Kosinus des zwischen Messebene und Längenmessachse eingeschlossenen Winkels als Messfehler ein. Dieser Messfehler ist verhältnismäßig klein und bei entsprechend genauer Positionierung des Längenmessgeräts in der Messebene zu vernachlässigen.

[0016] Werden für eine Messebene drei oder mehr Durchläufe mit unterschiedlicher Positionierung des Längenmessgeräts durchgeführt und ausgewertet, können durch räumliche Trilateration auch die Versätze der Positionen des Längenmessgeräts in Bezug zur Messebene berechnet und korrigiert werden.

Ausführungsbeispiel

Bevorzugte Ausführungsform

[0017] Am Koordinatenmessgerät oder an der Werkzeugmaschine wird an Stelle des Tasters oder des Werkzeuges vorzugsweise ein optischer Reflektor als Referenzelement befestigt und in eine Anzahl von vorgegebenen Soll-Positionen gefahren, welche relativ genau in einer Ebene liegen. Als interferometrisches Längenmessgerät wird ein handelsüblicher Lasertracker [3] eingesetzt und derart aufgestellt, dass er sich hinreichend genau in der Ebene der vom Koordinatenmessgerät oder der Werkzeugmaschine anzufahrenden Positionen befindet. Ausgehend von einer Startposition erfolgt dann eine automatische Verfolgung des Reflektors und eine automatische Messung der Abstände. Als Messstrahl wird dabei ein kollimiertes Laserstrahlenbündel verwendet, das über einen in zwei Achsen drehbaren Spiegel auf den Reflektor gerichtet wird.

[0018] Als Reflektoren eignen sich insbesondere Kugelschalenreflektoren oder 3-Flächen-Spiegel (**4**). Wenn der Reflektionswinkel nicht ausreicht, um in allen angefahrenen Messpositionen eine Längenmessung vornehmen zu können, kann der Reflektor in der Art dem Messstrahl nachgeführt werden, dass sein wirksamer Reflektionspunkt ortsfest zum Referenzpunkt des Koordinatenmessgerätes oder der Werkzeugmaschine bleibt.

[0019] Die Ausrichtung des Reflektionselements kann durch ein Signal des Koordinatenmessgerätes oder der Werkzeugmaschine erfolgen. Ein möglicher

Auslöseimpuls kann das akustische Signal des Steuerrechners des Koordinatenmessgerätes oder der Werkzeugmaschine sein.

[0020] In der Startposition wird der reflektierte Laserstrahl über den Spiegel in den Lasertracker zurückgeführt und dort sowohl von einem positionsempfindlichen Detektor gemessen als auch einem Interferometer zugeführt. Bei Bewegung des Reflektors aus der Startposition steuert der positionsempfindliche Detektor den Spiegel derart, dass der Laserstrahl dem bewegten Reflektor folgt, bis dieser die gewünschte Position innerhalb des Messvolumens des Koordinatenmessgerätes oder der Werkzeugmaschine erreicht hat. Mit dem Interferometer wird nach Stillstand der Maschine die Abstandsänderung bestimmt. Nacheinander werden auf diese Weise die Abstände zu allen angefahrenen Positionen gemessen.

[0021] Nach diesem ersten Durchlauf wird der Lasertracker neu positioniert. Vom Koordinatenmessgerät oder von der Werkzeugmaschine werden nochmals alle Soll-Positionen angefahren und der Lasertracker misst wiederum die Abstandsänderungen zu allen angefahrenen Positionen. Abschließend erfolgt ein dritter Durchlauf, wozu der Lasertracker erneut in der Ebene der anzufahrenden Soll-Positionen verschoben wird.

[0022] Aus den drei Durchläufen liegen jeweils gemessene Abstandsänderungen zwischen den angefahrenen Positionen vor. Aus den Abstandsänderungen lassen sich dann in der Verfahrensebene die zweidimensionalen Koordinaten der angefahrenen Soll-Positionen und die Positionen der Lasertracker iterativ durch wiederholten Bogenschnitt durch die Gleichungen

$$(X_i - x_1)^2 + (Y_i - y_1)^2 = (l_{i1} + m_1)^2$$

$$(X_i - x_2)^2 + (Y_i - y_2)^2 = (l_{i2} + m_2)^2$$

$$(X_i - x_3)^2 + (Y_i - y_3)^2 = (l_{i3} + m_3)^2$$

berechnen, wobei die x_j und y_j die Koordinaten der drei Lasertrackerstandpunkte bezeichnen, die l_{ij} die vom jeweiligen Standpunkt j zwischen den Soll-Positionen i interferometrisch gemessenen Abstandsänderungen, die m_j die unbekanntesten Abstände zwischen Lasertrackerstandpunkt und Startposition, die X_i sowie Y_i die Koordinaten der angefahrenen Soll-Positionen.

[0023] Sind mehr Abstandsänderungen gemessen worden als zur eindeutigen Bestimmung der Soll-Positionen notwendig sind, können die wahrscheinlichsten Koordinaten der angefahrenen Positionen mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate gefunden werden. Nachdem auf diese Weise die Koordinaten

der angefahrenen Positionen in einer Verfahrensebene gefunden wurden, wird das Verfahren für die anderen Verfahrensebenen wiederholt.

Vorteile

[0024] Gegenüber der im Stand der Technik unter a) beschriebenen Methode, die einzelnen Geometrieabweichungen durch unterschiedliche, spezialisierte Messgeräte zu ermitteln, bietet das erfindungsgemäße Verfahren folgende Vorteile: Es erfordert weniger Zeit, da Umbau und Justierarbeiten deutlich reduziert werden. Außerdem wird der Apparateaufwand verringert, da nur noch ein schwenkbares Längenmessgerät benötigt wird. Zusätzlich bietet das Verfahren die Möglichkeit, neben physikalischen Abweichungen der Führungen auch die nach einer numerischen Korrektur verbleibenden Messabweichungen eines Koordinatenmessgerätes oder einer Werkzeugmaschine zu ermitteln.

[0025] Gegenüber der im Stand der Technik unter b) beschriebenen Methode liegt der wesentliche Vorteil im Verzicht auf kalibrierte Prüfkörper. Insbesondere für große Koordinatenmessgeräte sind solche Prüfkörper kaum noch mit ausreichender Genauigkeit realisierbar. Zudem würden sie hohe Transportkosten erfordern und die Handhabung wäre sehr arbeitsintensiv.

[0026] Gegenüber dem direkten Einsatz von Lasertrackern [3], die durch eine Verbindung von Längenmessung und Raumwinkelmessung ein Kugelkoordinatensystem verkörpern, ergibt sich durch das Trilaterationsprinzip eine deutlich gesteigerte Genauigkeit. Bei dem direkten Einsatz von Lasertrackern ist die Messgenauigkeit senkrecht zur Längenmessachse relativ gering, da diese von der Genauigkeit der Raumwinkelmessung abhängt. Positionen quer zum Laserstrahl werden durch die Winkelgeber zwar mit einer gleichbleibenden Winkelauflösung α bestimmt, diese führt aber über die gemessene Länge l und die Beziehung $\sin(\alpha) \times l$ zu einer stark längenabhängigen Positionsmessgenauigkeit quer zum Messstrahl. Aufgrund der begrenzten Winkelauflösung α sind Lasertracker deshalb nicht ausreichend, um allein durch direkte Messung die geometrischen Abweichungen von hochgenauen Koordinatenmessgeräten und Werkzeugmaschinen zu bestimmen.

[0027] Gegenüber den bisher in der Literatur erwähnten Trilaterationsverfahren [4, 6] bietet die erfindungsgemäße Lösung den Vorteil, dass durch den sequentiellen Einsatz nur eines Lasertrackers an mehreren Positionen der gerätetechnische Aufwand auf ein Minimum reduziert wird. Durch die Messung mit einem optischen Längenmessgerät in einer Ebene wird der Einsatz eines automatisch nachgeführten Reflektors technisch deutlich vereinfacht, da er nur über eine Drehachse verfügen muss. Trotzdem kann

durch die Aufnahme der ebenen Abweichungen in drei senkrecht aufeinander stehenden Ebenen nach [2] das vollständige Abweichungsverhalten eines Koordinatenmessgerätes oder einer Werkzeugmaschine erfasst werden.

Legende zu den nachfolgenden Bildern

[0028] Bild 1: Verwendung eines in mindestens zwei Positionen aufgestellten schwenkbaren Längenmessgeräts zur Ermittlung von Geometrieabweichungen eines Koordinatenmessgerätes oder einer Werkzeugmaschine

[0029] Bild 2: Erzeugung eines Koordinatennetzes aus Längenmessungen in einer Ebene

[0030] Bild 3: Reflektor drehbar um eine Achse durch den scheinbaren Reflektionspunkt

[0031] Bild 4: Anbringung eines in einer Achse schwenkbaren Reflektors anstelle eines Tasters oder eines Werkzeuges

Literatur

- [1] Busch, K., Kunzmann, H., Wäldele, F., "Numerical errorcorrection of a coordinate measuring machine, proceedings of the international symposium on metrology for quality control in production", Tokyo 1984, S. 278–282
- [2] Traget, E., Wäldele, F., "A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools", Measurement Vol 9 No 1, Jan–Mar 1991, S. 17–21
- [3] Loser, R., "Laser-Tracking-System für 3D-Messungen bewegter Objekte", Technisches Messen Jahrgang 60, Nr. 5, 1993, S. 198–202
- [4] T. Takatsuji et al.: The first measurement of a three-dimensional coordinate by use of a laser tracking interferometer system based on trilateration, in: Meas. Sci. Technol. 9 (1998) 38–41
- [5] O. Nakamura et al.: A laser tracking robot performance calibration system using ball-seat bearing mechanisms and a spherically shaped cat's eye reflector, in: Rev. Sci. Instrum. 65 (4) 1994, S. 1006–1011
- [6] O. Nakamura, M. Goto: Four-beam laser interferometry for three-dimensional microscopic coordinate measurement, in: Applied Optics, 33 (1994) 1, S.31–36

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung von geometrischen Abweichungen von Koordinatenmessgeräten oder Werkzeugmaschinen durch den Einsatz eines schwenkbaren optischen Längenmessgerätes, bei dem
 - a) von dem Koordinatenmessgerät oder der Werk-

zeugmaschine in mindestens zwei Durchläufen eine gleiche Serie von Soll-Positionen angefahren wird, wobei in jeder Soll-Position der Abstand zu einem während des jeweiligen Durchlaufs ortsfesten, vom Standpunkt des Längenmessgeräts bestimmten Bezugspunkt ermittelt wird,

b) der Bezugspunkt nach jedem Durchlauf versetzt wird,

c) aus diesen gemessenen Abständen ein geometrisches Netz durch Trilateration aufgespannt wird,

d) dieses Netz zur Ermittlung der Messabweichungen des betrachteten Gerätes verwendet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass die Soll-Positionen und die Bezugspunkte ungefähr in einer Ebene liegen und die Messabweichungen ausschließlich in dieser Ebene ausgewertet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2 dadurch gekennzeichnet,

a) dass das schwenkbare optische Längenmessgerät über eine Winkelmesseinrichtung verfügt,

b) dass die gemessenen Winkel zur Projektion der gemessenen Längen in die Messebene verwendet werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 dadurch gekennzeichnet, dass die Längen interferometrisch gemessen werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass das schwenkbare Längenmessgerät automatisch dem bewegten Referenzelement folgt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 dadurch gekennzeichnet, dass das als Reflektor ausgeführte Referenzelement sich automatisiert in einer Achse hinreichend in Richtung des optischen Längenmessgeräts ausrichtet, so dass dieses in jeder angefahrenen Position eine Längenmessung vornehmen kann.

7. Verfahren nach Anspruch 6 dadurch gekennzeichnet, dass der scheinbare Reflektionspunkt des schwenkbaren Referenzelementes sich in der Drehachse oder dem Drehpunkt der Schwenkbewegung befindet und dadurch ortsfest zur Einspannung des Tasters oder des Werkzeuges bleibt.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7 dadurch gekennzeichnet, dass die Orientierung des Referenzelementes durch eine elektrische Positioniereinrichtung erfolgt, die durch ein Triggersignal des Steuerrechners der Werkzeugmaschine oder des Koordinatenmessgerätes gesteuert wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8 dadurch gekennzeichnet, dass dieses Triggersignal durch ein akusti-

sches Signal des Steuerrechners ausgelöst wird.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Bild 1

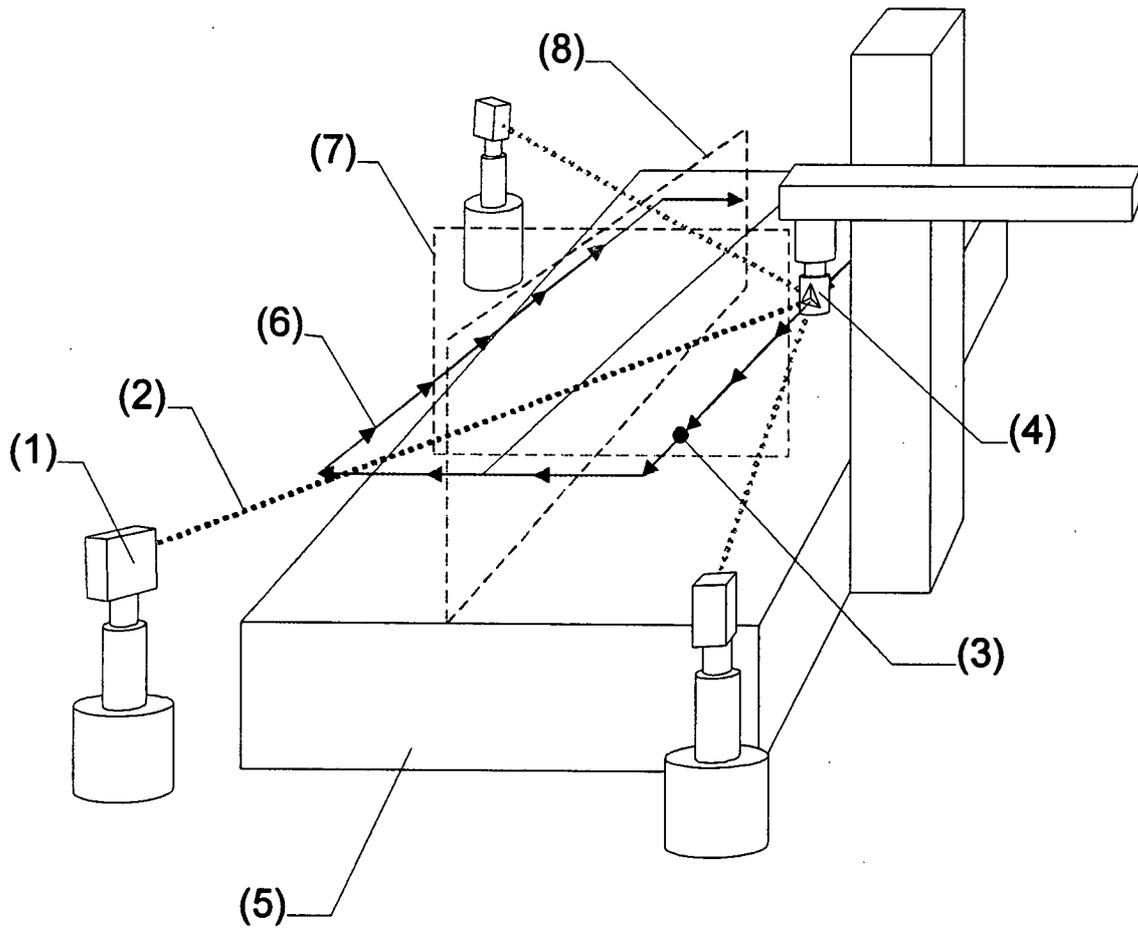


Bild 2

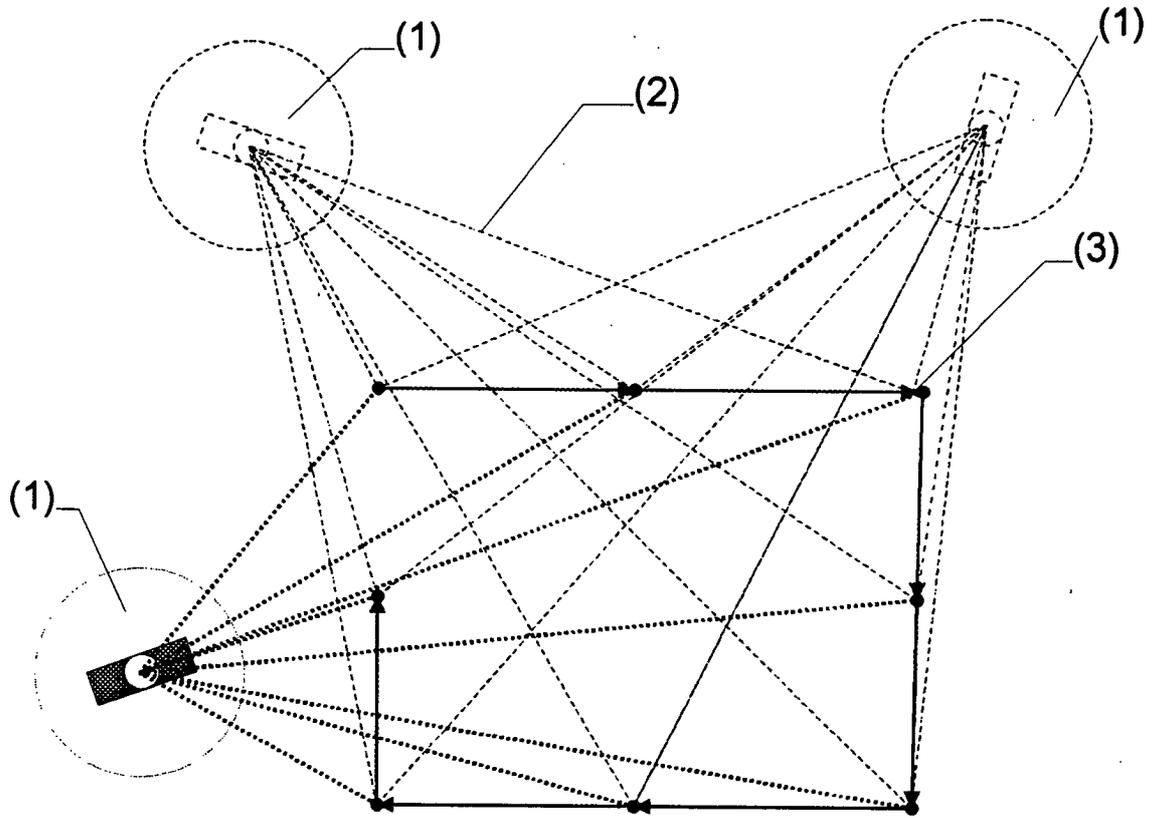


Bild 3

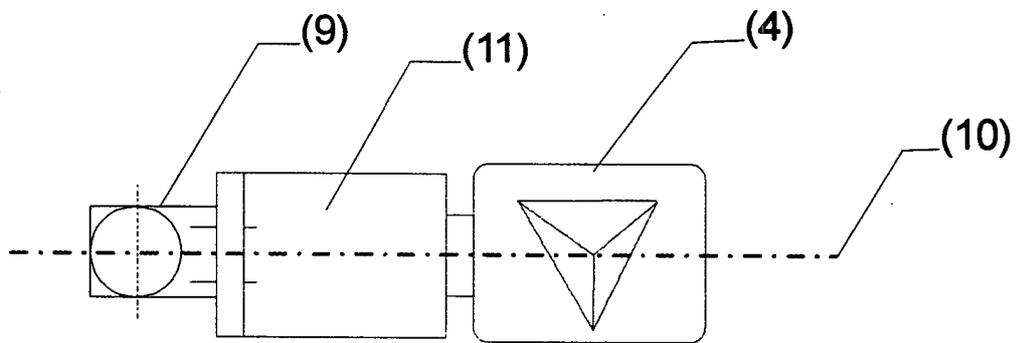


Bild 4

