



(10) **DE 10 2016 108 587 A1** 2016.11.24

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 108 587.1**

(22) Anmeldetag: **10.05.2016**

(43) Offenlegungstag: **24.11.2016**

(51) Int Cl.: **G01S 17/42 (2006.01)**

G01S 17/66 (2006.01)

G01B 11/03 (2006.01)

G01B 11/14 (2006.01)

G01B 11/24 (2006.01)

G01C 15/00 (2006.01)

G01C 3/08 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
14/716,971 **20.05.2015** **US**

(74) Vertreter:
OFFICE FREYLINGER S.A., Strassen, LU

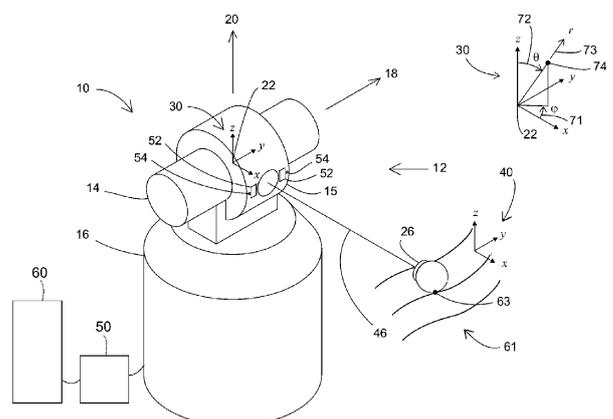
(71) Anmelder:
Faro Technologies, Inc., Lake Mary, Fla., US

(72) Erfinder:
Steffey, Kenneth, Longwood, Fla., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Automatische Messung von Dimensionsdaten in einer Akzeptanzregion durch einen Lasertracker**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein automatisches Verfahren zur Messung dreidimensionaler Koordinaten durch einen Lasertracker, das Folgendes umfasst: Ermitteln, ob ein Retroreflektor in einer Akzeptanzregion einer Prüfposition zugänglich ist und, falls nicht, Durchführen einer Korrekturmaßnahme.



Beschreibung**Hintergrund**

Querverweis auf verwandte Patentanmeldungen

[0001] Die vorliegende Anmeldung ist eine Teilfortführung der am 10. Dezember 2014 eingereichten Anmeldung Nr. 14/565,624, welche eine Teilanmeldung der am 6. März 2014 eingereichten US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 14/199,211, jetzt Patent Nr. 9,007,601, ist. Die Anmeldung Nr. 14/199,211 ist eine Teilanmeldung der am 10. April 2013 eingereichten US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 13/860,010, jetzt Patent Nr. 8,724,120, welche eine Teilanmeldung der am 13. März 2012 eingereichten US-Anmeldung Nr. 13/418,899, jetzt Patent Nr. 8,619,265, ist, welche eine nicht vorläufige Anmeldung der am 14. März 2011 eingereichten vorläufigen US-Patentanmeldung Nr. 61/452,314 ist, deren aller Gesamtinhalte hiermit durch Verweis einbezogen werden. Die US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 13/418,899 ist auch eine Teilfortführungsanmeldung der am 30. Dezember 2011 eingereichten US-Patentanmeldung Nr. 13/340,730, jetzt Patent Nr. 8,537,371, welche eine Teilfortführungsanmeldung der am 20. April 2011 eingereichten US-Patentanmeldung Nr. 13/090,889, jetzt Patent Nr. 8,422,034, ist, welche eine nicht vorläufige Anmeldung der am 21. April 2010 eingereichten vorläufigen US-Patentanmeldung Nr. 61/326,294 ist, deren aller Gesamtinhalte hiermit durch Verweis einbezogen werden. Die US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 13/418,899 ist ferner eine nicht vorläufige Anmeldung der am 15. April 2011 eingereichten vorläufigen US-Patentanmeldung Nr. 61/475,703 und der am 30. Januar 2012 eingereichten vorläufigen US-Patentanmeldung Nr. 61/592,049, deren beider Gesamtinhalte hiermit durch Verweis einbezogen werden. Die US-Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 13/418,899 ist auch eine Teilfortführungsanmeldung der am 29. Februar 2012 eingereichten US-Patentanmeldung Nr. 13/407,983, jetzt Patent Nr. 8,467,072, welche eine nicht vorläufige Anmeldung der am 3. März 2011 eingereichten vorläufigen US-Patentanmeldung Nr. 61/448,823 ist, deren beider Gesamtinhalte hiermit durch Verweis einbezogen werden.

Gebiet der Erfindung

[0002] Die vorliegende Offenbarung betrifft messtechnische Geräte wie beispielsweise einen Lasertracker und insbesondere einen Lasertracker, der automatisch jedes einer Vielzahl von auf einem Objekt angeordneten Retroreflektorzielen unter Verwendung einer oder mehrerer Lokalisierungskameras, die dem Lasertracker zugeordnet sind (z. B. als Teil davon), identifiziert.

[0003] Es gibt eine Klasse von Instrumenten, die als ein Lasertracker bekannt ist, der die Koordinaten eines Punkts durch Senden eines Laserstrahls zu einem Retroreflektorziel misst, das sich in Kontakt mit dem Punkt befindet. Das Instrument bestimmt die Koordinaten des Punkts, indem es den Abstand und die zwei Winkel zu dem Ziel misst. Der Abstand wird mit einem Distanzmessgerät wie beispielsweise einem Absolutdistanzmesser oder einem Interferometer gemessen. Die Winkel werden mit einem Winkelmessgerät wie beispielsweise einem Winkelkodierer gemessen. Ein kardanisch aufgehängter Strahlungsmechanismus in dem Instrument lenkt den Laserstrahl zu dem interessierenden Punkt.

[0004] Der Lasertracker ist ein besonderer Typ eines Koordinatenmessgeräts, der das Retroreflektorziel mit einem oder mehreren Laserstrahlen verfolgt, den bzw. die es emittiert. Es gibt eine andere Kategorie von Instrumenten, die als „Totalstationen“ oder „Tachymeter“ bekannt sind und einen Retroreflektor oder einen Punkt auf einer diffus streuenden Oberfläche messen können. Lasertracker, die normalerweise Genauigkeiten in der Größenordnung von 25 Mikrometern (ein Tausendstel Zoll) aufweisen und unter bestimmten Bedingungen bis auf 1 oder 2 Mikrometer genau sind, sind üblicherweise weitaus genauer als Totalstationen. In dieser gesamten Anmeldung wird die weitreichende Definition eines Lasertrackers verwendet, welche Totalstationen umfasst.

[0005] Gewöhnlich sendet der Lasertracker einen Laserstrahl zu einem Retroreflektorziel, das normalerweise auf der Oberfläche eines zu messenden Objekts angeordnet ist. Ein üblicher Typ eines Retroreflektorziels ist der sphärisch montierte Retroreflektor (SMR; spherically mounted retroreflector), der einen in eine Metallkugel eingebetteten Würfecken-Retroreflektor umfasst. Der Würfecken-Retroreflektor umfasst drei zueinander senkrecht stehende Spiegel. Der Scheitelpunkt, der der gemeinsame Schnittpunkt der drei Spiegel ist, befindet sich nahe dem Mittelpunkt der Kugel. Wegen dieser Anordnung der Würfecke in der Kugel bleibt der senkrechte Abstand vom Scheitelpunkt zu einer beliebigen Oberfläche des Objekts, auf welcher der SMR aufliegt, sogar fast konstant, während der SMR gedreht wird. Demzufolge kann der Lasertracker die 3D-Koordinaten einer Oberfläche messen, indem er der Position eines SMR folgt, während dieser über die Oberfläche bewegt wird. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Lasertracker lediglich drei Freiheitsgrade (einen Radialabstand und zwei Winkel) messen muss, um die 3D-Koordinaten einer Oberfläche vollständig zu charakterisieren.

[0006] Einige Lasertracker sind in der Lage, sechs Freiheitsgrade (DOF; degrees of freedom) zu mes-

sen, welche drei Translationen wie beispielsweise x, y und z sowie drei Drehungen wie beispielsweise Nick-, Roll- und Gierdrehung umfassen können. Ein beispielhaftes Lasertrackersystem mit sechs Freiheitsgraden wird in dem an Bridges et al. erteilten US-Patent Nr. 7,800,758 ('758) beschrieben, das durch Verweis hierin einbezogen wird. Das Patent '758 offenbart eine Sonde, die einen Würfecken-Retroreflektor hält, auf dem Markierungen angeordnet wurden. Ein Retroreflektor, auf dem solche Markierungen angeordnet wurden, wird als „6-DOF-Retroreflektor“ bezeichnet. Der Würfecken-Retroreflektor wird durch einen Laserstrahl des Lasertrackers beleuchtet und die Markierungen auf dem Würfecken-Retroreflektor werden von einer Kamera im Lasertracker aufgenommen. Die drei Orientierungsfreiheitsgrade wie beispielsweise die Nick-, Roll- und Gierwinkel werden auf der Grundlage des von der Kamera erhaltenen Bilds berechnet. Der Lasertracker misst einen Abstand und zwei Winkel zum Scheitelpunkt des Würfecken-Retroreflektors. Wenn der Abstand und die zwei Winkel, welche drei Translationsfreiheitsgrade des Scheitelpunkts ergeben, mit den von dem Kamerabild erhaltenen drei Orientierungsfreiheitsgraden kombiniert werden, kann man die Position einer Sondenspitze, die an einer vorgeschriebenen Position relativ zu dem Scheitelpunkt des Würfecken-Retroreflektors angeordnet ist, finden. Eine solche Sondenspitze kann beispielsweise dazu benutzt werden, die Koordinaten eines „verborgenen“ Merkmals zu messen, das sich außerhalb der Sichtlinie des Laserstrahls des Lasertrackers befindet.

[0007] Eine übliche Anwendung eines Lasertrackers ist die Messung eines relativ großen Objekts, um zu sehen, wie dessen Istmaße im Vergleich zu den Konstruktionsmaßen (beispielsweise durch CAD-Daten angegeben) beschaffen sind. Es können mehrere dieser Objekte in einer bestimmten Anwendung benutzt werden und man geht normalerweise davon aus, dass die Objekte geometrisch identisch sind. Eine etwaige Verdrehung der Geometrie des Objekts, die entweder am Anfang vorliegt oder sich im Laufe der Zeit entwickelt, kann andere Vorgänge in dem gesamten System beeinflussen, von dem das Objekt ein Teil ist. Wenn das Objekt zum Beispiel in irgendeiner Weise gebogen oder verdreht wird, kann dies zu Fertigungsfehlern und schlechter Produktqualität führen.

[0008] Es ist bekannt, dass normalerweise mindestens drei Punkte erforderlich sind, um die Beziehung zwischen dem Lasertracker und dem Objekt für Messzwecke einzurichten. Es ist in der Technik bekannt, dass die Fähigkeit des Bedieners, diese Anfangspunkte manuell mit ausreichender Genauigkeit zu messen, eine Abwägungssache ist.

[0009] Es besteht somit Bedarf daran, dass einem Bediener eines Lasertrackers oder eines ähnlichen Messgeräts die Möglichkeit gegeben wird, die Zielpunkte (z. B. SMRs) nicht manuell messen zu müssen. Es wäre statt dessen für den Bediener des Lasertrackers zu wünschen, dass er das Kamerasystem im Lasertracker zum automatischen Messen aller für eine bestimmte Anwendung notwendigen Zielpunkte benutzt, wodurch die Möglichkeit eines Bedienerfehlers im Messverfahren signifikant reduziert wird und keine speziellen Fachkenntnisse und/oder keine spezielle Einarbeitung erforderlich sind.

[0010] In allgemeinerem Sinne besteht Bedarf an einem Verfahren und einem System, bei dem der Lasertracker viele derjenigen Funktionen automatisch erledigt, die vorher manuell durchgeführt werden mussten. Es wäre wünschenswert, wenn man in kurzer Zeit sogar dann gleichbleibende Messungen mit dem Lasertracker erzielt, wenn ein unerfahrener Bediener die Messungen durchführt. Zu den typischen Messungen zählen Messungen mit Werkzeugprüfungen; beispielsweise ist der Schlitten in einer Fertigungsstraße für Rohkarosserien ein Beispiel für ein zu prüfendes oder zu beobachtendes Werkzeug. Zu den anderen Beispielen für Werkzeuge gehören eine Stanzvorrichtung für Bleche und ein Montagewerkzeug für die Montage eines Teils einer Flugzeugstruktur. Generell gibt es für nahezu jedes Teil, das bei einer Anwendung im Krafffahrzeug- oder Flugzeugbereich hergestellt wird, ein entsprechendes Werkzeug. Es wäre demnach erstrebenswert, das Verfahren zur Messung derartiger Werkzeuge mit einem Lasertracker zu verbessern. Es wäre ferner wünschenswert, das Messverfahren auch auf Fertigteile anzuwenden.

[0011] Wenn eine oder mehrere Kameras an einem Lasertracker verwendet werden, um Retroreflektorziele in einem automatischen Verfahren zu lokalisieren und zu steuern, wird ein SMR gelegentlich nicht an einer erwarteten Stelle gefunden. Die Unfähigkeit, einen Retroreflektor zu finden, kann Folgendes umfassen: einen nicht in einer vorgesehenen Aufnahme angeordneten SMR, einen in einem großen Winkel gedrehten SMR oder ein zwischen dem Tracker und dem Retroreflektor befindliches Hindernis. Bei einem Betriebsmodus kann ein Tracker den Retroreflektor fest anvisieren, der der vorgesehenen Zielposition am nächsten ist. In einigen Fällen kann dies dazu führen, dass der Tracker den falschen Retroreflektor misst und somit die falsche Stelle ermittelt. Obwohl bereits existierende Tracker für ihre beabsichtigten Zwecke geeignet sind, besteht demgemäß ein Verbesserungsbedarf insbesondere bei der Bereitstellung eines verbesserten Verfahrens, mit dem auf die Unfähigkeit des festen Anvisierens eines Retroreflektorziels an einer erwarteten Stelle reagiert wird.

Zusammenfassung

[0012] Gemäß einem Aspekt der Erfindung umfasst ein Verfahren zur Messung mit einem Lasertracker die folgenden Schritte: Bereitstellen des Lasertrackers, der eine Struktur, ein erstes Winkelmessgerät, ein zweites Winkelmessgerät, einen ersten Motor, einen zweiten Motor, eine erste Lichtquelle, eine zweite Lichtquelle, einen Absolutdistanzmesser, ein Trackingsystem, einen Positionsdetektor, eine erste Kamera, ein erstes Linsensystem, eine erste photosensitive Anordnung, einen Prozessor und einen Speicher aufweist, wobei die Struktur durch den ersten Motor um eine erste Achse und durch den zweiten Motor um eine zweite Achse drehbar ist, wobei die erste Lichtquelle einen ersten Lichtstrahl erzeugt, der mit dem Absolutdistanzmesser zusammenwirkt, um einen Abstand basierend zumindest teilweise auf einer Geschwindigkeit des ersten Lichtstrahls zu messen, wobei das erste Winkelmessgerät einen ersten Drehwinkel um die erste Achse misst, wobei das zweite Winkelmessgerät einen zweiten Drehwinkel um die zweite Achse misst, wobei die erste Kamera das erste Linsensystem und die erste photosensitive Anordnung umfasst, wobei die zweite Lichtquelle einen zweiten Lichtstrahl erzeugt, der mit der ersten Kamera zusammenwirkt, wobei die erste Kamera in Bezug auf die Struktur feststehend ist, wobei der Speicher mit dem Prozessor wirkgekoppelt ist und wobei der Prozessor dafür konfiguriert ist, den Lasertracker zu bedienen; Bereitstellen eines Prüfplans mit einer Vielzahl von Prüfpositionen; Bereitstellen einer Vielzahl von Akzeptanzregionen, wobei jede Akzeptanzregion einer Prüfposition entspricht; Drehenlassen des ersten Motors und des zweiten Motors, um die erste Kamera derart auszurichten, dass sie eine der Vielzahl von Akzeptanzregionen sieht; Emittieren des zweiten Lichtstrahls; Aufnehmen eines ersten Bilds der durch den zweiten Lichtstrahl beleuchteten Akzeptanzregion mit der ersten Kamera; Ermitteln, ob ein erster Retroreflektor in der Akzeptanzregion vorhanden ist, durch den Prozessor basierend zumindest teilweise auf dem ersten Bild; wenn der erste Retroreflektor nicht in der Akzeptanzregion vorhanden ist, fortfahren durch: Anhalten, um weitere Anweisungen zu erwarten; wenn der erste Retroreflektor in der Akzeptanzregion vorhanden ist, fortfahren durch: Ermitteln einer Position des ersten Retroreflektors basierend zumindest teilweise auf dem ersten Bild; Messen des ersten Drehwinkels und des zweiten Drehwinkels als erstes Paar gemessener Winkel; Ermitteln eines zweiten Paares geschätzter Winkel durch den Prozessor basierend zumindest teilweise auf dem ersten Paar gemessener Winkel, dem ersten Bild und dem ersten Sichtfeld; Drehen der Struktur durch den ersten Motor und den zweiten Motor, um zu bewirken, dass der erste Drehwinkel und der zweite Drehwinkel dem ermittelten zweiten Paar geschätzter Winkel entsprechen; Emittieren des ersten Lichtstrahls; Auffangen

eines Teils des vom ersten Retroreflektor reflektierten ersten Lichtstrahls durch den Positionsdetektor; Verfolgen des ersten Retroreflektors unter Verwendung des Trackingsystems; Messen eines ersten Abstands zum ersten Retroreflektor mit dem Absolutdistanzmesser; Messen des ersten Drehwinkels und des zweiten Drehwinkels als drittes Paar gemessener Winkel; Ermitteln eines ersten Satzes dreidimensionaler Koordinaten des Mittelpunkts des ersten Retroreflektors durch den Prozessor basierend zumindest teilweise auf dem ersten Abstand und dem dritten Paar gemessener Winkel; und Speichern des ersten Satzes dreidimensionaler Koordinaten im Speicher.

[0013] Diese und andere Vorteile und Merkmale gehen aus der folgenden Beschreibung in Verbindung mit den Zeichnungen deutlicher hervor.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0014] Nun Bezug nehmend auf die Zeichnungen, sind dort beispielhafte Ausgestaltungen dargestellt, welche nicht als den gesamten Schutzbereich der Offenbarung einschränkend aufzufassen sind und wobei die Elemente in mehreren Figuren gleich nummeriert sind. Es zeigen:

[0015] Fig. 1: eine perspektivische Darstellung eines Lasertrackers, eines Zusatzgeräts und eines externen Computers gemäß einer Ausgestaltung;

[0016] Fig. 2: eine perspektivische Darstellung des Lasertrackers von Fig. 1 mit einer zusätzlichen Schmalsichtfeldkamera und einer zugeordneten Lichtquelle gemäß einer Ausgestaltung;

[0017] Fig. 3: eine zweidimensionale Darstellung eines dreidimensionalen Vektordiagramms;

[0018] Fig. 4A: eine Frontansicht einer Weitfeld-Lokalisierungskamera, die auf einem starren Strukturabschnitt des Lasertrackers von Fig. 1 angeordnet ist, wo die starre Struktur gedreht wird, um der Lokalisierungskamera die gleichzeitige Sicht auf mehrere Retroreflektorziele zu ermöglichen;

[0019] Fig. 4B: eine Querschnittsansicht der Lokalisierungskamera von Fig. 4A entlang der Linie 410-410 von Fig. 4A;

[0020] Fig. 5A: eine perspektivische Darstellung des Lasertrackers von Fig. 1 in einer ersten Orientierung in Bezug auf ein zu messendes Objekt, wobei der Lasertracker automatisch Messungen verschiedener Zielpunkte auf dem Objekt durchführt;

[0021] Fig. 5B: eine perspektivische Darstellung des Lasertrackers von Fig. 1 in einer zweiten Orientierung in Bezug auf ein zu messendes Objekt, wobei der

Lasertracker automatisch Messungen verschiedener Zielpunkte auf dem Objekt durchführt;

[0022] Fig. 6: elektronische Prozessorelemente in einem Lasertracker gemäß einer Ausgestaltung;

[0023] Fig. 7: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0024] Fig. 8: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0025] Fig. 9: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0026] Fig. 10: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0027] Fig. 11: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0028] Fig. 12: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0029] Fig. 13: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0030] Fig. 14: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0031] Fig. 15: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem System gemäß einer Ausgestaltung zeigt;

[0032] Fig. 16A: einen Lasertracker bei der Durchführung einer automatischen Prüfung mehrerer Ziele gemäß einer Ausgestaltung;

[0033] Fig. 16B: einen Fall, bei dem ein Retroreflektor aus einer Akzeptanzzone gemäß einer Ausgestaltung entfernt wurde;

[0034] Fig. 16C: einen Fall, bei dem ein Retroreflektor gedreht wird, um das Reflektieren von Licht zu verhindern;

[0035] Fig. 16D: einen Fall, bei dem ein Hindernis einen Lichtstrahl eines Lasertrackers zu einem Ziel gemäß einer Ausgestaltung blockiert; und

[0036] Fig. 17: ein Ablaufdiagramm, das die Schritte beim Messen mit einem Lasertracker gemäß einer Ausgestaltung zeigt.

Detaillierte Beschreibung

[0037] In Fig. 1 ist ein beispielhafter Lasertracker **10** dargestellt. Ein beispielhafter kardanisch aufgehängter Strahlenkungsmechanismus **12** des Lasertrackers **10** umfasst einen Zenitschlitten **14**, der auf einem Azimutsockel **16** angebracht ist und um eine Azimutachse **20** gedreht wird. Eine Nutzlast **15** ist auf dem Zenitschlitten **14** angebracht und wird um eine Zenitachse **18** gedreht. Die mechanische Zenitdrehachse (nicht dargestellt) und die mechanische Azimutdrehachse (nicht dargestellt) schneiden sich orthogonal innerhalb des Trackers **10** an einem Kardanpunkt **22**, der normalerweise der Ursprung für Abstandsmessungen ist. Ein Laserstrahl **46** verläuft nahezu durch den Kardanpunkt **22** und wird orthogonal zu der Zenitachse **18** gerichtet. Dies bedeutet, dass sich der Laserstrahl **46** in einer Ebene befindet, die senkrecht zu der Zenitachse **18** ist. Der Laserstrahl **46** wird durch Motoren im Tracker (nicht dargestellt), die die Nutzlast **15** um die Zenitachse **18** und um die Azimutachse **20** drehen, in die gewünschte Richtung gerichtet. Zenit- und Azimutwinkelkoderer innen im Tracker (nicht dargestellt) sind an der mechanischen Zenitachse (nicht dargestellt) und der mechanischen Azimutachse (nicht dargestellt) befestigt und geben mit relativ hoher Genauigkeit die Drehwinkel an. Der Laserstrahl **46** verläuft zu einem externen Retroreflektor **26** wie beispielsweise dem oben beschriebenen sphärisch montierten Retroreflektor (SMR). Durch Messen des Radialabstands zwischen dem Kardanpunkt **22** und dem Retroreflektor **26** sowie der Drehwinkel um die Zenit- und Azimutachse **18**, **20** wird die Position des Retroreflektors **26** im Kugelkoordinatensystem des Trackers gefunden.

[0038] Der Lasertracker 10 ist ein Gerät, das ein Gerätbezugssystem **30** aufweist. Das Gerätbezugssystem kann den Kardanpunkt **22** als seinen Ursprung haben. Das Bezugssystem kann in Bezug auf den Azimutsockel **16** festgelegt sein, der normalerweise bezogen auf die Umgebung ortsfest ist. Das Gerätbezugssystem kann durch eine Vielfalt an Koordinatensystemen dargestellt werden. Ein Typ eines Koordinatensystems ist ein kartesisches Koordinatensystem mit drei zueinander senkrechten Achsen x , y und z . Ein anderer Typ eines Koordinatensystems ist ein Kugelkoordinatensystem. Ein Punkt **74** in einer Kugelcoordinate **30** kann durch einen Radialabstand **73** (r), einen ersten Winkel (Zenitwinkel) **72** (θ) und einen zweiten Winkel (Azimutwinkel) **71** (φ) in einem Kugelkoordinatensystem dargestellt werden. Der Winkel θ wird erhalten, indem man die Projektion des Punkts **74** auf die z -Achse verwendet. Der Winkel φ wird erhalten, indem man die Projektion des Punkts **74** auf die x - y -Ebene verwendet. Der Lasertracker **10** führt

von sich aus Messungen in einem Kugelkoordinatensystem durch, wobei ein in Kugelkoordinaten gemessener Punkt aber ohne Weiteres in kartesische Koordinaten umgewandelt werden kann.

[0039] Das Ziel **26** kann ein Prüfobjekt **61** berühren. Das Prüfobjekt **61** hat ein Objektbezugssystem **40**. Das Objektbezugssystem kann beispielsweise mit den kartesischen Koordinaten x , y und z dargestellt werden. Die x -, y - und z -Achse des Objektbezugssystems **40** bewegen sich mit dem Objekt **61** und sind nicht unbedingt parallel zu den entsprechenden Gerätachsen x , y und z des Gerätbezugssystems **30**. Man kann das Ziel **26** in Kontakt mit der Objektfläche **61** an einem Punkt **63** positionieren. Zum Auffinden der dreidimensionalen (3D) Koordinaten des Punkts **63** ermittelt der Tracker zuerst den Mittelpunkt des Ziels **26**, wobei er den Abstand und die zwei Winkel benutzt, die er gemessen hat. Er kann auch benutzt werden, um eine Vektorverschiebung des Retroreflektor-Bezugspunkts (z. B. der Scheitelpunkt der Würfecke) bezogen auf den Mittelpunkt der Kugelkontaktfläche des Ziels **26** anzugeben. Zur Bewegung vom Mittelpunkt des Ziels zur Oberfläche des Werkstücks wird die Position des Mittelpunkts um einen Betrag verschoben, der dem Radius der Kugelzieloberfläche gleicht. Die Richtung der Verschiebung wird bei einer Ausgestaltung ermittelt, indem mehrere Punkte nahe dem Kontaktpunkt **63** gemessen werden, um die Flächennormale an dem Punkt **63** zu ermitteln.

[0040] Der Laserstrahl **46** kann eine oder mehrere Laserwellenlängen umfassen. Der Klarheit und Einfachheit halber wird in der folgenden Besprechung ein Lenkungsmechanismus des in **Fig. 1** dargestellten Typs angenommen. Es sind jedoch andere Typen von Lenkungsmechanismen möglich. Es wäre beispielsweise möglich, einen Laserstrahl von einem Spiegel reflektieren zu lassen, der um die Azimut- und Zenitachse gedreht wird. Als anderes Beispiel könnte man den Lichtstrahl mittels zweier Lenkspiegel lenken, die durch Stellantriebe wie beispielsweise Galvanometermotoren angetrieben werden. In diesem letzteren Fall könnte der Lichtstrahl ohne die Bereitstellung von mechanischen Azimut- und Zenitachsen gelenkt werden. Die hierin beschriebenen Methoden sind anwendbar, und zwar ungeachtet der Art des Lenkungsmechanismus.

[0041] In dem beispielhaften Lasertracker **10** sind Kameras **52** und Lichtquellen **54** auf der Nutzlast **15** angeordnet. Die Lichtquellen **54** beleuchten ein oder mehrere Retroreflektorziele **26**. Bei einer Ausgestaltung sind die Lichtquellen **54** LEDs, die elektrisch derart gesteuert werden, dass sie wiederholt gepulstes Licht emittieren. Jede Kamera **52** umfasst eine photosensitive Anordnung und eine vor der photosensitiven Anordnung angeordnete Linse. Die photosensitive Anordnung kann beispielsweise eine CMOS- oder

CCD-Anordnung sein. Die Linse hat bei einer Ausgestaltung ein relativ weites Sichtfeld von beispielsweise 30 oder 40 Grad. Der Zweck der Linse besteht darin, auf der photosensitiven Anordnung ein Bild von Objekten abzubilden, die sich im Sichtfeld der Linse befinden. Normalerweise ist mindestens eine Lichtquelle **54** nahe der Kamera **52** derart angeordnet, dass Licht von der Lichtquelle **54** von jedem Retroreflektorziel **26** auf die Kamera **52** reflektiert wird (zur Beleuchtung eines Retroreflektorziels in einer Art, die auf der Kamera **52** erkannt werden kann, muss sich die Lichtquelle **54** nahe der Kamera befinden; andernfalls wird das reflektierte Licht in einem zu großen Winkel reflektiert und trifft nicht auf die Kamera). Auf diese Weise werden Retroreflektorbilder auf der photosensitiven Anordnung problemlos von dem Hintergrund unterschieden, da ihre Bildpunkte heller als Hintergrundobjekte und gepulst sind. Bei einer Ausgestaltung gibt es zwei Kameras **52** und zwei Lichtquellen **54**, die rings um die Linie des Laserstrahls **46** herum angeordnet sind. Durch den derartigen Einsatz von zwei Kameras kann man das Prinzip der Triangulation anwenden, um die dreidimensionalen Koordinaten eines beliebigen SMR innerhalb des Sichtfelds der Kamera zu finden. Ferner können die dreidimensionalen Koordinaten eines SMR überwacht werden, während der SMR von Punkt zu Punkt bewegt wird. Die Verwendung von zwei Kameras für diesen Zweck wird in der an Bridges et al. erteilten veröffentlichten US-Patentanmeldung Nr. 2010/0128259 beschrieben, deren Inhalte durch Verweis herein einbezogen werden.

[0042] Das Zusatzgerät **50** kann ein Teil des Lasertrackers **10** sein. Der Zweck des Zusatzgeräts **50** besteht darin, elektrische Energie zum Körper des Lasertrackers zu führen, und in manchen Fällen auch darin, dem System Kapazitäten für die Berechnung und Taktung zur Verfügung zu stellen. Man kann das Zusatzgerät **50** ganz wegfallen lassen, indem man dessen Funktionalität in den Körper des Trackers integriert. In den meisten Fällen ist das Zusatzgerät **50** an einen Universalcomputer **60** angeschlossen. Die Anwendungssoftware, die auf dem Universalcomputer **60** geladen ist, kann Anwendungskapazitäten wie beispielsweise Reverse Engineering bereitstellen. Man kann den Universalcomputer **60** auch wegfallen lassen, indem man dessen Rechenkapazität direkt in den Lasertracker **10** einbaut. In diesem Fall kann eine Benutzerschnittstelle, die eventuell eine Tastatur- und Mausfunktionalität bereitstellt, in den Lasertracker **10** eingebaut werden. Die Verbindung zwischen dem Zusatzgerät **50** und dem Computer **60** kann drahtlos oder durch ein Kabel aus elektrischen Drähten vorhanden sein. Der Computer **60** kann an ein Netzwerk angeschlossen sein und das Zusatzgerät **50** kann auch an ein Netzwerk angeschlossen sein. Mehrere Instrumente, beispielsweise mehrere Messinstrumente oder Aktoren, können entweder über den Computer **60** oder das Zusatzgerät

50 miteinander verbunden werden. Bei einer Ausgestaltung wird das Zusatzgerät weggelassen und erfolgen die Anschlüsse direkt zwischen dem Lasertracker **10** und dem Computer **60**.

[0043] Bei alternativen Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung kann der Lasertracker **10** eine Weitsichtfeldkamera (wide FOV camera; wide field of view camera) und eine Schmalsichtfeldkamera (narrow FOV camera; narrow field of view camera) **52**, die zusammen auf ihm angebracht sind, benutzen. Nachfolgend werden verschiedene beispielhafte Verfahren zur gemeinsamen Verwendung solcher Kameras beschrieben.

[0044] Bei einer ersten Ausgestaltung ist eine der Kameras **52** in **Fig. 1** eine Schmalsichtfeldkamera und die andere Kamera **52** eine Weitsichtfeldkamera. Bei dieser Anordnung identifiziert die Weitsichtfeldkamera **52** die retroreflektierenden Ziele **26** über eine relativ breitere Winkelerstreckung. Der Lasertracker **10** dreht den Lichtstrahl **46** in die Richtung eines bestimmten ausgewählten Retroreflektorziels **26**, bis das Retroreflektorziel **26** sich innerhalb des Sichtfelds der Schmalsichtfeldkamera **52** befindet. Der Lasertracker **10** kann anschließend ein nachfolgend beschriebenes Verfahren durchführen, um die Position eines Retroreflektorziels unter Verwendung der Bilder auf den zwei Kameras **52**, die auf dem Lasertracker **10** angebracht sind, zu finden. Dies wird durchgeführt, um den besten Schätzwert für die Position des Retroreflektorziels **26** zu finden.

[0045] Bei einer anderen Ausgestaltung, die in **Fig. 2** veranschaulicht ist, sind beide Kameras **52** Weitsichtfeldkameras. Zusätzlich dazu gibt es eine Schmalsichtfeldkamera **58** und eine nahe gelegene Lichtquelle **56**. Die zwei Weitsichtfeldkameras **52** ermitteln die dreidimensionale Position des Retroreflektors **26** und drehen den Trackerlichtstrahl **46** in Richtung des Ziels **26**. Wenn die Schmalsichtfeldkamera **58** ebenfalls das Retroreflektorziel **26** sieht, wird die durch alle drei Kameras **52**, **58** bereitgestellte Information zur Berechnung der dreidimensionalen Position des Retroreflektorziels **26** verwendet.

[0046] Die zwei Weitsichtfeldkameras **52** in **Fig. 1** werden bei noch einer anderen Ausgestaltung zur Lokalisierung des Ziels verwendet und drehen den Laserstrahl dorthin. Eine Orientierungskamera, die der Orientierungskamera **210** ähnlich ist, die in **Fig. 2** und **Fig. 7** des vorher angegebenen und an Bridges et al. erteilten US-Patents Nr. 7,800,758 ('758) dargestellt ist, das durch Verweis hierin einbezogen wird, sieht eine kleine Region rings um das beleuchtete Retroreflektorziel **26**. Dadurch, dass der Lasertracker **10** die Position des Retroreflektors **26** in der photosensitiven Anordnung der Orientierungskamera **210** beobachtet, kann er den Laserstrahl **46** sofort auf den Mittelpunkt des Retroreflektors **26** richten.

[0047] Es wird nun das Verfahren zum Auffinden der Position eines Retroreflektorziels unter Verwendung von Bildern auf den zwei Kameras **52**, die auf der Vorderseite des Lasertrackers **10** von **Fig. 1** und **Fig. 2** angebracht sind, beschrieben.

[0048] Dem Lasertracker **10** sind fünf Bezugssysteme zugeordnet: ein Nutzlastbezugssystem, das sich mit der Nutzlast **15** dreht; ein Azimutbezugssystem, das sich mit dem Zenitschlitten **14** dreht; ein Weltbezugssystem des Trackers, das in Bezug auf den Azimutsockel **16** ortsfest ist; und zwei Kamerabezugssysteme. Der Azimutsockel **16** ist ortsfest in Bezug auf seine Umgebung. Die Kameras **52** umfassen ein Linsensystem (nicht dargestellt) und eine photosensitive Anordnung (nicht dargestellt). In **Fig. 4A–B** sind repräsentative Darstellungen einer Kamera dargestellt, die ein Linsensystem und eine photosensitive Anordnung umfasst.

[0049] Das Nutzlastbezugssystem hat bei einer Ausgestaltung einen Ursprung am Kardanpunkt **22**, der sich an einem Punkt entlang der Azimutachse befindet; eine y-Achse, die parallel zu der Zenitrichtung ist; eine x-Achse, die senkrecht zu der y-Achse und ungefähr parallel zu dem Laserstrahl ist; und eine z-Achse, die senkrecht zu der x- und y-Achse ist. Die Kameras **52** sind in Bezug auf das Nutzlastbezugssystem ortsfest.

[0050] Das Azimutbezugssystem hat bei einer Ausgestaltung einen Ursprung am Kardanpunkt **22**; eine z-Achse entlang der Azimutrichtung; eine y-Achse, die parallel zu der Zenitachse und senkrecht zu der z-Achse ist; und eine x-Achse, die senkrecht zu der y- und z-Achse ist.

[0051] Das Weltbezugssystem des Trackers hat bei einer Ausgestaltung einen Ursprung am Kardanpunkt **22**; eine z-Achse entlang der Azimutachse; eine y-Achse, die senkrecht zu der z-Achse und parallel zu der Zenitachse ist, wenn der Winkel der Azimutachse auf 0 Grad eingestellt ist; und eine x-Achse, die senkrecht zu der y- und z-Achse ist.

[0052] Ein Kamerabezugssystem hat bei einer Ausgestaltung eine x-Achse, die die optische Achse des Linsensystems in der Kamera ist. Die y-Achse und die z-Achse sind senkrecht zu der x-Achse und zueinander und sind auf die Reihen bzw. Spalten der Pixel der photosensitiven Anordnung in der Kamera **52** ausgerichtet.

[0053] In dem Lasertracker **10** werden ein Zenitwinkel und ein Azimutwinkel, welche Drehwinkel um die Zenit- bzw. Azimutachse sind, von dem Zenitkodierer bzw. dem Azimutkodierer gemessen. Kennt man den Zenit- und Azimutwinkel sowie die Gleichungen der optischen Achsen der Kamera im Nutzlastbezugssystem, kann ein beliebiges der fünf Bezugs-

systeme – Nutzlastbezugssystem, Azimutbezugssystem, Weltbezugssystem des Trackers und die zwei Kamerabezugssysteme – in ein beliebiges der anderen Bezugssysteme transformiert werden. Dies wird normalerweise mit einer Transformationsmatrix durchgeführt, die eine 4×4-Matrix einschließlich einer 3×3-Rotationsmatrix und einer die Translation ermöglichenden Skalierungskomponente umfasst. Die Verwendung von Transformationsmatrizen sind dem durchschnittlichen Fachmann weithin bekannt.

[0054] Die Kamera **52** und die Leuchten **54** dienen dazu, die Position eines oder mehrerer Retroreflektorziele **26** im Nutzlastbezugssystem oder irgendeinem anderen Bezugssystem zu finden. Derartige Ziele können erforderlichenfalls automatisch von dem Lasertracker **10** erfasst werden.

[0055] Es wird nun das Verfahren zum Auffinden eines Retroreflektorzies im Nutzlastbezugssystem beschrieben. Ein erster Schritt in dem Verfahren besteht darin, die Leuchten **54** derart einzuschalten, dass sie die Retroreflektoren **26** beleuchten, und ein Bild auf den Kameras **52** abzubilden. In einigen Fällen kann die Beleuchtung kurz abgeschaltet werden und die Differenz zwischen der beleuchteten und der unbeleuchteten Szene verwendet werden. Auf diese Weise können Hintergrundmerkmale entfernt werden, was dazu führt, dass das Retroreflektorziel deutlicher dargestellt wird. Ein zweiter Schritt ist die Verwendung eines Prozessors (z. B. des Prozessors **50**) zur Berechnung eines Mittelpunkts für jeden Retroreflektor-Lichtpunkt auf der photosensitiven Anordnung der Kamera **52**. Der Mittelpunkt kann beispielsweise als Flächenschwerpunkt berechnet werden. Ein dritter Schritt besteht darin, eine Richtung im Kamerabezugssystem für jeden der Mittelpunkte einzurichten. Mit der einfachsten Annäherung wird die Richtung gefunden, indem eine Linie zwischen dem Mittelpunkt und dem perspektivischen Zentrum der Kamera **52** gezogen wird. Eine ausgereifere Analyse kann Abbildungsfehler des Linsensystems bei der Ermittlung der Richtung berücksichtigen. Ein vierter Schritt besteht darin, die Koordinaten des perspektivischen Zentrums und die Richtung für jeden Mittelpunkt in das Nutzlastbezugssystem umzuwandeln. Ein fünfter Schritt besteht darin, einen besten Schätzwert für die Position des Retroreflektorzies **26** im Nutzlastbezugssystem zu finden, indem simultane Gleichungen gelöst werden, wie nachfolgend erläutert wird.

[0056] Für jedes Retroreflektorziel **26** wird auf den photosensitiven Anordnungen jeder der zwei Kameras **52** ein Mittelpunkt gebildet und aus diesen Mittelpunkten wird eine Linie konstruiert, die die Richtung von jeder der Kameras zu dem Retroreflektorziel **26** angibt. Die beiden Linien schneiden sich im Idealfall in einem Punkt, doch im Allgemeinen sind die zwei Linien schiefe Linien, die sich nicht genau schneiden. Der beste Schätzwert für die Schnittpunktlage von

zwei schiefen Linien wird dadurch gefunden, dass ein Liniensegment der größten Annäherung ermittelt wird. Das Liniensegment der größten Annäherung ist senkrecht zu jeder dieser zwei schiefen Linien und kürzer als irgendein anderes Liniensegment, das senkrecht zu den beiden schiefen Linien ist. Normalerweise ist der beste Schätzwert für die Position des Retroreflektorzies **26** der Mittelpunkt des Liniensegments der größten Annäherung.

[0057] Fig. 3 zeigt eine zweidimensionale Darstellung eines dreidimensionalen Vektordiagramms. Man kann eine solche Darstellung beispielsweise in einer Draufsicht erhalten, bei der der Tracker und das Retroreflektorziel von oben aus nach unten blickend gesehen werden. Der Punkt O ist der Ursprung des Nutzlastbezugssystems. Die Vektoren P und R erstrecken sich vom Ursprung des Lasertrackers zu einer ersten Kamera bzw. einer zweiten Kamera. Der Vektor U verkörpert die Linie, die durch das perspektivische Zentrum der ersten Kamera verläuft und eine Richtung aufweist, die gemäß dem dritten Schritt im obigen Verfahren berechnet wird. Der Vektor V verkörpert die Linie, die durch das perspektivische Zentrum der zweiten Kamera verläuft und eine Richtung aufweist, die gemäß dem dritten Schritt im obigen Verfahren berechnet wird. Der Vektor C verkörpert das Liniensegment, das sich von einem ersten Punkt auf dem Vektor U zu einem zweiten Punkt auf dem Vektor V erstreckt. Der Vektor C ist senkrecht zu den Vektoren U und V.

[0058] Eine Methode zum Auffinden der Endpunkte des Vektors C ist die Verwendung der folgenden Gleichung:

$$P + uU + cC = R + vV, \quad (1)$$

welche die skalaren Größen u, c und v sowie die Vektorgößen P, U, C, R und V enthält.

[0059] Ferner ist der Vektor C von folgender Nebenbedingung abhängig:

$$C = U \times V, \quad (2)$$

wobei \times der Kreuzproduktoperator ist. Die Vektorgleichung (1) kann als eine erste Gleichung in x, eine zweite Gleichung in y und eine dritte Gleichung in z geschrieben werden. Der Vektor C kann in den Ausdrücken der x-, y- und z-Komponenten von U und V geschrieben werden, wobei weithin bekannte Kreuzproduktformeln verwendet werden. Die x- y- und z-Komponenten von C werden in die erste, zweite und dritte Gleichung eingesetzt. Das Ergebnis sind drei Gleichungen in x, y und z, wobei alle Vektorgößen bekannt sind und nur die drei skalaren Größen u, v und c noch gefunden werden müssen. Da drei Gleichungen und drei Unbekannten vorhanden sind, kann man drei Werte finden.

[0060] Die dreidimensionalen Endpunktkoordinaten Q_1 und Q_2 des Liniensegments, welche die Vektoren U und V entlang der Linie der größten Annäherung verbinden, sind gegeben durch:

$$Q_1 = P + uU, \quad (3)$$

$$Q_2 = R + vV. \quad (4)$$

[0061] Der beste Schätzwert Q für die Schnittpunkte der zwei Linien ist gegeben durch:

$$Q = (Q_1 + Q_2)/2. \quad (5)$$

[0062] Gegebenenfalls können andere mathematische Verfahren verwendet werden, um einen besten Schätzwert Q für die Schnittpunkte zu finden. Beispielsweise kann man eine Optimierungsmethode benutzen, um die Werte von Q_1 und Q_2 zu finden.

[0063] Die obigen Verfahren wurden in Bezug auf einen Lasertracker **10** beschrieben, der einen Lichtstrahl **46** aufweist, der von einer sich um eine Zenitachse **18** drehenden Nutzlast **15** ausgeht. Es sind jedoch andere Arten von mechanischen Lenkungsmechanismen möglich. Die Nutzlast **15** kann beispielsweise durch einen Lenkspiegel ersetzt werden. Bei diesem Ansatz wird ein Lichtstrahl vom Azimutsockel **16** aus nach oben gerichtet. Der Lichtstrahl trifft auf den Lenkspiegel auf und wird aus der Trackerumschließung herausreflektiert. Ein an der mechanischen Zenitachse befestigter Motor dreht den Lenkspiegel derart, dass der Strahl in die gewünschte Richtung zeigt. Bei dieser Ausgestaltung ist das Nutzlastbezugssystem durch das Spiegelbezugssystem ersetzt, doch die Analyse bleibt sonst die gleiche.

[0064] Es wäre ebenfalls möglich, eine oder mehrere Kameras zu verwenden, die nicht an der Nutzlast des Lasertrackers befestigt sind. Solche Kameras könnten am Azimutschlitten **14** befestigt werden oder sie könnten völlig getrennt vom Lasertracker angebracht werden. Das Verfahren zum Auffinden der Beziehung zwischen den Bezugssystemen der Kameras und des Lasertrackers würde in einer Weise ermittelt, die der oben beschriebenen ähnlich ist: eine Anzahl von Punkten würde von den Kameras und dem Lasertracker gemessen und die Messergebnisse würden dazu benutzt, entsprechende Transformationsmatrizen einzurichten.

[0065] Wieder Bezug nehmend auf **Fig. 2**, da die Schmalsichtfeldkamera **58** in den meisten Fällen einen kleineren durch jedes Pixel abgedeckten Winkelbereich aufweist, wäre es von Vorteil, wenn der Messwert der Schmalsichtfeldkamera **58** schwerer gewichtet würde. Eine einfache Möglichkeit dafür besteht darin, die obige Gleichung (5) zu ändern. Wenn das Sichtfeld der Schmalsichtfeldkamera **58** beispielsweise ein Viertel des Sichtfelds der Weit-

sichtfeldkamera **58** beträgt, lautet eine passende Gleichung an Stelle der Gleichung (5) wie folgt:

$$Q = 0,2Q_1 + 0,8Q_2. \quad (6)$$

[0066] Ein weiteres anwendbares mathematisches Verfahren ist eine Optimierungsmethode der kleinsten Quadrate, um den besten Schätzwert für das Retroreflektorziel **26** zu finden, wobei aber die Messwerte der Schmalsichtfeldkamera **58** schwerer als die Messwerte der Weitsichtfeldkamera **52** gewichtet werden.

[0067] Bezug nehmend auf **Fig. 4A** und **Fig. 4B**, ermöglicht eine Lokalisierungskamera **400** dem Lasertracker **10** die schnelle Ermittlung der ungefähren Position mehrerer Retroreflektoren in einem relativ weiten Sichtfeld des Lasertrackers **10**. Eine Vielzahl identischer Lichtquellen **401** ist in einem Ring vorgesehen, der eine Linse **402** umgibt. Alternativ dazu können weniger Leuchten oder sogar eine einzige Leuchte verwendet werden. Die einzelnen Lichtquellen emittieren sich überlappende Kegel, die zusammen einen Lichtkegel bilden, aus im Wesentlichen inkohärentem Licht **440**. Jeder der Retroreflektoren reflektiert einen Teil des Lichts des Lichtkegels als Lichtbündel zurück zu der Lokalisierungskamera **400**. In **Fig. 4B** ist eines der Lichtbündel **457** dargestellt. Die Linse **402** fokussiert das Bündel **457** nach unten zu einem Lichtpunkt auf der Oberfläche einer photosensitiven Anordnung **404**. Die photosensitive Anordnung **404** ist um die Brennweite f der Linse von der vorderen Hauptebene **403** der Linse **402** getrennt.

[0068] Elektrische Drähte **441** führen Energie von einer Energiequelle (z. B. dem Zusatzgerät **50**) im Lasertracker **10** zu den Strahlern **401** und der photosensitiven Anordnung **404**. Die elektrischen Drähte **441** übertragen auch die Pixeldaten von der photosensitiven Anordnung **404** zu einem Universalcomputer **60**, beispielsweise zur Analyse. Der Computer **60** analysiert das Lichtmuster auf der photosensitiven Anordnung **404**, um die Position eines Mittelpunkts **452** auf der photosensitiven Anordnung **404** zu ermitteln. Der Computer **60** führt außerdem diese Analyse des Musters durch, das von den anderen Lichtbündeln gebildet wird, die von den Retroreflektoren zurückkehren. Dies bedeutet, dass die reflektierten Lichtbündel durch die Linse **402** hindurch in Mustern auf der photosensitiven Anordnung **404** fokussiert werden. Der Computer **60** analysiert diese Muster, um den Mittelpunkt jedes Musters zu ermitteln. Aus der Position der Mittelpunkte lässt sich die ungefähre Winkelrichtung zu jedem der Retroreflektoren bestimmen.

[0069] Es wird angenommen, dass der interessierende Retroreflektor ein bestimmter Retroreflektor unter den mehreren Retroreflektoren ist. Wenn die Absicht besteht, das Ziel zu erfassen und die Zielpositionen mit dem Lasertracker zu messen, dann

kann das folgende Verfahren durchgeführt werden. Es werden Motoren eingeschaltet, um die Nutzlast zu drehen, bis der Laserstrahl in die ungefähre Richtung eines bestimmten Retroreflektors zeigt. Der Lichtstrahl visiert direkt das Ziel fest an und beginnt mit der Verfolgung des Ziels, wenn der Schätzwert der Zielposition gut genug ist. Wenn der Schätzwert der Zielposition nicht gut genug ist, besteht eine Möglichkeit darin, eine Suche zu initiieren, bei der die Richtung des Laserstrahls in systematischer Weise verändert wird. Beispielsweise könnte der Laserstrahl entlang einem Spiralmuster gelenkt werden. Wenn der Laserstrahl das Ziel schneidet, erfasst ein Positionsdetektor im Lasertracker das reflektierte Licht. Die Signale des Positionsdetektors stellen eine ausreichende Information zur Verfügung, die den Motoren die Möglichkeit gibt, die Nutzlast direkt auf den Mittelpunkt des bestimmten Retroreflektors zu richten. Eine andere Möglichkeit für den Bediener besteht darin, den mechanischen Mechanismus des Lasertrackers, beispielsweise die Nutzlast, direkt zu ergreifen und den Lichtstrahl manuell auf den interessierenden Retroreflektor zu richten. Bei einer Ausgestaltung beginnt eine LED auf der Vorderseite des Trackers zu blinken, wenn der Bediener den Lichtstrahl nahe genug auf den Mittelpunkt des Retroreflektors richtet. Wenn der Lichtstrahl noch näher ist, visiert der Lichtstrahl das Retroreflektorziel fest an. Wenn sich der Lichtstrahl nicht nahe genug am Mittelpunkt des Retroreflektors befindet, um das Ziel fest anvisieren zu können, kann man ein Schnellsuchverfahren zur Lokalisierung des Retroreflektorziels durchführen.

[0070] In dem Fall, in dem zwei oder mehr Lokalisierungskameras **52** auf dem Lasertracker **10** angeordnet sind, ist es normalerweise möglich, mittels der vorstehend beschriebenen Stereokameraberechnung direkt eine Eins-zu-eins-Entsprechung zwischen den Retroreflektorzielen **26** und den Zielmittelpunkten festzustellen, die auf den photosensitiven Anordnungen der Kameras **52** erscheinen. Wenn in ähnlicher Weise eine einzige Kamera **52** derart im Lasertracker angeordnet ist, dass das von den Zielen **26** reflektierte Licht auf einer optischen Achse des Lasertrackers zu der Kamera verläuft, entfällt dann eine Parallaxe zwischen den beiden Kameras; es ist ferner normalerweise möglich, eine Eins-zu-eins-Entsprechung zwischen den Retroreflektorzielen und den auf der photosensitiven Anordnung der Kamera erscheinenden Zielmittelpunkten festzustellen. Bei dem Einsatz einer einzigen Kamera können alternative Verfahren benutzt werden, um eine Eins-zu-eins-Entsprechung zwischen den Zielmittelpunkten und den Retroreflektorzielen festzustellen. Ein Verfahren bezieht das Drehen der Azimutachse in verschiedenen Winkeln sowie das Beobachten der Positionsänderung auf der photosensitiven Anordnung der einzigen Kamera **52** ein. Während der Azimutwinkel verändert wird, ändern sich die Positionen der Mittelpunkte auf der photosensitiven Anordnung um einen Betrag, der

von dem Abstand zwischen dem Lasertracker **10** und dem Retroreflektor **26** abhängt. Bei einer bestimmten Änderung des Azimutwinkels – während der Abstand zum Retroreflektor zunimmt – verringert sich die Änderung zwischen den zwei Mittelpunkten auf der photosensitiven Anordnung. Man kann ein ähnliches Verfahren durchführen, indem man den Zenitwinkel anstelle des Azimutwinkels des Lasertrackers verändert. Eine ausführlichere Erklärung dieses Verfahrens wird in Bezug auf **Fig. 18** in der US-Patentanmeldung Nr. 2011/0260033 ('033) beschrieben, die durch Verweis hierin einbezogen wird.

[0071] In manchen Fällen sind die eine oder die mehreren Kameras auf dem Lasertracker genau genug, um den Lichtstrahl des Lasertrackers nahe genug derart auf den Mittelpunkt eines Retroreflektorziels zu richten, dass der in den Lasertracker zurückreflektierte Lichtstrahl vom Positionsdetektor erfasst wird, wodurch bewirkt wird, dass der Laserstrahl mit der Verfolgung des Ziels beginnt. In solchen Fällen kann die Software, die den Lasertracker steuert, den Lichtstrahl des Lasertrackers automatisch derart auf jedes der Ziele richten, dass die relativ hohen Genauigkeiten des Distanzmessers des Lasertrackers und der Winkelkodierer zu den dreidimensionalen Koordinatenwerten übertragen werden. In anderen Fällen sind die eine oder die mehreren Kameras auf dem Lasertracker eventuell nicht genau genug, um den Lichtstrahl des Lasertrackers direkt nahe genug auf den Mittelpunkt des Retroreflektorziels zu richten, damit der Positionsdetektor den Lichtstrahl unmittelbar erfassen und mit der Verfolgung beginnen kann. In diesem Fall kann der Lichtstrahl des Lasertrackers auf ein Ziel gerichtet und der Strahl in einem Suchmuster zur Lokalisierung des Ziels gelenkt werden, wie vorstehend erläutert wurde. Durch die Wiederholung dieses Verfahrens bei jedem der Ziele innerhalb des Messvolumens lassen sich relativ genaue dreidimensionale Koordinaten bei jedem Zielpunkt erhalten. Relativ genaue dreidimensionale Koordinaten für die Zielpunkte sind wichtig, da sie der Software, die den Lasertracker steuert, die Möglichkeit geben, automatische Messungen der Zielpunkte vorzunehmen, ohne vorläufige Zielsuchen durchzuführen.

[0072] Wie bereits in der obigen Besprechung vorgeschlagen wurde, ist es bei einigen Aspekten dieser Erfindung erforderlich, dass eine Eins-zu-eins-Entsprechung zwischen den Zielpunkten, die von der einen oder den mehreren Kameras auf dem Lasertracker beobachtet werden, und einer Liste dreidimensionaler Koordinaten von Retroreflektorzielpunkten erhalten wird. Nachfolgend werden einige Verfahren beschrieben, mit denen man eine Liste dreidimensionaler Koordinaten der Zielpunkte erhalten kann. Die Liste kann in manchen Fällen dreidimensionale Sollkoordinaten aufweisen, die sich um einen relativ großen Betrag von den dreidimensionalen Istkoordinaten unterscheiden. In anderen Fällen kann

die Liste relativ genaue dreidimensionale Koordinaten aufweisen.

[0073] Eine Liste von dreidimensionalen Koordinaten zwischen dem Lasertracker und den Zielpunkten auf einem Prüfobjekt wird bei einer Ausgestaltung aus einem CAD-Modell erhalten, das die Positionen der Ziele auf dem Objekt beschreibt.

[0074] Bei einer anderen Ausgestaltung wird die Eins-zu-eins-Entsprechung zwischen den Zielpunkten und der Liste dreidimensionaler Koordinaten dadurch erhalten, dass dreidimensionale Messungen bei jedem der von der Kamera beobachteten Punkte durchgeführt werden. Derartige dreidimensionale Messungen wurden möglicherweise vor der aktuellen Messreihe durchgeführt.

[0075] In manchen Fällen können die Bilder der Zielpunkte auf der einen oder den mehreren Kameras zu nahe beabstandet sein, um sofort die Eins-zu-eins-Entsprechung zwischen den Zielpunkten und den Lichtpunkten auf den Kamerabildern ermitteln zu können. In diesem Fall kann man die Zielpunkte mit dem Lasertracker unter Anwendung der vorstehend beschriebenen Verfahren messen. Beispielsweise kann der Lasertracker den Lichtstrahl auf das Ziel richten. Der Lasertracker kann anschließend die Zielposition gegebenenfalls direkt oder mit Hilfe einer Suchmethode messen.

[0076] Ein wichtiger Aspekt dieser Erfindung ist die Einrichtung einer Beziehung zwischen dem Bezugssystem des Lasertrackers und dem Bezugssystem des Prüfobjekts. Der gleiche Gedanke bedeutet mit anderen Worten, dass es wichtig ist, dass man über ein Verfahren zum Transformieren des Lasertrackerbezugssystems in das Prüfobjektbezugssystem und umgekehrt verfügt.

[0077] Es werden hierin drei Verfahren zum Einrichten dieser Beziehung gelehrt. Bei einem ersten Verfahren werden mindestens drei Retroreflektorzielpunkte durch den Lasertracker gemessen. Bei einem zweiten Verfahren werden mindestens zwei Zielpunkte durch den Lasertracker gemessen und zusätzlich mindestens zwei Neigungswinkel durch Neigungsmesser gemessen, die auf jedem von dem Lasertracker und dem Prüfobjekt angeordnet sind. Bei einem dritten Verfahren wird eine einzige Kamera mit sechs Freiheitsgraden (DOF) durch einen Lasertracker, der über 6-DOF-Messkapazität verfügt, gemessen. Dadurch, dass die aus einem beliebigen der drei Verfahren erhaltenen Informationen kombiniert werden, ist es möglich, den Lasertracker in das Bezugssystem des Prüfobjekts zu bringen. Es ist dementsprechend möglich, das Prüfobjekt in das Lasertrackerbezugssystem zu bringen.

[0078] Es wird nun das Verfahren kurz erklärt, mit dem das Prüfobjekt in das Trackerbezugssystem gebracht wird, wobei dies auf dem Erhalt der gemessenen Informationen beruht, die im vorangehenden Absatz beschrieben wurden. Für den Fall, in dem der Lasertracker drei Retroreflektorzielpunkte misst, kann ein lokales Koordinatensystem für das Prüfobjekt eingerichtet werden, indem man ermöglicht, dass einer der drei gemessenen Punkte ein Ursprungspunkt im lokalen Bezugssystem des Prüfobjekts ist, ein zweiter der gemessenen Punkte die x-Achse einrichtet und der dritte der gemessenen Punkte eine Komponente in der y-Richtung einrichtet. Die y-Achse wird derart gewählt, dass sie durch den Ursprung verläuft und senkrecht zu der x-Achse ist. Die z-Achse wird derart gewählt, dass sie durch den Ursprung verläuft, senkrecht zu der x-Achse und der y-Achse ist und eine Richtung nach der Rechte-Hand-Regel, die dem durchschnittlichen Fachmann bekannt ist, aufweist. Das Prüfobjekt kann sein eigenes Koordinatenbezugssystem haben, das durch eine CAD-Zeichnung erstellt wurde. Die CAD-Zeichnung kann beispielsweise Bezugsgrößen haben, die einen Ursprung, die x-Achse, die y-Achse und die z-Achse erstellen. Um die CAD-Zeichnung in das Bezugssystem des Lasertrackers oder dementsprechend den Lasertracker in das Bezugssystem der CAD-Zeichnung zu bringen, werden normalerweise drei Transformationsmatrizen erhalten. Transformationsmatrizen sind normalerweise 4×4 -Matrizen, die eine 3×3 -Rotationsmatrix sowie eine Skalierungskomponente, die Translationen der Bezugssysteme relativ zu den anderen Bezugssystemen ermöglicht, umfassen. In der vorstehend beschriebenen Situation werden die drei Transformationsmatrizen in einer bestimmten Reihenfolge miteinander multipliziert, um eine Gesamt-Transformationsmatrix für die Transformation von gemessenen Werten oder CAD-Werten in das gewünschte Bezugssystem zu erhalten. Die Verwendung von Transformationsmatrizen ist dem durchschnittlichen Fachmann weithin bekannt und wird hier nicht weiter beschrieben.

[0079] Für den Fall, in dem der Lasertracker die dreidimensionalen Koordinaten von mindestens zwei Retroreflektorzielpunkten zusätzlich zu den Neigungswinkeln des Lasertrackers und des Prüfobjekts misst, kann ein lokales Koordinatensystem für das Prüfobjekt eingerichtet werden, indem ermöglicht wird, dass ein erster Retroreflektorzielpunkt der lokale Ursprung des Prüfobjekts ist und dass die Richtung vom ersten Zielpunkt zum zweiten Zielpunkt eine lokale x-Achse für das Prüfobjekt konstituiert. Wenn ein auf dem Lasertracker und dem Prüfobjekt angeordneter Neigungsmesser jeweils zwei senkrechte Neigungswinkel und den Schwerkraftvektor misst, kann das Prüfobjekt dann gedreht werden, um die zwei Schwerkraftvektoren auszurichten, wobei wieder Rotationsverfahren zum Einsatz kommen, die dem durchschnittlichen Fachmann weithin bekannt

sind. Die Mehrdeutigkeit bei dem Drehwinkel um den Schwerkraftvektor kann beseitigt werden, da es nur eine mögliche Drehung um den Schwerkraftvektor gibt, die diese richtige Übereinstimmung zwischen der lokalen x-Achse des Prüfobjekts und der durch das CAD-Modell definierten x-Achse bereitstellt. Dieses Verfahren funktioniert, solange die dreidimensionalen Koordinaten der durch den Lasertracker gemessenen zwei Retroreflektorzielpunkte nicht eine Linie bilden, die mit dem Schwerkraftvektor zusammentrifft.

[0080] Eine andere Methode zur Beobachtung der Transformation zwischen Bezugssystemen besteht darin, dass man die Anzahl der Freiheitsgrade in Betracht zieht, die durch die gemessenen Werte bereitgestellt werden. Wenn der Lasertracker beispielsweise einen ersten Retroreflektorzielpunkt misst, heißt es, dass er die mögliche Bewegung des Prüfobjekts um drei Freiheitsgrade einschränkt, da ein erster, zweiter und dritter Freiheitsgrad, welche den x-, y- und z-Koordinaten entsprechen, für einen Punkt auf dem Prüfobjekt eingerichtet wurden. Physikalisch fixiert diese Einschränkung die Position des gemessenen Punkts im Raum, ermöglicht jedoch die Drehung des Prüfobjekts in einer beliebigen Orientierung um diesen Punkt. Wenn der Lasertracker den zweiten Retroreflektorzielpunkt misst, heißt es, dass er die mögliche Bewegung des Prüfobjekts um zwei zusätzliche Freiheitsgrade einschränkt, da das Prüfobjekt nicht mehr in der Lage ist, sich in einem beliebigen von drei Orientierungswinkeln zu drehen, und stattdessen darauf beschränkt wird, sich um die Linie zu drehen, die den ersten mit dem zweiten Retroreflektorzielpunkt verbindet. Die drei Orientierungsfreiheitsgrade wurden demnach auf einen Orientierungsfreiheitsgrad reduziert. Bei einer Gesamteinschränkung von fünf Freiheitsgraden schränkte der erste gemessene Punkt drei Translationsfreiheitsgrade ein und schränkte der zweite gemessene Punkt zwei Orientierungsfreiheitsgrade ein. Da es in diesem Fall einen uneingeschränkten Freiheitsgrad gibt, beträgt die Gesamtanzahl der eingeschränkten und uneingeschränkten Freiheitsgrade sechs.

[0081] Für den Fall, in dem Neigungsmesser auf dem Lasertracker und dem Prüfobjekt jeweils zwei Neigungswinkel relativ zum Schwerkraftvektor messen und der Lasertracker die dreidimensionalen Koordinaten von lediglich einem Zielpunkt misst, ist nicht genug Information vorhanden, um das Prüfobjekt völlig einzuschränken. Die zwei Neigungsmesser schränken zwei Winkel ein, stellen aber keine Information über die Drehung des Prüfobjekts um den Schwerkraftvektor bereit. Dies bedeutet, dass die zwei Neigungsmesser zwei Freiheitsgrade einschränken. Die dreidimensionalen Koordinaten des einzigen durch den Lasertracker gemessenen Ziels ergeben die Einschränkung von Freiheitsgraden bei einer Gesamteinschränkung von fünf Freiheitsgra-

den. Da sechs Freiheitsgrade für eine vollständige Einschränkung notwendig sind, ergeben die gemessenen Werte keine vollständige Einschränkung und kann sich das Objekt frei um den Schwerkraftvektor drehen.

[0082] Für den Fall, in dem Neigungsmesser auf dem Lasertracker und dem Prüfobjekt jeweils zwei Neigungswinkel relativ zu dem Schwerkraftvektor messen und der Lasertracker die dreidimensionalen Koordinaten von zwei Zielpunkten misst, ist genug Information vorhanden, um das Prüfobjekt vollständig einzuschränken, solange die zwei Zielpunkte keine Linie entlang der Richtung des Schwerkraftvektors erstellen. Dadurch, dass diese Messung durchgeführt wird, heißt es, dass das Prüfobjekt in sechs Freiheitsgraden eingeschränkt ist, solange die zwei Zielpunkte nicht entlang der Richtung des Schwerkraftvektors liegen.

[0083] Für den Fall, in dem die zwei Vektoren entlang dem Schwerkraftvektor liegen, heißt es, dass das Prüfobjekt um fünf Freiheitsgrade eingeschränkt ist, da nicht genug Informationen für die Ermittlung der Orientierung des Prüfobjekts um den Schwerkraftvektor herum vorliegen. Es ist anzumerken, dass die Anzahl der Freiheitsgrade nicht durch einfaches Addieren der Anzahl von Freiheitsgraden, die durch einzelne Messungen erhalten würden, ermittelt werden kann. Beispielsweise schränkt die Messung eines einzigen Punkts drei Freiheitsgrade ein, wobei die Messung von zwei Punkten jedoch fünf Freiheitsgrade und nicht sechs Freiheitsgrade einschränkt. Es ist ferner anzumerken, dass die zwei Winkelfreiheitsgrade, die von den Neigungsmessern auf dem Lasertracker und dem Prüfobjekt bereitgestellt werden, nicht zu den fünf Freiheitsgraden, die durch die Lasertrackermessung der zwei Retroreflektorzielpunkte erhalten wurden, hinzuaddiert werden und dabei keine sechs oder sieben Freiheitsgrade erhalten werden. Dies liegt daran, dass die durch die Neigungsmesser bereitgestellten zwei Freiheitsgrade nicht einem Basissatz entsprechen, der von dem Basissatz der zwei Zielpunkte unabhängig ist, die von dem Lasertracker gemessen wurden. Das heißt, dass eine vollständige Einschränkung eines einzigen starren Körpers eine Einschränkung von drei Translationsfreiheitsgraden (z. B. x, y, z) und drei Orientierungsfreiheitsgraden (z. B. Nick-, Roll- und Gierwinkel) erfordert. In dem oben betrachteten Fall gibt es keine Einschränkung für die Drehung um den Schwerkraftvektor (oft als „Gierwinkel“ bezeichnet). In dieser Anmeldung ist der Begriff „Freiheitsgrade“ derart zu verstehen, dass er unabhängige Freiheitsgrade bedeutet.

[0084] Es versteht sich, dass die von den Kameras auf dem Lasertracker beobachteten Ziele in einer Region liegen können, die sich außerhalb des Sichtfelds der Kameras befindet, wenn die Azimut- und Zenit-

achse des Lasertrackers gedreht werden. Beispielsweise kann das Sichtfeld einer der Kameras auf dem Lasertracker 30 Grad in der Azimutrichtung betragen. Die Azimutachse des Trackers kann jedoch um 360 Grad gedreht werden, wodurch das effektive Sichtfeld der Kamera auf 360 Grad erhöht wird.

[0085] Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung geben einem Bediener mit begrenzter Einarbeitung an dem Messsystem (z. B. Lasertracker, Werkzeugausstattung der Ziele, SMRs oder andere Lasertrackerziele, Computersystem, Software des Messsystems sowie gegebenenfalls eine Fernsteuerung oder in der Hand gehaltene Vorrichtung, die mit der Messsoftware verbunden ist) die Möglichkeit, gegebenenfalls eine Reihe von Eingabeaufforderungen und Anweisungen über einen Computer (z. B. einen Universalcomputer **60**) zu befolgen, um den Lasertracker einzustellen, gegebenenfalls die SMRs in der erforderlichen Werkzeugausstattung auf dem zu messenden Teil zu positionieren und gegebenenfalls den zu messenden interessierenden Bereich zu definieren. Anschließend kann das Messsystem die Zielpunkte automatisch messen und die Ergebnisse liefern.

[0086] Eine Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung, die dem Bediener einfachere und schnellere Messungen gestattet, ist ein Verfahren, bei dem der Lasertracker den Lichtstrahl an einer gewünschten Messposition auf das Objekt richtet, um den Bediener aufzufordern, einen SMR an der gewünschten Position zu platzieren. Der Bediener könnte beispielsweise dazu aufgefordert werden, ein Retroreflektorziel in einer magnetischen Aufnahme auf einem Prüfobjekt zu positionieren. Als weiteres Beispiel könnte ein Retroreflektor an der falschen Position angeordnet sein und der Bediener durch den Lichtstrahl des Lasertrackers dazu aufgefordert werden, das falsch platzierte Ziel zur richtigen Position zu bewegen. Die Bedienerführung könnte dies zum Beispiel durch aufeinanderfolgendes Bewegen des Lichtstrahls von einer ersten Position, die das falsch platzierte Ziel enthält, zu einer zweiten Position, wo das Ziel zu positionieren ist, durchführen.

[0087] Die durch den Lichtstrahl des Lasertrackers bereitgestellte Führung kann auch einen Vorteil bei der Einrichtungsphase haben, in welcher der Bediener SMRs an vorgeschriebenen Stellen platziert, während der Lasertracker die dreidimensionalen Koordinaten der Zielpositionen misst. Dieser Vorteil ist zu erkennen, wenn die in einem CAD-Modell vorgegebenen Sollmaße nicht den Istmaßen eines Prüfobjekts entsprechen. Wenn die genauen dreidimensionalen Positionen der Zielpunkte während der Einrichtung ermittelt werden, können die Messdauer und später im Verfahren auftretende Messfehler verringert werden.

[0088] Die Leitung der Maßnahmen des Bedieners durch das Zeigen mit dem Lichtstrahl kann dabei helfen, Fehler zu eliminieren. Zum Beispiel kann ein Prüfplan in der Software für eine Lasertrackerprüfung darauf hinweisen, dass der Bediener Punkte in einer bestimmten Reihenfolge messen muss. Man kann die Ergebnisse solcher Messungen speichern und dazu benutzen, eine gewünschte Beziehung – z. B. eine Beziehung zwischen zwei Bezugssystemen, eine Länge zwischen zwei Linien oder der Winkel zwischen zwei Ebenen – zu erhalten. Wenn der Bediener die Anfangspunkte in der falschen Reihenfolge oder die falschen Punkte gemessen hat, scheitert dann eventuell die Software dabei, nach den gewünschten Werten aufzulösen, oder sie erhält die falschen Antworten.

[0089] In den bis jetzt beschriebenen Fällen wird der Bediener angewiesen, ein Retroreflektorziel an einer festen Stelle zu positionieren, die beispielsweise eine magnetische Aufnahme oder eine Werkzeugbohrung sein kann. Es gibt allerdings einen weiteren wichtigen Fall, in welchem der Bediener ein Oberflächenprofil misst. Ein solches Oberflächenprofil könnte gemessen werden, um beispielsweise die Ebenheit einer Oberfläche oder den Durchmesser einer Kugel zu ermitteln; oder es könnten zwei Oberflächen gemessen werden, um den Winkel zwischen den Oberflächen zu ermitteln. Als weiteres Beispiel könnte ein Bediener einen Abschnitt eines Werkzeugs messen, das für den Einsatz bei der Montage von Kraftfahrzeugen oder Flugzeugen konstruiert ist. Der Lasertracker könnte für die Messung des Oberflächenprofils verwendet werden, um zu erkennen, ob das Profil innerhalb der Konstruktionstoleranzen liegt. Falls nicht, könnte der Bediener angewiesen werden, das Werkzeug in der entsprechenden Weise zu modifizieren – vielleicht z. B. durch Abschleifen von Material aus einer Region. In all diesen Fällen, bei denen der SMR zum Messen des Profils einer Oberfläche verwendet wird, kann die den Lasertracker steuernde Software das Verfahren für den Bediener in hohem Maße vereinfachen und beschleunigen, indem sie auf die abzutastende Region hinweist. Sie kann dies dadurch realisieren, dass sie den Lasertracker dazu veranlasst, den Lichtstrahl zur Abgrenzung der Bereiche zu richten, die der Bediener abtasten muss. Alternativ dazu könnte sie den tatsächlichen Weg nachführen, dem der Bediener während der Abtastung folgen muss.

[0090] Der Lasertracker kann ferner dazu benutzt werden, bei der Montage komplexer Strukturen zu helfen. Es kann beispielsweise notwendig sein, dass mehrere Komponenten am Cockpit eines Flugzeugs befestigt werden. In vielen Fällen besteht eine wirtschaftliche Methode zur Durchführung darin, einen Lichtstrahl derart zu richten, dass er den Monteur zum Bohren von Löchern oder zu anderen Vorgängen an den geeigneten Stellen anweist. Nachdem die

Komponenten befestigt wurden, kann der Bediener angewiesen werden, das Profil der eingebauten Teile optisch abzutasten, um zu bestätigen, dass der Einbau korrekt war. Es können eine oder mehrere Kameras zur Identifizierung von Retroreflektoren auf dem Montageobjekt benutzt werden, um diese Messung zu erleichtern. Diese Retroreflektoren würden dazu verwendet, den Lasertracker in das Bezugssystem des Montageobjekts zu bewegen; dies würde dann ermöglichen, dass der Lasertracker die Tätigkeiten des Monteurs mit dem Lichtstrahl des Trackers anweist.

[0091] Die eine oder die mehreren Kameras auf dem Lasertracker sind in der Lage, alle Retroreflektorziele in einem großen, effektiven Sichtfeld zu messen, indem sie, wie vorstehend erläutert, die Azimut- und Zenitachse drehen. Wenn die einzigen für den Lasertracker zugänglichen Ziele diejenigen auf dem Prüfobjekt sind, kann der Lasertracker durch Beobachten der Retroreflektorziele automatisch die zu messende Raumregion ermitteln. Wenn sich andererseits Ziele auf mehreren Objekten befinden, die für die aktuelle Messung nicht alle von Interesse sind, ist es in einigen Fällen eventuell erforderlich, dass der Bediener auf die zu messende Region hinweist. Der Bediener kann bei einer Ausgestaltung auf die zu messende Region hinweisen, indem er einen Retroreflektor zur Abgrenzung der interessierenden Region verwendet. Der Bediener kann dies beispielsweise realisieren, indem er vier aufeinanderfolgende Bewegungen des Retroreflektorziels durchführt, um auf die obere, untere, linke und rechte Ausdehnung der Region hinzuweisen. Bei einer anderen Ausgestaltung kann der Bediener die Nutzlast (oder eine äquivalente Struktur) des Lasertrackers manuell bewegen, um den Lichtstrahl in den oberen, unteren, linken und rechten Rand der interessierenden Region zu richten. Der Bediener kann angewiesen werden, diese Bewegungen mit einer Software durchzuführen, die den Lasertracker steuert; oder der Bediener kann mit Handbewegungen diese Informationen mitteilen, ohne vom Computerprogramm dazu angewiesen zu werden. Solche Handbewegungen können beispielsweise die Bewegung eines Retroreflektorziels in vorher festgelegten Mustern in vorgeschriebenen Zeitintervallen umfassen. Als anderes Beispiel kann der Bediener auf die Absicht hinweisen, eine Region abzugrenzen, indem er die Nutzlast ergreift und den Lichtstrahl des Lasertrackers direkt nach unten bewegt. Der Bediener könnte nach dieser Anfangsbewegung die Nutzlast bewegen, um den oberen, unteren, linken und rechten Rand der gewünschten Messregion abzugrenzen. In anderen Fällen ist es eventuell möglich, dass die Software den Lasertracker derart steuert, dass er ein Zielabstimmungsverfahren durchführt, bei dem die Software eine Sammlung von Retroreflektorziele gemäß einem CAD-Modell oder einer Liste von dreidimensionalen Koordinaten der Ziele identifiziert.

[0092] In den obigen Besprechungen wurden die Vorteile hervorgehoben, die sich ergeben, wenn man den Lasertracker mit dem Lichtstrahl zur Unterstützung des Bedieners bei der Durchführung von Messungen verwendet. Es werden nun die Vorteile einer vollständigen Automatisierung einer Messung in Betracht gezogen. Ein potentieller Vorteil besteht darin, dass wegen der Geschwindigkeit, mit der sich ein vollautomatische Messung durchführen lässt, dem Prüfobjekt ohne Erhöhung der Prüfdauer zusätzliche Ziele hinzugefügt werden können. Durch die Bereitstellung mehrerer Punkte in jedem Datensatz kann die Software schneller die gewünschten geometrischen Kenngrößen des Prüfobjekts mit weniger potentiellen Fehlern ermitteln. Durch die Messung von Sätzen von Punkten ohne die Anforderung, dass der Bediener den SMR manuell bewegen muss, wird ferner die Möglichkeit reduziert, dass das Objekt während der Messreihe verschoben wird. Dies wiederum verringert die Möglichkeit von Messfehlern.

[0093] Ein potentieller Vorteil einer vollautomatischen Messung besteht darin, dass die Reihenfolge, in der Messungen durchgeführt werden, optimiert werden kann. In dem Fall, in dem eine große Anzahl von Zielpositionen auf einem Prüfobjekt vorhanden ist, kann ein Bediener die Zielpositionen gemäß der relativen Nähe der Punkte messen, da dies die schnellste Methode für manuelle Messungen ist. Andererseits können bei einem vollautomatischen Verfahren die Messungen in einer Reihenfolge vorgenommen werden, die die genauesten und stabilsten Messergebnisse liefert. Beispielsweise können sich zwei Punkte auf einer Bezugslinie an gegenüberliegenden Seiten eines großen Prüfobjekts befinden. Ein automatisches Prüfverfahren kann diese weit voneinander getrennten Bezugspunkte nacheinander messen, wodurch eine Verschiebung vermieden wird und die genauesten Messergebnisse erhalten werden.

[0094] Ein weiterer potentieller Vorteil der automatischen Messung ist die Möglichkeit einer automatischen Überholung. Es wird oft gewünscht, dass die Kenngrößen der bei der Herstellung von Produkten verwendeten Werkzeuge periodisch gemessen werden. Derartige periodische Messungen unterstützen die Gewährleistung, dass das Werkzeug nicht gekrümmt wurde, dass die Ziele nicht bewegt wurden usw. Wenn ein Prüfobjekt angestoßen wurde, wird dies anschließend während einer periodischen Messung von der Software erkannt, die den Lasertracker steuert. Die Software kann als Reaktion ein automatisches Überholungsverfahren aufrufen, bei dem die neue Position des angestoßenen Ziels neu eingerichtet wird. Das automatische Überholungsverfahren kann außerdem die Anforderung verringern, dass das Objekt durch eine starre Anbringung starr auf dem Werkzeug gehalten wird. Geringere Anforderungen an die Standfestigkeit führen zu niedrigeren Kosten

beim Aufbau und Betrieb eines sehr präzisen, wiederholgenauen Werkzeugs.

[0095] Ein anderes Beispiel für die automatische Überholung betrifft den Fall, in dem sich das Prüfobjekt auf einer Fertigungsstraße befindet. Ein solches Objekt befindet sich wahrscheinlich nicht mehr exakt an derselben Stelle, nachdem es einen Kreislauf vollendet hat und für eine Prüfung zum Lasertracker zurückgekehrt ist. Der Lasertracker kann die Bezugspunkte messen, um die Beziehung zwischen dem Bezugssystem des Lasertrackers und dem Bezugssystem des Prüfobjekts wiederherzustellen.

[0096] Eine Leistungsfähigkeit, die durch die oben beschriebenen automatischen Messungen ermöglicht wird, ist die Einstellung eines gewünschten Genauigkeitswerts – eventuell durch den Benutzer –, um spezifische Vorgänge zu steuern und Schwellwerte für Warnungen und Alarme einzustellen. Der auf die gewünschte Genauigkeit eingestellte Wert kann Folgendes steuern: (1) die Häufigkeit und Toleranz bei Stabilitätsprüfungen; (2) die Anforderung der Selbstkompensation im Vergleich zu einer vollständigen Ausrichtungskompensation; (3) die Häufigkeit und Toleranz bei der Selbstkompensation; (4) den Schwellwert für die Anzahl von Messabfragen pro gemessenem Punkt; (5) Grenzwerte für eine Änderung der Umgebungstemperatur vor Kompensationsprüfungen; (6) die Toleranz bei akzeptablen Ergebnissen von Ausrichtungen und Positionsbewegungen; und (7) die Häufigkeit und Toleranz bei Überprüfungen von Verschiebungen.

[0097] Alternativ dazu kann jeder dieser Werte einzeln eingestellt werden. Man kann eine Matrix von Werten auf der Grundlage von verschiedenen Anwendungen und Betriebsbedingungen einstellen, und diese können dann als Messprofile gespeichert und abgerufen werden.

[0098] Es wird nun ein Beispiel betrachtet, bei dem ein Einrichtungsverfahren eher die Mitarbeit des Bedieners als eine vollständige Automatisierung beinhaltet. Der Lasertracker **10** visiert für die gewünschten Messpositionen eine gewünschte Position auf dem Objekt zur Platzierung eines SMR an. Bei einer ersten Ausgestaltung hält der Bediener den SMR in der Hand, während er den SMR in dem Lichtstrahl platziert, wodurch der Strahl den SMR fest anvisieren kann. Der Lasertracker misst, nachdem der SMR auf das Objekt (beispielsweise auf eine magnetische Aufnahme) gelegt wurde, die dreidimensionalen Koordinaten und bewegt den Lichtstrahl zur nächsten Zielposition. Bei einer zweiten Ausgestaltung positioniert der Bediener den Retroreflektor z. B. unmittelbar auf dem Objekt, also möglicherweise auf einer magnetischen Aufnahme. Falls der Lichtstrahl nicht sofort den Retroreflektor fest anvisiert, gibt der Bediener ein Signal, indem er beispielsweise eine Hand vor

dem Retroreflektorziel hin- und herbewegt, wodurch bewirkt wird, dass das Ziel im Sichtfeld der Kamera blinkt. Der Tracker sucht nach dem SMR und misst schnell die SMR-Position. Der Tracker bewegt sich dann zu dem nächsten Sollpunkt weiter, um den Bediener anzuleiten, wo das Ziel auf dem Objekt zu platzieren ist. Ein dritte Ausgestaltung ist wie die zweite Ausgestaltung ausgelegt, außer dass der Lasertracker keine Suche durchführt, wenn das Ziel nicht sofort gefunden wird. Wenn der Bediener eine Hand vor dem Retroreflektorziel hin- und herbewegt, führt der Lasertracker statt dessen den Lichtstrahl zu der nächsten Zielposition. Es kann bei einer Anfangseinstellung akzeptabel sein, dass alle Messungen relativ schnell vorgenommen werden, indem beispielsweise jede Messdauer auf ungefähr 0,1 Sekunden begrenzt wird.

[0099] Es kann eine große Anzahl von Retroreflektorzielen, die 100 überschreiten kann, verwendet werden, um Punkte auf einem Werkzeug zu messen. In einigen Fällen beabsichtigt der Bediener möglicherweise, nur einen Teil der Retroreflektoren auf einmal zu platzieren (z. B. 25 Retroreflektoren zu einem Zeitpunkt), um Geld beim Kauf von Retroreflektoren zu sparen. Ein Messzyklus ist als ein Zyklus definiert, während welchem die verfügbaren Retroreflektorziele (z. B. 25 Ziele) auf dem Werkzeug platziert sind und Messungen vom Lasertracker durchgeführt werden.

[0100] Wenn die SMRs nicht bereits an dem Prüfobjekt befestigt wurden, positioniert der Bediener die SMRs entweder manuell und gemäß der durch den Lasertracker **10** bereitgestellten Führung auf dem Objekt. Der Tracker kann anschließend eine Überprüfung der Stabilität und des Bezugssystems durchführen. Die Stabilitätsprüfung kann durch Messen von einem oder mehreren Punkten erfolgen. Bei einer Ausgestaltung misst der Tracker zwei oder mehr Punkte an den äußersten Grenzen des Messvolumens zusammen mit einem Punkt, der dem Mittelpunkt des Volumens am nächsten ist. Der Lasertracker **10** nimmt automatisch eine Reihe von Punkten mit kürzerer und schrittweise längerer Dauer (mehr Abfragen) zur Ermittlung der optimalen Anzahl von Abfragen, um die gewünschte Genauigkeit zu erzielen (der Bediener stellt diese Anzahl im System ein). Die Systemeinstellung für Abfragen pro Punkt wird auf diesen Wert gesetzt. Das System hat die Option, die Stabilität nach einem bestimmten Zeitraum, einer Anzahl gemessener Punkte oder am Anfang und/oder Ende jedes Zyklus wieder zu prüfen. Nachdem die Bezugspunkte (mindestens drei) zum ersten Mal gemessen wurden, können sie am Ende des Zyklus zur Überprüfung der Bewegung erneut gemessen werden oder am Anfang jedes Zyklus noch einmal gemessen werden, um den Lasertracker neu zu dem Teil zu orientieren, damit eine etwaige Bewegung des Objekts korrigiert wird, die vom Bediener

verursacht wurde, während er die SMRs bewegte. Ein einfacheres und schnelleres Verfahren zur Überprüfung einer möglichen Bewegung besteht darin, einen einzigen Punkt auf dem Objekt und einen zweiten Punkt irgendwo anders (beispielsweise auf dem Fußboden) zu positionieren. Diese Positionen verfügen zu jeder Zeit über SMRs und das Messsystem kann sie während der gesamten Messreihe periodisch überprüfen. Eine Methode besteht darin, in bestimmten Intervallen während der Messreihe zusätzlich zum Anfang und Ende jedes Zyklus zu überprüfen. Eine minimale Implementierung bestünde darin, diese Verschiebungspunkte am Anfang und Ende jeder Messreihe zu messen.

[0101] Das Messsystem misst automatisch alle erforderlichen Punkte gemäß den Einstellungen des Systems. Die Benutzerleuchten des Lasertrackers können nach jeder Messung eines Punkts ein Muster von LEDs blinken lassen, um den Bediener über einen die Bedingungen erfüllenden oder nicht erfüllenden Punkt zu alarmieren. Falls ein Punkt nicht die Bedingungen erfüllt, kann der Bediener die automatischen Messungen anhalten, indem er mit einer Hand vor einem beliebigen Ziel im Sichtfeld des Trackers winkt. Das Kamerasystem registriert die Unterbrechung beim Blinken eines einzigen Ziels, die als Reaktion auf die blinkende Lichtquelle **54** erzeugt wird, und hält die Messungen an. Der Bediener kann eine Hand derart vor den außerhalb des Toleranzbereichs liegenden Punkt halten, dass er eingestellt werden kann. Der Lasertracker visiert anschließend den gewünschten Punkt an. Eine digitale Auslesung leitet den Bediener an, denjenigen Teil des Werkzeugs einzustellen, der sich außerhalb des Toleranzbereichs befindet. Sobald die Einstellung beendet ist, kann der Bediener eine andere Handbewegung durchführen (z. B. Bewegen einer Hand vor dem SMR), um den Lasertracker anzuweisen, den Punkt erneut zu messen und mit der Messung der übrigen Punkte fortzufahren. Dadurch, dass man entweder vor dem SMR winkt oder die Azimut- oder Zenitachse der Systeme physisch bewegt, kann das gesamte Messverfahren derart durchgeführt werden, dass der Bediener keine Fernsteuerung, Maus oder Tastatur benötigt.

[0102] Bezug nehmend auf **Fig. 5A** und **Fig. 5B**, sind dort perspektivische Darstellungen des Lasertrackers **10** von **Fig. 1** und **Fig. 2** in einer ersten bzw. zweiten Orientierung in Bezug auf ein Objekt **500** dargestellt, das mit dem Lasertracker **10** zu messen ist, der automatisch verschiedene Zielpunkte **26** (z. B. SMRs **26**) auf dem Objekt **500** misst. Das Objekt **500** kann eine beliebige Art eines relativ großen Objekts sein, beispielsweise ein Schlitten, der ein Teil einer Fertigungsstraße für Kraftfahrzeuge ist. Dies ist allerdings ein bloßes Beispiel; das Objekt **500** kann irgendein Typ einer Werkzeugausstattung oder eines Fertigprodukts sein. Wie vorstehend besprochen wurde, hat das Objekt **500** mehrere Zielpunkte **26** wie bei-

spielsweise die SMRs **26**, die gemäß den Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung an verschiedenen Stellen auf dem Objekt **500** positioniert sind. SMRs können ferner auf der durch das Objekt **500** gehaltenen Baugruppe platziert sein.

[0103] **Fig. 5A** veranschaulicht SMRs **26** an verschiedenen Stellen auf dem Objekt **500**. Es ist ebenfalls der Lasertracker **10** dargestellt, dessen Laserstrahl **46** auf mehrere dieser SMRs **26** gerichtet ist. Ferner ist ein Kegel **510** abgebildet, der das Sichtfeld der einen oder der mehreren Kameras **52, 58** des Lasertrackers **10** repräsentiert, während die Kamera (s) einen Teil des Objekts **500** beobachtet bzw. beobachtet.

[0104] **Fig. 5B** ist **Fig. 5A** ähnlich, doch der Lasertracker **10** ist jetzt bezogen auf das Objekt **500** gedreht und außerdem wurden einige der SMRs **26** auf dem Objekt **500** an den spezifischen Stellen von **Fig. 5A** zu anderen Stellen auf dem Objekt **500** in **Fig. 5B** bewegt. Zudem befindet sich der Kegel des Sichtfelds der Kamera(s) **52, 58** in einer anderen Orientierung in Bezug auf das Objekt **500**. Dies verschafft der bzw. den Kameras **52, 58** die Möglichkeit, weitere zusätzliche Zielpunkte **26** auf dem Objekt **500** aufzunehmen. Die Bewegung des Ziels zu zwei unterschiedlichen Positionen kann mit jeder von zwei Methoden erzielt werden. Bei einer Fertigungsstraße kann sich der Schlitten um einen geringen Betrag bewegen, um die Änderung der Perspektive des Lasertrackers zu gestatten, wie es in **Fig. 5** und **Fig. 6** dargestellt ist. Bei einem ortsfesten Werkzeug kann der Lasertracker bewegt werden, um die Messung von Punkten zu ermöglichen, die sonst uneinsehbar wären.

[0105] Die Umgebungstemperatur des Objekts **500** könnte wegen der Größe des gemessenen Objekts **500** und der eventuell gewünschten Genauigkeiten eine Ursache für einen Messfehler werden, wenn man dem nicht entgegenwirkt. Beispielsweise können sich Metallstrukturen ausdehnen, während sie wärmer werden. Ferner werden die Sollwerte des Objekts (z. B. die CAD-Datei) häufig bei der Temperatur eines geregelten Raums im Bereich von 20 °C bzw. 68 °F eingestellt. Wenn das Messobjekt wärmer als diese Temperatur ist, ist es physisch größer. Es ist eine übliche Praktik, dass auf diese Differenz eingestellt wird, indem ein Skalenfaktor für die Messaufgabe angewandt wird und die Messdaten zur Solltemperatur zurückgestellt werden, wenn das Material und die Temperatur des Teils bekannt sind oder Bezugspunkte gemessen werden und ein Skalenfaktor bei der Umwandlung der Aufgabe angewandt wird.

[0106] Bei einer automatischen Messreihe, bei der Bezugspunkte **26** verwendet und gemessen werden, kann der Bediener durch eine Einrichtung in der Software darauf hinweisen, dass immer ein Skalenfaktor bei der Umwandlung der Aufgabe angewandt wird.

Das Problem bei dieser Praktik besteht darin, dass, wenn die Geometrie des Objekts verändert, gebogen usw. wird, das automatische Skalierverfahren diesen Fehler verringert, indem es die Skala der Aufgabe verändert. Ein zweites Verfahren kann darin bestehen, einen auf dem Objekt angeordneten Materialsensor zu verwenden und den Bediener dazu zu veranlassen, den Ausdehnungskoeffizienten oder Materialtyp einzugeben, so dass das System die Skala auf der Grundlage dieser Eingaben ermitteln kann. Ein bevorzugtes Verfahren, durch welches ein automatisches System arbeiten kann, besteht jedoch darin, die zwei Verfahren zu vergleichen und den Bediener zu warnen, falls eine etwaige Abweichung die gewünschte Systemgenauigkeit überschreitet. Der Bediener würde dann einen oder mehrere Materialensoren auf dem Objekt platzieren. Das System kann die Umgebungstemperatur über einen internen Trackersensor oder einen externen Sensor kontrollieren. Falls die Differenz groß genug ist, dass das Teil sich während der Messreihe ausdehnt oder zusammenzieht, würde das System den Bediener warnen, damit dieser das Objekt in der Umgebung konditionieren lässt und die Messung verzögert, bis sich die Temperatur des Objekts stabilisiert. Die Messaufgabe kann den Materialtyp und/oder den Ausdehnungskoeffizienten des Materials umfassen. Das System misst die Bezugspunkte auf dem Objekt und vergleicht deren Werte mit den Soll- bzw. Nennwerten.

[0107] Das System berechnet während des Umwandlungsverfahrens den Skalenfaktor auf Basis der Umwandlung vom gemessenen zum Sollwert und berechnet die Skala auf Basis des Materialtyps und des Materialtemperatursensors. Falls eine nicht akzeptable Differenz zwischen den zwei Skalenberechnungen besteht, wird der Bediener alarmiert und die Messreihe angehalten. Diese Differenz kann darauf hinweisen, dass sich eine der folgenden Bedingungen ereignet hat und dass das System unter Umständen nicht in der Lage ist, die Aufgabe erwartungsgemäß zu messen: (1) der bzw. die Materialtemperatursensoren und/oder der bzw. die Lufttemperatursensoren können defekt sein und verursachen die falschen Werte; (2) oder die häufigere Ursache kann darin bestehen, dass sich das Objekt bis zu dem geometrischen Punkt verformt hat, wo sich die Bezugspunkte **26** nicht mehr an der Sollposition auf dem Objekt befinden. Dies ist bei laufenden Messreihen relativ schwierig zu erfassen, da die automatische Skalierung dazu neigt, diese Fehler zu verbergen und Unsicherheiten oder Fehler während der gesamten Aufgabe einzubringen. Wenn die Bezugspunkte Fehler aufweisen, verschiebt sich normalerweise die gesamte Aufgabe etwas von der Sollvorgabe und dies kann dazu führen, dass einige Punkte die Bedingungen nicht mehr korrekt erfüllen. Wenn höchste Genauigkeit verlangt wird, kann das System zusätzliche Überprüfungen während der Messreihe durchführen,

um die Ausdehnung oder Schrumpfung des Teils zu minimieren.

[0108] Das System, das relativ am meisten automatisch ist, kann darin bestehen, dass man die Stereokameras **52** auf dem Lasertracker **10** verwendet, um die Tiefe und Position zur Einschätzung der SMRs **26** zu ermitteln. Der Bediener platziert bei einer Ausgestaltung die SMRs **26** auf dem Objekt **500** und visiert sie manuell in der Richtung des Lasertrackers **10** an. Er weist auf das gewünschte Messvolumen hin, indem er gemäß der Aufforderung durch die Software die Azimut- und Zenitachse des Trackers **10** manuell zu den relativ äußeren Punkten des Messvolumens bewegt. Die Software fordert den Bediener auf, den Trackerkopf und den Laserstrahl **46** zu dem am weitesten rechts gelegenen Punkt zu bewegen; danach bewegt der Bediener den Trackerkopf. Sobald die Bewegung für einen vorgegebene Zeitdauer (z. B. zwei Sekunden) ausgeglichen ist, zeichnet das System die Position auf. Die Software fordert den Benutzer auf, den Trackerkopf zu der am weitesten links, oben und unten gelegenen Stelle des beabsichtigten Messvolumens zu bewegen.

[0109] Wenn das angegebene Messvolumen den Bereich des weitesten Sichtfelds des Kamerasystems **52** auf dem Tracker **10** überschreitet, führt der Tracker anschließend einen programmierten Durchlauf bzw. eine programmierte Erhebung des gesamten Messvolumens durch, wobei er SMRs **26** bzw. Ziele sucht. Dieser programmierte Durchlauf bzw. diese programmierte Erhebung wird erforderlichenfalls während der gesamten Messreihe wiederholt, um den Zustand der SMRs zu überwachen oder auf eine Eingabe des Benutzers in das System zu warten. Der Lasertracker **10** schätzt unter Einsatz der Stereokameras **52** die XYZ-Position jedes Punkts innerhalb des Messvolumens ein. Die Software des Messsystems berechnet eine erste Annäherung bei der Transformation zwischen dem Tracker und dem Punktesatz. Der Tracker visiert dann die gewünschten Punkte an. Falls etwaige Punkte von der Messvorrichtung aus unsichtbar sind, weist der Tracker **10** durch Blinken mit den LEDs auf seiner Vorderseite (nicht dargestellt) auf einen Fehler hin und visiert er die Position an, wo das Ziel **26** fehlt, falsch anvisiert ist oder durch ein anderes Objekt verdeckt ist. Der Tracker kann sich in einem vorgegebenen Muster bewegen, um die Position für den Bediener besser erkennbar zu machen. Sobald der Punkt korrigiert ist, kann der Bediener vor dem SMR **26** winken, damit das System über die Messung der Position informiert ist und das Verfahren fortsetzen kann. Der Tracker **10** visiert wieder automatisch jedes Ziel **26** an und benutzt dafür das Kamerasystem **52** oder ein herkömmliches Suchsystem, um jedes Ziel **26** fest anzuvisieren und zu messen.

[0110] Wie im vorangehenden Absatz dargelegt wurde, ist es beim Richten eines Lichtstrahls auf eine Zielposition manchmal vom Gedanken her ein Vorteil, wenn der Lichtstrahl in einem Muster bewegt und nicht in einem vorgegebenen Winkel gerichtet wird. Man betrachte beispielsweise den Fall, in dem eine magnetische Aufnahme von der Oberseite eines Prüfobjekts versetzt ist. In diesem Fall kann ein direkt auf die Zielposition (d. h. den Mittelpunkt des Retroreflektorziels, wenn es in der magnetischen Aufnahme platziert ist) gerichteter Lichtstrahl für den Bediener unsichtbar sein, da er am Objekt vorbeistrahlt, ohne auf irgendetwas in seinem Weg aufzutreffen. Die gewünschte Position des SMR kann sichtbar gemacht werden, indem der Lichtstrahl in einem Muster bewegt wird.

[0111] Wenn der Lasertracker **10** mit einer oder mehreren Weitsichtfeldkameras (WFOV cameras; wide field of view cameras) und einer oder mehreren Schmalsichtfeldkameras (NFOV cameras; narrow field of view cameras) versehen ist, kann das System die allgemeine Position des SMR **26** mit der Weitsichtfeldkamera lokalisieren und den Punkt **26** anvisieren. Falls der Laserstrahl **46** nicht nahe genug den Mittelpunkt des Ziels **26** trifft, um dem Trackingssystem das feste Anvisieren des Ziels zu ermöglichen, können ein oder mehrere der folgenden Verfahren ausgeführt werden. (1) Der Tracker kann die von der bzw. den Weitsichtfeldkameras erhaltene Position erneut auswerten und wieder den ortsfesten Punkt anvisieren. (2) Der Tracker kann zu der bzw. den Schmalsichtfeldkameras umschalten, den optischen Mittelpunkt des Ziels neu berechnen, diesen neu berechneten Mittelpunkt anvisieren und versuchen, das Ziel mit dem Trackingsystem zu erfassen. (3) Wenn der Tracker mit einer optischen Zoomfunktion auf der bzw. den Schmalsichtfeldkameras versehen ist und die Schmalsichtfeldkamera(s) das Ziel nicht sehen kann bzw. können, nachdem von den Weitsichtfeldkameras zu ihnen gewechselt wurde (die Berechnung der Weitsichtfeldkamera-Position bewirkte, dass der Tracker eine Position anvisierte, deren Fehler so groß ist, dass die Schmalsichtfeldkamera(s) den SMR nicht sehen kann bzw. können), kann die Schmalsichtfeldkamera bis zu dem Punkt herauszoomen, wo das Ziel sichtbar ist, und anschließend den optischen Mittelpunkt berechnen und den Tracker korrekt anvisieren lassen.

[0112] Jedes beliebige dieser Verfahren kann wiederholt werden, bis das Ziel wieder erfasst ist; der Vorteil besteht darin, dass die Verwendung der Kombination aus Weit- und Schmalsichtfeldkameras (die hierin als das „Kamerasystem“ bezeichnet werden) schneller sein kann als das herkömmliche Anvisier- und Suchverfahren mit Laserstrahl und Positionssensor.

[0113] Bei anderen Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung kann ein anderes Messverfahren darin bestehen, die Messergebnisse unter der Leitung der Software mit zulässigen Toleranzen zu vergleichen. Der Lasertracker **10** kann die Sollmaße (Maße des CAD-Modells) zwischen Zielpunkten auf einem Werkzeug und den von ihm gemessenen Maßen vergleichen. Wenn der Fehler zwischen einem Sollmaß und einem gemessenen Maß einen Toleranzwert überschreitet, kann der Tracker eine Maßnahme ergreifen. Diese Maßnahme kann so einfach sein wie eine erneute Messung der Punkte oder eine länger andauernde Messung der Punkte. Der Tracker kann auch eine Zwei-Stirnflächen-Messung durchführen, damit sichergestellt wird, dass das Problem nicht mit der Genauigkeit des Trackers zusammenhängt. Alternativ dazu kann die vom Tracker durchgeführte Maßnahme darin bestehen, dem Bediener eine Fehlermeldung zu senden, einen Piepton auszugeben, eine Leuchte blinken zu lassen oder sogar die Fertigungsstraße auszuschalten, bis der Bediener beispielsweise die Stabilität überprüft, eine Einstellung vornimmt oder ein defektes Ziel austauscht.

[0114] Ausgestaltungen der Zwei-Stirnflächen-Prüfung werden in dem an Cramer et al. erteilten US-Patent Nr. 7,327,446 ('446) beschrieben, das in seiner Gesamtheit durch Verweis einbezogen wird. Der Tracker **10** führt eine Zwei-Stirnflächen-Messung von einem oder mehreren Zielpunkten **26** durch. Falls der erhaltene Zwei-Stirnflächen-Fehler den vorgeschriebenen Wert (beispielsweise den im Datenblatt des Herstellers angegebenen) überschreitet, könnte ein weiterer Schritt für den Tracker darin bestehen, ein Kompensationsverfahren durchzuführen, um die Trackerleistung zu verbessern. Es gibt zwei Arten von Kompensationsverfahren, die am häufigsten durchgeführt werden (obwohl andere Verfahren möglich sind). Diese zwei Verfahren sind das in dem Patent '446 beschriebene Verfahren der Selbstkompensation und das Verfahren der Ausrichtungskompensation. Das Verfahren der Ausrichtungskompensation umfasst die Durchführung mehrerer Zwei-Stirnflächen-Messungen durch Ausrichten auf Ziele, die auf dem Fußboden, Ständern oder einem Objekt angebracht sein können. Nach der Erfassung der Daten von der Ausrichtungskompensation korrigiert der Tracker automatisch seine internen Parameter, wodurch seine Messgenauigkeit verbessert wird.

[0115] Ein anderes Messverfahren könnte darin bestehen, die Stabilität der Messungen im Zeitverlauf zu überprüfen. Der Tracker kann beispielsweise einen Zielpunkt auf einem Fußboden und einen anderen Zielpunkt auf dem Werkzeug messen. Falls die relativen Positionen dieser zwei Zielpunkte sich im Verlauf der Messung verändern, kann der Tracker dem Bediener eine Warnung senden. In ähnlicher Weise kann der Tracker den Abstand zwischen drei Punkten auf einem Werkzeug messen und danach am En-

de der Messung zurückkehren und diese drei Punkte erneut messen. Falls sich die relativen Positionen dieser Punkte ändern, wird die Gültigkeit der gesamten Messung in Frage gestellt und können zusätzliche Messungen erforderlich sein.

[0116] Obwohl die Besprechung größtenteils den Fall behandelt hat, in dem die eine oder die mehreren Kameras auf der Nutzlast des Lasertrackers angeordnet sind, versteht sich für den durchschnittlichen Fachmann, dass solche Kameras innen im Lasertracker (z. B. koaxial zu der optischen Achse des Lasertrackers), auf dem Azimutschlitten **14** des Lasertrackers **10** oder gänzlich getrennt vom Lasertracker angeordnet sein können.

[0117] Fig. 6 ist ein Blockschaltbild, das ein Dimensionsmesselektronik-Verarbeitungssystem **1500** zeigt, das ein Lasertrackerelektronik-Verarbeitungssystem **1510**, periphere Elemente **1582**, **1584**, **1586**, einen Computer **1590** und andere vernetzte Komponenten **1600**, die hier als Wolke dargestellt sind, umfasst. Das beispielhafte Lasertrackerelektronik-Verarbeitungssystem **1510** umfasst einen Hauptprozessor **1520**, eine Nutzlastfunktionselektronik **1530**, eine Azimutkodiererelektronik **1540**, eine Zenitkodiererelektronik **1550**, eine Anzeige- und Benutzerschnittstellenelektronik (Anzeige- und BS-Elektronik) **1560**, eine herausnehmbare Speicherhardware **1565**, eine Radiofrequenzidentifikationselektronik (RFID-Elektronik) und eine Antenne **1572**. Die Nutzlastfunktionselektronik **1530** umfasst mehrere Unterfunktionen, zu denen die 6-DOF-Elektronik **1531**, die Kameraelektronik **1532**, die ADM-Elektronik (Absolutdistanzmesserelektronik) **1533**, die Positionsdetektorelektronik (PSD-Elektronik) **1534** und die Nivellierelektronik **1535** gehören. Die meisten Unterfunktionen haben mindestens eine Prozessoreinheit, die beispielsweise ein digitaler Signalprozessor (DSP) oder eine feldprogrammierbare Anordnung von Logik-Gattern (FPGA; field programmable gate array) sein kann. Die Elektronikeinheiten **1530**, **1540**, und **1550** sind gemäß der Darstellung wegen ihrer Position innerhalb des Lasertrackers voneinander getrennt. Bei einer Ausgestaltung sind die Nutzlastfunktionen **1530** in einer Nutzlast angeordnet, während die Azimutkodiererelektronik in der Azimutbaugruppe und die Zenitkodiererelektronik **1550** in der Zenitbaugruppe angeordnet sind.

[0118] Es sind zahlreiche Arten peripherer Geräte möglich, wobei hier jedoch drei derartige Geräte dargestellt sind: ein Temperatursensor **1582**, eine 6-DOF-Sonde **1584** und ein persönlicher digitaler Assistent **1586**, der beispielsweise ein Smartphone sein kann. Der Lasertracker kann mit peripheren Geräten über verschiedene Mittel kommunizieren, die Folgendes umfassen: eine drahtlose Kommunikation über die Antenne **1572**, ein Sichtsystem wie z. B. eine Kamera sowie die Abstands- und Winkelmesswerte

des Lasertrackers, die zu einem zusammenwirkenden Ziel wie z. B. der 6-DOF-Sonde **1584** gesendet werden.

[0119] Ein separater Kommunikationsbus verläuft bei einer Ausgestaltung von dem Hauptprozessor **1520** zu jeder der Elektronikeinheiten **1530**, **1540**, **1550**, **1560**, **1565** und **1570**. Jede Kommunikationsleitung kann beispielsweise drei serielle Leitungen aufweisen, welche die Datenleitung, die Taktleitung und die Rahmenleitung umfassen. Die Rahmenleitung gibt an, ob die Elektronikeinheit auf die Taktleitung achten sollte oder nicht. Falls sie angibt, dass eine Beachtung erfolgen sollte, liest die Elektronikeinheit den aktuellen Wert der Datenleitung bei jedem Taktsignal ab. Das Taktsignal kann beispielsweise einer steigenden Flanke eines Taktimpulses entsprechen. Bei einer Ausgestaltung wird die Information in Form eines Pakets über die Datenleitung übertragen. Bei einer Ausgestaltung umfasst jedes Paket eine Adresse, einen Zahlenwert, eine Datennachricht und eine Prüfsumme. Die Adresse gibt an, wohin die Datennachricht innerhalb der Elektronikeinheit zu leiten ist. Die Stelle kann beispielsweise einer Subroutine des Prozessors in der Elektronikeinheit entsprechen. Der Zahlenwert gibt die Länge der Datennachricht an. Die Datennachricht enthält Daten und Anweisungen, welche die Elektronikeinheit durchführen muss. Die Prüfsumme ist ein Zahlenwert, der dazu dient, die Möglichkeit zu minimieren, dass Fehler über die Kommunikationsleitung übertragen werden.

[0120] Der Hauptprozessor **1520** sendet bei einer Ausgestaltung Informationspakete über den Bus **1610** zu der Nutzlastfunktionselektronik **1530**, über den Bus **1611** zu der Azimutkodiererelektronik **1540**, über den Bus **1612** zu der Zenitkodiererelektronik **1550**, über den Bus **1613** zu der Anzeige- und BS-Elektronik **1560**, über den Bus **1614** zu der herausnehmbaren Speicherhardware **1565** und über den Bus **1616** zu der RFID- und Drahtlos-Elektronik **1570**.

[0121] Bei einer Ausgestaltung sendet der Hauptprozessor **1520** auch gleichzeitig einen Synchronisationsimpuls (Synch-Impuls) über den Synchronisationsbus **1630** zu jeder der Elektronikeinheiten. Der Synchronisationsimpuls stellt eine Möglichkeit zur Synchronisation von Werten bereit, die von den Messfunktionen des Lasertrackers erfasst wurden. Beispielsweise zwischenspeichern die Azimutkodiererelektronik **1540** und die Zenitelektronik **1550** ihre Kodiererwerte, sobald der Synchronisationsimpuls empfangen wird. In ähnlicher Weise zwischenspeichert die Nutzlastfunktionselektronik **1530** die Daten, die von der in der Nutzlast enthaltenen Elektronik erfasst wurden. Der 6-DOF-, die ADM- und die Positionsdetektor-Elektronik zwischenspeichern alle beim Senden des Synchronisationsimpulses die Daten. In den meisten Fällen erfassen die Kamera und der Neigungsmesser Daten bei einer langsameren Rate

als der Synchronisationsimpulsrate, doch sie können Daten bei Vielfachen der Periodendauer des Synchronisationsimpulses zwischenspeichern.

[0122] Das Lasertracker-elektronik-Verarbeitungssystem **1510** kann mit einem externen Computer **1590** kommunizieren oder es kann die Berechnungs-, Anzeige- und Benutzerschnittstellen-Funktionen im Lasertracker bereitstellen. Der Lasertracker kommuniziert über eine Kommunikationsverbindung **1606**, die beispielsweise eine Ethernet-Leitung oder eine drahtlose Verbindung sein kann, mit dem Computer **1590**. Der Lasertracker kann auch über eine Kommunikationsverbindung **1602**, die ein oder mehrere elektrische Kabel wie beispielsweise Ethernet-Kabel oder ein oder mehrere drahtlose Verbindungen umfassen könnte, mit anderen Elementen **1600**, die durch die Wolke repräsentiert sind, kommunizieren. Ein Beispiel für ein Element **1600** ist ein anderes dreidimensionales Prüfgerät – z. B. ein Gelenkarm-KMG –, das durch den Lasertracker umgesetzt werden kann. Eine Kommunikationsverbindung **1604** zwischen dem Computer **1590** und den Elementen **1600** kann drahtgebunden (z. B. Ethernet) oder drahtlos sein. Ein Bediener, der an einem Ferncomputer **1590** sitzt, kann über eine Ethernet- oder eine drahtgebundene Leitung, die wiederum über eine Ethernet- oder drahtlose Leitung an den Hauptprozessor **1520** angeschlossen ist, eine Verbindung mit dem Internet herstellen, das durch die Wolke **1600** repräsentiert ist. Auf diese Weise kann ein Benutzer die Tätigkeit eines entfernten Lasertrackers steuern.

[0123] Fig. 7 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **700** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System umfasst. Schritt **705** besteht darin, ein System bereitzustellen, das eine Sammlung von Retroreflektorzielen und einen Lasertracker umfasst. Die Sammlung von Retroreflektorziele umfasst mindestens drei Retroreflektorziele, und zwar ein erstes Ziel, ein zweites Ziel und ein drittes Ziel, wobei diese Ziele nicht in einer geraden Linie ausgerichtet sind. Der Lasertracker befindet sich in einem ersten Bezugssystem, das in Fig. 1, Fig. 5 und Fig. 6 als Bezugssystem **30** dargestellt ist. Der Ursprung des Bezugssystems des Lasertrackers befindet sich bei einer Ausgestaltung an einem Kardanpunkt **22** des Lasertrackers. Die x-, y- und z-Achse des ersten Bezugssystems sind in Bezug auf die Trackerumgebung ortsfest, werden üblicherweise aber mit den Trackereigenschaften wie beispielsweise Drehrichtungen in Beziehung gesetzt. Der Lasertracker umfasst eine Struktur, eine erste Lichtquelle, einen Absolutdistanzmesser, ein erstes Winkelmessgerät, ein zweites Winkelmessgerät, ein Trackingsystem, eine erste Kamera, eine zweite Lichtquelle und einen Prozessor. Die Struktur ist um eine erste Achse und eine zweite Achse drehbar. Die erste Achse ist bei einer Ausgestaltung eine Azimutachse und die zweite Achse ist eine Zenitachse. Bei einer Ausgestaltung ist

die Struktur eine Nutzlast, die optische Komponenten hält. Bei einer anderen Ausgestaltung ist die Struktur ein Spiegel, der Licht umlenkt, um es aus dem Lasertracker heraus in eine gewünschte Richtung zu leiten. Die erste Lichtquelle, die einen ersten Lichtstrahl erzeugt, kann ein Laser, eine Superlumineszenzdiode oder ein anderer Lichtquellentyp sein. Der Absolutdistanzmesser wirkt mit der ersten Lichtquelle zusammen, um eine Absolutdistanz zu messen. Das Licht von der ersten Lichtquelle kann verwendet werden, um die Zeit zu messen, die das Licht benötigt, das sich mit Lichtgeschwindigkeit durch Luft zu einem Retroreflektorziel und zurück zum Tracker ausbreitet. Das Verfahren zum Messen der Laufzeit kann ein Phasenmessverfahren, ein Impulslaufzeitverfahren oder irgendeinen anderen Typ eines Absolutdistanzmessverfahrens umfassen. Bei einer Ausgestaltung können das erste und das zweite Winkelmessgerät Winkelkodierer sein, die die Azimut- und Zenitwinkel messen. Das Trackingsystem wird verwendet, um den ersten Lichtstrahl zentriert auf einem Retroreflektorziel zu halten. Ein Retroreflektor hat eine Position, um welche herum ein Lichtstrahl reflektiert wird. Bei einem Würfecken-Retroreflektor wird Licht beispielsweise symmetrisch um den Scheitelpunkt der Würfecke herum reflektiert, der der Punkt ist, um welchen herum sich die drei zueinander senkrechten Oberflächen schneiden. In vielen Fällen ist der Punkt, an welchem Licht symmetrisch reflektiert wird, in einer Kugel zentriert. Bei einem Typ eines sphärisch montierten Retroreflektors befindet sich der Scheitelpunkt einer luftoffenen Würfecke beispielsweise am Mittelpunkt einer Stahlkugel. In diesem Fall hält das Trackingsystem des Lasertrackers den ersten Lichtstrahl zentriert auf einem Mittelpunkt des Retroreflektorziels. Ein Retroreflektorziel ist allerdings nicht unbedingt in einer Kugel zentriert. Ein Retroreflektor kann vielmehr direkt an einem Prüfobjekt befestigt werden, ohne dass er in einer Kugel positioniert wird. In diesem Fall soll sich der Begriff „Mittelpunkt“ auf den Punkt des Retroreflektors beziehen, um welchen herum der erste Lichtstrahl symmetrisch reflektiert wird, sogar wenn er sich nicht auf einen Mittelpunkt eines etwaigen Objekts bezieht. Das Trackingsystem des Lasertrackers kann einen Teil des reflektierten Lichts zentriert auf einem Positionsdetektor im Lasertracker halten, wobei der Positionsdetektor beispielsweise ein positionssensitiver Detektor oder eine photosensitive Anordnung ist. Der Lasertracker umfasst eine erste Kamera, die bei einer Ausgestaltung auf einer Außenfläche einer Nutzlast eines Trackers angebracht ist, wobei die Nutzlast in der Lage ist, sich um die erste Achse und eine zweite Achse zu drehen. Die erste Kamera kann bei anderen Ausgestaltungen innen im Lasertracker angeordnet sein und eine außerhalb des Lasertrackers gelegene Szene beobachten, wobei die Szene um eine optische Achse des Lasertrackers herum zentriert ist. Bei anderen Ausgestaltungen kann die erste Kamera an anderen Positionen relativ auf oder in dem Lasertracker angeord-

net sein. Die erste Kamera umfasst eine erste Linse und eine erste photosensitive Anordnung. Die erste Linse erzeugt ein Bild auf der ersten photosensitiven Anordnung von außerhalb des Lasertrackers befindlichen Objekten. Eine zweite Lichtquelle, die in den meisten Fällen nahe der ersten Kamera angeordnet ist, emittiert einen zweiten Lichtstrahl. Dieses Licht verläuft zu den Retroreflektorzielen, die ein Teil einer Sammlung von Retroreflektorzielen sind. Ein Teil des zweiten Lichtstrahls wird von den Retroreflektoren reflektiert und kehrt zur ersten Kamera zurück, welche das reflektierte Licht auf der ersten photosensitiven Anordnung abbildet. Ein Prozessor kann in dem Lasertracker, in einer begleitenden elektrischen Einheit **50**, in einer externen Einheit **60** oder in einer Kombination von Positionen angeordnet sein. Der Prozessor kann eine Kombination aus Verarbeitungselementen umfassen, welche Mikroprozessoren, digitale Verarbeitungseinheiten, feldprogrammierbare Anordnungen von Logik-Gattern und Speicher umfassen. Der Prozessor ist derart konfiguriert, dass er den Lasertracker bedient.

[0124] Schritt **710** besteht darin, eine Liste von Sollkoordinaten für das erste Ziel, das zweite Ziel, das dritte Ziel und mindestens einen Zusatzpunkt zu speichern. Die Sollkoordinaten sind dreidimensionale Koordinaten, die in einem zweiten Bezugssystem vorgegeben sind. Das zweite Bezugssystem ist einem Prüfobjekt oder einer Struktur, an welcher das Prüfobjekt befestigt ist, zugeordnet. In **Fig. 1**, **Fig. 5** und **Fig. 6** ist ein Beispiel für ein zweites Bezugssystem **40** dargestellt. Im Allgemeinen können die x-, y- und z-Achse des zweiten Bezugssystems in Bezug auf die x-, y- und z-Achse des ersten Bezugssystems gedreht werden.

[0125] Schritt **715** besteht darin, auf der ersten photosensitiven Anordnung einen Teil des durch den zweiten Lichtstrahl emittierten und von dem ersten Ziel, dem zweiten Ziel und dem dritten Ziel reflektierten Lichts zu erfassen.

[0126] Schritt **720** besteht darin, auf der photosensitiven Anordnung Lichtpunktpositionen aus dem Teil des von dem ersten Ziel, dem zweiten Ziel und dem dritten Ziel reflektierten Lichts zu erhalten. Die Lichtpunktpositionen können beispielsweise Flächenschwerpunkte der Lichtpunkte für das erste Ziel, das zweite Ziel und das dritte Ziel sein.

[0127] Schritt **725** besteht darin, eine Übereinstimmung zwischen einer ersten Lichtpunktposition, einer zweiten Lichtpunktposition und einer dritten Lichtpunktposition auf der ersten photosensitiven Anordnung und den Sollkoordinaten des ersten Ziels, des zweiten Ziels bzw. des dritten Ziels zu ermitteln. Eine derartige Übereinstimmung kann beispielsweise auf verschiedene Weisen gemäß den in den nachfolgenden Ansprüchen beschriebenen Verfahren er-

halten werden. Ein derartiges Verfahren umfasst das Beobachten der möglichen Übereinstimmungen in einem zulässigen Orientierungsbereich des zweiten Bezugssystems mit dem ersten Bezugssystem. Ein anderes Verfahren betrifft die Anwendung eines Triangulationsverfahrens mit zwei Kameras (Stereokameras), die auf dem Lasertracker angeordnet sind. Ein weiteres Verfahren betrifft die Verwendung einer einzigen Trackerkamera, wobei der Tracker jedoch zu zwei verschiedenen Orientierungen gedreht wird. Mit diesem Verfahren können die zwei auf der photosensitiven Anordnung der Kamera erhaltenen Bilder dazu benutzt werden, die Übereinstimmung zu ermitteln. Es können auch Messungen mit der ersten Kamera im Vor- und Rückblickmodus durchgeführt werden und die auf der ersten photosensitiven Anordnung erhaltenen Bilder können zur Ermittlung der Übereinstimmung verwendet werden. Die relativen Positionen des ersten und zweiten Bezugssystems können verändert werden und das resultierende Lichtpunktmuster auf der ersten photosensitiven Anordnung kann zur Ermittlung der Übereinstimmung verwendet werden. Beispielsweise kann das zweite Bezugssystem einem wie in **Fig. 5** und **Fig. 6** dargestellten beweglichen Schlitten derart zugeordnet werden, dass die erste Kamera zwei verschiedene Bilder wie an unterschiedlichen relativen Positionen des ersten und zweiten Bezugssystems erhalten kann. Bei einer Ausgestaltung bezieht ein allgemeiner mathematischer Ansatz, der zur Ermittlung einer Übereinstimmung zwischen dem ersten, zweiten und dritten Lichtpunkt auf einer photosensitiven Anordnung und den Sollkoordinaten des ersten, zweiten und dritten Ziels durchgeführt werden kann, die Konstruktion einer Transformationsmatrix zum Transformieren der Koordinaten des Bezugssystems 2 in das Bezugssystem 1 oder umgekehrt ein, wie es vorstehend und nachfolgend in den Ansprüchen besprochen wird. Für ein von einer photosensitiven Anordnung erhaltenes Bild können die Punkte auf der Anordnung von einer Stelle auf der photosensitiven Anordnung durch ein perspektivisches Zentrum der Linse und in den Objektraum projiziert werden. Auf diese Weise können die Lichtpunkte auf einer ersten photosensitiven Anordnung in Winkel umgewandelt werden. Wenn eine zweite photosensitive Anordnung mit einem bekannten Abstand zwischen der ersten und zweiten photosensitiven Anordnung zur Verfügung steht, kann ein Triangulationsverfahren eingesetzt werden, um die Position jedes der drei Ziele mit Verfahren, die dem Fachmann weithin bekannt sind, zu ermitteln. Falls lediglich eine einzige Kamera zur Verfügung steht, kann dennoch ein Triangulationsverfahren angewendet werden, indem man Vor- und Rückblickbilder erhält, da beim Umschalten vom Vor- in den Rückblickmodus die Position der Kamera zur entgegengesetzten Seite der optischen Achse des Trackers umgedreht wird. Der Abstand zwischen den Kamerapositionen im Vor- und Rückblickmodus ist bekannt, so dass das Verfahren einem Stereotriangulationsver-

fahren äquivalent ist. In ähnlicher Weise, wobei die Trackerstruktur jedoch in zwei verschiedenen Winkeln (um die erste Achse, die zweite Achse oder beide) gedreht wird, kann man zwei verschiedene Ansichten erhalten und ein Verfahren einsetzen, das einem Triangulationsverfahren ähnlich ist, das vorstehend und in '033 erläutert wird. Das Verfahren mit Einschränkungen, bei dem die ungefähren relativen Orientierungen zwischen dem ersten und zweiten Bezugssystem bekannt sind, gestattet normalerweise keine direkte Lösung für jede der dreidimensionalen Koordinaten des ersten, zweiten und dritten Ziels; in den meisten Fällen ermöglicht es jedoch, dass Positionen gut genug lokalisiert werden können, um eine Übereinstimmung zwischen den drei Lichtpunkten und den Sollkoordinaten des ersten, zweiten und dritten Ziels zu konstruieren.

[0128] Schritt **730** besteht darin, den ersten Lichtstrahl auf das erste Ziel basierend zumindest teilweise auf den Sollkoordinaten des ersten Ziels und der ersten Lichtpunktposition zu richten und die dreidimensionalen Koordinaten des ersten Ziels unter Verwendung des Absolutdistanzmessers, des ersten Winkelmessgeräts und des zweiten Winkelmessgeräts zu messen. Wie bei Schritt **720** erläutert wurde, ergeben einige der Verfahren zum Erhalt von Übereinstimmungen dreidimensionale Koordinaten in Bezug auf das erste Bezugssystem derart, dass das Richten des Laserstrahls auf das erste, zweite und dritte Ziel unkompliziert ist. In dem Fall, in dem die Richtungen auf den Einschränkungen zwischen dem ersten und zweiten Bezugssystem basieren, sind die optimalen Richtungen zu dem ersten, zweiten und dritten Ziel unter Umständen nicht mit hoher Präzision bekannt; durch die Annahme eines Abstands zum Ziel lässt sich jedoch eine Richtung erhalten. Die resultierende Richtung ist im Allgemeinen nahe genug an der optimalen Richtung, so dass das Ziel beispielsweise mittels der in den Ansprüchen nachfolgend beschriebenen Verfahren erfasst werden kann. Die gemessenen dreidimensionalen Koordinaten befinden sich in dem ersten Bezugssystem, welches das Bezugssystem des Lasertrackers ist.

[0129] Schritt **735** ist der gleiche wie Schritt **730**, nur dass er auf das zweite Ziel anstelle des ersten Ziels angewendet wird. Schritt **740** ist der gleiche wie Schritt **735**, nur dass er auf das dritte Ziel anstelle des ersten Ziels angewendet wird.

[0130] Schritt **745** besteht darin, dreidimensionale Koordinaten des mindestens einen Zusatzpunkts in dem ersten Bezugssystem basierend zumindest teilweise auf den gemessenen dreidimensionalen Koordinaten des ersten Ziels, des zweiten Ziels, des dritten Ziels und den Sollkoordinaten des mindestens einen Zusatzpunkts zu ermitteln. Dies ist ein mathematischer Schritt, der beispielsweise durchgeführt werden kann, indem eine Transformationsmatrix erhalten

wird, die die Umrechnung einer beliebigen Sollkoordinate (der dreidimensionalen Koordinate im zweiten Bezugssystem) in eine dreidimensionale Koordinate im ersten Bezugssystem (Trackerbezugssystem) ermöglicht. Die in den Schritten **725**, **730** und **735** erhaltenen dreidimensionalen Koordinaten reichen aus, um die Transformationsmatrix mit Verfahren zu ermitteln, die dem Fachmann weithin bekannt sind.

[0131] Schritt **750** besteht darin, die dreidimensionalen Koordinaten des mindestens einen Zusatzpunkts zu speichern. Die Koordinaten können zum Beispiel in elektronisch lesbaren Medien, einem Computerspeicher oder einem Mikroprozessor gespeichert werden. Schritt **755** ist das Ende des Verfahrens mit den Schritten **700**.

[0132] Fig. 8 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **800** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **800** folgen an Punkt A, der in Fig. 7 als „755“ gekennzeichnet ist. Schritt **805** besteht darin, einen Lichtstrahl auf den mindestens einen Zusatzpunkt zu richten. Der Lasertracker kann diesen Schritt automatisch durchführen.

[0133] Schritt **810** besteht darin, ein ausgewähltes Retroreflektorziel derart zu positionieren, dass es den ersten Lichtstrahl auffängt. Eine Möglichkeit dafür besteht darin, dass der Bediener ein in der Hand gehaltenes ausgewähltes Retroreflektorziel in den ersten Lichtstrahl bewegt. Eine zweite Möglichkeit dafür besteht darin, das ausgewählte Retroreflektorziel auf einer Aufnahme zu platzieren, also beispielsweise einer magnetischen Aufnahme, die auf einem Prüfbjekt angebracht ist. Wenn die dreidimensionalen Koordinaten des mindestens einen Zusatzpunkts genau genug bekannt sind, wird der erste Laserstrahl gut genug ausgerichtet, so dass zumindest ein Teil des Strahls von der lichtdurchlässigen Öffnung des ausgewählten Retroreflektorziels erfasst wird.

[0134] Schritt **815** besteht darin, dass der erste Lichtstrahl auf den Mittelpunkt des ausgewählten Retroreflektorziels gerichtet wird. Dieser Schritt wird von dem Trackingsystem des Lasertrackers durchgeführt. Schritt **820** besteht darin, dreidimensionale Koordinaten des ausgewählten Retroreflektorziels unter Verwendung des Absolutdistanzmessers, des ersten Winkelmessgeräts und des zweiten Winkelmessgeräts zu messen. Das Verfahren **800** endet mit Schritt **825**.

[0135] Fig. 9 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **900** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **900** folgen an Punkt A, der in Fig. 7 als „755“ gekennzeichnet ist. Schritt **905** besteht darin, den ersten Lichtstrahl auf den mindestens einen Zusatzpunkt zu richten.

[0136] Schritt **910** besteht darin, den ersten Lichtstrahl in einem ersten Muster im Raum zu bewegen, wobei das erste Muster dem mindestens einen Zusatzpunkt nahe ist. Ein solches erstes Muster wird normalerweise als „Suchmuster“ bezeichnet. Als Beispiel kann der Lichtstrahl an einer Anfangsposition beginnen und sich dann in einem Spiralmuster nach außen bewegen.

[0137] Schritt **915** besteht darin, den Lichtstrahl mit dem Trackingsystem des Lasertrackers zu erfassen. Dies kann durchgeführt werden, wenn ein von einem Retroreflektor reflektierter Teil des ersten Lichtstrahls auf einen Positionsdetektor auftrifft. Diese Erfassung von Licht durch den Positionsdetektor weist darauf hin, dass der erste Lichtstrahl von der lichtdurchlässigen Öffnung des Retroreflektorziels aufgefangen wurde.

[0138] Schritt **920** besteht darin, dass der erste Lichtstrahl auf einen Mittelpunkt des ausgewählten Retroreflektorziels gerichtet wird. Wie oben erläutert wurde, bezieht sich der Begriff „Mittelpunkt“ in diesem Zusammenhang auf eine Position relativ zu dem Retroreflektorziel, um welche herum Lichtstrahlen symmetrisch reflektiert werden. Der Begriff „Mittelpunkt“ bezieht sich in diesem Zusammenhang nicht unbedingt auf einen physischen Mittelpunkt des Retroreflektorziels.

[0139] Schritt **925** besteht darin, dreidimensionale Koordinaten des ausgewählten Retroreflektorziels unter Verwendung des Absolutdistanzmessers, des ersten Winkelmessgeräts und des zweiten Winkelmessgeräts zu messen. Das Verfahren von Schritt **900** endet mit Schritt **930**.

[0140] Fig. 10 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **1000** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **1000** folgen an einem Punkt A, der in Fig. 7 als „755“ gekennzeichnet ist. Schritt **1005** besteht darin, eine dritte Kamera und eine vierte Lichtquelle bereitzustellen, wobei die dritte Kamera ein drittes Linsensystem und eine dritte photosensitive Anordnung umfasst, wobei die dritte Kamera ein Sichtfeld aufweist, das kleiner als das Sichtfeld der ersten Kamera ist, und wobei die vierte Lichtquelle einen vierten Lichtstrahl bereitstellt.

[0141] Schritt **1010** besteht darin, auf der dritten photosensitiven Anordnung einen Teil des durch die vierte Lichtquelle emittierten und von dem ersten Ziel, dem zweiten Ziel und dem dritten Ziel reflektierten Lichts aufzunehmen. Die Bilder des ersten Ziels, des zweiten Ziels und des dritten Ziels wurden bereits mit der ersten Kamera erhalten. Es werden nun mit einer dritten Kamera zusätzliche Messungen erfasst. In einigen Fällen kann die von der ersten Kamera erhaltene Information dazu verwendet werden, den Lasertracker zu einer Position zu lenken, die der zweiten

Kamera die Möglichkeit gibt, das erste, zweite und dritte Ziel zu beobachten.

[0142] Schritt **1015** besteht darin, auf der photosensitiven Anordnung Lichtpunktpositionen aus dem Teil des von jedem von dem ersten Ziel, dem zweiten Ziel und dem dritten Ziel reflektierten Lichts zu erhalten. Derartige Lichtpunktpositionen können beispielsweise als Flächenschwerpunkte von jedem der Lichtpunkte erhalten werden.

[0143] Schritt **1020** besteht darin, dass eine Übereinstimmung zwischen einer ersten Lichtpunktposition, einer zweiten Lichtpunktposition und einer dritten Lichtpunktposition auf der dritten photosensitiven Anordnung und den Sollkoordinaten des ersten Ziels, des zweiten Ziels bzw. des dritten Ziels ermittelt wird. Die Verfahren zur Ermittlung einer Übereinstimmung sind die gleichen wie die vorstehend besprochenen, wobei aber eine relativ genauere Information von der dritten Kamera bereitgestellt wird, die ein schmaleres Sichtfeld als die erste Kamera aufweist. Das Verfahren **1000** endet mit Schritt **1025**.

[0144] Fig. 11 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **1100** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **1100** folgen an einem Punkt A, der in Fig. 7 als „755“ gekennzeichnet ist. Schritt **1105** besteht darin, den ersten Lichtstrahl auf eine Vielzahl von Zusatzpunkten zu richten, wobei die Vielzahl von Zusatzpunkten den ersten Zusatzpunkt umfasst und wobei die Vielzahl von Zusatzpunkten auf Maßnahmen hinweist, die von einem Bediener durchzuführen sind. Auf diese Weise ist der Lasertracker in der Lage, die Maßnahme eines Bedieners zu führen.

[0145] Fig. 12 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **1200** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **1200** folgen an einem Punkt B, der in Fig. 8 als „825“ gekennzeichnet ist. Schritt **1205** besteht darin, dass gemäß einem Prüfplan gemessen wird. Ein typischer Prüfplan kann eine Vielzahl von zu messenden Punkten umfassen. Einige der Punkte können sich auf der Oberfläche eines Objekts befinden, während andere Punkte in Aufnahmen liegen können. Einige der zu messenden Punkte können einzeln gemessen werden, während andere Punkte in einem Abtastmuster über vorgesehenen Oberflächen gemessen werden.

[0146] Fig. 13 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **1300** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **1300** folgen an einem Punkt A, der in Fig. 7 als „755“ gekennzeichnet ist. Schritt **1305** besteht darin, den ersten Lichtstrahl auf den mindestens einen Zusatzpunkt zu richten. Schritt **1310** besteht darin, einen Montagevorgang an einer Position des ersten Lichtstrahls durchzuführen. Ein Montagevorgang kann das Bohren, Verschrau-

ben, Schleifen, Spachteln, Fräsen oder irgendeinen anderen Vorgang umfassen, der für die Modifikation des Objekts oder die Hinzufügung zum Objekt beabsichtigt ist. Der erste Lichtstrahl könnte beispielsweise auf eine Position auf dem Objekt hinweisen, wo ein Loch gebohrt werden muss.

[0147] Fig. 14 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **1400** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **1400** folgen an einem Punkt B, der in **Fig. 8** als „**825**“ gekennzeichnet ist. Schritt **1405** besteht darin, einen Prüfplan mit durch den Lasertracker zu messenden Prüfpunkten bereitzustellen. Schritt **1410** besteht darin, mindestens ein Retroreflektorziel an einem Prüfobjekt zu befestigen. Ein solches Retroreflektorziel dient quasi als eine Verschiebungsstatue, die eine Stabilitätsprüfung des Systems gestattet. Schritt **1415** besteht darin, dass eine maximal zulässige Bewegung für die dreidimensionalen Koordinaten des mindestens einen an dem Prüfobjekt befestigten Retroreflektorziels bereitgestellt wird. Die maximal zulässige Bewegung ist ein Zahlenwert, der von dem Benutzer basierend auf der notwendigen Stabilität bereitgestellt wird. Schritt **1020** besteht darin, die dreidimensionalen Koordinaten des mindestens einen an dem Prüfobjekt befestigten Retroreflektorziels zu messen, wobei das Messen zu einem ersten Zeitpunkt und zu einem zweiten Zeitpunkt durchgeführt wird. Schritt **1025** besteht darin, eine erste Änderung der dreidimensionalen Koordinaten des mindestens einen Retroreflektorziels von dem ersten Zeitpunkt zu dem zweiten Zeitpunkt zu ermitteln. Bei einem hochstabilen System ändern sich diese Koordinaten um einen geringen Betrag. Falls entweder das Prüfobjekt oder der Lasertracker angestoßen wird, können sich die Messungen plötzlich verändern, wodurch Fehler eingebracht werden. Wenn sich die Umgebungstemperatur signifikant ändert, können in ähnlicher Weise die Maße des Objekts verändert werden, kann die Leistung des Trackers nachlassen oder können sich die Eigenschaften der Luft, durch welche sich der erste Lichtstrahl ausbreitet, ändern. Jede beliebige dieser Änderungen kann die Genauigkeit der Messungen beeinträchtigen. Schritt **1030** besteht darin, eine Maßnahme durchzuführen, wenn die erste Änderung die maximal zulässige Bewegung überschreitet. Die Maßnahme kann das Messen von mindestens drei Retroreflektoren auf dem Prüfobjekt umfassen, um die dreidimensionalen Koordinaten der Prüfpunkte wiederherzustellen. Sie kann auch das Benachrichtigen eines Bedieners umfassen, dass die erste Änderung die maximal zulässige Bewegung überschritten hat. Dies könnte den Bediener dazu auffordern, den Lasertracker erneut zu kompensieren, die Stabilität des Prüfobjekts und des Lasertrackers zu kontrollieren oder andere Schritte durchzuführen. Das Verfahren **1400** endet bei Schritt **1435**.

[0148] Fig. 15 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **1700** in einer Ausgestaltung zum Messen mit einem System zeigt. Die Schritte **1700** folgen an einem Punkt A, der in **Fig. 7** als „**755**“ gekennzeichnet ist. Schritt **1705** besteht darin, eine maximal zulässige Abweichung bereitzustellen. Diese ist ein vom Benutzer vorgesehener Wert. Schritt **1710** besteht darin, dass ein Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE; coefficient of thermal expansion) für das Prüfobjekt sowie eine Bezugstemperatur bereitgestellt werden. Als Beispiel kann, wenn das Material Stahl ist, ein Wärmeausdehnungskoeffizient von 11, 5 Mikrometern/Meter/°C vorgesehen werden. Die Bezugstemperatur könnte der weithin verwendete Wert von 20 °C sein. Schritt **1715** besteht darin, einen ersten Bezugsretroreflektor und einen zweiten Bezugsretroreflektor auf dem Prüfobjekt zu positionieren, wobei ein erster Abstand zwischen dem ersten Bezugsretroreflektor und dem zweiten Bezugsretroreflektor bei der Bezugstemperatur besteht. Schritt **1720** besteht darin, dass eine Temperatur des Prüfobjekts gemessen wird. Schritt **1725** besteht darin, eine erste Temperaturdifferenz durch Subtrahieren der Bezugstemperatur von der gemessenen Temperatur des Prüfobjekts zu berechnen. Schritt **1730** besteht darin, einen Skalenfaktor durch Multiplizieren der ersten Temperaturdifferenz mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten zu berechnen. Dies ergibt beispielsweise einen Wert in der Einheit Mikrometer/Meter. Das bedeutet, dass der Skalenfaktor eine dimensionslose Größe ist. Schritt **1735** besteht darin, die 3D-Koordinaten des ersten und zweiten Bezugsretroreflektors unter Verwendung des Absolutdistanzmessers, des ersten Winkelmessgeräts und des zweiten Winkelmessgeräts zu messen. Schritt **1740** besteht darin, einen zweiten Abstand, der sich von den gemessenen 3D-Koordinaten des ersten Bezugsretroreflektors zu den gemessenen 3D-Koordinaten des zweiten Bezugsretroreflektors erstreckt, zu berechnen. Schritt **1745** besteht darin, einen dritten Abstand durch Subtrahieren des ersten Abstands von dem zweiten Abstand zu berechnen. Schritt **1750** besteht darin, einen vierten Abstand durch Multiplizieren des ersten Abstands mit dem Skalenfaktor zu berechnen. Schritt **1755** besteht darin, einen Abweichungswert durch Subtrahieren des dritten Abstands von dem vierten Abstand zu berechnen. Schritt **1760** besteht darin, dass eine Maßnahme durchgeführt wird, wenn der Abweichungswert die maximal zulässige Abweichung überschreitet, wobei die Maßnahme entweder das Ausgeben eines Alarms oder das Messen der Koordinaten von zumindest einigen Retroreflektorzielen aus der Sammlung von Retroreflektorzielen ist, und, aus diesen Daten, das Wiederherstellen eines Bezugssystems für ein Objekt ist. Der Zweck der Schritte **1700** besteht darin, die Beständigkeit der wärmebedingten Längenkompensationen gegenüber den direkt gemessenen Längendifferenzen zu überprüfen. Wenn die Längenänderungen nicht übereinstimmen, besteht die Möglichkeit, dass die Tem-

peraturmessung ungültig ist, der Wert des Wärmeausdehnungskoeffizienten nicht korrekt angegeben ist oder ein anderes Problem vorliegt. Ist dieses Problem identifiziert, können zusätzliche Schritte durchgeführt werden.

[0149] Es kann manchmal vorkommen, dass ein Lasertracker nicht in der Lage ist, ein Retroreflektorziel nahe einem vorgesehenen Prüfpunkt zu finden. Dies kann manchmal die Folge einer Unbeständigkeit bei möglichen Prüfpunktpositionen sein. In anderen Fällen kann dies die Folge einer unerwarteten Änderung des Prüfaufbaus sein. Wenn keine Vorkehrungen getroffen werden, ist es im letzteren Fall möglich, dass der Lasertracker seinen Lichtstrahl **46** derart führt, dass dieser einen anderen Retroreflektor als beabsichtigt fest anvisiert. Ein Weg zur Umgehung dieses Problems besteht darin, für jede Prüfposition eine Akzeptanzregion zur Verfügung zu stellen. Wenn der Retroreflektor nicht in dieser Akzeptanzregion gefunden wird, wird das Prüfverfahren angehalten, bis ein weiterer Schritt durchgeführt wird. Man kann eine oder mehrere Kameras mit gegebenenfalls einer oder mehreren Lichtquellen benutzen, um zu ermitteln, ob ein Retroreflektorziel in einer Akzeptanzregion liegt.

[0150] Fig. 16A zeigt eine vergrößerte Darstellung eines Teils von Fig. 5A. Ein Prüfplan hat den Lasertracker **10** angewiesen, jeden der sechs Retroreflektoren **26** zu messen. In Fig. 16A wird jeder der Retroreflektoren durch den Lichtstrahl **46** gefunden und daher kann die Prüfung beendet werden.

[0151] Fig. 16B veranschaulicht eine Situation, in der ein Retroreflektor unbeabsichtigt in einer der magnetischen Aufnahmen weggelassen wurde. Bei dieser Ausgestaltung gab der Prüfplan vor, dass der Retroreflektor in einer Akzeptanzregion **1610** anzuordnen war. In diesem Fall befinden sich die benachbarten Retroreflektoren **26B**, **26C** außerhalb der Akzeptanzzone. Infolgedessen wird der Prüfplan angehalten, bis eine weitere Maßnahme erfolgt. Bei einigen Ausgestaltungen kann ein Alarm eingeschaltet werden oder es können andere Maßnahmen in einem Versuch durchgeführt werden, das Problem mit dem fehlenden Retroreflektor zu lösen.

[0152] Fig. 16C veranschaulicht eine andere Ausgestaltung, bei der ein Retroreflektor nicht durch den Tracker **10** gefunden werden kann. Der Retroreflektor **26A** ist bei dieser Ausgestaltung gegenüber dem Lichtweg des Lichtstrahls **46** ge- bzw. verdreht. Der Winkel des Retroreflektors **26A** relativ zum Lichtstrahl **46** ist zu groß, als dass dieser vom Retroreflektor **26A** zum Lasertracker zurückkehren könnte. Da sich die in der Nähe gelegenen Retroreflektoren **26B**, **26C** außerhalb der Akzeptanzregion **1610** befinden, hält die Prüfung an, bis eine Korrekturmaßnahme erfolgt.

[0153] Fig. 16D veranschaulicht eine Ausgestaltung, bei der ein Hindernis vor den Lichtstrahl **46** des Lasertrackers **10** bewegt wird. Bei dieser Ausgestaltung blockiert ein Objekt **1620** das Licht für drei der sechs Retroreflektoren **26**. Die Akzeptanzregion **1610** ist zu klein, als dass sie den in der Nähe gelegenen Retroreflektor **26D** umfassen könnte. Demzufolge hält das Prüfverfahren an, bis eine weitere Maßnahme erfolgt. Zu den Beispielen für übliche Hindernisse zählen Personen und bewegliche Einrichtungen.

[0154] Bei einer Ausgestaltung werden eine oder mehrere Kameras wie beispielsweise die Kameras **52**, **58** verwendet, um zu ermitteln, ob sich ein Retroreflektor in einer Akzeptanzregion befindet. Bei einer Ausgestaltung werden eine oder mehrere Lichtquellen **54**, **55** zum Beleuchten von Retroreflektoren verwendet. Bei einer Ausgestaltung ist eine Akzeptanzregion in zwei Dimensionen definiert. Die zwei Dimensionen könnten Winkelmaße oder auch Seitenabstandsmaße sein, die wie Winkelmaße sind, aber außerdem eine Abstandsangabe zum Erhalten einer Abstandsskala erforderlich machen. Eine Akzeptanzregion könnte ein Kreis mit einem bestimmten Radius, ein Quadrat mit vorgegebener Seitenlänge oder irgendeine beliebige andere zweidimensionale Form irgendeines Maßes sein. Bei einer anderen Ausgestaltung ist eine Akzeptanzregion in drei Dimensionen definiert. Beispielsweise können zwei Retroreflektoren, die entlang fast derselben Linie angeordnet sind, um 10 Meter voneinander getrennt sein. Wenn mehr als ein Retroreflektor in einer zweidimensionalen Akzeptanzregion gefunden wird, kann eine Messung eines der zwei Retroreflektoren durchgeführt werden. Wenn dieser Retroreflektor nicht in der entsprechenden dreidimensionalen Akzeptanzregion gefunden wird, kann statt dessen eine Messung des anderen Retroreflektors durchgeführt werden. In dieser Situation, wenn keiner der in einer zweidimensionalen Akzeptanzregion befindlichen Retroreflektoren in einer dreidimensionalen Akzeptanzregion gefunden wird, hält das Prüfverfahren an, bis eine weitere Maßnahme erfolgt.

[0155] Fig. 17 ist ein Ablaufdiagramm, das ein Verfahren **1700** zur Messung mit einem Lasertracker gemäß einer Ausgestaltung zeigt. In Block **1705** wird ein Lasertracker bereitgestellt. In Block **1710** werden ein erster Motor und ein zweiter Motor des Lasertrackers drehen gelassen, um eine Kamera auf dem Tracker auf eine Akzeptanzregion zu richten, die einer Prüfposition zugeordnet ist. In Block **1715** emittiert eine Lichtquelle nahe der Kamera ein Licht. In Schritt **1720** analysiert ein Prozessor ein von der Kamera aufgenommenes Bild der beleuchteten Region, um zu ermitteln, ob in der Akzeptanzregion ein Retroreflektor vorhanden ist. Wenn der Retroreflektor nicht vorhanden ist, stoppt die Messung in einem Schritt **1730** und wartet der Tracker auf weitere Anweisungen.

gen. Wenn der Retroreflektor in der Akzeptanzregion vorhanden ist, wird die Messung mit den Blöcken **1735** bis **1780** fortgesetzt. In Block **1735** ermittelt der Prozessor die Position des Retroreflektors basierend zumindest teilweise auf Messwerten der Winkelmessgeräte und dem Kamerabild. In Block **1740** berechnet der Prozessor den Drehwinkel. In Block **1745** drehen die Motoren in dem ermittelten Drehwinkel. In Block **1750** sendet der Tracker einen Lichtstrahl zum Retroreflektor. In Block **1755** wird Licht, das vom Retroreflektor reflektiert wird, von einem Positionsdetektor im Tracker aufgefangen. In Block **1760** beginnt der Tracker damit, den Mittelpunkt des Retroreflektors zu verfolgen. In Block **1765** misst der Absolutdistanzmesser des Trackers den Anstand zum Retroreflektor. In Block **1770** messen die Winkelmessgeräte des Trackers den ersten und zweiten Winkel zum Retroreflektor. In Block **1775** ermittelt der Prozessor 3D-Koordinaten. In Block **1780** speichert der Prozessor die 3D-Koordinaten.

[0156] Es versteht sich für den Fachmann, dass die Aspekte der vorliegenden Erfindung als ein System, Verfahren oder Computerprogrammprodukt ausgebildet sein können. Die Aspekte der vorliegenden Erfindung können demgemäß die Form einer ganz aus Hardware bestehenden Ausgestaltung, einer ganz aus Software bestehenden Ausgestaltung (einschließlich Firmware, residenter Software, Mikrocode usw.) oder einer Ausgestaltung, bei welcher die hierin allgemein als „Schaltung“, „Modul“ oder „System“ bezeichneten Software- und Hardware-Aspekte kombiniert sind, aufweisen. Darüber hinaus können die Aspekte der vorliegenden Erfindung die Form eines Computerprogrammprodukts aufweisen, das in einem oder mehreren computerlesbaren Medien ausgebildet ist, auf denen ein computerlesbarer Programmcode ausgebildet ist.

[0157] Es kann eine beliebige Kombination von einem oder mehreren computerlesbaren Medien benutzt werden. Das computerlesbare Medium kann ein computerlesbares Signalmedium oder ein computerlesbares Speichermedium sein. Ein computerlesbares Speichermedium kann beispielsweise ein(e) elektronische(s), magnetische(s), optische(s), elektromagnetische(s), mit Infrarot oder Halbleitern arbeitende (s) System, Vorrichtung oder Gerät oder eine beliebige geeignete Kombination des Vorangehenden sein, ist aber nicht darauf beschränkt. Zu den spezifischeren Beispielen (keine erschöpfende Auflistung) für das computerlesbare Medium würde Folgendes zählen: ein elektrischer Anschluss mit einem oder mehreren Drähten, eine tragbare Computerdiskette, eine Festplatte, ein Direktzugriffsspeicher (RAM; random access memory), ein Nurlesespeicher (ROM; read-only memory), ein löschbarer programmierbarer Nurlesespeicher (EPROM; erasable programmable read-only memory; oder Flash-Speicher), eine Lichtleitfaser, eine tragbare CD-ROM (compact disc read-on-

ly memory), ein optisches Speichergerät, ein magnetisches Speichergerät oder eine beliebige geeignete Kombination des Vorangehenden. Im Rahmen dieser Druckschrift kann ein computerlesbares Speichermedium ein beliebiges greifbares Medium sein, das ein Programm enthalten oder speichern kann, damit es von oder in Verbindung mit einem System, einer Vorrichtung oder einem Gerät verwendbar ist, welches bzw. welche Anweisungen ausführt.

[0158] Es kann eine beliebige Kombination von einem oder mehreren computerlesbaren Medien benutzt werden. Das computerlesbare Medium kann ein computerlesbares Signalmedium oder ein computerlesbares Speichermedium sein. Ein computerlesbares Speichermedium kann beispielsweise ein(e) elektronische(s), magnetische(s), optische(s), elektromagnetische(s), mit Infrarot oder Halbleitern arbeitende (s) System, Vorrichtung oder Gerät oder eine beliebige geeignete Kombination des Vorangehenden sein, ist aber nicht darauf beschränkt. Zu den spezifischeren Beispielen (keine erschöpfende Auflistung) für das computerlesbare Medium würde Folgendes zählen: ein elektrischer Anschluss mit einem oder mehreren Drähten, eine tragbare Computerdiskette, eine Festplatte, ein Direktzugriffsspeicher (RAM; random access memory), ein Nurlesespeicher (ROM; read-only memory), ein löschbarer programmierbarer Nurlesespeicher (EPROM; erasable programmable read-only memory; oder Flash-Speicher), eine Lichtleitfaser, eine tragbare CD-ROM (compact disc read-only memory), ein optisches Speichergerät, ein magnetisches Speichergerät oder eine beliebige geeignete Kombination des Vorangehenden. Im Rahmen dieser Druckschrift kann ein computerlesbares Speichermedium ein beliebiges greifbares Medium sein, das ein Programm enthalten oder speichern kann, damit es von oder in Verbindung mit einem System, einer Vorrichtung oder einem Gerät verwendbar ist, welches bzw. welche Anweisungen ausführt.

[0159] Ein computerlesbares Signalmedium kann ein sich ausbreitendes Datensignal mit einem darin ausgebildeten computerlesbaren Programmcode sein, beispielsweise im Basisband oder als Teil einer Trägerwelle. Ein solches sich ausbreitendes Signal kann irgendeine von unterschiedlichen Formen annehmen, die elektromagnetische, optische oder eine beliebige geeignete Kombination davon umfassen, aber nicht darauf beschränkt sind. Ein computerlesbares Signalmedium kann ein beliebiges computerlesbares Medium sein, das kein computerlesbares Speichermedium ist und das ein Programm kommunizieren, ausbreiten oder transportieren kann, damit es von oder in Verbindung mit einem System, einer Vorrichtung oder einem Gerät verwendbar ist, welches bzw. welche Anweisungen ausführt.

[0160] Der auf einem computerlesbaren Medium ausgebildete Programmcode kann mit irgendeinem

geeigneten Medium übertragen werden, das ein drahtloses Medium, eine Drahtleitung, ein Lichtleitfaserkabel, eine Radiofrequenz usw. oder eine beliebige geeignete Kombination des Vorangehenden umfasst, aber nicht darauf beschränkt ist.

[0161] Der Computerprogrammcode zur Durchführung der Vorgänge für die Aspekte der vorliegenden Erfindung kann in einer beliebigen Kombination einer oder mehrerer Programmiersprachen geschrieben sein, zu denen eine objektorientierte Programmiersprache wie beispielsweise Java, Smalltalk, C++, C# oder dergleichen und herkömmliche Verfahrensprogrammiersprachen wie beispielsweise die Programmiersprache „C“ oder ähnliche Programmiersprachen gehören. Der Programmcode kann vollständig auf dem Computer des Benutzers, teilweise auf dem Computer des Benutzers, als unabhängiges Softwarepaket, teilweise auf dem Computer des Benutzers und teilweise auf einem Ferncomputer oder vollständig auf dem Ferncomputer oder -server ausgeführt werden. Im letzteren Szenarium kann der Ferncomputer durch irgendeinen Netzwerktyp einschließlich eines lokalen Netzwerks (LAN) oder eines Weitverkehrsnetzes (WAN) mit dem Computer des Benutzers verbunden sein oder kann die Verbindung zu einem externen Computer erfolgen (beispielsweise über das Internet durch einen Internet-Dienstanbieter). Die Aspekte der vorliegenden Erfindung werden unter Bezugnahme auf Ablaufdiagramm-Darstellungen und/oder Blockdiagramme von Verfahren, Vorrichtungen (Systemen) und Computerprogrammprodukten gemäß den Ausgestaltungen der Erfindungen beschrieben. Es versteht sich, dass jeder Block der Ablaufdiagramm-Darstellungen und/oder Blockdiagramme und Kombinationen von Blöcken in den Ablaufdiagramm-Darstellungen und/oder Blockdiagrammen durch Computerprogramm-Anweisungen implementierbar sind.

[0162] Diese Computerprogramm-Anweisungen können einem Prozessor eines Universalcomputers, Spezialcomputers oder einer anderen programmierbaren Datenverarbeitungsvorrichtung zur Bildung eines Geräts derart bereitgestellt werden, dass die Anweisungen, welche über den Prozessor des Computers oder der anderen programmierbaren Datenverarbeitungsvorrichtung ausgeführt werden, Mittel zur Implementierung der Funktionen/Vorgänge erzeugen, die in dem Block oder den Blöcken des Ablaufdiagramms und/oder Blockdiagramms vorgegeben sind. Diese Computerprogramm-Anweisungen können auch auf einem computerlesbaren Medium gespeichert sein, das einen Computer, eine andere programmierbare Datenverarbeitungsvorrichtung oder andere Geräte derart für eine bestimmte Funktionsweise steuern kann, dass die auf dem computerlesbaren Medium gespeicherten Anweisungen einen Herstellungsartikel einschließlich Anweisungen erzeugen, welche die Funktion bzw. den Vorgang im-

plementieren, die bzw. der in dem Block oder den Blöcken des Ablaufdiagramms und/oder Blockdiagramms vorgegeben ist.

[0163] Die Computerprogramm-Anweisungen können ferner derart auf einen Computer, eine andere programmierbare Datenverarbeitungsvorrichtung oder andere Geräte geladen werden, dass sie eine Reihe von Arbeitsschritten bewirken, die auf dem Computer, der anderen programmierbaren Vorrichtung oder anderen Geräten so durchzuführen sind, dass sie ein computerimplementiertes Verfahren derart erzeugen, dass die Anweisungen, welche auf dem Computer oder der anderen programmierbaren Vorrichtung ausgeführt werden, Verfahren zur Implementierung der Funktionen/Vorgänge bereitstellen, die in dem Block bzw. den Blöcken des Ablaufdiagramms und/oder Blockdiagramms vorgegeben sind.

[0164] Etwaige Ablauf- und Blockdiagramme in den Figuren zeigen die Architektur, die Funktionalität und den Betrieb möglicher Implementierungen von Systemen, Verfahren und Computerprogrammprodukten gemäß verschiedenen Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung. In dieser Hinsicht kann jeder Block in den Ablauf- oder Blockdiagrammen ein Modul, ein Segment oder einen Teil eines Codes repräsentieren, welcher eine oder mehrere ausführbare Anweisungen zur Implementierung der vorgegebenen logischen Funktion(en) umfasst. Es ist ferner anzumerken, dass die in dem Block angegebenen Funktionen bei einigen alternativen Implementierungen in einer anderen als der in den Figuren angegebenen Reihenfolge erfolgen können. Beispielsweise können zwei hintereinander dargestellte Blöcke eigentlich im Wesentlichen gleichzeitig ausgeführt werden oder können die Blöcke je nach der betreffenden Funktionalität manchmal in umgekehrter Reihenfolge ausgeführt werden. Es ist ebenfalls anzumerken, dass jeder Block der Blockdiagramme und/oder der Ablaufdiagramm-Darstellung und Kombinationen von Blöcken in den Blockdiagrammen und/oder der Ablaufdiagramm-Darstellung durch spezielle Systeme auf Hardware-Basis implementierbar sind, die die vorgegebenen Funktionen oder Vorgänge sowie Kombinationen von speziellen Hardware- und Computeranweisungen durchführen.

[0165] Obwohl bevorzugte Ausgestaltungen dargestellt und beschrieben wurden, können verschiedene Modifikationen und Ersetzungen daran erfolgen, ohne dabei von dem Gedanken und Schutzbereich der Erfindung abzuweichen. Es versteht sich demgemäß, dass die vorliegende Erfindung anhand von Darstellungen und nicht als Einschränkung beschrieben wurde.

[0166] Die vorliegenden offenbarten Ausgestaltungen sind demzufolge in jeder Hinsicht als veranschaulichend und nicht als einschränkend aufzufas-

sen, wobei der Schutzbereich der Erfindung durch die beigefügten Ansprüche und nicht durch die vorangehende Beschreibung angegeben ist; ferner sollen daher alle Änderungen, die in die Bedeutung und den Äquivalenzbereich der Ansprüche fallen, darin umfasst sein.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 9007601 [0001]
- US 8724120 [0001]
- US 8619265 [0001]
- US 8537371 [0001]
- US 8422034 [0001]
- US 8467072 [0001]
- US 7800758 [0006, 0046]
- US 7327446 [0114]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung mit einem Lasertracker, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
 Bereitstellen des Lasertrackers, der eine Struktur, ein erstes Winkelmessgerät, ein zweites Winkelmessgerät, einen ersten Motor, einen zweiten Motor, eine erste Lichtquelle, eine zweite Lichtquelle, einen Absolutdistanzmesser, ein Trackingsystem, einen Positionsdetektor, eine Kamera, ein erstes Linsensystem, eine erste photosensitive Anordnung, einen Prozessor und einen Speicher aufweist, wobei die Struktur durch den ersten Motor um eine erste Achse und durch den zweiten Motor um eine zweite Achse drehbar ist, wobei die erste Lichtquelle einen ersten Lichtstrahl erzeugt, der mit dem Absolutdistanzmesser zusammenwirkt, um einen Abstand basierend zumindest teilweise auf einer Geschwindigkeit des ersten Lichtstrahls zu messen, wobei das erste Winkelmessgerät einen ersten Drehwinkel um die erste Achse misst, wobei das zweite Winkelmessgerät einen zweiten Drehwinkel um die zweite Achse misst, wobei die Kamera das erste Linsensystem und die erste photosensitive Anordnung umfasst, wobei die Kamera ein Sichtfeld aufweist, wobei die zweite Lichtquelle einen zweiten Lichtstrahl erzeugt, der mit der Kamera zusammenwirkt, wobei die Kamera in Bezug auf die Struktur feststehend ist, wobei der Speicher mit dem Prozessor wirkgekoppelt ist und wobei der Prozessor dafür konfiguriert ist, den Lasertracker zu bedienen;
 Bereitstellen eines Prüfplans mit einer Vielzahl von Prüfpositionen;
 Bereitstellen einer Vielzahl von Akzeptanzregionen, wobei jede Akzeptanzregion einer Prüfposition entspricht, wobei die Vielzahl von Akzeptanzregionen eine erste Akzeptanzregion umfasst;
 Drehenlassen des ersten Motors und des zweiten Motors, um die Kamera derart auszurichten, dass sie eine der Vielzahl von Akzeptanzregionen sieht;
 Emittieren des zweiten Lichtstrahls;
 Aufnehmen eines ersten Bilds der durch den zweiten Lichtstrahl beleuchteten Akzeptanzregion mit der Kamera;
 Ermitteln, ob ein Retroreflektor in der ersten Akzeptanzregion vorhanden ist, durch den Prozessor basierend zumindest teilweise auf dem ersten Bild;
 wenn der Retroreflektor nicht in der ersten Akzeptanzregion vorhanden ist, hält das Verfahren an, um weitere Anweisungen zu erwarten;
 wenn der Retroreflektor in der ersten Akzeptanzregion vorhanden ist, fährt das Verfahren dann fort durch:
 Ermitteln einer Position des Retroreflektors basierend zumindest teilweise auf dem ersten Bild;
 Messen des ersten Drehwinkels und des zweiten Drehwinkels als erstes Paar gemessener Winkel;
 Ermitteln eines zweiten Paares geschätzter Winkel durch den Prozessor basierend zumindest teilweise auf dem ersten Paar gemessener Winkel, dem ersten Bild und dem Sichtfeld;

Drehen der Struktur durch den ersten Motor und den zweiten Motor, um zu bewirken, dass der erste Drehwinkel und der zweite Drehwinkel dem ermittelten zweiten Paar geschätzter Winkel entsprechen;
 Emittieren des ersten Lichtstrahls;
 Auffangen eines Teils des vom Retroreflektor reflektierten ersten Lichtstrahls durch den Positionsdetektor;
 Verfolgen des Retroreflektors unter Verwendung des Trackingsystems;
 Messen eines ersten Abstands zum Retroreflektor mit dem Absolutdistanzmesser;
 Messen des ersten Drehwinkels und des zweiten Drehwinkels als drittes Paar gemessener Winkel;
 Ermitteln eines ersten Satzes dreidimensionaler Koordinaten eines Mittelpunkts des Retroreflektors durch den Prozessor basierend zumindest teilweise auf dem ersten Abstand und dem dritten Paar gemessener Winkel; und
 Speichern des ersten Satzes dreidimensionaler Koordinaten im Speicher.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Anhalten, um weitere Anweisungen zu erwarten, ferner das Ermitteln, ob der Retroreflektor an der Prüfposition vorhanden ist, durch einen Bediener und, wenn der Retroreflektor nicht vorhanden ist, das Anordnen des Retroreflektors an der Prüfposition umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Anhalten, um weitere Anweisungen zu erwarten, ferner das Ermitteln, ob ein Hindernis die Beleuchtung des Retroreflektors durch den zweiten Lichtstrahl verhindert, und, wenn das Hindernis vorhanden ist, das Entfernen des Hindernisses umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Anhalten, um weitere Anweisungen zu erwarten, ferner das Ermitteln, ob der Retroreflektor zu einem vierten Winkel gedreht ist, der die Reflexion des zweiten Lichtstrahls in die Kamera verhindert, und, wenn der Retroreflektor zu dem vierten Winkel gedreht ist, das Drehen des Retroreflektors zur Ermöglichung der Reflexion des zweiten Lichtstrahls in die Kamera umfasst.

5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die erste Akzeptanzregion einem Bereich entspricht.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die erste Akzeptanzregion dem durch einen Kreis umschlossenen Bereich entspricht.

7. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die erste Akzeptanzregion dem durch ein Quadrat umschlossenen Bereich entspricht.

Es folgen 20 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

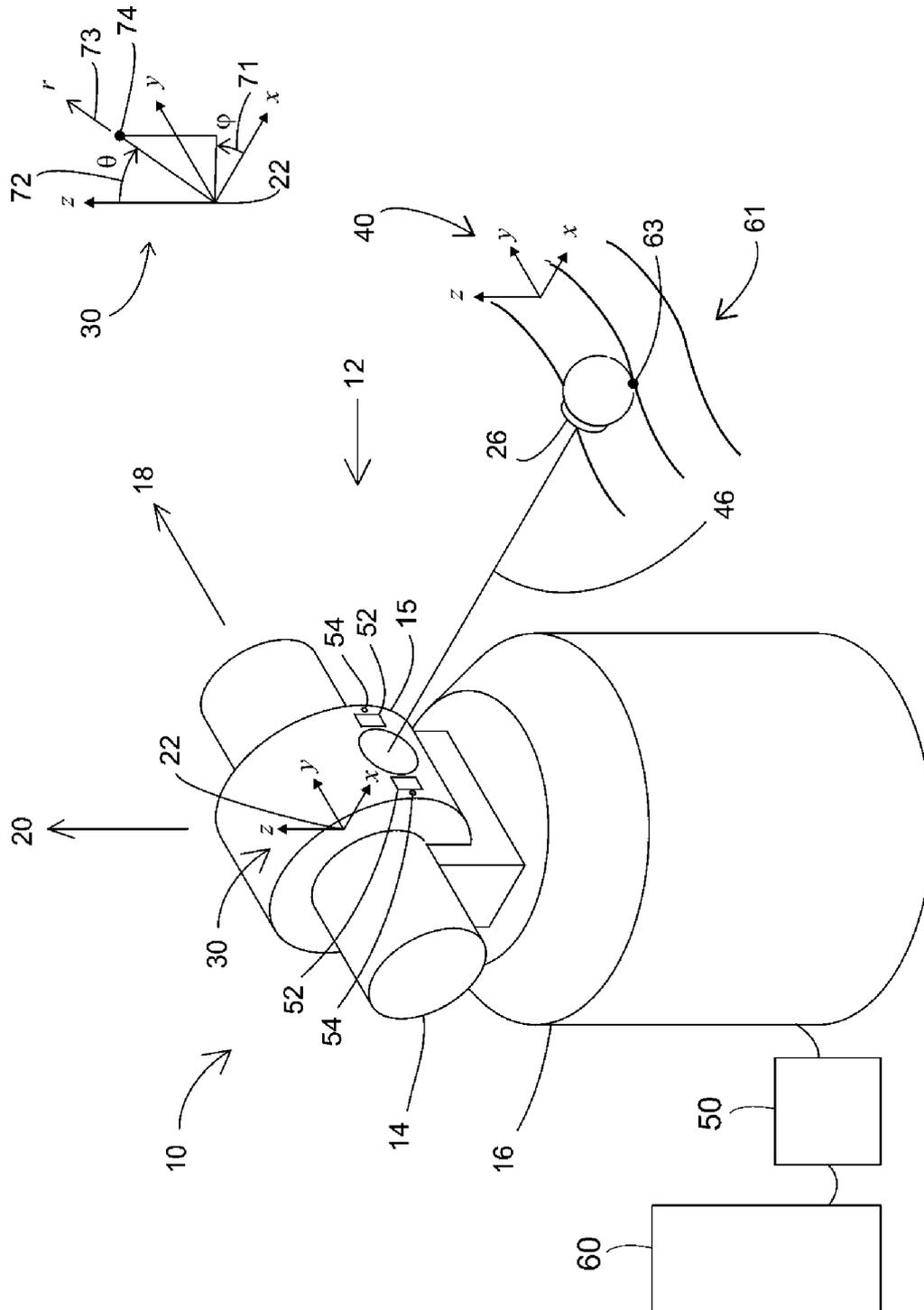


FIG. 1

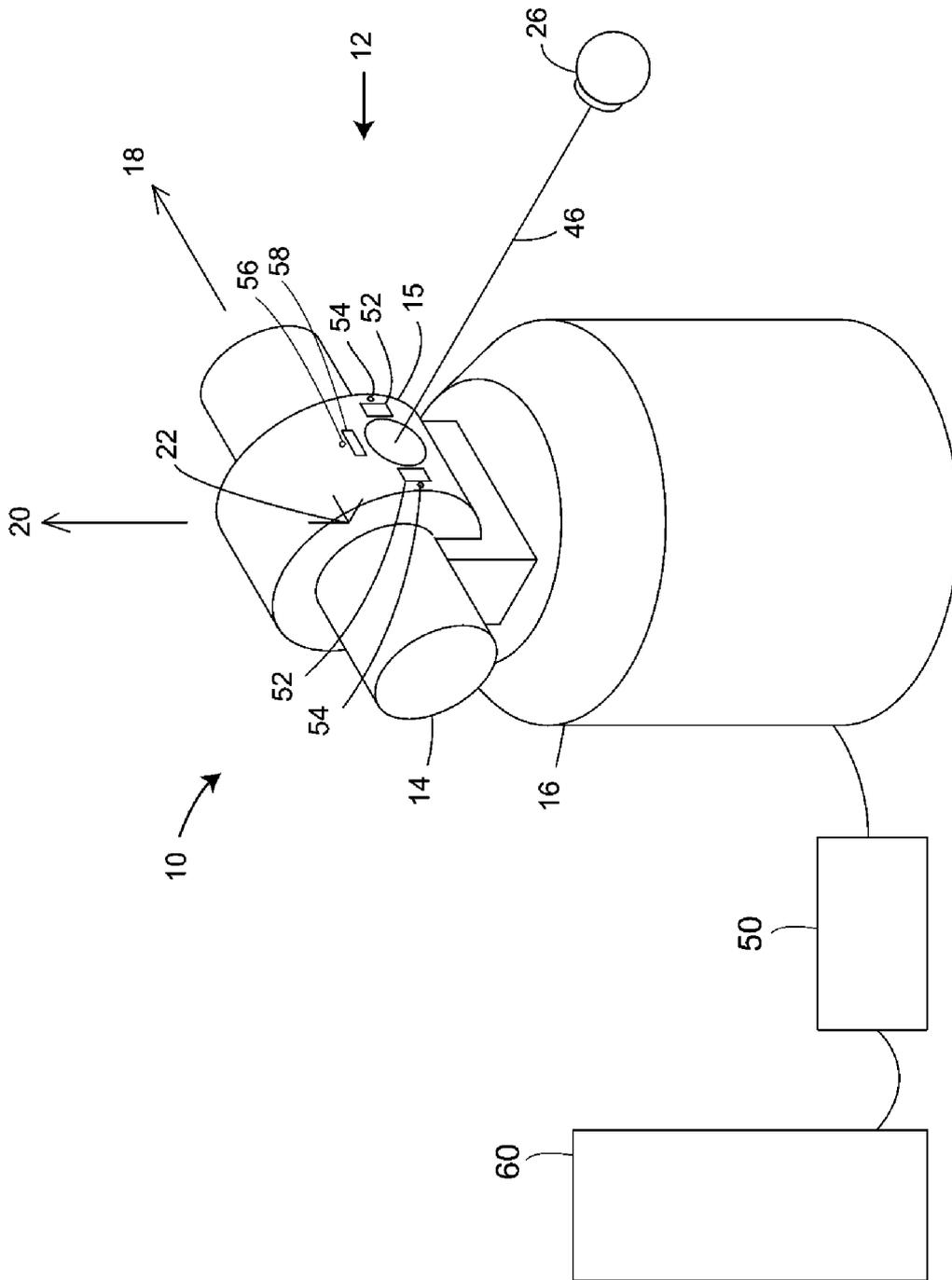


FIG. 2

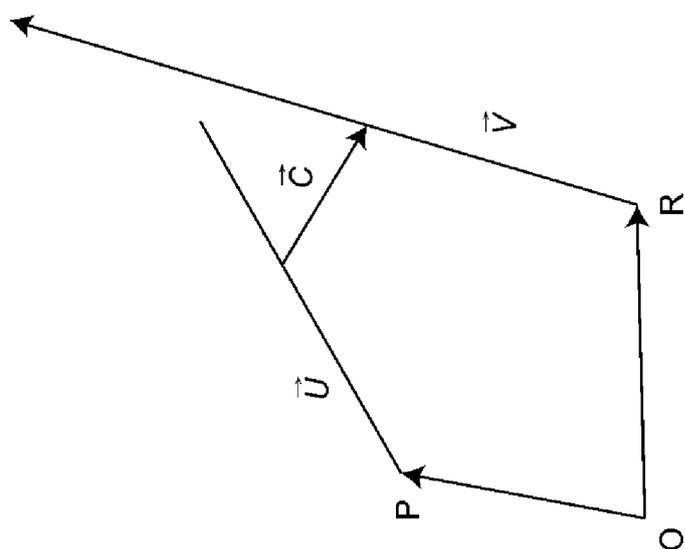


FIG. 3

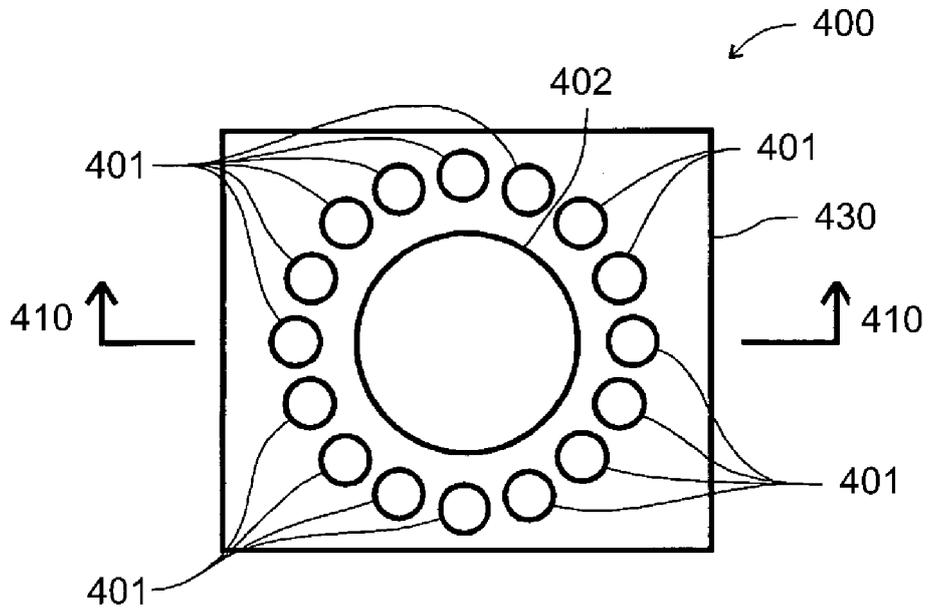


FIG. 4A

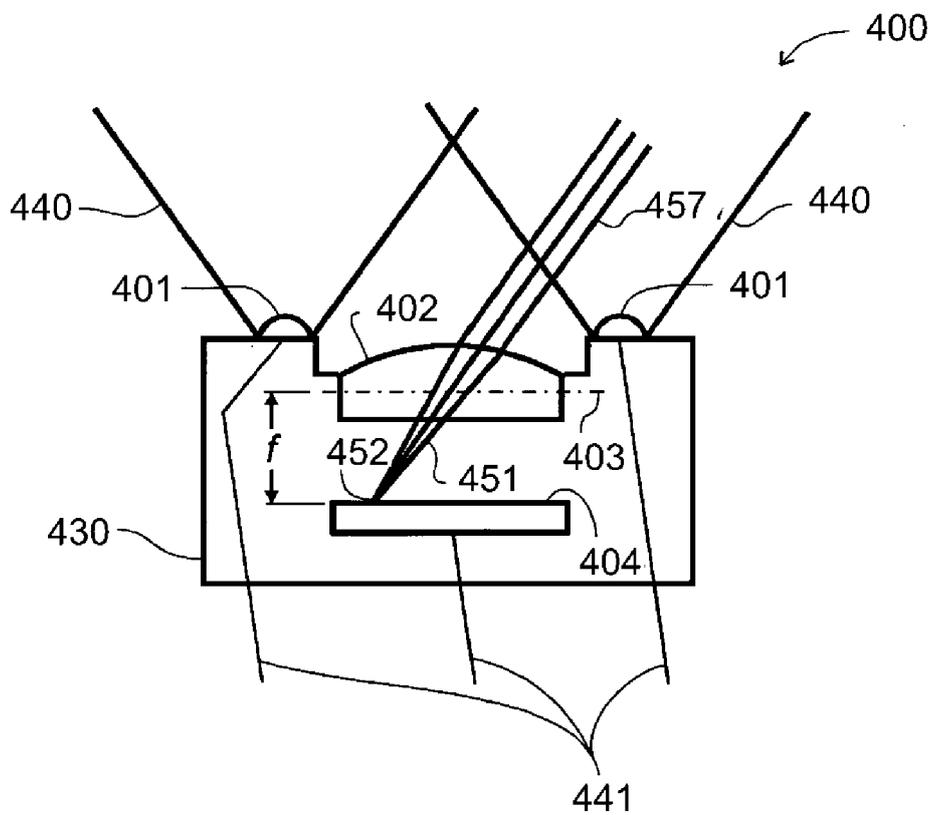


FIG. 4B

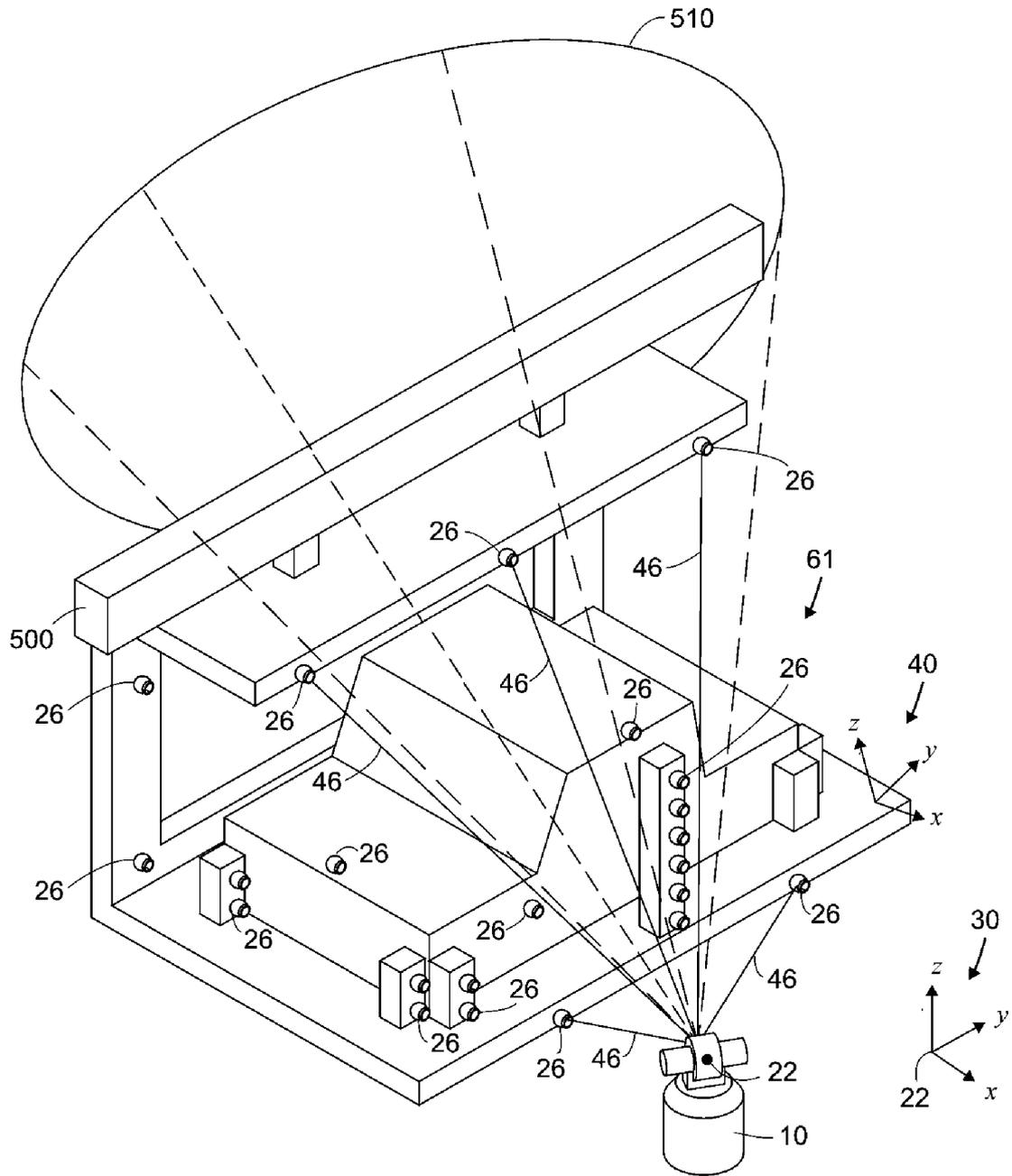


FIG. 5A

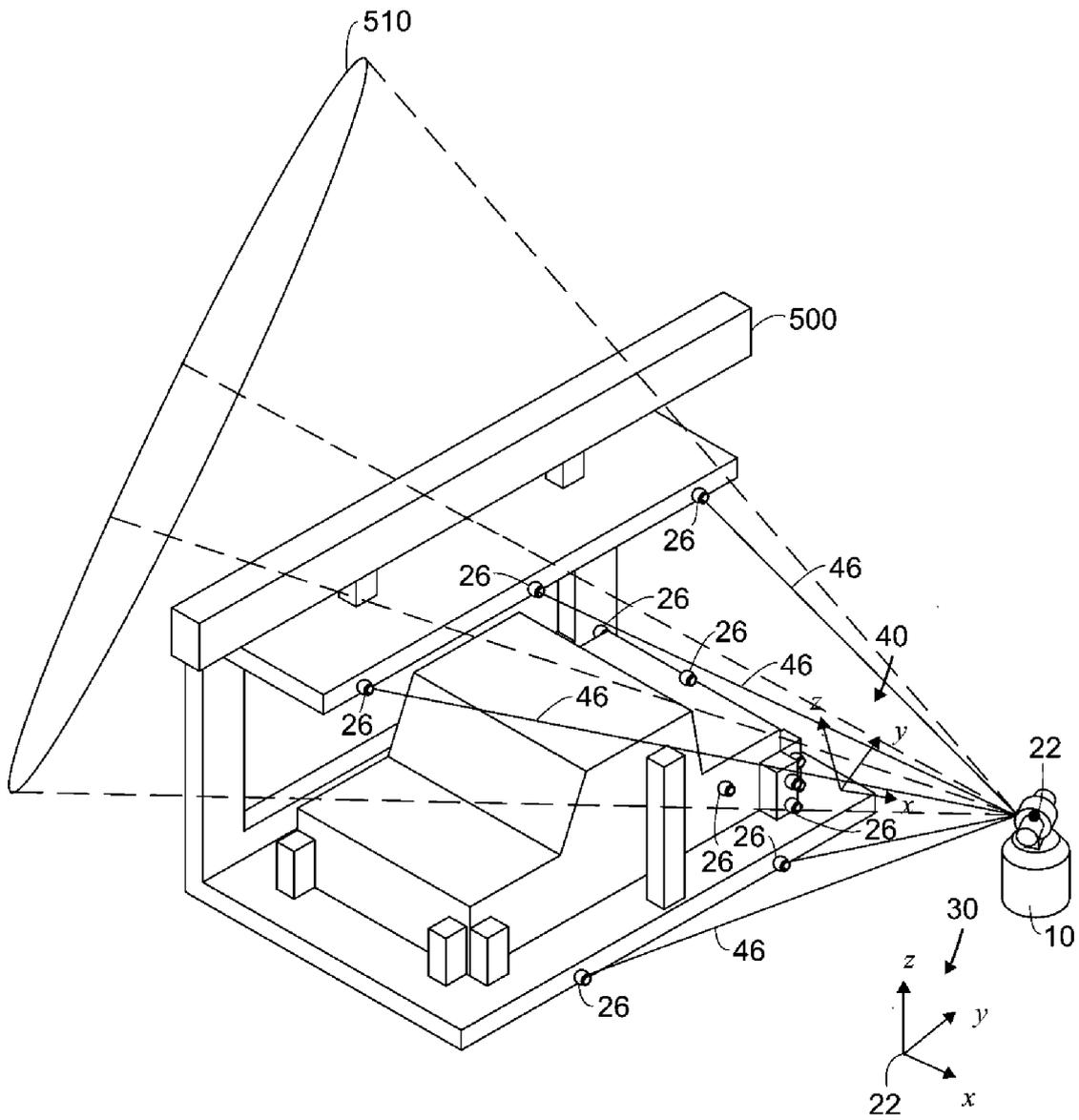
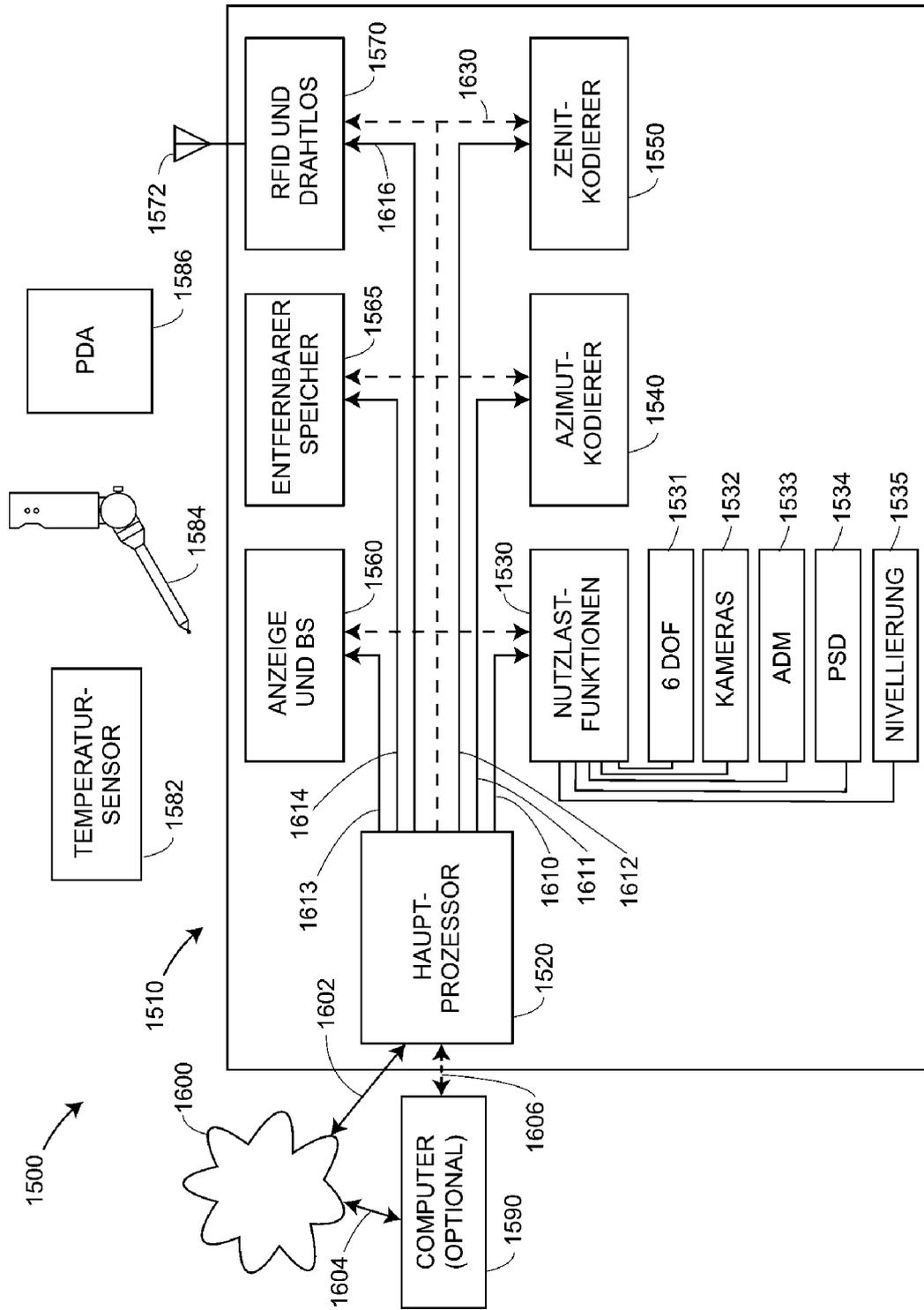


FIG. 5B



FIGUR 6



FIG. 7

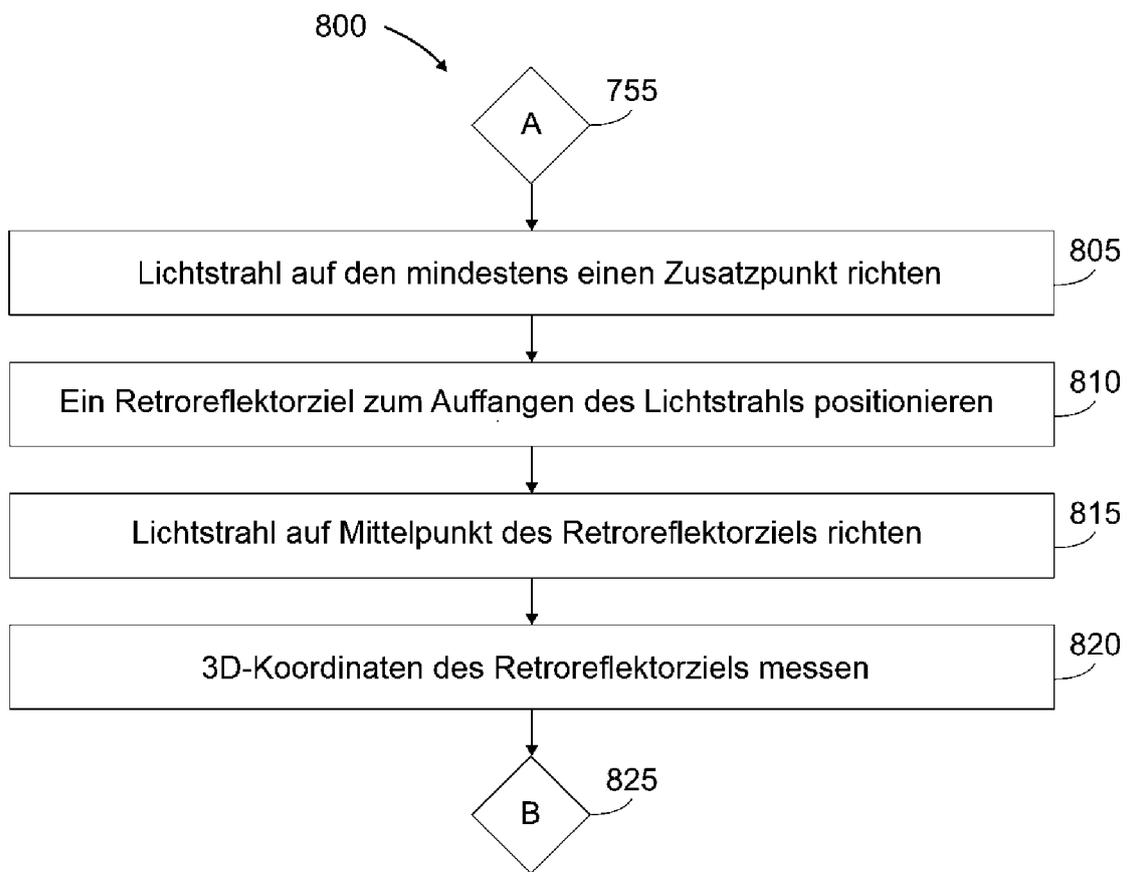


FIG. 8

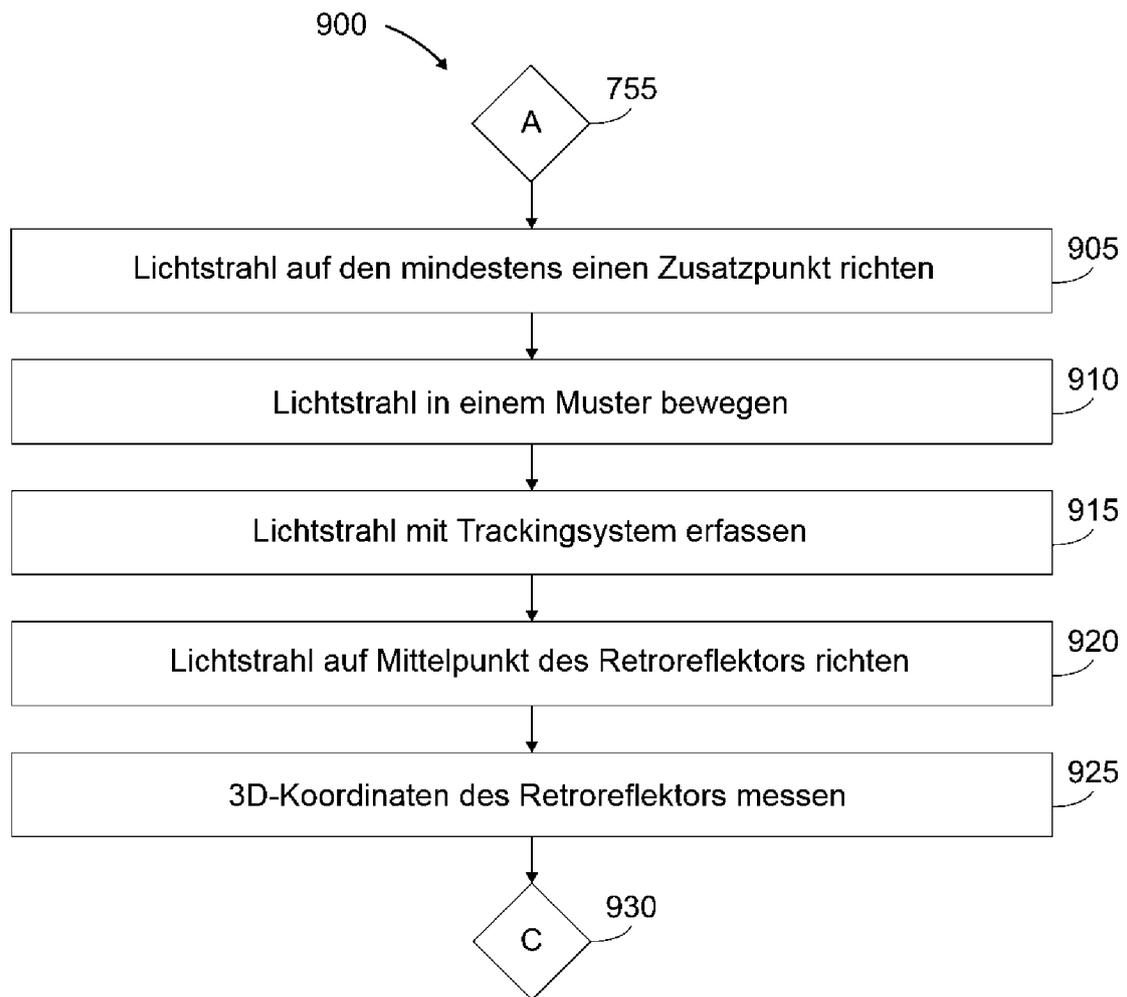


FIG. 9

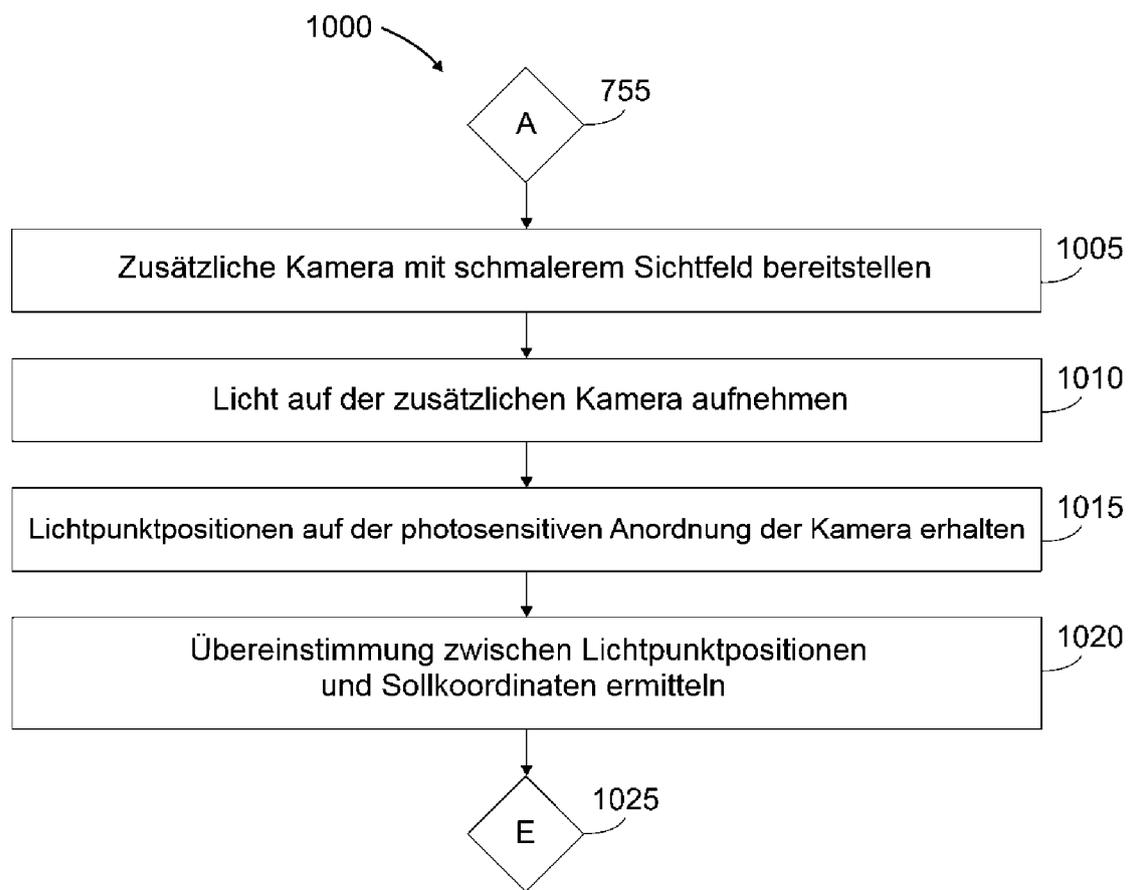


FIG. 10

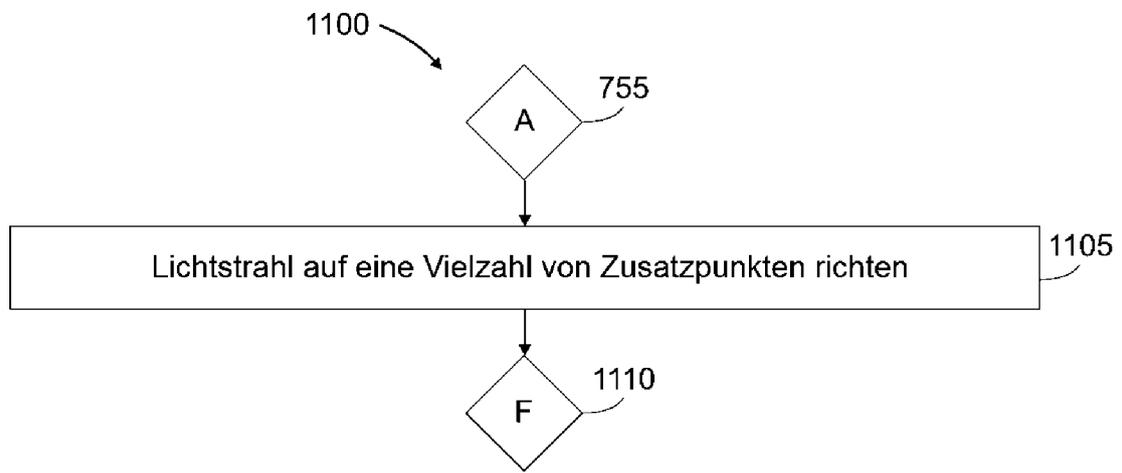


FIG. 11

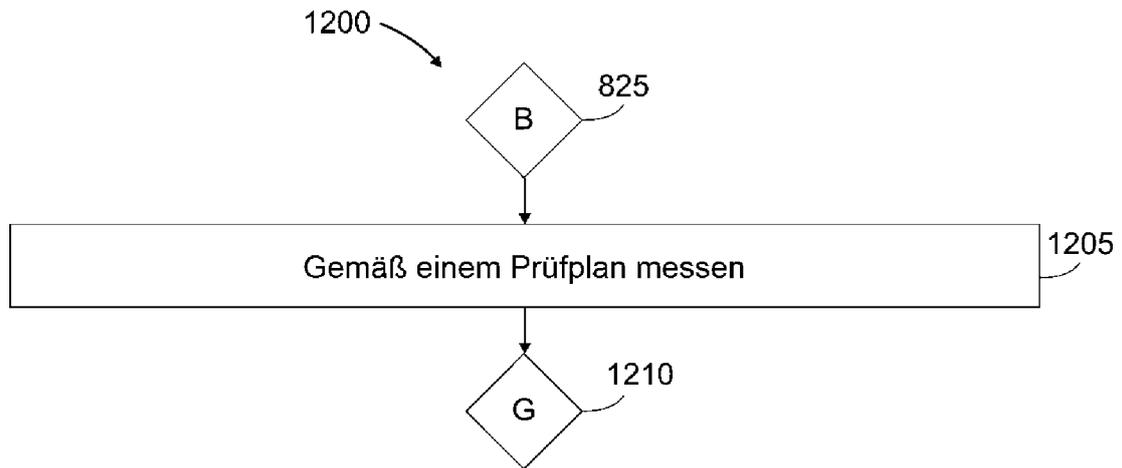


FIG. 12

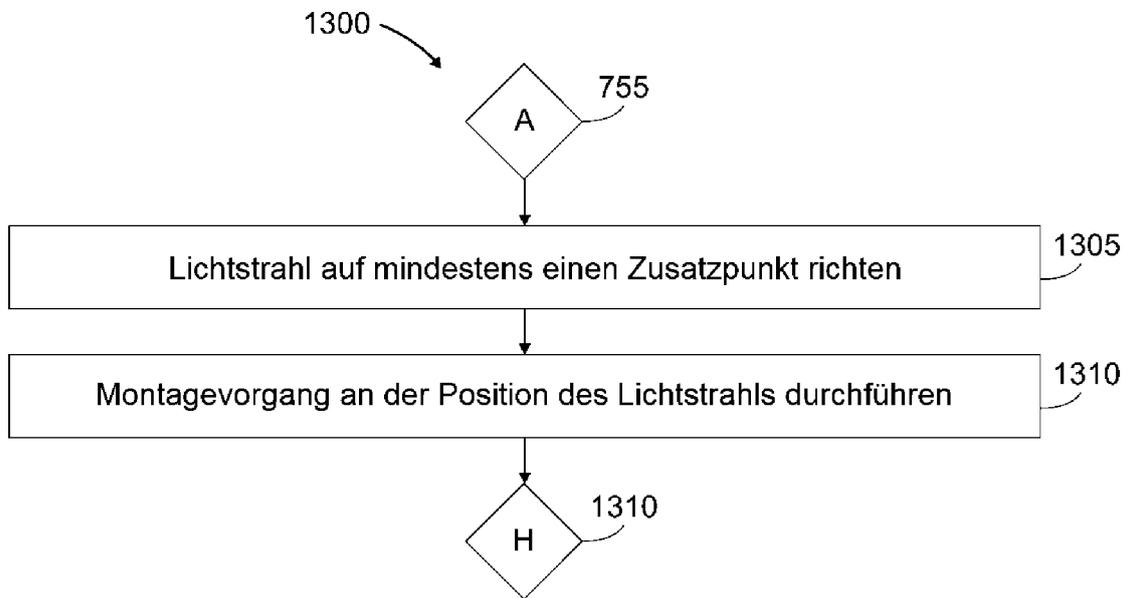


FIG. 13

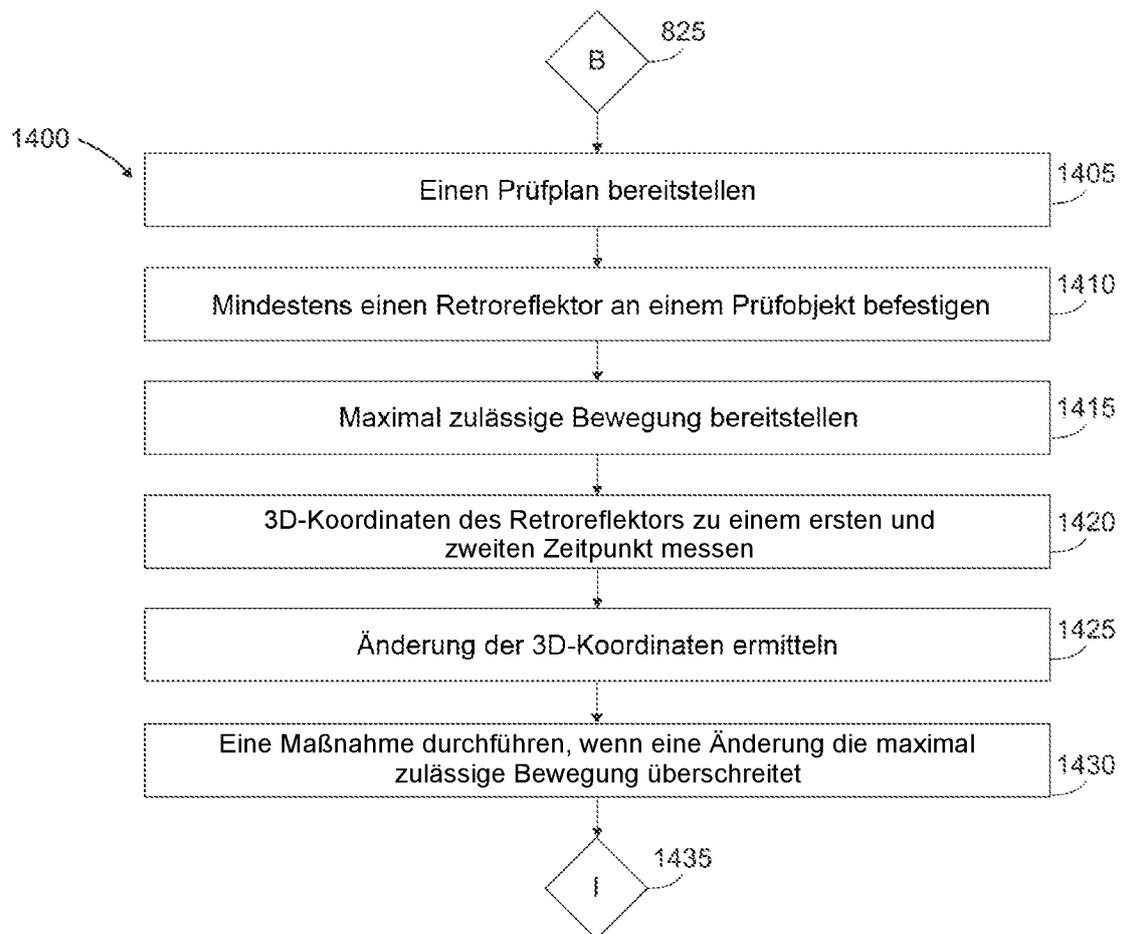


FIG. 14

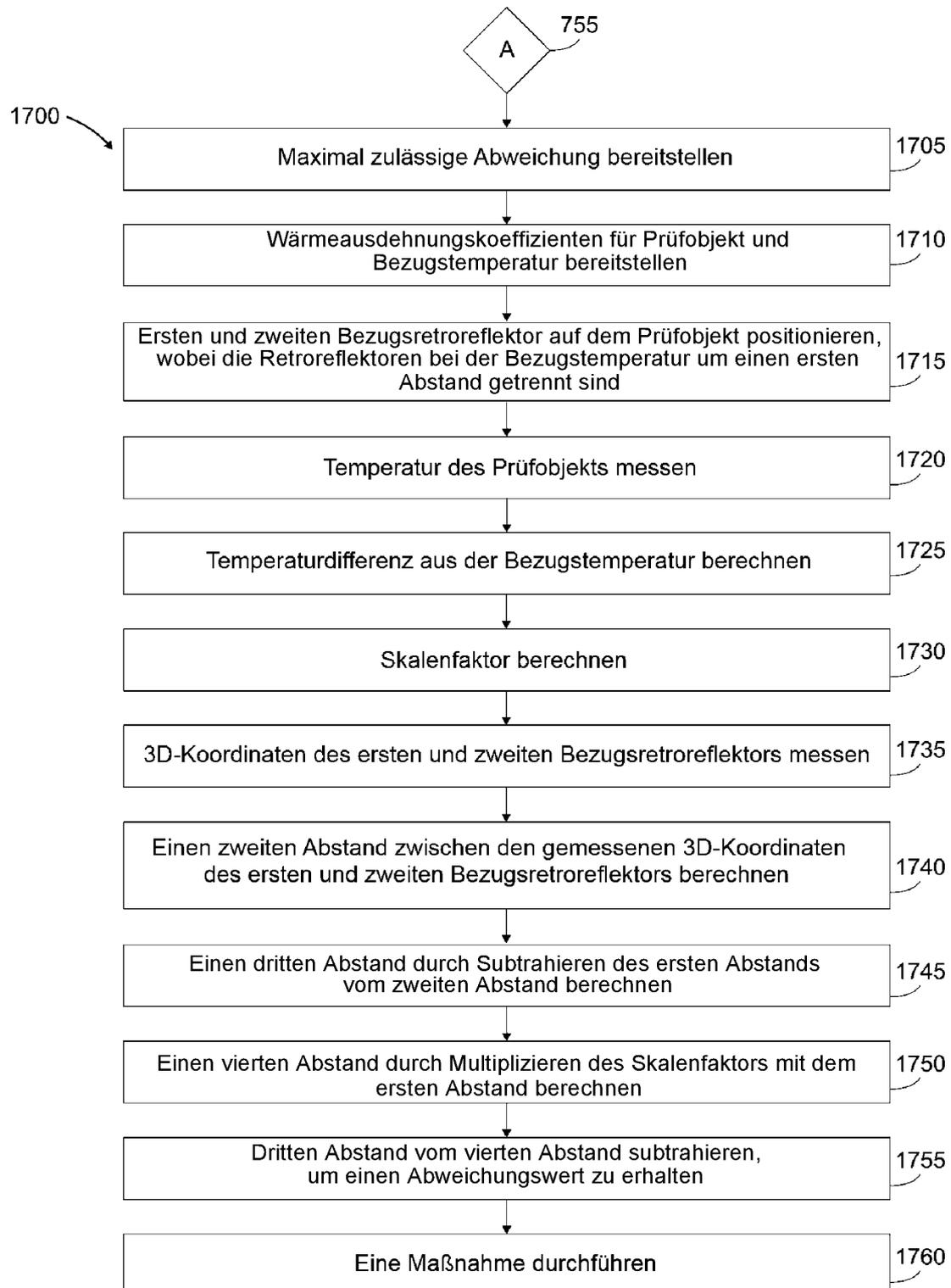


FIG. 15

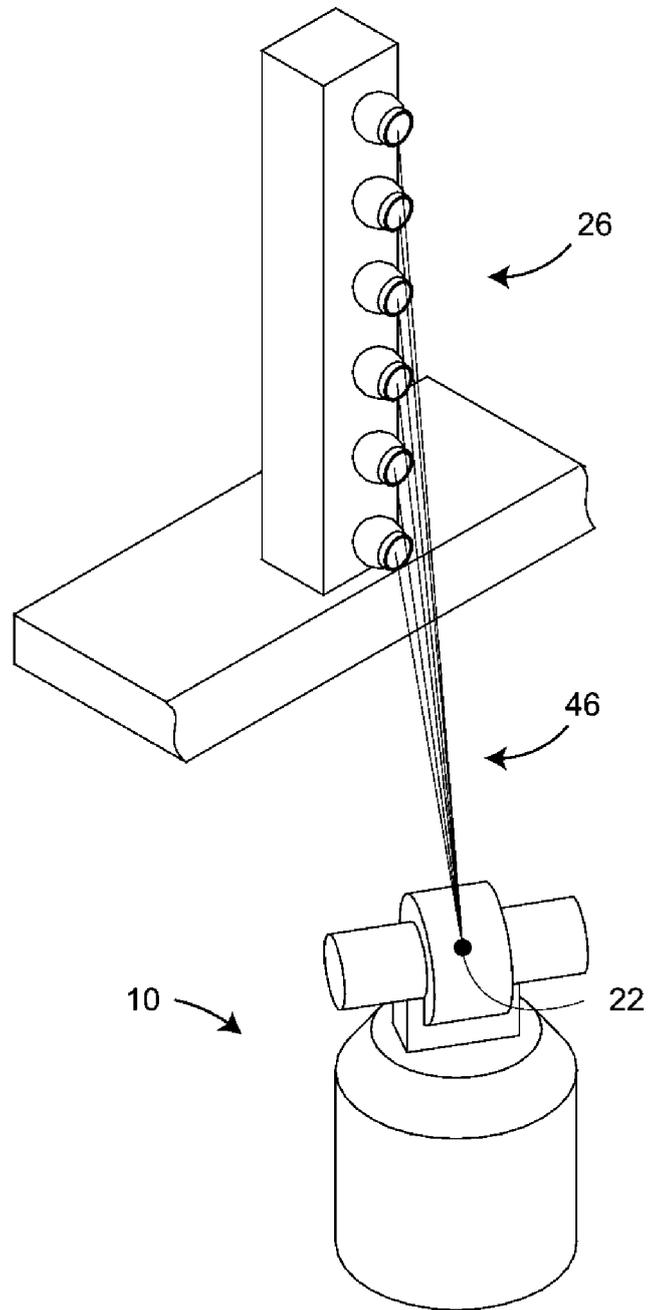


FIG. 16A

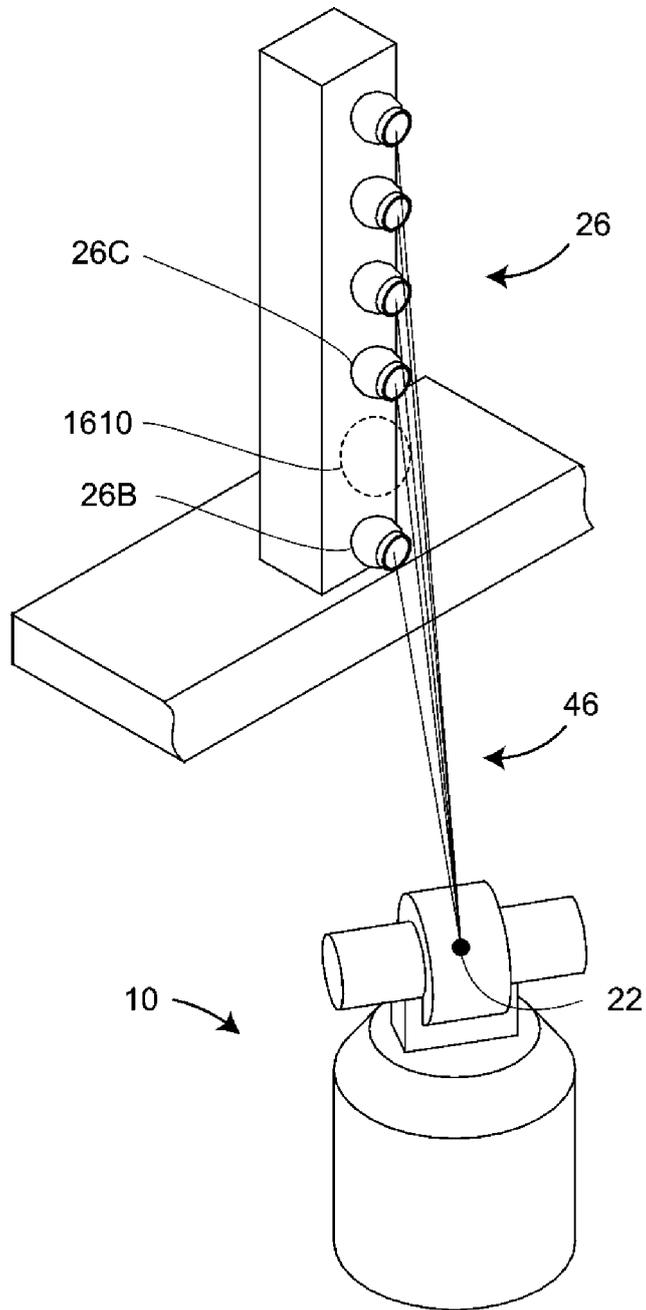


FIG. 16B

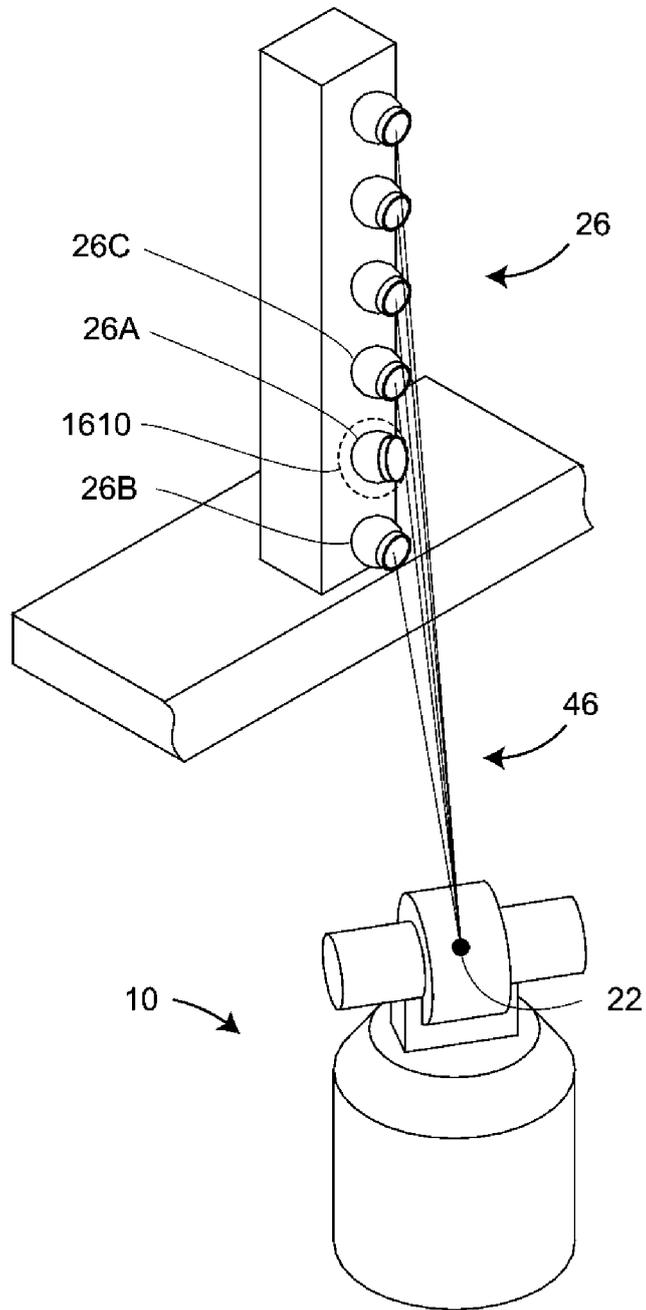


FIG. 16C

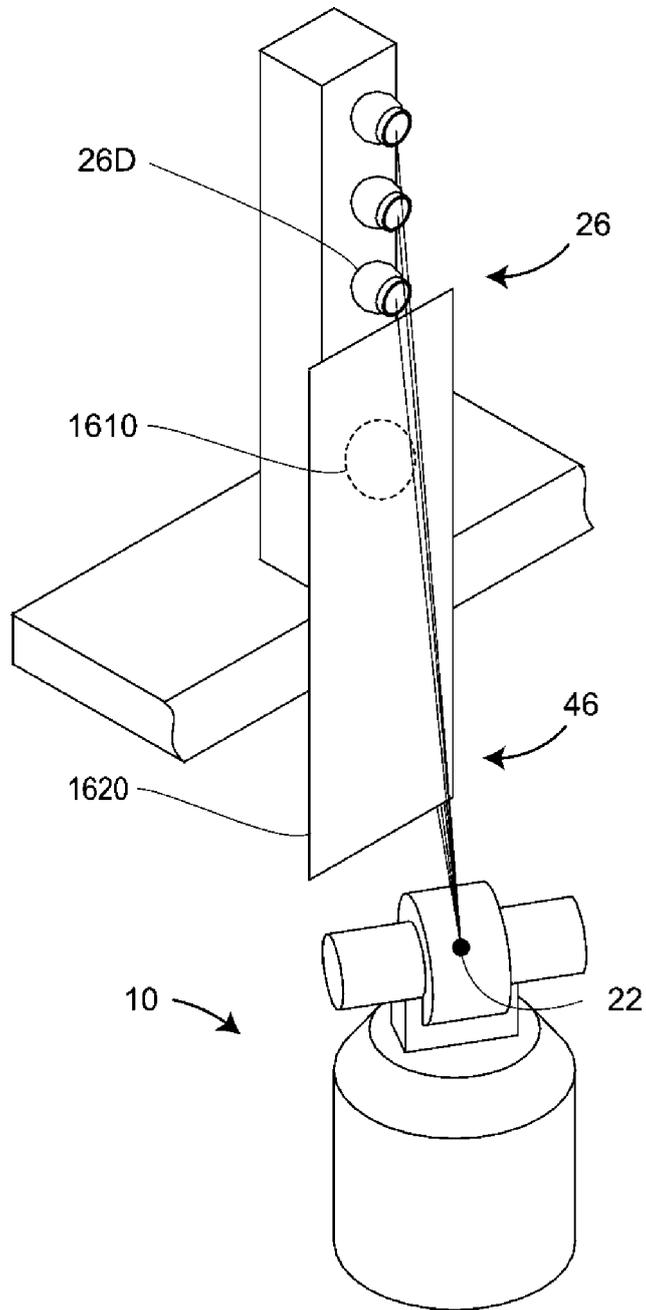


FIG. 16D

1700 →

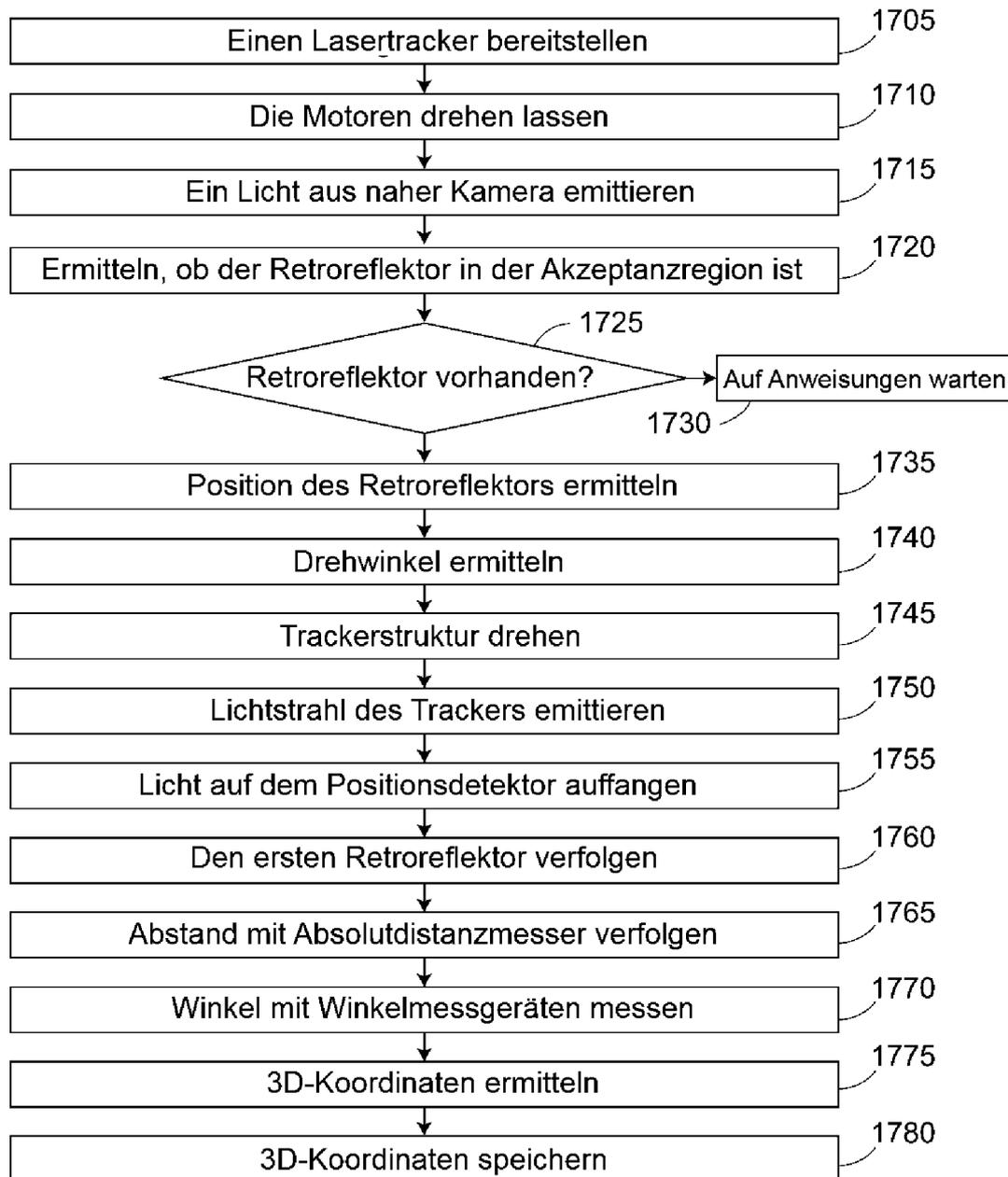


FIG. 17