

(12)

PATENTCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 2056/89

(51) Int.Cl.⁵ : B25J 13/08

(22) Anmeldetag: 31. 8.1989

(42) Beginn der Patentdauer: 15.10.1990

(45) Ausgabetag: 10. 5.1991

(56) Entgegenhaltungen:

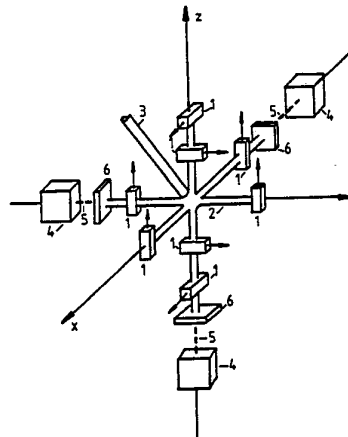
DE-OS3627560
IBM TECHNICAL DISCLOSURE BULLETIN VOL. 26, NO. 3B,
AUG. 1983, S. 1455, 1456
IBM TECHNICAL DISCLOSURE BULLETIN VOL. 26, NO. 3B,
AUG. 1983, S. 1480-1482
EP-A1-172666 DD-PS 247406 DD-PS 235596

(73) Patentinhaber:

FAVRE-BULLE BERNARD DIPL.ING.
A-1060 WIEN (AT).

(54) TRÄGHEITSENSORGESTÜTZTES MESSSYSTEM FÜR HANDHABUNGSEINRICHTUNGEN

(57) Das erfindungsgemäße Meßsystem dient zur dynamischen Messung der Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen von bewegten Handhabungseinrichtungen, insbesondere mehrachsiger Industrieroboter mit beliebig vielen Freiheitsgraden mittels Trägheitssensoren (1), die mit Hilfe starrer Verbindungselemente (2, 3) zusammen mit Meßsystemen zur Positions- und Orientierungsbestimmung in unmittelbarer Umgebung eines räumlichen Bezugspunktes (4, 5, 6) zu einem am Handhabungsgerät befestigten Meßkopf so zusammengefaßt werden, daß durch algebraische Verknüpfung, Koordinatentransformation und Integration der aufbereiteten Sensorsignale durch geeignete, vorzugsweise digitale Rechenwerke, der zeitliche Verlauf von Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen des Meßkopfes im Bezugsraum als Meßausgangsgröße, beispielsweise zum Zweck der Untersuchung von Genauigkeitseigenschaften des Handhabungsgerätes errechnet wird.



Die Erfindung bezieht sich auf ein Meßsystem zur dynamischen Messung der Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen von bewegten Handhabungseinrichtungen mit beliebig vielen Freiheitsgraden, insbesondere mehrachsiger Industrieroboter, welche zur Aufnahme der translatorischen und rotatorischen Beschleunigungswerte aus einer Anordnung von an sich bekannten Trägheitssensoren, die mittels einer starren Verbindungs-
 5 Vorrichtung zu einem Meßkopf zusammengefaßt sind, besteht. Die Beschleunigungswerte werden als Translationsbeschleunigungen, Winkelbeschleunigungen, Gravitationsbeschleunigungen und Zentripetalbeschleunigungen von den Trägheitssensoren aufgenommen. Die Signale der Trägheitssensoren werden nach
 10 Aufbereitung durch an sich bekannte Schaltungen einem Rechenwerk, vorzugsweise Digitalcomputer zugeführt, welches neben der Linearisierung der Meßsignale und Kompensation allfälliger Meßsystem-Eigenfehler sowie Eliminierung der gravitationsbedingten Beschleunigungsanteile die Berechnung des zeitlichen Verlaufes von
 15 Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen des bewegten Teiles der Handhabungseinrichtung durch Koordinatentransformation und zeitliche Integration der Trägheitssensorsignale durchführt. Die Anfangsbedingungen für Position und Orientierung in einem raumfesten Bezugspunkt werden durch an sich bekannte Verfahren, beispielsweise laseroptische Positionsdetektoren bestimmt, wobei der bewegliche Teil der Sensorik
 20 starr mit dem Meßkopf verbunden ist.

Die Messung mit dem erfindungsgemäßen Meßsystem verläuft kontinuierlich über ein vorgegebenes Meßintervall, so daß das Meßergebnis den zeitlichen Verlauf von Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen des untersuchten Teiles der Handhabungseinrichtung, beispielsweise des Industrierobotergräfers wiedergibt, um beispielsweise eine Beurteilung der Genauigkeitseigenschaften des Handhabungsgerätes zu ermöglichen.

Bisher war die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Positionskoordinaten und der Raumorientierungslagen von Handhabungsgeräten nur in einem räumlich beschränkten Ausmaß für einfache Bahnkurvenstücke mit niederen Meßfrequenzen möglich, und erforderte einen erheblichen Aufwand an kostenintensiven Spezialgeräten, wie beispielsweise laserinterferometrische Verfolgungssysteme oder berührende Meßverfahren, die neben dem
 25 Nachteil der stark eingeschränkten Vielfalt der vermeßbaren Bahnformen auch eine ungünstige Kraft- und Momentenrückwirkung auf das zu vermessende Handhabungsgerät mit sich brachten.

Die Nachteile der bekannten Vermessungssysteme für den zeitlichen Verlauf von Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen von Handhabungseinrichtungen mit mehreren Freiheitsgraden werden durch das erfindungsgemäße Meßsystem gemäß dem kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 beseitigt. Es sind Systeme bekannt, die beispielsweise durch Sensorführung eine Verbesserung der Bahnfahreigenschaften von
 30 Industrierobotern in unmittelbarer Umgebung des zu bearbeitenden Werkstückes bewirken (DE-OS 3627560 (AUDI, 7 S), DD-PS 247406 (ZERMAG, 5 S)).

Auch wird beispielsweise der Einsatz von Beschleunigungsaufnehmern zur Erfassung von Rutschvorgängen bei Robotergräfern berichtet (EP-A1-172666 (IBM, 11 S)).

Keines dieser Systeme dient jedoch zur vollständigen Erfassung des zeitlichen Verlaufes von
 35 Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen von Handhabungseinrichtungen mit beliebig vielen Freiheitsgraden mittels Trägheitssensoren und einem zugeordneten Rechenwerk.

Bekannt ist weiters, daß zur Bestimmung des Positions- und Orientierungsverlaufes von erd-, wasser-, und luftgebundenen Fahrzeugen sowie Raumfluggeräten Trägheitssensorsysteme zum Zweck der Navigation eingesetzt werden. Die bei obengenannten Fahrzeugen auftretenden Meßzeiten und zurückgelegten Wege erfordern
 40 einen hohen Aufwand an Präzision der Meßverfahren, um den durch Integration der Meßsignale zeitlich anwachsenden Gesamtfehler in vertretbaren Grenzen zu halten. Das erfindungsgemäße Meßsystem wird im Gegensatz zu den obengenannten Meßaufgaben zur dynamischen Positions- und Orientierungsvermessung von Handhabungsgeräten, insbesondere mehrachsiger Industrieroboter eingesetzt, wo sowohl die Meßzeiten nur einen
 45 Bruchteil der bei Navigationsaufgaben vorliegenden Zeiten betragen, als auch hohe bewegungsinduzierte Beschleunigungsanteile auftreten.

In den Zeichnungen wird die Erfindung anhand von beispielsweise Ausführungsformen erläutert und zwar zeigen:

Fig. 1 ein dreidimensionales Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Fig. 2 ein zweidimensionales Ausführungsbeispiel der Erfindung und

50 Fig. 3 ein zweidimensionales Ausführungsbeispiel der Erfindung im Blockschaltbild.

Das Kernstück der Erfindung besteht aus einem Meßkopf (1) bis (3), (6), mit einer der Anzahl der Freiheitsgrade des zu vermessenden Positions- und Orientierungsverlaufes mindestens gleich großen Anzahl von Trägheitssensoren (1), die mittels starrer Verbindungselemente (2) so angeordnet sind, daß durch algebraische Verknüpfung der einzelnen Sensorsignale translatorische und rotatorische Beschleunigungsanteile eindeutig
 55 unterschieden werden. Weiters ist der bewegliche Teil einer an sich bekannten, vorzugsweise optischen Anfangspositions- und Orientierungsmeßeinrichtung (6) zusätzlich am Meßkopf befestigt. In der beispielsweise Ausführungsform der Fig. 1 besteht die obengenannte Meßeinrichtung (4) bis (6) aus drei raumfesten Laserlichtquellen (4), welche jeweils einen, auf den zugehörigen optischen Positionsdetektor (6) fokussierten
 60 Laserstrahl (5) aussenden. Aus den Signalen der Positionsdetektoren (6) können mittels bekannter Verfahren die Position und Orientierung sowie die räumlichen Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten des Meßkopfes in näherer Umgebung eines raumfesten Bezugspunktes errechnet werden. Die Trägheitssensoren (1) erfassen gemäß ihrem Aufnehmerprinzip zeitlich konstante und zeitlich veränderliche Beschleunigungsanteile, arbeiten

daher vorteilhafterweise nach dem bekannten Kraftkompensationsprinzip. In einer Weiterentwicklung der Erfindung werden zusätzlich raumlageempfindliche Trägheitssensoren, beispielsweise Kreiselssysteme zur Gewinnung von Zusatzsignalen zur Genauigkeitssteigerung des Meßsystems fest mit dem Meßkopf verbunden. Die von den Trägheitssensoren (1) aufgenommenen Beschleunigungen setzen sich aus translatorischen, tangentialen und zentripetalen sowie gravitationsbedingten Anteilen zusammen, die in einem Rechenwerk getrennt weiterverarbeitet werden. Anhand einer zweidimensionalen Meßkopfanordnung mit drei Trägheitssensoren (1) werden in Fig. 2 die geometrischen Beziehungen zwischen den Hauptempfindlichkeitsachsen der Trägheitssensoren (1), der Lage der Hauptkoordinatenachse des ruhenden Bezugssystems (7) sowie des Winkels (ϕ) zwischen ihr und der Hauptachse des Koordinatensystems (x, y) des Meßkopfes (2) liegenden Winkels (ϕ), des Winkels (ϕ_g) zum Gravitationsvektor (G) mit seinen Komponenten (g_x) und (g_y), sowie der Zählpfeilrichtung der Winkelgeschwindigkeit (w) des Meßkopfes bezüglich des ruhenden Bezugssystems dargestellt.

Das in Fig. 3 dargestellte Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Meßsystems dient zur Erläuterung der Funktionsweise des an die Trägheitssensoren (1) des Meßkopfes (2) angeschlossenen Signalaufbereitungs- und Rechenwerkes. Die Ausgangssignale der Trägheitssensoren (1) werden in jeweils einer bekannten Signalaufbereitungsschaltung (15) verstärkt, gefiltert, und im Falle der Anwendung eines digitalen Rechenwerkes in eine digitale Form gebracht. Nach der Linearisierung (8) werden die Signale über differenzbildende Schaltungs- oder Programmelemente (13) einer Fehlerkompensation und Signalverknüpfung (9) unterzogen, wo aus den Signalen der einzelnen Aufnehmerkanäle (1), (15), (8) durch algebraische Verknüpfung die Translationsbeschleunigungen ($a_x + g_x, a_y + g_y$) und die Winkelbeschleunigung (w_b) getrennt werden. Gleichzeitig werden zum Zweck der Korrektur von Aufnehmerfehlern Rückkopplungssignale (14), die aus obengenannten Beschleunigungsanteilen gewonnen werden, zu den differenzbildenden Elementen (13) geleitet.

Eine zweimalige zeitliche Integration (12) des Winkelbeschleunigungssignales (w_b) mit den Anfangsbedingungen ($w(0)$) und ($\phi(0)$) liefert Signale für Winkelgeschwindigkeit (w) und Orientierung (ϕ) des Meßkopfes.

Durch Subtraktion (13) der Anfangswinkellage ($\phi_g(0)$) des Schwerkraftvektors (G) wird der Momentanwinkel (ϕ_g) des Meßkopfes (2) bezüglich des Schwerkraftvektors (G) berechnet.

Durch Auftrennung der Schwerkraftkomponenten (g_x) und (g_y) unter Miteinbeziehung des Betrages der örtlichen Schwerebeschleunigung (g) mittels Rechenschaltung oder Programmelement (11) wird eine Abspaltung der gravitationsbedingten Beschleunigungsanteile (g_x) und (g_y) aus den Ausgangssignalen der Signalverknüpfung (9) zur Gewinnung der reinen Translationsbeschleunigungsanteile (a_x) und (a_y) durchgeführt. Nach der Koordinatentransformation (10) in das ruhende Bezugssystem wird die Positionsinformation (s_x) und (s_y) des Meßkopfes durch Integration (12) der Signale (s_{x2}) und (s_{y2}) beziehungsweise (s_{x1}) und (s_{y1}) unter Mitberücksichtigung der Anfangsbedingungen für Ort ($s_x(0)$), ($s_y(0)$) und Geschwindigkeit ($v_x(0)$), ($v_y(0)$) berechnet.

Damit liefert das erfindungsgemäße Meßsystem kontinuierlich Meßwerte für den zeitlichen Verlauf der aktuellen Position und Orientierung des Meßkopfes im Bezugsraum.

In einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Meßsystems werden zusätzliche Trägheitssensoren, beispielsweise Beschleunigungsaufnehmer oder Kreiselssysteme am Meßkopf befestigt, um durch die Gewinnung von überbestimmten Meßsignalen eine Mittelwertbildung der mehrfachbestimmten Bewegungsgrößen zum Zweck der Genauigkeitssteigerung des Meßsystems durchzuführen. Durch die Bildung von aufnehmersignal-amplitudengesteuerter gewichteter Mittelwerte wird die durch zusätzliche Trägheitssensoren gewonnene Überbestimmtheit der Bewegungsgrößen zur optimalen Ausnützung des zur Verfügung stehenden Aussteuerungsbereiches der Signal- und Rechenkanäle erreicht.

Eine zusätzliche Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Meßsystems benützt die Signale von gleichzeitig betriebenen Längen-, Winkel- und Positionsmeßsystemen zur Bestimmung von dynamischen Positions- und Raumorientierungsdaten des Meßkopfes im Bezugsraum. Die zusätzlichen Meßdaten werden mittels bekannter Optimierungsverfahren, wie beispielsweise Kalman- oder Komplementärfiltertechniken zur Verbesserung der Langzeitgenauigkeit des erfindungsgemäßen Meßsystems herangezogen.

5

PATENTANSPRÜCHE

- 10 1. Meßsystem zur dynamischen Messung der Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen von bewegten Handhabungseinrichtungen mit beliebig vielen Freiheitsgraden, insbesondere mehrachsiger Industrieroboter, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Aufnahme der zur vollständigen Erfassung des zeitlichen Verlaufes der Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen erforderlichen Beschleunigungswerte durch Trägheitssensoren (1) erfolgt.
- 15 2. Meßsystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine der Zahl der Freiheitsgrade der Handhabungseinrichtung mindestens gleich große Anzahl von Trägheitssensoren (1) durch starre Verbindungselemente (2) zu einem Meßkopf zusammengefaßt, und am bewegten Teil der Handhabungseinrichtung mittels eines starren Verbindungsstückes (3) befestigt wird.
- 20 3. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 und 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Trägheitssensoren (1) ihrem Aufnehmerprinzip entsprechend zeitlich konstante und zeitlich veränderliche Beschleunigungssignale erfassen, vorteilhafterweise also nach dem bekannten Kraftkompensationsprinzip arbeiten.
- 25 4. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß der zeitliche Verlauf von Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen entsprechend der auftretenden Translationsbeschleunigungsanteile sowie Winkelbeschleunigungs-, Winkelgeschwindigkeits- und Winkellagenanteile aus den Signalen der Trägheitssensoren (1) durch mathematische Verknüpfungen der Sensorsignale nach Verstärkung, Filterung, sowie Vorverarbeitung der Signale durch bekannte Signalaufbereitungs- und Wandelvorrichtungen (15) mittels eines Rechenwerkes (8, 9, 10, 11, 12 und 13), vorzugsweise Digitalcomputers gewonnen wird.
- 30 5. Meßsystem nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Winkelgeschwindigkeit bei radial liegenden Trägersensoren ihrem Betrag nach aus der Zentripetalbeschleunigung und die Winkelbeschleunigung bei tangential liegenden Trägheitssensoren direkt aus den Aufnehmersignalen gewonnen wird und daß die Gewinnung der Translationsbeschleunigungsanteile jeweils durch Linearkombination der Ausgangssignale eines Sensorpaares erfolgt.
- 35 6. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Kompensation der durch Sensoreigenschaften und Montagetoleranzen der Trägheitssensoren (1) und des Meßkopfes bedingten Eigenfehler des Meßsystems, beispielsweise Nichtlinearitäten und funktionsprinzipbedingte Winkelbeschleunigungs- und Querempfindlichkeiten der Trägheitssensoren durch Linearisierungsvorrichtungen (8) und eine Fehlerkompensationsvorrichtung (9) mit Gegenkopplungsausgängen (14) zur Genauigkeitssteigerung des Meßsystems erfolgt.
- 40 7. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß der zeitliche Verlauf von Positionskoordinaten und Raumorientierungslagen des Meßkopfes als kontinuierliche Weg- bzw. Winkelinformation durch Koordinatentransformation (10) der Translationsbeschleunigungen, Winkelbeschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten des bewegten Meßkopfes auf Komponenten des die Handhabungseinrichtung umgebenden festen Bezugsraumes und anschließende wiederholte zeitliche Integration (12) gewonnen wird.
- 45 8. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die für die zeitliche Integration der Beschleunigungs-, Geschwindigkeits-, Winkelbeschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitssignale notwendigen Anfangsbedingungen für Position und Orientierung sowie Anfangstranslations- und Rotationsgeschwindigkeit des Meßkopfes in einem räumlich fixierten Bezugspunkt des Bezugsraumes durch eine, nach an sich bekannten Verfahren arbeitende Vorrichtung, beispielsweise eine Anordnung von Lasern (4) und optischen Positionsdetektoren (6) gemessen werden.
- 50 9. Meßsystem nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß die optischen Positionsdetektoren (6) starr mit der bewegten Haltevorrichtung (2) für die Trägheitssensoren (1) verbunden sind.
- 55 10. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß der die Messung beeinflussende gravitationsbedingte Beschleunigungsanteil durch seinen am Meßort bekannten Betrag (g) und durch seine aus der

Momentanorientierung des Meßkopfes (ϕ) im Bezugsraum und der aus der Anfangsorientierung des Meßkopfes ($\phi(0)$) bestimmten Richtung (ϕ_g) kompensatorisch mittels vorzugsweise digitaler Rechenwerke (10, 11 und 13) aus der Messung eliminiert wird.

- 5 11. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß durch Erhöhung der Anzahl der Trägheitssensoren (1) über den minimal erforderlichen Wert hinaus Redundanzinformationen entstehen, die durch Mittelwertbildung mehrfach bestimmter Bewegungsgrößen und Winkellagen und durch Bildung von signalamplitudengesteuerten, automatisch gewichteten Mittelwerten zur Verbesserung der Gesamtgenauigkeit des Systems herangezogen werden.
- 10 12. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß durch Erweiterung des Meßkopfes durch Hinzunahme meßkopffester winkellage- bzw. winkelgeschwindigkeitsempfindlicher Trägheitssensoren, beispielsweise kardanisch gelagerter Kreisel oder Wendekreisel eine Redundanzhöhung des erfindungsgemäßen Meßsystems erfolgt, die zur Erhöhung der Gesamtgenauigkeit des Verfahrens durch
- 15 Mittelwertbildung der Einzelsignale und durch Bildung von signalamplitudengesteuerten, automatisch gewichteten Mittelwerten sowie durch Anwendung bekannter Optimierungsverfahren, beispielsweise Kalmann- oder Komplementärfilter, führt.
- 20 13. Meßsystem nach den Ansprüchen 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß durch gleichzeitige Anwendung von Längen-, Winkel- und Positionsmeßsystemen, beispielsweise interferometrischer Distanz- und Winkelmeßsysteme zur Bestimmung von dynamischen Positions- und Orientierungsdaten des Meßkopfes im Bezugsraum und durch Miteinbeziehung der zusätzlichen Meßdaten in das Gesamtmeßergebnis eine Genauigkeitssteigerung des Meßsystems durch Anwendung an sich bekannter Optimierungsverfahren wie
- 25 beispielsweise Kalmann- oder Komplementärfiltertechniken erfolgt.

30

Hiezu 3 Blatt Zeichnungen

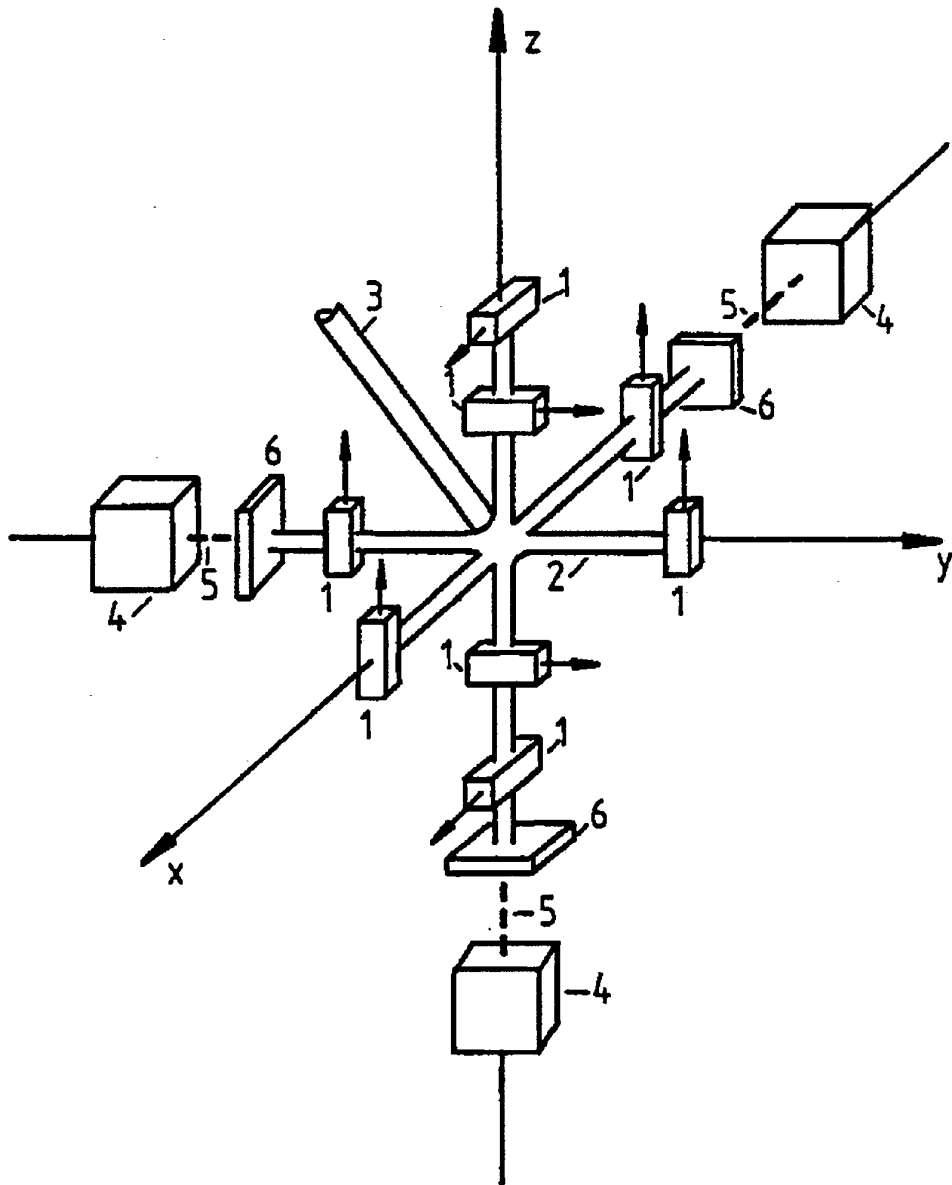


Fig. 1

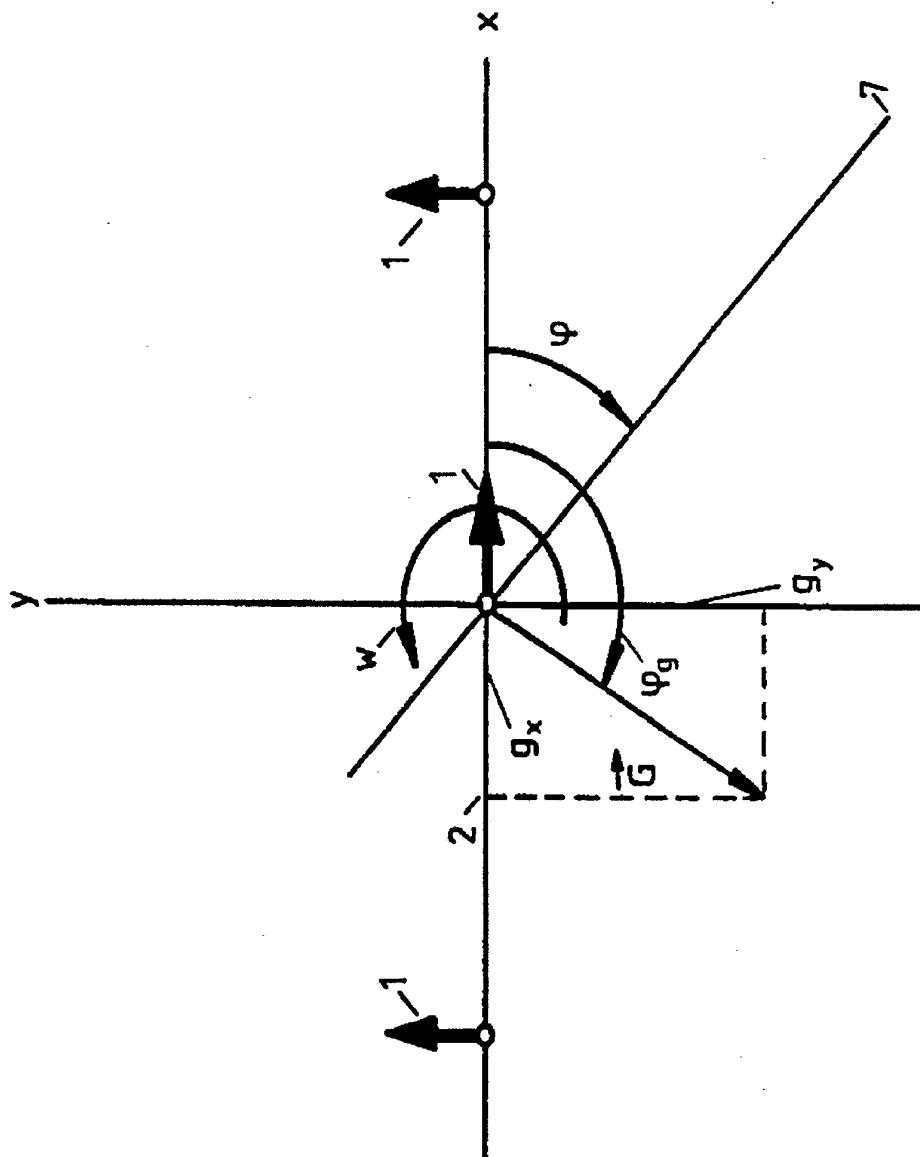


Fig. 2

Fig. 3

