



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 213 886.9**
(22) Anmeldetag: **04.11.2020**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **05.05.2022**

(51) Int Cl.: **G01B 7/30** (2006.01)
G01R 33/00 (2006.01)
G01D 5/12 (2006.01)
G01D 5/14 (2006.01)

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

(73) Patentinhaber:
**ZF Friedrichshafen AG, 88046 Friedrichshafen,
DE; ZF PADOVA Srl., Caselle di Selvazzano, IT**

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

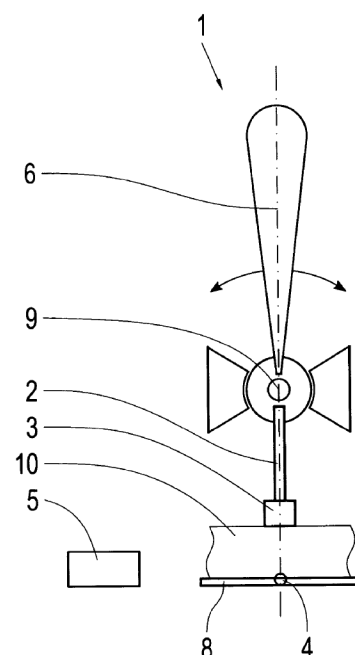
(74) Vertreter:
derzeit kein Vertreter bestellt

(72) Erfinder:
**Herzog, Stefan, 88682 Salem, DE; Pellegrinetti,
Andrea, Malcesine, IT; Tranquillini, Massimo,
Mori, IT; Basurto, Ferruccio, 88046
Friedrichshafen, DE; Malago, Perla, Villach, AT;
Ortner, Michael, Villach, AT**

(54) Bezeichnung: **Magnetsensorsystem**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Magnetsensorsystem (1), das eine Welle (2), die um eine Neigungsmitte (9) neigbar und um eine Rotationsachse (6) drehbar ist, einen in einem Abstand von der Neigungsmitte (9) an der Welle (2) befestigten Magneten (3) und mindestens einen Magnetfeldsensor (4) zum Detektieren des Magnetfelds des Magneten (3) umfasst. Der Magnetfeldsensor (4) ist mit einer Signalverarbeitungseinheit (5) verbunden, die dazu konfiguriert ist, einen mechanischen Zustand der Welle (2) bezüglich mehrerer Bewegungsfreiheitsgrade der Welle (2) zu bestimmen. Der Magnetfeldsensor (4) ist mit einem Versatz zu der Rotationsachse (6) in dem Magnetfeld positioniert.

Darüber hinaus betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Bestimmen des mechanischen Zustands einer neigbaren und drehbaren Welle (2) und ein Lenksystem für ein Schiff, das das vorgeschlagene Magnetsensorsystem (1) umfasst.



(56) Ermittelte Stand der Technik:

US	10 048 091	B1
US	2010 / 0 265 176	A1
EP	1 464 918	A2
EP	2 706 007	A1
WO	2017/ 053 202	A1

A. Ermakova, L. Martins, D. Spitzer, M. Ortnner:
Analytical Modelling of Magnetic Multimedia
Control Elements Based on a Single Magnetic
Sensor. Proceedings 2018, 2, 840. DOI: 10.3390/
proceedings2130840

A. Ermakova, M. Ribeiro, D. Spitzer, M. Ortnner:
Analytical Development of a Four-Axis Magnetic
Multimedia Control Element. In IEEE Sensors
Journal, vol. 18, no. 19, pp. 7819-7825, 1 Oct.1,
2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2838579

C. Di Natali, M. Beccani, N. Simaan, P.
Valdastri: Jacobian-Based Iterative Method for
Magnetic Localization in Robotic Capsule
Endoscopy. In IEEE Transactions on Robotics,
vol. 32, no. 2, pp. 327-338, April 2016. DOI:
10.1109/TRO.2016.2522433

Infineon: Infineon 3D Magnetic Sensor – How
to Make a Magnetic Design for Joysticks.
Application Note, Rev. 1.0 2016-06-21 (2016).
URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-3D_Magnetic_Sensor_Joystick-AN-v01_00-EN-AN-v01_00-EN.pdf?filed=5546d46255dd933d0155e3cf23a91753
[abgerufen am 28.06.2021]

Kim, Junguk: DEVELOPMENT OF
ORIENTATION MEASUREMENT SYSTEM WITH
MAGNETIC FIELD AND NEURAL NETWORK.
Master's Thesis, Department of Mechanical
Engineering, Graduate School of UNIST,
Südkorea (2018). URL: <https://scholarworks.unist.ac.kr/bitstream/201301/23506/1/DEVELOPMENT%20OF%20ORIENTATION%20MEASUREMENT%20SYSTEM%20WITH%20MAGNETIC%20FIELD%20AND%20NEURAL%20NETWORK.pdf> [abgerufen am 30.06.2021]

Y. Chen, A. Mazumdar, C. F. Brooks, B. G. van
Bloemen Waanders, S. D. Bond, M. B. Nemer:
Remote Distributed Vibration Sensing Through
Opaque Media Using Permanent Magnets. In
IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 6,
pp. 1-13, June 2018, Art no. 6000613. DOI:
10.1109/TMAG.2018.2816578

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Magnetsensorsystem und ein Verfahren zum Bestimmen des mechanischen Zustands einer Welle. Solch ein System und ein Verfahren können zum Beispiel für die Realisierung einer magnetischen Position und Ausrichtung eines dreiachsigen magnetischen Joystick-Systems verwendet werden.

[0002] Es gibt viele technische Anwendungen, die eine genaue und zuverlässige Bestimmung des mechanischen Zustands, d. h. der Positionierung und Ausrichtung einer Welle oder anderer Objekte, erfordern. Im Stand der Technik sind mehrere Magnetsensorsysteme zum Bestimmen des mechanischen Zustands von Objekten bekannt. Der mechanische Zustand kann einen oder mehrere Linear-, Rotations- und/oder Neigungszustände des Objekts beinhalten. In der Regel weist solch ein Magnetsensorsystem ein bewegliches Objekt, einen Magneten zum Erzeugen eines Magnetfelds und mindestens einen stationären Magnetfeldsensor auf, der mit einer Signalverarbeitungsschaltung verbunden ist. Das Objekt kann Teil einer Eingangsvorrichtung eines elektrischen Lenksystems wie einer Joystick-Steuerung oder eines Gangschalthebels in einem Getriebe sein. Im Allgemeinen weisen solche Systeme eine große Robustheit in einem weiten Temperaturbereich auf, und sie sind aufgrund ihrer kontaktlosen Funktionsweise verschleißfrei.

[0003] Eine Anwendung eines Magnetsensorsystems mit einem einzigen Magneten und einem einzigen Sensor ist in US 10 048 091 B1 offenbart worden. Dort wird ein Magnetsensor beschrieben, der einen Satz von Elementen zum Detektieren eines Satzes von Magnetfeldstärken eines durch einen Magneten erzeugten Magnetfelds aufweist. Basierend auf dem Satz von Magnetfeldstärken kann ein Zustand eines Objekts im Hinblick auf mehrere Freiheitsgrade einer Objektbewegung detektiert werden. Der Magnet soll mit dem Objekt derart verbunden sein, dass eine Mitte des Magneten von einer Rotationsachse des Objekts versetzt ist, und derart, dass der Magnet im Hinblick auf eine Richtung, die im Wesentlichen senkrecht zu der Rotationsachse verläuft, wenn sich das Objekt in einer nicht geneigten Position befindet, abgewinkelt ist. Der Magnetsensor ist auf der Rotationsachse des Objekts zentriert, wenn sich das Objekt in der nicht geneigten Position befindet.

[0004] Von A. Ermakova, L. Martins, D. Spitzer, M. Ortner: Analytical Modelling of Magnetic Multimedia Control Elements Based on a Single Magnetic Sensor. Proceedings 2018, 2, 840. DOI: 10.3390/proceedings2130840 ist ein Magnetsensorsystem gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 bekannt.

[0005] Auch aus der EP 1 464 918 A2 ist ein Magnetsensorsystem gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 bekannt. Darin sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung einer Position beschrieben, welche ein Magnet gegenüber einem im Magnetfeld des Magneten angeordneten Messort aufweist. Dabei liegt der Messort in der Mitte zwischen wenigstens zwei Magnetsensoren und eine Auswerteeinrichtung bestimmt die relative Position zwischen dem Magneten und dem Messort aus den Messsignalen der Magnetsensoren. Die wenigstens zwei Magnetsensoren messen die Magnetfeldstärke in drei orthogonalen Achsen (X, Y, Z). Ferner ist aus der US 2010 / 0 265 176 A1 ein Magnetsensorsystem gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 bekannt, bei dem mehrere Magnetsensoren unterhalb eines Permanentmagneten auf einer Leiterplatte angeordnet sind.

[0006] Ein weiteres Magnetsensorsystem ist bekannt aus „A. Ermakova, M. Ribeiro, D. Spitzer, M. Ortner: Analytical Development of a Four-Axis Magnetic Multimedia Control Element. In IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 19, pp. 7819-7825, 1 Oct. 2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2838579“. Darin ist ein Multimedia-Bedienelement beschrieben, welches mithilfe eines einzigen Magneten und eines einzigen 3D-Hallsensors Bewegungen um vier Achsen erfassen kann.

[0007] Aus der EP 2 706 007 A1 ist ein Joystick, ein System und ein Verfahren zum Manövrieren eines Bootes bekannt. In einer Ausführung des Joysticks ist dazu ein Magnetsensor vorgesehen, der die Position einer eisenhaltigen Kugel erfasst, welche am unteren Ende des Joysticks angeordnet ist. Aus dem Dokument „Infineon 3D Magnetic Sensor - How to Make a Magnetic Design for Joysticks. Application Note, Rev. 1.0 2016-06-21 (2016). URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-3D_Magnetic_Sensor_Joystick-AN-v01_00-EN-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46255dd933d0155e3cf23a91753“ ist ein weiteres Magnetsensorsystem für die Anwendung bei Joysticks bekannt. Darin sind verschiedene geometrische Anordnungen eines Magneten und eines Magnetfeldsensors mit Bezug auf ein kartesisches Koordinatensystem beschrieben.

[0008] Ferner sind aus der WO 2017/ 053 202 A1 Anordnungen von Magnetometern und Verfahren zu deren Anwendung bekannt. In einigen der beschriebenen Ausführungen wird aus den Messdaten des Magnetometers eine Jacobinsche Matrix des Magnetfeldes berechnet. Diese Jacobinsche Matrix kann dazu verwendet werden, eine Magnetfeldkarte für eine bestimmte Umgebung zu erzeugen oder eine Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung einer inertialen Messeinheit zu ermitteln.

[0009] Schließlich ist ein weiteres Magnetsensorsystem bekannt von Kim, Junguk: „DEVELOPMENT OF ORIENTATION MEASUREMENT SYSTEM WITH MAGNETIC FIELD AND NEURAL NETWORK“. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of UNIST, Südkorea (2018). URL: [https://scholarworks.unist.ac.kr/bitstream/201301/23506/1/DEVELOPMENT %20OF %20ORIENTATION%20MEASUREMENT%20SYSTEM%20WITH %20MAGNETIC%20FIELD%20AND %20NEURAL%20NETWORK.pdf](https://scholarworks.unist.ac.kr/bitstream/201301/23506/1/DEVELOPMENT%20OF%20ORIENTATION%20MEASUREMENT%20SYSTEM%20WITH%20MAGNETIC%20FIELD%20AND%20NEURAL%20NETWORK.pdf) Darin ist ein Vorgehen zur Beschränkung eines Algorithmus' auf bestimmte räumliche Bereiche einer Magnetfelderfassung bei einem Messsystem mit zwei Freiheitsgraden beschrieben. Durch die Beschränkung des Algorithmus' sollen uneindeutige Zuordnungen von Magnetfeld und Position vermieden werden.

[0010] Der Zweck der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein verbessertes Magnetsensorsystem, insbesondere im Hinblick auf ein kompaktes und einfaches Design und eine zuverlässige Funktion in einem weiten Anwendungsbereich, bereitzustellen. Ferner wird ein entsprechendes Verfahren zum Bestimmen des mechanischen Zustands einer neigbaren und drehbaren Welle mittels eines Magnetsensorsystems offenbart.

[0011] Diese Zwecke werden durch ein Magnetsensorsystem nach Anspruch 1, ein solch ein Magnetsensorsystem umfassendes Lenksystem für ein Schiff und durch ein Verfahren nach Anspruch 10 erreicht. Weitere bevorzugte Ausführungsformen werden in abhängigen Ansprüchen beansprucht.

[0012] Die Erfindung stellt ein Magnetsensorsystem bereit, das eine Welle, einen an der Welle befestigten Magneten und einen Magnetfeldsensor zum Detektieren des Magnetfelds des Magneten umfasst. Die Welle ist um eine Neigungsmittelpunkt neigbar und um eine Rotationsachse drehbar. Der Magnet ist in einem Abstand von der Neigungsmittelpunkt an der Welle befestigt. Der mindestens eine Magnetfeldsensor ist mit einer Signalverarbeitungseinheit verbunden, die dazu konfiguriert ist, einen mechanischen Zustand der Welle bezüglich mehrerer Bewegungsfreiheitsgrade zu bestimmen. Mit anderen Worten kann das System die Positionierung und Ausrichtung einer Welle detektieren. Der Magnet ist in einem Abstand von einer Neigungsmittelpunkt an der Welle befestigt. Der mindestens eine Magnetfeldsensor ist mit einem Versatz zu der Rotationsachse der Welle in dem Magnetfeld positioniert.

[0013] Das vorgeschlagene System weist eine Eins-zu-Eins-Entsprechung zwischen den mechanischen Zuständen der Welle und dem Sensorausgangssignal auf. Die Welle kann ein beliebiges Element sein, das in dem Magnetsensorsystem auf eine um eine Rotationsachse drehbare Weise gestützt

wird. Die Welle kann eine rotationssymmetrische Form aufweisen, sie kann aber auch eine nichtsymmetrische Form aufweisen. Bei einer Ausführungsform weist die Welle die Form und Funktion eines Joysticks auf.

[0014] Eine Ausführungsform weist nur einen Magnetfeldsensor und nur einen Magneten auf, wodurch ein sehr kompaktes und einfaches Design gestattet wird. Wie nachfolgend unter Bezugnahme auf eine Ausführungsform weiter beschrieben wird, kann eine dreidimensionale Bewegungsdetektion eines nur einen Magneten und nur einen Sensor umfassenden Joysticks vollständig gelöst werden, wenn das System spezielle mathematische Bedingungen erfüllt.

[0015] Andere Ausführungsformen können mehrere Magnetfeldsensoren umfassen. Dies ist leicht möglich, weil der Magnetfeldsensor der vorliegenden Erfindung sowieso mit einem Versatz zu der Rotationsachse positioniert ist. Vorzugsweise sollen alle Magnetfeldsensoren einer Anordnung mit mehreren Sensoren in einer Ebene positioniert werden, die senkrecht zu der Rotationsachse verläuft. Mit mehreren Magnetfeldsensoren ist das System robuster gegenüber magnetischen Streufeldern. Ferner können die Signale mehrerer Sensoren im Vergleich zu Signalen von nur einem Sensor in komplexeren Kalman-Filtern verarbeitet werden. Somit kann eine zuverlässigere Bestimmung des mechanischen Zustands der Welle durch Verwendung mehrerer Magnetfeldsensoren erreicht werden.

[0016] Jede Wellenposition kann einer speziellen Magnetposition und -ausrichtung zugeordnet werden. Der Magnet kann bezüglich der Welle in verschiedenen Positionen angeordnet werden. Für viele Anwendungen kann es von Vorteil sein, den Magneten auf der Unterseite der Welle anzubringen. Im Hinblick auf die Rotationsachse kann der Magnet in einer mittleren Position auf der Rotationsachse der Welle an der Welle befestigt werden. Bei anderen Ausführungsformen kann der Magnet mit einem Versatz zu der Rotationsachse an der Welle befestigt werden. Dies bedeutet, dass der Magnet und der Magnetfeldsensor von der Rotationsachse versetzt sind. Es ist möglich, den Magneten mit einem größeren Abstand von der Rotationsachse als der Magnetfeldsensor oder umgekehrt zu versetzen. In Abhängigkeit von der gewählten Anordnung des Magneten und des Magnetfeldsensors im Hinblick auf die Rotationsachse und die Neigungsmittelpunkt können verschiedene Sensorgebiete erreicht werden. Ein Sensorgebiet deckt alle mechanischen Zustände der Welle ab, wenn eine Eins-zu-Eins-Entsprechung zwischen dem mechanischen Zustand und einem Sensorausgangssignal erfolgt. Somit entspricht ein Sensorgebiet einem Satz von mechanischen Zuständen, für die ein Algorithmus in der Verarbeitungseinheit reali-

sierbare Ergebnisse erreicht. Das Sensorgebiet kann als ein Bereich in einem entsprechenden Diagramm angezeigt werden, wie nachfolgend weiter beschrieben wird.

[0017] Die Magnetachse des Magneten ist vorzugsweise senkrecht zu der Rotationsachse angeordnet. Die Magnetachse bedeutet die Richtung der Magnetisierung. Es wurde festgestellt, dass die besten Ergebnisse erreicht werden können, wenn die Magnetachse und die Rotationsachse senkrecht zueinander verlaufen. Angesichts der erwähnten Erfassungsgebiete kann das maximale Ausmaß der Erfassungsgebiete erreicht werden, was dem weitesten Bereich von mechanischen Zuständen der Welle, die durch das vorgeschlagene Magnetsensorsystem bestimmt werden können, entspricht.

[0018] Die Orthogonalität muss jedoch nicht für jedwede Anwendung der Erfindung exakt genau sein. Geeignete Anordnungen hängen von den gewählten geometrischen Bedingungen wie Abständen, der Magnetgröße und der Stärke sowie von der Sensorgröße und den Sensoreigenschaften ab. Ein Fachmann kann durch einfache Testverfahren geeignete und zufriedenstellende Anordnungen zum Reproduzieren der Erfindung auch in einem Bereich außerhalb der genau senkrechten Anordnung finden. Der Magnet kann eine beliebige Art von magnetischem Dipol sein, der ein lokales Magnetfeld erzeugt. Eine bevorzugte Form des Magneten ist eine kubische Form. Kubische Magneten erzeugen im Vergleich zu anderen Formen von Magneten größere Magnetfeldamplituden. Dies gestattet eine größere Zustandstrennung, was eine höhere Zuverlässigkeit und Qualität bei der Bestimmung des mechanischen Zustands der Welle bedeutet. Eine größere Zustandstrennung bedeutet, dass die verschiedenen mechanischen Zustände untereinander gut getrennt sind.

[0019] Der Magnetfeldsensor oder die Magnetfeldsensoren können auf einer als PCB bekannten Leiterplatte, die senkrecht zu der Rotationsachse der nicht geneigten Welle angeordnet ist, angeordnet sein. Dadurch können die Magnetfeldsensoren als diskrete Bauteile, die auf die PCB gelötet sind, in der Signalverarbeitungseinheit integriert sein. Bei anderen Ausführungsformen können die Magnetfeldsensoren unter Verwendung einer bekannten Einbettungstechnologie in der PCB eingebettet sein. Es gibt verschiedene Arten von Magnetfeldsensoren, die zur Verfügung stehen und zur Verwendung bei der vorliegenden Erfindung geeignet sind. Nur als Beispiele können Hall-Effekt-Sensoren, MAG-FETs oder einen Magnetowiderstandseffekt verwendende Sensoren verwendet werden.

[0020] Das Magnetsensorsystem kann den Zustand der Welle im Hinblick auf mindestens drei Freiheits-

grade bestimmen. Insbesondere bei Ausführungsformen, bei denen ein Joystick als Welle verwendet wird, können diese drei Freiheitsgrade durch einen Rotationswinkel φ , einen Neigungswinkel θ und einen Azimutwinkel ψ der Welle bestimmt werden. Eine Drehung der Welle um ihre eigene Rotationsachse kann durch den Rotationswinkel φ bestimmt werden. Die Rotationsachse der Welle kann auf die z-Richtung eines entsprechenden kartesischen Koordinatensystems ausgerichtet sein, wenn die Welle nicht geneigt ist. Eine Neigung der Welle um die Neigungsmittel kann durch den Neigungswinkel θ , auch als Polarwinkel bezeichnet, bestimmt werden. Die Neigungsmittel kann auf der Rotationsachse der Welle positioniert sein. Mit anderen Worten verläuft die Rotationsachse vorzugsweise durch die Neigungsmittel. Der Azimutwinkel ψ entspricht der Neigungsrichtung in einer Ebene, die senkrecht zu der Rotationsachse der nicht geneigten Welle verläuft, z. B. der durch die x- und die y-Richtung des kartesischen Koordinatensystems umspannten Ebene. Aufgrund der mechanischen Beschränkungen des Neigungswinkels in solch einem System kann der mögliche Bereich des Neigungswinkels θ in der Signalverarbeitungseinheit beispielsweise auf einen Bereich von $\pm 20^\circ$ oder darunter beschränkt sein. In Abhängigkeit von der speziellen Anwendung ist es möglich, auch die Bereiche der Rotation und Winkel φ und ψ zu beschränken. Bei einer typischen Ausführungsform mit einem Joystick wird bevorzugt, die volle Drehung des Azimutwinkels ψ zu realisieren, während der Rotationswinkel φ auf ein bestimmtes Ausmaß, zum Beispiel auf einen Bereich von $\pm 30^\circ$, beschränkt sein kann.

[0021] Ein axialer Abstand, d. h. der Luftspalt, zwischen dem Magneten und dem mindestens einen Magnetfeldsensor, kann in einem Bereich zwischen 1 und 5 Millimetern liegen. Der axiale Abstand bezieht sich auf einen Abstand entlang einer Rotationsachse der nicht geneigten Welle, die als eine z-Achse in einem entsprechenden kartesischen Koordinatensystem definiert sein kann. Vorzugsweise kann dieser axiale Abstand zwischen dem Magneten und dem einen oder den mehreren Magnetfeldsensoren in einem Bereich zwischen 2 und 4 Millimetern liegen. Der Versatz des Magnetfeldsensors von der Rotationsachse liegt vorzugsweise in einem Bereich zwischen 0,1 und 15 Millimetern. Der Versatz zwischen der Neigungsmittel und dem Magneten in der Richtung der Rotationsachse kann zwischen 3 und 5 Millimetern liegen. Bei einer Ausführungsform mit speziellen Bewegungsneigungs- und -rotationsbereichen und speziellen mechanischen Toleranzen haben sich die folgenden Werte angesichts einer großen Erstreckung der Erfassungsgebiete und einer großen Zustandstrennung als besonders vorteilhaft erwiesen:

- ein Spalt von ungefähr 2 Millimetern zwischen dem Magneten und einem einzigen Magnetfeldsensor,

- ein Versatz von ungefähr 4,3 Millimetern zwischen der Neigungsmittelpunkt und dem Magneten in Richtung der Rotationsachse und

- ein Versatz von ungefähr 5,5 Millimetern zwischen Rotationsachse und dem Magnetfeldsensor in einer senkrecht zu der Rotationsachse verlaufenden Richtung.

[0022] Für andere Bewegungen und verschiedene mechanische Toleranzen können die optimalen Werte verschieden sein.

[0023] Ein weiterer Aspekt der Erfindung ist die Signalverarbeitung des Magnetsensorsystems. Die Signalverarbeitungseinheit ist dazu konfiguriert, eine Jacobi-Determinante für die Bestimmung des mechanischen Zustands der Welle zu verwenden. Dies bedeutet, dass eine spezielle Art von Vektorberechnung in der Signalverarbeitungseinheit verarbeitet wird. Die Jacobi'sche Matrix einer vektorwertigen Funktion in mehreren Variablen ist die Matrix aller ihrer partiellen Ableitungen erster Ordnung. Wenn die Matrix quadratisch ist, das heißt wenn die Funktion die gleiche Anzahl von Variablen als Eingabe wie die Anzahl von Vektorkomponenten ihrer Ausgabe nimmt, wird ihre Determinante als die Jacobi-Determinante bezeichnet.

[0024] Bei einer Ausführungsform kann die Erfindung in einem Lenksystem für ein Schiff verwendet werden, das ein Magnetsensorsystem wie oben beschrieben umfasst und wobei die Welle ein Joystick zum Lenken des Antriebssystems des Schiffes ist. Auf diese Weise profitiert das Lenksystem von der robusten und zuverlässigen Funktion des erfindungsgemäßen Magnetsensorsystems. Bei anderen Ausführungsformen kann die Erfindung in der Umgebung von magnetischen Werkzeugen für kontaktfreie Bewegungsdetektion, magnetischen Multimedia-steuerungselementen, Mensch-Maschine-Schnittstellen und ähnlichen Systemen verwendet werden.

[0025] Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zum Bestimmen des mechanischen Zustands einer neigbaren und drehbaren Welle. Das Verfahren verwendet ein Magnetsensorsystem, das die neigbare und drehbare Welle, einen Magneten und mindestens einen Magnetfeldsensor zum Detektieren des Magnetfelds des Magneten umfasst. Der mindestens eine Magnetfeldsensor und der Magnet sind mit einem Versatz zwischen sich in einer senkrecht zu einer Rotationsachse der nicht geneigten Welle verlaufenden Ebene angeordnet. Das Signal des mindestens einen Magnetfeldsensors wird von einem Prozessor empfangen und berechnet. Der Rechenprozess zum Bestimmen des mechanischen

Zustands der Welle beinhaltet einen Algorithmus mit einer Jacobi'schen Matrix. Das vorgeschlagene Verfahren basiert auf der Auflösung eines inversen Problems, das in der Berechnung des mechanischen Zustands ausgehend von dem Sensorausgangssignal besteht. Das Verfahren beinhaltet die Analyse der Jacobi-Determinante in jedem mechanischen Zustand innerhalb definierter Erfassungsgebiete. Durch Berechnen der Jacobi-Determinante in jedem mechanischen Zustand wird ein Erfassungsgebiet als der Satz von mechanischen Zuständen definiert, wo es eine Eins-zu-Eins-Entsprechung zwischen dem mechanischen Zustand und einem Sensorausgangssignal gibt.

[0026] Vorzugsweise wird ein Algorithmus zum Berechnen der Jacobi'schen Matrix mittels einer Beschränkung auf die Jacobi-Determinante begrenzt, um die mechanischen Zustände der Welle nur innerhalb definierter Erfassungsgebiete zu bestimmen. Da alle mechanischen Zustände innerhalb der Erfassungsgebiete durch ein Gleichheitszeichen der Jacobi-Determinante mittels der Beschränkung auf den Jacobi'schen Wert gekennzeichnet sind, kann der Algorithmus auf das Auflösen des inversen Problems innerhalb solch eines Erfassungsgebiets begrenzt werden. Solch eine Begrenzung vermeidet ungültige Ergebnisse, die in einem so genannten Ausfallsgebiet, in dem die Eins-zu-Eins-Beziehung zwischen den mechanischen Zuständen der Welle und der Sensorausgabe nicht gültig ist, auftreten könnten. Die Begrenzung auf gültige Erfassungsgebiete gewährleistet Algorithmusstabilität, da das inverse Problem, das durch den Algorithmus gelöst wird, nicht zu mechanischen Zuständen außerhalb des Erfassungsgebiets konvergiert.

[0027] Das vorgeschlagene Verfahren gestattet ein zuverlässiges Bestimmen des mechanischen Zustands der Welle aus der Magnetfeldsensorausgabe durch Verleihen einer Beschränkung auf einen lokalen Algorithmus basierend auf analytischen Lösungen für das Magnetfeld, die den Algorithmus auf einen bestimmten Zustandsraum begrenzt. Dieser Zustandsraum kann in Form von Erfassungsgebieten besprochen und angezeigt werden. Diese Beschränkung gestattet die vollständige Nutzung eines verfügbaren Magnetfeldraums mit lokalen Optimierungen ohne die Gefahr von ungültigen Ergebnissen. Diese Beschränkung kann ein festes Zeichen der Jacobi-Determinante sein.

[0028] Mit anderen Worten wird das Zeichen der Jacobi-Determinante dazu verwendet, zu überprüfen, ob ein berechneter mechanischer Zustand der Welle der richtige ist, das heißt, ob der berechnete mechanische Zustand innerhalb des Erfassungsgebiets liegt.

[0029] Es kann bei einigen Anwendungen einen begrenzten Bereich oder Raum für die mechanische Bewegung der Welle geben. Solch ein gestatteter Bereich an mechanischer Bewegung kann durch einen Raumparameter in dem Algorithmus berücksichtigt werden, um den mechanischen Zustand der Welle zu bestimmen. Andere Systemparameter in dem Algorithmus können die vollständige Systemgeometrie, Materialparameter, Sensoreigenschaften, Toleranzen oder externe Einflüsse wie Streufelder beinhalten. Der mechanische Zustand der Welle kann durch einen Rotationswinkel φ , einen Neigungswinkel θ und einen Azimutwinkel ψ der Welle zum Durchführen des vorgeschlagenen Verfahrens bestimmt werden.

[0030] Die Erfindung wird nunmehr rein beispielhaft und unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen in näherer Einzelheit weiter beschrieben; in den Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Magnetsensorsystems gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2 eine vereinfachte schematische Darstellung des Magnetsensorsystems von **Fig. 1** mit die Freiheitsgrade der Welle bestimmenden Winkeln;

Fig. 3 das Magnetsensorsystem von **Fig. 1** in einem kartesischen Koordinatensystem;

Fig. 4 ein Diagramm mit Magnetfeld-ISO-Oberflächen für spezielle Neigungswinkel und Rotationswinkel und

Fig. 5 ein Diagramm mit einem Erfassungsgebiet eines vorgeschlagenen Magnetsensorsystems.

[0031] Ein Magnetsensorsystem 1 in **Fig. 1** umfasst eine neigbare und drehbare Welle 2, einen Magneten 3 und einen Magnetfeldsensor 4 zum Detektieren des Magnetfelds des Magneten 3. Der Magnetfeldsensor 4 ist mit einer Signalverarbeitungseinheit 5 verbunden, die dazu konfiguriert ist, einen mechanischen Zustand der Welle 2 bezüglich mehrerer Bewegungsfreiheitsgrade zu bestimmen. Der Magnet 3 ist in einer mittleren Position auf der Rotationsachse 6 der Welle 2 an der Welle 2 befestigt, während der Magnetfeldsensor 4 mit einem Versatz zu der Rotationsachse 6 in dem durch den Magneten 3 erzeugten Magnetfeld positioniert ist, wie in **Fig. 2** und **Fig. 3** zu sehen ist. Der Magnetfeldsensor 4 ist bezüglich der beweglichen Welle 2 stationär, und der Magnetfeldsensor 4 ist in einem gewissen Abstand zu dem Magneten 3 positioniert. Somit gibt es zwischen dem Magneten 3 und dem Magnetfeldsensor 4 einen Luftspalt 10. Der Magnetfeldsensor 4 ist auf einer Leiterplatte 8 angeordnet, die senkrecht zu der Rotationsachse 6 unterhalb der Welle 2 und des Magneten 3 angeordnet ist.

[0032] **Fig. 2** zeigt, wie die mechanischen Zustände der Welle 2 durch einen Rotationswinkel φ , einen Neigungswinkel θ und einen Azimutwinkel ψ bestimmt werden können. Die Rotationsachse 6 der nicht geneigten Welle 2 kann der z-Achse eines kartesischen Koordinatensystems entsprechen.

[0033] In **Fig. 3** ist das Magnetsensorsystem 1 in einem kartesischen Koordinatensystem mit seiner x-, y- und z-Achse positioniert. Die Rotationsachse 6 der Welle 2 entspricht der z-Achse. Der Magnet 3 ist zentrisch auf der z-Achse mit einem Abstand zu der Neigungsmittelpunkt 9 positioniert. Eine Magnetachse 7 des Magneten 3 verläuft senkrecht zu der z-Achse in Richtung der y-Achse.

[0034] Der Magnetfeldsensor 4 befindet sich in der Ebene der x-Achse und y-Achse und ist von dem Ursprung des kartesischen Koordinatensystems in Richtung der x-Achse versetzt. Mit anderen Worten befindet sich der Magnetfeldsensor 4 mit einem Versatz in der x-Richtung bezüglich der Rotationsachse 6. Somit verläuft die Magnetachse 7 des Magneten 3 senkrecht zu der Rotationsachse 6 und zu der Versatzrichtung des Magnetfeldsensors 4. Der Magnetfeldsensor 4 kann direkt an der Leiterplatte 8 befestigt sein oder in der Leiterplatte 8, die in der von der x-Achse und der y-Achse umspannten Ebene angeordnet sein kann, integriert sein.

[0035] Das Diagramm in **Fig. 4** zeigt drei gebogene Ebenen 11, 12 und 13 in dem dreidimensionalen Raum, der durch die Feldkomponenten der am Sensor gemessenen Magnetflussdichte, nämlich B_x , B_y , B_z , verbreitet ist. Jede Ebene 11, 12, 13 ist durch mehrere Linien angegeben. Jede Ebene 11, 12, 13 entspricht einem verschiedenen Rotationswinkel φ . Die getrennten Linien in jeder Ebene 11, 12 und 13 beziehen sich auf verschiedene Neigungswinkel θ . Das vorgeschlagene Magnetsensorsystem weist eine Eins-zu-Eins-Entsprechung zwischen den mechanischen Zuständen der Welle 2 und dem Sensorausgangssignal auf. Bei einem eingeschränkten Rotationsintervall, z. B. $\pm 45^\circ$ oder $\pm 90^\circ$, sind die magnetischen Zustände gut getrennt und zeigen glatte ISO-Oberflächen, was entscheidend für eine effiziente Magnetpositionsdetektion ist. Die glatten ISO-Oberflächen sind in **Fig. 4** als die Ebenen 11, 12, 13 zu sehen.

[0036] Das Diagramm in **Fig. 5** zeigt das Erfassungsgebiet 14 für das vorgeschlagene Magnetsensorsystem und seine Abgrenzung von einem Nichterfassungsgebiet 15. Das vorgeschlagene Verfahren beinhaltet die Analyse der Jacobi-Determinante in jedem mechanischen Zustand innerhalb eines definierten Erfassungsgebiets 14. Durch Berechnen der Jacobi-Determinante in jedem mechanischen Zustand wird das Erfassungsgebiet 14 als der Satz von mechanischen Zuständen definiert, bei denen es

eine Eins-zu-Eins-Entsprechung zwischen dem mechanischen Zustand der Welle 2 und dem Sensorausgangssignal gibt.

[0037] Da alle mechanischen Zustände innerhalb des Erfassungsgebiets 14 durch ein Gleichheitszeichen der Jacobi-Determinante gekennzeichnet sind, ist der Algorithmus mittels Beschränkung auf den Jacobi'schen Wert auf das Auflösen des inversen Problems innerhalb dieses Gebiets begrenzt. Dadurch wird insofern eine Algorithmusstabilität gewährleistet, als das inverse Problem nicht zu mechanischen Zuständen außerhalb des Erfassungsgebiets 14 konvergiert.

Bezugszeichenliste

1	Magnetsensorsystem
2	Welle
3	Magnet
4	Magnetfeldsensor
5	Signalverarbeitungseinheit
6	Rotationsachse
7	Magnetachse
8	Leiterplatte
9	Neigungsmitte
10	Luftspalt
11	Ebene
12	Ebene
13	Ebene
14	Erfassungsgebiet
15	Nichterfassungsgebiet

Patentansprüche

1. Magnetsensorsystem (1), das eine Welle (2), die um eine Neigungsmitte (9) neigbar und um eine Rotationsachse (6) drehbar ist, einen in einem Abstand von der Neigungsmitte (9) an der Welle (2) befestigten Magneten (3) und mindestens einen Magnetfeldsensor (4) zum Detektieren des Magnetfelds des Magneten (3) umfasst, wobei die Rotationsachse (6) der nicht geneigten Welle (2) der z-Achse eines kartesischen Koordinatensystems entspricht, wobei der mindestens eine Magnetfeldsensor (4) mit einer Signalverarbeitungseinheit (5) verbunden ist, die dazu konfiguriert ist, einen mechanischen Zustand der Welle (2) bezüglich mehrerer Bewegungsfreiheitsgrade der Welle (2) zu bestimmen, und wobei der mindestens eine Magnetfeldsensor (4) mit einem Versatz zu der Rotationsachse (6) der nicht geneigten Welle (2) in dem Magnetfeld positioniert ist, **dadurch gekennzeichnet**

net, dass die Signalverarbeitungseinheit (5) dazu konfiguriert ist, eine Jacobi-Determinante für die Bestimmung des mechanischen Zustands der Welle (2) zu verwenden, und dass, durch Berechnen der Jacobi-Determinante in jedem mechanischen Zustand, ein Erfassungsgebiet (14) als ein Satz von mechanischen Zuständen definiert wird, bei denen es eine Eins-zu-Eins-Entsprechung zwischen dem mechanischen Zustand der Welle (2) und einem Sensorausgangssignal gibt.

2. Magnetsensorsystem (1) nach Anspruch 1, wobei eine Magnetachse (7) des Magneten (3) senkrecht zu der Rotationsachse (6) angeordnet ist.

3. Magnetsensorsystem (1) nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Magnet (3) mittig auf der Rotationsachse (6) an der Welle (2) befestigt ist.

4. Magnetsensorsystem (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der mindestens eine Magnetfeldsensor (4) auf einer Leiterplatte (8) angeordnet ist, die senkrecht zu der Rotationsachse (6) angeordnet ist.

5. Magnetsensorsystem (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der mechanische Zustand der Welle (2) durch einen Rotationswinkel φ , einen Neigungswinkel θ und einen Azimutwinkel ψ bestimmt wird.

6. Magnetsensorsystem (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der axiale Abstand entlang der z-Achse des kartesischen Koordinatensystems zwischen dem Magneten (3) und dem mindestens einen Magnetfeldsensor (4) in einem Bereich zwischen 1 und 5 Millimetern liegt.

7. Magnetsensorsystem (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Versatz in einem Bereich zwischen 1 und 8 Millimetern liegt.

8. Lenksystem für ein Schiff, umfassend ein Magnetsensorsystem (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Welle (2) ein Joystick zum Lenken eines Antriebssystems des Schiffes ist.

9. Verfahren zum Bestimmen des mechanischen Zustands der neigbaren und drehbaren Welle (2) des Magnetsensorsystems (1) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das Sensorausgangssignal des mindestens einen Magnetfeldsensors (4) von einem Prozessor empfangen und berechnet wird, wobei ein Rechenprozess einen Algorithmus mit einer Jacobi'schen Matrix beinhaltet, und wobei, durch Berechnen der Jacobi-Determinante in jedem mechanischen Zustand, ein Erfassungsgebiet (14) als ein Satz von mechanischen Zuständen definiert wird, bei denen es eine Eins-zu-Eins-Ent-

sprechung zwischen dem mechanischen Zustand der Welle (2) und dem Sensorausgangssignal gibt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei der Algorithmus zum Berechnen der Jacobi'schen Matrix mittels einer Beschränkung auf die Jacobi-Determinante zum Bestimmen der mechanischen Zustände der Welle (2) nur innerhalb definierter Erfassungsbereiche (14) begrenzt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, wobei der mechanische Zustand der Welle (2) durch einen Rotationswinkel φ , einen Neigungswinkel θ und einen Azimutwinkel ψ der Welle (2) bestimmt wird.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

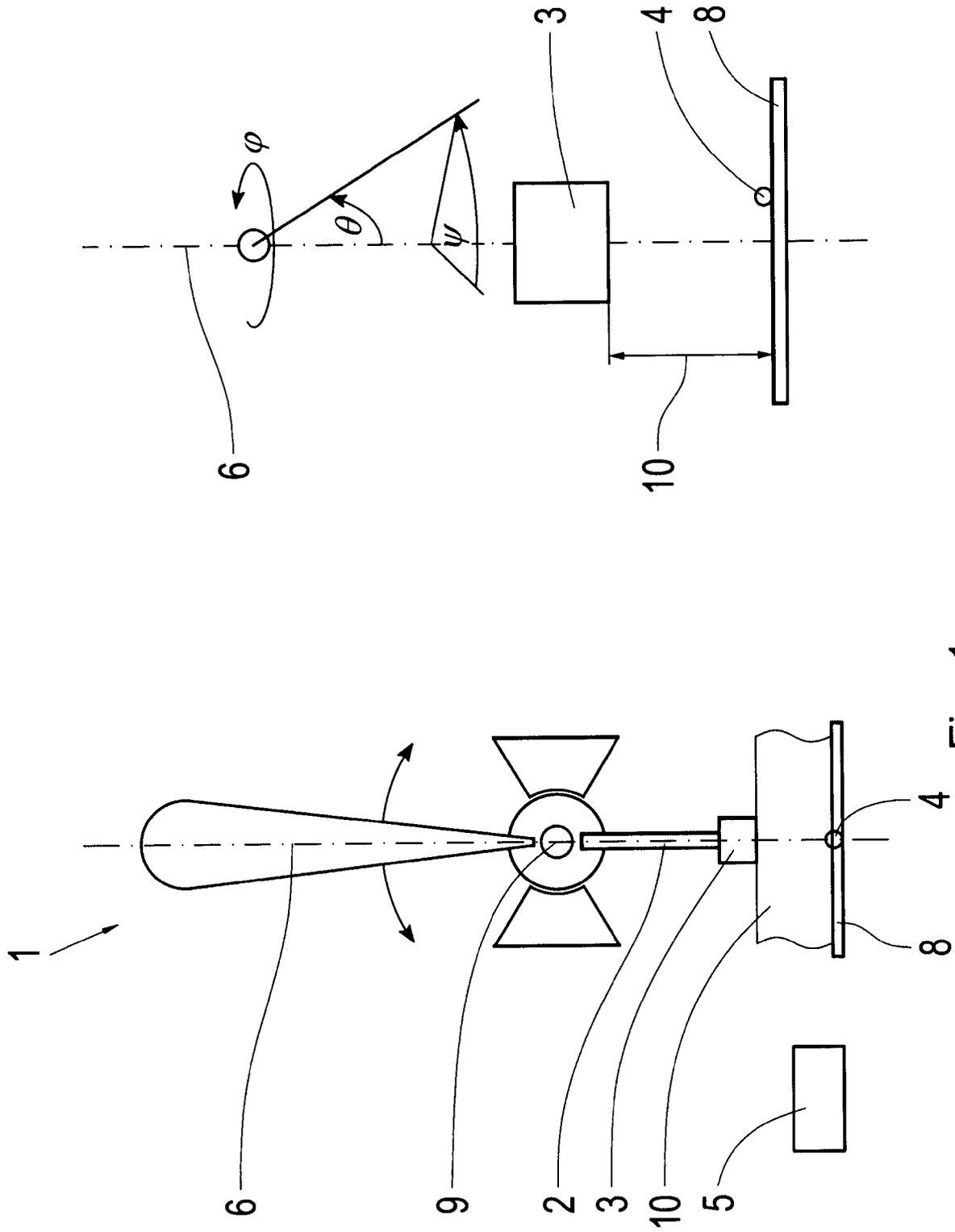


Fig. 2

Fig. 1

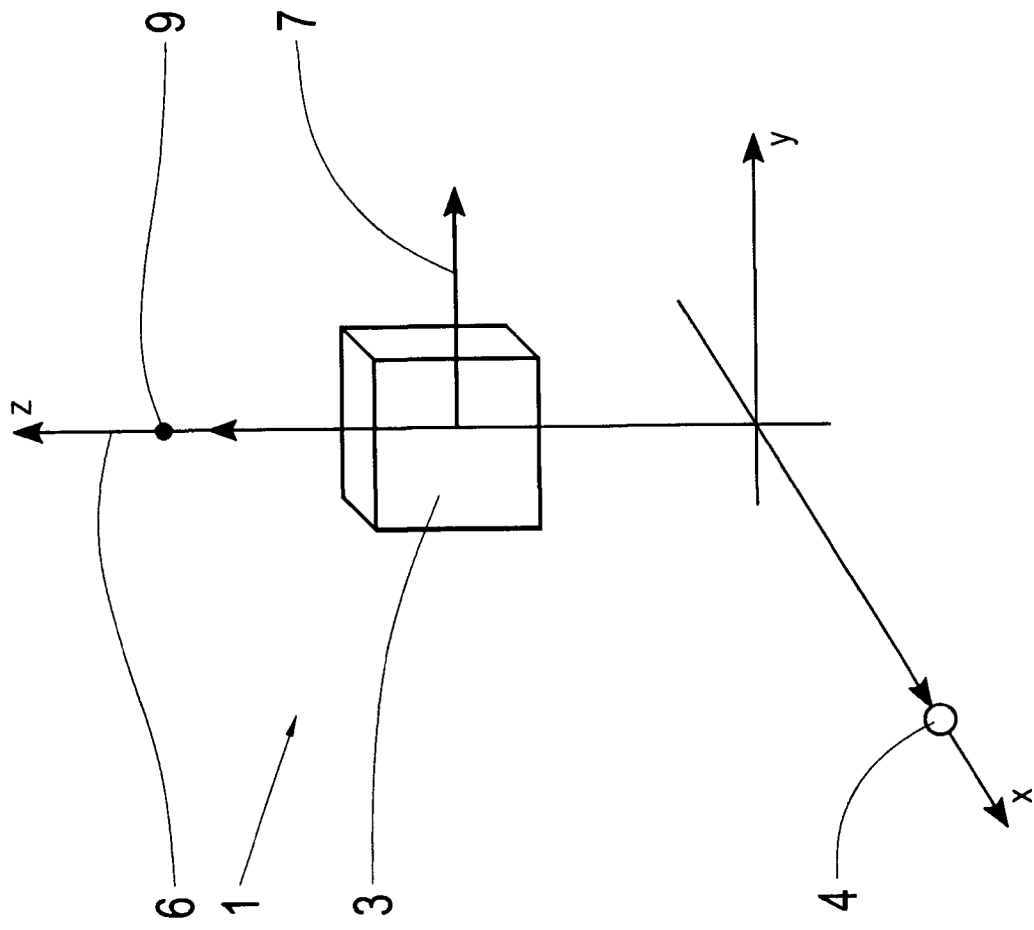


Fig. 3

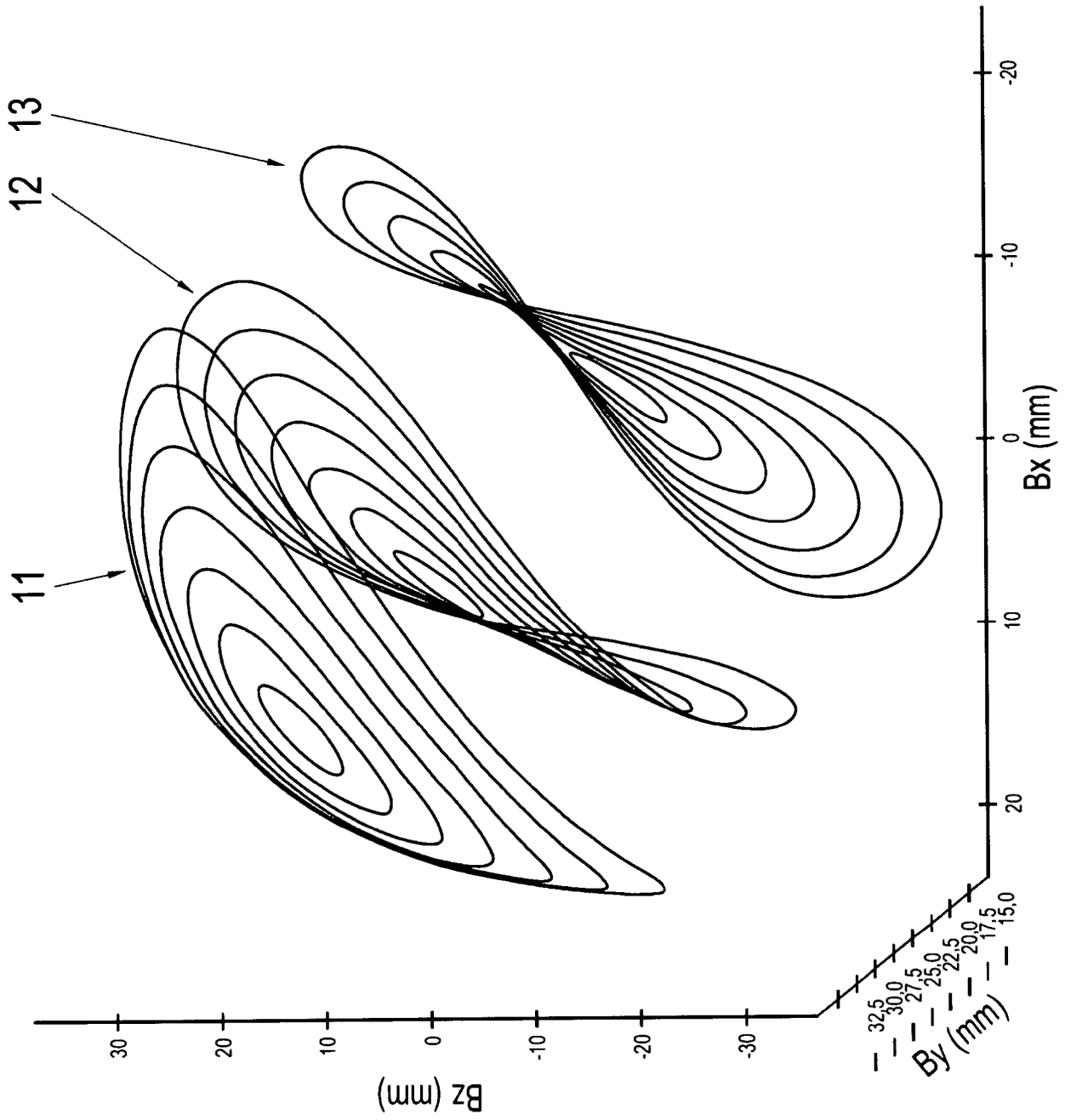


Fig. 4

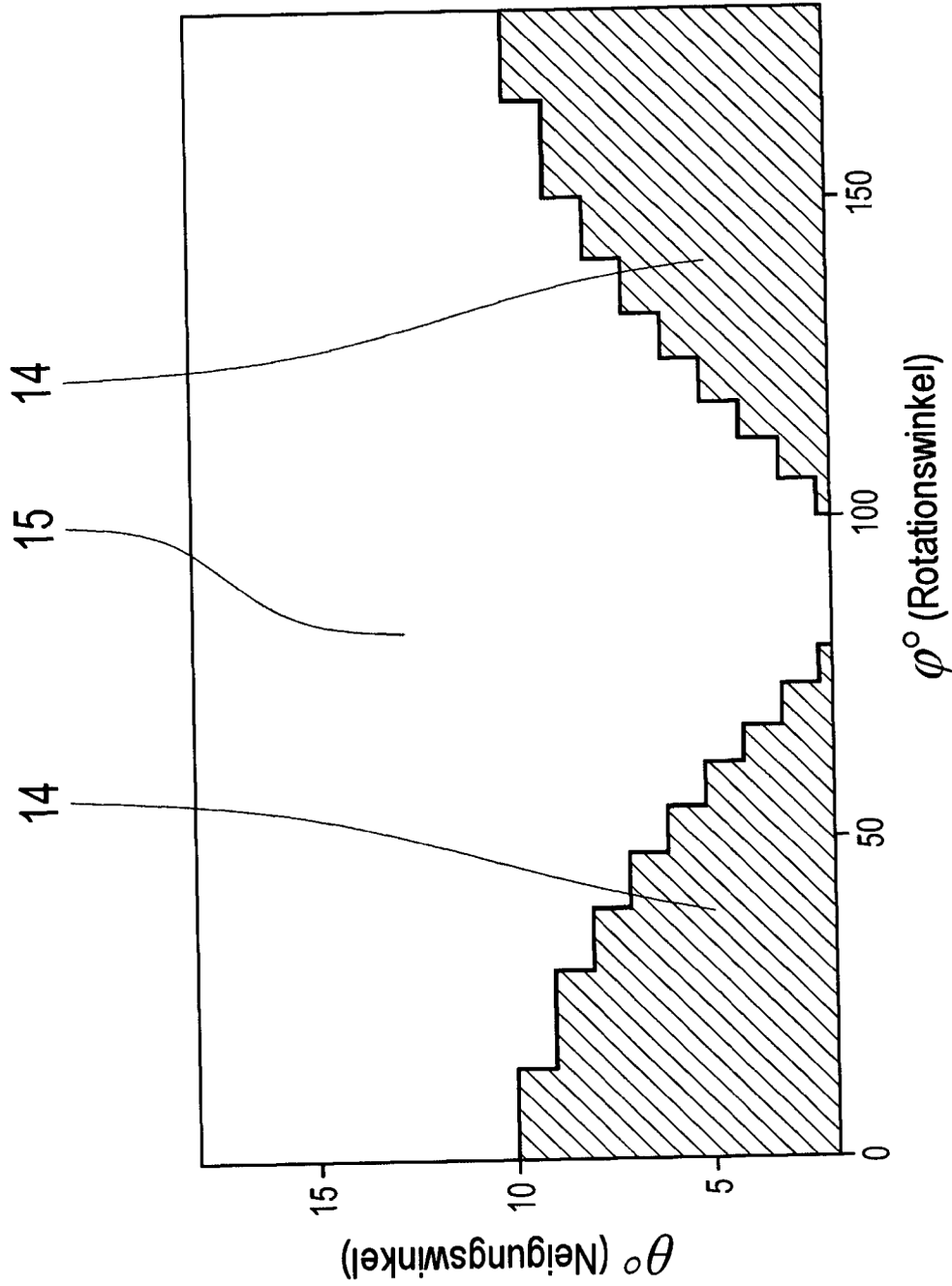


Fig. 5