



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 023 439 A1** 2009.11.26

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 023 439.7**

(22) Anmeldetag: **14.05.2008**

(43) Offenlegungstag: **26.11.2009**

(51) Int Cl.⁸: **H04N 5/232** (2006.01)

H04N 5/272 (2006.01)

G06T 1/00 (2006.01)

G06T 15/00 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118
 Kiel, DE**

(74) Vertreter:

BOEHMERT & BOEHMERT, 24105 Kiel

(72) Erfinder:

**Koch, Reinhard, Prof. Dr., 24119 Kronshagen, DE;
 Haase, Kristine, 24340 Eckernförde, DE**

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

EP 15 01 051 A2

US 61 81 302 B1

EP 07 22 601 B1

DE 10 2005 045973 A1

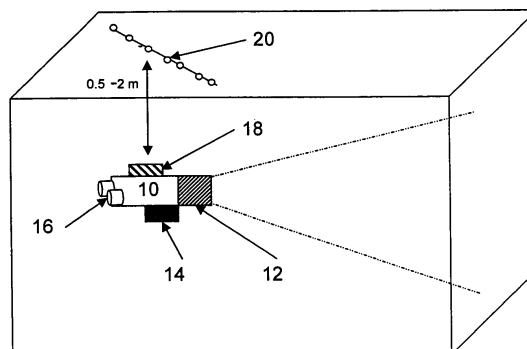
DE 10 2004 017730 B4

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Augmented Reality Fernglas zur Navigationsunterstützung**

(57) Zusammenfassung: Vorrichtung zur Augmentierung eines elektronischen Abbildes einer realen Szene mit Augmentierungsinformationen, umfassend eine perspektivische elektronische Kamera, ein Display zur Wiedergabe des Abbildes der realen Szene, eine Einrichtung zur Bestimmung der Position der perspektivischen Kamera in einem globalen Koordinatensystem, eine Einrichtung zur kontinuierlichen Bestimmung der Verdrehung der perspektivischen Kamera bezüglich des globalen Koordinatensystems, eine Datenspeichereinheit, enthaltend die Augmentierungsinformationen bezüglich des globalen Koordinatensystems, eine Recheneinheit, ausgebildet zur Kommunikation mit der Datenspeichereinheit und den Einrichtungen zur Position- und Verdrehungsbestimmung sowie mit der perspektivischen Kamera und dem Display, wobei die Recheneinheit dem Display Anweisungen zur Darstellung der Augmentierungsinformationen derart erteilt, dass diese Informationen sichtbaren Objekten im Abbild der realen Szene zugeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur Bestimmung der Verdrehung der perspektivischen Kamera folgende Komponenten umfasst: a. einen Sensor zur Messung der Schwerkraftfrichtung in starrer Verbindung mit der perspektivischen Kamera, b. eine sphärische Kamera in starrer Verbindung mit der perspektivischen Kamera, wobei die Bildebenen der Kameras senkrecht aufeinander stehen, c. eine Markeranordnung, umfassend wenigstens zwei Marker, angeordnet in einer bezüglich des globalen Koordinatensystems verdrehbaren ...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein System und ein Verfahren zur Augmentierung eines elektronischen Abbildes einer realen Szene mit computergenerierten Informationen. Die Erfindung betrifft insbesondere eine vergrößernde elektronische Kamera mit daran angeordnetem binokularem Display ausgebildet nach Art eines Fernglases, wobei im Display computergenerierte Bildelemente dem Kamerabild einer realen Szene überlagert werden. Die Erfindung betrifft ein Verfahren, diese Einblendung der Symbole passgenau in Bezug auf vorab bekannte Objekte der realen Szene einzurichten unter Beachtung der aktuellen Kameraposition und -pose. Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Navigationsunterstützung insbesondere im Seeverkehrswesen.

[0002] Eine Augmentierung ist das Einblenden von zusätzlichen Informationen in Aufnahmen der realen Umgebung des Benutzers. Die einfachste Form der Bildaugmentierung besteht im Einblenden von Informationen, die keinen direkten Bezug zur realen Szene haben, z. B. Datum und Uhrzeit in elektronischen Fotografien. Ein weiteres Beispiel ist das Einblenden aktueller Instrumentenanzeigen in das Sichtfeld eines Piloten, damit dieser seinen Blick nicht von einem Ziel im Unendlichen abwenden und auf die Instrumente fokussieren muss, um diese abzulesen. Er muss somit den Kopf auch nicht neigen, was einer solchen Vorrichtung die Bezeichnung „Head Up Display“ (HUD) verschafft.

[0003] Sehr viel aufwendiger ist aber das Einblenden von Informationen über reale Objekte, die sich gerade im Sichtfeld des Beobachters befinden. Dies setzt voraus, dass die relative Position und Pose von Kamera zu Objekt bekannt sind oder ermittelt werden können, damit eine begrenzte Szenenrekonstruktion in einem Rechner erfolgen kann. Aufgabe der Szenenrekonstruktion ist zunächst festzustellen, ob sich das Objekt im Sichtfeld der Kamera befindet, und falls ja, an welcher Stelle – in Pixelkoordinaten – des elektronischen Bildes. Wünschenswert ist stets die Einblendung von Zusatzinformationen, z. B. ein Symbol (Icon) oder eine Objektbezeichnung, an oder unmittelbar neben der Position des Objekts im Bild.

[0004] Die EP 0 722 601 B1 stellt ausführlich zweckmäßige Anwendungsmöglichkeiten von „Augmented Reality“ (AR)-Sichtsystemen vor und gibt Hinweise auf den prinzipiellen Aufbau entsprechender Vorrichtungen. Unter anderem schlägt die Druckschrift auch vor, ein AR-Fernglas zur Unterstützung des Navigationsoffiziers eines Schiffes zu konzipieren. Eine nautische Peilung ist bisher nur bei Sichtkontakt zu ortsfesten Objekten möglich, wobei ein Abgleich mit Seekarten zur Identifikation der Objekte vorgenommen werden muss.

[0005] Ein AR-Fernglas kann bei Nacht oder verdeckter Sicht zu den Objekten zur Identifikation der Navigationselemente beitragen und zusätzliche Informationen wie gegenwärtige Entfernung oder Eigenschaften wie Leuchtsignaltaktungen liefern. Die Positionen solcher Navigationselemente sowie zugeordnete Augmentierungsinformationen werden dafür aus digitalisierten, genormten Seekarten entnommen, die als elektronische Datenbasis kommerziell erhältlich sind.

[0006] Der EP 0 722 601 B1 zufolge sind folgende Komponenten für das AR-System vorzusehen:

- elektronische Kamera
- Recheneinheit, z. B. Mikroprozessor,
- Vorrichtung zur Positionsbestimmung,
- Vorrichtung zur Bestimmung der Kamerapose, d. h. die Drehachsen und -winkel bezüglich eines Referenzkoordinatensystems (hier: mit dem Schiff bewegt)
- Datenbasis mit Eintragungen zu Objekten (hier: elektronische Seekarte)
- Display, in dem das Bild der realen Szene mit computergenerierten Einblendungen überlagert dargestellt wird.

[0007] Um ein AR-Fernglas zu realisieren wird man bevorzugt ein binokulares Display verwenden wollen, schon um die gewöhnliche Handhabung zu erleichtern. Die Kamera wird entweder zoomfähig oder aber mit einem fest gewählten Teleobjektiv zur Vergrößerung versehen sein. Die Recheneinheit wird ein handelsüblicher PC sein, in dem man vorzugsweise auch die Datenbasis gespeichert und vom Prozessor abrufbar vorhält.

[0008] Als Vorrichtung zur Positionsbestimmung liegt ein GPS (Global Positioning System) Empfänger oder eine vergleichbare Einrichtung auf der Hand. Da Schiffe ohnehin mit einem solchen System und überdies mit einem hochgenauen Kompass ausgestattet sind, wird man die Daten zur Schiffsposition und den aktuellen Kurs („Heading“) des Schiffes der Recheneinheit zur Verfügung stellen wollen und können, um sie für das AR-System zu verwenden.

[0009] Ein AR-Fernglas soll natürlich auf der Schiffsbrücke in die Hand genommen und an die Augen des Nutzers geführt werden können. Folglich ist die Bestimmung der Kamerapose in Echtzeit der kritische Faktor für die Brauchbarkeit des Systems. Der Nutzer wird das AR-Fernglas nicht ideal in einer festen Pose relativ zum Schiffsrumpf halten können, erst recht nicht bei Seegang, wenn er eine bestimmte Landmarke im Auge behalten will. Die Augmentierung muss seinen Bewegungen Schritt haltend angepasst werden, damit er sie sinnvoll nutzen kann.

[0010] Aus der EP 0 722 601 B1 ist zu entnehmen, dass die Vorrichtung zur Posebestimmung der Kamera in das handgehaltene Gerät zu integrieren ist und sich entweder auf die Messung des Erdmagnetfeldes oder auf eingebaute Gyrosensoren stützen soll. Die Magnetfeldmessung ist aber im vollständig metallischen Schiffsrumpf praktisch nicht möglich. Gyroskope oder Inertialsensoren erlauben nur relative Drehbestimmung und driften über die Zeit, sind somit nicht einsetzbar. Allein ein hochgenauer Kreiselkompass könnte dieses verhindern, ist aber im handgeführten AR-Fernglas nicht einbaubar.

[0011] Eine Alternative offenbart beispielsweise die Druckschrift DE 10 2005 045 973 A1, die sich ebenfalls mit der Ermittlung von Kameraposen und -positionen für Augmented Reality Anwendungen befasst. Es wird vorgeschlagen, Objektpunkte der Umgebung mit einer zusätzlichen Kamera, die mit der beweglichen AR-Systemkomponente (also hier mit dem AR-Fernglas) starr verbunden ist, zu erfassen. Diese zusätzliche Kamera soll i. F. als Tracking-Kamera bezeichnet werden. Die Bewegungen der Objektpunkte im von der Tracking-Kamera aufgezeichneten Bild während einer Translation oder Rotation der beweglichen AR-Systemkomponente können verfolgt („tracking“) und zur Bestimmung der Position und Pose in Echtzeit ausgewertet werden. Typisch ist auch die Installation von Markerobjekten an vorbekannten Positionen im Arbeitsbereich des AR-Systems (z. B. Industriehalle), die von allen Positionen der Tracking-Kamera aus möglichst gut sichtbar sind, um diese Auswertung zu vereinfachen.

[0012] Besonders vorteilhaft ist das Ausbilden der Tracking-Kamera als sphärische oder halbsphärische Kamera, d. h. mit einem oder zwei Fischaugen-Objektiven zur Abbildung einer ca. 180° oder 360° Umgebung, wie die DE 10 2004 017 730 B4 lehrt. Verbindet man nämlich die bewegliche AR-Systemkomponente außer mit der Tracking-Kamera auch noch starr mit einem 3DOF-Rotationssensor, so ist es hiernach möglich, das von der Tracking-Kamera aufgezeichnete, sphärische Bild zeitlich Schritt haltend mit der Bewegung gegen die Rotation zu kompensieren, d. h. das sphärische Bild erscheint auf einem Monitor invariant gegenüber Verdrehungen der AR-Systemkomponente. Das rotationskompensierte Bild enthält nur noch Informationen über die Translation und kann separat ausgewertet werden, was in praktischen Anwendungen eine wesentliche Vereinfachung darstellt.

[0013] Für die Aufgabe, ein AR-Fernglas zum Einsatz auf einer Schiffsbrücke zu realisieren, reichen die vorgenannten Ansätze nicht aus.

[0014] Die erste Herausforderung liegt in der zu erreichenden Genauigkeit der Posebestimmung. Durch die Vergrößerung der Darstellung, wie sie für ein Fernglas charakteristisch ist, muss eine sehr viel höhere Genauigkeit als bei anderen Anwendungen erreicht werden, um trotzdem eine pixelgenaue Augmentierung gewährleisten zu können.

[0015] Das zweite Problem in der Umsetzung einer Tracking-basierten Posebestimmung liegt darin, dass geeignete Tracking-Objekte, mithin also Marker, zweifellos im Nahbereich des AR-Fernglases, also auf der Schiffsbrücke, anzubringen sind, diese sich dann jedoch infolge des Seegangs in unvorhersehbarer Weise gegenüber dem interessierenden Koordinatensystem bewegen werden, in dem die Posebestimmung des AR-Fernglases letztlich erfolgen muss.

[0016] Es ist deshalb die Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung zur Augmentierung des Bildes eines in der Hand gehaltenen Fernglases aus der Sicht einer Schiffsbrücke mit Informationen aus elektronischen Seekarten anzugeben sowie ein Verfahren zum Betreiben dieser Vorrichtung, das eine ausreichend genaue Posebestimmung des Fernglases erlaubt.

[0017] Die Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Ein Nebenanspruch ist auf ein Verfahren zum Betreiben dieser Vorrichtung gerichtet. Die Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen an.

[0018] Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst eine perspektivische elektronische Kamera (Augmentierungskamera) mit einem Teleobjektiv (oder einem Zoomobjektiv) zur Aufnahme des Sichtfeldes des Benutzers,

eine sphärische Kamera (Tracking-Kamera) zur Aufnahme von Markern in der lokalen Umgebung sowie einen Sensor zur Messung der Schwerkraftrichtung (künstlicher Horizont) und ein Display zur Darstellung der Augmentierung (i. F. wird die mobile Komponente des Gesamtsystems nur noch kurz AR-Fernglas genannt).

[0019] Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst weiterhin einen Rechner, z. B. einen PC, der aber nicht notwendig in das AR-Fernglas integriert ist. Der Rechner soll bevorzugt Informationen von den Navigationseinrichtungen des Schiffes (Position, Heading) erhalten und soll mit diesen eine Datenverbindung aufweisen. Der Rechner hält überdies elektronische Seekarten gespeichert vor und hat insbesondere Zugriff auf Positionen sichtbarer Objekte (Landmarken, Bojen etc.). Der Rechner muss mit dem AR-Fernglas Daten austauschen können. Dies kann nach dem Stand der Technik kabelgebunden, vorzugsweise aber auch kabellos erfolgen.

[0020] Die letzte und sehr bedeutende Komponente der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist eine Anordnung von wenigstens zwei Markern, die fest im Innern der Schiffsbrücke installiert sind. Die genauen Positionen dieser Marker sind – im Unterschied zum Stand der Technik der Bildrekonstruktion – eher unwichtig, aber sie müssen durch ihre relative Lage zueinander eine definierte Richtung relativ zum Schiff anzuzeigen. Vorzugsweise werden die Marker in einer Linie entlang dieser einmal gewählten Richtung angeordnet. Es ist besonders vorteilhaft, aber nicht notwendig, wenn die Marker entlang der Langsachse des Schiffes installiert werden, also die Heading-Richtung anzeigen.

[0021] Es versteht sich, dass die erfindungsgemäße Vorrichtung nicht zwangsweise als in sich geschlossene Einheit ausgebildet sein muss. Vielmehr kann die erfindungsgemäße Vorrichtung als Anordnung von einzelnen Vorrichtungen/Einrichtungen bzw. als aus einzelnen Vorrichtungen/Einrichtungen bestehendes System ausgebildet sein.

[0022] Damit die Tracking-Kamera die Marker von möglichst vielen Positionen auf der Schiffsbrücke möglichst gut ausmachen kann, sollten die Marker bevorzugt an der Decke der Brücke etwa mittig angebracht werden.

[0023] Alle Marker sind in einer Ebene anzuordnen. Vorzugsweise liegt diese Ebene stets senkrecht zur Richtung des Schwerfeldes. Da dies aber auf einem fahrenden Schiff nicht zu gewährleisten ist, ist es eine besonders vorteilhafte Ausgestaltung, einen zweiten Schwerfeldsensor in der Nähe der Markieranordnung fest zu installieren. Die Aufgabe des zweiten Schwerfeldsensors besteht darin, eine etwaige Neigung der Markerebene gegen die – ideal gewünschte – Ebene senkrecht zur Schwerkraftrichtung zu messen und, z. B. in Form der Verdrehungswinkel bezüglich des Schwerfeldes, fortlaufend dem Rechner bereitzustellen.

[0024] Um Missverständnissen vorzubeugen, soll klargestellt werden, dass unter einem Marker im Sinne dieser Erfindung ein Objekt verstanden werden soll, welches nur einen Punkt im Raum indiziert. Für eine Richtungsangabe sind folglich wenigstens zwei Marker vorzusehen. Ein Schild mit einem aufgedruckten Pfeil etwa, welches für die Umsetzung der Erfindung gleichfalls brauchbar wäre, indiziert wenigstens zwei Pfeilendpunkte und wird im Sinne dieser Erfindung ebenfalls als Anordnung wenigstens zweier Marker aufgefasst.

[0025] Die perspektivische Kamera indiziert die aktuelle Blickrichtung, während die Tracking-Kamera als halbsphärische Kamera um 90 Grad dazu verschwenkt mit der Blickrichtung nach oben montiert ist. Das Display ist in Anlehnung an ein übliches Fernglas als ein binokulares Display ausgebildet.

[0026] Die nachfolgenden Abbildungen dienen der Erläuterung des Verfahrens, mit dem die vorgenannte Vorrichtung Schritt haltend in der Lage ist, pixelgenau Zusatzinformationen in das von der perspektivischen Kamera aufgenommene Bild einzublenden. Dabei zeigt:

[0027] [Fig. 1](#) eine Skizze der Horizontebene (Tangentialfläche an die Erdkugel), die das für die Augmentierung interessierende, kartesische Koordinatensystem (Horizontsystem) definiert;

[0028] [Fig. 2](#) eine Skizze der möglichen Verdrehungen des AR-Fernglases gegenüber dem Horizontsystem;

[0029] [Fig. 3](#) eine Skizze der Abbildungseigenschaft eines sphärischen Objektivs (Fischauge);

[0030] [Fig. 4](#) eine Skizze der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einer exemplarischen Markieranordnung.

[0031] Den Anfang des Verfahrens bildet die Klarstellung der beteiligten Koordinatensysteme.

[0032] Die Position des Schiffes und damit der Schiffsbrücke ist durch die Navigationssysteme bekannt ebenso wie sein aktueller Kurs. Diese Angaben liegen als Längen und Breiten sowie als Winkel gegen die geographische bzw. magnetische Nordrichtung vor. Navigationsinstrumente wie auch die elektronische Seekarte müssen sich auf dieselbe Geoid-Definition der Erde stützen, die heute gängig durch WGS84 beschrieben wird. In einer lokalen Umgebung um irgendeine Position kann ein kartesisches Koordinatensystem durch die Richtung des Schwerfeldes und eine hierzu senkrechte Tangentialebene (Horizontebene, vgl. [Fig. 1](#)) aufgespannt werden, in dem sich die Positionen aller umgebenden Objekte nach an sich bekannten Transformationen auch kartesisch sehr genau darstellen lassen.

[0033] Das kartesische Horizontsystem (i. F. kurz: H) wird man schon für Zwecke der Abstandsbestimmung verwenden wollen. Sein Ursprung liege o. B. d. A. auf der Schiffsbrücke, und während z. B. die z-Achse durch das lokale Schwerfeld festliegt, können sich x- und y-Achse um die z-Achse drehen allein infolge einer Kursänderung des Schiffes. Gleichwohl soll das Horizontsystem nicht als fest mit dem Schiffsrumpf verbunden gelten, denn Roll- und Stampfbewegungen des Schiffskörpers sollen das Horizontsystem nicht verändern. Sie verändern allerdings gleichwohl die absoluten Positionen der Marker auf der Brücke im Horizontsystem.

[0034] Das zweite relevante Koordinatensystem ist das der Kamera (i. F. kurz: K). Es ist ebenfalls kartesisch (x' , y' , z'), starr mit der Kamera verbunden und vorzugsweise so definiert, dass eine seiner Achsen (z. B. die y' -Achse) mit der optischen Achse der Augmentierungskamera, also der Hauptblickrichtung, zusammenfällt. Die lichtsensitiven Pixel der Kamera liegen in der Bildebene, die hier in der (x' , z')-Ebene liegen soll. Schließlich existiert noch als weitere Bildebene die der Tracking-Kamera, die parallel zur (x' , y')-Ebene der Kamera angeordnet ist. In dieser Ebene liegen insbesondere Pixelkoordinaten (p_x' , p_y') vor.

[0035] Für die Zielsetzung eines AR-Fernglases sind einige vereinfachende Annahmen erlaubt.

[0036] So ist zum einen die lokale Position des AR-Fernglases auf der Schiffsbrücke nicht genau bekannt, da der Benutzer sich bewegen kann. In einem herkömmlichen AR-Verfahren müsste diese Position an sich aufwendig berechnet werden. Aus der Entfernung der zu augmentierenden Objekte, die zwischen etwa einigen 100 m bis ungefähr 10 km vom Betrachter aus beträgt, ergibt sich hier jedoch, dass sowohl die verbleibende Unschärfe der Bestimmung der Schiffsposition (z. B. via GPS) als auch die unscharfe Festlegung der Position des AR-Fernglases „irgendwo auf der Brücke“ im praktischen Betrieb keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Augmentierung hat. Die lokale Translation des AR-Fernglases bezüglich der Brückenposition wird daher vernachlässigt. Dies impliziert, dass den Koordinatensystemen H und K ein gemeinsamer Ursprung unterstellt werden kann und insofern nur die Verdrehung der beiden zueinander zu bestimmen ist.

[0037] Zum anderen sind in das Koordinatensystem H die in der elektronischen Seekarte verzeichneten, real sichtbaren Objekte einzutragen. Die Koordinatentransformation wird mit wachsendem Abstand der Objekte zum Schiff fehlerhafter, da man natürlich der Erdkrümmung nicht Rechnung trägt. Der Fehler ist jedoch für die Zwecke der Augmentierung hinreichend klein, sofern man sich auf Objekte aus einem Umkreis von bis zu 15 km um die aktuelle Position beschränkt (Gloeckler, Joy, Simpson, Specht, Ackeret, „Handbook for Transformation of Datums, Projections, Grids and Common Coordinate Systems“, ARMY TOPOGRAPHIC ENGINEERING CENTER ALEXANDRIA VA, 1996).

[0038] Das AR-Fernglas weist ein vergrößerndes Objektiv für die perspektivische Kamera auf. Beispielhaft wird ein Teleobjektiv mit Vergrößerungsfaktor 7 benutzt, was der Vergrößerung nautischer Ferngläser entspricht. Im Prinzip kommt auch ein Zoomobjektiv, also eines mit variabler Vergrößerung, in Frage. Jedoch muss der Vergrößerungsfaktor der Recheneinheit bekannt sein, d. h. bei einer Änderung der Vergrößerung ist diese dann zu messen und der Recheneinheit zu übermitteln.

[0039] Aus der Vergrößerung der Objekte ergibt sich auch eine erhöhte Anforderung an die Genauigkeit der Winkelmessung. Denn bei einer perspektivischen Kamera mit einer Auflösung von 640×480 Pixel bei einem Öffnungswinkel von 1×7 Grad bilden 60 Pixel gerade mal 1 Grad der Umgebung ab. Soll die Einblendung der Zusatzinformationen pixelgenau im Realbild erfolgen, muss die Bestimmung aller Winkel mit einer Präzision besser als 0.016 Grad möglich sein.

[0040] Drei Rotationswinkel der Kamera (System K) gegen das Koordinatensystem H sind zu bestimmen: Die Drehung um die vertikale Achse (z) wird dabei mit α (Azimutwinkel), die um die Achse der Blickrichtung wird mit ρ (Rollwinkel) und die Rotation um die horizontale Querachse – senkrecht zur Blickrichtung – mit ν (Nickwinkel) bezeichnet. [Fig. 2](#) zeigt diese Winkel, wobei im Hintergrund die Horizontebene ((x, y) -Ebene in H) angedeutet wird.

[0041] In praktischen Anwendungen wird man keine pixelgenaue Augmentierung benötigen, aber gleichwohl ist eine sehr genaue Winkelbestimmung unvermeidbar, die vor allem in Echtzeit realisierbar sein muss.

[0042] Um dies zu gewährleisten, ist in dem AR-Fernglas ein Schwerefeldsensor eingebaut. Dieser misst die Komponente der maximalen Beschleunigung in Richtung des Erdmittelpunktes. Zwei der Rotationswinkel gegenüber H können so problemlos und schnell ermittelt werden. Die Ausgabe des Schwerefeldsensors wird man vorzugsweise so einrichten, dass sie direkt im Koordinatensystem K erfolgt, das sich mit der Kamera bewegt. Da man ja weiß, dass die Richtung des Schwerefeldvektors mit der z-Richtung von H übereinstimmt, geben x'- und y'-Komponenten des Schwerefeldvektors unmittelbar den Roll- und Nickwinkel der Kamera bezüglich H an.

$$\rho = \text{Arcsin}(g_x/g) \text{ und } \nu = \text{Arcsin}(g_y/g) \tag{1}$$

[0043] Es lässt sich auch sofort eine 3 × 3-Drehmatrix R angeben, die die Verdrehung des Kamerakoordinatensystems K gegenüber der Richtung des Schwerefeldes beschreibt:

$$(2) \quad R = \begin{bmatrix} \frac{g_{y'}^2}{g_P^2} + \frac{g_{x'}^2}{g_P^2} \frac{g_{z'}}{g} & -\frac{g_{x'}g_{y'}}{g_P^2} + \frac{g_{x'}g_{y'}}{g_P^2} \frac{g_{z'}}{g} & -\frac{g_{x'}}{g} \\ -\frac{g_{x'}g_{y'}}{g_P^2} + \frac{g_{x'}g_{y'}}{g_P^2} \frac{g_{z'}}{g} & \frac{g_{x'}^2}{g_P^2} + \frac{g_{y'}^2}{g_P^2} \frac{g_{z'}}{g} & -\frac{g_{y'}}{g} \\ \frac{g_{x'}}{g} & \frac{g_{y'}}{g} & \frac{g_{z'}}{g} \end{bmatrix}$$

[0044] In den Gleichungen (1) und (2) sind mit $g_{x'}$, $g_{y'}$ und $g_{z'}$ die Komponenten des gemessenen Schwerefeldvektors im System K bezeichnet, und es werden Abkürzungen $g_P^2 = g_{x'}^2 + g_{y'}^2$ sowie der Betrag $g = \text{sqrt}(g_P^2 + g_{z'}^2)$ benutzt.

[0045] Die Rohdaten des Schwerefeldsensors sind üblich verrauscht und auch anfällig gegen ruckartige Bewegungen. Allerdings erzeugt der Sensor 100 Messungen pro Sekunde bei kurzer Messverzögerung, während die Kamera mit einer Wiederholrate von nur 25 Bildern pro Sekunde arbeitet, aber eine längere Messverzögerung (Delay) aufweist. Daher kann die höhere Messrate des Sensors zeitlich gefiltert werden, um die Messung zu stabilisieren und die Genauigkeit zu erhöhen. Die Sensormessungen werden zeitlich mit einem Filter mit Gauß-Fensterfunktion so gefiltert, dass der Erwartungswert der Sensormessungen mit der Bildaufnahme unter Berücksichtigung des Delays synchronisiert wird. Das Gauß-Fenster wird zeitlich asymmetrisch so gelegt, dass die systembedingten unterschiedlichen Zeitverzögerungen bei Bild- und Sensorerfassung berücksichtigt werden und keine Laufzeitverzögerung bei der Messung auftritt.

[0046] Damit können zwei Winkel sehr akkurat gemessen werden. Der dritte wird mit Hilfe der Tracking-Kamera bestimmt, die die ausgerichtete Marker-Anordnung abbildet.

[0047] Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, die Marker in einer Linie entlang der Heading-Richtung des Schiffes anzuordnen. Dabei ist eine asymmetrische Anordnung vorteilhaft, um Bug- und Heckrichtung zu unterscheiden. Konkret werden hier 7 Markerpunkte benutzt, die in zwei Gruppen zu 3 oder 4 Markern entlang der Heading-Richtung platziert werden. Es sei aber wohl verstanden, dass jede Anordnung von Marker, die die Identifizierung der Heading-Richtung erlaubt, für die Zwecke der Erfindung möglich ist.

[0048] Wie eingangs erwähnt, haben alle Marker in einer Ebene zu liegen, bevorzugt sind alle an der Decke der Schiffsbrücke installiert. Es ist sehr vorteilhaft, aber nicht unbedingt erforderlich, einen zweiten Schwerefeldsensor in der Markerebene vorzusehen, der die Neigung dieser Markerebene gegenüber der (x, y)-Ebene des Horizontsystems H fortlaufend misst und an den Rechner übermittelt.

[0049] Da das System sowohl robust gegen die Bewegungen des Schiffpersonals als auch gegen Lichtveränderungen sein muss, ist es vorteilhaft, als Marker Infrarot-LEDs in Verbindung mit einem Infrarot-Passfilter in der Tracking-Kamera zu verwenden. Damit kann die Tracking-Kamera – außer bei starker Sonneneinstrahlung – das Tageslicht ausblenden, und durch die selbststrahlenden LEDs sind die Marker auch bei Nacht gut

zu detektieren. Durch Anbringen der Marker an der Schiffsdecke kann zudem eine Behinderung des Personals wie auch des AR-Fernglas-Benutzers ausgeschlossen werden.

[0050] Der verbliebene Azimutwinkel α , um den die Kamera gegenüber der Heading-Richtung des Schiffes (y-Achse von H) verdreht ist, wird durch fortlaufende Verarbeitung der Bilder der sphärischen Tracking-Kamera bestimmt.

[0051] Die Bildverarbeitung sucht zunächst nach möglichen Punktkorrespondenzen im Bild. Diese können die Anzahl der tatsächlichen Marker übertreffen, weshalb eine robuste Ausreißer-Erkennung erforderlich ist. Da die Geometrie des Markers bekannt ist, kann der Suchalgorithmus mit dieser Kenntnis optimiert werden. Beispielsweise werden für die lineare Markeranordnung Ausreißer durch Permutation der Kandidaten und Approximation einer Geraden erkannt. Dieser Teilschritt der Identifikation eines Satzes von Pixelkoordinaten $p^{(i)}$ in der Bildebene der Tracking-Kamera, basierend auf dem projektiven Doppelverhältnis von Punkten auf einer Geraden, die mit den Marker in der realen Szene korrespondieren, ist dem Fachmann geläufig und soll hier nicht näher erläutert werden.

[0052] Der insofern gemessene Satz von Pixelkoordinaten wird vorzugsweise aufbereitet. Typisch erforderlich ist eine Fleckverkleinerung. Die verwendeten LEDs weisen eine charakteristische Verflachung der Linsen auf, wodurch ein größerer Ausstrahlwinkel erreicht wird. Damit sind die LEDs in der Bildaufnahme besser zu detektieren, als LEDs mit kleineren Ausstrahlwinkeln. Hinzu kommt, dass die LEDs immer als kreisförmige Korrespondenzen angenommen werden können, wo hingegen kleine Ausstrahlwinkel zu elliptischen Korrespondenzen führen können. Bei einem Abstand zur Decke von 1 m bis 2 m sind die LEDs mit ungefähr 15 Pixel großen Korrespondenzen zu detektieren. Für weitere Berechnungen ist dies zu ungenau. Man ermittelt stattdessen den Mittelpunkt des Markerabbildes sogar mit Subpixelgenauigkeit durch geeignetes Template Matching mit einer abgeflachten 2D-Gausstemplate-Filtermaske und verwendet die optimierten Pixelkoordinaten für das Weitere.

[0053] Durch die sphärische Projektion des Fischauges werden Objektpunkte auf einer Halbkugel (o. B. d. A. mit Radius Eins) um das Kamerazentrum auf eine Kreisscheibe in der Pixelebene abgebildet. Die natürlichen Koordinaten des Bildes sind dann ebene Polarkoordinaten (r, φ) . Die optische Achse der Kamera verläuft senkrecht zur Pixelebene durch einen zentralen Pixel mit Koordinaten (x_H, y_H) (Kamera-Hauptpunkt). Jeder Objektpunkt auf der Halbkugel erscheint unter einem Winkel δ zur optischen Achse (z'-Achse von K) und ist zudem durch seine Azimutposition φ ($\varphi = 0$ entlang der positiven x'-Achse von K) gekennzeichnet.

[0054] Die Besonderheit der Fischaugen-Projektion besteht darin, dass der Winkel δ im idealen Fall linear auf den Radius der Kreisscheibe abgebildet wird. Dies ist in Praxis für kleine Winkel sehr gut erfüllt, aber für $\delta \rightarrow 90^\circ$ wird die Abbildung typisch nicht-linear. **Fig. 3** zeigt exemplarisch die Kalibrierfunktion $k(\delta)$, die den jeweiligen Umrechnungsfaktor von Winkel (z. B. Radian) auf Pixelkoordinaten angibt und für jedes Objektiv einmal zu bestimmen ist.

[0055] Das sphärische Bild kann wegen der oben genannten Linearität durch die Polarkoordinaten (δ, φ) beschrieben werden. Lässt man die Problematik diskreter Pixel außer acht, da die Pixelkorrespondenzen ja mit Subpixelgenauigkeit bestimmt werden, so besitzt ein Objektpunkt auf der Halbkugel bei den Koordinaten (δ, φ) in der Pixelebene die Pixelkoordinaten:

$$p_x = x_H + k(\delta) \cdot \delta \cos(\varphi) \text{ und } p_y = y_H + k(\delta) \cdot \delta \sin(\varphi) \quad (3)$$

[0056] Es ist praktisch und in der 3D-Bildverarbeitung gängig, die Pixelkoordinaten in die dritte Dimension zu erheben. Der Pixelkoordinatenvektor des i-ten Markers in K sei

$$(4) \quad p^{(i)} = \begin{pmatrix} p_x^{(i)} \\ p_y^{(i)} \\ 1 \end{pmatrix}$$

und wegen (3) gilt dann

$$(5) \quad p^{(i)} = K_F^{(i)} * \begin{pmatrix} \varrho^{(i)} \cos \varphi^{(i)} \\ \varrho^{(i)} \sin \varphi^{(i)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad K_F^{(i)} = \begin{pmatrix} k(\varrho^{(i)}) & 0 & x_H \\ 0 & k(\varrho^{(i)}) & y_H \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

[0057] Hierbei kennzeichnet * die Matrixmultiplikation. Durch Multiplikation mit der Matrix

$$(6) \quad A^{(i)} = \begin{pmatrix} si(\varrho^{(i)}) & 0 & 0 \\ 0 & si(\varrho^{(i)}) & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varrho^{(i)} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad si(\varrho) = \frac{\sin \varrho}{\varrho}$$

gelangt man schließlich zur Normdarstellung der Markerkoordinaten in sphärischen Polarkoordinaten (oder auch Kugelkoordinaten) über der Bildebene der Tracking-Kamera. Diese Normdarstellung enthält die wahren Winkel, unter Beseitigung des sphärischen Objektivs und seiner Verzerrungen, welche Verbindungsstrahlen vom Kamerazentrum in der Bildebene zu den einzelnen Markern mit den Achsen des Koordinatensystems K bei seiner aktuellen Pose einschließen. Multipliziert man nun weiter mit der zuvor bestimmten Matrix R aus Gleichung (2), so berechnet man die Normkoordinaten im Koordinatensystem K' (Achsen x", y", z"), dessen z"-Achse parallel zur z-Achse von H, also zur Richtung der Schwerkraft liegt.

$$p_N^{(i)} = R * A^{(i)} * (K_F^{(i)})^{-1} * p^{(i)} \quad (7)$$

[0058] Bei Verwendung einer strikt linearen Markeranordnung, was eine besonders bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung ist, weiß man, dass alle vorgenannten Verbindungsstrahlen in einer Ebene liegen, die die Marker und das Kamerazentrum enthält. Anhand der berechneten Markerdarstellungen in K' gemäß Gleichung (7) kann mit den bekannten Methoden der linearen Algebra nun die zugehörige Ebenengleichung aufgestellt werden – wofür natürlich im Prinzip nur zwei Markerpunkte erforderlich sind.

[0059] Schließlich wird die Schnittgerade dieser berechneten Ebene mit der Ebene z" = 1 (oder irgendeiner anderen beliebigen Ebene senkrecht zur z"-Achse, d. h. parallel zur (x, y)-Ebene des Horizontkoordinatensystems H) berechnet, und deren Richtungsvektor weist genau in Heading-Richtung des Schiffes. Aus den Koordinaten des Heading-Vektors im Koordinatensystem K' kann der Azimutwinkel α unmittelbar abgelesen werden.

[0060] Aus der vollständigen Kenntnis der Verdrehung der Kamera K gegenüber dem Horizontsystem H ist die Bildaugmentierung des AR-Fernglases mm im Rahmen des Standes der Technik möglich. In einem experimentellen Labormuster, das die hier beschriebene Vorrichtung realisiert, werden die drei Drehwinkel 25 Mal pro Sekunde mit einer Genauigkeit von 0,025 Grad (Roll- und Nickwinkel) bzw. von 0,03 Grad (Azimutwinkel) bestimmt. Dies entspricht einer Pixelgenauigkeit von 3–4 Pixeln bei der Augmentierung, was für die meisten Zwecke ausreichend ist.

[0061] In [Fig. 4](#) ist ein Teil der erfindungsgemäßen Vorrichtung schematisch dargestellt, um die bevorzugte geometrische Anordnung zu verdeutlichen. Die handgehaltene Komponente der Vorrichtung umfasst die elektronische Kamera **10** mit perspektivischem, vergrößerndem Objektiv **12**, einem starr verbundenen Schwerkraftsensor **14** und ein binokulares Display **16**, in dem Realbilder mit Augmentierungsdaten überblendet dargestellt werden. Ebenfalls starr mit der Kamera **10** ist die sphärische Tracking-Kamera **18** verbunden, die nach oben sieht. Die – hier lineare – Markeranordnung **20** ist an der Decke eines Raumes (angedeutet durch den umgebenden Quader) fest installiert, d. h. sie bewegt sich bei einer Drehung des Raumes (z. B. beim Kurswechsel des Schiffes). Vorzugsweise beträgt der Abstand zwischen Tracking-Kamera und Markeranordnung 0,5 bis 2 Meter, wobei die Längenausdehnung der Markeranordnung bevorzugt zwischen 1,5 und 2,5 Meter betragen soll.

[0062] Die Erfindung zielt ab auf die Vorrichtung und ein mit dieser durchführbares Verfahren, die Drehwinkel schnell und genau bereitzustellen, wobei die Schwierigkeit a priori darin besteht, dass das Horizontsystem H, in dem die Bildaugmentierung letztlich vorzunehmen ist, nicht starr mit dem Schiffsrumpf verbunden ist. Ein auf Marker-Tracking basierender Ansatz liegt deshalb nicht auf der Hand, da eine fortlaufende Bewegung der Marker bezüglich H infolge Seegangs zu unterstellen ist. Zudem versagt eine rein markerbasierte Tracking-Lösung über Bildverarbeitung durch Marker im Nahbereich der Brücke, da durch die Kopplung von Rotation und Translation im Nahbereich Korrelationen entstehen, welche eine hochgenaue Rotationsbestimmung verhindern.

Durch die hybride Kopplung von Schweresensor und eindimensionaler bildbasierter Headingbestimmung kann dieses Problem gelöst werden.

[0063] Die erfindungsgemäß bevorzugte Markieranordnung ist linear und entlang der Längsachse des Schiffes ausgerichtet. Sie wird vorteilhaft an der Decke der Schiffsbrücke installiert. Offenbar hat eine Rollbewegung des Schiffes dann keine Auswirkungen auf korrekte Richtungsweisung durch die Marker.

[0064] Wenn das Schiff hingegen starke Stampfbewegungen vollführt, liegen die Marker nicht mehr in einer Ebene parallel zur (x, y) -Ebene von H. Dies führt zu Missweisungen, wie man sich folgendermaßen veranschaulicht. Stünde man auf der Schiffsbrücke mit Blick entlang der Schwerkrafttrichtung zur Decke gerichtet, wo zwei parallel verlaufende Markieranordnungen installiert sind, so hätte man bei einer Neigung der Decke den optischen Eindruck, beide Linien würden aufeinander zu laufen. Die Tracking-Kamera kann deshalb die korrekte Heading-Richtung aus einer einzelnen, linearen Markieranordnung nur sicher erkennen, wenn sie sich direkt unter dieser Markieranordnung befindet. Dieser Sonderfall kann jedoch für praktische Anwendungen nicht vorausgesetzt werden.

[0065] Die Missweisung kann aber korrigiert werden, wenn man die Neigung der Markerebene fortlaufend bestimmt. Diese Neigung ist mit Hilfe der Tracking-Kamera allein ermittelbar, wenn man anstelle einer linearen eine zweidimensionale Markieranordnung verwendet, so dass sich perspektivische Verzerrungen aus der Kenntnis der wahren Geometrie der Marker erkennen lassen. Für das Beispiel der beiden parallel verlaufenden linearen Markieranordnungen wie oben beschrieben (jetzt aufgefasst als eine einzige zweidimensionale Anordnung) kann man etwa den Winkel zwischen den in die Bildebene der Kamera abgebildeten Linien bestimmen und hieraus auf die Neigung der Markerebene schließen. Allerdings sind solche Berechnungen womöglich zu ungenau, da die Winkel üblich recht klein sind.

[0066] Einen einfacheren Ausweg bietet hier die fortlaufende Messung der Neigung der Markerebene mit einem zweiten Schwerfeldsensor, der z. B. konkret einfach neben den Markern an der Decke der Schiffsbrücke fest angeordnet wird und sich folglich mit der Markerebene neigt. Es kann erforderlich sein, diesen einmalig zu kalibrieren in Bezug auf die tatsächliche Neigung der installierten Markerebene im ruhenden Schiff.

[0067] Man kann schließlich bei Kenntnis des Neigungswinkels der Markerebene wie oben beschrieben eine von Verbindungsstrahlen zum Kamerazentrum aufgespannte Ebene, deren Gleichung mittels einer Auswahl aus den zur Verfügung stehenden Markerkoordinaten berechenbar ist, mit einer parallel zur Markerebene geneigten Ebene schneiden lassen. Der Richtungsvektor der Schnittgerade hat dann eine von Null verschiedene z'' -Komponente, die man aber ignorieren kann, denn die wahre Heading-Richtung ist allein aus x'' - und y'' -Komponente dieses Richtungsvektors abzulesen.

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

- EP 0722601 B1 [[0004](#), [0006](#), [0010](#)]
- DE 102005045973 A1 [[0011](#)]
- DE 102004017730 B4 [[0012](#)]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Gloeckler, Joy, Simpson, Specht, Ackeret, „Handbook for Transformation of Datums, Projections, Grids and Common Coordinate Systems“, ARMY TOPOGRAPHIC ENGINEERING CENTER ALEXANDRIA VA, 1996 [[0037](#)]

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Augmentierung eines elektronischen Abbildes einer realen Szene mit Augmentierungsinformationen umfassend eine perspektivische elektronische Kamera, ein Display zur Wiedergabe des Abbildes der realen Szene, eine Einrichtung zur Bestimmung der Position der perspektivischen Kamera in einem globalen Koordinatensystem, eine Einrichtung zur kontinuierlichen Bestimmung der Verdrehung der perspektivischen Kamera bezüglich des globalen Koordinatensystems, eine Datenspeichereinheit enthaltend die Augmentierungsinformationen bezüglich des globalen Koordinatensystems, eine Recheneinheit ausgebildet zur Kommunikation mit der Datenspeichereinheit und den Einrichtungen zur Positions- und Verdrehungsbestimmung sowie mit der perspektivischen Kamera und dem Display, wobei die Recheneinheit dem Display Anweisungen zur Darstellung der Augmentierungsinformationen derart erteilt, dass diese Informationen sichtbaren Objekten im Abbild der realen Szene zugeordnet sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung zur Bestimmung der Verdrehung der perspektivischen Kamera folgende Komponenten umfasst
 - a. einen Sensor zur Messung der Schwerkrafttrichtung in starrer Verbindung mit der perspektivischen Kamera,
 - b. eine sphärische Kamera in starrer Verbindung mit der perspektivischen Kamera, wobei die Bildebenen der Kameras senkrecht aufeinander stehen,
 - c. eine Markeranordnung umfassend wenigstens zwei Marker angeordnet in einer bezüglich des globalen Koordinatensystems verdrehbaren Markerebene derart, dass alle Marker im Sichtfeld der sphärischen Kamera liegen, wobei die Anordnung der Marker eine fest gewählte Richtung in der Markerebene indiziert,
 - d. eine Einrichtung zur fortlaufenden Messung der Verdrehung der in der Markerebene indizierten Richtung gegenüber einer senkrecht zur Schwerkrafttrichtung verlaufenden Achserrichtung des globalen Koordinatensystems.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein zweiter Sensor zur Messung der Schwerkrafttrichtung starr mit der Markerebene verbunden vorgesehen ist, der die Neigung der Markerebene gegen das Schwerfeld fortlaufend misst und der Recheneinheit übermittelt.
3. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Markeranordnung als eine einzelne Linie von Markern ausgebildet ist.
4. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die perspektivische Kamera ein Teleobjektiv aufweist und das Display ein binokulares Display ist, wobei beide miteinander starr verbunden und zusammen als mobiles Gerät nach Art eines Fernglases ausgebildet sind.
5. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Marker an der Decke einer Schiffsbrücke angeordnet sind, so dass diese die Markerebene bildet.
6. Vorrichtung nach den Ansprüchen 3 und 5, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelne Linie von Markern entlang der Schifflängsachse ausgerichtet ist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur fortlaufenden Messung der Verdrehung der in der Markerebene indizierten Richtung gegenüber einer senkrecht zur Schwerkrafttrichtung verlaufenden Achserrichtung des globalen Koordinatensystems der Schiffskompass ist, der den Schiffskurs fortlaufend der Recheneinheit übermittelt.
8. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Marker als Leuchtdioden mit großem Abstrahlwinkel ausgebildet sind.
9. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Marker als Infrarotlicht emittierende Leuchtdioden ausgebildet sind und die sphärische Kamera einen Infrarotlicht durchlassenden Spektralfilter aufweist, der sichtbares Licht unterdrückt.
10. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand zwischen Markeranordnung und sphärischer Kamera zwischen 0,5 und 2 Meter beträgt, wobei die Längenausdehnung der Markeranordnung zwischen 1,5 und 2,5 Meter beträgt.
11. Verfahren zur Augmentierung eines mit einer elektronischen perspektivischen Kamera aufgenommenen Abbildes einer realen Szene mit Augmentierungsinformationen durch Wiedergabe des Abbildes der realen Szene in einem Display und Einblenden der Augmentierungsinformationen in das Display derart, dass eine Zuordnung zu sichtbaren Objekten in der Szene erfolgt, wobei die Augmentierungsinformationen in Bezug auf ein

globales Koordinatensystem H vorbekannt sind und eine Bestimmung der Position und der Verdrehung der Kamera in Bezug auf das globale Koordinatensystem H fortlaufend erfolgen, gekennzeichnet durch die fortlaufende Messung der Verdrehung der Kamera mit folgenden Schritten:

- a. Vorsehen einer Markieranordnung mit vorgegebener Geometrie in einer gegenüber dem globalen Koordinatensystem verdrehbaren Markerebene, wobei die Markieranordnung eine feste Richtung in der Markerebene indiziert,
- b. Bestimmen der Verdrehung der in der Markerebene indizierten Richtung gegen eine senkrecht zur Schwerkrafttrichtung verlaufende Achse des globalen Koordinatensystems H,
- c. Abbilden der Markieranordnung mit einer sphärischen Kamera, deren Bildebene senkrecht auf der Bildebene der perspektivischen Kamera steht,
- d. Identifizieren eines Satzes von die Marker repräsentierenden Pixelkoordinaten in der Bildebene der sphärischen Kamera,
- e. Messen der Schwerkrafttrichtung in einem mit der perspektivischen Kamera mitbewegten Koordinatensystem K,
- f. Erstellen einer Drehmatrix, die die Verdrehung von K gegen die Schwerkrafttrichtung beschreibt,
- g. Erzeugen eines zweiten, dreidimensionalen, die Marker repräsentierenden Koordinatensatzes der Marker aus dem Satz der Pixelkoordinaten unter Elimination der Verzerrung der sphärischen Kamera und unter Kompensation der Verdrehung von K gegen die Schwerkrafttrichtung mit einer linearen Transformation,
- h. Bestimmen einer Ebene verlaufend durch wenigstens zwei Marker und das Zentrum der sphärischen Kamera,
- i. Bestimmen einer Schnittgeraden der zuvor bestimmten Ebene mit einer zur Markerebene parallel verlaufenden Ebene,
- j. Berechnen der Verdrehung von K gegen die durch die Markieranordnung in der Markerebene indizierte Richtung aus der Richtung der zuvor bestimmten Schnittgeraden,
- k. Berechnen der Verdrehung der Kamera um die Achse der Schwerkrafttrichtung gegen die in Schritt b. gewählte Achse des globalen Koordinatensystems.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Verfahrensschritte c. bis k. wenigstens 25 Mal pro Sekunde wiederholt werden.

13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Messung der Schwerkrafttrichtung mit einer Taktfrequenz größer als 25 Hz erfolgt und dass die Einzelmesswerte zeitlich mit einer Gauß-Fensterfunktion so gefiltert werden, dass der Erwartungswert der Schwerkraftmessungen mit der Bildaufnahme synchronisiert wird.

14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung aller die Verdrehung des Koordinatensystems K bezüglich H beschreibenden Winkel mit einer Genauigkeit von $\leq 0,03$ Grad erfolgt.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

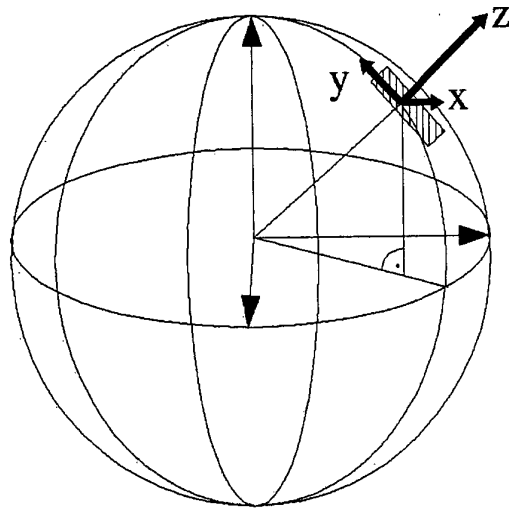


FIG. 1

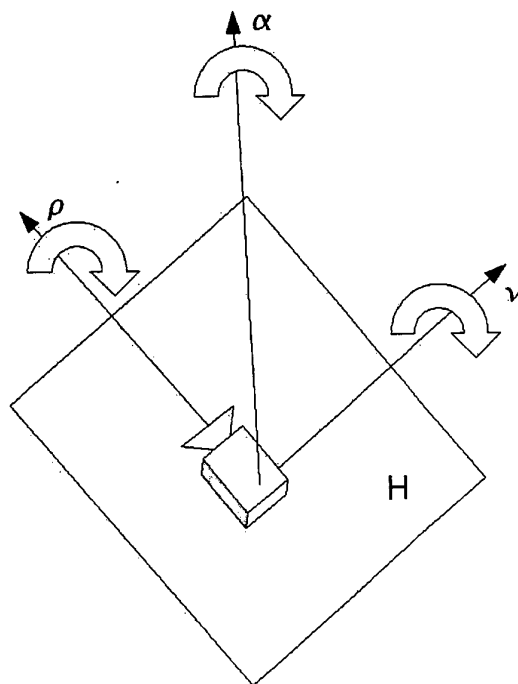


FIG. 2

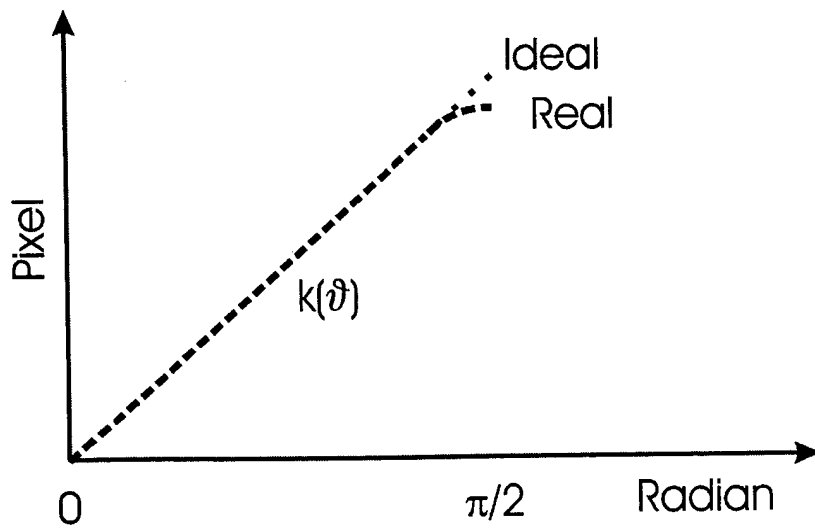


FIG.3

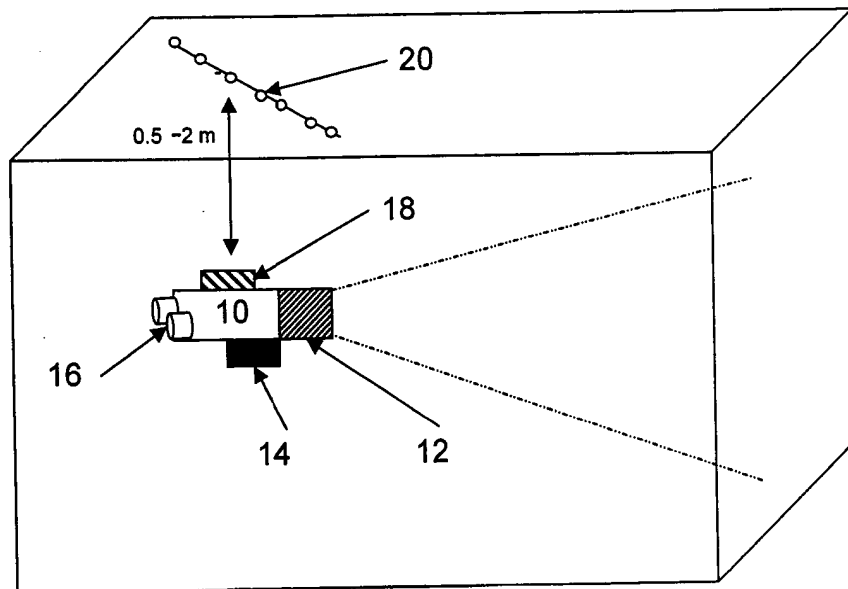


FIG. 4