



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 04 416 T2 2004.06.24**

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 033 300 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 04 416.5**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 104 122.7**

(96) Europäischer Anmeldetag: **29.02.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **06.09.2000**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **13.08.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **24.06.2004**

(51) Int Cl.⁷: **B64G 1/36**

G01C 21/02, G01S 3/786

(30) Unionspriorität:

261727 03.03.1999 US

(73) Patentinhaber:

Hughes Electronics Corp., El Segundo, Calif., US

(74) Vertreter:

**Witte, Weller, Gahlert, Otten & Steil, 70178
Stuttgart**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(72) Erfinder:

**Wu, Yeong-Wei A., Rancho Palos Verdes,
California 90275, US; Hein, Douglas H., Los
Angeles, California 90049, US; Didinsky, Garry,
Niles, Illinois 60714, US; Augenstein, David L.,
Hermosa Beach, California 90254, US**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Lageregelung von Raumfahrzeugen mit drehbaren Sterndetektoren**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Reduzieren von Ortsfehlern, die mit der Bewegung eines Sternbildes über einen Array von Detektorpixeln eines Sternverfolgers hinweg einhergehen, wobei der Array in einem vertikalen/horizontalen Koordinatensystem orientiert ist, wobei parallele und orthogonale Bewegungen eines Sternbildes relativ zu einer der Koordinaten Rauschen in dem Ausgang des Sternverfolgers erzeugen.

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft auch ein Sternverfolgersystem, das einen Sternverfolger aufweist, der ein Ausgangssignal erzeugt, das eine Sternbewegung relativ zum Sternverfolger angibt.

[0003] Ein solches Verfahren und eine solches System sind aus der FR 2 779 830 A1 bekannt.

[0004] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein die Bestimmung und Steuerung einer Lage eines Raumflugkörpers, und insbesondere ein Verfahren und System zum Positionieren von Sternverfolgern, um Lagesteuersignale mit geringem Fehler zu erzeugen.

[0005] Raumflugkörper, wie z.B. Satelliten, werden für verschiedene Zwecke inkl. wissenschaftlicher Forschung und Kommunikation verwendet. Bei vielen Anwendungen muss der Raumflugkörper in besonderen Lagen oder Orientierungen im Raum positioniert sein. Eine Lage eines Raumflugkörpers umfasst Roll (Rollwert), Pitch (Nickwert), und Yaw (Gierwert), wie in dem von James R. Wertz herausgegebenen Artikel "Spacecraft Attitude Determination and Control", D. Reidel Publishing Company, Boston, USA 1986, Seiten 1–21, beschrieben. Eine präzise Lagebestimmung des Raumflugkörpers unter Verwendung von Gyros (Kreisel) und Sternverfolgern wurde in "Stellar Inertial Attitude Determination for LEO Spacecraft", Proc. of the 35th Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, Dezember 1996, Seiten 3236–3244, von Wu und Hein beschrieben. Bei diesem System wird eine Echtzeitkenntnis der Raumflugkörperlage durch numerisches Integrieren von Gyrodaten berechnet, die eine dynamische Bewegung eines Raumflugkörpers messen, und Sternverfolgerdaten werden verarbeitet, um Korrekturen zur Lage und Gyrodaten-Vorspannungsschätzungen zu erzeugen, die durch ein erweitertes Kalman-Filter mit sechs Zuständen bereitgestellt werden. Für diesen Zweck verwendete Sternverfolger werden auch in "METOSAT Second Generation Enhanced/Visible/IR Imager SERVER I and its Environmental Monitoring Potential", München, 30. März bis 4. April 1992, von B. Kunkel et al. beschrieben.

[0006] Wie hier verwendet, umfasst der Begriff "Sternverfolger" alle sternverfolgenden Geräte, die einen Stern auf einen Pixelarray abbilden oder projizieren, umfassend aber nicht beschränkt auf kardangelagerte Sternverfolger, Sternverfolger mit fixiertem Kopf und Sternscanner. Sternverfolger werden zurzeit an Raumflugkörpern angebracht, ohne die Rich-

tung zu berücksichtigen, in der ein abgebildeter Stern ihre CCD- (charge coupled device) Pixelarrays traversiert. Auf Grund ortsabhängiger Sternverfolgerfehler, die von der örtlichen Position stammen, und einer Bewegung von Sternbildern über Pixelarrays ist die Lagebestimmungsleistung nicht nur gegenüber zeitlichem Rauschen des Sternverfolgers sondern auch gegenüber einer verfolgten Sternbewegung über die Detektoren empfindlich. Ein Zeigefehler eines Sternverfolgers variiert positiv mit diesem ortsabhängigen Sternverfolgerfehler.

[0007] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zum Reduzieren von Ortsfehlern im Ausgang eines Sternverfolgers zu schaffen, wobei der Ausgang dem Auftreten von Rauschen hoher und niedriger Frequenz unterworfen ist.

[0008] Es ist eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein System zu schaffen, das ein Filtern von erzeugtem Rauschen mit einem herkömmlichen Tiefpassfilter ermöglicht.

[0009] Diese Aufgaben werden durch ein Verfahren der eingangs erwähnten Art gelöst, wobei das erzeugte Rauschen ein Ortsrauschen hoher und niedriger Frequenz aufweist, durch Drehpositionieren des Arrays innerhalb des Koordinatensystems, so dass er von einem Sternbild unter einem Winkel α traversiert wird, der ein Ortsrauschen im Ausgang des Sternverfolgers erzeugt, das sowohl in der vertikalen als auch der horizontalen Koordinate Komponenten hoher Frequenz aufweist, und durch Filtern des Rauschens mit einem Tiefpassfilter.

[0010] Diese Aufgaben werden des Weiteren durch ein System der eingangs erwähnten Art gelöst, das ein Filter, das Fehlerkomponenten hoher Ortsfrequenz des Ausgangs des Sternverfolgers filtert, und einen Sternverfolger-Positionierer aufweist, der den Sternverfolger so positioniert, dass der vorherrschende Ortsfehler in seinem Ausgang sich im Hochfrequenzbereich des Filters befindet.

[0011] Allgemein versucht die vorliegende Erfindung eine Lagesteuerung hoher Präzision für Raumflugkörper zu schaffen. Dies wird durch Positionieren von Sternverfolgern an dem Raumflugkörper erreicht, so dass die Bilder der Sterne oder anderer Himmelsobjekte diagonal über den Pixelarray des Sternverfolgers traversierend verfolgt werden. Das Ergebnis ist eine Verschiebung des Rauschens im Bildortssignal in Richtung höherer Frequenzen, bei denen es einfach durch ein Tiefpassfilter entfernt werden kann. Während ein 45° -Traversierwinkel optimal für quadratische Pixel ist, können bedeutend verbesserte Resultate mit Traversierwinkeln im Bereich von 25° – 65° erhalten werden. Der Traversierwinkel kann für den Fall rechtwinkliger Pixel auf innerhalb 20° von $\tan^{-1}(v/h)$ verallgemeinert werden, wobei v bzw. h das vertikale bzw. das horizontale Pixelmaß ist.

[0012] Das gefilterte Signal hoher Präzision wird verwendet, um die Lage des Raumflugkörpers zu be-

rechnen und zu korrigieren. Simulierte Ergebnisse haben eine Leistungsverbesserung von ungefähr 50% bei einem 45°-Traversierwinkel gezeigt.

[0013] Diese und weitere Merkmale, Aspekte und Vorteile der Erfindung werden aus der folgenden detaillierten Beschreibung besser verständlich werden, die zusammen mit den beigegeführten Zeichnungen zu sehen ist.

[0014] **Fig. 1a** ist ein Flussdiagramm, das das neue Verfahren zum Steuern einer Lage eines Raumflugkörpers veranschaulicht.

[0015] **Fig. 1b** ist eine Veranschaulichung eines die Erde umkreisenden Raumflugkörpers, dessen Lage durch einen Sternverfolger gesteuert wird.

[0016] **Fig. 2** ist eine perspektivische Explosionsansicht eines herkömmlichen Sternverfolgers, der mit einem lichtempfindlichen Pixelarray ausgerüstet ist.

[0017] **Fig. 3a, 3b und 3c** sind Sätze aus Graphen, die jeweils die DC-Fehlersignale repräsentieren, die erzeugt werden, wenn (a) eine Lichtquelle sich stationär auf einem einzelnen Pixel innerhalb eines Pixelarrays eines Sternverfolgers befindet, (b) eine Lichtquelle parallel zur Zeilenrichtung des Pixelarrays wandert, und (c) eine Lichtquelle diagonal sowohl zur Zeilen- als auch zur Spaltenrichtung des Pixelarrays wandert.

[0018] **Fig. 4a** ist ein Satz aus Graphen, die ein ideales Ausgangsfehlersignal ohne überlagerte zeitliche Fehler veranschaulichen, wenn eine Lichtquelle diagonal die Pixel eines Sternverfolgerarrays traversiert, während **Fig. 4b** ein Satz von Graphen ist, der die gleichen Signale mit einem überlagerten zeitlichen Fehlersignal veranschaulicht.

[0019] **Fig. 5** ist ein Graph, der die horizontalen und vertikalen Fehlerkomponenten veranschaulicht, die aus einem horizontalen Bild resultieren, das über ein Sternverfolgerpixel traversiert.

[0020] **Fig. 6** ist ein Graph des horizontalen Fehlers hoher Ortsfrequenz für wiederholte horizontale Pixelscans.

[0021] **Fig. 7** ist ein Graph, der die horizontalen und vertikalen Fehler veranschaulicht, die aus einem diagonalen Bild resultieren, das über Sternverfolgerpixel traversiert.

[0022] **Fig. 8a, 8b und 8c** sind Graphen, die den Traversierwinkel α für horizontale, vertikale und diagonale Pixeltraversierungen veranschaulichen.

[0023] **Fig. 9** ist ein Graph, der ein Referenzkoordinatensystem für die optische Detektorebene des Sternverfolgers veranschaulicht.

[0024] **Fig. 10** ist ein Flussdiagramm, das ein herkömmliches Verfahren zum Steuern einer Lage eines Raumflugkörpers veranschaulicht;

[0025] **Fig. 11** ist ein Flussdiagramm-Graph, der das von der Erfindung angewandte Verfahren, eine Lagesteuerung eines Raumflugkörpers zu verbessern, veranschaulicht.

[0026] **Fig. 12a** ist ein Satz Gleichungen für die drei Eulerschen Winkel, die bei 3-Achsen-Kardanbewegungsbefehlen verwendet werden, um eine diagona-

le Traversierung eines Sternbildes über die Sternverfolgerpixel für ein verallgemeinertes Missionsprofil zu erzeugen.

[0027] **Fig. 12b und 12c** sind Sätze aus Gleichungen, die Terme definieren, die sich auf die Gleichungen der **Fig. 12a** beziehen.

[0028] Diese Erfindung verbessert die Genauigkeit, mit der ein Raumflugkörper im Raum durch ein verbessertes Filtern von Ortsfehlern, die auftreten, positioniert werden kann, wenn die Lage des Raumflugkörpers mit Sternverfolgern gemessen wird, die lichtempfindliche Pixelarrays aufweisen. Der Pixelarray wird um seine Ziellinie ("boresight") in eine Position gedreht, bei der Sternbilder vorzugsweise die Pixel diagonal traversieren. Dies veranlasst den Pixelarray, ein Rauschen hoher Frequenz sowohl in der vertikalen als auch der horizontalen Koordinate des Koordinatensystems des Arrays zu erzeugen. Das Rauschen wird dann mit einem herkömmlichen Tiefpassfilter gefiltert, normalerweise mit einem Kalman-Filter.

[0029] **Fig. 1** veranschaulicht die allgemeine Anwendung der Erfindung auf eine Steuerung einer Lage eines Raumflugkörpers. Bei einem Schritt **100** wird der Sternverfolgerarray diagonal zum Weg einer Lichtquelle, wie z.B. einem Sternbild, das den Array traversiert, positioniert. Bei einem Schritt **102** werden die Ortsfehlerkomponenten im Ausgang des Arrays herausgefiltert. Der gefilterte Arrayausgang wird dann verwendet, um die Lage des Raumflugkörpers in einem Schritt **104** zu berechnen, und die Lage des Raumflugkörpers wird in einem Schritt **106** so angepasst, dass sie mit der gewünschten Lage übereinstimmt.

[0030] In **Fig. 1b** ist ein Raumflugkörper **108**, wie z.B. ein Satellit, gezeigt, der die Erde **110** umkreist. Ein Sternverfolger **112** wird mittels einer Befestigung **114** auf dem Raumflugkörper getragen und durch die Befestigung so positioniert, dass seine Ziellinie **116** in eine gewünschte Richtung relativ zu Sternen **118** zeigt, die verfolgt werden sollen. Der Sternverfolger gibt eine Information aus, aus der die Lage des Raumflugkörpers bestimmt werden könnte, wobei jede nötige Anpassung, die gemacht werden soll, um den Raumflugkörper in seiner gewünschten Lage zu halten, ermöglicht wird. Bis zu diesem Punkt ist das beschriebene System der **Fig. 1b** herkömmlich. Die Erfindung ermöglicht ein eindeutiges Drehpositionieren des Pixelarrays des Sternverfolgers um die Ziellinie, um so Ortsfehler in seinem Ausgang auf bedeutende Weise zu reduzieren.

[0031] **Fig. 2** ist eine perspektivische Ansicht eines bekannten Sternverfolgeraufbaus, der bei der Erfindung verwendet werden kann. Eine Lichtblende **200** schirmt eine Optik gegen eine direkte Beleuchtung durch helle Quellen, wie z.B. die Sonne, die Erde und den Mond, ab. Eine optische Linsenanordnung **202** wird in einer Klammer **204** mit drei optischen Referenzoberflächen **206** und drei Raumflugkörper-Schnittstellenplatten **208** gehalten. Die Linsenanordnung fokussiert eine Lichtquelle auf einen licht-

empfindlichen CCD-Pixelarray **210**, der von einem thermoelektrischen Kühler **212** gekühlt wird. Eine Brennebenenelektronik (focal plane electronics) **214** empfängt die Arrayausgabe und verfolgt die Bewegung eines abgebildeten Lichts über den Array, was eine digitale Ausgabe erzeugt, die durch eine digitale Verarbeitungselektronik **216** weiterverarbeitet wird, um eine finale Sternbewegungsausgabe zu erzeugen, die verwendet werden kann, um die Lage des Raumflugkörpers zu steuern. Die verschiedenen Komponenten sind in einem Gehäuse **218** eingehäust, das eine Ober- und Rückabdeckung **220** und **222** umfasst, wobei die Klammer **204** die Vorderseite schließt. Eine Stromversorgung **224** wird innerhalb des Gehäuses vorgesehen, während eine Verbindungstafel **226** eine elektrische Schnittstelle zwischen der digitalen Verarbeitungselektronik **216** und dem Äußeren des Sternverfolgers über Öffnungen **228** in der Rückabdeckung **222** bereitstellt.

[0032] **Fig. 3a, 3b und 3c** sind Sätze aus Graphen, die gezeigt sind, um das Verständnis der Erfindung zu unterstützen. Sie repräsentieren jeweils DC-Fehlersignale, die von einem Sternverfolgerpixel in Reaktion auf eine abgebildete Lichtquelle erzeugt werden, die stationär auf dem Pixel ist, die das Pixel parallel zur Zeilenrichtung des Pixelarrays traversiert und die das Pixel diagonal traversiert.

[0033] In **Fig. 3a** ist eine stationär abgebildete Lichtquelle **300** auf einem einzelnen Pixel **302** in einem Sternverfolgerarray mit einer Spaltenrichtung und einer Zeilenrichtung bezeichnet, die den zwei DC-Fehlersignalen entsprechen, die durch die Sternverfolgerelektronik erzeugt werden. Die Spalten- und Zeilen-signale sind konstante Werte **304** und **306**, da die Bildposition auf dem Pixel über die Zeit konstant ist.

[0034] **Fig. 3b** veranschaulicht die DC-Fehlersignale, die erzeugt werden, wenn das Lichtbild **308** das Pixel **302** in einer Richtung **310** parallel zur Zeile traversiert, in der sich das Pixel befindet. Das Spalten-DC-Fehlersignal **314** ist eine gerade Linie eines konstanten Werts, da die Bildposition in der Spaltenrichtung unverändert bleibt. Das Zeilen-DC-Fehlersignal **316** richtet sich von Null auf, wenn die abgebildete Lichtquelle **308** zuerst das Pixel **302** betritt, und nähert sich seiner Mitte, nach der es auf Null zurückfällt, da das Bild von der Mitte zurückweicht und eventuell das Pixel verlässt. Die resultierende Sägezahn-gestalt des Zeilen-DC-Fehlersignals entspricht der Pixelarrayelektronik, die einen Peak bei der Mitte jedes Pixels im Array erzeugt. (Falls der Sternverfolger konfiguriert ist, Peak-Fehlersignale bei der ansteigenden Kante auszugeben, wo das Lichtbild zuerst das Pixel betritt, oder bei der Austrittskante, wo es das Pixel verlässt, würden die DC-Fehlerausgabesignale nicht dem gleichen Sägezahnweg folgen, aber der wichtige Punkt für die Zwecke der Erfindung ist, dass die Frequenzbereiche der mit den Pixelausgaben einhergehenden Fehlersignale, die unten diskutiert werden, die gleichen wären).

[0035] **Fig. 3c** veranschaulicht Sägezahn-DC-Feh-

lersignale, die sowohl in der Spalten- als auch der Zeilenrichtung erzeugt werden, wenn eine abgebildete Lichtquelle **318** das Pixel in einer Richtung **320** traversiert, die diagonal zu der Zeilen- und der Spaltenrichtung des Pixels ist. Das Spalten-DC-Fehlersignal **324** und das Zeilen-DC-Fehlersignal **326** richten sich beide aus der Ecke des Pixels **302** auf, bis das Lichtbild die Mitte des Pixels erreicht, nach der beide Signale auf Null abfallen, da das abgebildete Licht das Pixel auf seiner gegenüberliegenden Ecke verlässt.

[0036] **Fig. 3a, 3b und 3c** repräsentieren ideale DC-Fehlersignale ohne temporäre Fehlerkomponenten. Jedoch werden die eigentlichen Signale zeitliche Fehlerkomponenten aufweisen, die den idealen DC-Signalen auf Grund der inhärenten Ungenauigkeiten des Pixelarrays und seiner verbundenen Elektronik überlagert werden. Der ideale Fall ist in **Fig. 4a** veranschaulicht, die ideale Signale ohne überlagerte Fehler verdeutlicht, wenn eine abgebildete Quelle diagonal über viele Pixel in einem Sternverfolgerarray wandert, während **Fig. 4b** zeitliche Fehlersignale veranschaulicht, die dem idealen Signal überlagert sind.

[0037] Der obere Graph der **Fig. 4a** repräsentiert einige Pixel **401** eines Sternverfolgerpixelarrays. Der partielle Array **400** ist mit drei Zeilen und drei Spalten gezeigt. Eine abgebildete Lichtquelle **402** wandert entlang eines diagonalen Wegs **404** über die Pixel. Das Spalten-DC-Fehlersignal **406** und das Zeilen-DC-Fehlersignal **408** sind beide sägezahnförmig und sind als ideale zeitliche fehlerfreie Signale gezeigt.

[0038] In **Fig. 4b** behalten das Spalten-DC-Fehlersignal **410** und das Zeilen-DC-Fehlersignal **412** die allgemeine Sägezahnform bei, aber diese Form wird auf Grund zeitlicher Fehler gestört, die zum idealen Fehlersignal hinzugefügt oder davon subtrahiert werden. **Fig. 4b** ist eine genauere Repräsentation der eigentlichen DC-Fehlersignale, die von einem Sternverfolger erzeugt werden.

[0039] Die Erfindung erkennt einen Unterschied zwischen den Fehlern in den vertikalen und den horizontalen (Spalten und Zeilen) Signalkomponenten, wenn das Lichtbild die Pixel in einem Array entweder vertikal oder horizontal traversiert, und verwendet diesen Unterschied, um beide Fehlerkomponenten in eine Betriebsbedingung zu zwingen, bei der sie auf einfache Weise vom gewünschten Ausgangssignal entfernt werden können. Es ist besonders festzustellen, dass für eine horizontale Sternbewegung über einen Sternverfolger-CCD-Array der horizontale Ortsfehler eine relativ hohe Frequenz aufweist (bestimmt durch die Rate der Sternbewegung und die Pixelgrößen) und eine sehr kleine DC-Vorspannung aufweist, wohingegen der vertikale Ortsfehler eine bedeutende DC-Vorspannung aufweist. Dies ist in **Fig. 5** veranschaulicht, in der Spuren der vertikalen und horizontalen Ortsfehler als Funktion der Zeit durch Bezugsziffern **500** und **502** angegeben werden. Der horizontale Fehler **502** weist eine Dauer von 4 Sekunden, entsprechend der Zeit, die benötigt wird, damit das

Sternbild ein Pixel traversiert, und eine entsprechende Frequenz von 0,25 Hz auf. Jedoch weist er einen mittleren Fehler (oder eine DC-Vorspannung) in der Nähe von Null auf. Der vertikale Fehler **500** andererseits weist einen großen mittleren Fehler auf, während eine sehr geringe Amplitudenvariation gezeigt wird. Die Kalman-Filter, die typischerweise verwendet werden, um Sternverfolgerfehler zu entfernen, sind Tiefpassfilter, die die relativ hochfrequenten 0,25 Hz-Fehlersignale stark schwächen, aber die Vorspannungsfehler durchlassen. Dementsprechend bleibt ein relativ hoher Fehler im Sternverfolgerausgang.

[0040] **Fig. 6** ist ein Graph, der gemessene Werte des horizontalen Fehlersignals hoher Ortsfrequenz als Funktion des Pixelorts in der horizontalen (Zeilen-) Richtung für wiederholte horizontale Sterntraversierungen zeigt. Der Zeilenortsfehler in Bogensekunden wird auf der vertikalen Achse gegeben, während der Pixelort links oder rechts der Mitte (Null) in Zehnteln der Pixelbreite auf der horizontalen Achse gegeben wird. Während eine merkliche Varianz in den absoluten Fehlerwerten **600** für sukzessive Traversierungen festgestellt wird, taucht ein allgemeines S-Muster bei dem oben erläuterten Fehlermuster hoher Frequenz auf.

[0041] Die Erfindung macht sich die Tatsache zunutze, dass, wenn ein Sternbild ein Pixel eher diagonal als vertikal oder horizontal traversiert, sowohl der vertikale als auch der horizontale Fehler sich in einem relativ hohen Frequenzbereich befinden, der durch ein Kalman-Filter entfernbar ist, ohne eine bedeutende DC-Vorspannung. Die Erfindung fügt einen dritten Grad einer örtlichen Steuerung zu der Azimuthal- und Elevations-Steuerung hinzu, die typischerweise für Sternverfolger verwendet werden: eine Drehsteuerung, die den Pixelarray um einen Ort dreht, bei dem er von einer Sternbildbewegung diagonal traversiert wird, wenn er in die richtige Richtung zeigt. Dies zwingt sowohl den vertikalen als auch den horizontalen Fehler in den Hochfrequenzbereich, wobei beide durch das Kalman-Filter entfernt werden können.

[0042] Der vertikale und der horizontale Fehler **700** und **702**, die aus einer diagonalen Traversierung resultieren, sind in **Fig. 7** für die gleichen Pixelgrößen und Sternbewegung wie in **Fig. 5** veranschaulicht. Beide Fehlerfunktionen weisen Frequenzen von ungefähr 0,17 Hz mit geringer oder gar keiner DC-Vorspannung auf. Die Frequenz ist geringer als die 0,25 Hz, die für eine horizontale Traversierung festgestellt ist, da es länger dauert, ein Pixel diagonal zu überqueren, aber die auf eine Weise niedrigere Frequenz ist immer noch einfach durch ein Kalman-Filter entfernbar.

[0043] Während ein Traversierwinkel von 45° (für ein quadratisches Pixel) optimale Resultate erzielt, können signifikante Niveaus der Fehlerreduktion für andere Traversierwinkel von ungefähr 25° bis ungefähr 65° erzielt werden. Für allgemeinere, rechtwinklige Pixel ist die optimale Lösung für den Sterntraver-

sierwinkel $\alpha = \tan^{-1}(v/h)$, wobei v und h die vertikale und die horizontale Größe des Pixels sind. In diesem Fall kann der eigentliche Wert von α innerhalb von ungefähr 20° des idealen Werts liegen und immer noch eine bedeutende Verbesserung der Fehlerreduktion erzielen. α -Werte von 0°, 90° und 45° werden in den **Fig. 8a**, **8b** und **8c** veranschaulicht, in denen die Sternwege über ein quadratisches Pixel **800** durch Bezugsziffern **802**, **804** und **806** angegeben sind.

[0044] **Fig. 9** veranschaulicht die Montagegeometrie des Sternverfolgers. Ein dreidimensionaler Rahmen aus Referenzen $X_{\text{Körper}}$, $Y_{\text{Körper}}$ und $Z_{\text{Körper}}$ wird durch den Raumflugkörper bereitgestellt. Die Ziellinie **900** des Sternverfolgers ist herkömmlicherweise innerhalb dieses Rahmens in Form eines Azimuths errichtet, der als Winkel von der X-Achse zu einer Ziellinienprojektion **902** auf die xz-Ebene und einem Elevationswinkel **904** von der xz-Ebene in die y-Richtung gegeben wird. Der Detektorarray des Sternverfolgers liegt in einer Ebene in rechten Winkeln zur Ziellinie, mit vertikalen (v) und horizontalen (h) Koordinaten. In Übereinstimmung mit der Erfindung wird der Detektorarray des Weiteren durch den Winkel α definiert, bei dem die vh -Ebene um die Ziellinie **900** rotiert wird.

[0045] **Fig. 10** ist ein Flussdiagramm, das ein herkömmliches Verfahren zum Steuern einer Lage eines Raumflugkörpers veranschaulicht. Photonen, die von Sternen **1000** emittiert werden, werden von der Optik **1002** des Sternverfolgers empfangen und auf den lichtempfindlichen Pixelarray des Sternverfolgers abgebildet, typischerweise ein CCD **1004**. Die Elektronik **1006** des Sternverfolgers wandelt die CCD-Ausgabe in DC-Signale um, die dann von einem Kalman-Filter **1008** verarbeitet und in das Lagekontrollsystem **1010** des Raumflugkörpers eingegeben werden.

[0046] Die Erfindung drehpositioniert den Sternverfolger so, dass seine Pixel von Sternbildern bis zu einer Diagonale von 20° traversiert werden, vorzugsweise mit einer minimalen Abweichung von der Diagonalen. Diese Technik ist in **Fig. 11** veranschaulicht. Wenn der Missionsweg des Raumflugkörpers erst einmal definiert wurde (**1100**) und die Sterne, denen mit den Sternverfolgern gefolgt werden soll, identifiziert wurden (**1102**), um so einen Sternenkatalog zu entwickeln, ist der Sternweg über seine jeweiligen Sternverfolgerpixel bestimmt (**1104**). Die Sternverfolger werden dann so gedreht, dass ihre Pixel von abgebildetem Sternlicht bei dem gewünschten Winkel, normalerweise diagonal, traversiert werden (**1106**). Anpassungen an die Drehpositionen des Sternverfolgers können gegebenenfalls während des Flugs mittels einer herkömmlichen Tele-Kommunikation von der Erde oder einer anderen Quelle im Raum gemacht werden. Ein Rückkopplungssystem könnte auch hinzugefügt werden, um jegliche Abweichungen von der gewünschten Drehposition zu erfassen, wie z.B. durch Erfassen des DC-Fehlersignals nach dem Kalman-Filter, das einen Schwellenwertpegel überschreitet, und um den Sternverfolger automa-

tisch zu drehen, um das Fehlerniveau auf akzeptable Grenzen zurückzubringen.

[0047] Lagedaten mit geringem Fehler werden während des Flugs unter Verwendung herkömmlicher Techniken erzeugt (**1108**), aber basierend auf Signalen mit geringem Fehler von den Sternverfolgern, und diese Daten werden verwendet, um die Lage des Raumflugkörpers auf eine herkömmliche Weise zu steuern (**1110**).

[0048] Für eine geosynchrone Erdorbit- (geosynchronous earth orbit, GEO) bzw. eine niedrige Erdorbit- (low earth orbit, LEO) Erdausrichtungsmission kann ein einzelner Rotationsfreiheitsgrad um die Ziellinie des Sternverfolgers verwendet werden, um eine nahe, diagonale Sternbildbewegung über den CCD-Array zu erhalten. Um jedoch für ein allgemeineres Missionsprofil eine diagonale Sternbildbewegung zu erzeugen, muss der Sternverfolger an einem Mechanismus **114**, wie z.B. einer 3-achsigen Kardanplattform, montiert sein, der eine Bewegung mit 3 Freiheitsgraden ermöglicht. In diesem Fall werden die 3-achsigen Kardanbewegungsbefehle (in Form dreier Eulerscher Winkel) erzeugt, um die Sternverfolgerziellinie so zu steuern, dass:

$$\dot{h} = \dot{v} = \text{konstant},$$

wobei $\dot{h}$ und $\dot{v}$ die Ableitungen der horizontalen und der vertikalen Position des Sterns auf dem CCD-Array bezeichnen und die drei Eulerschen Winkel θ_x , θ_y , θ_z die in **Fig. 12a** gegebenen Gleichungen erfüllen, wobei γ_s^{st} der abgetastete Sterneneinheitsvektor im Sternverfolgerbezugssystem ist; γ_s^{ECI} der Sterneneinheitsvektor im Erdmitte-Trägheitsbezugssystem (Earth Center Inertial reference frame) ist; $C_{\text{ECI}}^{\text{body}}$ die 3×3-Richtungskosinusmatrix ist, die eine Trägheitslage des Raumflugkörpers repräsentiert, und $C_x(\theta_x)$, $C_y(\theta_y)$, $C_z(\theta_z)$, die in **Fig. 12b** angegeben sind, drei 3×3-Rotationsmatrizen sind. Sterneneinheitsvektoren γ_s^{st} und γ_s^{ECI} werden in **Fig. 12c** gegeben, wobei RA und DEC Sternlicht-Aufstiegs- und Abstiegswinkel sind.

[0049] Die Erfindung erhöht die Präzision einer Lagesteuerung und einer Zeigeleistung eines Raumflugkörpers. Missionen, wie z.B. Ausrichten eines Laserstrahls auf einen speziellen Ort auf der Erde oder Errichten eines präzisen Orbits um einen Planeten, erfordern eine präzise Zeigeleistung.

[0050] Die Erfindung wurde befunden, eine Gesamtlagesteuerung eines Raumflugkörpers in der Größenordnung von 50% zu verbessern. Bei einem simulierten Vergleich mit einer Schwerpunktspositionengenauigkeit eines Sterns (star centroid position accuracy) von 3 Bogensekunden, 15 pro Achse pro Stern, wurde ein Rollfehler von ungefähr 0,75 auf ungefähr 0,52 Bogensekunden, ein Pitch-Fehler von ungefähr 1,05 auf ungefähr 0,57 Bogensekunden und ein Yaw-Fehler von ungefähr 0,88 auf ungefähr 0,40 Bogensekunden reduziert.

[0051] Eine noch präzisere Lagebestimmung kann

mit kleineren Pixeln erzielt werden, die eine größere Ortsauflösung aufweisen. Die vorliegenden Pixelarrays haben Ortsauflösungen runter bis auf etwa ein Zehntel einer Bogensekunde; kleinere Pixel mit geringeren Ortsauflösungen würden eine Lagepräzisierung erhöhen.

[0052] Während besondere Ausführungsformen der Erfindung gezeigt und beschrieben wurden, können zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen durchgeführt werden, ohne den Schutzbereich der Erfindung, wie er in den beigefügten Ansprüchen definiert ist, zu verlassen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Reduzieren von Ortsfehlern, die mit der Bewegung (**404**) eines Sternbildes (**402**) über einen Array (**400**) von Detektorpixeln (**401**) eines Sternverfolgers hinweg einhergehen, wobei der Array (**400**) in einem vertikal horizontalen Koordinatensystem (v, h) orientiert ist, wobei parallele und orthogonale Bewegungen eines Sternbildes (**402**) relativ zu einer der Koordinaten (v, h) Rauschen in dem Ausgang des Sternverfolgers erzeugen, gekennzeichnet durch:

die Tatsache, dass das erzeugte Rauschen Ortsrauschen hoher und niedriger Frequenz ist,

Drehpositionieren (**100**; **1106**) des Arrays (**400**) innerhalb des Koordinatensystems (v, h), so dass er von einem Sternbild (**402**) unter einem Winkel α traversiert wird, der ein Ortsrauschen in dem Ausgang des Sternverfolgers (**112**) erzeugt, das sowohl in der vertikalen als auch der horizontalen Koordinate Komponenten (**700**, **702**) hoher Frequenz beinhaltet, und

Filtern (**102**) des Rauschens mit einem Tiefpassfilter (**1008**).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Array (**400**) um die Ziellinie (**900**) des Sternverfolgers herum gedreht wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Sternverfolger (**112**) an einem Weltraumflugkörper (**102**) montiert ist und der gefilterte Ausgang des Sternverfolgers dazu verwendet wird, die Lage des Weltraumflugkörpers zu steuern (**106**, **1110**).

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, gekennzeichnet durch die Tatsache, dass die Pixel (**401**) generell rechteckige Formen mit einer jeweiligen vertikalen (v) und horizontalen (h) Abmessung aufweisen und innerhalb des Arrays (**400**) in Zeilen und Spalten angeordnet sind, wobei der Array (**400**) derart drehpositioniert wird, dass die Pixel (**401**) von erfasstem Sternenlicht (**402**) unter einem Winkel α relativ zu der vertikalen Koordinate traversiert werden, wobei α innerhalb von 20° von $\tan^{-1}(v/h)$ liegt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass α etwa gleich $\tan^{-1}(v/h)$ ist.

6. Sternverfolgersystem, mit:
 einem Sternverfolger (112), der ein Ausgangssignal erzeugt, das eine Sternbewegung (404) relativ zu dem Sternverfolger (112) angibt,
 gekennzeichnet durch
 ein Filter (1008), das Fehlerkomponenten des Ausgangs des Sternverfolgers hoher Ortsfrequenz filtert, und
 einen Sternverfolger-Positionierer (114), der den Sternverfolger (112) so positioniert, dass der vorherrschende Ortsfehler (700, 702) in seinem Ausgang sich im Hochfrequenzbereich des Filters (1008) befindet.

7. System nach Anspruch 6, gekennzeichnet durch die Tatsache, dass der Sternverfolger (112) einen Array (400) von Detektorpixeln (401) aufweist, die in einem vertikalhorizontalen Koordinatensystem (v, h) orientiert sind, wobei parallele und orthogonale Bewegungen eines Sternenbildes (402) relativ zu einer der Koordinaten (v, h) in dem Ausgang des Sternverfolgers Ortsrauschen hoher bzw. niedriger Frequenz erzeugen, und wobei der Sternverfolger-Positionierer (114) den Sternverfolger-Array (400) innerhalb des Koordinatensystems (v, h) so drehpositioniert (100), dass er von einem Sternenbild (402) unter einem Winkel α traversiert wird, der Ortsrauschen in dem Ausgang des Sternverfolgers erzeugt, das sowohl in der vertikalen als auch der horizontalen Koordinate Hochfrequenzkomponenten (700, 702) beinhaltet.

8. Sternverfolgersystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Sternverfolger-Positionierer (114) den Array (400) um die Ziellinie (900) des Sternverfolgers herum dreht.

9. Sternverfolgersystem nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Pixel (401) generell rechteckige Formen mit einer jeweiligen vertikalen (v) und horizontalen (h) Abmessung aufweisen und innerhalb des Arrays (400) in Zeilen und Spalten angeordnet sind, und dass der Sternverfolger-Positionierer (114) den Array (400) so drehpositioniert, dass die Pixel (401) von erfasstem Sternenlicht (402) unter einem Winkel α relativ zu der vertikalen Koordinate traversiert werden, wobei α innerhalb von 20° von $\tan^{-1}(v/h)$ liegt.

10. Sternverfolgersystem nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Sternverfolger (114) an einem Weltraumflugkörper (108) montiert ist, und dadurch, dass dessen Ausgang angeschlossen ist, um die Lage (106) des Weltraumflugkörpers zu steuern.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

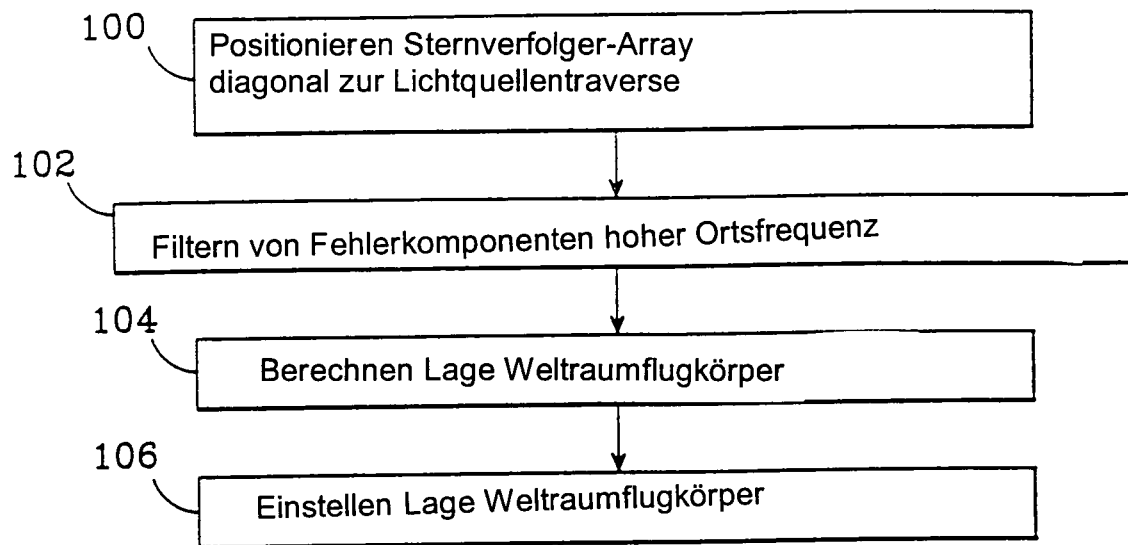


FIG. 1a

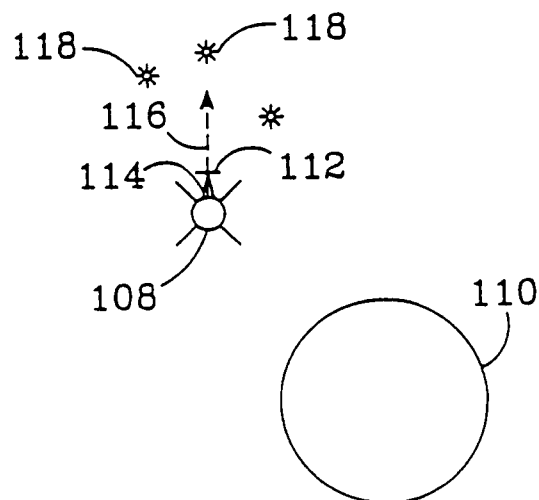
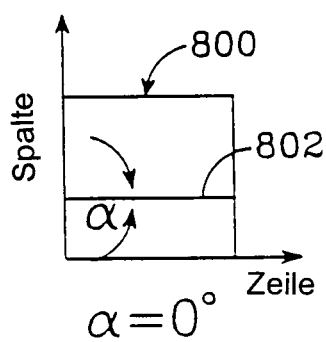
FIG. 1b
(Stand der Technik)

FIG. 8a

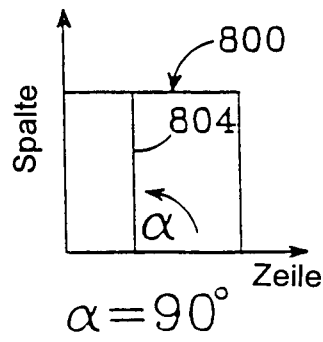


FIG. 8b

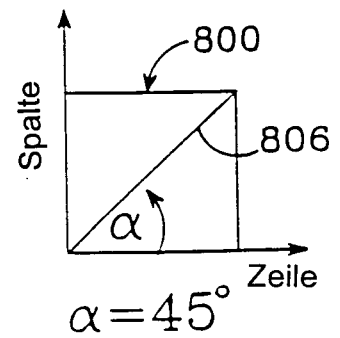


FIG. 8c

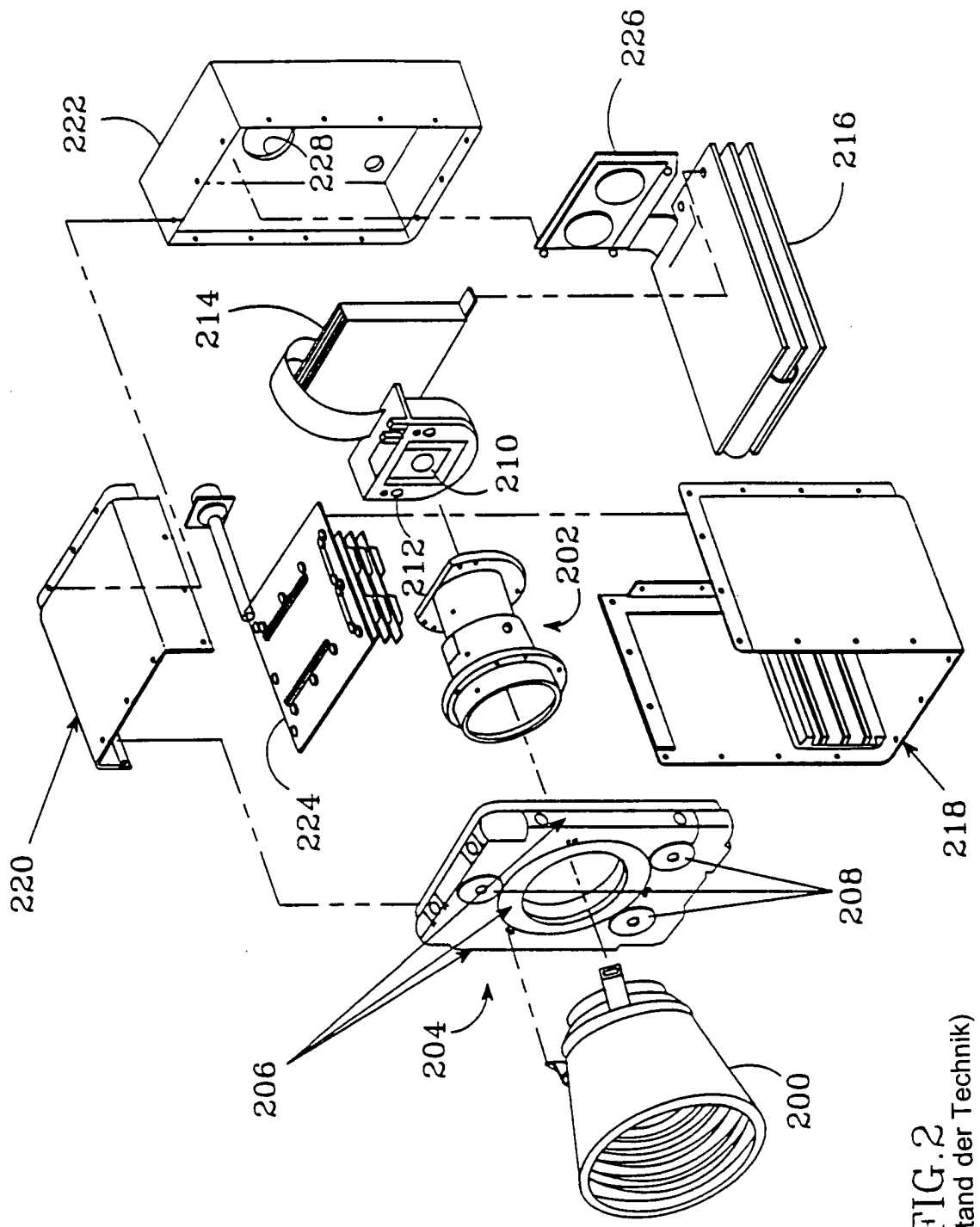


FIG. 2
(Stand der Technik)

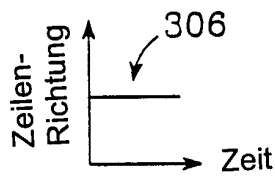
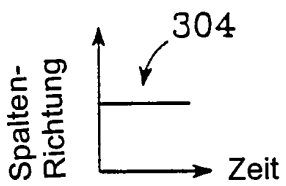
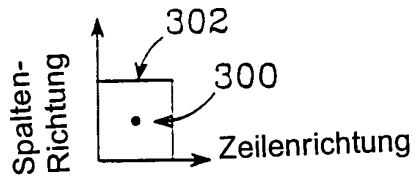


FIG. 3a

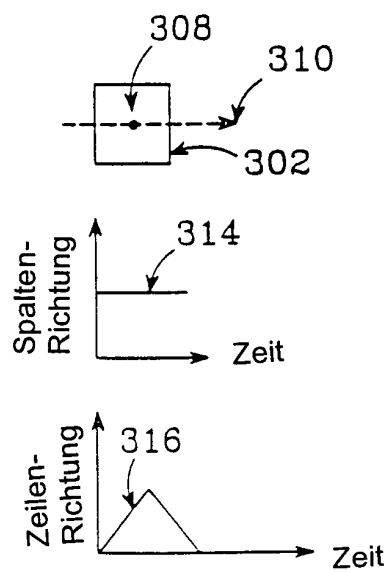


FIG. 3b

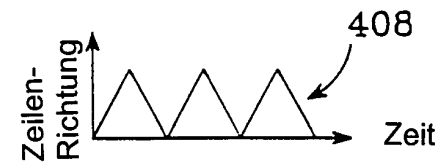
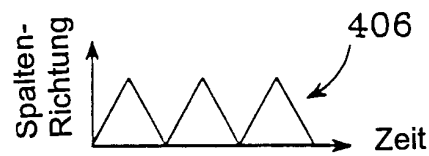
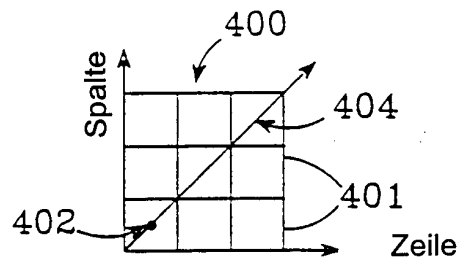


FIG. 4a

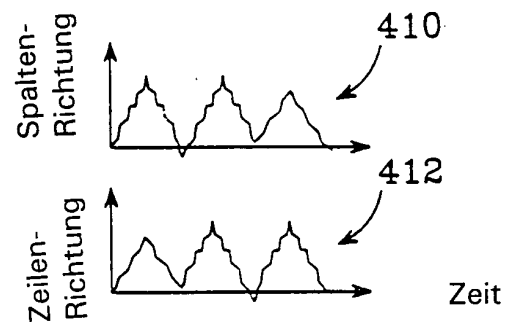


FIG. 4b

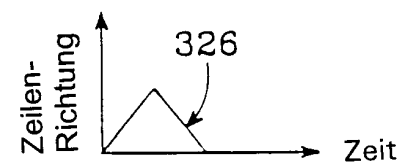
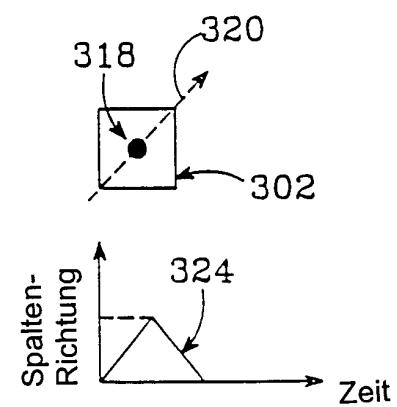


FIG. 3c

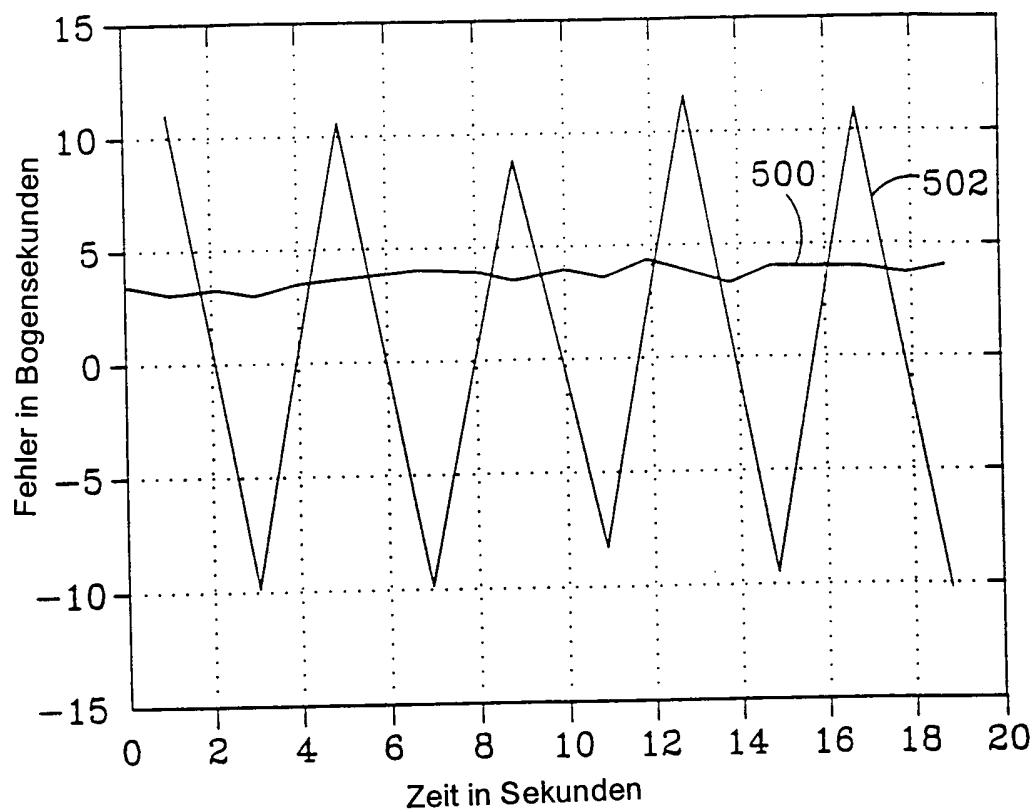


FIG. 5

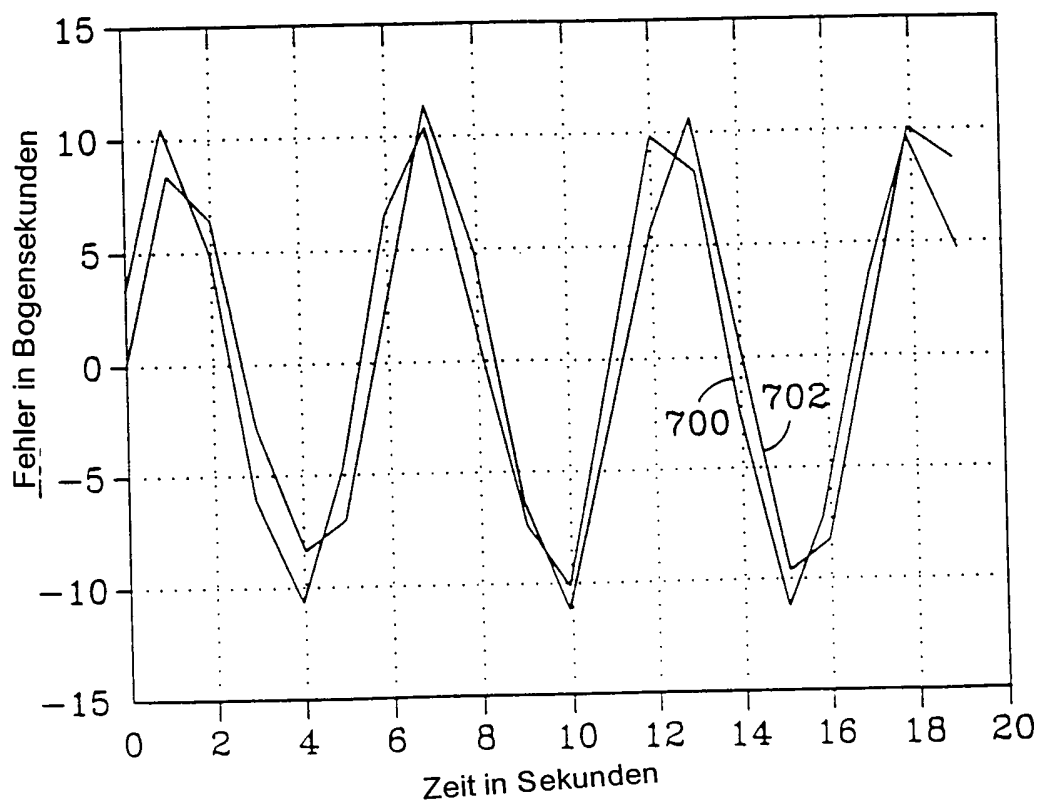


FIG. 7

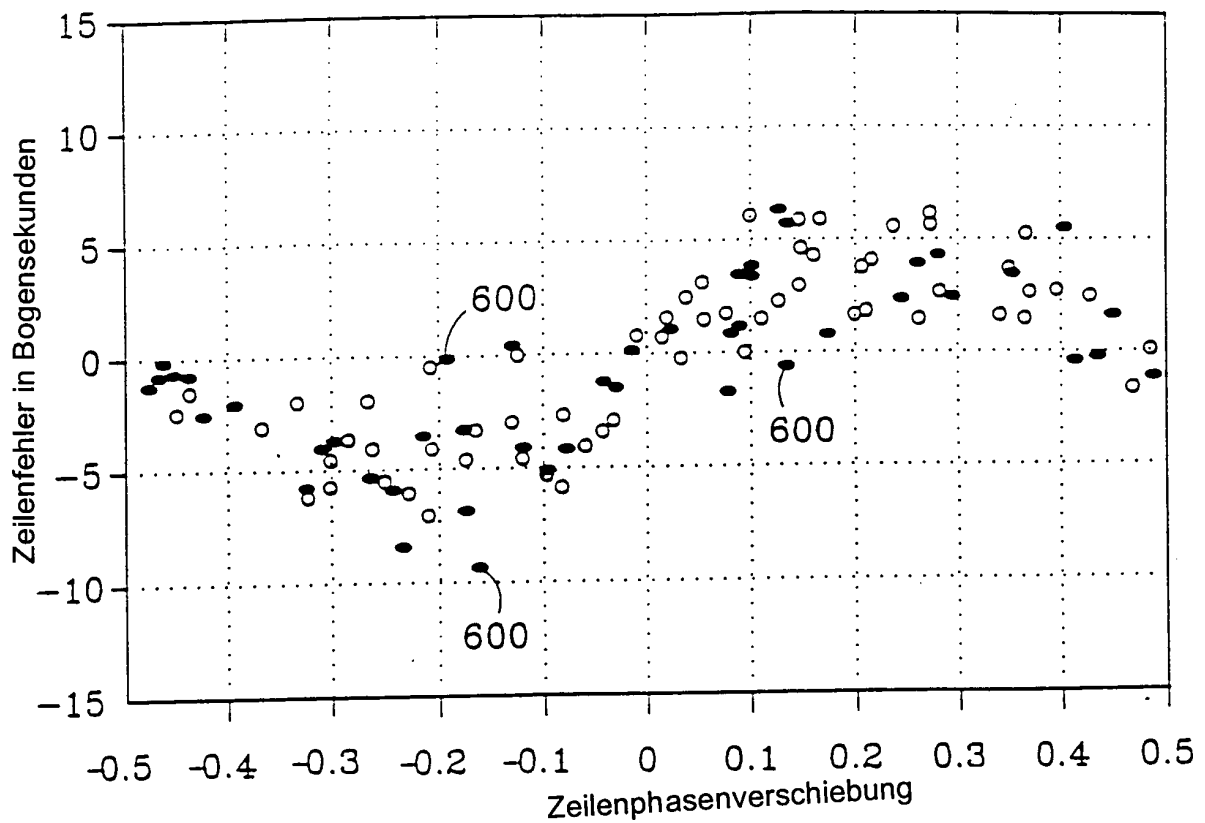


FIG.6

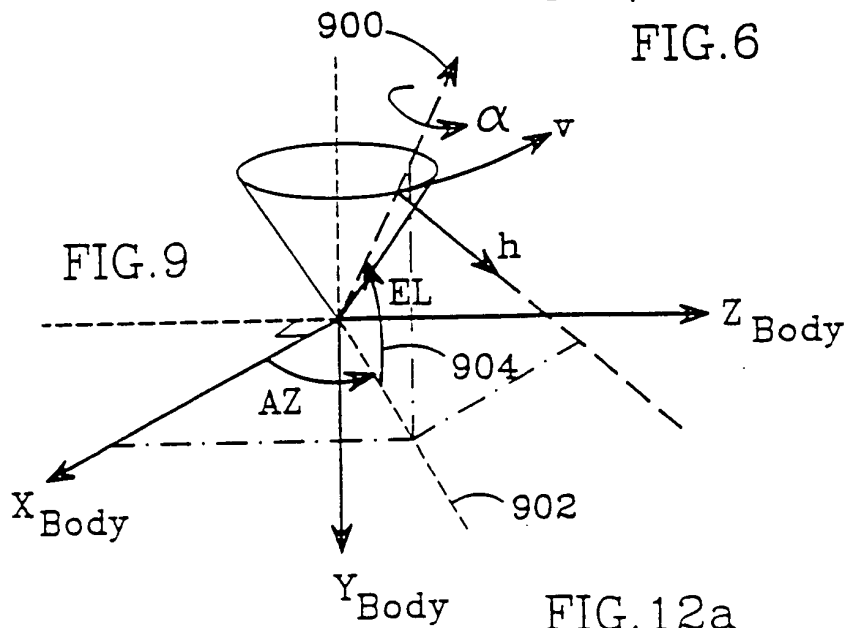


FIG.9

FIG.12a

$$\begin{aligned} & \mathbf{r}_S^{ST(3)} \dot{\mathbf{r}}_S^{ST(1)} - \mathbf{r}_S^{ST(1)} \dot{\mathbf{r}}_S^{ST(3)} = \text{konstant} \\ & \mathbf{r}_S^{ST(3)} \dot{\mathbf{r}}_S^{ST(2)} - \mathbf{r}_S^{ST(2)} \dot{\mathbf{r}}_S^{ST(3)} = \text{konstant} \\ & \text{with} \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{r}_S^{ST(1)} \\ \mathbf{r}_S^{ST(2)} \\ \mathbf{r}_S^{ST(3)} \end{bmatrix} = [C_x(\theta_x)][C_y(\theta_y)][C_z(\theta_z)][C_{ECI}^{body}] \mathbf{r}_S^{ECI} \end{aligned}$$

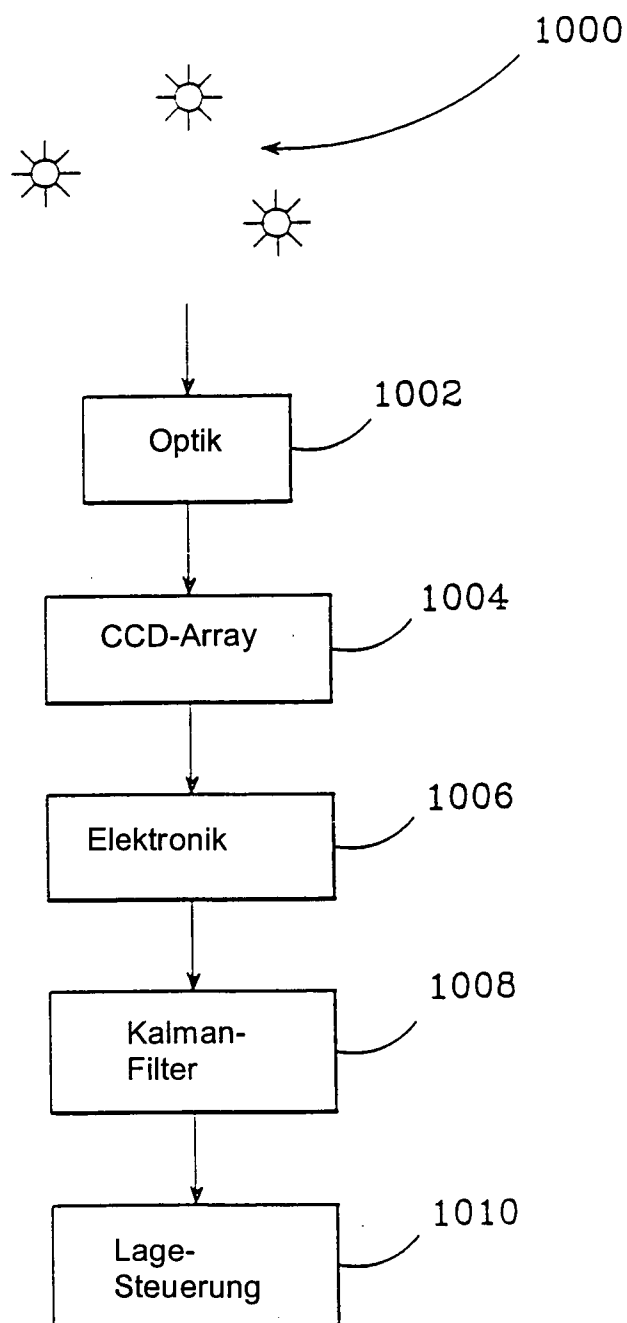


FIG.10
(Stand der Technik)

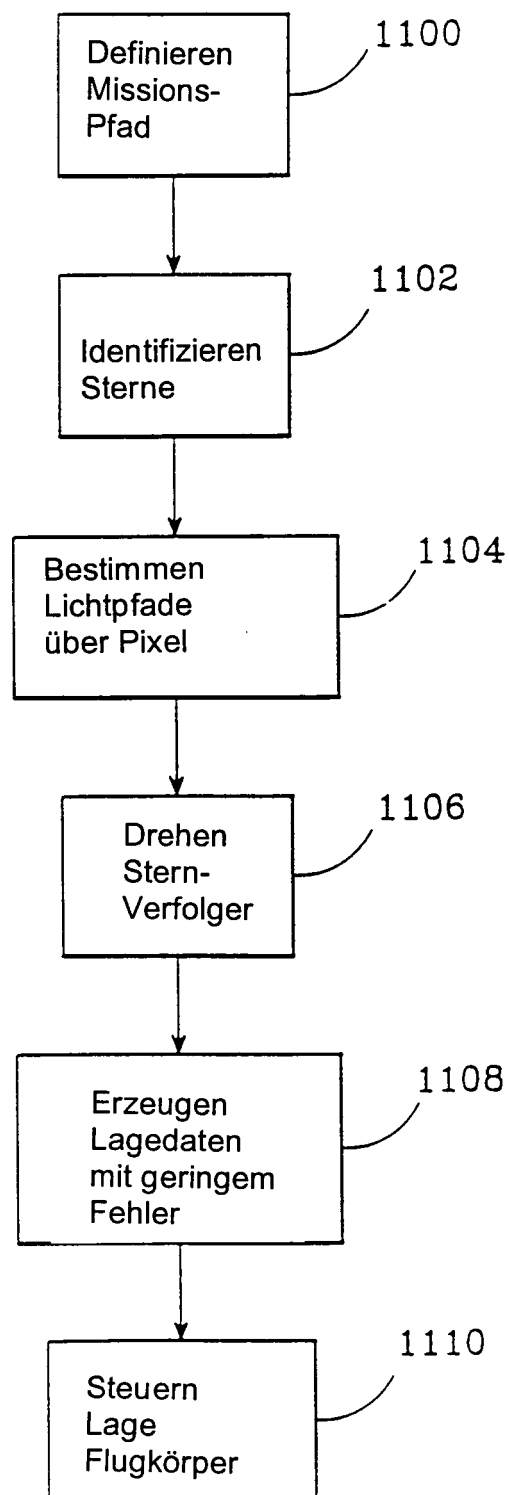


FIG. 11

$$C_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix}$$

$$C_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix}$$

$$C_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) \\ 0 & \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) \end{bmatrix}$$

FIG. 12b

$$\gamma_s'' = \frac{1}{\sqrt{1+h^2+v^2}} \begin{bmatrix} h \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma_s^{ECI} = \begin{bmatrix} \cos(DEC) & \cos(RA) \\ \cos(DEC) & \sin(RA) \\ \sin(DEC) \end{bmatrix}$$

FIG. 12c