

(19)



(11)

EP 2 251 849 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:

17.11.2010 Patentblatt 2010/46

(51) Int Cl.:

G08G 5/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **10002260.7**

(22) Anmeldetag: **05.03.2010**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL
PT RO SE SI SK SM TR**

Benannte Erstreckungsstaaten:

AL BA ME RS

(30) Priorität: **09.05.2009 DE 102009020636**

(71) Anmelder: **EADS Deutschland GmbH
85521 Ottobrunn (DE)**

(72) Erfinder:

- **Hoyer, Michael
88633 Heiligenberg (DE)**
- **Ruebsamen, Oliver
57080 Siegen (DE)**

(74) Vertreter: **Riegel, Werner**

**EADS Deutschland GmbH,
Patentabtlg., DSLAIP1
88039 Friedrichshafen (DE)**

(54) **Verfahren zur verbesserten Erkennung von leitungsartigen Objekten**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur verbesserten Erkennung von leitungsartigen Objekten in einer vor einem Fluggerät befindlichen Umgebung, wobei aus den Entfernungswerten eines mittels eines Entfernungssensors erzeugten Entfernungsbildes dieser Umgebung unter Berücksichtigung der Position und Lage des Fluggeräts eine Menge von dreidimensionalen Messpunkten in einem geodätischen Koordinatensystem erzeugt wird, aus welcher unter Verwendung bekannter Filtermethoden potentielle Leitungsmesspunkte extrahiert werden, wobei in einem ersten Schritt die potentiellen Leitungsmesspunkte in eine horizontale Ebene projiziert werden

und mittels einer polynomialen Phasentransformation und einer nachfolgenden spektralen Analyse Geradenverläufe identifiziert werden und in einem zweiten Schritt die potentiellen Leitungsmesspunkte auf und in einem vorgebbaren Abstand zu einer im ersten Schritt gefundenen Geraden in eine vertikale Ebene zu der horizontalen Ebene und der jeweiligen Geraden aus dem ersten Schritt projiziert werden und mittels einer quadratischen Formtransformation Katenoiden- oder Parabelverläufe identifiziert werden.

EP 2 251 849 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur verbesserten Erkennung von leitungsartigen Objekten gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

[0002] Das vorliegende Verfahren ist geeignet für tief fliegende Fluggeräte zur Vermeidung von Kollisionen mit Hochspannungsleitungen und anderen leitungsartigen Objekten wie z.B. Abspanndrähte von Masten, Seilbahnen etc.

[0003] In DE 196 05 218 C1 ist ein Verfahren zur Hinderniswarnung für tief fliegende Fluggeräte beschrieben. Dabei werden mittels eines Sensors Entfernungsbilder der vor dem Fluggerät sich befindenden Umgebung erzeugt. Aus den Entfernungsbildern werden Hinderniskonturen extrahiert, indem zwischen benachbarten Bildpixeln mittels Hochpassfiltern nach Diskontinuitäten ("Sprüngen") gesucht wird. Mit einem Navigationssystem kann die Lage der Hinderniskorrektur der natürlichen Außensicht graphisch überlagert werden. Eine Erkennung des Hindernisses im eigentlichen Sinn findet nicht statt. In DE 10 2005 047 273 B4 wird ein weiteres Verfahren zur Unterstützung von Tiefflügen beschrieben, welches auf der Untersuchung von Sprüngen in den aufgenommenen Entfernungsbildern basiert. Bei diesem Verfahren werden drahtähnliche Hindernisse bei starken Umgebungseinflüssen, z.B. Clutter oder beim Blick gegen den Himmel erkannt.

[0004] In DE 100 55 572 C1 ist ein Verfahren zur Leitungserkennung beschrieben welches mit Einsatz einer Hough Transformation arbeitet. Die Hough Transformation ist bekanntermaßen ein äußerst rechenintensives Verfahren da im Prinzip sämtliche theoretisch denkbaren Lösungen auch gerechnet werden müssen. Es ergeben sich dabei szenenabhängig drastisch unterschiedliche Verarbeitungszeiten.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur verbesserten Leitungserkennung anzugeben, mit welchem Leitungen zuverlässig und in Echtzeit erkannt werden.

[0006] Diese Aufgabe wird mit dem Verfahren gemäß den Merkmalen des geltenden Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

[0007] Zur verbesserten Erkennung von leitungsartigen Objekten in einer vor einem Fluggerät befindlichen Umgebung werden aus den Entfernungswerten eines mittels eines Entfernungssensors erzeugten Entfernungsbildes dieser Umgebung unter Berücksichtigung der Position und Lage des Fluggeräts eine Menge von dreidimensionalen Messpunkten in einem geodätischen Koordinatensystem erzeugt. Aus dieser Menge von Messpunkten werden unter Verwendung bekannter Filtermethoden potentielle Leitungsmesspunkte extrahiert. In einem ersten erfindungsgemäßen Schritt werden die potentiellen Leitungsmesspunkte in eine horizontale Ebene projiziert und mittels einer polynomialen Phasentransformation und einer nachfolgenden spektralen Analyse Geradenverläufe identifiziert. In einem zweiten erfindungsgemäßen Schritt werden die potentiellen Leitungsmesspixel auf und in einem vorgebbaren Abstand zu einer im ersten Schritt gefundenen Geraden in eine vertikale Ebene zu der horizontalen Ebene und der jeweiligen Geraden aus dem ersten Schritt projiziert und mittels einer quadratischen Formtransformation Katenoiden- oder Parabelverläufe identifiziert.

[0008] Bei den beschriebenen bekannten Filtermethoden handelt es sich um Filter, welche Clutter und Störungen, z.B. durch Sonneneinstrahlung eliminieren. Solche Filter werden z.B. in DE 10 2005 047 273 B4 oder DE 198 28 318 C2 beschrieben. Messpunkte welche in diesen Filtermethoden als Clutter oder Störung identifiziert werden, werden in dem ersten und zweiten erfindungsgemäßen Verfahrensschritt nicht berücksichtigt. Dadurch wird die Rechenzeit erheblich reduziert.

[0009] Die den potentiellen Leitungsmesspunkten entsprechenden Pixel werden in eine horizontale Ebene projiziert in welcher Leitungen als Geradenstücke erscheinen. Es gilt nun mit einem geeigneten Verfahren diese Geradenstücke zu erkennen. Wegen der bekannten Nachteile kommt hier nicht die Hough Transformation zum Einsatz.

[0010] In dem erfindungsgemäßen Verfahren wird eine mathematische Analogie zwischen einem Linienfit und der Bestimmung der spektralen Parameter eines Signals mit mehreren Komponenten hergestellt. Für die spektrale Analyse existieren effiziente Verfahren in der digitalen Signalverarbeitung.

[0011] In einem erfindungsgemäßen Verfahrensschritt findet eine Zuordnung geeigneter Messpunkte, d.h. welche sich innerhalb eines definierten Korridors, d.h. einen vorgegebenen Abstand aufweisend, um die im ersten Verfahrensschritt abgeschätzten Gerade befinden, statt.

[0012] Die Auswertung im zweiten erfindungsgemäßen Verfahrensschritt erfolgt verallgemeinert auf die Identifizierung von Katenoiden. Als Näherung zur Rechenzeiterparnis kann die Identifizierung auch auf Parabeln erfolgen.

[0013] Um eine niedrige Falschalarmrate zu erreichen, kann das Ergebnis einer Auswertung eines Entfernungsbildes (Datensatz) zusätzlich zur Bestätigung mit den Ergebnissen der zeitlich voran gegangenen Bilder verglichen werden.

[0014] Es können zur Erhöhung der Verfahrenssicherheit auch mehrere Datensätze zur Auswertung akkumuliert werden.

[0015] Werden mehrere Leitungen gefunden können anhand der durch die polynomialen Phasentransformation gefundene Parametrisierung die Lage der Leitungen relativ zueinander untersucht werden und unplausible Leitungsverläufe eliminiert werden.

[0016] Ist eine Leitung bestätigt, kann die Lage relativ zur extrapolierten Flugtrajektorie des Flugkörpers untersucht werden, um in kritischen Fällen eine Warnung zu erzeugen.

[0017] Aufgrund der bekannten Lageinformation kann der Pilot z.B. über Entfernung, Höhe und Richtung relativ zur Hubschrauberachse oder Flugvektor informiert werden. Die Leitung kann als Symbol, Messpunktwolke oder Katenoide anhand der gefundenen Parametrisierung als Video- oder FLIR Overlay oder in eine digitale Karte eingezeichnet werden.

5 Sensorsystem

[0018] Als Sensor wird ein bildgebendes Front-End gewählt, welches die Szene aktiv abtastet und dessen Bildinformation aus Entfernungswerten besteht. Entfernungsbilder sind für die nachfolgende automatische Bildauswertung zur Leitungserkennung vorteilhaft. Als Sensoren kommen ein Laserscanner, der Vorzugsweise im Infrarotbereich arbeitet, oder ein abbildendes Radar im mm-Wellenbereich in Frage. Obwohl das Radar im Hinblick auf Schlechtwetterbetrieb (Nebel) gewisse Vorteile besitzt, hat nach aktuellem Stand der Technik nur ein Laserscanner die gewünschte vertikale und laterale Bildauflösung. Beide Sensoren sind als aktive Systeme gleichermaßen für Tag und Nachtbetrieb geeignet.

[0019] Ein geeigneter Laserscanner ist für große Reichweiten (>1km) und hohe Bildauflösung (z.B. 0,5 horizontal* 0,1 Grad vertikal) ausgelegt. Für jedes Entfernungsbild muss die räumliche Richtung, in die der Lasermesspuls ausgesandt wurde, eindeutig im sensorfesten Koordinatensystem bestimmbar sein, durch die Bauart des Scanners sowie evtl. durch zusätzliche Messungen während des Scanvorgangs.

[0020] Das Navigationssystem dient zur Bestimmung von Position und Lage des Fluggeräts. Jeder Entfernungswert wird mit Hilfe der Koordinaten der zugehörigen räumlichen Scanrichtung und den aktuellen Positions- und Lageparametern des Fluggeräts in einen Szenenpunkt umgerechnet. Ein Szenenpunkt (Messpunkt) ist durch seine drei Ortskoordinaten in einem erdfesten Koordinatensystem festgelegt. Aus jedem Entfernungsbild entsteht auf diese Weise eine sog. erdfeste Messpunkt wolke, aus der evtl. vorhandene Leitungen extrahiert werden können.

[0021] Für die Datenverarbeitung ist ein Prozessor mittlerer Leistung zuständig. Auf diesem wird zunächst die oben genannte Transformation von Entfernungsmesswerten in Messpunkte durchgeführt.

[0022] Die sich daraus ergebenden Daten dienen als Input für eine Auswerteeinheit. Die Auswerteeinheit stellt fest, ob sich die einzelnen Leitungen in gefährlicher Nähe zur aktuellen Position des Fluggeräts oder zur vorgesehenen Flugbahn befinden. Das Ergebnis dieser Auswertung wird dem Piloten optisch und/oder akustisch mitgeteilt.

[0023] Als Sensor kann ein bildgebendes Front-End verwendet werden, welches die Umgebung des Fluggeräts aktiv abtastet und dessen Bildinformation aus Entfernungswerten besteht. Die daraus entstehenden Entfernungsbilder werden in den nachfolgenden Verfahrensschritten zur Leitungserkennung verwendet. Als Sensoren kommen ein Laserscanner oder ein abbildendes Radar im mm-Wellenbereich in Frage. Im Gegensatz zum Radar, welches im Hinblick auf Schlechtwetterbetrieb (Nebel) gewisse Vorteile besitzt, hat ein Laserscanner eine vergleichsweise bessere vertikale und laterale Bildauflösung. Beide Sensoren sind als aktive Systeme gleichermaßen für Tag und Nachtbetrieb geeignet.

[0024] Ein geeigneter Laserscanner ist für große Reichweiten (>1 km) und hohe Bildauflösung (z.B. 0,5 horizontal* 0,1 Grad vertikal) ausgelegt. Für jedes Entfernungsbild ist, durch die Bauart des Scanners sowie durch etwaige zusätzliche Messungen während des Scanvorgangs, die räumliche Richtung in die der Lasermesspuls ausgesandt wurde eindeutig im sensorfesten Koordinatensystem bestimmbar.

[0025] Das Navigationssystem dient zur Bestimmung von Position und Lage des Fluggeräts. Jeder Entfernungswert wird mit Hilfe der Koordinaten der zugehörigen räumlichen Scanrichtung und den aktuellen Positions- und Lageparametern des Fluggeräts in einen Messpunkt umgerechnet. Ein Messpunkt ist durch seine drei Ortskoordinaten in einem geodätischen Koordinatensystem festgelegt. Aus jedem Entfernungsbild entsteht auf diese Weise eine so genannte erdfeste Messpunkt wolke, aus der vorhandene Leitungen extrahiert werden können.

[0026] Für die Datenverarbeitung ist ein Prozessor mittlerer Leistung zuständig. Auf diesem wird eine Transformation der Entfernungsmesswerte in Messpunkte durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Daten dienen als Input für eine Auswerteeinheit. Die Auswerteeinheit stellt fest, ob sich die einzelnen Leitungen in gefährlicher Nähe zur aktuellen Position des Fluggeräts oder zur vorgesehenen Flugbahn befinden. Das Ergebnis dieser Auswertung wird dem Piloten optisch und/oder akustisch mitgeteilt.

[0027] Ausgangspunkt für die in der Erfindung verwendete PPT ist eine reduzierte Menge von dreidimensionalen Messpunkten. Die reduzierte Menge begründet sich dadurch, dass lediglich solche Messwerte einer PPT unterzogen werden, welche nicht durch Clutter- oder Störungsfilter eliminiert wurden.

[0028] In einem ersten Verfahrensschritt der Erfindung wird nur die horizontale (x,y)-Komponente der Messwerte ausgewertet, um die Geradenverläufe in dieser Punktmenge zu identifizieren. Horizontale Geraden sind potentielle Verlaufsrichtungen von Leitungen. In einem zweiten Verfahrensschritt der Erfindung werden alle vertikalen Ebenen, die zu den hier gefundenen Geraden gehören, auf Katenoidenstücke oder Parabelstücke untersucht [Katenoide: $\cosh(x)$]. Das heißt, es werden alle Messpunkte, die in oder nahe bei einer solchen Ebene liegen, in diese Ebene projiziert, und der resultierende Satz von zweidimensionalen Messpunkten wird mittels Anwendung einer quadratischen Formtransformation (QFT) auf Katenoiden bzw. Parabeln untersucht.

Polynomiale Phasentransformation (Polynomial Phase Transform - PPT)

[0029] Die Erfindung basiert auf der so genannten Polynomial Phase Transform. Darin wird das Problem der Geradenerkennung in ein Problem der Frequenzbestimmung eines sinusförmigen Signals überführt bzw. der spektralen Analyse eines Frequenzgemisches im Falle mehrerer Geraden. Hierfür stehen bekannte Signalverarbeitungsverfahren zur Verfügung (Fourier Transformation, Matrix Pencil, FFT, Wavelets, Esprit, Pisarenco, MUSIC etc.) wobei sich der Matrix Pencil als besonders effizient erwiesen hat und im Weiteren im Detail erläutert wird.

[0030] Im Folgenden wird zunächst kurz die polynomiale Phasentransformation erläutert:

Die horizontale Projektion der potentiellen Leitungspixel wird auf eine $N \times M$ -Matrix abgebildet. Die Elemente dieser Matrix haben den Wert 1 wenn sie ein potentielles Leitungspixel repräsentieren, ansonsten den Wert 0. Die Matrix entspricht also einem diskretisierten Binärbild mit Draufsicht von oben.

[0031] Sei R eine $N \times M$ -Matrix mit:

$$R = \begin{pmatrix} q_1(1) \dots q_M(1) \\ \vdots \\ q_1(N) \dots q_M(N) \end{pmatrix} \quad (1)$$

worin die $q_j(k) \in \{0, 1\}$, dann hat die polynomiale Phasentransformation die Form:

$$z(k) = \sum_{j=1}^M e^{i \cdot P(q_j(k))} \quad (2)$$

[0032] Sei $P(x)$ ein Polynom von x . Im Folgenden werden nur Polynome vom Grad 1 benutzt. Speziell für die Detektion von Geraden wird folgendes Polynom benutzt:

$$P(x) = \mu_1 \cdot x \quad \text{mit} \quad x = y \cdot \tan(\varphi) + x_0 \quad (3)$$

μ_1 ist ein konstanter, geeignet zu wählender Parameter, typischerweise im Bereich 0,01 bis 1. Mit diesem Parameter wird die Samplingfrequenz beeinflusst.

[0033] Im Falle von d Geraden mit Winkeln φ_j und Achsenabschnitten x_j mit $1 \leq j \leq d$ und einer Linienbreite, so dass jede Gerade nur einen Eintrag pro Zeile erzeugt, gilt für den k -ten Eintrag von z :

$$z(k) = \sum_{j=1}^d e^{i \cdot P(k \cdot \tan \varphi_j + x_j)} = \sum_{j=1}^d e^{i \cdot \mu_1 (k \cdot \tan \varphi_j + x_j)} \quad (4)$$

[0034] Dieses ist ein sinusförmiges Signal, welches man in der Form (5) schreiben kann:

$$z(k) = \sum e^{i\mu_1 x_j} \cdot e^{i\mu_1 \cdot k \cdot \tan \varphi_j} = \sum b_j \cdot e^{i f_j \cdot k} \quad (5)$$

[0035] Die Frequenzen f_j enthalten nun die gesuchten Informationen, nämlich die Winkel φ_j :

$$f_j = \mu_1 \cdot \tan \varphi_j \quad \Leftrightarrow \quad \varphi_j = \arctan \left(\frac{f_j}{\mu_1} \right) \quad (6)$$

Matrix Pencil Methode

[0036] Im nächsten Schritt werden die Frequenzen φ_j bestimmt. Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten. Dazu zählen die Fourier-Transformation (FT), die Maximum-Likelihood Methode (MLM), die Methode der kleinsten Quadrate (LSM) und die Matrix Pencil Methode (MPM). Im Folgenden wird die Matrix Pencil Methode angewendet. Selbstverständlich lassen sich auch die anderen Methoden zur Frequenzbestimmung heranziehen.

[0037] Zunächst werden die Eingangsdaten in folgender Art und Weise zusammengefasst:

$$\begin{aligned} \bar{x}(k) &= [x(k), \dots, x(N-L+k-1)]^T \\ X_0 &= [\bar{x}(L-1), \dots, \bar{x}(0)] \\ X_1 &= [\bar{x}(L), \dots, \bar{x}(1)] \end{aligned} \quad (7)$$

[0038] Worin "T" transponiert bedeutet und L ein gewählter Parameter ist, der sogenannte Pencilparameter, mit $d \leq L \leq N-d$. Die $x(k)$ sind die gemessenen Daten in der Form:

$$x(k) = \sum_{j=1}^d b_j \cdot z_j^k \quad \text{mit} \quad z_j = e^{i f_j} \quad (8)$$

[0039] Drei Aussagen sind wichtig, um die MPM nachzuvollziehen: Erstens:

$$\begin{aligned} X_0 &= Z_L B Z_R \\ X_1 &= Z_L B Z Z_R \end{aligned} \quad (9)$$

mit

$$Z_L = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ z_1 & \dots & z_M \\ \vdots & & \\ z_1^{N-L-1} & \dots & z_M^{N-L-1} \end{bmatrix} \quad Z_R = \begin{bmatrix} z_1^{L-1} & z_1^{L-2} & \dots & 1 \\ & & & 1 \\ & & & 1 \\ & & & 1 \\ z_M^{L-1} & z_M^{L-2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_M\} \quad Z = \text{diag}\{z_1, z_2, \dots, z_M\} \quad (10)$$

[0040] Zweitens:

Jedes der $\{z_r; r=1, \dots, M\}$ ist eine Rang reduzierende Zahl des Matrix Pencils $X_1 - zX_0$, wenn $M \leq L \leq N - M$ ist.
Keine der $\{z_r; r=1, \dots, M\}$ ist eine Rang reduzierende Zahl des Matrix Pencils, wenn $L < M$ oder $L > N - M$ ist.

[0041] Drittens:

Wenn $M \leq L \leq N - M$ ist, ergeben sich die Lösungen des Singulär- Eigenwertproblems:

$$\begin{aligned} (X_1 - zX_0)\vec{q} &= 0 \\ \vec{p}'(X_1 - zX_0) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

zu:

$$\begin{aligned} z &= z_r \\ \vec{q} &= \vec{q}_r = \left(r\text{-te Spalte von } Z_R^+ = Z_R' (Z_R Z_R')^{-1} \right) \\ \vec{p}' &= \vec{p}'_r = \left(r\text{-te Zeile von } Z_L^+ = (Z_L' Z_L)^{-1} Z_L' \right) \end{aligned} \quad (12)$$

X_0 und X_1 sind nicht quadratisch, deswegen ist es eine Singulärwertzerlegung und kein einfaches Eigenwertproblem.
 $\vec{q}_r$ und $\vec{p}_r$ werden die Rechts- bzw. Linkssingulärvektoren zum Singulärwert z_r genannt.
"+" steht für die Moore-Penrose Inverse oder Pseudoinverse. "t" bedeutet konjugiert und transponiert, "-1" ist die Inverse.

[0042] Basierend auf (10) bekommt man die folgenden Ergebnisse zur Berechnung der $\{z_r; r=1, \dots, M\}$ von X_0 und X_1 :

Multipliziert man die erste Gleichung von (11) von links mit X_0^+ , erhält man:

$$X_0^+ X_1 \vec{q}_r = z_r X_0^+ X_0 \vec{q}_r = z_r \vec{q}_r \quad (13)$$

[0043] Das impliziert, dass $\{z_r; r=1, \dots, M\}$ die M Singulärwerte von $X_0^+ X_1$ sind. Da $X_0^+ X_1$ den Rang $M \leq L$ hat, existieren auch noch $L - M$ Singulärwerte mit dem Wert 0 für das Matrixprodukt.

[0044] Für $X_1 X_0^+$ ergibt sich auf äquivalente Weise, dass $X_1 X_0^+$ M Singulärwerte vergleichbar mit den z_r 's hat und $N - L - M$ Eigenwerte gleich 0, und $X_1 X_0^+$

(oder $X_0^+ X_1$) hat M Singulärwerte vergleichbar mit z_r^{-1} 's und $L - M$ (oder $N - L - M$) Singulärwerte gleich 0.

[0045] Für verrauschte Daten $y(k)=x(k)+n(k)$ worin $n(k)$ das Rauschen ist, sind $\vec{y}(k)$, Y_0 und Y_1 genauso definiert, wie $\vec{x}(k)$, X_0 und X_1 .

[0046] Die Pseudoinversen X_0^+ oder X_1^+ werden ersetzt durch die auf Rang M verkürzte Pseudoinverse Y_0^+ bzw. Y_1^+ . Y_0^+ ist definiert als:

$$Y_0^+ = \sum_{r=1}^M \frac{1}{\sigma_{0r}} \vec{v}_{0r} \vec{u}_{0r}^t = V_0 A^{-1} U_0^t \quad (14)$$

wobei $\{\sigma_{0r}; r=1, \dots, M\}$ die M größten Singulärwerte von Y_0 sind; $\vec{v}_{0r}$ und u_{0r} sind die zugehörigen Singulärvektoren;

$$V_0 = [\vec{v}_{01}, \dots, \vec{v}_{0M}] \quad U_0 = [\vec{u}_{01}, \dots, \vec{u}_{0M}] \quad A = \text{diag}\{\sigma_{01}, \dots, \sigma_{0M}\} \quad (15)$$

Y_1^+ ist ähnlich definiert.

[0047] Was die Rauschkomponenten in Y_0 betrifft, ist die Stetigkeit jedes Elements der verkürzten Pseudoinversen Y_0^+ auch an dem Punkt erhalten, wo das Rauschen gleich 0 ist, und somit auch die Stetigkeit der z_r 's. Im Gegensatz zu der Tatsache dass die komplette Pseudoinverse von Y_0 unstetig ist an dem Punkt wo das Rauschen null ist, und somit würde es verschiedene Probleme verursachen, die komplette Pseudoinverse zu berechnen bei einem niedrigen Rauschpegel. Y_0^+ ist identisch mit X_0^+ dann und nur dann wenn das Rauschen null ist. Da $Y_0^+ Y_1$ $L-M$ Singulärwerte gleich null hat, die keine Informationen über die z_r 's beinhalten, kann man die Größe der Matrix reduzieren, bevor man die Singulärwerte berechnet. Ersetzt man X_0 und X_1 in (13) durch Y_0 und Y_1 und substituiert (14) in (13) für Y_0^+ , erhält man:

$$V_0 A^{-1} U_0^t Y_1 \vec{q}_r = z_r \vec{q}_r \quad (16)$$

da $V_0^t V_0 = I_M$ und $\vec{q}_r = V_0^t V_0 \vec{q}_r$ ergibt Multiplizieren der Gleichung (17) von links mit V_0^t :

$$A^{-1} U_0^t Y_1 V_0 (V_0^t \vec{q}_r) = z_r (V_0^t \vec{q}_r) \quad (17)$$

[0048] Nun kann man erkennen, dass die Schätzung der z_r 's gefunden werden können durch Berechnung der Eigenwerte der $M \times M$ nicht-symmetrischen Matrix:

$$Z_E = A^{-1} U_0' Y_1 V_0 \quad (18)$$

[0049] Somit sind die Singulärwerte z_r die M Eigenwerte von Z_E , welche dieselben sind wie die M von null verschiedenen Singulärwerte von $Y_0^+ Y_1$.

[0050] Somit sind die gesuchten Frequenzen:

$$f_j = \text{Im}\{\log(z_r)\} \quad (19)$$

Quadratic Form Transform (QFT)

[0051] Um herauszufinden, ob die gefundene Gerade auch eine Hochspannungsleitung ist, werden die Pixel der Gerade in die Frontansicht transformiert. Das heißt, man betrachtet die Pixel der Gerade nicht mehr aus der Vogelperspektive. Man benutzt stattdessen das erste gefundene Pixel der Gerade als Nullpunkt eines neuen Koordinatensystems, welches die gefundene Gerade als eine der neuen Achsen benutzt, und die z-Achse als die zweite neue Achse. Somit erhält man ein Diagramm, in dem die gefundene Gerade Katenoidenform haben sollte, wenn sie einer Hochspannungsleitung entspricht. Die Transformation PPT basiert auf einem Polynom vom Grad 1. Also ist es damit nicht möglich, die Parameter eines cosh zu bestimmen, denn das grundlegende Problem dabei ist, das man eine Gleichung der Form:

$$f \cdot k = A \cdot \text{ar cosh}\left(\frac{k - C}{A}\right) + B \quad (20)$$

zu lösen hätte, legt man die allgemeine Form des cosh zu Grunde:

$$F(x) = A \cdot \cosh\left(\frac{x - B}{A}\right) + C \quad (21)$$

[0052] Deshalb benutzt man zunächst die ersten beiden Terme der Taylorentwicklung des cosh:

$$f(x) = \cosh(x) = \sum_n \left(\frac{df}{dx}\right)^n \cdot (x - x_0)^n = 1 + \frac{1}{2} \cdot x^2 + \dots \quad (22)$$

[0053] Wenn die gefundene Gerade einer Hochspannungsleitung entspricht, sollte sie also in einer annähernden Parabelform zu sehen sein. Nun kann man mit Hilfe einer weiteren Transformation, der sogenannten Quadratic Form Transform, diese Parabelform überprüfen. In der Frontansicht wird also ein Test auf Parabelform gemacht, allerdings nicht mit der PPT, sondern mit der QFT. Anschließend wird das Signal wieder an die Matrix Pencil Methode (MPM) weitergegeben.

[0054] Diese Transformation wird benutzt um die Parameter einer Parabel zu bestimmen. Im Weiteren wird die Funktion der Transformation kurz erläutert:

Ausgangspunkt ist die allgemeine Form einer Parabel:

$$y = a \cdot (x - x_0)^2 + y_0 \quad (23)$$

[0055] Dann hat das für die Transformation benutzte Signal ähnlich zu der PPT die Form:

$$z(k) = e^{i\mu_1 [a \cdot (k - x_0)^2 + y_0]} \quad (24)$$

[0056] Die Transformation an sich ist dann:

$$\begin{aligned} z(k + \tau) &= e^{i\mu_1 [a \cdot (k + \tau - x_0)^2 + y_0]} \\ z^*(k - \tau) &= e^{-i\mu_1 [a \cdot (k - \tau - x_0)^2 + y_0]} \end{aligned} \quad (25)$$

[0057] Und schließlich führt folgende Rechnung dann zum Resultat:

$$\begin{aligned} Z(k) &= z(k + \tau) z^*(k - \tau) \\ &= e^{ia\mu_1 [2k\tau - 2x_0k - 2x_0\tau - (-2k\tau + 2x_0\tau - 2kx_0)]} \\ &= e^{ia\mu_1 [4k\tau - 4x_0\tau]} \\ &= A_0 e^{i\mu_1 4a\tau \cdot k} \end{aligned} \quad (26)$$

[0058] Dieses Ergebnis hängt nur linear von der Variable k ab, so dass es nun in der Matrix Penxci Method benutzt werden kann um den Parameter a zu bestimmen:

$$\begin{aligned} Z(k) &= A_0 e^{i\mu_1 4a\tau k} = A_0 e^{ifk} \\ \Rightarrow \quad 4a\mu_1 \tau &= f \\ \Leftrightarrow \quad a &= \frac{1}{4\tau\mu_1} \cdot f \end{aligned} \quad (27)$$

[0059] Dabei gilt es zu beachten, $\tau \neq 0$, zweckmäßig wird τ auf 1 gesetzt.

[0060] Wäre der Wert gleich null, würde man mit (26) den Betrag der komplexen Zahl z mit 1 festlegen. Damit wäre keine Weiterverarbeitung möglich.

Patentansprüche

1. Verfahren zur verbesserten Erkennung von leitungsartigen Objekten in einer vor einem Fluggerät befindlichen Umgebung, wobei aus den Entfernungswerten eines mittels eines Entfernungssensors erzeugten Entfernungsbildes dieser Umgebung unter Berücksichtigung der Position und Lage des Fluggeräts eine Menge von dreidimensionalen Messpunkten in einem geodätischen Koordinatensystem erzeugt wird, aus welcher unter Verwendung bekannter Filtermethoden potentielle Leitungsmesspunkte extrahiert werden,
dadurch gekennzeichnet, dass
in einem ersten Schritt die potentiellen Leitungsmesspunkte in eine horizontale Ebene projiziert werden und mittels einer polynomialen Phasentransformation und einer nachfolgenden spektralen Analyse Geradenverläufe identifiziert werden und dass
in einem zweiten Schritt die potentiellen Leitungsmesspunkte auf und in einem vorgebbaren Abstand zu einer im ersten Schritt gefundenen Geraden in eine vertikale Ebene zu der horizontalen Ebene und der jeweiligen Geraden aus dem ersten Schritt projiziert werden und mittels einer quadratischen Formtransformation Katenoiden- oder Parabelverläufe identifiziert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Erzielung einer niedrigen Falschalarmrate gefundene Katenoiden- oder Parabelverläufe mit zeitlich vorangegangenen Identifizierungen verglichen werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein aus mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden Entfernungsbilder akkumuliertes Entfernungsbild analysiert wird.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei mehreren in einem Entfernungsbild gefundenen Leitungen unplausible Leitungsverläufe eliminiert werden.

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 19605218 C1 [0003]
- DE 102005047273 B4 [0003] [0008]
- DE 10055572 C1 [0004]
- DE 19828318 C2 [0008]