

19



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

11 CH 692 873 A5

51 Int. Cl.⁷: G 03 B 043/00
H 04 N 017/00
G 01 C 025/00
G 01 D 018/00

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

12 PATENTSCHRIFT A5

21 Gesuchsnummer: 00828/98

22 Anmeldungsdatum: 07.04.1998

30 Priorität: 27.06.1997 DE 197 27 281.9

24 Patent erteilt: 29.11.2002

45 Patentschrift veröffentlicht: 29.11.2002

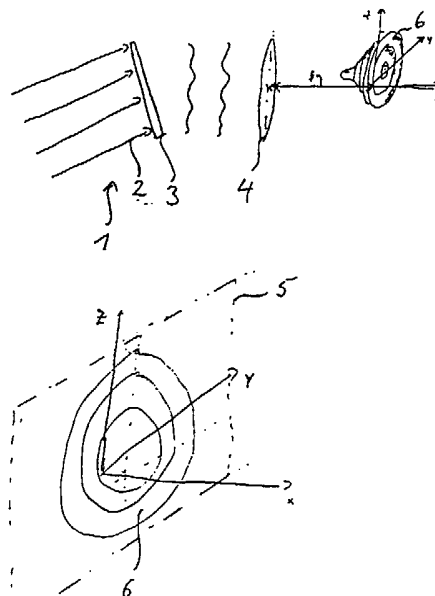
73 Inhaber:
Deutsche Forschungsanstalt für Luft-
und Raumfahrt e.V.,
Linder Höhe 6, 51147 Köln (DE)

72 Erfinder:
Martin Scheele, Schwalbenstrasse 10,
14656 Brieselang (DE)
Thomas Terzibaschian, Lindenallee 51,
13088 Berlin (DE)

74 Vertreter:
Patentanwaltsbüro Jean Hunziker,
Siewertstrasse 95, 8050 Zürich (CH)

54 Vorrichtung und Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von CCD-Kameras.

57 Die Vorrichtung zur geometrischen Kalibrierung von CCD-Kameras umfasst eine kohärente Lichtquelle (2) und ein synthetisches Hologramm (3). Dabei sind die Lichtquelle (2) und das Hologramm (3) derart zueinander angeordnet, dass bei Beleuchtung des Hologramms (3) durch die Lichtquelle (2) eine dreidimensionale Teststruktur $f_{pr}(x,y,z)$ um die Fokalebene (5) der CCD-Kamera erzeugt wird. Durch die Auswertung der einzelnen Bildinformationen der Sensorpixel der CCD-Kamera aus Schnittebenen (6) durch die Teststruktur $f_{pr}(x,y,z)$ kann vorteilhaft eine schnelle Kalibrierung der CCD-Kamera erreicht werden.



Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von CCD-Kameras.

Bei CCD-Kameras befindet sich in der Brennebene hinter dem optischen System entweder eine CCD-Matrix oder eine oder mehrere CCD-Zeilen. Unter geometrischer Kalibration versteht man die Bestimmung der Blickrichtung jedes einzelnen Sensorpixels in den Objektraum. Wird eine ideal verzeichnungsfreie Optik benutzt und ist der geometrische Ort jedes Sensorpixels in der Fokalebene bekannt, so kann die jeweilige Blickrichtung einfach berechnet werden. Bei realen Optiken sind jedoch Verzeichnungen unvermeidlich. Ausserdem weisen die Sensorpixel gewisse Toleranzen bezüglich ihrer Lage in der Fokalebene auf. Der Grund hierfür ist zum einen die nicht exakt durchführbare Justierung in der Fokalebene, zum anderen Abweichungen auf Grund der Montagetechnik der CCD-Matrix bzw. CCD-Zeilen, sodass diese nicht vollkommen plan sind, sondern Wölbungen und/oder Durchbiegungen aufweisen. Ein weiteres Erfordernis für ein Verfahren zur geometrischen Kalibrierung ist die Bestimmung der Abbildungsschärfe für das Gesamtsystem.

Bei klassischen fotometrischen Filmkameras werden Rahmenmarken auf den Film projiziert, die nachträglich eine Korrektur von Abbildungsfehlern ermöglichen. Dieses Verfahren ist prinzipiell für CCD-Kameras mit Matrizen anwendbar, jedoch nicht für CCD-Zeilen. Zur Kalibrierung von CCD-Zeilen müssten zusätzlich CCD-Matrizen in der Fokalebene angeordnet werden und diese in Relation zu den CCD-Zeilen kalibriert werden.

Für CCD-Kameras ist daher ein Verfahren entwickelt worden, bei dem die CCD-Kamera auf einem zweiachsigen Drehtisch angeordnet ist (T. Ohlhof and W. Kornus: Geometric calibration of digital three line CCD cameras, Proceedings of the Symposium (ISPRS): Primary Data Acquisition and Evaluation, September 12-16, 1994 Como S. 71). Dabei wird die CCD-Kamera aus dem Objektraum mit einem feinen parallelen Lichtstrahl beleuchtet, der in Nullstellung des Drehtisches genau entlang der optischen Achse verläuft. Durch Drehung um zwei Winkel kann die Kamera immer in eine Position gedreht werden, sodass jedes einzelne Pixel beleuchtet wird. Die beiden Winkel können dann zur Bestimmung der Blickrichtung verwendet werden. Nachteilig an dem Verfahren ist, dass auf Grund der isolierten Einzelvermessung jedes Pixels das Verfahren sehr zeitaufwändig ist. Ausserdem handelt es sich um ein indirektes Verfahren, bei dem die Blickwinkel aus den Messwerten errechnet werden müssen. Zur Bestimmung der Abbildungsgüte des Gesamtsystems wird die Punktverschmierungsfunktion PSF gemessen, indem der pixelfreie Lichtstrahl in Schrittwerten unterhalb einer Pixeldimension über ein Pixel wandert, was ebenfalls sehr zeitaufwändig ist.

Eine solche pixelorientierte Kalibrierung einer CCD-Matrix-Kamera ist darüber hinaus aus der US 5 444 481 bekannt, wo auf der CCD-Matrix vorher-

bestimmte Bildelemente aufgebracht werden, mittels derer die optische Achse bzw. die jeweilige Blickrichtung bestimmbar sind.

Aus der DE 19 536 297 ist ein Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von optischen 3-D-Sensoren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten relativ zu einem Referenzkoordinatensystem bekannt, wobei unter Verwendung wenigstens einer Kamera, einer Einrichtung zur Digitalisierung und Speicherung von Bildfolgen der Kamera, einem zur Kamera fixierten Beleuchtungsprojektor, der zeitlich nacheinander Lichtstrukturen aus wenigstens eindimensionalen Streifen innerhalb eines Arbeitsvolumens erzeugt, einer Beleuchtungseinrichtung zur Beleuchtung von reflektierenden Signalmarken einer Kalibriereinrichtung und eines Rechners zur Steuerung und Verarbeitung der Bilder. Die Kalibriereinrichtung wird innerhalb und am Rande des Arbeitsvolumens in verschiedene Positionen relativ zu Kamera und Beleuchtungsprojektor gebracht und jeweils so beleuchtet, dass die Bereiche der Signalmarken der Kalibriereinrichtung in den digitalisierten und gespeicherten Bildern eine möglichst hohe Grauwert- oder Farbmodulation ohne Übersteuerung aufweisen. Die Kalibrierung der Kamera erfolgt durch ein fotogrammetrisches Standardverfahren zum Auffinden der inneren und äusseren Orientierung. Der Projektor weist einen Lichtmodulator auf, der nach aussen sichtbare Muster aus beliebigen Streifen oder Pixeln als Bildelemente auf die Kalibriereinrichtung projiziert. Zur Kalibrierung des Projektors wird dieser als inverse Kamera betrachtet, indem den äusseren Bildelementen ein reales oder fiktives x-y-Projektionsmuster definierter Breite aber unbestimmter Länge im Innern des Projektors zugeordnet wird, und zur Bestimmung der Parameter der inneren und äusseren Orientierung des Beleuchtungsprojektors mehrere Beobachtungen herangezogen werden, in denen jeweils geometrische Zusammenhänge zwischen den x-y-Projektionsmustern und den korrespondierenden aussen sichtbaren Mustern hergestellt werden. Die gefundenen und gespeicherten Kalibrierparameter werden beim Einsatz des 3D-Sensorssystems zur Vermessung von Objekten von einem Algorithmus wieder verwendet, der einerseits die Strahlgeometrien innerhalb der Kamera und des Projektors korrigiert, zum anderen basierend auf dem Prinzip der Triangulation die x,y,z-Koordinaten des Objektes im Objektraum berechnet. Nachteilig an dem Verfahren ist, dass die Brennweite des Objektivs der Kamera und der Projektor aufeinander abgestimmt werden müssen. Des Weiteren muss auch die Abbildung vom Projektor kalibriert werden, sodass das Verfahren insgesamt immer noch zeitaufwändig ist.

Der Erfindung liegt daher das technische Problem zu Grunde, eine Vorrichtung zur geometrischen Kalibrierung einer CCD-Kamera und ein Verfahren zum Betrieb der Vorrichtung zu schaffen, mit dem die Kalibrierung schneller durchführbar ist.

Die Lösung des technischen Problems ergibt sich durch die Merkmale der Patentansprüche 1 und 4. Durch die Erzeugung einer wohldefinierten dreidimensionalen Teststruktur, aus deren Funktionswerten eindeutig auf die jeweilige Schnittebene zurück-

geschlossen werden kann, ist die jeweilige geometrische Ausrichtung jedes einzelnen Pixels und die Punktverschmierungsfunktion PSF der Pixel durch eine einzige Aufnahme gleichzeitig bestimmbar. Anhand der PSF kann eine Scharfeinstellung vorgenommen werden, nämlich die Bestimmung des Abstandes der Fokalebene von einer Hauptebene des optischen Systems. Dies alles führt zu einer beträchtlichen Einsparung an Messzeit. Des Weiteren lässt sich die Kalibrierung leicht automatisieren und auch ausserhalb eines Labors durchführen. Dies ist insbesondere vorteilhaft, wenn das Objektiv und/oder die Fokalebene der kalibrierten CCD-Kamera ausgetauscht werden muss, was eine Dekalibrierung zur Folge hat. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Patentansprüchen.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels näher erläutert. Die Figuren zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung der Vorrichtung zur geometrischen Kalibrierung einer CCD-Kamera und

Fig. 2 eine Darstellung der Schnittebenen einer realen Fokalebene.

Die Vorrichtung 1 zur geometrischen Kalibrierung einer CCD-Kamera umfasst eine kohärente Lichtquelle zur Erzeugung parallelen Weisslichtes 2 und ein synthetisches Hologramm 3, das vorzugsweise als Weisslichthologramm ausgebildet ist. Das synthetische Hologramm 3 wurde zuvor errechnet, um eine wohldefinierte dreidimensionale Teststruktur $f_{th}(x,y,z)$ unter Berücksichtigung einer verzeichnungsfreien Kameraoptik 4 der zu kalibrierenden CCD-Kamera zu schaffen und anschliessend mittels der bekannten Herstellungsverfahren für Hologramme gefertigt. Die kohärente Lichtquelle, die beispielsweise als Laser ausgebildet ist, und das synthetische Hologramm 3 sind derart zueinander angeordnet, dass das synthetische Hologramm 3 eine reale dreidimensionale Teststruktur $f_{pr}(x,y,z)$ um die Fokalebene der CCD-Kamera herum erzeugt. Der Abstand der Fokalebene der CCD-Kamera zur Kameraoptik 4 ist idealerweise die Brennweite f der Kameraoptik 4. Des Weiteren ist die Fokalebene im Idealfall derart angeordnet, dass deren X-Koordinate konstant ist. Auf der Fokalebene sind die CCD-Zeilen oder -Matrizen der CCD-Kamera angeordnet. Ist nun die Fokalebene richtig zur Kameraoptik justiert und die auf der Fokalebene angeordneten CCD-Elemente plan zur Fokalebene, so erfassen die einzelnen CCD-Pixel jeweils einen Funktionswert $f(x=const.,y,z)$ der dreidimensionalen Teststruktur. Sind hingegen die auf der Fokalebene angeordneten CCD-Elemente gewölbt und/oder gebogen, so erfassen benachbarte CCD-Pixel Funktionswerte $f_{pr}(x,y,z)$ mit unterschiedlichen x -Werten. Anhand der erfassten Funktionswerte $f_{pr}(x,y,z)$ kann dann auf die reale Position eines jeden einzelnen CCD-Pixels zurückgeschlossen werden. Eine mögliche Funktion $f(x,y,z)$ für die dreidimensionale Teststruktur ist beispielsweise

$$f(x,y,z) = f(\bar{r}) - \frac{\sin(\bar{k}\bar{r})}{\bar{k}\bar{r}}$$

In der Fig. 2 ist gestrichelt die reale Fokalebeneposition 5 dargestellt sowie die jeweils zugehörigen zweidimensionalen Schnittebenen 6 der dreidimensionalen Teststruktur.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur geometrischen Kalibrierung von CCD-Kameras, umfassend eine kohärente Lichtquelle und ein synthetisches Hologramm (3) zur Erzeugung einer wohldefinierten Teststruktur $f_{th}(x,y,z)$, wobei die kohärente Lichtquelle und das Hologramm (3) derart zueinander angeordnet sind, dass bei Beleuchtung des Hologramms (3) durch die kohärente Lichtquelle das Hologramm (3) eine dreidimensionale Teststruktur $f_{pr}(x,y,z)$ um die Fokalebene (5) der CCD-Kamera herum erzeugt.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die kohärente Lichtquelle als Laser oder parallele Weisslichtquelle ausgebildet ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das synthetische Hologramm (3) als Weisslichthologramm ausgebildet ist.

4. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach Anspruch 1 zur geometrischen Kalibrierung von CCD-Kameras mittels einer kohärenten Lichtquelle und eines synthetischen Hologramms (3), umfassend folgende Verfahrensschritte:

a) Berechnung eines synthetischen Hologramms (3) einer wohldefinierten Teststruktur $f_{th}(x,y,z)$ unter Berücksichtigung einer verzeichnungsfreien Kameraoptik (4) der zu kalibrierenden CCD-Kamera, b) Beleuchtung dieses Hologramms (3) mittels der kohärenten Lichtquelle, sodass eine reale dreidimensionale Teststruktur $f_{pr}(x,y,z)$ um die Fokalebene (5) der CCD-Kamera herum erzeugt wird und c) parallele Auswertung aller Sensorpixel durch Ermittlung der jeweiligen Schnittebene (6) durch die Teststruktur $f_{pr}(x,y,z)$ aus den einzelnen Bildinformationen jedes einzelnen Sensorpixels.

