



(19)  
**Bundesrepublik Deutschland**  
**Deutsches Patent- und Markenamt**

(10) **DE 102 51 217 B3 2004.06.24**

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **102 51 217.5**  
 (22) Anmeldetag: **31.10.2002**  
 (43) Offenlegungstag: –  
 (45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **24.06.2004**

(51) Int Cl.7: **H04N 5/74**  
**G03B 21/00, H04N 17/00, H04N 9/12**

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

(71) Patentinhaber:  
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
 angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

(74) Vertreter:  
**Patentanwälte von Kreisler, Selting, Werner et col.,  
 50667 Köln**

(72) Erfinder:  
**Klose, Stefan, 15732 Waltersdorf, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:  
**DE 100 52 263 A1**  
**WO 00/18 139 A1**  
**WO 00/07 376 A1**  
**K. Isakovic, T. Dudziak, K. Köchy, X-Rooms, A PC-**

**based immersive visualization environment, In:  
 Web 3D Conference, Tempe, Arizona, 2002;**  
**S.S. Beauchemin, R. Bajcsy, G. Givaty, Modelling  
 and Removing Radial and Tangential Distortions  
 in  
 Spherical Lences, 1999, RASP Laboratory, Univer-  
 sity of Pennsylvania;**  
**Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera  
 Calibration, In: IEEE Transactions on Pattern  
 Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.11,  
 Nov.2000, P.1330-1334;**  
**Z. Zhang, Flexible Camera Calibration By Viewing  
 a Plane From Unknown Orientations, International  
 Conference on Computer Vision (ICCV'99), Corfu,  
 Greece, pages 666-673, September 1999;**

(54) Bezeichnung: **Autokalibrierung von Multiprojektorsystemen**

(57) Zusammenfassung: Das System zur automatischen  
 Kalibrierung eines Multiprojektorsystems weist mindestens  
 zwei Projektoren, eine Digital-Kamera und eine Ansteue-  
 rungseinheit zur Ansteuerung der Projektoren und der Ka-  
 mera auf. Die Autokalibrierung wird gemäß folgender  
 Schritte durchgeführt:  
 - Erzeugung, Aufnahme und Bildfilterung von Streifenmus-  
 tern,  
 - Finden der größtmöglichen Projektionsfläche und  
 - Berechnung der Warp-Felder und Imagewarping.



**Beschreibung**

## Ausführungsbeispiel

## Einleitung

[0001] Die Endung betrifft ein Verfahren zur automatischen Kalibrierung eines Multiprojektorsystems, das erlaubt, eine beliebige Anzahl von Bildern, die von verschiedenen Projektoren erzeugt werden, pixelgenau übereinander zu legen, um die Gesamtlichtstärke zu erhöhen bzw. eine Stereodarstellung zu ermöglichen.

## Stand der Technik

## Problembeschreibung

[0002] Multiprojektorsysteme zur Darstellung von Informationen auf großen Projektionsflächen sind bekannt. Ein Beispiel hierfür ist in WO-A-00/18139 beschrieben. Die Projektionsbilder der Projektoren sind nebeneinander angeordnet.

[0003] Um die Gesamthelligkeit eines Bildes zu erhöhen bzw. um ein Passiv-Stereo-Bild zu erzeugen, ist es notwendig, dass mehrere Projektoren denselben Bereich der Projektionsfläche beleuchten. Bei dieser Bilddarstellung besteht das Problem, dass die Einzelbilder der Projektionseinheiten in der Regel nicht übereinander liegen. Diese Kalibrierung wird momentan manuell getätigt und ist mit hohem Aufwand verbunden und zu ungenau.

## Aufgabenstellung

[0004] Aufgabe der Erfindung ist es, eine pixelgenaue Auto-Kalibrierung zu implementieren, die die umständliche manuelle Feinjustage überflüssig macht. Diese Kalibrierung entzerrt zusätzlich noch durch die Geometrie der Projektionsfläche bzw. durch den Projektor (Keystone) hervorgerufene Bildverzerrungen bezüglich einer Kamera.

[0005] Zur Lösung der vorstehend genannten Aufgabe wird mit der Erfindung ein Multiprojektor-Autokalibrierungssystem vorgeschlagen, das versehen ist mit

- mindestens zwei Projektoren,
- eine Digital-Kamera und
- einer Ansteuerungseinheit zur Ansteuerung der Projektoren und der Kamera.

[0006] Die Autokalibrierung wird gemäß folgender Schritte durchgeführt:

- Erzeugung, Aufnahme und Bildfilterung von Streifenmustern,
- Finden der größtmöglichen gemeinsamen Projektionsfläche und
- Berechnung der Warp-Felder und Imagewarping.

[0007] Im folgenden sollen die Teilschritte der Autokalibrierung anhand der Abbildungen kurz erläutert werden.

[0008] Im einzelnen zeigen:

[0009] **Abb. 1** Versuchsaufbau mit zwei Projektoren,

[0010] **Abb. 2** Hintergrundbild (Projektion zweier schwarzer Flächen)

[0011] **Abb. 3** horizontale Streifenprojektion des linken Projektors,

[0012] **Abb. 4** horizontale Streifenprojektion des rechten Projektors,

[0013] **Abb. 5** vertikale Streifenprojektion des linken Projektors,

[0014] **Abb. 6** vertikale Streifenprojektion des rechten Projektors,

[0015] **Abb. 7** erkanntes Gitternetz und größte, gemeinsame Projektionsfläche,

[0016] **Abb. 8** gewarpptes Bild des linken Projektors,

[0017] **Abb. 9** gewarpptes Bild des rechten Projektors,

[0018] **Abb. 10** entzerrtes Bild des linken Projektors (rechter Projektor ist abgedeckt)

[0019] **Abb. 11** entzerrtes Bild beider Projektoren übereinander und

[0020] **Abb. 12** Vergleich der Leuchtstärke.

Erzeugung, Aufnahme und Bildfilterung der Streifenmuster

[0021] Um eine erfolgreiche Geometrieentzerrung mittels Imagewarping durchführen zu können, muss zuerst die zugrunde liegende Geometrie erfasst werden. Dies geschieht durch die Aufnahme von projizierten vertikalen und horizontalen Streifenmustern. Diese Streifen haben einen konstanten Abstand, der je nach Komplexität der zu entzerrenden Geometrie zu wählen ist. Bei dem hier beschriebenen Ausführungsbeispiel wurde ein Streifenabstand von zwanzig Pixeln gewählt, da die Wand viele Unregelmäßigkeiten aufwies. Andere Streifenabstände und Anordnungen sind möglich. Die projizierten Streifen werden für alle Projektoren aufgenommen (in unserem Fall zwei Projektoren => zwei vertikale und zwei horizontale Streifenbilder). Zusätzlich wird noch ein Bild aufgenommen, bei dem beide Projektoren auf Schwarz geschaltet sind, um den teilweise störenden Hintergrund bzw. niedriges Rauschen entfernen zu können. Dieses Hintergrundbild wird vor der weiteren Bildfilterung von allen aufgenommen Bildern subtrahiert. Die aufgenommenen Bilder sind in den **Abb. 2 bis 6** zu sehen.

[0022] Auf Grund der Verwendung einer Linsenkamera zeigen die aufgenommenen Bilder typische radiale Verzerrungen auf, die vor der Weiterverarbeitung entfernt werden müssen. Bei verzerrungsfreier Aufnahme kann dieser Schritt entfallen.

[0023] Die eigentliche Filterung wurde mit

Standardbildverarbeitungsfilteroperationen durchgeführt. Nach der Bildsubtraktion von zu filterndem Bild und Hintergrundbild wird das Ergebnisbild in Graustufen umgewandelt, so dass jeder der drei Farbkanaäle denselben Farbwert hat. Anschließend wird dieses Bild in Abhängigkeit eines Schwellwertes in ein Schwarz/Weiß-Bild umgewandelt, wobei die Streifen Weiß sind und der Hintergrund Schwarz. Um Löcher in den Streifen zu entfernen, wird eine Dilation und Erosion durchgeführt. Anschließend müssen die aufgenommenen Linien noch derart gefiltert werden, dass sie nur noch einen Pixel breit sind. Dies geschieht mit Hilfe eines vertikalen bzw. horizontalen Versatzfilters. Dieser Versatzfilter wird in zwei Richtungen ausgeführt (links und rechts bzw. oben und unten). Der Mittelwert der Ergebnisse dieser beiden Filteroperationen liefert den Mittelpunkt des Streifens. Die gefilterten Streifen werden nun durch ihre Mittelpunkte repräsentiert.

[0024] Sämtliche Filteroperationen wurden mittels an sich bekannter Pixelshader hardwareunterstützt umgesetzt.

#### Berechnung der größtmöglichen Projektionsfläche

[0025] Um eine deckungsgleiche Wahrnehmung zu gewährleisten, muss die größte gemeinsame Projektionsfläche aller Projektoren im Originalbildverhältnis (in diesem Ausführungsbeispiel 4:3) bestimmt werden. Dazu wird zuerst aus den gefilterten Streifenmustern ein Gitternetz erzeugt. Mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus wird innerhalb dieses Netzes, welches in unserem Fall aus zwei Teilgitternetzen besteht, die größte gemeinsame Projektionsfläche „gesucht“. Das Gitter des linken und des rechten Projektors sowie die Zielprojektionsfläche sind in **Abb. 7** dargestellt. Aus diesen Daten können im Anschluss die Parameter für das Warping bestimmt werden.

#### Berechnung der Warp-Felder und Imagewarping

[0026] Mit Hilfe des zuvor berechneten Gitters kann das Bild in Warpingpatches zerlegt werden. Diese Patches bestehen aus einem Dest-Patch (der Bildbereich, an den ein Bildteil gewarpt werden soll) und einem Src-Patch (der Bildbereich, der in den Dest-Patch gewarpt wird).

[0027] Die Eckpunkt-Berechnung der Dest-Patches ist trivial. Aufgrund des vorgegebenen Abstands der horizontalen und vertikalen Linien ist somit auch die Position sämtlicher Gitterpunkte im Ziel bekannt.

[0028] Die Src-Patches werden in Abhängigkeit des Projektionsrechteckes (im Foto) und der Position der Dest-Patches (im Foto) linear berechnet. Es wird die Berechnung für die linke untere Ecke eines Src-Patches in Abhängigkeit der linken unteren Ecke eines Dest-Patches aufgezeigt:

$$\text{patch.x1} = (\text{pLB.X} - \text{projectionRect.left}) / (\text{projectionRect.right} - \text{projectionRect.left});$$

$$\text{patch.y1} = (\text{pLB.Y} - \text{projectionRect.bottom}) / (\text{projec-$$

$$\text{tionRect.top} - \text{projectionRect.bottom}).$$

[0029] Das Src-Patch wird mittels eines Warping-Verfahrens inklusive integrierter perspektivischer Korrektur in das Dest-Patch transformiert.

[0030] Wird der Abstand der horizontalen und vertikalen Linien relativ klein gewählt, ist auch der Ausgleich von Krümmungen realisierbar. Mit den bei den Versuchen gewählten Linienabständen von zwanzig Pixeln war es bereits möglich, Krümmungen der Wand auszugleichen.

[0031] Bei einer Zweiprojektorkalibrierung müssen zwei Warp-Arrays berechnet werden, bei mehr als zwei Projektoren entsprechend mehr. Die Warp-Arrays werden immer in Abhängigkeit der korrespondierenden Gitterpunkte mit der Beschränkung durch die gemeinsame größte Projektionsfläche bestimmt. Die für eine Zweikanalprojektion berechneten gewarpten Bilder sind in **Abb. 8** und **9** zu sehen. Das Ergebnis an der Projektionsfläche ist für einen Projektor in **Abb. 10** und für zwei Projektoren in **Abb. 11** zu sehen. Der Vergleich der Leuchtstärke ist in **Abb. 12** dargestellt.

[0032] Um eine effektive Verarbeitung zu gewährleisten, wird die Autokalibrierung nur einmal (pro Sitzung) durchgeführt. Aus diesem Grund werden die für die Geometrieentzerrung und Multiprojektorkalibrierung berechneten Daten in Warp-Feldern gespeichert, welche z.B. vom X-Rooms™-System (K. Isakovic, T. Dudziak, K. Köchy. X-Rooms. A PC-based immersive visualization environment, Web 3D Conference, Tempe, Arizona, 2002) verwendet werden können. Die Entzerrung mittels der Warp-Felder wurde wiederum hardwareunterstützt umgesetzt, so dass eine Entzerrung in Echtzeit möglich ist.

#### Anwendungsgebiete

[0033] Für eine Multiprojektorkalibrierung gibt es viele Anwendungsgebiete. Sie kann beispielsweise zur kostengünstigen Leuchtstärkeerhöhung bzw. zur Stereokalibrierung verwendet werden. Des Weiteren kann ohne großen Aufwand eine Geometrie- und Projektorbedingte Entzerrung durchgeführt werden. Die Autokalibrierung eines Zweiprojektorsystems mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens dauert 35 Sekunden inklusive der Bildaufnahme (ca. 20 Sekunden). Sie stellt eine signifikante Steigerung gegenüber der manuellen Kalibrierung dar.

#### Patentansprüche

1. System zur automatischen Kalibrierung eines Multiprojektorsystems mit
  - mit mindestens zwei Projektoren,
  - einer Digital-Kamera und
  - einer Ansteuerungseinheit zur Ansteuerung der Projektoren und der Kamera,
  - wobei eine Autokalibrierung gemäß folgender Schritte durchgeführt wird:
    - Erzeugung, Aufnahme und Bildfilterung von Strei-

fenmustern,

- Finden der größtmöglichen gemeinsamen Projektionsfläche und
- Berechnung der Warp-Felder und Imagewarping.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

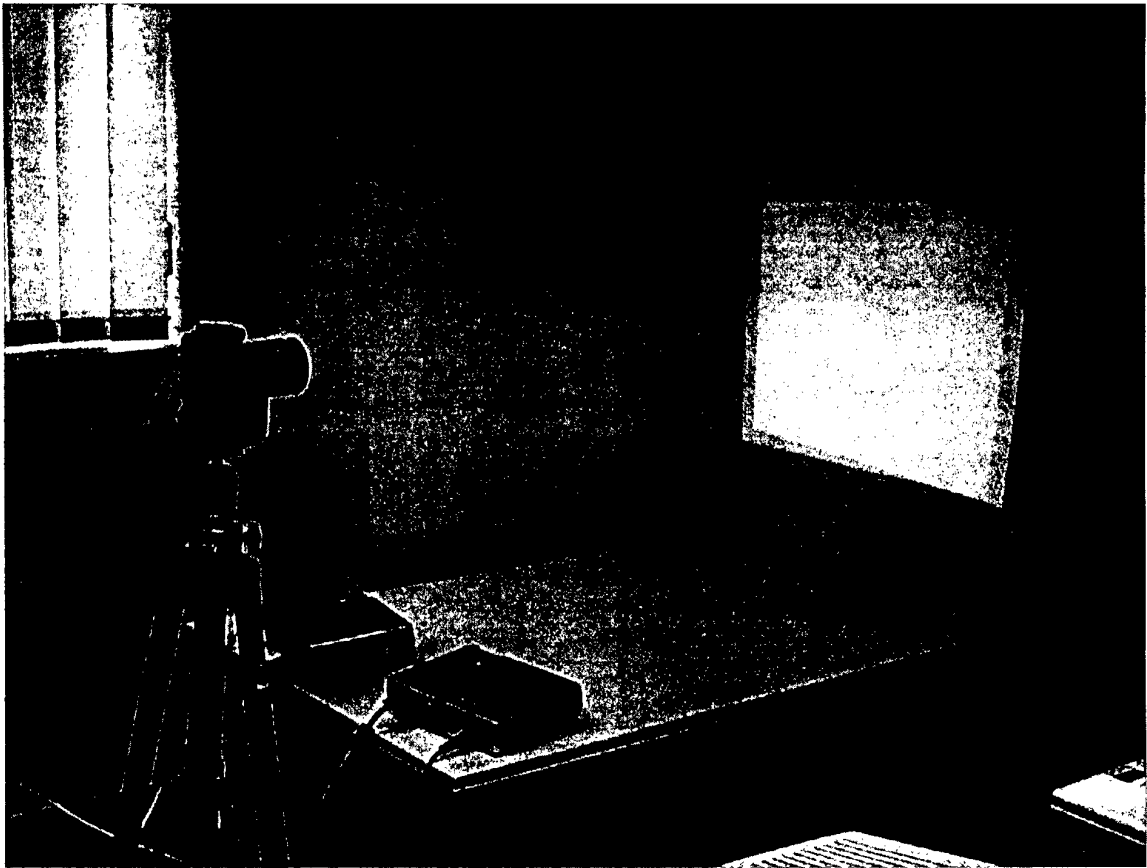


Abb.1

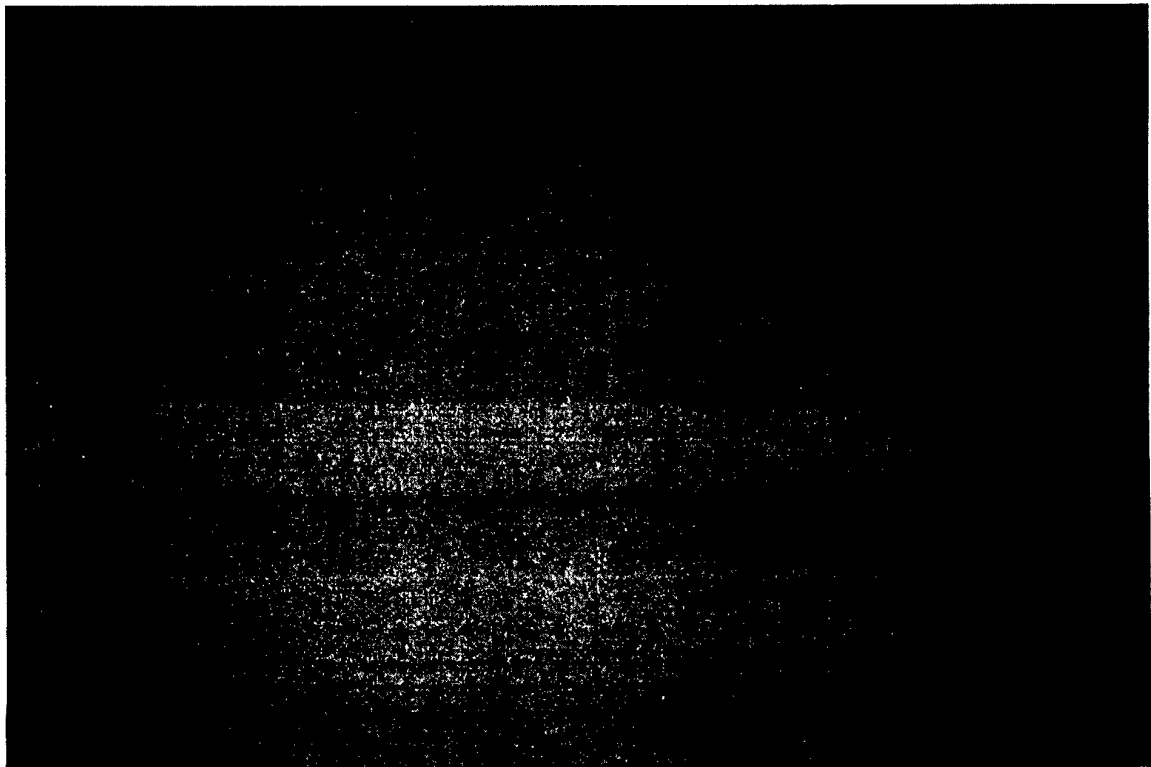


Abb.2

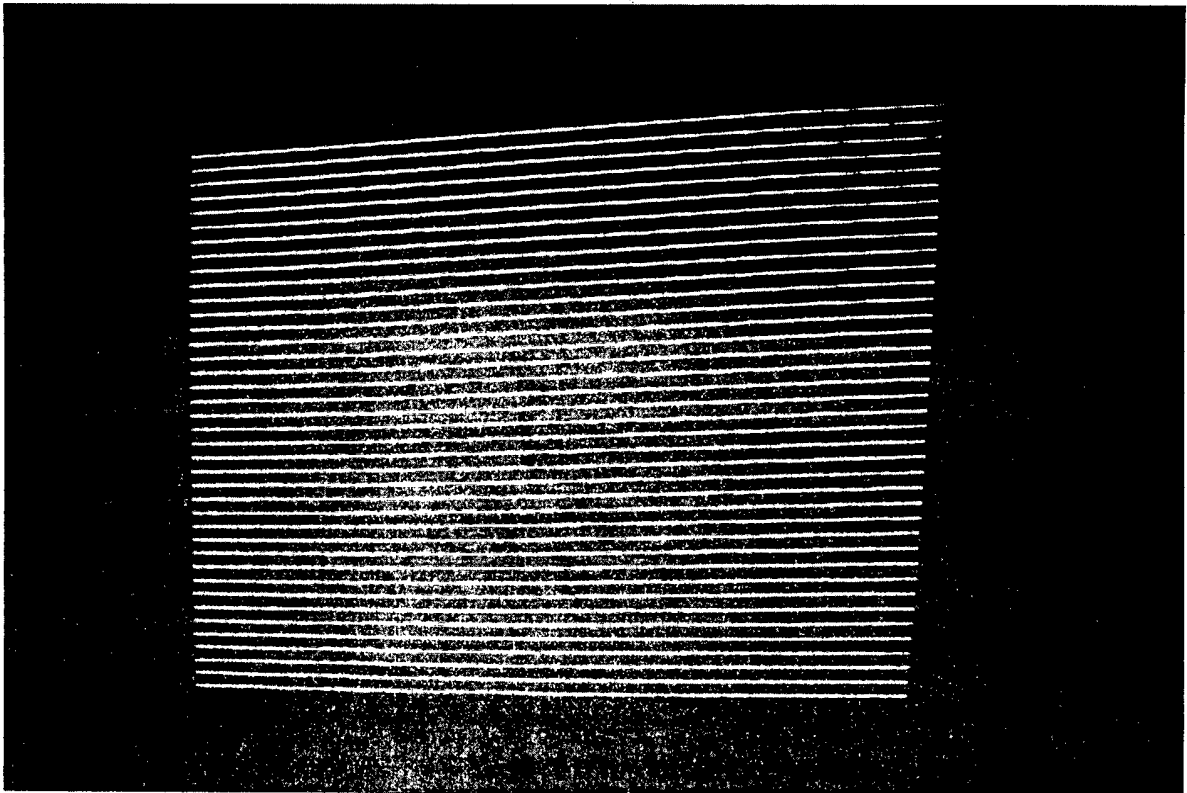


Abb.3

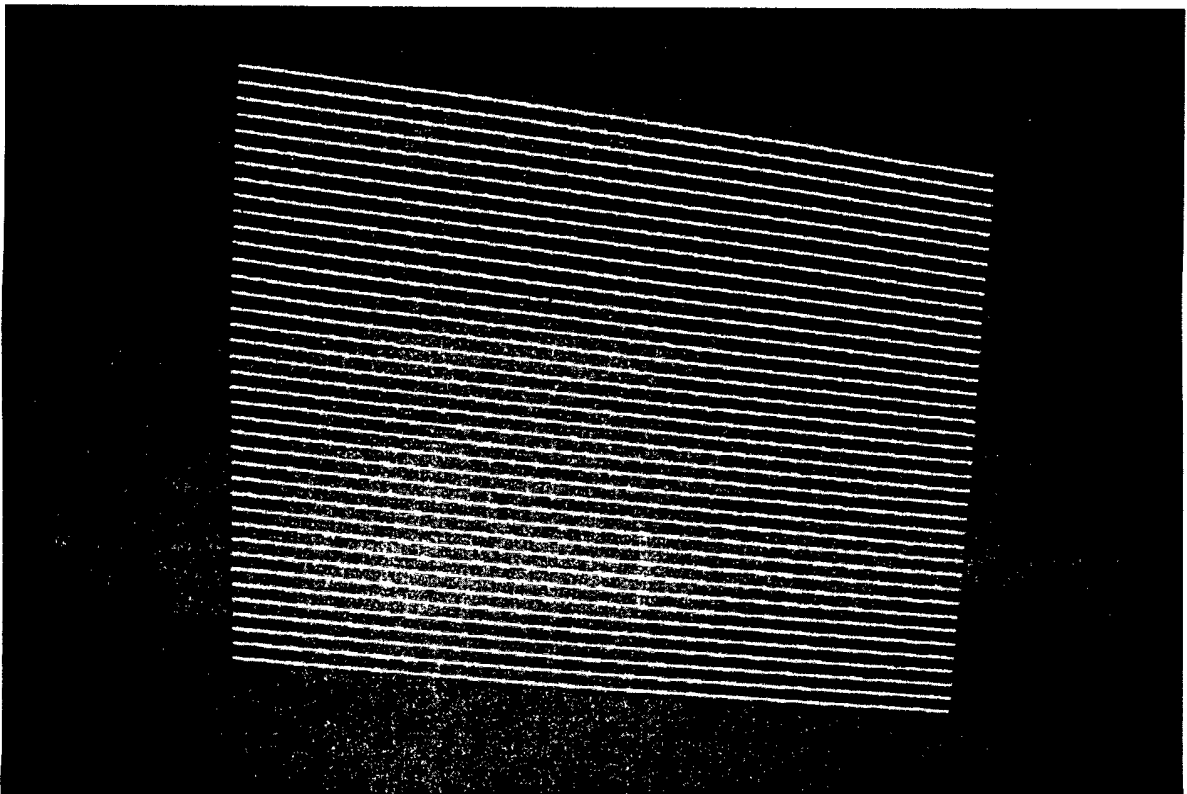


Abb.4

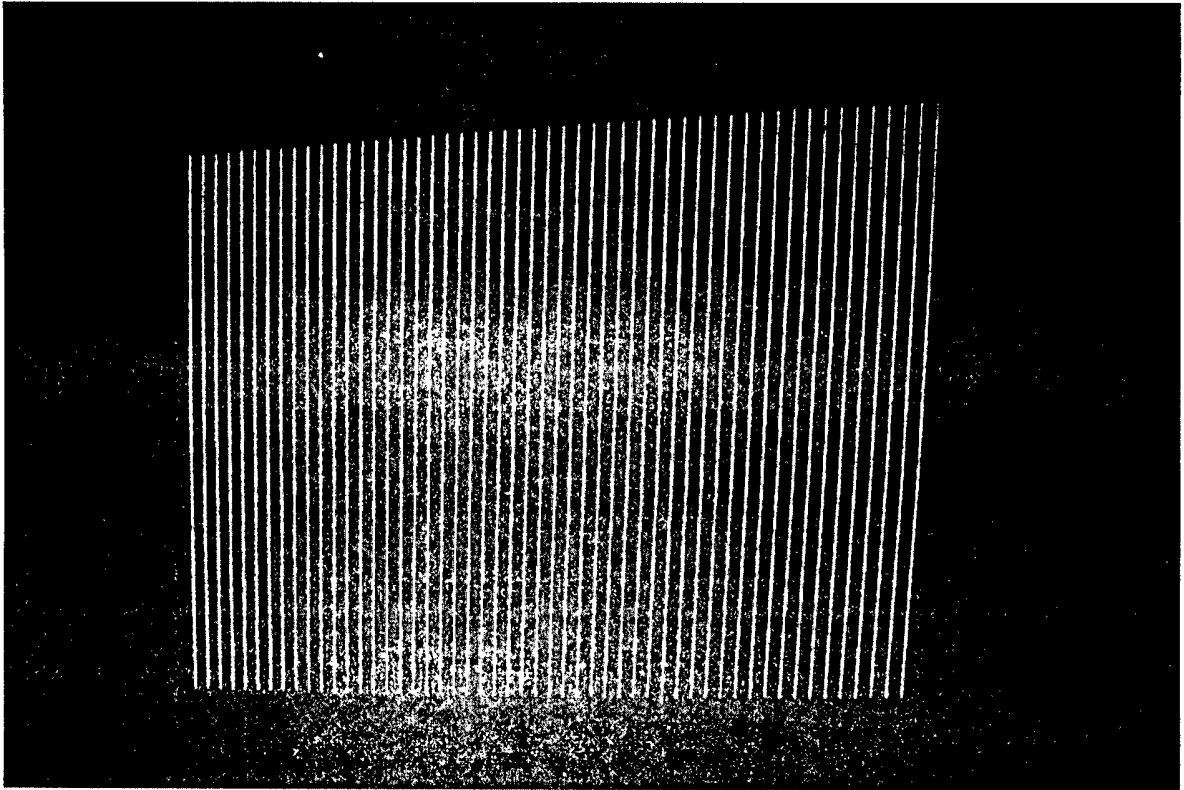


Abb.5

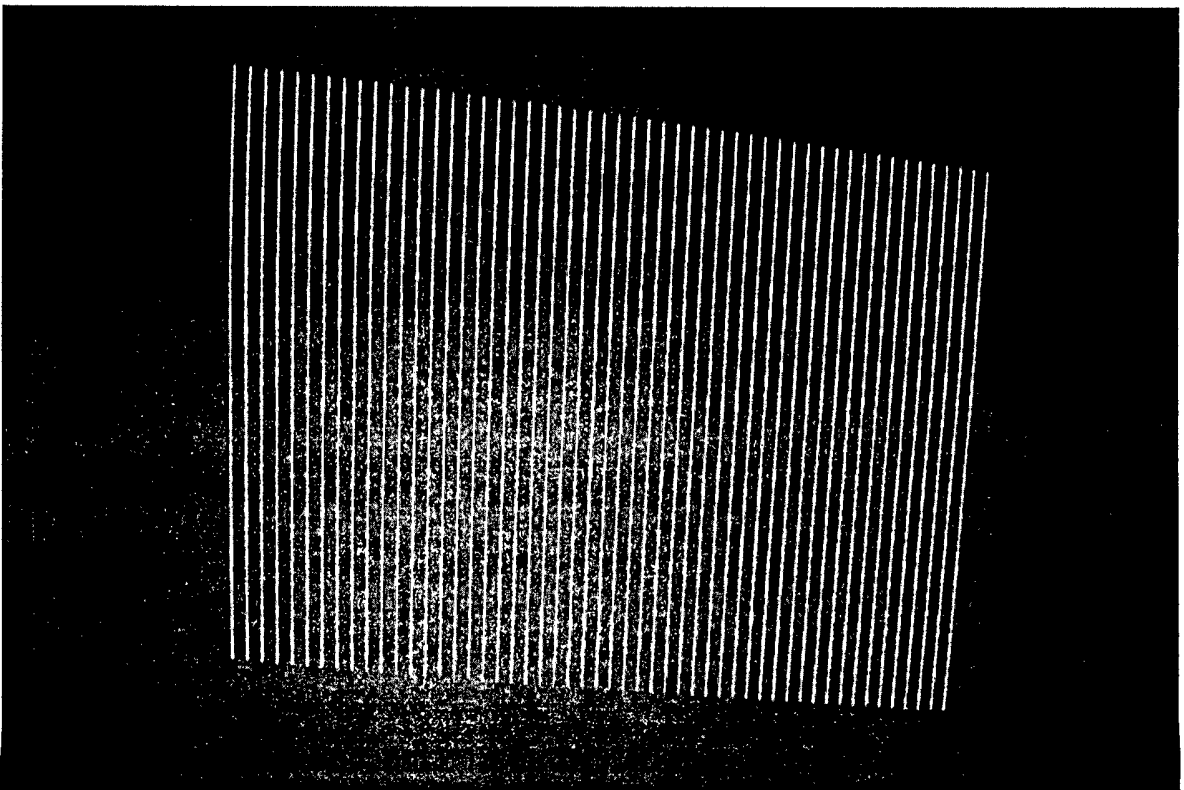


Abb.6

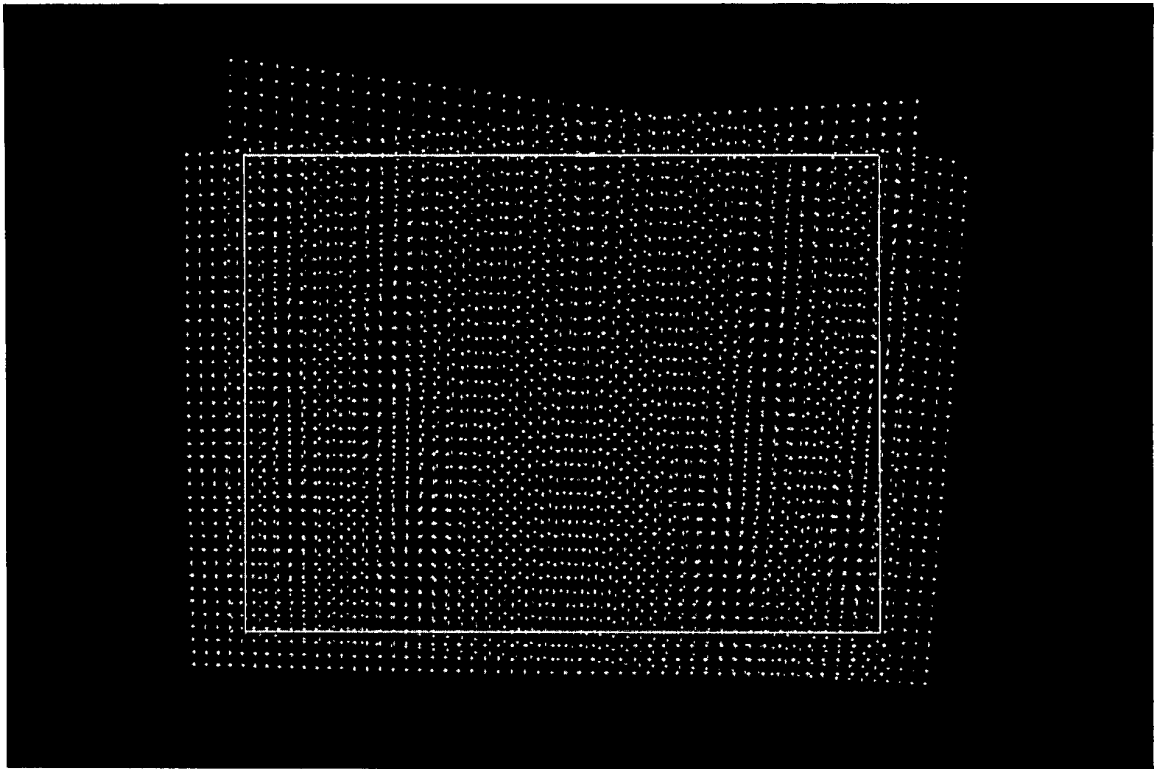


Abb.7

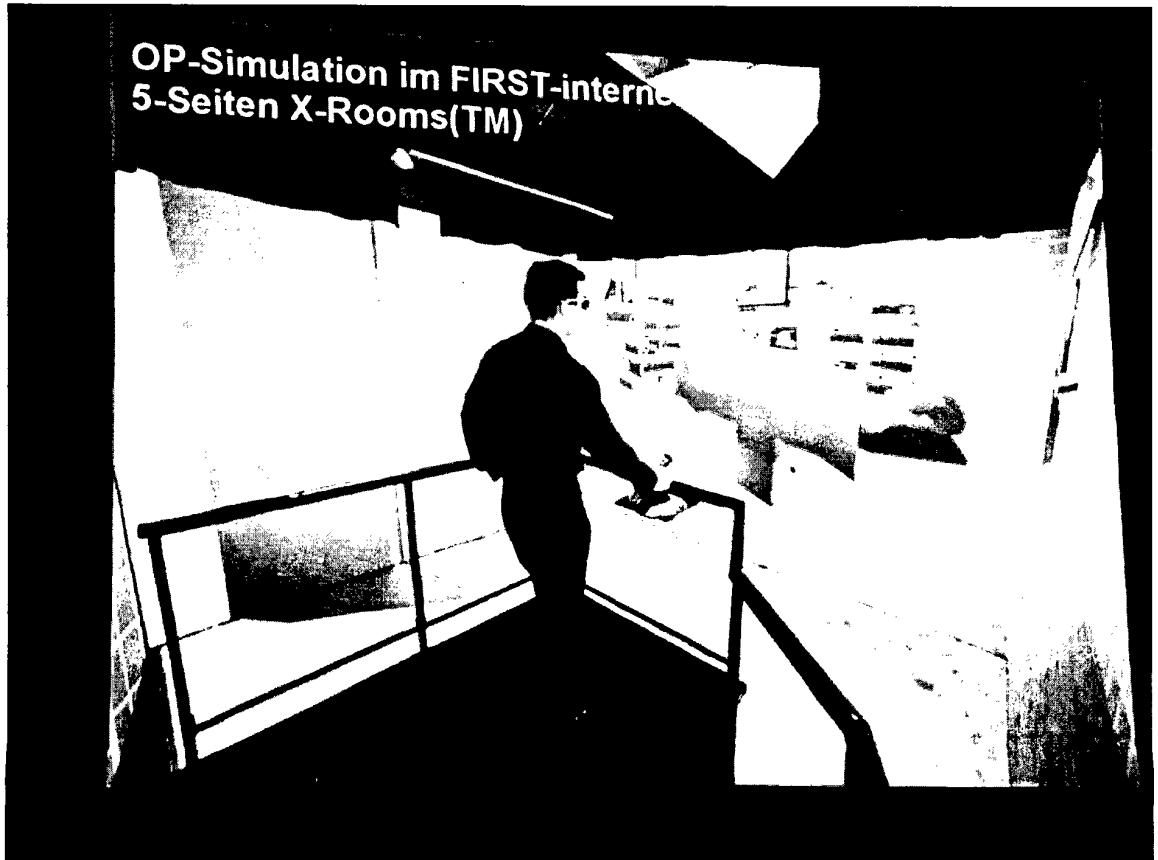


Abb.8





Abb.9



Abb.10

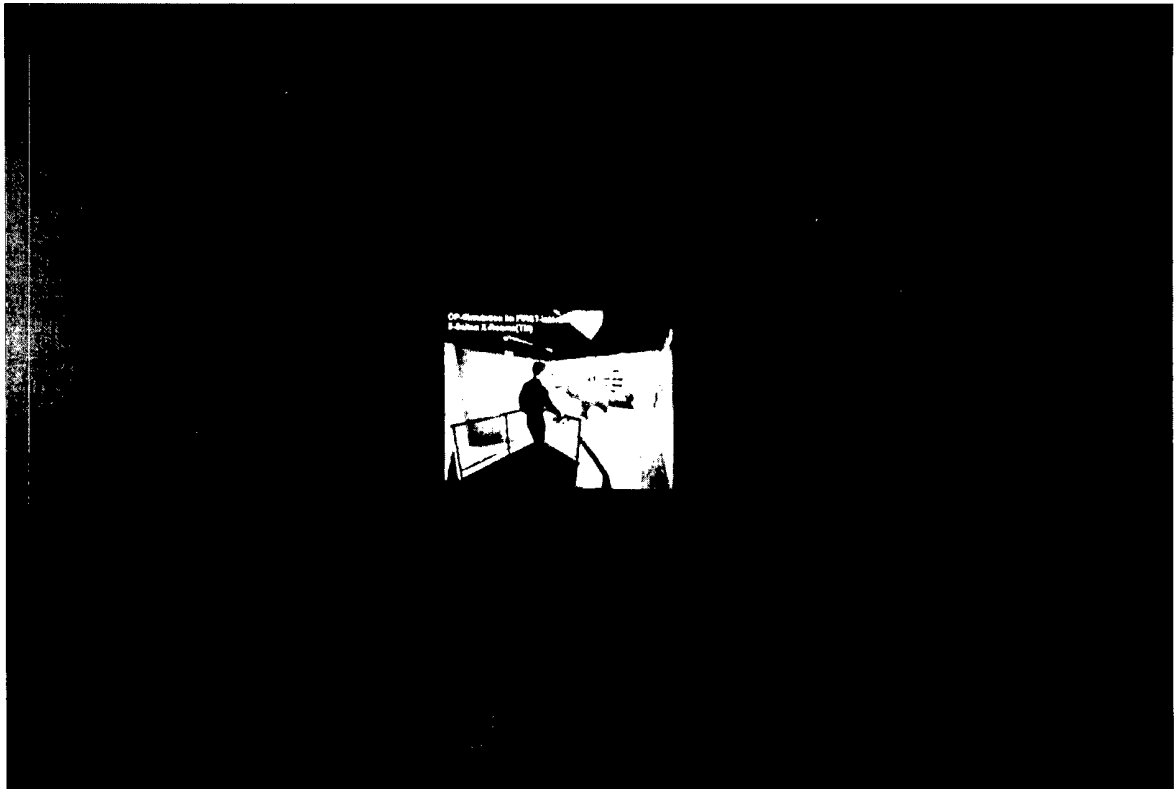


Abb.11



Abb. 12