

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

第2672509号

(45)発行日 平成9年(1997)11月5日

(24)登録日 平成9年(1997)7月11日

(51)Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 6 T 7/00			G 0 6 F 15/62	4 0 0
G 0 5 B 19/18			15/64	3 2 5 H
G 0 6 T 1/00			G 0 5 B 19/18	A

発明の数2 (全 14 頁)

(21)出願番号	特願昭62-147205	(73)特許権者	999999999 オムロン株式会社 京都府京都市右京区花園土堂町10番地
(22)出願日	昭和62年(1987)6月13日	(72)発明者	久野 敦司 京都市右京区花園土堂町10番地 立石電機株式会社内
(65)公開番号	特開昭63-311485	(72)発明者	渡邊 正誓 京都市右京区花園土堂町10番地 立石電機株式会社内
(43)公開日	昭和63年(1988)12月20日	(74)代理人	弁理士 鈴木 由充
審判番号	平7-16405	合議体	審判長 倉地 保幸 審判官 谷川 洋 審判官 酒井 伸芳
		(56)参考文献	特開 昭63-61903 (J P, A)

(54)【発明の名称】 カメラモデルの自動キャリブレーション方法およびその装置

1

(57)【特許請求の範囲】

1 . 3次元座標と、ラベルと、形状または配置の情報が既知である特徴部分を複数個備えたキャリブレーション用ワークを用いてカメラモデルのキャリブレーションを自動的に行うための方法であって、  
 撮像手段により前記キャリブレーション用ワークを撮像して得られた2次元画像上で複数個の特徴部分を抽出すると共に、この2次元画像上においてそれぞれの特徴部分の2次元座標を検出する第1の工程と、  
 前記2次元画像上で検出された各特徴部分をキャリブレーション用ワークの前記既知の形状または配置の情報と比較して、前記2次元画像上で検出された各特徴部分を、それぞれキャリブレーション用ワークのいずれかの特徴部分のラベルでラベル付けする第2の工程と、  
 キャリブレーション用ワークの特徴部分の前記既知の3

2

次元座標と前記2次元画像上における特徴部分の2次元座標とにおいて同一のラベルを持つ特徴部分の座標を組として用いて、前記既知の3次元座標を前記2次元座標に変換するためのパラメータである前記撮像手段のカメラモデルを求める演算を行う第3の工程とを一連に実行することを特徴とするカメラモデルの自動キャリブレーション方法。  
 2 . 3次元座標と、ラベルと、形状または配置の情報が既知である特徴部分を複数個備えたキャリブレーション用ワークを用いてカメラモデルのキャリブレーションを自動的に行うためのカメラモデルの自動キャリブレーション装置であって、  
 前記キャリブレーション用ワークを撮像してキャリブレーション用ワークの2次元画像を生成する撮像手段と、前記撮像手段により撮像された前記キャリブレーション

10

用ワークの 2 次元画像が格納される画像記憶手段と、前記画像記憶手段に格納された前記キャリブレーション用ワークの 2 次元画像上で複数個の特徴部分を抽出すると共に、この 2 次元画像上においてそれぞれの特徴部分の 2 次元座標を検出する 2 次元座標検出手段と、前記 2 次元画像上で検出された各特徴部分をキャリブレーション用ワークの前記既知の形状または配置の情報と比較して、前記 2 次元画像上で検出された各特徴部分を、それぞれキャリブレーション用ワークのいずれかの特徴部分のラベルでラベル付けするラベル付け手段と、キャリブレーション用ワークの特徴部分の前記既知の 3 次元座標と前記 2 次元画像上における特徴部分の前記 2 次元座標とにおいて同一のラベルを持つ特徴部分の座標を組として用いて、前記既知の 3 次元座標を前記 2 次元座標に変換するためのパラメータである前記撮像手段のカメラモデルを求める演算を行う演算手段とを備えて成るカメラモデルの自動キャリブレーション装置。

#### 【発明の詳細な説明】

##### < 産業上の利用分野 >

この発明は、例えば産業用ロボットにおける視覚認識技術に関連し、殊にこの発明は、視覚を構成する撮像装置のカメラモデルのキャリブレーションを自動的に実行するための自動キャリブレーション装置に関する。

##### < 従来の技術 >

従来、物体の形状等を認識するために種々な方式があり、その一方式として、先般、板状のスリット光を用いた 3 次元物体認識方式が提案されている。この方式は、投光装置により板状のスリット光を物体に照射してその表面にスリット光の交わり線を生成し、その交わり線を撮像装置により撮像してスリット像を得た後、そのスリット像を画像処理して、物体認識を行うものである。この種の方式の場合、認識処理に先立ち、前記撮像装置や投光装置のキャリブレーションを実行して、カメラモデルやスリット光モデルを予め求めておく必要がある。

従来、撮像装置のキャリブレーションを行うには、表面に複数個のマークが設けられたキャリブレーション用ワークを用意し、このワークを撮像装置で撮像してそのマーク画像を画面上に生成する。その後、オペレータがそれぞれマーク画像がどのマークに対応するのかを画面上で判断して手作業によりラベル付け操作を行った上で、各マークの空間座標位置とそれぞれマークに対応する各マーク画像の検出座標位置とをコンピュータに与えてキャリブレーション演算を実行させ、これにより撮像装置のカメラモデルを求めている。

##### < 発明が解決しようとする問題点 >

ところがこのようなキャリブレーション方式の場合、各マーク画像をラベル付けするのに手作業で行っているため、その操作が面倒かつ非能率的であり、キャリブレーションを行うのに多大の時間がかかるという問題がある。

この発明は、上記問題に着目してなされたもので、画像のラベル付け処理を自動化して撮像装置のカメラモデルを自動生成することによって、カメラモデルのキャリブレーションを容易かつ短時間で行うことができるカメラモデルの自動キャリブレーション装置を提供することを目的とする。

##### < 問題点を解決するための手段 >

第 1 の発明は、3 次元座標と、ラベルと、形状または配置の情報とが既知である特徴部分を複数個備えたキャリブレーション用ワークを用いてカメラモデルのキャリブレーションを自動的に行うための方法であって、撮像手段により前記キャリブレーション用ワークを撮像して得られた 2 次元画像上で複数個の特徴部分を抽出すると共に、この 2 次元画像上においてそれぞれの特徴部分の 2 次元座標を検出する第 1 の工程と、前記 2 次元画像上で検出された各特徴部分をキャリブレーション用ワークの前記既知の形状または配置の情報と比較して、前記 2 次元画像上で検出された各特徴部分を、それぞれキャリブレーション用ワークのいずれかの特徴部分のラベルでラベル付けする第 2 の工程と、キャリブレーション用ワークの特徴部分の前記既知の 3 次元座標と前記 2 次元画像上における特徴部分の 2 次元座標とにおいて同一のラベルを持つ特徴部分の座標を組として用いて、前記既知の 3 次元座標を前記 2 次元座標に変換するためのパラメータである前記撮像手段のカメラモデルを求める演算を行う第 3 の工程とを一連に実行することを特徴とする。

また第 2 の発明は、上記の方法を実施するためのカメラモデルの自動キャリブレーション装置であって、前記キャリブレーション用ワークを撮像してキャリブレーション用ワークの 2 次元画像を生成する撮像手段と、前記撮像手段により撮像された前記キャリブレーション用ワークの 2 次元画像が格納される画像記憶手段と、前記画像記憶手段に格納された前記キャリブレーション用ワークの 2 次元画像上で複数個の特徴部分を抽出すると共に、この 2 次元画像上においてそれぞれの特徴部分の 2 次元座標を検出する 2 次元座標検出手段と、前記 2 次元画像上で検出された各特徴部分をキャリブレーション用ワークの前記既知の形状または配置の情報と比較して、前記 2 次元画像上で検出された各特徴部分を、それぞれキャリブレーション用ワークのいずれかの特徴部分のラベルでラベル付けするラベル付け手段と、キャリブレーション用ワークの特徴部分の前記既知の 3 次元座標と前記 2 次元画像上における特徴部分の前記 2 次元座標とにおいて同一のラベルを持つ特徴部分の座標を組として用いて、前記既知の 3 次元座標を前記 2 次元座標に変換するためのパラメータである前記撮像手段のカメラモデルを求める演算を行う演算手段とを備えている。

##### < 作用 >

撮像手段により撮像されたキャリブレーション用ワークの 2 次元画像上で各特徴部分とその座標位置が検出さ

れると、つぎにキャリブレーション用ワークの各特徴部分の形状または配置の既知情報が参照されて、2次元画像上の各特徴部分がそれぞれキャリブレーション用ワークのいずれかの特徴部分のラベルによりラベル付けされる。さらにキャリブレーション用ワークの特徴部分の既知の3次元座標と画像上の特徴部分の2次元座標とを、同一のラベルを持つ特徴部分ごとに組とし、これら各座標の組を用いた演算処理を行なうことにより、カメラモデルの生成が行われる。

第2の発明にかかる自動キャリブレーション装置では、2次元撮像手段により撮像されたキャリブレーション用ワークの画像が画像記憶手段内に格納されると、2次元座標検出手段によりこの2次元画像上における各特徴部分の座標位置が検出される。ついでラベル付け手段がキャリブレーション用ワークの各特徴部分の形状または配置の既知情報を参照して、2次元画像上の各特徴部分をそれぞれキャリブレーション用ワークのいずれかの特徴部分のラベルでラベル付けすると、演算手段は、キャリブレーション用ワークの特徴部分の既知の3次元座標と画像上の特徴部分の2次元座標とを、同一のラベルを持つ特徴部分ごとに組にし、これら各座標の組を用いた演算を実行して、カメラモデルを生成する。

この発明によれば、キャリブレーション用ワークを撮像して得られた2次元画像上での特徴部分の検出や2次元画像における特徴部分の対応付け処理が自動的に行われて、撮像装置のカメラモデルが自動生成される。

#### <実施例>

第1図はこの発明にかかる自動キャリブレーション装置2の概念を示しており、この自動キャリブレーション装置2がインターフェイス3を介して物体認識装置1に電気接続されている。

物体認識装置1は物体の形状等を認識するためのものであって、撮像装置4と、ビデオ信号を取り込み所定の画像処理を実行して物体認識する画像処理装置5とから構成されている。

自動キャリブレーション装置2は、コンピュータのCPU6を制御主体としており、撮像装置4のキャリブレーションを実行するためのプログラムを格納するROM7や各種データを格納する演算用RAM8を備えている。CPU6はキャリブレーション用プログラムを解釈実行し、撮像装置4よりキャリブレーション用ワーク9の画像データを取り込んで、所定のキャリブレーション演算を実行する。その結果、カメラモデル(詳細は後述する)が生成され、そのカメラモデルを構成する座標変換係数が物体認識装置1へ出力される。

第2図および第3図は、上記自動キャリブレーション装置が組み込まれた物体認識装置を示しており、第2図は2次元物体認識装置の例であり、また第3図は板状のスリット光を用いた3次元物体認識装置の例である。

第2図の装置例は、コンピュータのCPU12を制御主体

とし、このCPU12に対し、画像処理用プログラムやキャリブレーション用プログラムが格納されるROM13、被認識物体の画像やキャリブレーション用ワーク9の画像が格納される画像記憶部15、カメラモデルを構成する座標変換係数が格納される係数記憶部16、演算用に供されるRAM17の他、CRTより成る表示部18やキーボードより成る操作部19が、それぞれ接続されている。前記画像記憶部15は画像メモリより成り、インターフェイス20を介して撮像装置21に接続される。この撮像装置21は例えば2次元CCDテレビカメラより成り、被認識物体やキャリブレーション用ワーク9を撮像してそのビデオ信号を出力する。

前記キャリブレーション用ワーク9は、第4図および第5図に示す如く、平面形状が正方形の薄板状をなし、一定高さ(厚み)hの平坦面10上に複数個のマーク11が設けてある。これら各マーク11は同一径の円形であり、このキャリブレーション用ワーク9を撮像して2値化したとき、その背景である平坦面10や床面などと明確に区別できるように円形内に黒く塗り潰してある。またマーク11の総数は10個であり、第5図に示す如く、各マーク11に対し「0」～「9」のラベルが割り当ててある。各マーク11は所定の規則に従って配置してあり、ラベルが0,5,6,7,8,9の各マーク11は直交する対角線上にほぼ位置し、その他のラベルの各マーク11はその線外に位置している。

なお図示例の各マーク11は同一形状であるが、後記するラベル付けのために個々の形状を違えてもよい。

第3図の装置例は、上記第2図の装置例とは、キャリブレーション用ワーク23の態様が異なる点および投光装置22を具備している点で差異がある。なおその他の構成は、第2図の実施例と同様であり、ここでは対応する構成に同一の符号を付すことにより、その説明を省略する。

この実施例でのキャリブレーション用ワーク23は、第6図および第7図に示す如く、高さ(厚み)h<sub>1</sub>,h<sub>2</sub>の異なる二段階の平坦面24,25を有し、各平坦面24,25上に前記マーク11と同様のマーク26が5個宛(合計10個)設けられたものである。各マーク26には第7図に示す如く、「0」～「9」のラベルが割り当てられ、前記の実施例と同様の規則に基づき各マーク26の配置が決定されている。

前記投光装置22は、被認識物体やキャリブレーション用ワーク23に対し板状のスリット光を斜め上方より照射して、その表面にスリット光の交わり線27を生成するためのもので、この交わり線27を撮像装置21で撮像して、被処理画像としてのスリット像を得る。

第8図および第9図は、前記撮像装置21のカメラモデルの構造を示している。同図中、O<sub>c</sub>は撮像装置21の撮像面31の中心点を示し、この中心点O<sub>c</sub>を原点としてX<sub>c</sub>軸、Y<sub>c</sub>軸、Z<sub>c</sub>軸を各直交軸とするカメラ座標系が設定されてい

る。Rは撮像装置21のレンズ中心であり、結像距離lenbはO<sub>c</sub>R間の距離で与えられる。また第8図中、S<sub>0</sub>は画像処理時のサンプリングの原点、PC<sub>x</sub>, PC<sub>y</sub>はX<sub>c</sub>軸方向およびY<sub>c</sub>軸方向の各サンプリングピッチである。なお第8図中のIJ座標系はこの撮像面31に当てはめられた画像メモリ座標系であり、また第9図中のxyz座標系は物点に空間座標を与える基準座標系である。

ここでカメラモデルとは、撮像装置の3次元位置および姿勢、レンズの結像距離、ビデオ信号のデジタル化\*

$$[FRAME] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{bmatrix} \dots\dots (1)$$

ここで

$$\begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix}$$

はカメラ座標系のX<sub>c</sub>方向の単位ベクトルであり、f<sub>11</sub>, f<sub>21</sub>, f<sub>31</sub>はそのベクトルの基準座標系におけるxyz成分である。

また

$$\begin{bmatrix} f_{12} \\ f_{22} \\ f_{32} \end{bmatrix} \text{ および } \begin{bmatrix} f_{13} \\ f_{23} \\ f_{33} \end{bmatrix}$$

はカメラ座標系のY<sub>c</sub>方向およびZ<sub>c</sub>方向の単位ベクトルであり、f<sub>12</sub>, f<sub>22</sub>, f<sub>32</sub> および f<sub>13</sub>, f<sub>23</sub>, f<sub>33</sub> はそれぞれベクトルの基準座標系におけるxyz成分である。

さらに

$$\begin{bmatrix} f_{14} \\ f_{24} \\ f_{34} \end{bmatrix}$$

$$[LENZ] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/lenb & 1 \end{bmatrix} \dots\dots (7)$$

さらに撮像装置の内部モデルは、撮像面31上で画像がどのようにサンプリングされるかを示すものであり、こ

$$[SAMP] = \begin{bmatrix} 1/PC_x & 0 & -ORG_x / PC_x \\ 0 & -1/PC_y & ORG_y / PC_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots (8)$$

なお上式中、ORG<sub>x</sub>, ORG<sub>y</sub>は第8図に示す如く、撮像面31におけるサンプリング原点S<sub>0</sub>のX<sub>c</sub>座標およびY<sub>c</sub>座標を示す。

いま基準座標系およびカメラ座標系で表現した物点B<sub>i</sub>(第9図に示す)の3次元座標を、

(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>, 1)<sup>t</sup> 基準座標系

(e<sub>i</sub>, f<sub>i</sub>, g<sub>i</sub>, 1)<sup>t</sup> カメラ座標系

とし、またこの物点B<sub>i</sub>についてカメラ座標系および画像

\*仕様を表現するモデルであって、前二者を外部モデル、後者を内部モデルという。撮像装置の位置および姿勢は前記カメラ座標系を基準座標系が表現したものであり、この撮像装置の位置・姿勢およびレンズの結像距離は撮像装置の移動やピント調整により変化する。

撮像装置の基準座標系より見た位置・姿勢を〔FRAME〕とすると、この〔FRAME〕は次式のように4行4列の行列として表現できる。

はカメラ座標系の原点O<sub>c</sub>の位置座標であり、f<sub>14</sub>, f<sub>24</sub>, f<sub>34</sub>は基準座標系におけるxyz成分である。

以上から、行列〔FRAME〕の各要素については理想的につぎの(2)~(6)式が成立する。

$$f_{11}^2 + f_{21}^2 + f_{31}^2 = f_{12}^2 + f_{22}^2 + f_{32}^2 = f_{13}^2 + f_{23}^2 + f_{33}^2 = 1 \dots (2)$$

$$20 \quad f_{11} f_{12} + f_{21} f_{22} + f_{31} f_{32} = 0 \dots (3)$$

$$f_{11} f_{13} + f_{21} f_{23} + f_{31} f_{33} = 0 \dots (4)$$

$$f_{12} f_{13} + f_{22} f_{23} + f_{32} f_{33} = 0 \dots (5)$$

$$f_{41} = f_{42} = f_{43} = 0, f_{44} = 1 \dots (6)$$

ただし(2)式は単位ベクトルという条件を表すものであり、(3)~(5)式はカメラ座標系の各軸が直交することを示すものである。

つぎに結像変換を表す行列を〔LENZ〕とすると、この〔LENZ〕は次式で示される。

れを〔SAMP〕とすると、次式のような3行3列として表現できる。

$$\begin{bmatrix} -ORG_x / PC_x & ORG_y / PC_y \\ ORG_y / PC_y & 1 \end{bmatrix} \dots\dots (8)$$

メモリ座標系で表現した像点P<sub>i</sub>の座標を、

(p<sub>i</sub>, q<sub>i</sub>, 1)<sup>t</sup> カメラ座標系

(l<sub>i</sub>, j<sub>i</sub>, 1)<sup>t</sup> 画像メモリ座標系

とする。なおこれらの各座標は同次座標表現で表してあり、tは転置行列を示す。

この場合に基準座標系で表現した物点B<sub>i</sub>の3次元座標が、カメラ座標系で表現した3次元座標に変換される過程はつぎの(9)式で表される。

$$\begin{bmatrix} e_i \\ f_i \\ g_i \\ 1 \end{bmatrix} = \text{[FRAME]}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (9)$$

つぎに結像変換によって物点座標が像点座標に変換される過程はつぎの(10)式で表される。

$$\begin{bmatrix} h_i \cdot p_i \\ h_i \cdot q_i \\ 0 \\ h_i \end{bmatrix} = \text{[LENZ]} \cdot \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \\ g_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (10)$$

なお上式中、 $h_i$  は座標のひずみ等を表す変数である。さらにカメラ座標系で表現した像点 $P_i$ の座標が画像メモリ座標系で表現した座標に変換される過程はつぎの(11)式で表される。

$$\begin{bmatrix} I_i \\ J_i \\ 1 \end{bmatrix} = \text{[SAMP]} \cdot \begin{bmatrix} p_i \\ q_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (11)$$

つぎに第10図は、第3図の装置例において、撮像装置21のキャリブレーションを実行する手順を示している。

このキャリブレーションは、第6,7図に示すキャリブレーション用ワーク23を用いて実行されるもので、各マーク画像の中心点を画像上で抽出した上で、各マークの中心点の3次元座標(既知)と各マーク座像の中心点の画像上の座標とから撮像装置21のカメラモデルを生成するものである。

まず同図のステップ1(図中「ST1」で示す)において、マーク画像を2値化するためのしきい値THを決定した後、投光装置22をオフして、キャリブレーション用ワーク23を撮像装置21で撮像する(ステップ2,3)。撮像装置21はキャリブレーション用ワーク23を画像化してそのビデオ信号をインターフェイス20へ出力するもので、CPU12はこのワーク23の画像を前記のしきい値THにより2値化し、マーク画像の部分を黒画素(データ「1」の画素)、背景の部分を白画素(データ「0」の画素)として、この2値画像を画像メモリより成る画像記憶部15に格納する。

つぎにCPU12はステップ4において、キャリブレーション用ワークの2値画像よりマーク画像の中心点を抽出する。

第11図はこの中心点抽出方法の一例を示すもので、キャリブレーション用ワーク画像32に対しマーク探索用ウィンドウ34およびマーク中心点抽出用ウィンドウ35が設定されている。マーク探索用ウィンドウ34は縦長矩形形状であり、長辺の長さがdj、短辺の長さがdiである。またマーク中心点抽出用ウィンドウ35は正方形形状であり、各辺の長さがwである。いま各マーク画像33の半径をrとすると、各ウィンドウ34,35の各サイズは、この半径rの関数としてつぎの(12)~(14)式により求める。

$$dj = 3r \quad (12)$$

$$di = 2 \quad (13)$$

$$w = 4r \quad (14)$$

ただし半径rは黒画素の全面積Sとマークの個数(=10)からつぎの(15)式によって求めるもので、これにより照明などの観測条件が変動しても、マーク画像位置の抽出の精度が劣化しにくくなる。

$$r = \sqrt{\frac{S}{10\pi}} \quad \dots\dots (15)$$

まずマーク画像33を探索するのに、マーク探索用ウィンドウ34を矢印方向へ走査し、ウィンドウ34内の黒画素の面積がウィンドウ面積の80%を占める位置を求める。

そしてその位置でマーク探索用ウィンドウ34を止め、ウィンドウ内の黒画素の重心Gの位置を求める。この重心位置はマーク画像33の中心点 $C_{i-9}$ の近傍である。つぎにこの中心点 $C_{i-9}$ の位置を求めるのに、マーク中心点抽出用ウィンドウ35を重心Gを中心にしてセットし、このウィンドウ内の黒画素の中心座標を中心点 $C_{i-9}$ として求める。この中心点 $C_{i-9}$ の座標が求まると、同じマーク画像の重複処理を防止するため、処理済みマーク画像を消去するとよい。以下同様の処理をマーク探索用ウィンドウ34を画像全面にわたり走査しながら実行して、全てのマーク画像33につき中心点 $C_{i-9}$ を抽出する。

第10図に戻って、ステップ4の中心点抽出が終わると、つぎのステップ5でCPU12は各マーク画像33の中心点 $C_{i-9}$ の検出座標位置に基づき各マークの配置に関する情報を参照して各マーク画像33をいずれかマークと対応させてラベル付けする。

すなわちCPU12は、第12図に示す如く、まず10個のマーク画像33の中心点 $C_{i-9}$ につきその重心gを求め、その重心gに最も近い位置にある中心点 $C_{i-9}$ のマーク画像33にラベル「9」を割り付ける。つぎにこのラベル「9」のマーク画像33の中心点 $C_{i-9}$ から最も遠い位置にある中心点 $C_{i-0}$ のマーク画像33にラベル「0」を割り付ける。ついでラベル「0」のマーク画像の中心点 $C_{i-0}$ よりラベル「9」のマーク画像の中心点 $C_{i-9}$ に向かう単位ベクトルを $\vec{n}$ とし、このベクトル $\vec{n}$ に直交する単位ベクトルを $\vec{t}$ とする。そしてラベル「9」の中心点 $C_{i-9}$ を原点とし、各単位ベクトル $\vec{n}$ ,  $\vec{t}$ の方向を軸とする座標系によって各マーク画像33の中心点 $C_{i-9}$ の座標を表現し直し、第i番目に検出したマーク画像の中心点 $C_{i-9}$ のn座標およびt座標を( $n_i$ ,  $t_i$ )とする。

つぎにラベル「9」のマーク画像33の中心点 $C_{i-9}$ と

ラベル「0」のマーク画像33の中心点 $C_{33}$  - 0との距離の1/4をしきい値 $ath$ とし、各マーク画像33の中心点 $C_{33}$ と前記しきい値 $ath$ とを用いて、次表に示す規則に基づき他のマーク画像33のラベル付けを行う。

なお同表中、「正」は $n$ 座標や $t$ 座標の値がしきい値 $ath$ より大であることを、また「0」はその座標値の絶対値がしきい値 $ath$ 以下であることを、さらに「負」はその座標値が $-ath$ よりも小であることを、それぞれ示している。

n座標	t座標	ラベル
負	正	1
負	0	5
負	負	4
0	正	7
0	負	6

\*

n座標	t座標	ラベル
正	正	3
正	0	8
正	負	2

つぎにステップ6において、CPU12は各マーク26の中心点の空間座標位置とそれぞれマークと対応関係にある各マーク画像33の中心点の検出座標位置とから所定の演算を実行して撮像装置21の外部モデルを生成する。

10 いまこの外部モデルを表す行列を〔EXT〕とすると、この〔EXT〕は前記(9)(10)式よりつぎの(16)(17)式のように表される。

$$〔EXT〕 = 〔LENZ〕 \cdot 〔FRAME〕^{-1} \quad (16)$$

\*

$$\begin{bmatrix} h_i \cdot p_i \\ h_i \cdot q_i \\ 0 \\ h_i \end{bmatrix} = 〔EXT〕 \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (17)$$

ここで〔FRAME〕<sup>-1</sup>の各要素を、

$$〔FRAME〕^{-1} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (18)$$

で表現すると、(7)式と(18)式とを(16)式に代入してつぎの(19)式を得る。

$$〔EXT〕 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-t_{31}}{lenb} & \frac{-t_{32}}{lenb} & \frac{-t_{33}}{lenb} & \frac{1-t_{34}}{lenb} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (19)$$

ここで(19)式に示す要素をもつ撮像装置21の外部モデルを、各マーク画像33の中心点 $C_{33}$ の画像メモリ座標系における座標と各マーク26の中心点の基準座標系における座標とを用いて算出する。

$$\begin{bmatrix} p_i \\ q_i \\ 1 \end{bmatrix} = 〔SAMP〕^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I_i \\ J_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (20)$$

つぎにラベル $i$ のマーク26の中心点の基準座標系における3次元座標 $(x_i, y_i, z_i)$ とすると、(20)式を用いて前記(17)式を解くことにより〔EXT〕を求めること

40 いまラベル $i$ のマーク画像33の中心点 $C_{33}$ につき、画像メモリ座標系における座標が $(I_i, J_i)$ であるとし、またこれをカメラ座標系で表現した座標を $(p_i, q_i)$ とすると、前記(11)式よりつぎの(20)式を得る。

ができる。  
この場合に前記(19)式を(17)式に代入し、 $p_i, q_i$ につき整理すると、つぎの(21)(22)式を得る。

$$P_i = \frac{C_{11} X_i + C_{12} Y_i + C_{13} Z_i + C_{14}}{C_{31} X_i + C_{32} Y_i + C_{33} Z_i + C_{34}} \dots (21)$$

$$Q_i = \frac{C_{21} X_i + C_{22} Y_i + C_{23} Z_i + C_{24}}{C_{31} X_i + C_{32} Y_i + C_{33} Z_i + C_{34}} \dots (22)$$

上記 (21) (22) 式を变形しかつ  $C_{34} = 1$  と置くと、  
つぎの (23) (24) 式を得る。

\* ここで行列 [C] を、

$$[C] = [C_{11} C_{12} C_{13} C_{14} C_{21} C_{22} C_{23} C_{24} C_{31} C_{32} C_{33}]^t \dots (25)$$

$$C_{11} X_i + C_{12} Y_i + C_{13} Z_i + C_{14} - C_{31} X_i p_i - C_{32} Y_i p_i - C_{33} Z_i p_i = p_i \dots (23)$$

10 と置き、さらに (23) (24) 式が N 個の点 ( $i = 1, \dots, N$ ) につき成立する場合に、行列 [A] および [R]

$$C_{21} X_i + C_{22} Y_i + C_{23} Z_i + C_{24} - C_{31} X_i q_i - C_{32} Y_i q_i - C_{33} Z_i q_i = q_i \dots (24)$$

\* をつぎの (26) (27) 式のように置く。

$$[A] = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 Z_1 1 0 0 0 0 & -X_1 p_1 & -Y_1 p_1 & -Z_1 p_1 \\ 0 0 0 0 X_1 Y_1 Z_1 1 & -X_1 q_1 & -Y_1 q_1 & -Z_1 q_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_2 Y_2 Z_2 1 0 0 0 0 & -X_2 p_2 & -Y_2 p_2 & -Z_2 p_2 \\ 0 0 0 0 X_2 Y_2 Z_2 1 & -X_2 q_2 & -Y_2 q_2 & -Z_2 q_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_i Y_i Z_i 1 0 0 0 0 & -X_i p_i & -Y_i p_i & -Z_i p_i \\ 0 0 0 0 X_i Y_i Z_i 1 & -X_i q_i & -Y_i q_i & -Z_i q_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N Y_N Z_N 1 0 0 0 0 & -X_N p_N & -Y_N p_N & -Z_N p_N \\ 0 0 0 X_N Y_N Z_N 1 & -X_N q_N & -Y_N q_N & -Z_N q_N \end{bmatrix} \dots (26)$$

$$[R] = [x_1 y_1 x_2 y_2 \dots x_i y_i \dots x_N y_N]^t \dots (27)$$

の各要素間の関係式を記述すると次のようになる。

かくして上記の各行列 [C] [A] [R] を用いて、  
 $i = 1, \dots, N$  についての (23) (24) 式を書きなおすと、  
つぎの行列方程式を得る。

$$t_{11} = C_{11} \cdot K \dots (30)$$

$$t_{12} = C_{12} \cdot K \dots (31)$$

$$t_{13} = C_{13} \cdot K \dots (32)$$

$$t_{14} = C_{14} \cdot K \dots (33)$$

$$t_{21} = C_{21} \cdot K \dots (34)$$

$$t_{22} = C_{22} \cdot K \dots (35)$$

$$t_{23} = C_{23} \cdot K \dots (36)$$

$$t_{24} = C_{24} \cdot K \dots (37)$$

$$t_{31} = -lenb \cdot C_{31} \cdot K \dots (38)$$

$$t_{32} = -lenb \cdot C_{32} \cdot K \dots (39)$$

$$t_{33} = -lenb \cdot C_{33} \cdot K \dots (40)$$

$$t_{34} = lenb - lenb \cdot C_{34} \cdot K \dots (41)$$

$$[A] \cdot [C] = [R] \dots (28)$$

そして行列 [C] は、最小 2 乗法を適用することによって、次のように求まる。

また行列 [FRAME]<sup>-1</sup> の各要素  $t_{ij}$  には、

$$[C] = ([A]^t \cdot [A])^{-1} \cdot [A]^t [R] \dots (29)$$

$$t_{11}^2 + t_{12}^2 + t_{13}^2 = 1 \dots (42)$$

$$t_{21}^2 + t_{22}^2 + t_{23}^2 = 1 \dots (43)$$

$$t_{31}^2 + t_{32}^2 + t_{33}^2 = 1 \dots (44)$$

従って (25) (29) 式から (19) 式の外部モデルの各パラメータを求めることができる。

第 10 図に戻って、ステップ 6 の外部モデルの算出が行われると、つぎにこの外部モデルから結像距離および撮像装置 21 の位置・姿勢を算出する (ステップ 7, 8)。

この場合に外部モデルは非一意的であって、(21) (22) 式から明らかなように [EXT] の各要素を K 倍 (ただし K は比例係数) しても成立する。従って (29) 式を解いて得られる [C] は本来の値を K 倍したものである可能性がある。この点を考慮して、(19) 式

の各拘束条件が成立するから、以上の (30) ~ (44) 式を解くことによって、つぎの (45) (46) 式を得る。

$$K = \sqrt{\frac{2}{(C_{11}^2 + C_{12}^2 + C_{13}^2 + C_{21}^2 + C_{22}^2 + C_{23}^2)}} \dots (45)$$

$$lenb = \sqrt{\frac{(C_{11}^2 + C_{12}^2 + C_{13}^2 + C_{21}^2 + C_{22}^2 + C_{23}^2)}{2(C_{21}^2 + C_{22}^2 + C_{23}^2)}} \dots (46)$$

かくして (45) (46) 式を (30) ~ (41) 式に代入することにより、[FRAME]<sup>-1</sup> の各要素  $t_{ij}$  を求めることができ、また [FRAME]<sup>-1</sup> の逆行列をとることによって、

[FRAME] が得られる。こうして求めた lenb が結像距離であり、また [FRAME] がカメラの位置・姿勢である。上記の撮像装置 21 のキャリブレーションが完了する

と、つぎに第13図に示す手順に基づき投光装置22のキャリブレーションを実行することになる。このキャリブレーションは、カメラモデルが既知となった後、前記キャリブレーション用ワーク23に板状のスリット光を照射してスリット像を生成し、このスリット像を解析することにより、投光装置22のスリット光モデルを生成するものである。

ここでスリット光モデルとは、第14図に示す如く、スリット光40の平面を平面方程式で表現したものである。このスリット光40の平面方程式は、つぎの(47)式で与えられ、従ってスリット光モデルはこの式のパラメータ  $a_s, b_s, c_s, d_s$  の組として表現できる。

$$a_s x + b_s y + c_s z + d_s = 0 \tag{47}$$

まず第13図のステップ9で、スリット像を2値化するためのしきい値TH を決定した後、ステップ10で投光装置22をオンして、キャリブレーション用ワーク23に板状のスリット光40を照射する。これによりワーク23の平坦面24,25や床面に第7図に示すようなスリット光の交わり線27が生成され、この交わり線27は撮像装置21により撮像される(ステップ11)。撮像装置21は交わり線27を画像化してスリット像を求め、そのビデオ信号をインターフェイス20へ出力するもので、CPU12はスリット像を前記しきい値TH により2値化し、例えばスリット像の部分黒画素(データ「1」の画素)、それ以外の部分を白画素(データ「0」の画素)として、この2値画像を画像記憶部15に格納する(ステップ12)。

つぎのステップ13で、CPU12はスリット像上の像点の3次元座標を算出する。

第15図は、像点の座標算出方法を示している。同図\*

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{X_R - X_0}{\{(X_R - X_0)^2 + (Y_R - Y_0)^2 + (Z_R - Z_0)^2\}^{1/2}} \\ n_y &= \frac{Y_R - Y_0}{\{(X_R - X_0)^2 + (Y_R - Y_0)^2 + (Z_R - Z_0)^2\}^{1/2}} \\ n_z &= \frac{Z_R - Z_0}{\{(X_R - X_0)^2 + (Y_R - Y_0)^2 + (Z_R - Z_0)^2\}^{1/2}} \end{aligned} \tag{52}$$

なお像点Pの3次元座標  $(x_0, y_0, z_0)$  は、カメラモデルが既知の状態下では、つぎの(53)式により求まる。

$$\begin{aligned} x_0 &= f_{11}(PC_x \cdot I + ORG_x) + f_{12}(-PC_y \cdot J + ORG_y) + f_{14} \\ y_0 &= f_{21}(PC_x \cdot I + ORG_x) + f_{22}(-PC_y \cdot J + ORG_y) + f_{24} \\ z_0 &= f_{31}(PC_x \cdot I + ORG_x) + f_{32}(-PC_y \cdot J + ORG_y) + f_{34} \end{aligned} \tag{53}$$

上記の各式から像点Pの視線43を求めることができるから、つぎに物点Bが位置する平坦面の平面方程式を求

\* 中、 $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4$  はキャリブレーション用ワーク23の上下平坦面24,25の角点であって、各角点に対応するワーク画像41上の角点は $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4$  で示してある。上下平坦面24,25および床面上にはスリット光40の交わり線27が生成され、このワーク23を撮像したとき、ワーク画像41には交わり線27に対応するスリット像42が現れる。交わり線27は物点Bの集合であり、各物点Bとその像点Pとはレンズ中心Rを通る視線43によりその位置関係が決定される。

すなわち像点Pが与えられたとき、その像点Pに対応する物点Bの3次元座標は像点Pの視線43とキャリブレーション用ワーク23の平坦面(図示例の場合は上段の平坦面25)との交点として求めることができる。

いま視線43を表す直線をパラメータ表現すると、つぎの(48)式で与えられる。ただし $k_R$  はパラメータである。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_R + k_R \cdot n_x \\ Y &= Y_R + k_R \cdot n_y \\ Z &= Z_R + k_R \cdot n_z \end{aligned} \right\} \dots \tag{48}$$

上式中、 $(X_R, Y_R, Z_R)$  はレンズ中心Rの3次元座標であり、カメラモデルが既知の状態下でつぎの(49)~(51)式により求まる。

$$X_R = f_{14} + lenb \cdot f_{13} \tag{49}$$

$$Y_R = f_{24} + lenb \cdot f_{23} \tag{50}$$

$$Z_R = f_{34} + lenb \cdot f_{33} \tag{51}$$

かくて像点Pの3次元座標を  $(x_0, y_0, z_0)$  とすると、 $n_x, n_y, n_z$  はつぎの(52)式で与えられる。

める。まずカメラモデルおよびキャリブレーション用ワーク

23の形状データが既知であるから、ワーク画像41上の角点A<sub>1</sub> ~ A<sub>4</sub> およびB<sub>1</sub> ~ B<sub>4</sub> の画像上の座標(I, J) \*

\*をつぎの(54)(55)式により算出する。

$$I = \frac{1}{PC_x} \{ (t_{11}X_B + t_{12}Y_B + t_{13}Z_B + t_{14}) / \{ 1 - \frac{1}{lenb} (t_{31}X_B + t_{32}Y_B + t_{33}Z_B + t_{34}) \} \} - \frac{ORG_x}{PC_x} \dots (54)$$

$$J = \frac{-1}{PC_y} \{ (t_{21}X_B + t_{22}Y_B + t_{23}Z_B + t_{24}) / \{ 1 - \frac{1}{lenb} (t_{31}X_B + t_{32}Y_B + t_{33}Z_B + t_{34}) \} \} + \frac{ORG_y}{PC_y} \dots (55)$$

なお上式中、(x<sub>B</sub>, y<sub>B</sub>, z<sub>B</sub>) は算出しようとするマーク画像41の角点と対応関係にあるワーク23上の角点の3次元座標を意味している。

全ての角点A<sub>1</sub> ~ A<sub>4</sub>, B<sub>1</sub> ~ B<sub>4</sub> の3次元座標が求まると、つぎに着目する像点Pが角点A<sub>1</sub> ~ A<sub>4</sub> で決まる四角形44と角点B<sub>1</sub> ~ B<sub>4</sub> で決まる四角形45と、どのような包含関係にあるかを次表にて判断し、これにより物点Bが平坦面24, 25や床面のいずれに位置するかを判断する。

20 平面的方程式と前記視線43の方程式とを連立させて解くことにより、物点Bの3次元座標を算出する。

このようにしてスリット像42上の各像点Pの3次元座標(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>) が得られると、スリット光40の平面パラメータとの間に次式が成立する。

$$z_i = a_s x_i + b_s y_i + d_s + e_i \quad (56)$$

ただし(47)式においてc<sub>s</sub> = -1と置く。

ここでN個の点について上式の誤差項e<sub>i</sub>について

$$\sum_{i=1}^N e_i$$

30 を最小とするa<sub>s</sub>, b<sub>s</sub>, d<sub>s</sub>を次式を解くことにより得る(ステップ14)。

四角形44との関係	四角形45との関係	物点Bの位置する平面
内側	内側	平坦面25
外側	内側	-
内側	外側	平坦面24
外側	外側	床面

上記により物点Bが位置する平面を判別すると、その

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_s \\ b_s \\ d_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \dots (57)$$

ここで(57)式の各行列を[R][A][Z]と置くと、この(57)式はつぎの(58)式で表現できる。

$$[R] \cdot [A] = [Z] \quad (58)$$

そしてこの式中、スリット光モデルを表す行列[A]はつぎの(59)式で与えられる。

$$[A] = \{ [R]^t \cdot [R] \}^{-1} \cdot [R] \cdot [Z] \quad (59)$$

なお上記は第3図の装置例について撮像装置21および

20 投光装置22のキャリブレーションを説明したが、第2図の装置例については撮像装置21のキャリブレーションのみを実施すれば足り、しかもその方法は上記と同様であるから、ここではその説明は省略する。

<発明の効果>

この発明は上記の如く、3次元座標と、ラベルと、形状または配置の情報とが既知である特徴部分を複数個備えたキャリブレーション用ワークを用いてカメラモデル

のキャリブレーションを行うのに、キャリブレーション用ワークの前記既知の形状または配置の情報により、このキャリブレーション用ワークを撮像して得た2次元画像上の特徴部分を、ワーク上のいずれかの特徴部分のラベルによりラベル付けした後、同一のラベルを持つキャリブレーション用ワークの特徴部分と画像上における特徴部分との各座標を組にして用いた演算を実行して、カメラモデルを自動で生成するようにしたから、2次元撮像装置におけるカメラモデルのキャリブレーションの自動化が実現でき、撮像装置のカメラモデルのキャリブレーションを容易かつ短時間で実施できるなど、発明目的を達成した顕著な効果を奏する。

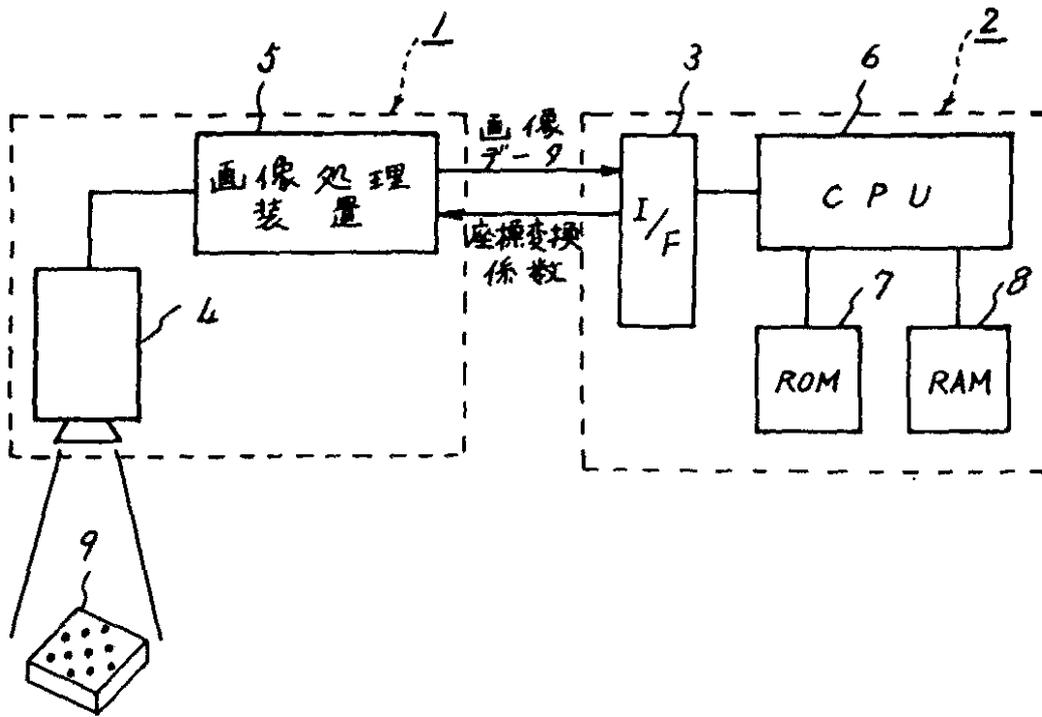
【図面の簡単な説明】

第1図はこの発明にかかる自動キャリブレーション装置の概念を示すブロック図、第2図はこの発明の一実施例\*

\*を示すブロック図、第3図はこの発明の他の実施例を示すブロック図、第4図はキャリブレーション用ワークの一例を示す斜面図、第5図はその平面図、第6図はキャリブレーション用ワークの他の例を示す斜面図、第7図はその平面図、第8図および第9図は撮像装置のカメラモデルの構造を説明するための説明図、第10図は撮像装置のキャリブレーションの実行手順を示すフローチャート、第11図はマーク画像の中心点抽出方法を示す説明図、第12図はマーク画像のラベル付け方法を示す説明図、第13図は投光装置のキャリブレーションの実行手順を示すフローチャート、第14図はスリット光モデルの構造を説明するための説明図、第15図は像点の座標算出方法を示す説明図である。

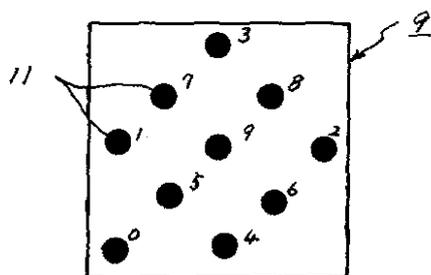
2.....自動キャリブレーション装置、4,21.....撮像装置、6,12.....CPU、9,23.....キャリブレーション用ワーク

【第1図】



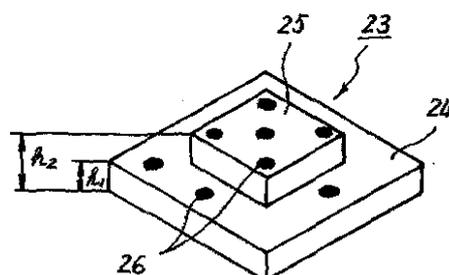
【第5図】

平面図

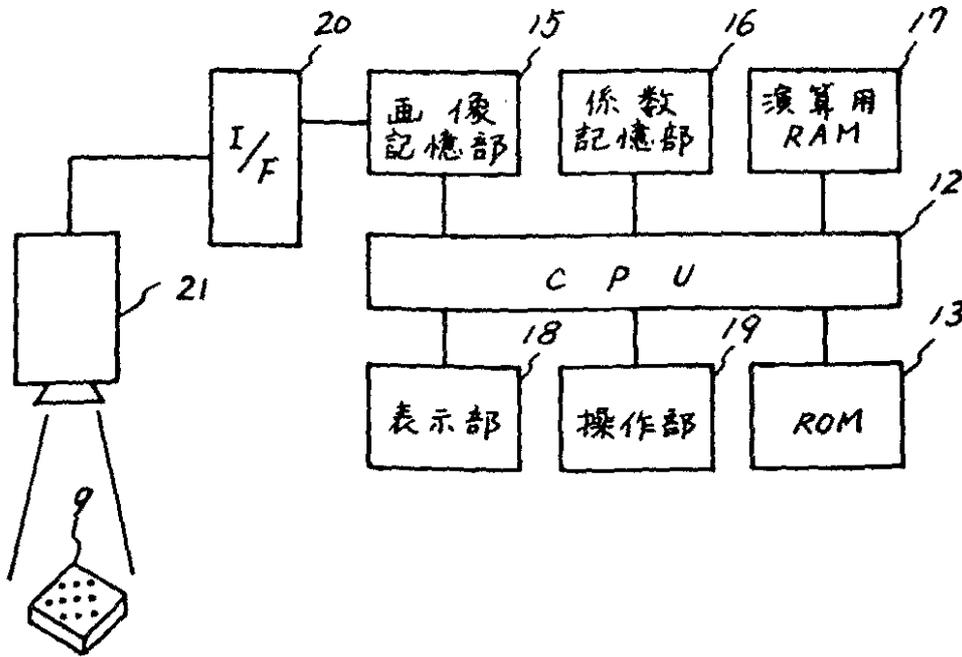


【第6図】

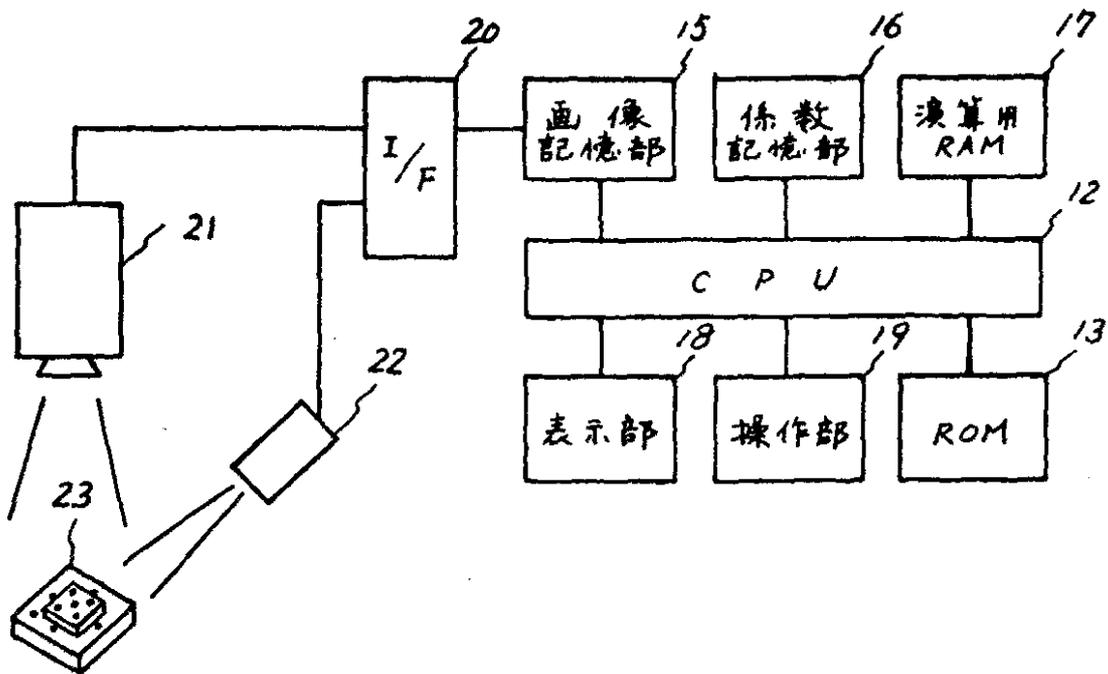
キャリブレーション用ワークの他の例を示す斜面図



【第2図】

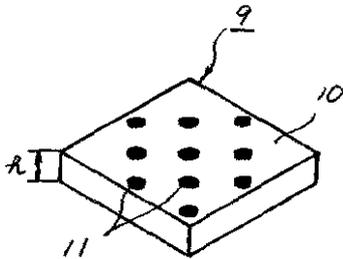


【第3図】



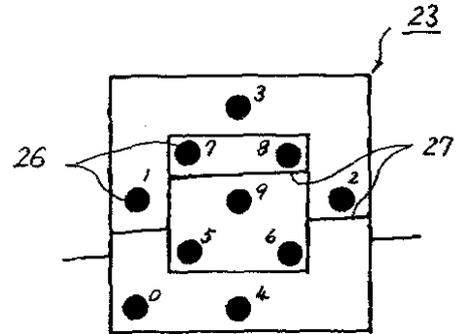
【第4図】

キャリアレーション用ワークの一例を示す斜視図



【第7図】

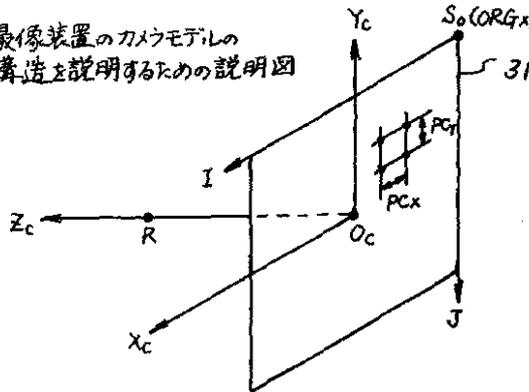
平面図



2... 自動キャリアレーション装置      6, 12... CPU  
 4, 21... 撮像装置      9, 14, 23... キャリアレーション用ワーク

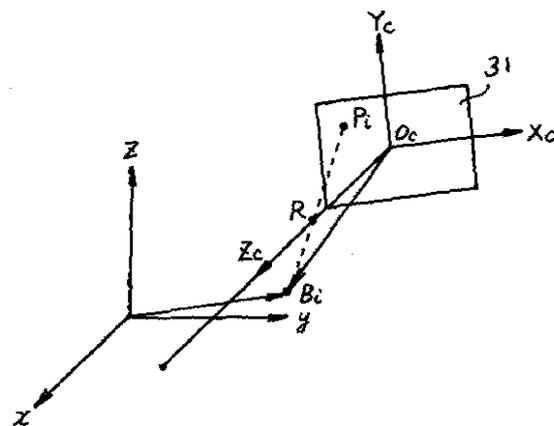
【第8図】

撮像装置のカメラモデルの構造を説明するための説明図



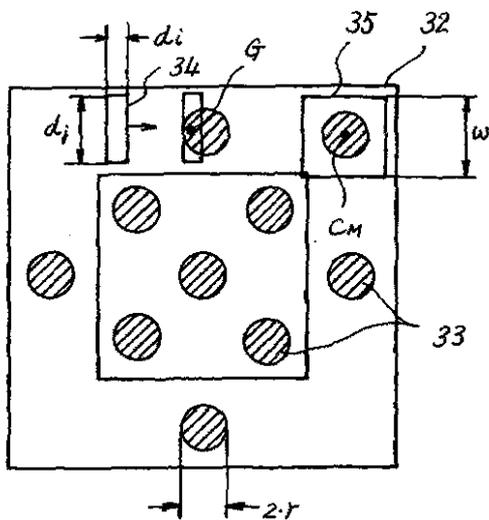
【第9図】

撮像装置のカメラモデルの構造を説明するための説明図

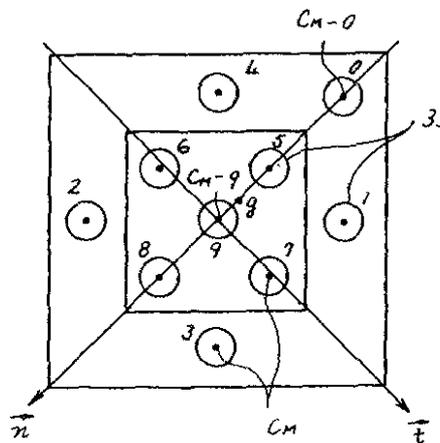


【第11図】

マーク画像の中心点抽出方法を説明図



【第12図】



【第10図】

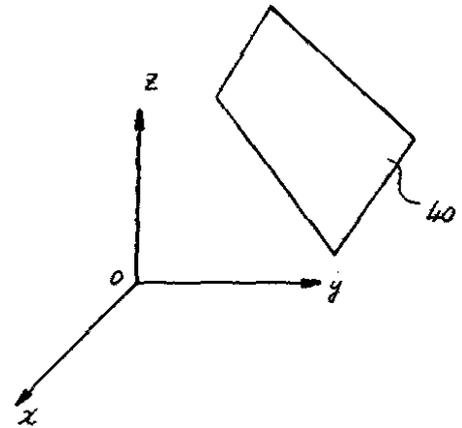
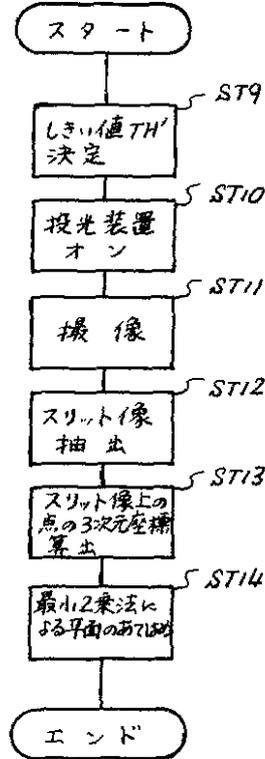
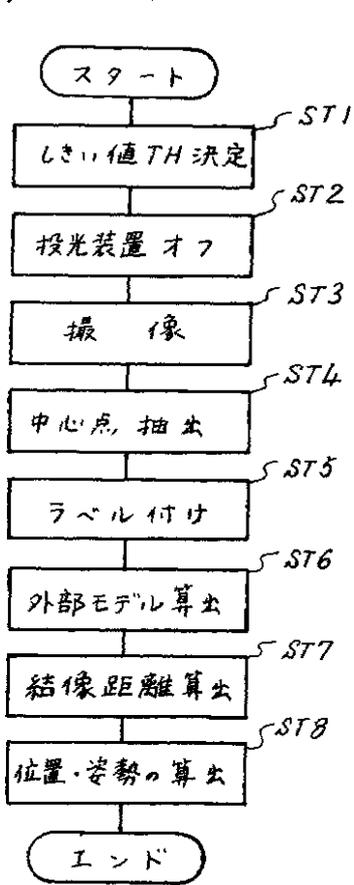
【第13図】

【第14図】

撮像装置のキャリブレーションの実行手順を示すフローチャート

投光装置のキャリブレーションの実行手順を示すフローチャート

スリット光モデルの構造を説明するための説明図



【第15図】

像点の座標算出方法を示す説明図

