

繰り返しコニックパターンを用いたカメラキャリブレーション

高橋 裕信 末広 尚士

新情報処理開発機構

つくば研究センター 能動知能研究室

茨城県つくば市竹園 1-6-1 つくば三井ビル 13F

E-mail: hironobu@trc.rwcp.or.jp

TEL: 0298-53-1684 FAX: 0298-53-1640

同一のコニック (円, 楕円) を繰り返して並べた標準パターンを用いて, 正確でかつ高速なカメラキャリブレーションの手法を提案する. カメラキャリブレーションでは空間中での位置と画像上での位置を対応付ける必要があるが, 大きく分けるとその基準点 (マーク) として線分等のエッジやその交点を用いる方法と, 面積を持った図形の重心を用いる方法等がある. 後者は本稿の実験に示すようにノイズ等による影響を受けにくく, 面積が大きくなるほどその効果が大きくなる利点があるが, 一方で透視投影なのでマークの空間中での重心と画像中での重心の不一致が大きくなる問題がある. ここではマークとしてコニックを用いた場合の重心の不一致を補正する方法を提案し, これをカメラのピンホールパラメータの導出とピンホールに一致しない非線型な歪みの検出に用いた例を示す. また特定の関係を持った楕円の繰り返しパターンを用いると画像処理での2値化や隣接するマークの識別が容易となる場合がある. これらについて実験例を含めて提案する.

Camera calibration with repeated conic patterns

Hironobu TAKAHASHI Takashi SUEHIRO

Real World Computing Partnership

Tsukuba Research Center Active Intelligence Laboratory

Tsukuba Mitsui Bldg. 13F, 1-6-1, Takezono, Tsukuba-shi, 305 JAPAN

TEL: +81-298-53-1684 FAX: +81-298-53-1640

The accurate and fast method of the camera calibration with repeated conic patterns (circles or ellipses) is proposed in this paper. In order to calibrate the camera parameters we must know the geometrical relationships between the 3 dimensional space and the image. The center of gravity of a pattern is often used as a mark and is more robust to the noises than using other higher features of patterns such as cross point of lines. There is a problem that the error of the center of the mark in the 3 dimensional space and image in the perspective view becomes larger when the projected mark is larger in the image. This paper proposes the method which compensate this error and applies it to the camera calibration.

1. まえがき

コンピュータビジョンは画像の理解や認識のための有力な手段としても、他のセンサーにかわる3次元測定装置としても広く利用されている。そのためコンピュータビジョンでは、認識対象とする3次元空間とカメラに撮像された画像の関係を正確に知ることが重要な課題とされている。カメラの画像と空間の位置を知るという意味ではすでに写真測量の分野ですでに多くの研究がなされているが、コンピュータビジョンがしばしばその対象とするビデオカメラでは解像度や歪みがコントロールできないのでその補償をする必要があったり、限られた情報のみからパラメータを可能な限り高精度に得る必要がある。また画像認識と組み合わせてマーカーとなる対象物を識別する方法を必要とする場合など、多くの研究課題がある[?].

新情報処理開発機構では実世界を取り扱うことができる計算機構について研究をすすめており、その一環として人間が行う組み立て作業を視覚システムで観察し、同じ作業を実行するロボットシステムの開発をすすめている[2]。視覚システムはロボット自身の動作も必要に応じて観察し、その動作の補正やロボットのおかれた状況を確認するためにも使用する。そこでカメラキャリブレーションシステムも、高精度であり、任意の大きさの範囲について、高速に使用できるものが望ましい。

ステレオカメラの外部パラメータ(回転と位置)の補正は自律的に行うこともできるが[3]、ここでは基準パターンとして同一のコニック(円、楕円)を繰り返し並べたパターンを用いて全てのパラメータを得る手法を提案する。

2. 方法

2.1 位置検出方法の比較

カメラキャリブレーションでは空間中での位置と画像上での位置を対応付ける必要がある。ここではその個々の位置を指示するための基準点(マーカー)を使う場合に重心を用いる方法が有利であることを示

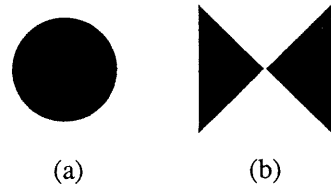


図 1: 比較パターン

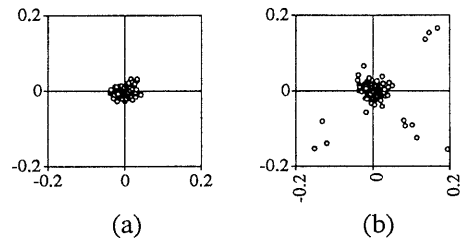


図 2: 計測誤差分布

す。同じ密度でマーカーを配置することを想定して、同じ画像の大きさの中に線分の交点を用いる方法と比較する。

図 1 にあるようなパターンの中心をマーカーとした場合の繰り返し誤差を実験により示す。円(a)の場合には二値化しその重心を求めた。交線(b)の場合には二値化して得られた直線の交点を求めた。それぞれ縦横 40 画素の画像を処理した。円の場合は直径を約 32 画素とし交点の場合と同じように白黒の画素の数を同じとなるようにした。その結果得られた中心点の分布を図 2 に示す。標準偏差を求めると、円の重心の分布は垂直・水平方向にそれぞれ(0.027, 0.018)、交線を二値化して得た場合は(0.085, 0.088)となり明らかに重心を用いた場合が有利である。

しかし重心を用いる方法では透視投影であるためにマーカーの空間中での重心と画像中での重心は正確に一致しない問題がある。特に画像中に投影されたマーカーの面積が大きいほどノイズに対して有利になるが、この誤差も大きくなる。

そこで本方法では、最初に画像中での各マーカーの重心が空間中でのマーカーの位置と一致するものとして

仮のピンホールカメラパラメータを求める。次に以下に述べるようにカメラパラメータとマークの記述した式からその中心位置のずれを予測する。その値を用いてカメラパラメータを求め直す。この処理を収束するまで繰り返してピンホールパラメータを求めることとした。

この重心の位置のずれを求めるには、全ピンホールカメラパラメータの一部を知るだけでよいので、ピンホールカメラパラメータに一致しない歪みの検出に用いる方法についても述べる。

楕円の繰り返しパターンの配置を工夫すると、画像処理において二値化や隣接するマークの識別を容易にすることができる。これについては具体的な実験例と共に述べる。

2.2 中心位置の補正

キャリブレーションの基準点として、3次元空間中の任意の平面に描いた楕円を撮像すると画像中では二次曲線に投影される。楕円が撮像面に交わるような極端な場合を除くと画像中では楕円に投影される。数値的には双曲線の漸近線の交点も同じ関係を満たし一般化できるが、ここでは重心を用いるので楕円に限定する。

画像中に楕円が投影されていて、その楕円の空間中での方程式とピンホールカメラパラメータが既知であるとする。この時画像中での楕円の中心が3次元空間中でどこにあったかを求める。

円の表現方法としては、まず仮想的な空間に基準となる円を次のように定める。この円は (X, Y) 平面上にあり、中心は $(0, 0, 1)$ の半径1の円である。

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 1 \\ z = 1 \end{cases} \quad (1)$$

実際に3次元空間中の任意の平面上にある楕円は上記の円のある空間を一次変換した次の行列で表現できる。

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

例えば X - Y 平面上の $(C_x, C_y, 1)$ を中心として描かれた半径 r の円ならば次のような式となる。

$$C = \begin{pmatrix} r & 0 & C_x \\ 0 & r & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ピンホールカメラパラメータは、空間中の点 (x, y, z) から画像上の点 (u, v) への変換として以下の G と D で与えられる [4]。

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + D \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{z'} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (6)$$

これらをまとめて $(X, Y, 1)$ から (x', y', z') への変換行列は次の式で表わされる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} &= GC \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} + D \\ &= (GC + D(001)) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

この式の中のアフィン行列 $(GC + D(001))$ を次のように展開する。

$$\begin{aligned} (GC + D(001)) &= HR \\ &= \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

R は回転を表す行列である。ここで $(X, Y, 1)$ を R で変換して得られる像を (x'', y'', z'') とし、その世界での平面 (u', v') に投影された像を考える。

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} = \frac{1}{z''} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} \quad (9)$$

そうすると以下の関係が成立しアフィン変換となる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{k} \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

アフィン変換なので双方で見える楕円の中心も同じアフィン変換に従う。そこで (u', v') 上での楕円の中心を求める。

R によって、基準円が変換され撮像面 (u', v') に投影される。たとえば基準円の中心は $(-R_{13}/R_{33}, 0)$ に投影される。 $R_{23} = 0$ なので (u', v') 上では u 軸上に長軸の一致した楕円となっている。楕円とその長軸が交わる点はそれぞれ

$$\left(-\frac{r_{33} - r_{13}}{r_{13} + r_{33}}, 0 \right) \quad (11)$$

$$\left(-\frac{r_{33} + r_{13}}{r_{13} - r_{33}}, 0 \right) \quad (12)$$

となるので、 (u', v') 上での中心は次の点となる。

$$\left(-\frac{2r_{13}r_{33}}{r_{33}^2 - r_{13}^2}, 0 \right) \quad (13)$$

(つまり $\tan 2\theta$)

R の逆行列を使って、さらに Z 軸が 1 になるように補正する。

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & 0 & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2r_{31} \\ 0 \\ r_{33} - r_{13}^2/r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2r_{11}r_{13} + r_{31}r_{33} - r_{31}r_{13}^2/r_{33} \\ 2r_{12}r_{13} + r_{32}r_{33} - r_{32}r_{13}^2/r_{33} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

とすると、画像上で中心に見えた点が (X, Y, Z) のどの位置にあったか求められる。式 14 に C をかけると、実際の空間での位置を知ることができる。

2.3 ピンホールカメラパラメータの計算

図 3 のような少なくとも 3 つの平面上に繰り返したコニックを描いたパターンを空間中に設置して撮像する。図中にあるように凸と凹のそれぞれを用途に応じて使っている。画像処理を行ない各マークご

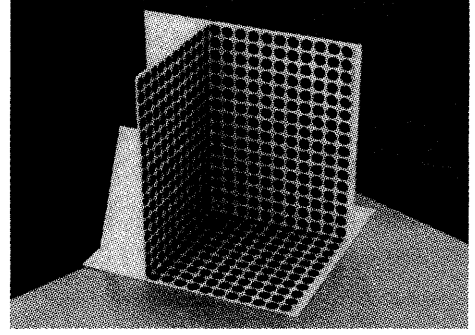


図 3: キャリブレーションパターン例

との画像中での重心を求める。 n 個のマークについて重心が得られたものとして、 $U_1(u_1, v_1), \dots, U_n(u_n, v_n)$ とする。また各マークの 3 次元空間中での位置は既知なので式 2 のパラメータは得られている $(C_{(1)}, \dots, C_{(n)})$ 。

最初はカメラパラメータが未知なので、各マークの C_i から、3 次元空間中での中心 $c_i(c_{xi}, c_{yi}, c_{zi})$ を求める。これらの点について以下の式の値を最小とするような G と D を求め仮のパラメータ G_0 と D_0 とする。最小化では最初に分母を繰りあげて概算値を求めてから、ニュートン法によって最適値を求めた。

$$\sum_{i=1}^n (U_i - R_i)^2 \quad (15)$$

ここで R_i は画像への写像である。

$$R_i = \frac{1}{g_{31}c_{xi} + g_{32}c_{yi} + g_{33}c_{zi} + d_3} \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & d_1 \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

次にこのパラメータと中心 C_i から、各マークの画像中での重心の空間中での位置を求めて c_i とし、式 15 によって G_1, D_1 を計算する。同様にして $G_2, D_2, \dots$ を求めて収束するまでくりかえす。しかし実際には一回の繰り返しのみで検出誤差より小さな値となっている。

2.4 画像のゆがみの計算

次にピンホールモデルに一致しないカメラの高次の歪みの検出にこの方法を適用する。投影像がピンホールカメラモデルに一致している必要十分条件を式 5,5 で表現できることとする。平面上のパターンを撮像した場合その平面上の座標 (m, n) 上の点が画像中で (u, v) に投影された場合次の式を満たすことが必要十分条件となる [5]。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{g'_{31}m + g'_{32}n + d_3} \begin{pmatrix} g'_{11} & g'_{12} & d_1 \\ g'_{21} & g'_{22} & d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m \\ n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

式 4 と同様に次のように置く。

$$G' = \begin{pmatrix} g'_{11} & g'_{12} \\ g'_{21} & g'_{22} \\ g'_{31} & g'_{32} \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} \quad (18)$$

図 4 のように平面上に繰り返して楕円のマークを描きそのパラメータが既知であるとする、式 2 と同じように C' が決められる。

$$C' = \begin{pmatrix} c'_{11} & c'_{12} & c'_{13} \\ c'_{21} & c'_{22} & c'_{23} \end{pmatrix} \quad (19)$$

その結果式 8 と同様に $(G'C' + D(001))$ が HR に展開できる。以下同様にして求めると画像上での重心が、撮像した平面上でどこにあったかがわかる。歪みを求める場合は、まず式 15 と同様にして G'_0 と D_0 を求めてから重心の補正を繰り返して正確な G'_n と D_n を求める。次にこの式によって与えられる (u', v') と画像上に観測された (u, v) を比較してその近傍での歪みの大きさとする。

画像中で大きく歪んだ部分があると、その近傍では G'_n と D_n は異なってくるので、可能であれば歪みをモデル化して、各マークごとに G'_n と D_n を求め直せばより正確になることが期待できるが、現在の系では明らかに検出誤差以下なので実験では行っていない。

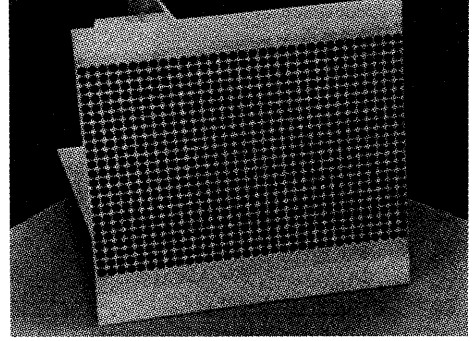


図 4: 歪みの検出パターン

3. 画像処理方法と実験結果

このシステムではそれぞれの円が空間中のどの円に対応するのかをすべて自動的に行ない、汎用性や利便性のために可能な限り閾値などの設定をしなくてよいようにしている。

3.1 キャリブレーションパターン

ピンホールカメラパラメータの計測ではいずれの 4 点も同一平面上にない 6 点について画像上の点と空間が対応つけられればよい。しかし対応点が密により多くある方が精度の向上が期待できるので、この実験系では図 3 のように 3 面に円が垂直水平に等間隔で並んだものを使用した。カメラに向って凸の箱型のパターンは認識しようとする対象物が固定されている場合等にその上に被せて使用する。凹のパターンは大きく作れるので、部屋全体等より広い空間を対象とするのに適している。3 面頂点に最も近い円については位置を識別するために中を白く抜いている。

マークの位置を正確にするために、円のパターンとその面の端点を印刷した特殊フィルムをアクリル板に貼り付けてから、一緒に切り取って組み立てた。精度は円の中心位置で 0.1mm 以下の誤差となるようにしている。

歪みの測定では同じフィルムを張った 1 平面を使用する。

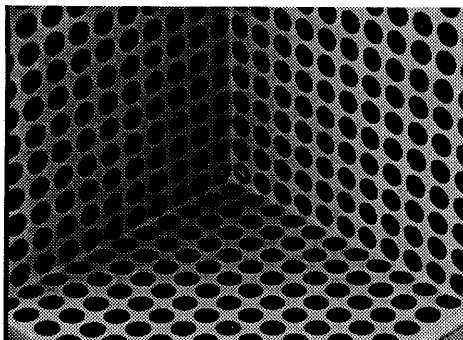


図 5: 円の繰り返しパターン

3.2 画像の平均と二値化

マークの円とその他の部分を識別するために最初に二値化を行う必要がある。しかし例えばピンホール用の3面のブロックでは、それぞれの面の向きが異なるので閾値を面ごとに設定しなければならず不便である。またカメラや照明条件が異なることに適当な閾値を与えるのは汎用性の点で望ましくない。

そこでキャリブレーションに使用しているパターンを図5に示した。それぞれの円の間隔を d とする時、半径 r を次のようにすると円の部分とその他の部分の面積が同じとなる。

$$r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} d \simeq 0.40d \quad (20)$$

そこで撮像した得られた画像の各点について、円よりも大きい近傍で平滑化した値を求めて原画像での値と比較して二値化すると安定した結果が得られる(図6, 7)。

3.3 画像のラベル付けと位置の計測

二値化画像のラベル付けには境界線追跡法を用いた。この方法ではラベル付けそのものが高速であることに加えて、境界線追跡によって周囲長や、中の穴を塗りつぶした場合の面積、重心位置、中にある穴のそれぞれの大きさまで同時に知ることができる??。

まず円らしいということから、面積に対して極端に周囲長の長いもの、大きな穴のあるもの、極端に小さ

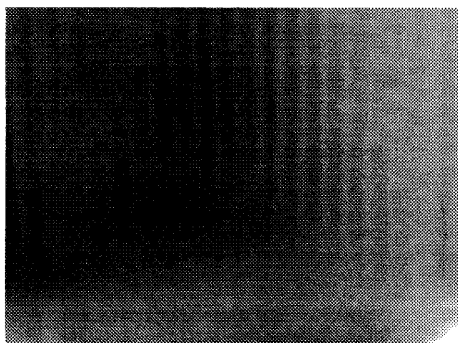


図 6: 平滑化画像

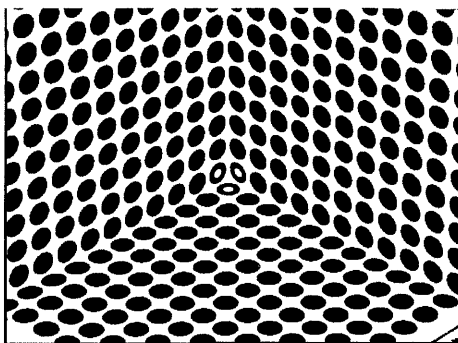


図 7: 二値化画像

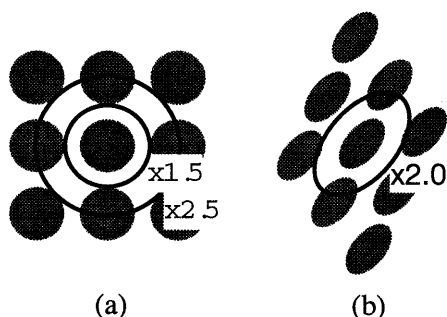


図 8: 隣接関係の検出

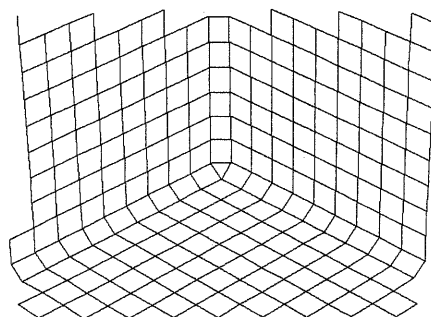


図 9: 隣接関係の検出結果

なものを排除して、残りの領域を円の候補とする。

3.4 隣接関係の検出

どの円が空間中のどの位置にあったかを知るには、各マークの本来の隣接関係を知る必要がある。しかしもとも平面がカメラの光軸に対して斜めに投影されたり、カメラのアスペクト比が極端に違っていることもあるので、単純に各マークの重心間の距離から隣接関係を求めることはできない。

図 5 のような配置にすると隣接関係の検出にも有利となる。図 8(a) のように、マークを重心を中心にして約 1.5 倍すると水平垂直方向の円と接し、約 2.5 倍した時に斜め隣りの円と接する。これは画像に投影された場合 (b) でも近傍が正射影に近ければ成立するので識別に利用できる。

各マークの候補について、その境界線を追跡し、その重心を中心として 2 倍した位置にある画素を含んでいるマークを隣接しているマークの候補とする。さらに互いに見て隣接候補と見られる場合のみを選択した。その結果図 9 のような関係が得られる。

3.5 順序付け

ピンホールカメラパラメータの計測では、次に各面に分割する。中に穴のあるマークを基点として近傍の隣接したマークを順次探していく。この中で十分な数 (10 個程度) のマークを含む面を候補とする。さらに隣りあった 3 面の組み合わせを選択して、それぞ

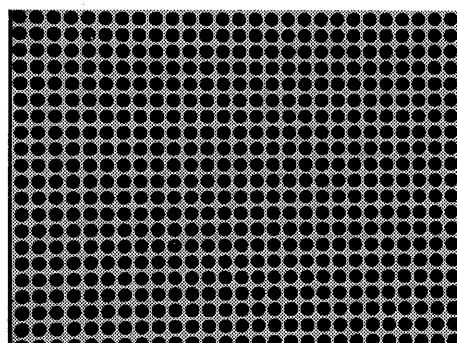


図 10: 歪み検出の実験例

れの円の式 C_i を割り当ててカメラパラメータを計算する。

歪みの検出では、等間隔で並んだパターンであるためにパターンの水平垂直方向にずれても、得られる結果は同じとなる。画像の中心付近の適当なマークを基点に定めて、隣接関係からそれぞれに式 C_i を割り当てて歪みを求める。一例として図 10 から図 11 が得られる。図中の線分は各マークの画像中での位置から歪みを補正した場合の位置に伸ばしたもので、さらに 10 倍に拡大している。

3.6 実験環境と処理速度

これらのアルゴリズムは SUN (SS20 Model 61) にフレームバッファ (Datacell 製 S2200) を接続し

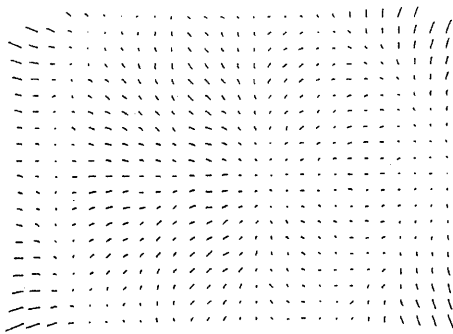


図 11: 歪み検出の実験結果

カラー画像の輝度のみを使って処理する。いずれも計測時間は1画面あたりほぼ2.0秒である。

4. まとめと今後の課題

実験例では真円を用いた場合についてのみ述べたが、基本パターンを一次変換したものであればこの方法が応用できる。ピンホールカメラパラメータの検出用のパターンとして真円を使用すると図3のように3面以上に貼るので、どうしても各面上の円は長楕円で投影され、方向によって精度が異なったりする問題がある。この方法では一般の楕円に利用できるので画像中で真円に近くなるようなパターンを用いることもできる。また画像処理装置によっては方向によって極端に解像度の違う場合もあり、解像度の悪い方向にパターンを引き延ばすような一次変換を行うこともできる。

すでにこのシステムはこまたマニピュレータの較正や動作の補正等にも利用されているが、ロボットの計画等にしばしば用いられている Eus-Lisp [6] 上で任意の画像について動作するように移植作業が行なわれている。

謝辞

本研究の推進にあたって日頃有益なご助言をいただいている新情報処理開発機構および電子技術総合研究所知能システム部の諸兄に感謝する。また高精度の基準ブロックを作成していただいた

メディアドライブ(株)の諸氏に感謝する。

参考文献

- [1] 出口: カメラキャリブレーション: 情報処理 CV 研究, (1993).
- [2] 末広, 坂根: RWCP におけるロボット研究の概要: 日本ロボット学会学術講演会, (1993).
- [3] 富田, 高橋: ステレオカメラのセルフキャリブレーション: 情報処理, (1993).
- [4] 高橋, 富田: ロボットビジョンのためのカメラキャリブレーション: ロボット誌 vol10, No.2, pp.177-184, (1992).
- [5] H. Takahashi, F. Tomita: Primitive-based Stereo Vision for Can Picking Robot: Int. Conf. of Machine Vision and Applications (1992).
- [6] T. Matsui: EusLisp Reference Manual v7.27: ETL-RM87-D6E (1992)