楕円成長法による楕円の自動当てはめ

岡部 光生　　金谷 健一　　太田 直哉

群馬大学工学部情報工学科

円形物体を撮影した画像から物体の３次元位置を正確に計測することを目的とし、画像から楕円を自動的に抽出する新しい手法を提案する。これは円検出のハフ変換を用いて楕円への接触円を検出し、それを逐次的に成長させて楕円とするものである。これが可能であるのは、最近の楕円当てはめ技術やロバスト推定の進歩によって、楕円のごく一部からでも楕円全体がよい精度で復元できるようになったからである。ただし従来の円検出のハフ変換は円に対しては効果的であるが、接触円の検出には必ずしも適していないので、独自の工夫と改良を行う。そして実画像例によって提案手法の有効性を確認するとともに、３次元復元のための回転台の校正例を示す。

キーワード: 楕円当てはめ、円弧当てはめ、ハフ変換、くりこみ法、ロバスト推定、最小メジアン法

Automatic Ellipse Fitting by Ellipse Growing

Mitsuo Okabe, Kenichi Kanatani and Naoya Ohta

Department of Computer Science, Gunma University, Kiryu, Gunma 376-8515 Japan

With a view to 3-D measurement of a circular object in the scene from its image, we present a new method for automatically detecting ellipses in images. We first detect an osculating circle to the ellipse that we want to detect by using the Hough transform. We then grow it into an ellipse by iterations. This is made possible by the recent progress of ellipse-fitting techniques and robust estimation algorithms, which enable us to predict the entire ellipse from a small fragment of it fairly accurately. However, the existing Hough transform technique for circle detection does not necessarily work well for osculating circles, so we introduce various techniques and procedures to make it fit to ellipse detection. We confirm the effectiveness of our technique by real image experiments and show an application to calibration of a circular turntable to be used for 3-D reconstruction of objects.

Key words: ellipse fitting, circle fitting, Hough transform, renormalization, robust estimation, least-median method

謝辞: 本研究の一部は文部科学省科学研究費基盤研究Ｃ (2) (No. 11680377) によった。

*376-8515 桐生市天神町 1–5–1，群馬大学工学部情報工学科，Tel: (0277)30-1844，Fax: (0277)30-1801
E-mail: mitsuo@ail.cs.gunma-u.ac.jp, kanatani@cs.gunma-u.ac.jp, ohta@cs.gunma-u.ac.jp

1. 序論

人工物体には円形や球状のものが多く、それらが画像上では楕円に投影されることから、画像上で楕円を検出する研究が数え切れないほど多くなされている。主流はハフ変換である。楕円は 5 パラメータで指定されるから、各エッジ点に対してそこを通り得る楕円のパラメータを量子化した 5 次元ハフ空間に投票し、多数の票を得たセルを取り出せばよい。

しかし、これを直接に行うと量子化数の 5 乗のメモリ量が必要となり、計算量も増えるので、種々の工夫が提案されている。例えば処理を多段階に分割し、一部のパラメータが独立に求まるときはそれを先に投票で求める。そうでなければ例えば 3 パラメータを固定して残りの 2 パラメータを投票し、これを量子化した 3 パラメータ値すべてについて調べる。その際、あり得ない値を排除する拘束条件を適用したり、画像あるいはハフ空間を階層的に分割して徐々に解像度を上げたり、ランダムサンプリング (遺伝アルゴリズムもその変形) が用いられたりする。さらに各点ごとではなく 2 点対 (ランダムサンプルあるいは平行線をスイープした交点) を用いたり、エッジ方向まで考慮したり、あるいは連結エッジを用いたりするなどして、楕円またはその中心の候補数を絞るなど、さまざまの計算時間と記憶容量削減の手法が工夫されている [2, 4, 17, 11, 12, 13, 15, 18, 20, 21, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]。これらは物体認識のために、楕円状の領域がいくつどこに存在するか調べることが主目的のようである。

もう一つはエッジ点を連結した線図形に基く方法である。これは線図形の直線部に直線を、曲線部に楕円を当てはめて線分と楕円弧でシーンをモデル化するものである [3, 9, 19]。分割点の選択は当てはめた直線や楕円との残差で判定する。

最近、浅山ら [1] は円抽出のハフ変換を用いて楕円に接する 2 個の円を求め、それから楕円の中心を求め、残りの 3 パラメータをハフ変換で求めている。しかしこの方法では楕円のほぼ全体が画像に現れるとともに、それ以外の物体があまり現れてはならないという制約がある。

本論文では物体認識のために楕円状の領域を検出したり曲線を楕円弧で近似したりするのではなく、ロボットの制御を想定して、文献 [16, 22, 25, 27] のように円形物体が撮影されていることが既知の画像から物体やカメラの 3 次元位置を計測することを目的とし、そのための新しい手法を提案する。

このような場合は楕円のごく一部が検出されればよい。これは、最近楕円当てはめ技術が進み、短い楕円弧に全体の楕円を精度よく当てはめることができるからである [8, 10]。そのための「くりこみ法」と呼ぶ手法のプログラムが公開され[1] [14]、3 次元復元のための回転台の校正に利用されている [25, 27]。この状況を考慮して、本論文では浅山ら [1] のようにまず接触円を抽出し、その接触部分に楕円を当てはめ、当てはめた楕円の接触部分に再び楕円を当てはめることを繰り返す方法 (楕円成長法と呼ぶ) を採用する。

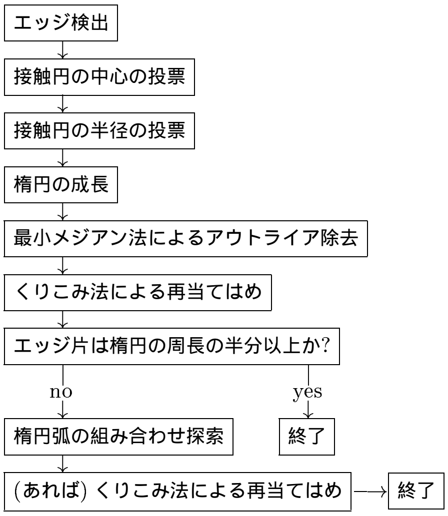


図 1: 楕円当てはめの処理の流れ。

円は 3 パラメータ図形であるから、画像中に円が存在すればハフ変換によって効率的に検出できる [5, 24]。しかし楕円しか存在しない場合は接触円の投票数のピークは低くなり、偽のピークと区別がつきにくい。そこで本論文では連結エッジから円の中心を推定して投票する。そして半径を符号付き投票によって定める。得られた接触円を初期値として、くりこみ法によって楕円を正確に当てはめ、「最小メジアン法」[23] によってアウトライアを除去する。そして、分離された楕円弧の組み合わせ探索を行なう。この処理の流れを図 1に示す。

以下、これらの処理の詳細を順に述べ、提案手法の有効性を実画像例で確認するとともに、応用として杉本ら [25] や鵜飼ら [27] と同じ回転台の校正例を示す。

2. 処理手順

2.1 エッジ検出

エッジ検出は Sobel 演算子と零交差法とを併用し、零交差法で得られるエッジと Sobel 演算子によるエッジ強度の高い部分との論理積 (AND) をとる。その後、分岐点で切断し、得られたエッジ片からある長さ (実験では 61 画素) 以上のものを取り出してリストに登録する。

[1] http://www.ail.cs.gunma-u.ac.jp/Labo/research.html

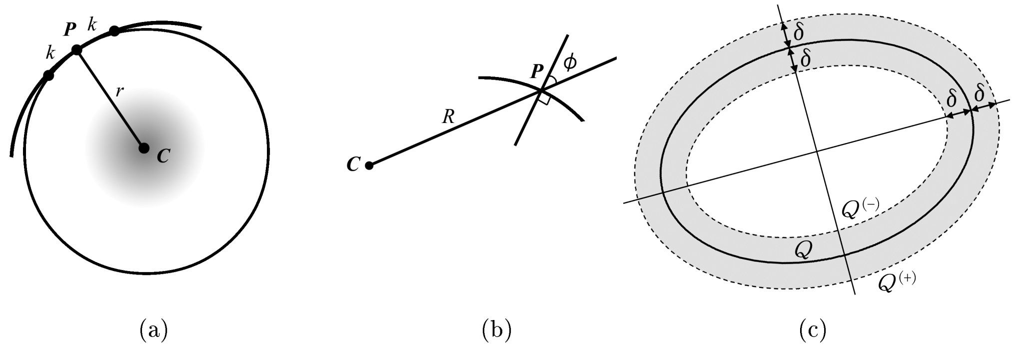


図 2: (a) 画素 P とそれから k 画素離れた 2 点を通る円の中心の推定する。(b) 推定した中心 C から距離 R の画素は重み $e^{-R^2/2s^2}\cos\phi$ で値 R を投票をする。(c) 推定した楕円から δ 画素以内の領域のエッジ片に楕円を当てはめる。

2.2 接触円の中心の投票

接触円の中心を求める原理は Ioannou ら [5] と同様のハフ変換である。彼らは各エッジ点でエッジ片の法線に沿って一定値を投票しているが、これは画像中に円がある場合に効果があり、楕円の場合にはピークが弱くなる。そこで次のように工夫する。

原画像と同じサイズのフレームをハフ空間とし、登録したエッジ片の画素 P についてその両側に k 個離れた 2 点と P を通る円の中心 C と半径 r を計算し (図 2(a))、点 C を中心として各方向に標準偏差 γr の正規分布に比例した実数値を投票する (実験では $k = 30$, $\gamma = 1/10$ とした)。ただしエッジ片の両側の k 画素については処理を行わない。さらにこれに $1/\sqrt{r}$ の重みをつける。これはエッジ片が同じ長さなら曲率が大きいほうを優先させるとともに、中心角が同じ円弧なら半径の大きいほうを優先させるためである。

これをすべての登録エッジ片について行い、最大のピークを接触円の中心とする[2]。そしてハフ空間のピークを検出し、得票数の高いものから数個 (実験では 4 個) を接触円の中心の候補とする。

2.3 接触円の半径の投票

次にやはり Ioannou ら [5] と同様のハフ変換で半径を求める。彼らは求めた中心からすべてのエッジ点までの距離を投票しているが、これは円の場合に効果があり、楕円の場合には偽のピークが多くなる。そこで次のように工夫する。

原画像の大きさ程度の 1 次元ハフ空間を用意する。そして、登録したすべてのエッジ片のエッジ点 P から求めた接触円の中心の候補 C までの距離 R を計算し、R を中心として両側に 1 画素を標準偏差とする正規分布に比例した実数値を投票する。さらにこれにエッジ点 P の方向 (Sobel 演算子の出力から計算される) と直線 CP の成す角を ϕ として (図 2(b))、$e^{-R^2/2s^2}\cos\phi$ の重みをつける (実験では s は画像サイズの $1/4$ とした)。この $e^{-R^2/2s^2}$ は中心から大きさが s 画素程度の部分のみを考慮するためである[3]。一方 $\cos\phi$ は密集したエッジ点の寄与を除去するためであり[4]、エッジ片が円周方向からずれるほど重みが小さくなり、半径方向に一致すると $\mathbf{0}$ になる。さらに濃淡の方向が反対の点は重みの符号が逆になるので、例えば点 C を内部に含まない閉曲線の寄与は 0 になり、接触円を構成する画素の寄与が増幅される。

そしてこの 1 次元ハフ空間のピークを検出して得票数の最も高いものを選ぶ。さらにこれを接触円の各候補について調べ、最も得票数の最も高いものを一つ残す。

2.4 楕円の成長

得られた円を初期楕円とし、現在の楕円 (最初は円) の長軸、短軸を δ 画素だけ伸縮させた楕円にはさまれる環状領域を考え (図 2c)、その内部のエッジ片に対して楕円を当てはめる。この環状領域は次のように計算される。

楕円を含む 2 次曲線は次の形の方程式をもつ。

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2f(Dx + Ey) + f^2F = 0 \quad (1)$$

ただし f は任意に固定したスケール因子 (例えば画像サイズ) である。これが楕円を表す条件は次のように書ける。

$$AC - B^2 > 0 \quad (2)$$

ベクトル $\boldsymbol{x}$ と行列 $\boldsymbol{Q}$ を

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x/f \\ y/f \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{Q} = \begin{pmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{pmatrix} \quad (3)$$

と定義すると式 (1) は次のように書ける [6, 7]。

$$(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{Qx}) = 0 \quad (4)$$

[2] 実際には効率化のために 1 画素おきに投票している。また投票領域を一方の辺がエッジの法線方向、他の辺が座標軸に平行な平行四辺形で近似するなどの近似を導入している。

[3] 計算を効率化するために実際には関数 e^{-x^2} の多項式近似を用いている。

[4] $\cos\phi$ はベクトルの内積から計算するので、三角関数を計算する必要はない。

ただし $(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b})$ はベクトル $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ の内積を表す。この楕円を軸方向に δ だけ拡大、縮小した楕円を表す $\boldsymbol{Q}^{(+)}$, $\boldsymbol{Q}^{(-)}$ は次のように計算される。

1. 次のように置く。

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} A & B \\ B & C \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{c} = \begin{pmatrix} D \\ E \end{pmatrix}$$

$$c = (\boldsymbol{c}, \boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{c}) - F \tag{5}$$

2. 行列 $\boldsymbol{S}$ の固有値を λ_1, λ_2 とし、対応する単位固有ベクトルを $\boldsymbol{u}_1$, $\boldsymbol{u}_2$ とする。

3. $\lambda_1^{(\pm)}$, $\lambda_2^{(\pm)}$ を次のように計算する。

$$\lambda_1^{(\pm)} = \frac{c}{(\sqrt{c/\lambda_1} \pm f\delta)^2}$$
$$\lambda_2^{(\pm)} = \frac{c}{(\sqrt{c/\lambda_2} \pm f\delta)^2} \tag{6}$$

4. 次のように行列 $\boldsymbol{S}^{(+)}$, $\boldsymbol{S}^{(-)}$ を計算する。

$$\boldsymbol{S}^{(\pm)} = \boldsymbol{U} \begin{pmatrix} \lambda_1^{(\pm)} & \\ & \lambda_2^{(\pm)} \end{pmatrix} \boldsymbol{U}^\top \tag{7}$$

ただし $\boldsymbol{U}$ はベクトル $\boldsymbol{u}_1, \boldsymbol{u}_2$ を列とする 2×2 行列である。

5. 次のように行列 $\boldsymbol{Q}^{(+)}$, $\boldsymbol{Q}^{(-)}$ を計算する。

$$\boldsymbol{Q}^{(\pm)} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{S}^{(\pm)} & \boldsymbol{S}^{(\pm)}\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{c} \\ (\boldsymbol{S}^{(\pm)}\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{c})^\top & F + (\boldsymbol{c}, \boldsymbol{S}^{-1}(\boldsymbol{S}^{(\pm)} - \boldsymbol{S})\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{c}) \end{pmatrix} \tag{8}$$

この結果、式 (4) の楕円をはさむ幅 δ の環状領域が次のように判定できる。

$$(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{Q}^{(+)}\boldsymbol{x})(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{Q}^{(-)}\boldsymbol{x}) < 0 \tag{9}$$

次に、この環状領域の内部にある部分エッジ片で最も長いものを選択し、くりこみ法 [8] によって楕円を当てはめる。これは通常の最小二乗法 [28, 32] と異なり、短いエッジ辺からでも全体の楕円がよく予測できる [10, 14]。そして、得られた楕円を再び伸縮し、これを収束するまで反復する。

なお、くりこみ法は楕円、双曲線、放物線を含む一般の 2 次曲線を当てはめる手法であり、エッジが短い場合は双曲線や放物線が当てはまることがある。実験ではまず $\delta = 4$ 画素とし、式 (2) を満たさない解が得られたら δ を 1 ずつ増やし、$\delta = 10$ でも楕円以外であれば初期円を返して次の処理に進むようにした。

2.5 最小メジアン法

当てはめた楕円が収束しても、用いたエッジ点がすべて楕円を構成しているとは限らない。そこでロバスト推定 [23] によってアウトライアを除去する。これは次のように行う。

当てはめる画素を式 (3) の第 1 式のようにベクトル表示したものを $\{\boldsymbol{x}_\alpha\}$, $\alpha = 1, ..., N$ とする。統計的に最適な当てはめは次式を最小にするものである [8]。

$$J = \sum_{\alpha=1}^{N} \frac{(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{Q}\boldsymbol{x})^2}{\|\boldsymbol{P}_{\mathbf{k}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}\|^2} \tag{10}$$

ここに $\boldsymbol{P}_{\mathbf{k}} = \mathrm{diag}(1, 1, 0)$ (対角要素 1, 1, 0 の対角行列) である。くりこみ法はこれを最小化するものである。しかし、これは選んだ画素のすべてが楕円の要素 (インライア) である場合にのみ正しい結果を与える。一般にはそうでないので、次の最小メジアン法 [23] によってアウトライアを除去する。まず $\boldsymbol{Q}_m = \boldsymbol{O}$, $S_m = \infty$ と初期化する (∞ は十分大きい数)。そして次の操作を収束するまで反復する。

1. $\{\boldsymbol{x}_\alpha\}$ からランダムに 5 点を選ぶ。
2. 選んだ 5 点を通る楕円の行列 $\boldsymbol{Q}$ を計算する。
3. 次のようにメジアンを計算する。

$$S = \mathrm{med}_{\alpha=1}^{N} \frac{(\boldsymbol{x}_\alpha, \boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}_\alpha)^2}{\|\boldsymbol{P}_{\mathbf{k}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}_\alpha\|^2} \tag{11}$$

4. $S < S_m$ であれば $\boldsymbol{Q}_m \leftarrow \boldsymbol{Q}$, $S_m \leftarrow S$ と更新する。

収束したら次の条件を満たす $\boldsymbol{x}_\alpha$ をインライアと判定する[5]。

$$\frac{(\boldsymbol{x}_\alpha, \boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}_\alpha)^2}{\|\boldsymbol{P}_{\mathbf{k}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}_\alpha\|^2} < 10S_m \tag{12}$$

実験では環状領域での当てはめでは 10 回、拡張した楕円内では 100 回連続して $S \geq S_m$ となることを収束判定条件とした[6]。ただし途中手で楕円以外が得られたら無視する。そして、得られたインライアにくりこみ法で楕円 $\boldsymbol{Q}$ を当てはめ直すとともに、そのエッジ片のインライアを両端とする最長部分を e とする。

2.6 楕円弧の組み合わせ探索

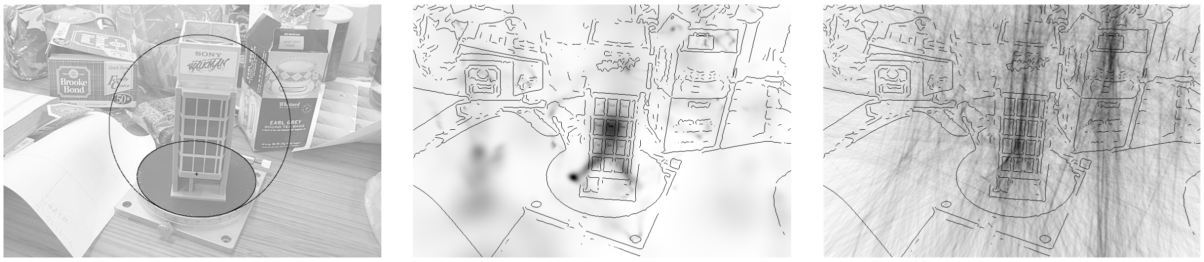
得られたエッジ片 e が楕円の半分以上あるときは終了する[7]。そうでないときは、当てはめた楕円 $\boldsymbol{Q}$ を $1 + \gamma$ 倍に拡張する。式 (6) を

$$\lambda_1^{(\pm)} = \frac{\lambda_1}{(1 \pm \gamma)^2}, \qquad \lambda_2^{(\pm)} = \frac{\lambda_2}{(1 \pm \gamma)^2} \tag{13}$$

[5] 文献 [23] に基づき、データ点数の大きい場合の誤差の標準偏差の推定式 $\sigma \approx 1.4826\sqrt{S_m}$ を用い、式 (12) の右辺を $(2.13\sigma)^2$ としたものである。

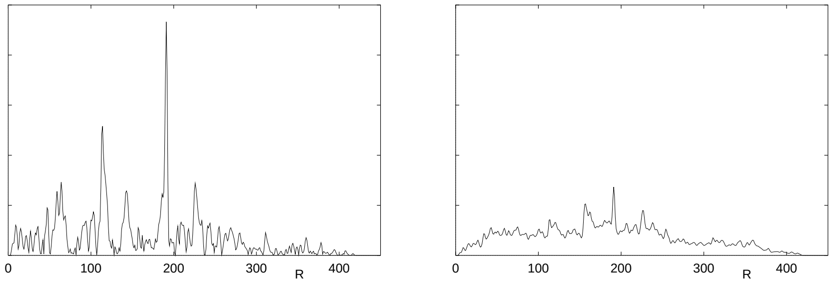
[6] 反復回数とアウトライア率および解の正解率の関係は文献 [23] 参照。

[7] 両端が開く方向に向いているか閉じる方向に向いているかで判定する。



(a) (b) (c)

図 3: 接触円の中心の推定。(a) 推定した接触円と当てはめた楕円。(b) 中心の候補点の投票。(c) 単純なハフ変換。



(a) (b)

図 4: 接触円の半径の投票数。(a) 提案手法。(b) 単純な投票。

に換えればそれぞれ楕円全体を $1 \pm \gamma$ 倍にしたものが得られる (実験では $\gamma = 1.2$ とした)。そして拡張した楕円の内部に含まれる一定長 (実験では 20 画素) 以上のエッジ片 e' をランダムに選び、e から 4 点, e' から 1 点を選び、前節で述べた最小メジアン法で楕円を当てはめる。これを e, e' に対するそれぞれのメジアンの和が収束するまで反復し、メジアンの和が初期のメジアンの 4 倍以上であれば初期の $\boldsymbol{Q}$ を採択する。そうでない場合は e, e' のそれぞれに対して式 (12) の基準でインライアを選び、それらにくりこみ法で当てはめた楕円を出力する。

以上は楕円を一つ抽出する処理であるが、複数の楕円を抽出するには、抽出した楕円のエッジ片を除去して、同じ操作を行えばよい。

3. 実画像例

図 3(a) は推定した接触円とそれを成長させて当てはめた楕円を原画像上に重ねたものである。図 3(b) は原画像から得られたエッジ画像上に接触円の中心の候補の投票数を濃淡値として表示したものである。比較のため図 3(c) に Ioannou ら [5] が行なったような単純なハフ変換 (各エッジ点でエッジ片の法線とその両側に 2 画素だけ正規分布に比例する重みをつけた投票) を示す。本手法の改良によって投票が可能性の高いところに集中し、接触円検出の安定性が向上することがわかる。

図 4(a) は接触円の中心の候補点に対する半径の投票結果である。比較のため図 4(b) に Ioannou ら [5] のように、すべてのエッジ点までの距離とその両側に 2 画素だけ正規分布に比例する重みをつけたものの投票結果を示す。ただし投票総数が一定となるようにスケールを合わせている。図 4(a) ではエッジが複雑に密集している部分の正負の投票が打ち消しあって 0 に近く、弧状の部分からの寄与が強調されていることがわかる。

図 5の左は分割された楕円を含むエッジ画像である。この場合は初期円をはさむ環状領域中のエッジ片には $\delta = 10$ としても双曲線が当てはまる。そこで最小メジアン法で楕円を当てはめ、組み合わせ探索に移る。右に初期円、くりこみ法で当てはめた双曲線、最小メジアン法で当てはめた楕円、および最終的に得られた楕円を原画像に重ねて表示す。このように一つの弧のみでは正しい楕円が当てはまらない場合でも、残りの弧を探索することによって完全な楕円を当てはめることができる。

図 6にさまざまな画像例に対してエッジ画像 (上段)、および初期円と最終的に当てはめた楕円を原画像中に重ねたもの (下段) を示す。くりこみ法は 1 ステップで最終的な楕円とほとんど一致し、2, 3 回で完全に収束する。このように多数のエッジがあり、楕円をなす部分が短い場合でもよく当てはまっている。実行時間は 500×333 画素の場合、平均約 20 秒であった。ただし CPU は Pentium III 600MHz を、OS は Linux を用いた。プログラムの工夫でさらなる高速化も可能であると思われる。

4. 円の 3 次元計算

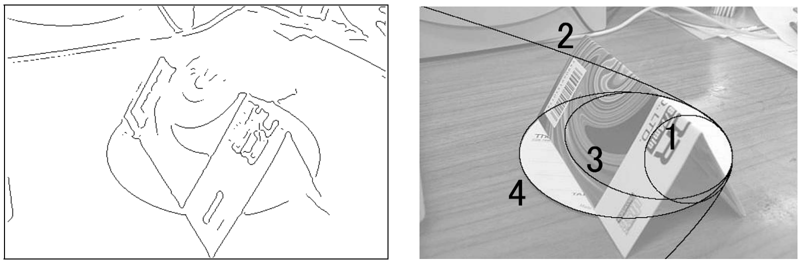


図 5: 左は用いたエッジ画像。右は 1. 初期円、 2. 成長させた 2 次曲線、 3. 最小メジアン法で得られた楕円、 4. 組み合わせ探索で得られた楕円を合成したもの。

序論に述べたように、本手法は 3 次元復元計算のための楕円検出法として開発したものである。そこで 3 次元位置を計算する具体的な方法を述べ、回転台の校正へ応用する。

物体を回転台に載せて回転させながら撮影した画像から 3 次元形状を計算することは、 3 次元復元の基本的な手法である [25, 27]。しかし、このためにはあらかじめカメラと回転台の位置関係を知らなければならない。これは回転台の直径を測定すれば、回転台の画像から次のように計算できる。

用いるカメラは校正されていて、式 (1), (3) 中の定数 f をレンズの焦点距離 (単位は画素) とする。また画像座標の原点をレンズの光軸に対応する点にとり、上方を x 軸、右方を y 軸とする画像座標を用い、 z 軸を奥行き方向とみなす。そして、観測した楕円 $\boldsymbol{Q}$ は半径 r の円の像であるとする。行列 $\boldsymbol{Q}$ にはスケール倍の不定性があるので、 $\det \boldsymbol{Q} = -1$ と規格化する ($\det \boldsymbol{Q} = 0$ なら退化した 2 直線等の楕円以外の図形となる [7])。

行列 $\boldsymbol{Q}$ の固有値を λ_1, λ_2, λ_3 とし、対応する単位固有ベクトルを $\boldsymbol{u}_1$, $\boldsymbol{u}_2$, $\boldsymbol{u}_3$ とする。 $\lambda_3 < 0 < \lambda_1 \leq \lambda_2$ のように順序を定めると、円の載っている平面 (支持平面) の単位法線ベクトルは次のようになる [6]。

$$\boldsymbol{n} = N[\sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_3}}\boldsymbol{u}_2 \pm \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3}}\boldsymbol{u}_3] \tag{14}$$

ただし $N[\cdot]$ は単位ベクトルへの正規化作用素である ($N[\boldsymbol{a}] = \boldsymbol{a}/\|\boldsymbol{a}\|$)。二種類の解が得られるのは、円を上から見下ろすのも下から見上げるのも画像としては同じになるからである。見下ろす解を得るには

$$(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{i})(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{k}) \leq 0 \tag{15}$$

となる符号を選べばよい。ただし $\boldsymbol{i} = (1, 0, 0)^\top$, $\boldsymbol{k} = (0, 0, 1)^\top$ と置いた。カメラのレンズの中心から支持平面までの距離は次のようになる。

$$d = \sqrt{\lambda_1^3}r. \tag{16}$$

画像中の円の中心の位置は次のベクトルで指定される点である。

$$\boldsymbol{x}_C = Z[\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{n}] \tag{17}$$

ただし $Z[\cdot]$ は Z 成分を 1 とする正規化作用素である ($Z[\boldsymbol{a}] = \boldsymbol{a}/(\boldsymbol{k}, \boldsymbol{a})$)。カメラ座標系から見た回転台の中心の位置は次のようになる。

$$\boldsymbol{r}_C = \frac{d\boldsymbol{x}_C}{(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{x}_C)} \tag{18}$$

カメラの光軸と支持平面の法線とのなす角度は次のようになる。

$$\theta = \cos^{-1}|n_3| \tag{19}$$

図 7は焦点距離は 700 画素に対する 768 × 512 画素の画像であり、回転台は半径 6.45cm である。左にエッジ画像、右に当てはめた楕円と計算した円の中心を原画像中に記入したものを示す。カメラの光軸と回転台の中心軸とのなす角は 59.4 度であり、カメラのレンズの中心から回転台の中心までは 27.3cm と計算された。

5. まとめ

本論文では円形物体を撮影した画像から物体の 3 次元位置を正確に計測することを目的とし、画像から楕円を自動的に抽出する新しい方法を提案した。これは円検出のハフ変換を用いて楕円への接触円を検出し、それを逐次的に成長させて楕円とするものである。従来の円検出のハフ変換は円に対しては効果的であるが、接触円の検出には必ずしも適していないので、独自の工夫と改良を行なった。そして実画像例によって提案手法の有効性を確認するとともに、 3 次元復元のための回転台の校正例を示した。

参考文献

[1] 浅山泰祐, 塩野充, 円弧近似を用いた任意傾斜楕円のハフ変換による検出実験, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU98-123 (1998-11), 1–8.

[2] Y. C. Cheng and S. C. Lee, A new method for quadratic curve detection using K-RANSAC with acceleration techniques, *Patt. Recog.*, **28**-5 (1995), 663–682.

[3] D. B. Cooper and N. Yalabik, On the computational cost of approximating and recognizing nose-perturbed straight lines and quadratic arcs in the plane, *IEEE Trans. Computers*, **25**-10 (1976), 1020–1032.

図 6: 当てはめの例。上段にエッジ画像を、下段に初期円と当てはめた楕円を示す。

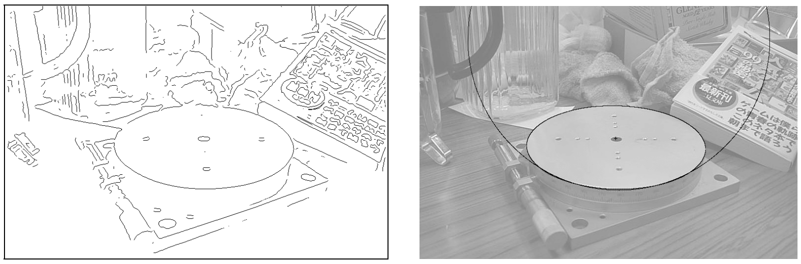


図 7: 回転台の校正。

[4] 藤本公三, 岩田剛治, 仲田周次, θ-ρ ハフ変換平面からの２次曲線のパラメータ抽出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J74-D-II**-9 (1991), 1184–1191.

[5] D. Ioannou, W. Huda and A. F. Laine, Circle recognition through a 2D Hough Trnasform and radius histogramming, *Image Vision Comput.*, **17** (1999), 15–26.

[6] K. Kanatani, *Geometric Computation for Machine Vision*, Oxford University Press, Oxford, 1993.

[7] 金谷健一, 「空間データの数理 — ３次元コンピューティングに向けて —」, 朝倉書店, 1995.

[8] K. Kanatani, *Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice*, Elsevier, Amsterdam, 1996.

[9] K. Kanatani, Comments on "Nonparametric Segmentation of Curves into Various Representations", *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, **19**-12 (1997), 1391 – 1392.

[10] Y. Kanazawa and K. Kanatani, Optimal conic fitting and reliability evaluation, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, **E79-D**-9 (1996), 1323 – 1328.

[11] N. Guil and E. L. Zapata, Lower order circle and ellipse Hough transform, *Patt. Recog.*, **30**-10 (1997), 1729–1744.

[12] C.-T. Ho and L.-H. Chen, A fast ellipse/circle detector using geometric symmetry, *Patt. Recog.*, **28**-1 (1995), 117–124.

[13] C. L. Huang, Elliptical feature extraction via an improved Hough transform, *Patt. Recog. Lett.*, **10**-2 (1989), 93–100.

[14] 三島等, 太田直哉, 金谷健一, 信頼性評価を備えた最適なコニック当てはめプログラム, 情報処理学会研究報告, 98-CVIM-111-4 (1998-5), 25 – 32.,

[15] 永田亮一, 川口剛, 遺伝アルゴリズムとエッジ点の線分領域へのグルーピングを利用するだ円検出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J81-D-II**-9 (1998), 2074–2085.

[16] 恩田寿和, 藤原伸行, 阿部清秀, 森宣仁, 三次元円検出による部品位置決めと事前のハンド干渉チェックにより実現した視覚ベースビンピッキングシステム, 日本ロボット学会論文誌, **18**-7 (2000), 995–1002.

[17] 恩田邦夫, 渡並智, 青木由直, Hough 変換平面からのだ円パラメータ決定法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J72-D-II**-10 (1989), 1760–1764.

[18] D. Pao, H. F. Li and R. Jayakumar, A decomposable parameter space for the detection of ellipses, *Patt. Recog.*, **14**-12 (1993), 951–958.

[19] P. L. Rosin and G. A. W. West, Nonparametric segmentation of curves into various representations, *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, **17**-12 (1995), 1140–1153.

[20] G. Roth and M. D. Levine, Extracting geometric primitives, *CVGIP: Image Understanding*, **58**-1 (1993), 1–22.

[21] G. Roth and M. D. Levine, Geometric primitive extraction using a genetic alorithm *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, **16**-9 (1994), 901–905.

[22] C. A. Rothwell, A. Zisserman, C. I. Marinos, D. A. Forsyth and J. L. Mundy, Relative motion and pose from arbitrary plane curves, *Image Vision Computing*, **10**-4 (1992), 250–262.

[23] P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy, *Robust Regression and Outlier Detection*, Wiley, New York, 1987.

[24] 塩野充, 黒点ランダム抽出と Hough 曲面の交点計算による円図形検出の一手法, 情報処理学会論文誌, **32**-2 (1991), 179–187.

[25] 杉本茂樹, 石橋素, 奥富正敏, 透視投影モデルによる時空間画像を用いた回転物体の形状復元, 第５回画像センシングシンポジウム講演論文集, 横浜, 1999 年６月, pp. 359–263.

[26] S. Tsuji and F. Matsumoto, Detection of ellipses by a modified Hough transform, *IEEE Trans. Computers*, **27**-8 (1978), 777–781.

[27] 鵜飼英充, 杉本茂樹, 奥富正敏, 時空間画像を用いた回転物体の表面形状の推定とモデリング, 第６回画像センシングシンポジウム講演論文集, 横浜, 2000 年６月, pp. 291–298.

[28] 渡辺孝志, 畠山雅充, 木村彰男, ハフ変換を用いた接線情報の抽出と欠損楕円の検出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J82-D-II**-12 (1999), 2221–2229.

[29] 渡辺孝志, 木村彰男, 丹波澄雄, 横山隆三, Li-Lavin-Le Master 型高速ハフ変換による欠損だ円の検出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J76-D-II**-12 (1993), 2504–2512.

[30] 渡辺孝志, 柴田俊浩, Hough 変換と階層化画像を用いた欠損だ円の検出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J73-D-II**-2 (1990), 159–166.

[31] W.-Y. Wu and M.-J. J. Wang, Elliptical object detection by using its geometric properties, *Patt. Recog.*, **26**-10 (1993), 1449–1500.

[32] 大和淳二, 入澤和義, 石井郁夫, 牧野秀夫, 重み付け中点図面を用いただ円抽出アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J72-D-II**-7 (1989), 1009–1016.

[33] H. K. Yuen, J. Illingworth and J. Kittler, Detecting partially occluded ellpises using the Hough transform, *Image Vision Comput.*, **7**-1 (1989), 31–37.

[34] J. H. Yoo and I. K. Seth, An ellipse detection method from the polar and pole definition of conics, *Patt. Recog.*, **26**-2 (1993), 307–315.