中 島 重 義[†], 正会員 濱 裕 光[†]
前 川 義 治[†], 細 川 省 一[†]

Elliptical Approximation of Trajectories of a Moving Object

Shigeyoshi Nakajima[†], Hiromitsu Hama[†], Yoshiharu Maekawa[†] and Shouichi Hosokawa[†]

あらまし 動画像の中の回転物体の特徴点の軌跡を解析するために、時空間中で楕円近似する方法について提案する。時空間で解析するため、画像平面上よりもグループ化が容易である。シミュレーションにより時空間上の楕円軌跡を高い精度で近似できることを確認した。

1. ま え が き

動画像中の動物体の特徴点の軌跡を追跡することは、3次元シーンの復元には大変有用なことである^{1)~3)}。筆者らは動画像中の特徴点の速度と位置から3次元空間の物体の構造を復元する手法を提案したが⁴⁾、そこでも速度と位置を正確に算出するためには特徴点の軌跡を高次元の曲線で近似する必要があることがわかった。

物体の回転運動には、固定した回転軸のまわりの運動と、移動する回転軸のまわりの運動とがある。回転軸の位置が固定されていると考え得るとき、特徴点の軌跡が円錐曲線を描くことが知られている⁵⁾。そのような円錐曲線の中でも、軌跡のすべてが視野に入っているような場合には画像平面上で楕円を描く。この楕円は、画像平面と時間変化の3次元時空間上では螺旋になる。この時、空間上の螺旋をまず直線セグメントとして近似し、次に直線セグメントと螺旋との中間段階として楕円近似を求める手法を本論文で提案する。直線セグメントを検出する手法は筆者らがすでに発表した手法に従う⁶⁾。

直線セグメントによる近似から出発し、螺旋近似するまでの間で3次元時空間上の楕円で近似する利点は次の点にある。まず、 $x-y$ 平面で軌跡を追跡するよりも時間的なずれを利用する方がグループ化が容易に

なる。次に、直線セグメントから楕円への近似では決定すべきパラメータが少なく、推定が容易である。さらに、楕円近似では軌跡の曲率変化に対応できる。最後に、楕円近似を行い、その軌跡を $x-y$ 平面に投射したときはまた楕円になるので、螺旋を $x-y$ 平面に投射したときの楕円をうまく近似できる。このように時空間上での楕円近似は動画像の観測点の軌跡を求めるのに有用である。

2. 直線セグメントから楕円近似へ

2.1 直線セグメントに最も近い平面

まず、最初に時空間上の観測点列から微小時間内の直線セグメントを求める。次に、得られた直線セグメントを4本集めた組を作る。最小2乗法により、この直線セグメントの両端点から一番近い平面を求める。この平面上に観測された特徴点を正射影し、この平面上で以下の処理を行う。

2.2 楕円の中心の推定

直線セグメントの組の中で上記の平面と両端点の距離が小さいものを選ぶ。選ばれた直線セグメントの組から楕円の中心の位置を推定する。直線セグメントを楕円の接線と考え、その中点を楕円との接点と考える。このとき、直線セグメントを2本選んで、2接点の中点、2接線を延長した交点、楕円の中心の3点は図1に示すように同一直線上に並ぶ。このことより、

キーワード：単眼視動画像、動きからの形、3次元認識

1995年4月17日受付、1995年6月2日再受付

[†] 大阪市立大学 工学部 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138, TEL 06-605-2684)

[†] Department of Engineering, Osaka City University (3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558, Japan)

2 接点の中点と 2 接線の交点を結んだ直線上に楕円の中心があると推定できる。4 本の直線セグメントから 2 直線セグメントの組は 6 組でき、それぞれの組に上述の直線が 1 本存在する。このようにして得られた 6 本の直線に一番近い点を楕円の中心と推定する。6 本の直線に一番近い点は最小 2 乗法によって決定する。

2.3 楕円の半径、離心率、長軸方向の推定

前述の平面において推定した楕円の中心を原点とし、観測された i 番目の特徴点からこの平面におろした垂線の足の極座標表示を (r_i, θ_i) とする。ただし、添え字の i に関して θ_i は昇順となるように並べ替えてある。 r_i に関して近傍 9 点の平均を取る平滑化を 2 回行い、その結果を R_i とする。この点列は楕円の点列であるが、 R_i を θ_i に関する次のような余弦関数で近似する。

$$R_i = R + k \cos 2(\theta_i - \theta) \quad (1)$$

ここで、定数 θ は x 軸に対して長軸がなす角を表す。 k は離心率に従って単調増加する係数である。ここで、楕円の長軸方向を示す θ を求める必要はあるが、 k の値を求めなくても離心率 e と半径 r が求められれば楕円が特定できる。添え字 i に従って θ_i に関する R_i の 1 次微分値と 2 次微分値を計算し、 θ の値を算出する。

$$\begin{aligned} 2(\theta_i - \theta) &= \tan^{-1} \left(\frac{-4k \sin 2(\theta_i - \theta)}{-4k \cos 2(\theta_i - \theta)} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{2R'_i}{R''_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\theta = \theta_i - (\theta_i - \theta) = \theta_i - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2R'_i}{R''_i} \right) \quad (3)$$

ただし

$$R'_i = \frac{dR_i}{d\theta_i}, \quad R''_i = \frac{d^2 R_i}{d\theta_i^2} \quad (4)$$

関数 $\tan^{-1}(\)$ を使用する場合、 $\alpha = \tan^{-1}(A)$ に対し

て、 $A = \tan \alpha = \tan(\alpha + \pi)$ となり、曖昧性が生じるが、分子 (R'_i) と分母 (R''_i) の符号を考慮することで $0 \sim 2\pi$ の範囲で一意的に決めることができる。さらに $0 \sim 4\pi$ の範囲では 2 解が存在し、上式を満たす θ に対して $\theta + \pi$ も解になるが、どちらを長軸の方向としても同一の楕円を得ることができる。実際のデータでは i によって θ の値が異なるが、すべての i に対しての分散が最も小さくなる θ の値を取る。

長軸方向が決定した後、各観測点ごとに離心率 e と半径 r の関係式ができ、これを e - r 平面上で Hough 変換することで、最適な e と r が求められる。

3. 実験結果

本手法の有効性を示すために計算機シミュレーションを行い、その結果を表 1 に示す。まず、入力として表 1 に示すパラメータを持った楕円の弧を時空間上に設定し、その楕円に沿って 60 点の観測点を作る。次に、雑音として楕円半径の +10% から -10% の間の一様擬乱数による位置ずれを x 方向と y 方向に加え

表 1 計算機シミュレーションによる推定結果
Estimated result of computer simulation.

	もとの値 (original)	推定値 (guessed)	比率 (ratio %)	誤差 (error)
X_{core} (pixel)	9.500	9.489	99.88	-0.011
Y_{core} (pixel)	9.200	9.188	99.87	-0.012
θ (degree)	9.39	12.13	129.2	2.74
e	0.600	0.609	101.5	0.009
r (pixel)	20.00	20.14	100.7	0.14

図 1 3 点が直線に並ぶ
The three points are in line.

図 2 シミュレーション結果
Simulation result.

る．これらの点を観測時間別に4本の直線で近似したものを用いた．表1より，中心位置(X_{core} , Y_{core})は高い精度で復元できていることがわかる．長軸方向 θ の誤差は 3° 程度あり，1次微分と2次微分の誤差の影響を受けたものと推測される．離心率 e と半径 r も高い精度で復元できている．図2に，もとの楕円の弧，位置ずれを加えた観測点，復元された楕円の弧を示す．もとの楕円の弧を実線で，復元された楕円の弧を点線で示す．元の楕円と復元された楕円はほとんど重なっている．

4. む す び

本稿では，時空間上での観測点の軌跡を，その直線近似を利用して時空間上の楕円に近似する手法について提案した．時空間上の楕円に沿った観測点の軌跡を対象とした実験では，高い精度で楕円のパラメータを復元できることがわかった．今後は，実際の動画像上で観測点が描く螺旋軌跡の復元を，楕円近似を利用して効率良く実行する手法について検討する．

大阪市立大学在学中に本研究に協力してくれた中嶋利和氏（現在，(株)クボタ）に感謝する．

【参 考 文 献】

- 1) T. J. Broida and R. Chellapa: "Estimation of Object Motion Parameters from Noisy Images", IEEE Trans., **PAMI-12**, 11, pp. 1092-1098 (Nov. 1990)
- 2) G. Adiv: "Determining Three-Dimensional Motion and Structure from Optical Flow Generated by Several Moving Objects", IEEE Trans., **PAMI-7**, 4, pp. 384-401 (Apr. 1985)
- 3) Y. Yasumoto and G. Medioni: "Robust Estimation of Three-Dimensional Motion Parameters from a Sequence of Image Frames Using Regularizations", IEEE Trans., **PAMI-8**, 4, pp. 464-471 (Apr. 1986)

- 4) S. Nakajima and H. Hama: "Concentration of Voting by Rotation of Objects in Monocular Moving Image", Memoirs of the Faculty of Engineering Osaka City Univ., **34**, pp. 185-192 (Dec. 1993)
- 5) H. S. Sawhney, J. Oliensis, and A. R. Hanson: "Image Description and 3-D Reconstruction from Image Trajectories of Rotational Motion", IEEE Trans., **PAMI-15**, 9, pp. 885-898 (Sep. 1993)
- 6) 杉浦，中島，濱: "Hough変換を用いた動き検出における計算コストの削減"，平成6年度電気関係学会関西支部連大予，p. G343 (Oct. 1994)

なかじま しげよし
中島 重義 昭和62年，京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻博士課程単位取得満期退学．同年，大阪市立大学工学部助手，現在に至る．この間，人工知能，画像処理，並列処理，神経回路網，コンピュータ・ビジョンの研究に従事．工学修士．

はま ひろみつ
濱 裕光 昭和45年，大阪大学大学院基礎工学研究科電気工学専攻修士課程修了．大阪市立大学工学部電気工学科助手．情報工学科助教授を経て，現在，同学科教授．この間，パターン認識，変換群不変関数，画像処理，視覚情報処理などの研究に従事．正会員．

まえかわ よしはる
前川 義治 昭和39年，大阪市立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了．同年，同大学工学部助手，43年，講師となり現在に至る．この間，無機薄膜，有機薄膜の合成，海水の自動計測装置の設計・試作などに関する研究に従事．

ほそかわ しゅういち
細川 省一 昭和35年，大阪市立大学大学院修士課程修了．同年，同大学工学部助手，38年，同講師，46年，同助教授．平成2年，同教授(情報処理工学講座)，現在に至る．この間，音声信号の高効率符号化法および伝送，音声認識，コンピュータネットワーク，ニューラルネットの研究に従事．工学博士．