対数極座標での運動物体の追跡

正員 三 橋 渉 (電気通信大学)

非会員 新 田 弘 樹 (電気通信大学)

非会員 岡 島 昇 (電気通信大学)

Tracking a Moving Object in Log-Polar Mapped Coordinates

Wataru Mitsuhashi, Member, Hiroki Nitta, Non-member, Noboru Okajima, Non-member (The University of Electro-Communications)

A new visual method with log-polar imaging geometry is proposed for tracking an object that translates in three dimensional space. The log-polar mapping is a popular model for space-variant sensing in computer vision, and is efficient in data reduction so that a tracking system can work with real time operation. An active camera with three degree of freedom (pan, tilt and zoom) is used to track the object and the log-polar mapping of images is performed with software computation, in which we can change the conversion parameters. In the log-polar coordinates, the lateral component of the object's translation varies sinusoidally, while the longitudinal motion component along the visual axis is reduced to rather simpler translation. These motion components can be estimated in sub-pixel order of accuracy by detecting the phase difference of the complex wavelet transforms of the converted image sequences. By using a commercially available PC without additional peripheral equipment, the pursuit of a moving planar object can be executed in the rate of 10 or 15 frames/sec.

キーワード：対数極座標変換，移動物体追尾，オプティカルフロー，複素 Wavelet 変換

Keywords: log-polar mapping, target tracking, optical flow, complex wavelet decomposition

1. はじめに

視野内の物体の動きを検出してそれを追尾し，対象物体が常に視野の中心に位置するように撮像系を制御できれば，対象と観測系の位置合わせなどに応用できる。このとき，対象と観測系の奥行き距離の変化も計測できると都合がよい。例えば，前方を走行する車両を追尾して車間距離を一定に保ったり，衝突を警告するなどの応用が考えられる。

奥行き変化にともなう撮像面内の対象の像の大きさ変化を知る方法として，対数極座標変換を用いる方法がある⁽¹⁾⁽²⁾。一方，像面内での一様な並進運動を対数極座標変換で求める効果的な方法は知られていないが，像面内での一様な並進運動を対数極座標上で観測すると，その運動方向は周期 2π で変化する⁽³⁾。著者らは，このことを利用して対数極座標上でオプティカルフローを求め，対象物体の接近や回転，および撮像面に平行な並進運動などを求める方法を提案し，数値実験によりその有効性を確認してきた⁽⁴⁾。

3次元空間内で任意に運動している対象を追尾し，撮像面で対象の像の位置と大きさを一定に保つために撮像系の姿勢を制御しようとする，6自由度の姿勢制御可能な機

構が必要となる。例えば，撮像系の光軸回りの回転は対数極座標上で容易に推定可能だが，追尾に必要な機構は大きくて複雑になる。そこで本論文では，対象物体の運動を床面や道路などの水平面内での2自由度の並進運動に限定し，筐体は固定のままでpan角とtilt角およびzoom倍率が制御できる市販のカメラを用いて対象物体追尾の実験を行った結果について報告する。

実験では特別な画像演算処理装置を持たない市販のパーソナルコンピュータを使用した。入力画像の対数極座標変換・オプティカルフローの推定・運動パラメタの抽出・カメラの姿勢制御までの一連の処理をソフトウェア計算だけで実行し，運動する物体を毎秒10ないし15フレーム程度の処理速度で追尾できた。毎秒30フレームのビデオレートには達しないが，ほぼ実時間で対象物体の追尾が可能であることを確かめた。

2. 画像の対数極座標変換

直交座標系 (x, y) を複素平面 $z = x + jy = \rho e^{j\theta}$ とみなし，適当な正の定数 κ を対数の底として

図1 格子状に配列された撮像素子の画素 (灰色の小円) からの対数極座標画像の再標本化

Fig. 1. Resampling the image plane to generate a log-polar mapped image. Image intensities of the pixels (gray circles) contained in an open circle are convolved with a 2D Gaussian function which covers the area of the corresponding circle, thus yielding an alternate pixel in the log-polar coordinates.

$$w = \log_{\kappa}(z) = (\ln \rho + j\theta) / \ln \kappa \dots \dots \dots (1)$$

で定義される座標変換を複素対数変換 (Complex Logarithmic Transform: CLM) あるいは対数極座標変換 (Log-Polar Mapping: LPM) とよぶ。対数極座標変換は網膜から大脳皮質第一次視覚野への神経投射の様式 (retinotopy)⁽⁵⁾⁽⁶⁾ のモデルとして知られており、像の大きさに対して不変なパターン処理法⁽⁷⁾⁽⁸⁾ としても応用されている。

一般に市販されている撮像装置では対数極座標変換された画像を直接観測することはできないので、さまざまな工夫が報告されている。例えば、國吉や末松らは撮像光学系を工夫して対数極座標画像を得ている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、申らはレンズ前方にダブリズムを置いて回転させることで極座標変換画像を得る方法を提案している⁽¹¹⁾。対数極座標変換された画像を直接得る撮像素子としては、Sandini らの開発した同心円状に画素を配列した CCD センサ⁽¹²⁾⁽¹³⁾ や Widnicki らの CMOS⁽¹⁴⁾ センサがある。

これらの特殊な光学系や専用の撮像素子を用いる方法とは異なり、本研究では画素が格子状に配列された市販の撮像素子を利用している。このため、撮影された画像から、ソフトウェア計算により対数極座標変換された画像を作成する必要があるが、状況に応じて座標変換のパラメータを変更できるなどの利点もある。

〈2・1〉 対数極座標変換された画像の生成 図1に示すように、 xy 座標の原点を中心とする同心円を考え、円周上に等間隔で一定の数 (N) の標本点を配置するものとする。各標本点を中心とする円形の受容野が互いに接するように像面を密に充填するとき、半径 ρ_i の同心円上の受容野の大きさ S_i と、これに隣接する半径 ρ_{i+1} の同心円上の受容野の大きさ S_{i+1} の間には、次式の関係が成り立つ⁽³⁾。

図2 生成された対数極座標画像の画素配置

Fig. 2. Configuration of picture elements in log-polar mapped coordinates.

$$\frac{S_{i+1}}{S_i} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = \frac{N + \pi}{N - \pi} \dots \dots \dots (2)$$

上式の比を κ で表すと、 $\log_{\kappa} \rho_{i+1} = \log_{\kappa} \rho_i + 1$ であるから、図2に示すように、対数極座標上ではこれらの標本点が等間隔で並ぶことになる。

受容野近傍に含まれる複数の撮像素子の出力に対し、受容野を覆う二次元ガウス関数を重みとする平均値を求めて標本点からの出力を作成する。このような再標本化を行なう場合、円周上に配置した受容野内には少なくとも1個以上の撮像素子の画素が含まなければならない。また、式(1)の画像原点 $\rho = 0$ での特異性を避けるためにも、画像原点付近の画素は対数変換に使用できない。

本来、この注視点付近の動きの情報は対象の動きを理解するために重要であるから、このような画素の欠損を補う何らかの対策が必要である。このため、注視点近傍は直交座標系で均等に画素を配置し、周辺部の対数極座標と組み合わせる方法⁽¹⁵⁾ や、式(1)の対数変換にオフセットを加えて特異点による欠損をなくす方法⁽¹⁶⁾ などが提案されているが、これらの方法では動きベクトルの推定手順が複雑になるなどの問題がある。そこで本研究では、実時間で物体追尾をめざして処理時間を短縮する必要上、画素欠損に対する特別の対策は取らず、追尾対象物体の像が原点付近の画素欠損領域の大きさよりも十分大きいものと仮定した。

3. 対数極座標系での動きベクトル

式(2)の比 κ は同心円上の受容野の数によって決まる定数であり、以下の議論ではこれを省略しても一般性を失わない。そこで、 $\xi = \ln \rho$ として自然対数による対数極座標 (ξ, θ) を考える。撮像面内の直交座標系 (x, y) と対数極座標系 (ξ, θ) での動きベクトルの間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、変数 x, y, ξ, θ などの上の記号 “ $\dot{}$ ” は当該変数の時間に関する微分を表すものとする。

〈3・1〉 座標原点を中心とする拡大・縮小と回転 撮像面の直交座標系の原点を中心とする拡大率 D (1 以下の場合は縮小をあらわす) および回転角 R の動きベクトルは

図3 一様な並進運動 (a, b) を、原点を中心とするある円周上で円の接線方向および法線方向に分解して評価すると、その大きさが正弦的に変化し、振幅と位相から並進運動成分を推定できる。

Fig. 3. In case of a uniform translation, a component perpendicular to the circumference of an eccentricity will vary with its period of 2π radians. The magnitude and the orientation of the translation can be estimated from the fundamental component of the Fourier series expansion of the flow fields on the log-polar mapped coordinates.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \ln D \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

と表される。これに対応する対数極座標での動きベクトルは、式 (3) を用いて次のように表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln D \\ R \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

このように、撮像面の原点を中心とする拡大縮小と回転は、対数極座標ではそれぞれ ξ 軸および θ 軸に沿った並進で表されることがわかる。

〈3・2〉 撮像面内での一様な並進 撮像面内で一様な並進の動きベクトル (図3) を次式で表す。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

これに対応する対数極座標上での動きベクトルは、 $\tan \phi = b/a$ として式 (3) を用いると、次のように書ける。

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\rho} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \phi) \\ \sin(\theta - \phi) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

上式 (7) は次のように書き直せる。

$$\dot{\xi} + j\dot{\theta} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\rho} e^{j(\theta - \phi)} \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、対数極座標での動きベクトルを離散フーリエ変換すれば、周期 2π の基本波成分の振幅から並進量 $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ が求まり、位相角より並進方向 ϕ が推定できる。

〈3・3〉 拡大・縮小および回転と一様な並進の混在 撮像面の座標原点を中心とする拡大・縮小および回転に一樣な並進が加わった場合、像面での動きベクトルは式 (4) と

(6) の和により、次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \ln D \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \dots\dots (9)$$

対数極座標での動きベクトルも、式 (5) および (7) の和で書けて

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln D \\ R \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\rho} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \phi) \\ \sin(\theta - \phi) \end{bmatrix} \dots\dots (10)$$

で与えられる。したがって、対数極座標での動きベクトルの平均値から拡大・縮小成分 $\ln D$ と回転成分 R が求まり、周期 2π の基本波の振幅から並進の大きさ $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ が、同様に位相から並進の方向 ϕ が、それぞれ推定できる。

〈3・4〉 原点以外を中心とする拡大・縮小と並進の合成運動 本論文の記述範囲では、対象物体の運動として床面に拘束された自由度2の並進運動を想定しており、回転運動はないものとしている。ただし、対象の高さと撮像系の高さが同じとは限らない。また、拡大・縮小の中心が常に撮像面の中心にあるとは限らない。このため、撮像面では、対象物体の接近・離速に伴う像の拡大・縮小に加えて、左右・上下の移動に伴う一様な並進運動が観測される。

撮像面で一様な並進 (a, b) と座標 (x_1, y_1) を中心とする拡大率 D の拡大・縮小とが混在し、かつ回転がない場合、(9) 式は次のように書き直される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \ln D \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a - x_1 \cdot \ln D \\ b - y_1 \cdot \ln D \end{bmatrix} \dots\dots (11)$$

この場合、〈3・3〉に述べたように、拡大・縮小成分 $\ln D$ は対数極座標での動きベクトルの平均値として求めることができるが、基本波成分の振幅と位相から並進 (a, b) と拡大・縮小の中心 (x_1, y_1) を完全に分離することはできない。

ただし、対象物体を追尾している場合、拡大・縮小の中心が撮像面の座標原点からずれていく理由は、並進運動の追尾の失敗に起因すると考えられる。この場合、並進 (a, b) と拡大・縮小の中心 (x_1, y_1) の値はほぼ等しいはずである。また、対象物体が急速に接近・離速しないかぎり、拡大率 D は1に近い値を取り $\ln D$ の値は小さいから、(11) 式右辺第二項の成分の比は並進の方向にほぼ等しい。したがって、対数極座標で動きベクトルの離散フーリエ級数展開を行って得られた基本波成分の位相から追尾の方向を大きく誤ることはなく、基本波成分の振幅がゼロに近づくようにカメラの姿勢を制御すればよい。

4. 動きベクトルの推定

式 (7) に示すように、一様な並進に対応する対数極座標での動きベクトルの大きさは ρ すなわち e^{ξ} に逆比例し、 ξ とともに指数的に減少する。したがって、並進成分を正確に求めるためには画素単位以下の動きを知る必要がある。加えて、実時間で物体追尾を行うためには、高速に計算できることも必要である。

図4 複素 Wavelet 変換 (CDWT) による多重解像度解析と動きベクトルの推定

Fig. 4. Motion vector estimation by complex discrete wavelet transform (CDWT) with 3 hierarchical layers and 6 orientations.

本研究では、動きベクトル推定アルゴリズムとして、複素 Wavelet 変換による多重解像度解析法を採用した。図4に計算手順の概略を示す。本来、Wavelet 変換には多くの計算時間が必要だが、Magarey らの方法⁽¹⁷⁾は核関数がある有理数で表現されているため、整数計算による高速化が可能である。また、新田はこの計算方法のチューニングを行い、画素単位以下の動きベクトルを精度良く推定する計算ライブラリを開発している⁽¹⁸⁾。

まず、2枚の入力画像を複素 Wavelet 変換して3階層6方向の帯域画像に分解し、各方向ごとに入力間の位相差から動き量を求める。次いで、各階層で得られた結果を統合し、最終的に誤差最小の動きベクトルを最小二乗推定する。この方法には次のような特徴がある。

- (1) 位相情報を利用して画素単位以下の動きが求まる。
- (2) 多重解像度解析により大きな動きも推定できる。
- (3) 対応点探索が必要なく、比較的高速に計算できる。

5. 物体領域の決定

カメラが静止している場合、物体が移動すると物体の像内部では一定方向の動きが生じるが、背景は移動しない。一方、カメラが物体を追尾するとき、背景は物体の動きと逆の動きを示す。

既に〈3・3〉で述べたように、並進があれば動きベクトルは θ に関して周期 2π で変化する。6章以降で述べる追尾実験で得られた対数極座標での動きベクトルの例を図5に示す。 ξ 軸に関して下部が ϕ 方向に並進する物体の内部である。ここでは(10)式にしたがって動きベクトルが周期 2π で変化しており、並進が含まれることを示唆している。一方、動きベクトルが不安定な上部が背景部分に相当する。

物体内部の運動成分は一定であるとみなせるが、物体と背景を分ける境界の近傍では隠蔽も生じているため、並進

図5 対数極座標での物体領域の決定

Fig. 5. Segmentation of a target object from background scenes in the log-polar coordinates. Although the motion vector field is uniform inside the object, it will abruptly fluctuate near the boundary, depicted by the solid line, which separates the object and the background scenes. Thus the object boundary can be determined on the basis of the discontinuity of the motion vector field.

の大きさ A 、移動方向 ϕ 、拡大率 D 、のそれぞれが急変する。そこで、ある範囲(例えば点線で示した ξ_0)までが物体の内部だと仮定して、 ξ_0 をインクリメントしながら内部での A と ϕ の分散を計算し、 ϕ の分散が大きく変化する場所までを物体の内部と判定する。また、 ϕ の分散が小さい場合でも、並進の大きさ A の分散が大きく変化するすれば、そこまでの領域を物体内部と判定する。

一方、像面に平行な並進運動が存在しない場合、物体内部で A の値は0に近いのでその分散も小さいが、 ϕ の分散は大きな値を取りうる。この場合は $\ln D$ の符号が変化する場所を物体と背景の境界と判定する。図5の横実線はこのような決定した物体領域と背景領域の境界である。こうして、まず物体領域を決定した後、その内部の動きベクトルから物体の運動パラメータ(A 、 ϕ および D)を推定する。

6. 追尾実験とその結果

〈6・1〉追尾対象物体とその動き 適当なランダムテクスチャを印刷した紙を平板に貼り付け、X-Yプロッタ(渡辺測器製、型番WX4636)のキャリッジ上に固定して追尾対象物体とした。図6に示すように、プロッタキャリッジをカメラ前方800 mmの位置に置いて初期位置とした。また、カメラは初期位置にある物体の中心を120 mm上から見下ろすように設置した。平板の向きは一定に保ったまま、次の2種類の経路に沿った運動を行わせた。

- (1) 初期位置から出発して左右方向に約113 mm、奥行き方向に約300 mmまでの直線に沿った速度約11 mm/sの等速往復運動
- (2) 半径約110 mmの円に沿った速度約7 mm/sの運動

どちらの場合もカメラは上から見下ろす形になるので、像面内では左右・上下の並進と拡大・縮小の動きが形成される。

図 6 カメラと物体との位置関係、および物体の動きの経路

Fig. 6. The setup used in tracking experiments: a planar object translates on a flat bed and a camera observes the object with a slight angle of depression. The pose of the camera (pan, tilt and zoom) are controlled according to the estimates of the object's motion.

図 7 出発位置の物体像 (左上) と折り返し点での物体像 (右上). 下はそれらの対数極座標変換画像.

Fig. 7. Above: The object at the start position (left) and at the turn (right). Below: log-polar mapped images corresponding to the above photographs.

〈6・2〉 追尾撮像系 直線に沿った運動の初期位置で撮影した対象の像と折り返し位置で撮影した対象の像、およびそれらの対数極座標変換画像を図 7 に示す。この対象の像の位置と大きさが初期位置の対象画像の位置と大きさに常に等しくなるように、カメラの位置を制御することが本来の研究目的である。しかし、撮像系の位置を移動・回転させる機構の製作が困難であったため、原理確認の目的で像の拡大・縮小に対してはレンズ系の zooming で対処し、上下・左右の並進に対しては同様に panning と tilting で対処することにした。この目的を達成するために、筐体は固定のままで pan 角と tilt 角および zoom 倍率を制御できるカメラ EVI-G20 (SONY 製) を用いた。このカメラ

図 8 物体追尾の手順

Fig. 8. Block diagram of the procedure for tracking a moving target. The parameters, such as pan, tilt and zoom, to maintain the location of the target and its size in the image plane are manipulated according to the optical flows calculated between the initial image and the subsequent image frames.

の筐体内部の光学系の姿勢は RS232C などのシリアル接続により VISCA (Video system control architecture) プロトコルの下で制御できる。

〈6・3〉 撮影画像と対数極座標変換画像 インターレース走査のビデオ信号から連続して画像を取得すると、撮影された光景は走査線毎にわずかな違いがある。これは画像間の動きベクトルの計算に悪影響を及ぼすので、この実験では偶数フィールドのみから 320×240 画素の大きさの画像を取得している。

一方、2. で述べたように、対数極座標変換では対数の特異性のために $\rho = 0$ 近傍の画素を利用できない。このため、画像平面中央部の半径約 10 画素程度を最内周として、円周上に $N = 128$ 点、半径方向に 64 点の標本点を配置して対数極座標変換画像を作成した。この結果、処理すべき画素数は約 9 分の 1 に低減される。標本点の数を 2 のべき乗に選んだのは、Wavelet 変換による多重解像度解析を考慮したためである。

図 7 の例からわかるように、撮影画像では対象物体に比べて背景などの領域が広いので、2 枚の画像間に大きな違いが感じられない。しかし、複素対数変換画像では、撮影画像の中心部を重点的に使用し周辺部の情報を捨てているため、2 枚の画像間に顕著な相違があるように見える。

〈6・4〉 物体追尾の手順 物体追尾のための処理の流れの概略を図 8 に示し、具体的な内容を以下に列挙する。処理に要する時間は、クロック周波数 400 MHz の Pentium III を CPU に用いた場合の例である。

- (1) 初期位置にある物体を撮像し、ビデオ信号の偶数フィールドから 320×240 画素の大きさの画像を取得し、初期画像とする。この初期画像に対して対数極座標変換を行ない、 128×64 画素の大きさの画像を作成する。座標変換に必要な座標換算データや画像平滑化のためのガウス関数などはすべてあらかじめ計算して表にしている。現在のシステムでは、対数極座標変換に約 11ms を要している。次いで、この対数極座標変換画像の複素 Wavelet 変換を実行して保存しておく。
- (2) 引き続き、偶数フィールドから初期画像と同じ大きさの画像を切り出し、対数極座標変換画像 (128×64 画素) を作成する。
- (3) 上で求めた対数極座標変換画像と初期画像の対数極座標変換画像との間で複素 Wavelet 変換を用いて動きベクトルを求める⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。これに要する時間は約 52 ms であった。
- (4) 動きベクトルから物体の拡大・縮小と並進を推定する。画像内に追尾対象物体以外の背景領域がある場合は、動きベクトルの変化から追尾対象物体の領域を推定し、物体内部だけで動きベクトルを推定する。この部分の計算には約 1ms を要した。
- (5) 取得された画像、その対数変換画像、動きベクトルの推定量、推定された物体領域などを画面上に表示する。表示データの準備には約 20 ms を要するので、デモンストレーション以外の場合は表示せずに追尾作業を実行する。
- (6) 物体の運動パラメタ推定値にもとづいてカメラの pan, tilt および zoom などの PID 制御を行う。本研究では、物体にステップ状の変位を与えたときにオーバーシュートが生じない程度の応答をするように、あらかじめ各制御パラメタを経験的に求めている。
- (7) カメラ姿勢制御の終了後、(2) に戻って再び同一の手順を繰り返す。

各偶数フィールドの画像を取得してからカメラを制御するまでの処理時間は (5) の結果の表示を入れて約 83 ms を要するが、(5) の結果を表示しない場合の処理時間は約 63 ms であった。これは毎秒 10 フレームないし 15 フレームの処理速度に相当する。

〈6・5〉 物体追尾の結果

〈6・5・1〉 直線運動 初期位置にある対象物体の像 (図 7 左上) を初期画像として撮影した。その後、プロッタキャリッジを折り返し点 (図 7 右上参照) に向けて線速度約 11 mm/s で直線運動させ、約 1 秒間停止させて初期位置に復帰させる。この往復運動を 2 回繰り返し、対象の像が常に中心位置に同じ大きさで観測されるように追跡する実験を行った。実験で得られた画像の一部 4 枚を図 9 上部に示す。

これらの画像中の対象物体の大きさと位置はほぼ一定に維持されており、これに反して背景やプロッタが移動しているように見える。また、各画像内の白円は 5 で述べた方

図 9 物体追跡中のスナップショット (上 4 枚: 白円は検出された物体領域の境界) とその対数極座標変換画像 (下 4 枚)

Fig. 9. Snapshots (upper four photographs) in case the tracking task is successfully running, and the corresponding log-polar mapped images (lower four photographs). The size and the location of the target in these images are approximately invariant. White circles depicted on the target indicate the target's boundary, determined according to the uniformity and the smoothness of motion parameters within the boundary.

法によって推定された物体領域の境界である (同図左上の初期画像では、物体が静止しているため領域推定ができず、あらかじめ少し大きめに初期物体領域を設定している)。

図 9 上部の各画像に対応する対数極座標変換画像を同図の下部 4 枚の画像に示した。〈6・3〉の末尾で指摘し図 7 にも示したように、画像中の物体が平行移動すると対数極座標変換画像は大きく変形する。しかし、図 9 下部に示した対数極座標変換画像では、対象物体はほぼ同じ形を保っている。これは、像面での物体の変位をキャンセルするようにカメラが追尾したことを示唆している。

このことを確認するため、この追跡実験で推定された運動パラメタに基づいてカメラに与えた pan, tilt および zoom 制御量を図 10 に示す。図中の実線は計算で求めた各制御量であり、シンボルが各制御量の実測値である。ただし、図の見易さを考慮して、実測値は 10 枚の偶数フィールドごとにプロットした。計算で求めた制御量と実測値がほぼ一

図 10 直線運動中の物体の追尾に伴うカメラ制御量の変化

Fig. 10. Trace of the manipulated signals in case the target reciprocates two times along the line shown in Fig. 6.

図 11 円周に沿って移動する物体の追尾に伴うカメラ制御量の変化

Fig. 11. Trace of the manipulated signals in case the target moves three times on a circular path shown in Fig. 6.

致しており、物体を正しく追跡したことが確認できた。

〈6・5・2〉円周に沿った運動 図 6 に示すように、初期位置よりさらに 110mm 遠方を中心とする半径 110 mm の円周に沿って、線速度約 7 mm/s で物体を運動させた。ただし、物体表面の向きはカメラに向けたままである。推定された運動パラメタに基づいてカメラに与えた制御量の変化を図 11 に示す。図 10 と同様に、計算で求めた各制御量を実線でプロットした。シンボルは 10 枚の偶数フィールドごとにプロットした実測値である。円周に沿って 3 周した場合でも各制御量が同一の軌跡を描いており、脱調もないことから、安定して物体を追尾したことを示している。

しかし、図 11 の pan の実測値の振れ幅の中心が 0 度ではないことから、この実験では、X-Y プロットの水平面に射影したカメラ光軸が円運動の中心を通っていなかったのではないかと考えられる。

7. 問題点の検討

物体の移動速度を上げたところ、処理画像間の像の並進移動量が約 2 画素を超えると追尾に失敗するようになった。この原因としては、主に次の 2 点が考えられる。

- 対数極座標で $\xi = 0$ 付近の動きは、画像外に出たり外部から内部に入るような動きを示し、動きベクトルの計算ができない。取得した画像間の移動量が多くなると、このような領域が増加する。動きベクトルが正しく求められないと運動パラメタの推定誤差も増大する。
 - 複素 Wavelet 変換による動きベクトルの計算では、この配法などと同様に画像が変形を伴わずにシフトすることを前提としている。物体の並進運動に対して追尾誤差があると対数極座標変換画像上の原点付近の画像が大きく変形するため、さらに大きな誤差が発生する。
- 〈6・4〉で述べたように、本研究では、初期画像の複素 Wavelet 変換画像を参照画像として常に初期画像との差がなくなる

ように追尾を行っている。この方法では、前方の車両が方向転換するときなどのように、垂直軸回りの回転によってカメラからの見え方が変化する物体の追跡は不可能である。

連続して取得される画像間の動き情報だけを使って物体の追尾を行おうとしても、カメラの追従制御の遅れによる偏差を無視できない。このため、参照画像を逐次更新すると追尾の誤差が蓄積し、次第に参照画像とのずれが大きくなって脱調することがあった。

8. まとめと今後の課題

対数極座標変換された動画像から対象物体の動きを求め、カメラの pan 角と tilt 角および zoom 倍率を制御して画面上の物体サイズと位置を維持する実験を行った。画素数の少ない対数極座標上で動きベクトルの計算を行うことで処理の効率化をはかり、10 ないし 15 フレーム/秒の処理速度を達成した。

本研究ではカメラ制御に PID 制御則を採用し、ステップ状の物体変位に対してオーバーシュートが生じない程度に制御パラメータを経験的に調整した。取得した画像間の物体移動量が大きいと追尾に失敗するが、動きパラメータの推定に必要な計算量を低減できれば毎秒の処理画像数を増やすことができ、画像間の相対的な移動量を低減できる。特殊な撮像素子や専用のハードウェア計算装置を使用すればソフトウェア計算の負荷を無視できるが、複素 Wavelet 変換以外の運動パラメータ推定法の採用や性能改善、カメラ制御における予測制御⁽¹⁹⁾の採用など、本研究の提案する方法でもなお改良の余地が残されている。

(平成 13 年 7 月 2 日受付, 同 13 年 10 月 11 日再受付)

文 献

- (1) R. Jain, S. L. Bartlett and N. O'Brian: "Motion stereo using ego-motion complex logarithmic mapping," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-9, No.3, 356-369(1987).
- (2) 三橋 渉, 岡 和彦, 山崎 弘郎: "電子的に構成した空間フィルタによる運動計測", 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.11, 1111-1117(1988)
- (3) H. Araujo and J. M. Dias: "An Introduction to Logpolar Mapping," *Proceedings II Workshop on Cybernetic Vision, Sao Carlos, Brazil*, 139-144(December, 1996).
- (4) 新田 弘樹, 三橋 渉: "複素対数変換画像の動き推定法", 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会資料, SSA-98-12(1998.11)
- (5) C. Braccini, G. Gambardella, G. Sandini and V. Tagliasco: "A model of the early stages of the human visual system: Functional and topological transformations performed in the peripheral visual field," *Biol. Cybern.*, Vol.44, 47-58(1982).
- (6) E. L. Schwartz: "Anatomical and physiological correlates of visual computation from striate to infero-temporal cortex," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-14, No. 2, 257-271(1984).
- (7) H. J. Reitboeck and J. Altmann: "A model for size- and rotation-invariant pattern processing in the visual system," *Biol. Cybern.*, Vol. 51, 113-121(1984).
- (8) L. Massone, G. Sandini and V. Tagliasco: "'Form-Invariant' topological mapping strategy for 2D shape recognition," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol.30, 169-188(1985).
- (9) Y.Kuniyoshi, N.Kita and T.Suehiro: "A Foveated Wide An-

gle Lens for Active Vision," *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan*, vol.2, 2982-2985(1995).

- (10) 末松 良一, 山田 宏高: "中心窩を有する新しい視覚センサの開発", 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.10, 1556-1563(1995)
- (11) 中 千雨, 井口 征士: "人間の網膜特性をもつ視覚センサ", 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.11, 1817-1823(1995)
- (12) G. Sandini and V. Tagliasco: "An anthropomorphic retina-like structure for scene analysis," *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 14, 365-372(1980).
- (13) J. Van der Spiegel, G. Kreider, C. Claeys, I. Debusschre, G. Sandini, P. Dario, F. Fantini, P. Belluti, and G. Soncini: "A Foveated Retina-like Sensor Using CCD technology," in *Analog VLSI and Neural Network Implementations*, C. Mead and M. Ismail, Eds. Boston, MA: DeKluwer (1989)
- (14) R. Widnicki, G. W. Roberts, and M. D. Levine: "A Log-Polar Image Sensor Fabricated in a Standard 1.2 μm ASIC CMOS Process," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.32, 1274-1277(1997)
- (15) Marc Bolduc and M. D. Levine: "A review of biologically motivated space-variant data reduction models for robotic vision," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 69, No.2, 170-184(1998).
- (16) A. S. Rojer and E. L. Schwartz: "Design considerations for a space-variant visual sensor with complex-logarithmic geometry," *10th International Conference on Pattern Recognition*, Vol.2, 278-285(1990).
- (17) J.Magarey and N.Kingsbury: "Motion Estimation using Complex Wavelets," *Technical Report TR-226, Cambridge University Engineering Department*(1995).
- (18) 新田 弘樹: "複素ウェーブレット変換を利用した動き推定", 第 2 回電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, 67(1997).
- (19) Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann: "Tracking and Data Association." Academic Press(1988).

三 橋 渉 (正員) 1969 年 3 月電気通信大学電気通信学部電波通信学科卒業。現在、同学部情報通信工学科助教授。工学博士。空間フィルタ速度計測法、立体視による形状計測法、生体ソナーの計算論的モデル化、テキスト解析などの研究に従事。1990 年度計測自動制御学会論文賞受賞。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本音響学会などの会員。

新 田 弘 樹 (非会員) 1999 年 3 月電気通信大学大学院博士前期課程電子情報学専攻修了。現在、ソニー (株) 勤務。在学中、動きベクトル推定アルゴリズムの高速化や運動物体の追尾方式に関する研究に従事。1997 年 5 月、信学会東京支部より学生会奨励賞を受賞。電子情報通信学会会員。

岡 島 昇 (非会員) 2001 年 3 月電気通信大学大学院博士前期課程電子情報学専攻修了。現在、本田技研工業 (株) 勤務。在学中、立体視による奥行き計測や運動物体の追尾方式に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。