

動画像と距離情報の併用による 3次元運動パラメータの直接的推定法

正員 山本 正信[†]

Direct Estimation of 3D Motion Parameters from Image Sequence and Depth

Masanobu YAMAMOTO[†], Member

あらまし 動画像から動物体の運動パラメータを推定する手法は、画像間照合を基礎とした二段階推定法と時間差分画像の利用に基づく直接的推定法に大別される。直接的推定法を3次元運動に適用すれば、運動情報のみならず3次元形状情報も理論的には推定可能である。しかしながら、推定式が非線型となることや像のごく僅かな変動を仮定していることなどから精度の高い解を得ることは難しく、この手法の長所の1つであるアルゴリズムの簡潔さも失われる。

そこで本論文ではまず、実際の観測点からレンジファインダーの併用を前提に、動物体までの距離情報を利用して、動画像から直接的に運動パラメータを推定する線型方程式を導きその解法を示す。ついで、方程式の解が一意となる条件を吟味することにより、運動が一意に解釈されるための像パターンが満たすべき幾何学的必要十分条件を明らかにする。更に、本手法を実際の動画像に適用し高い精度で運動パラメータが推定できることを実証する。

1. ま え が き

本論文は剛体の3次元運動パラメータを物体までの距離情報を利用して動画像から直接的に推定する手法を提案している。また運動を一意に決定するために、像パターンが満たすべき幾何学的性質についても考察している。

動画像から運動パラメータを推定する場合、方法論的には2つの流儀がある。その1つは二段階推定法とよぶべき手法である。それは、前段で画像上の見かけの動きをオプティカルフローあるいはフレーム間対応として算出し、後段で見かけ上の動きからシーン中の動物体の運動パラメータを求める手法である。2つ目は直接的推定法とよぶべき方法で差分画像の利用に基づいている。画面上の速度ベクトルが画像の明るさの空間的および時間的変化率に拘束されているとき、さらにいくつかの運動パラメータの関数として束縛されているならば、両者の拘束を連立させた方程式系を解くことにより、運動パラメータを推定することが可能である。Limb & Murphy^{(1),(2)}や Cafforio & Rocca⁽³⁾ら

の研究は平行移動している像パターンの運動パラメータを推定したものだと言える。Schalkoff & McVey⁽⁴⁾はこの手法を速度ベクトル場がアフィン変換でモデル化できる運動に拡張し、Hvang & Tsai⁽⁵⁾はさらに3次元運動に拡張した。

本論文で提案する手法は直接的推定法に属するものである。瞬間的な動きの解析では、直接的推定法は二段階推定法に比べて次の2点ですぐれている。

(1) アルゴリズムが簡潔である 二段階推定法はオプティカルフローを中間結果として算出するため処理手続きが複雑である。これに比べて直接的推定法に必要とされる演算は明るさの空間微分とフレーム間差分および連立方程式を解く演算である。従ってハードウェア化による実時間処理も可能である⁽⁴⁾。しかし3次元運動の解析は距離情報が知られていない場合容易ではない。Huangら⁽⁵⁾は対象の3次元構造を平面と仮定し、平面の傾きと運動パラメータを同時に推定する方程式系を導出したが、それらは非線型連立方程式であるために解析的に解くのは容易ではなく、逐次近似法で解を得たとしても、その解が真の解に収束する保証はない。直接的推定法はもともと像のごく僅かな変動を仮定している。そこから対象の3次元構造情報を高い精度で得ることは期待できない。一方、距離情

[†]電子技術総合研究所制御部, 茨城県
Automatic Control Division, Electrotechnical Laboratory,
Ibaraki-ken, 305 Japan

報を得る技術は多数提案され、その速度・精度とも向上している。そこで我々は適当なレンジファインダーを併用することを前提に、距離情報を利用して運動パラメータを動画像から直接推定する手法を2で導く。

(2) 動きの決定可能性が代数的に判定可能 直接的推定法では、与えられた像パターンの動きを一意に決定できるか否かは運動パラメータを推定する方程式系の解の一意性を調べることにより知ることができる。しかしながら、それぞれの場合の像パターンの性質についてはほとんど考察されていない。動きの一意性は像パターンが適当なテクスチャを帯びているといったあいまいな仮定で保証されていたにすぎない。3.では、動きを一意に決定するために必要にしてかつ十分な像パターンの幾何学的構造について論じる。

この様な利点を持つ直接的推定法でありながら、高い自由度を持つ運動の動画像に実際に適用した例は少ない。その理由の1つに、明るさの空間的・時間的勾配値が高い精度で得難いことがあげられる。4.では5枚の画像列を使って信頼度の高い勾配値を算出し、いくつかの動画像に対して本手法を適用することにより、その有効性を実証する。

2. 運動パラメータの推定式とその解法

3次元座標系の x, y 平面をカメラの画像面、 z 軸を光軸とする。動物体を含むシーンは x, y 平面に正射影され、動画像は正射影像の時間関数であるとする。画面上の点 (x, y) の時刻 t における明るさを $E(x, y, t)$ とし、明るさの空間勾配を $(E_x, E_y) = (\partial E / \partial x, \partial E / \partial y)$ 、時間勾配を $E_t = \partial E / \partial t$ とする。時刻 t において画面上の点 (x, y) の近傍の明るさが、 (E_x, E_y) を勾配に持つ平面で近似できるとする。単位時間経過後、この明るさ分布が x 方向に u 、 y 方向に v ほど平行移動したとき、明るさの時間勾配 E_t は近傍内では一定である。従って、図1より次式が成立する。

$$E_x \cdot u + E_y \cdot v + E_t = 0 \quad (1)$$

(1)式は点 (x, y, t) を中心に $E(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$ をテーラー展開することによっても解析的に得られる⁽³⁾。

一方、時刻 t_0 において、画面上の点 (x, y) から光軸方向に最も近い物体面までの距離 $z = d(x, y)$ が与えられているとする。動物体は剛体であるとするれば、位置ベクトル $r = (x, y, z)$ を持つ剛体上の点Pの速度ベクトル $V_p = (u, v, w)$ はこの剛体の運動より生成される速度ベクトル場の原点における速度ベクトル $V_0 = (u_0, v_0, w_0)$ と角速度ベクトル $\Omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$

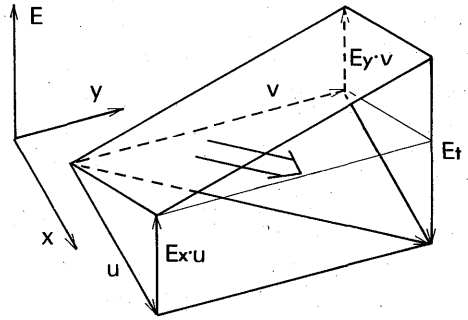


図1 明るさの分布と変動のモデル
Fig.1 A model of brightness pattern and its motion.

をパラメータとして次式で与えられる。

$$V_p = \Omega \times r + V_0 \quad (2)$$

正射影を仮定しているので (u, v) がオプティカルフローである。

さて、(2)式を(1)式に代入すれば、運動パラメータを未知数とする次の線型推定式が得られる。

$$E_x \cdot u_0 + E_y \cdot v_0 - z \cdot E_y \omega_x + z \cdot E_x \omega_y + (x \cdot E_y - y \cdot E_x) \omega_z + E_t = 0 \quad (3)$$

運動が光軸に垂直な平面に限定されるならば、 $\omega_x = \omega_y = 0$ 。従って、(3)式は、

$$E_x \cdot u_0 + E_y \cdot v_0 + (x \cdot E_y - y \cdot E_x) \omega_z + E_t = 0 \quad (3')$$

となる。さらに、回転運動を許さないならば、 $\omega_z = 0$ 。(3)式は(3)''となる。

$$E_x \cdot u_0 + E_y \cdot v_0 + E_t = 0 \quad (3)''$$

(3)', (3)', (3)式でモデル化される運動をそれぞれ1D, 2D, 3D運動とよぶことにする。

未知数の個数より多くの画面上の n 個の点に関して上記の推定式が成立するとすれば、運動パラメータはそれらの推定式を連立させた次の線型一次連立方程式の最小2乗解として得られる。

$$A \cdot X = B \quad (4)$$

ただし、 A の第 i 行ベクトルと未知数ベクトルは、

3D運動の場合、 $(E_{x_i}, E_{y_i}, -z_i E_{y_i}, z_i E_{x_i}, x_i E_{y_i} - y_i E_{x_i})$, $(u_0, v_0, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$,

2D運動の場合、 $(E_{x_i}, E_{y_i}, x_i E_{y_i} - y_i E_{x_i})$, (u_0, v_0, ω_z) ,

1D運動の場合、 (E_{x_i}, E_{y_i}) , (u_0, v_0) である。また定数ベクトル B の第 i 要素は $-E_{t_i}$ である。ここで、

$E_{x_i} = E_x(x_i, y_i, t_0)$, $E_{y_i} = E_y(x_i, y_i, t_0)$, $E_{t_i} = E_t(x_i, y_i, t_0)$ とする。

実際に(4)式から次の正規化方程式を得る。

$$A^T A X = A^T B \quad (5)$$

ただし、添字 T は行列の転置を意味する。

(5)式の係数行列 $A^T A$ が正則であるならば、方程式は一意的な解を持つ。

$$X = [A^T \cdot A]^{-1} A^T \cdot B \quad (6)$$

正則でない場合は 3. で議論する。

3 D 運動の場合、角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega} \neq \mathbf{0}$ ならばこの運動は回転軸を持つ。一般に剛体運動の回転軸は角速度ベクトルと平行に任意に選ぶことができる。ここでは、そのうち軸上の速度ベクトルが角速度ベクトルと同じ向きを持つ回転軸を求める。そのとき回転軸の方程式は、

$$V_p \times \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0} \quad (7)$$

である。その際 w_0 を定める必要があるが、正射影を仮定しているので、(4)式から求めることはできない。そこで、回転軸上では速度ベクトルの軸方向成分が 0 であると仮定して w_0 を定める。すなわち、

$$V_p \cdot \boldsymbol{\omega} = u_0 \cdot \omega_x + v_0 \cdot \omega_y + w_0 \cdot \omega_z = 0 \quad (8)$$

を満たす様に w_0 を定める。ただし、 $\omega_z = 0$ のときは、 $w_0 = 0$ とする。この仮定は通常の場合（転がるボール、開くドア、など）には成立すると考えられるが、常に正しいとは限らない。

3. 動きの決定可能性

運動パラメータを決定する線型一次連立方程式(5)は、その係数行列が正則でないとき、解を一意的に決定することができない。これは、動画像からは動きを一意的に解釈することができない場合である。係数行列 $A^T A$ は明るさの空間勾配の関数であるため、動きの解釈の一意性は像パターンの性質に依存する。本節では、動きの解釈が一意的に確定する場合や定まらない場合などについて、それぞれの像パターンの幾何学的性質を各運動モデルについて明らかにする。

解析を行なう前に画像法線 (Image normal line) と一般化法線 (Generalized normal line) を定義しておく。画面上の点 (x_i, y_i) とその点に射影される動物体表面までの距離 z_i が与えられているとき、次の空間直線を一般化法線 l_i と定義する。

$$\begin{cases} x = E_{x_i} \cdot r_i + x_i \\ y = E_{y_i} \cdot r_i + y_i \\ z = z_i \end{cases} \quad (9)$$

ただし、 r_i はパラメータとする。

点 (x_i, y_i) を通り明るさの空間勾配と同じ向きを方向比に持つ画面上の直線を画像法線とよぶとき、一

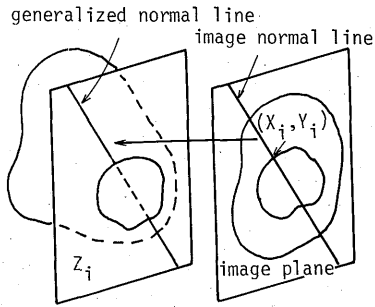


図2 一般化法線と画像法線
Fig.2 Generalized normal line and image normal line.

般化法線は図 2 に示される様に画像法線に対応する物体表面まで平行移動したものだと言える。 z_i を一般化法線 l_i の距離とよぶ。画面上の各点に対して係数行列 A の 1 つの行と一般化法線と画像法線が定義される。従って、問題は一般化法線あるいは画像法線の幾何学的配置と動きの決定可能性との関係について考察することになる。ただし、(3)'、(3)'' 式は距離 z を含まないので、1 D、2 D 運動の場合は画像法線で十分である。

さて、 m をパラメータの数、 n を推定式の個数としたとき、 A は $n \times m$ の行列となり、一般に次の関係式が成立する（文献(8)第 1 章定理 11）。

$$\det(A^T A) = \sum_{(i_1, i_2, \dots, i_m)} \det(A(i_1, i_2, \dots, i_m))^2 \quad (10)$$

$A(i_1, i_2, \dots, i_m)$ は A の第 i_1, i_2, \dots, i_m 行から作られる正方小行列で、和において (i_1, i_2, \dots, i_m) は ${}_n C_m$ 個の組み合わせの上をわたる。従って $\det(A^T A) = 0$ であるための必要十分条件は、任意の (i_1, i_2, \dots, i_m) に対して $\det(A(i_1, i_2, \dots, i_m)) = 0$ である。ゆえに、1 D 運動の場合は 2 本の画像法線、2 D 運動の場合は 3 本の画像法線、3 D 運動の場合は 5 本の一般化法線について、 $\det(A) = 0$ となるとき各法線の幾何学的配置を調べておけば十分である。

1 D、2 D 運動の場合の解析は容易である。

1 D 運動のときの係数行列は、

$$A = \begin{bmatrix} E_{x_1} & E_{y_1} \\ E_{x_2} & E_{y_2} \end{bmatrix}$$

である。2 本の画像法線の配置と動きの決定可能性との関係は次の 2 つの場合に限られる。

1 a 型 画像法線の傾きが等しい場合、図 3 に示される様に傾きと直交する動きは不定である。

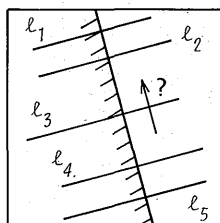


図3 1 a型, 2 a型, 3 a型
Fig.3 1a, 2a, 3a type.

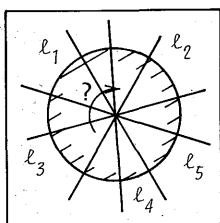


図4 2 b型, 3 d型
Fig.4 2b, 3d type.

1 b型 画像法線の傾きが異なるならば、動きは一意に確定する。

2 D運動のときの係数行列は、

$$A = \begin{bmatrix} E_{x_1}, E_{y_1}, x_1 E_{y_1} - y_1 E_{x_1} \\ E_{x_2}, E_{y_2}, x_2 E_{y_2} - y_2 E_{x_2} \\ E_{x_3}, E_{y_3}, x_3 E_{y_3} - y_3 E_{x_3} \end{bmatrix}$$

である。det(A)=0となる場合は、3本の画像法線が1点で交わるか、またはすべての傾きが等しいかのいずれかである(文献(8)演習問題1の12)。従って、3本の画像法線の配置と動きの決定可能性の関係は次の3つの型に分類される。

2 a型 画像法線の傾きが等しい場合、1 a型と同様傾きと直交する方向の動きが不定である。

2 b型 画像法線が1点に集中している場合、図4に示される様に集中点まわりの角速度は不定である。

2 c型 2 a, 2 b型でなければ動きは一意に定まる。以上の分類結果を表1に整理して示す。

3 D運動のときの係数行列は、

$$A = \begin{bmatrix} E_{x_1}, E_{y_1}, -z_1 E_{y_1}, z_1 E_{x_1}, x_1 E_{y_1} - y_1 E_{x_1} \\ E_{x_2}, E_{y_2}, -z_2 E_{y_2}, z_2 E_{x_2}, x_2 E_{y_2} - y_2 E_{x_2} \\ E_{x_3}, E_{y_3}, -z_3 E_{y_3}, z_3 E_{x_3}, x_3 E_{y_3} - y_3 E_{x_3} \\ E_{x_4}, E_{y_4}, -z_4 E_{y_4}, z_4 E_{x_4}, x_4 E_{y_4} - y_4 E_{x_4} \\ E_{x_5}, E_{y_5}, -z_5 E_{y_5}, z_5 E_{x_5}, x_5 E_{y_5} - y_5 E_{x_5} \end{bmatrix}$$

である。表1に示された条件に従って5つの一般化法線 l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 の幾何学的配置を3 a型から3 j型までの10種類の型に分類する。そのとき、係数行列Aは3 d型と3 j型の場合正則となり動きは一意に確定する。これら2つの型以外の場合には正則とならず、動きは不定である。このことを各々の型ごとに説明する。なお、証明は数式処理システム⁽⁹⁾の支援を必要としたが、ここでは紙面の都合上省略する。

3 a型 一般化法線の傾きがすべて等しいとき、1

表1 像パターン分類と運動の決定可能性

運動	分類条件	運動の解釈
1D	if 2本の画像法線の傾きが等しい. then -----	- 1 a型 不定
	else -----	- 1 b型 確定
2D	if 3本の画像法線の傾きが等しい. then -----	- 2 a型 不定
	or 3本の画像法線が一点で交わる. then -----	- 2 b型 不定
	else -----	- 2 c型 確定
3D	if 5本の一般化法線の傾きがすべて等しい. then -----	- 3 a型 不定
	else 互いに傾きの異なる一般化法線対のうち、	
	if 各対の一般化法線の距離が等しい. then -----	- 3 b型 不定
	else 距離の異なる一般化法線の対が存在する。それを l_1, l_2 とする。	
	残りの一般化法線 l_3, l_4, l_5 のうち、	
	if l_1 とも l_2 とも距離の異なる一般化法線が存在する。それを l_3 とする。	
	then l_1, l_2, l_3 から生成される空間曲面の z_4 切片と z_5 切片のうち、	
	if どちらも、それぞれ l_4, l_5 と同じ傾きをもつ. then -----	- 3 c型 不定
	else 少なくとも一方が l_4 あるいは l_5 と一点で交わる。	
	交わる一般化法線を l_4 とする。	
	if l_1, l_2, l_3, l_4 を通る空間直線が l_5 と交わる. then -----	- 3 d型 不定
	else 交わらない. -----	- 3 e型 確定
else 各一般化法線の距離が l_1 、または l_2 の距離に等しい。		
if $z_1 = z_3 = z_4 = z_5$ then -----	- 3 f型 不定	
else $z_1 = z_3 = z_4, z_2 = z_5$.		
if l_2 と l_5 の傾きが等しい. then -----	- 3 g型 不定	
or l_1, l_3, l_4 の傾きが等しい. then -----	- 3 h型 不定	
or l_1, l_3, l_4 が一点で交わる. then -----	- 3 i型 不定	
else -----	- 3 j型 確定	

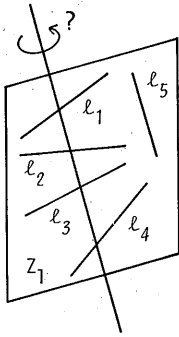


図5 3b型
Fig.5 3b type.



図6 3c型
Fig.6 3c type.

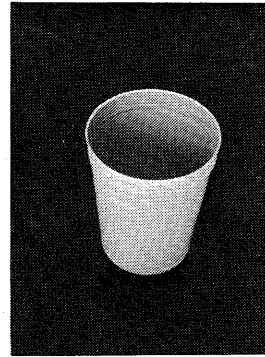


図7 3d型
Fig.7 3d type.

a型や2a型と同様傾きと直交する動きは定まらない。

3b型 一般化法線のうち互に傾きの異なるものが存在しそれらの距離 z が互に等しいとする。傾きの異なる一般化法線を仮に l_1, l_2 としよう。仮定より $z_1 = z_2$ 。 l_1, l_2 以外の一般化法線 l_i は、 l_1, l_2 の少なくとも1つと傾きが異なる。それを l_1 とすれば、再び仮定より $z_i = z_1$ 。従って、 $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5$ 。すなわち3b型の仮定は、すべての一般化法線が光軸に垂直な1つの平面上に存在することと等価である。このとき図5の様にこの平面上の任意の直線を回転軸としたとき、その角速度は定まらない。

一般化法線のうち互に傾きの異なるものが存在するとき、それらのうちで距離 z が異なるものがあるとする。それを仮に l_1, l_2 とするならば、 $z_1 \neq z_2$ である。残りの一般化法線 l_3, l_4, l_5 のうち距離 z が、

(1) z_1 と z_2 と異なるものが存在する場合、または(2)すべて z_1 または z_2 に等しい場合に分けられる。

(1)の場合の考察

距離 z が z_1 および z_2 と異なる一般化法線を l_3 としておく。ここで、 l_1, l_2, l_3 を含む1つの曲面を定義する。 l_1, l_2 を通る空間直線は次式で表わされる。

$$\frac{x - (r_1 E_{x_1} + x_1)}{(r_2 E_{x_2} + x_2) - (r_1 E_{x_1} + x_1)} = \frac{y - (r_1 E_{y_1} + y_1)}{(r_2 E_{y_2} + y_2) - (r_1 E_{y_1} + y_1)}$$

$$= \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (11)$$

この空間直線が l_3 と交わるとすれば、次式を満たす。

$$\frac{(r_3 E_{x_3} + x_3) - (r_1 E_{x_1} + x_1)}{(r_2 E_{x_2} + x_2) - (r_1 E_{x_1} + x_1)} = \frac{(r_3 E_{y_3} + y_3) - (r_1 E_{y_1} + y_1)}{(r_2 E_{y_2} + y_2) - (r_1 E_{y_1} + y_1)}$$

$$= \frac{z_3 - z_1}{z_2 - z_1} \quad (12)$$

(12)式を r_1, r_2 について解き(11)式に代入する。 r_3 を r

に置き換えれば、 x, y は次式で表わされる。

$$\begin{cases} x = (b_1 r + c_1) / a \\ y = (b_2 r - c_2) / a \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 $a = (z_2 - z_3)(z_3 - z_1)(E_{x_1} E_{y_2} - E_{y_1} E_{x_2})$,

$$b_1 = (z - z_1)(z_2 - z_3)E_{x_2}(E_{x_1} E_{y_3} - E_{y_1} E_{x_3})$$

$$+ (z - z_2)(z_3 - z_1)E_{x_1}(E_{x_2} E_{y_3} - E_{y_2} E_{x_3}),$$

$$b_2 = (z - z_1)(z_2 - z_3)E_{y_2}(E_{x_1} E_{y_3} - E_{y_1} E_{x_3})$$

$$+ (z - z_2)(z_3 - z_1)E_{y_1}(E_{x_2} E_{y_3} - E_{y_2} E_{x_3}),$$

$$c_1 = (z_3 - z_1)\{x_2(z - z_3) + x_3(z_2 - z)\}E_{x_1} E_{y_2}$$

$$+ (z_2 - z_3)\{x_1(z - z_3) + x_3(z_1 - z)\}E_{y_1} E_{x_2}$$

$$+ (z - z_3)\{y_1(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_3) + y_3(z_2 - z_1)\}E_{x_1} E_{x_2}$$

$$c_2 = (z_3 - z_1)\{y_2(z - z_3) + y_3(z_2 - z)\}E_{y_1} E_{x_2}$$

$$+ (z_2 - z_3)\{y_1(z - z_3) + y_3(z_1 - z)\}E_{x_1} E_{y_2}$$

$$+ (z - z_3)\{x_1(z_3 - z_2) + x_2(z_1 - z_3) + x_3(z_2 - z_1)\}E_{y_1} E_{y_2}$$

(13)式は1つの曲面を表わしている。この曲面を一般化法線 l_1, l_2, l_3 から生成される空間曲面とよぶ。また、(13)式はこの曲面と光軸に垂直な任意の平面 $z = z_1$ との交線が直線であることを示している。この交線を空間曲面の z_1 切片とよぶ。

3c型 l_1, l_2, l_3 から生成される空間曲面の z_4, z_5 切片が、各々 l_4, l_5 と等しい傾きを持つとき、 $\det(A) = 0$ となり、動きは一意に定まらない。3c型に属する像パターンの例として図6に円筒の周囲に螺旋状の模様が記された物体の像が示されている。像からは、中心軸まわりの螺旋運動の大きさを知ることはできない。実際、任意の5本の一般化法線について、そのうちの3本の一般化法線から空間曲面が生成されるとき、残り2本の一般化法線は生成された空間曲面のそれぞれの切片と同じ傾きを持つことが容易に示される。

3d型 l_1, l_2, l_3 から生成される空間曲面の z_4 あるいは z_5 切片のうち少なくとも1つが、 l_4 あるいは

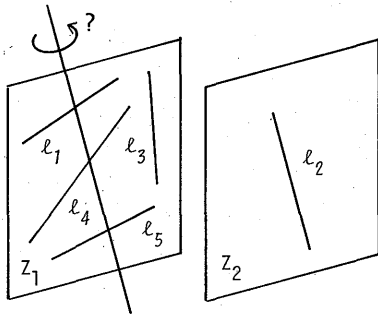


図8 3f型
Fig.8 3f type.

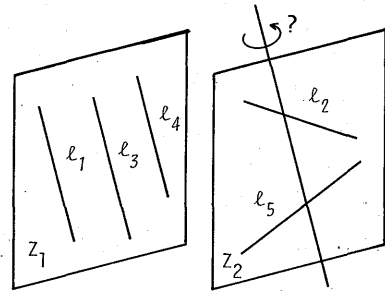


図10 3h型
Fig.10 3h type.

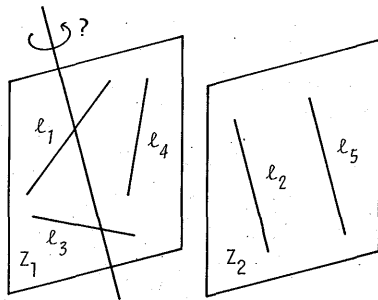


図9 3g型
Fig.9 3g type.

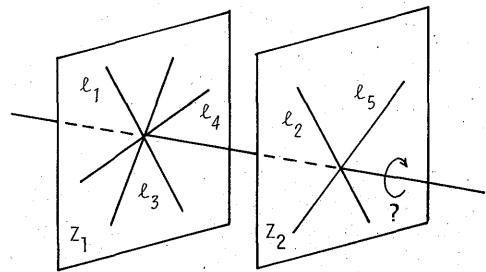


図11 3i型
Fig.11 3i type.

l_5 と 1 点で交わるとする。それを仮に l_4 とおく。その交点を通る空間曲面上の空間直線を L としたとき、 L が l_5 を通るならば、 $\det(A) = 0$ となり、 L を回転軸としたときの角速度の大きさは定まらない。3 d 型の例として表面に模様のないバケツの射影像が図 7 に示されている。このバケツが中心軸まわりに回転しているときには、その角速度を知ることができない。実際、一般化法線はすべてこの中心軸を通ることが容易に示される。

3 e 型 空間直線 L が l_5 を通らないならば、 $\det(A) \neq 0$ となり動きは確定する。

(2) の場合の考察

z_3, z_4, z_5 がそれぞれ z_1, z_2 のいずれかに等しいとき、

$$(2.1) \quad z_1 = z_3 = z_4 = z_5,$$

$$(2.2) \quad z_1 = z_3 = z_4, \quad z_2 = z_5$$

のいずれかであるとしても一般性を失わない。

3 f 型 さて、(2.1) の場合、一般化法線は図 8 の様に配置されている。従って、 $z = z_1$ 平面上で l_2 と平行な直線を回転軸とすれば、その角速度の大きさは一意には定められない。

次に (2.2) の場合、 A の行列式は次の様に表わされる。

$$\det(A) = (z_1 - z_2)^2 \cdot \det(A_1) \cdot \det(A_2) \quad (14)$$

ただし、

$$A_1 = \begin{bmatrix} E_{x_2}, E_{y_2} \\ E_{x_3}, E_{y_3} \\ E_{x_5}, E_{y_5} \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} E_{x_1}, E_{y_1}, x_1 E_{y_1} - y_1 E_{x_1} \\ E_{x_3}, E_{y_3}, x_3 E_{y_3} - y_3 E_{x_3} \\ E_{x_4}, E_{y_4}, x_4 E_{y_4} - y_4 E_{x_4} \end{bmatrix}$$

従って、 $\det(A) = 0$ であるためには、 $\det(A_1) = 0$ または、 $\det(A_2) = 0$ でなければならない。

3 g 型 $\det(A_1) = 0$ のとき、 l_2 と l_5 の傾きが等しい。このとき一般化法線は図 9 の様に配置されている。 $z = z_1$ 平面上で l_2, l_5 と平行な直線を回転軸とすれば、その回転角速度の大きさは定まらない。

$\det(A_2) = 0$ のとき、 l_1, l_3, l_4 の関係は 3 本とも傾きが等しいか、3 本が 1 点で交わるかのいずれかである。

3 h 型 前者の場合の一般化法線の配置を図 10 に示す。このとき、 $z = z_2$ 平面上で l_1, l_3, l_4 に平行な直線を回転軸としたとき、回転角速度の大きさは不定となる。

3 i 型 後者の場合の一般化法線の配置を図 11 に示す。このとき、 $z = z_1, z = z_2$ それぞれの面上で、一般化法線が交わる点を通る空間直線を回転軸としたとき、その角速度の大きさは不定である。

3 j 型 (2.2) の場合ではあるが、3g, 3h, 3i 型

のどの条件も満たさない場合、 $\det(A) \approx 0$ となり動きは一意に確定する。

4. 実 験

実際に動画像から運動パラメータを推定した結果を示す。ここでは、対象とする動物体の像が画像中に占める領域は既知であるとする。

明るさの空間勾配 (E_x, E_y) と時間勾配 E_t は精度よく算出されねばならない。(2)式の成立仮定から、局所的な領域上では、(a)明るさ分布が平面で近似できること、(b)動きが平行移動であり近似範囲から外れないことが必要である。そのためには、時間サンプリング間隔を動きに対して十分速くとることや画像をあらかじめ局所的にスムージングしておく⁽⁶⁾ことなどが必要となる。勾配値は次の様に計算される。動画像を時間順

に並べ奥行座標を時間軸とする3次元画像を図12の様構成する。平面状の明るさ分布が等速度で平行移動しているとき、等しい明るさを持つ点の集合は3次

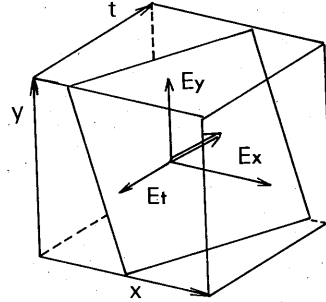


図12 明るさの空間勾配および時間勾配
Fig.12 Spatial and temporal gradients of brightness.

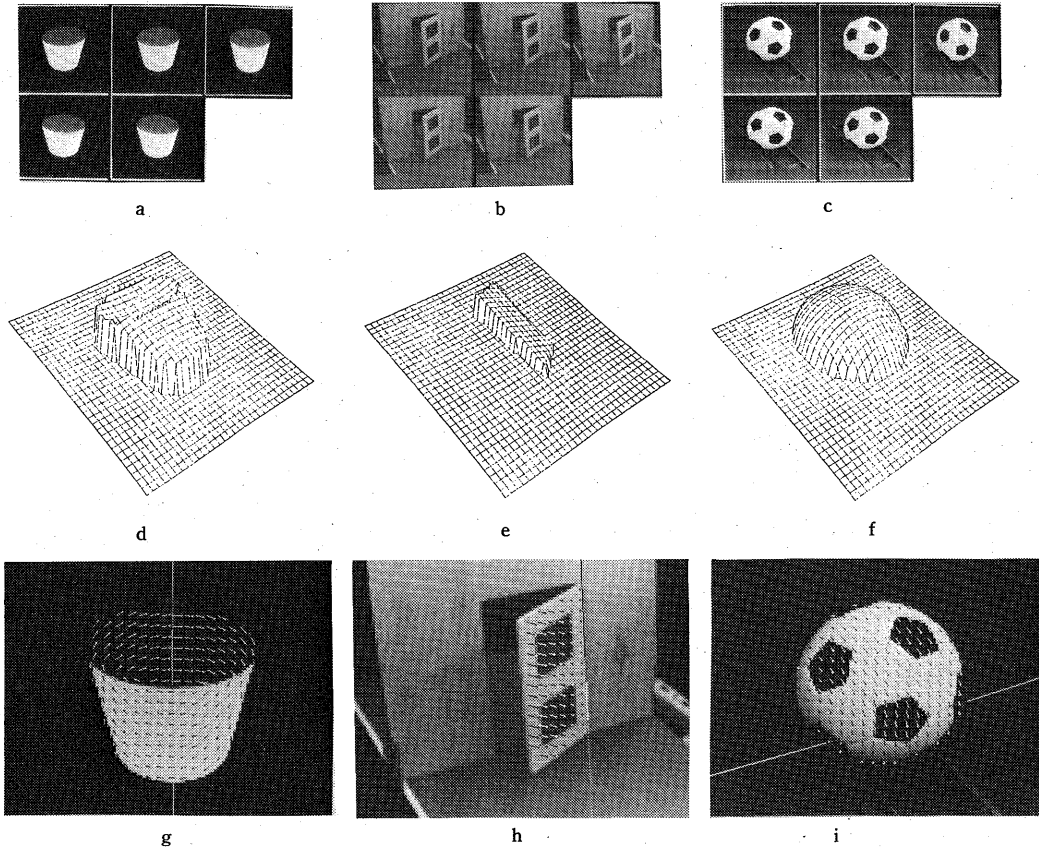


図13 (a,b,c) 動画像, (d,e,f) 3D形状, (g,h,i) オプティカルフローと回転軸,
(a,d,g) 例1, (b,e,h) 例2, (c,f,i) 例3
Fig.13 (a,b,c) Image sequence, (d,e,f) 3D shape, (g,h,i) Optical flow and axis of rotation, (a,d,g) Example 1, (b,e,h) Example 2, (c,f,i) Example 3.

表2 運動パラメータの推定結果

パラメータ	バケツ	ド ア	ボール
u_0	4.712	-0.611	-0.265
v_0	-0.768	0.791	-2.178
w_0	-1.565	1.226	1.704
ω_x	0	0.068×10^{-2}	-1.77×10^{-2}
ω_y	-2.412×10^{-2}	1.434×10^{-2}	0.793×10^{-2}
ω_z	2.75×10^{-2}	-0.892×10^{-2}	0.739×10^{-2}
$ \omega $	2.096	1.02	1.189
$ \omega $ の理論値	2	1	1.185

単位: u_0, v_0, w_0 は画素/フレーム. $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は rad/フレーム. 角速度の大きさ $|\omega|$ は度/フレーム.

元画像中で平面を形成する. この平面の法線ベクトル成分が, 空間勾配および時間勾配である. 従って, 法線ベクトルは, 3Dエッジ検出オペレータの出力で得られる. 本実験では, 3Dエッジ検出オペレータのなかでもSN比が特に良いものとして知られている, Zucker¹⁰⁾らの提案したオペレータのうちサイズが $5 \times 5 \times 5$ のものを使用した. 従って, 動画像のフレーム数は5枚である. また画像サイズは 128×128 で明度階調は7bitである. 距離情報は, 第3フレームに対するものである.

さて, 次の3種類の動画像例について実験を行なった. ただし, 例1だけが計算機により人工的に合成された動画像である.

[例1] 回転対称軸のまわりを2度/フレームで回転しているバケツ. バケツの口は長径と短径の比が3:2の楕円形に歪ませてある. 従って, 3d型の例とは異なりその運動は一意に解釈可能である. このバケツは局所的な特徴点を得難いため二段階推定法では動きの推定が難しい例である.

[例2] 1度/フレームで開きつつあるドア. 回転軸の推定精度を評価するための例である.

[例3] 2mm/フレームの速度で転っているボール. ボールの実際の回転半径は9.67cmであった. 従って, 角速度の大きさの理論値は1.185度/フレームである. この例では前2つの例とは異なり回転軸が移動している.

各例の動画像とその3コマ目に対応する物体の3次元形状図が, 図13の上の行と中の行に示されている.

距離 z はこの3次元形状図から与えられる.

それぞれの例に対し運動パラメータを推定した結果を表2に示す. また, 得られた運動パラメータから算出されたオプティカルフローと回転軸をそれぞれの原

画像に重ね合わせたのが図13の下の行である. 回転軸の陰線部は点線で示されている.

5. むすび

距離情報を併用して動画像から剛体の3次元運動パラメータを算出する手法を提案した. 本手法は, 平行移動や平面運動の解析法を特殊例として含んでいる. また, 一意に動きを決定することができない像パターンは8種類の特殊な幾何学的構造を持つ像またはそれらの組み合わせからなる像に限られることを示した. このことは, 動きが一意に決定可能な像パターンの限界を幾何学的に明らかにするものである.

なお, 複数動物体の場合や中心投影カメラモデルでの解析などが残されているが, これらは重要な問題であるので稿を改めて論じたい.

謝辞 御検討頂きました白井良明室長, 研究室諸兄, 田村秀行主任研究官に感謝すると共に, Viewシステム利用の便宜をはかって頂いた築根秀男, 坂根茂幸主任研究官に深謝致します.

文 献

- (1) J. O. Limb and J. A. Murphy: "Measuring the speed of moving objects from television signals", IEEE Trans., COM-23, pp. 474-478 (1975).
- (2) J. O. Limb and J. A. Murphy: "Estimation of velocity of moving images in television signals", C. G. I. P., 4, pp. 311-327 (1975).
- (3) C. Cafforio and F. Rocca: "Methods for measuring small displacements of television images", IEEE Trans., IT-22, 5, pp. 573-579 (1976).
- (4) R. J. Schalkoff and E. S. McVey: "A model and tracking algorithm for a class of video targets", IEEE Trans., PAMI-4, 1, pp. 2-10 (1982).
- (5) T. S. Huang and R. Y. Tsai: "Image sequence analysis: Motion estimation", in Image sequence analysis, T. S. Huang ed., New York, Springer-Verlag (1981).
- (6) T. S. Huang and Y. P. Hsu: "Image Sequence Enhancement", ibid.
- (7) 岩堀長慶: ベクトル解析, 裳華房, §12 (1960).
- (8) 大島 勝, 他: 基礎過程線型代数学, 学術図書出版社 (1968).
- (9) A. C. Hearn: "REDUCE 2 USER'S MANUAL", University of Utah (1973).
- (10) S. W. Zucker and R. A. Hummel: "A three dimensional edge operator", IEEE Trans., PAMI-3, 3, pp. 324-331 (1981).

(昭和59年6月18日受付)