3 視点からのオプティカルフローによる 3 次元速度ベクトル場の復元[†]

築 根 秀 男*

Recovering 3-D Velocity Vector Field Using Optical Flow Observed from Three Views

Hideo TSUKUNE*

This paper describes a method for analyzing optical flow and reconstructing 3-D motion and structure using three views. Instead of taking correspondence between tokens in stereo images, it tries to estimate motion and structure by comparing the analytic representation of optical flows in stereo images. The assumptions made here are: 1) images are formed by orthographic projection, 2) a rigid motion is to be analyzed. Firstly it is shown that the optical flow of an arbitrary motion is that of purely rotational motion under orthographic projection. Then by combining the parameters describing apparent rotational optical flow observed from each view, the 3-D velocity vector field can be reconstructed. The calculation of depth map of the object in motion follows directly. In order to adjust the estimated parameters of the rotational optical flows from three views and obtain a more plausible solution, an optimizing process is proposed where the geometrical relation between three views are used as constraints. The results of applying this method to computer generated optical flow and real optical flow are shown and the effectiveness of the method is tested. The merit of the method is that it can recover the 3-D velocity vector field and the depth map of the moving object from noisy optical flow avoiding correspondence problem peculiar to stereoscopic techniques.

Key Words: optical flow, 3-D motion, dynamic stereo, constrained optimization, computer vision

1. はじめに

運動する剛体の動画像を処理し運動と運動物体の認識を行う研究が従来より試みられてきた。多くの方法は、動画像からオプティカルフロー（以下紛らわしくない限り OF と略す）と呼ばれる画像上の 2 次元速度ベクトル場を計算することを前処理として行う¹⁾。OF は 3 次元の速度ベクトル場の画像上への投影であり、この解析から、瞬間的な運動のようすのみならず物体の構造をも推定することが可能である^{2)~4)}。

しかし、現実の動画像から得られる OF は、物体の運動情報を十分に反映しない場合が多い。すなわち、実動画像には何らかのノイズが通常含まれているし、また、計算過程の前提となる対象物に関する仮定が実際の適用場面で満たされていないこともある。特に、時空間微分法と呼ばれる OF 計算法は陽にフレーム画像間に対応付けをとる必要がなく高速化の可能な方法であるが、微分操作を含むこと、大きな動きに対しては追従しきれないこと、運動の異なる物体間の境界付近で問題を生ずること、運動物体に関する発見的な知識を要すること、により誤差が避けられない^{1), 5)~8)}。

このため、理論結果を直ちに現実の画像から計算した OF に適用することが困難な場合が多く、実用への障害となっている。たとえば、多くの理論は問題を非線形方程式を解くことに帰着させるが、OF の誤差により計算誤差が大きくなるばかりでなく、計算不安定となるおそれがある。この対策としては、1) OF の計算法そのものの改善を試みるもの^{7)~9)}、2) 運動や対象物体に関する事前知識を与えて問題を単純化するもの^{10), 11)}、がある。1)については、その性能はさまざまな工夫によって向上していくものと期待されるが、誤差要因を完全に除去することは難しいものと考えられる。2)については、事前知識の必要性がそのまま手

† 第 31 回自動制御連合講演会で発表 (1988・10)

* 電子技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-4

* Electrotechnical Laboratory, Tsukuba

(Received January 23, 1989)

(Revised June 5, 1989)

法適用の際に制限条件となる。

本論文は、複数視点からの OF をつぎあわせて冗長情報を利用することにより、誤差を含む現実の OF から剛体運動と物体に関する情報を得ようとするものである。

このようなオプティカルフロー法とステレオ法を組み合わせる方法はいくつか提案されている^{12)~14)}。しかしながら、これらは特徴点間の対応付けを前提としているため、ステレオ法固有の問題として、対応付けを行う際の多重対応問題とオクルージョン問題が付随してくる。このため、複雑な処理が避けられない。ステレオ法の分野では、最近、対応付けを確かなものとするため三つ以上のカメラを用いてその冗長性を利用する方法が提案されており^{15),16)}、多重対応問題を相当程度軽減することができ有力であるが、対応付けの問題は依然として残るものと考えられる。

ここでは、従来のアプローチと異なり、各視点から観測した画像の特徴点間の対応を求める代わりに、各視点で観測した動画像から計算された OF を各画像ごとに解析し、視点間でこれら解析結果を比較することにより 3 次元速度ベクトル場を推定する。対応付けについては、微小な探索範囲において解析的な手法を適用する時空間微分法の方が、ステレオ法において一定範囲にわたってステレオ画像間で特徴点を探索し整合する方法よりも、処理の高速化が期待できる¹⁷⁾。本手法は局所的な対応付けを時間軸方向で行い、ステレオ効果は大域的に OF を関係付けることにより求めるものである。ここでの仮定は、1) 画像形成は正射影によること、2) 単一の剛体運動を観測すること、である。1) は大きな仮定であるが、現実の場面でも正射影とみなせる場合が少なくないこと、計算が簡単となり結果として安定に解が求められること、から採用した。まず、仮定 1) のもとでは、任意の運動の OF は見かけ上回転運動の OF と一致することを示す。ついで、三つの複数視点から観測した見かけ上の回転 OF のパラメータを組み合わせる 3 次元速度ベクトル場のパラメータを求める。実際には 3 視点間の幾何学的関係を制約条件とする非線形最小化問題を解くことになる。本方法によれば各ステレオ画像間の対応付けを回避しつつ誤差を含む OF から 3 次元情報の算出が可能である。

2. オプティカルフローの成分分解

3 次元空間内の剛体運動による速度ベクトル場を F とする。 F は回転成分 F_r と並進成分 F_u に分けて考えることができる。**Fig. 1** に 1 点 $P(x, y, z)$ の運動を記述するパラメータを導入する。まず、 F_r を記述

Fig. 1 Parameters specifying the motion of a point in 3-D space

するパラメータについて、回転角速度を ω 、回転軸方向を示すベクトルを t 、座標系原点からの回転軸の偏位ベクトルを l とする。ここで、つぎの関係がある。

$$|t| = 1 \quad (1)$$

$$l \cdot t = 0 \quad (2)$$

回転軸の方向は ϕ と θ ($-\pi/2 < \phi, \theta \leq \pi/2$) でも指定することとする。 F_u については、並進速度を u とおく。さて、点 P の速度ベクトルを $dx = (dx, dy, dz)^t$ 、また、 $X = x - l = (X, Y, Z)^t$ とおけば、速度ベクトル場は次式で与えられる。

$$dx = \omega(t \times X) + u \quad (3)$$

(3) 式を成分に展開すれば、

$$dx = \omega(t_y Z - t_z Y) + u_x$$

$$dy = \omega(t_z X - t_x Z) + u_y \quad (3)'$$

$$dz = \omega(t_x Y - t_y X) + u_z$$

である。

視線ベクトルを z 軸にとり、 xy 平面を画像面として F を正射影したものが OF であり、(3) 式の dx, dy で与えられる。以後一般に * を付けた記号は射影量を表わすものとする。また、OF ベクトルの数は速度ベクトル場 F を記述するパラメータ数よりも十分多いものとする。

さて、 u を回転軸に垂直な成分 u_n と平行な成分 u_t とに分解してみる： $u = u_n + u_t$ 。 $u = 0$ のときの回転軸の偏位ベクトルが l であれば、垂直な成分 u_n は 3 次元回転速度ベクトル場を平行にシフトさせ、 l を $l' = l + \Delta l_n = l + t \times u_n / \omega$ に変えるものとみることができる。この関係式は周知のように 3 次元空間中で Δl_n と u_n とが相互関係を保ちながら任意の値を取れることを示している。以下では常に $u_n = 0$ とし、このときの回転軸の偏位ベクトルを改めて l とする。一方、平行な成分 u_t は、回転運動の速度ベクトル場を螺旋運動に

より引き起こされる速度ベクトル場に変える。以後、 $\mathbf{u}$ を改めて $\mathbf{u}$ とおくことにし、この意味での一般運動の速度ベクトル場のパラメータを $\mathcal{E}=[\omega, \mathbf{t}, \mathbf{l}, \mathbf{u}]$ とする。

さらに、一般運動の OF は回転運動の OF を平行にシフトしたものと見ることができることを示そう。まず、一般運動の OF の解釈は一意には定まらない。実際、 $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}'$ の二つのパラメータで表わされる2通りの解釈を与えてみよう。すると、(3)'式より、関係式

$$\begin{aligned} d\mathbf{x}^* &= \omega([t_y Z - t_z Y], [t_z X - t_x Z])' + \mathbf{u}^* \\ &= \omega'([t_y' Z' - t_z' Y'], [t_z' X' - t_x' Z'])' + \mathbf{u}'^* \end{aligned}$$

が画面上のすべての OF ベクトルに対して恒等的に成立しなければならない。ここで、 $\omega t_z \neq 0$ と仮定し、 $|\mathbf{t}|=1$, $\mathbf{t} \times \mathbf{u}=0$, を用いれば、

$$\omega' = \omega, \quad \mathbf{t}' = \mathbf{t}$$

$$\Delta \mathbf{l} = (\Delta u_y / (\omega t_z), -\Delta u_x / (\omega t_z), 0)'$$

なる関係式が得られる。

ここで、 $\Delta \mathbf{l} = \mathbf{l}' - \mathbf{l}$, $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}' - \mathbf{u}$ である。この結果は、元の3次元速度ベクトル場が回転軸に平行な並進成分をもっている、OF においては $\Delta \mathbf{l}^*$ と $\Delta \mathbf{u}^*$ とが相互関係を保ちながら任意の値を取れることを意味する。つぎに、特に $u'_z = u_z = 0$ とおけば、OF は見かけ上回転運動の OF として解釈できる。なお、 $\omega t_z = 0$ であっても同様である。

OF は(3)'の第1, 2式で与えられる。しかし、これらの式の右辺は画面上では観測不可能な量 $Z (=z - l_z)$ を含んでいる。そこで、 Z を両式から消去し、観測可能量である x, y, dx, dy と速度ベクトル場を記述するパラメータの一部からなる式を求める。これは OF を記述する式であり、観測される OF ベクトルのデータを用いて速度ベクトル場のパラメータの一部を決定することができる。OF の式には二つの形式があり、

1) t_x と t_y の少なくとも一方が0でないならば、

$$\mathbf{t}^* \cdot d\mathbf{x}^* = -\omega^* \det(\mathbf{t}^*, \mathbf{X}^*) + \mathbf{t}^* \cdot \mathbf{u}^* \quad (4)$$

2) t_x と t_y がともに0であれば、

$$d\mathbf{x}^* = \omega^* (-Y, X)' + \mathbf{u}^* \quad (5)$$

となる。ただし、 $\omega^* = \omega \cos \theta$ とする。2)は、視線ベクトルが回転軸の方向と一致する特別な場合である。さて、1)の形式の OF において回転成分がない、すなわち、 $\omega^* = 0$ となる場合がある。それはつぎの3), 4)であり、

3) $\omega = 0$ のとき、

$$d\mathbf{x}^* = \mathbf{u}^* \quad (6)$$

4) $|\theta| = \pi/2$ のとき、

$$\mathbf{t}^* \cdot d\mathbf{x}^* = \mathbf{t}^* \cdot \mathbf{u}^* \quad (7)$$

となる。3)は純粋並進運動であり、4)は視線ベクトルと回転軸が直交する場合である。2), 3), 4)の場合は5章においてまとめて論ずることとし、以下では一般的な1)の場合について考察を加えていく。

(4)式を整理し、OF を規定するパラメータを定義しておく。まず、 $\mathbf{u}=0$ のとき、回転 OF の式

$$Q \equiv dx + K dy - \omega^* \{K(x-L) - y\} = 0 \quad (8)$$

を得る。ここで、 K, L はつぎで与えられる。

$$K = \tan \phi, \quad L = l_x - (l_y/K) \quad (9)$$

K は射影回転軸の傾き、 L は x 切片であり、 ω^* を加えて射影された回転速度ベクトル場を規定する三つのパラメータとし、 $\xi = [K, \omega^*, L]$ と表記する。

なお、 $|\phi| = 0, \pi/2$ の場合でも OF を観測する画面上に設定した座標系を回転することによって回避できるので(9)式の一般性は失われない。

$\mathbf{u} \neq 0$ のときは前述の議論により OF は見かけ上回転運動の OF であり、やはり(8)式で表現できて ξ が OF を規定する。ただし、OF は $\mathbf{u}=0$ のときと比べて全体が平行移動し、射影回転軸の x 切片は

$$\Delta L = -(u_x + K u_y) / (\omega^* K) \quad (10)$$

だけシフトする。

3. 複数視点による3次元速度ベクトル場の復元

一つの OF から画面上の見かけの回転運動を記述するパラメータ ξ が得られる。本章では、視線ベクトルが互いに平行でない複数視点から一つの3次元速度ベクトル場を観測したとき得られる OF 間の関係を用いて元の3次元速度ベクトル場を復元する (Fig. 2)。この場合、観測座標系は既知とする。個々の OF ベクトルを複数視点画像の間で対応付ける代わりに、OF ベクトルの集合である OF 全体を画像間で比較し解析する。このようにすることにより複数視点画像間の対応付け問題が回避される。

3.1 回転成分の復元

まず、運動が純粋に回転運動であるものとする。同一の回転速度ベクトル場を視線ベクトルが互いに平行でない二つの視点から観測するものとする。各視点の

Fig. 2 Observing 3-D velocity vector field from three views

観測座標系を E_i ($i=1, 2$) とし、絶対座標系からの偏位ベクトルと回転行列をそれぞれ $\mathbf{d}_i$, R_i とすれば、 E_i 上では回転軸の方向ベクトル $\mathbf{t}$ と偏位ベクトル $\mathbf{l}$ はそれぞれ、

$$\mathbf{t}_i = R_i \mathbf{t}, \quad \mathbf{l}_i = R_i (\mathbf{l} - \mathbf{d}_i)$$

となる。各視点から観測した OF のパラメータは $\xi_i = [K_i, \omega_i^*, L_i]$ である。

ξ_i ($i=1, 2$) から $\mathcal{F} = [\omega, \mathbf{t}, \mathbf{l}, \mathbf{u}]$ (ただし $\mathbf{u} = 0$) が求められることを示す。まず、2 視点の観測データから ω , $\mathbf{t}$ を決定する。行列 R_i を、 $R_i = (\mathbf{r}_i^1, \mathbf{r}_i^2, \mathbf{r}_i^3) = \{\mathbf{r}_i^j\}$ とおくと、

$$K_i = \mathbf{r}_i^2 \cdot \mathbf{t} / \mathbf{r}_i^1 \cdot \mathbf{t} \quad (11)$$

$$\omega_i^* = \omega \mathbf{r}_i^3 \cdot \mathbf{t} \quad (12)$$

なる関係がある。 ω_i^* を組み合わせて (12) 式より、

$$\omega_i^* / \omega_i^* = \mathbf{r}_i^3 \cdot \mathbf{t} / \mathbf{r}_i^1 \cdot \mathbf{t} \quad (13)$$

を得る。(11), (13), (1) 式から $\mathbf{t}$, (12) 式から ω が決まる。つぎに、 $\mathbf{l}$ を決定する。各視点について

$$L_i = l_{xi} + l_{yi} / K_i \quad (14)$$

の関係が得られ、(2) 式と組み合わせて $\mathbf{l}$ が求められる。

3.2 並進成分の復元

運動が並進成分を含む場合でも、上述の手続きにより、2 視点で観測された回転 OF を生じさせるような回転運動が見かけ上得られる。さらに、回転軸に平行な並進成分を見かけの回転軸の偏位ベクトルから分離するには、別の情報を必要とする。ここでは、視線ベクトルが第 1, 第 2 視点のそれと平行でない、第 3 の視点 E_3 を導入する。(10), (14) 式より、

$$L_i = l_{xi} - l_{yi} / K_i + \Delta L_i \quad (i=1-3) \quad (15)$$

の関係を得る。ただし、 ΔL_i は

$$\Delta L_i = -|\mathbf{u}|(t_{xi}^2 + t_{yi}^2) / (\omega t_{yi} t_{xi})$$

である。 $\mathbf{l}$, $\mathbf{u}$ は (15) 式と (2) 式から求められる。したがって、3 視点から観測した OF を用いて (3) 式のパラメータが $\mathbf{u}_n = 0$ として求められた。

3.3 対象物の存在領域の推定

OF から 3 次元速度ベクトル場のパラメータが算定されるとこれを用いて対象運動物体の 3 次元の存在領域を推定できる。各視点 E_i から観測した OF ベクトルのデータ (x, y, dx, dy) を (3)' 式に代入すれば、 z , dz が復元され、対象物の存在領域が推定される。

なお、(3) 式において、 $\mathbf{l}$ と $\mathbf{u}$ は物体上の点であれば同一であるから、個々の OF ベクトルに対応する運動点間の相対的な 3 次元の位置関係は 2 視点からの OF だけで計算可能である。

4. 最小化問題の構成

ある視点からの OF パラメータを求めるには、(8) 式よりおのおの OF につき無制約最小化問題：

$$\min[\xi_i] \sum (Q_i)^2 \quad (i=1-3) \quad (16)$$

を解けばよい。ここで、 Q_i は視点 i に対する (8) 式の Q であり、 $\min[\]$ は $[\]$ 内のパラメータについて最小とすることを意味し、総和はすべての OF ベクトルについてとる。これら ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 から前章の計算により速度ベクトル場が求められる。しかし、OF の観測誤差のため (16) 式で求めた三つの OF パラメータは通常相互に矛盾する。すなわち、3 視点からの観測データを用いることにより (1), (2), (11), (12), (15) の各式が成立する。求めるべきパラメータは ω , $\mathbf{t}$, $\mathbf{l}$, $\mathbf{u}$ の 8 個であるから、三つの冗長性が存在する。

そこで、冗長性を除去し解が矛盾なく一意に決まるように各視点間の幾何学的変換関係を制約条件として導入する (Fig. 2)。

制約条件としてはつぎのようなものを考えればよい。

1) 2 視点の OF を組み合わせて見かけの回転運動パラメータを計算するとき、2 視点に対して唯一つ決まる。

2) 三つの 2 視点の OF の組で計算された 3 通りの見かけの回転運動のパラメータ (すなわち、運動の回転成分パラメータ) が一致する。

ここで、つぎのベクトルを定義する ($i=1-3$)。

$$\mathbf{v}_i = \begin{pmatrix} K_i r_i^{11} - r_i^{21} \\ K_i r_i^{12} - r_i^{22} \\ K_i r_i^{13} - r_i^{23} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{w}_i = \begin{pmatrix} \omega_{i+1}^* r_i^{31} - \omega_i^* r_{i+1}^{31} \\ \omega_{i+1}^* r_i^{32} - \omega_i^* r_{i+1}^{32} \\ \omega_{i+1}^* r_i^{33} - \omega_i^* r_{i+1}^{33} \end{pmatrix},$$

ただし、添字の加算は 3 を法として行うものとしている。つぎにこのベクトルを用いてつぎの行列を定義する。

$$A_k = (\mathbf{v}_k, \mathbf{v}_{k+1}, \mathbf{w}_k) \quad (k=1-3),$$

$$B = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3), \quad C = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3)$$

まず、1) については、各 2 視点 i, j の組に対してつぎの連立式がそれぞれ一意な解をもつことである。

$$A_k \mathbf{t} = 0, \quad |\mathbf{t}| = 1 \quad (k=1-3) \quad (17)$$

2) については、二つの連立式

$$B \mathbf{t} = 0, \quad |\mathbf{t}| = 1 \quad (18)$$

$$C \mathbf{t} = 0, \quad |\mathbf{t}| = 1 \quad (19)$$

がそれぞれ一意な解をもつことである。(17)~(19) 式

の解の一意性を保障する条件は、つぎようになる。

$$\det(A_k)=0 \quad (k=1-3) \quad (20)$$

$$\det(B)=0 \quad (21)$$

$$\det(C)=0 \quad (22)$$

(22) 式は常に成立し、(20) 式の 3 式のうち一つは独立でないから、少なくとも (20) 式の 2 式と (21) 式を制約条件に選べばよい。ここでは 3 視点間の対称性保存のため、(20) 式の 3 式と、(21) 式を制約条件として採用している。

そこで、(16) 式の無制約解を初期値とし、改めて制約条件 (20)、(21) 式のもとで最小化問題を解いて 3 次元運動のパラメータを決定する。

$$\min[\xi_1, \xi_2, \xi_3] \sum_{i=1,2,3} \Sigma(Q_i)^2 \quad (23)$$

5. 特別な場合

今までは、運動が回転成分を含み、視線が回転軸に対して一般的な位置関係にある場合を考察してきた。以後、このような場合に観測される OF を一般 OF と呼ぶ。ここでは、純粹並進運動の場合と、視点と回転軸の位置関係により OF が縮退する場合とを考察する。

5.1 純粹並進運動の場合

OF は (6) 式である。これを、純粹並進 OF と呼ぶ。1 視点から観測した OF より、 u_x と u_y が求められ、2 視点からの OF を組み合わせることにより 3 次元並進速度ベクトル場が復元できる。しかしながら、正射影仮定から運動物体上の点に関する情報は得られず物体の存在領域の推定はできない。

5.2 縮退する場合

(1) 縮退回転 OF

(5) 式の場合、すなわち、視線が回転軸に平行な場合は運動によって引き起こされる OF は 2 次元の回転運動の速度ベクトル場となる。これを縮退回転 OF と呼ぶことにする。この場合、明らかに u_z 以外の 3 次元速度ベクトル場のパラメータが決まる。

(2) 縮退並進 OF

(7) 式の場合、すなわち、視線が回転軸に垂直な場合は、OF ベクトルはすべて平行となる。これを縮退並進 OF と呼ぶ。K と $u_x + Ku_y$ の値が決まる。

互いに平行でない 3 視点を用いて一般運動を観測する場合、(1)、(2) の特別な場合を考慮したあらゆる組合せが 7 通り考えられるが、3 視点とも縮退並進 OF を観測する場合以外は 3 次元速度ベクトル場、物体の存在領域ともに復元可能である。

6. 処理の手順

3 視点からの OF が与えられた時の手順をつぎに示す。

手順 A

- 1) 手順 B に従って各 OF を分類する。
- 2) 復元の不可能な場合を除いて以下の処理を行う。
- 3) 各 OF の種類に対応した制約付き最小化問題を解く。特に、3 視点ともに一般 OF を観測する場合の手順を手順 C に示す。
- 4) 3 次元速度ベクトル場のパラメータと OF を用いて物体の存在領域を推定する。

手順 B

$\varepsilon_1 \sim \varepsilon_5$ は適当な正の微小数とする。

- 1) OF に対し、(4) 式より導いたつぎの線形式をあてはめる。

$$dx + Ady + Bx + Cy + D = 0$$

- 2) $|C| < \varepsilon_1$ ならば、3) へ、 $|C| > \varepsilon_1$ ならば、7) へ。
- 3) $|B| < \varepsilon_2$ ならば、分類不能で終了、 $|B| > \varepsilon_2$ ならば、4) へ。

- 4) すべての OF ベクトルに対し、その絶対値の平均、分散が ε_3 より小ならば、静止 OF と判定し終了。そうでなければ、5) へ。

- 5) すべての OF ベクトルに対し、その偏角の分散が ε_4 より小ならば、6) へ、 ε_4 以上ならば、分類不能で終了。

- 6) すべての OF ベクトルに対し、その絶対値の分散が ε_5 より小ならば、純粹並進 OF と判定し終了。そうでなければ、縮退並進 OF と判定し終了。

- 7) OF に対し (5) 式をあてはめる。求めた縮退回転 OF を元の OF と比較し誤差がしきい値以下であれば縮退回転 OF と判定し終了。そうでなければ、一般 OF と判定し終了。

手順 C¹⁸⁾

手順中 x は (ξ_1, ξ_2, ξ_3) を表わす。

- 1) 無制約最小化問題 (16) を解きその解を x^0 とおく。初期値は手順 B の 1) で推定した係数より決定する。

- 2) x^0 を初期値とし、初期スカラーパラメータを $s_k^0 > 0$ ($k=1 \sim 4$) とし $m=1$ とおく。

- 3) 無制約最小化問題

$$\Pi = f(x) + \phi(x)$$

を x^{m-1} を初期値として解き、解を x^m とする。ここで、

$$f(x) = \sum_{i=1,2,3} \Sigma(Q_i)^2$$

は目的関数であり、

$$\phi(\mathbf{x}) = \sum_{k=1,2,3,4} s_k^m \det(A_k)^2$$

はペナルティ関数である。ただし、 $A_4 \equiv B$ とする。解 $\mathbf{x}_m$ に対して行列 A_k の特異値分解を行い、第 2、第 3 特異値の比 ρ_k を計算する。

4) 収束したならば、6) へ。

5) $s_k^{m+1} = \beta s_k^m (\beta > 1)$, $m = m + 1$ とする。さらに、最大の ρ_k に対応する s_k^m に対して、 $s_k^m = \beta' s_k^m (\beta' > 1)$ として余分にペナルティ係数を増やし 3) へ。

6) ρ_k の最大値があるしきい値よりも大きければ解無しとして終了する。

7) 行列 B の特異値分解から $\mathbf{t}$ を決定する。 $k=1-3$ について最小の ρ_k を与える行列 A_k から ω を決定する。(15)式より $\mathbf{l}, \mathbf{u}$ を決定する。

7. 実験結果

実験に用いた画像サイズは 256×256 である。

実験 A： 球の運動に対する OF を計算機で生成し、本方法を適用した。視点配置は、

$$E_1: \mathbf{d}_1 = (0, 0, 0)^t, \quad \mathbf{e}_1 = (0, 0, 1)^t,$$

$$E_2: \mathbf{d}_2 = (0, 0, 0)^t, \quad \mathbf{e}_2 = (0, -0.259, 0.966)^t,$$

$$E_3: \mathbf{d}_3 = (0, 0, 0)^t, \quad \mathbf{e}_3 = (0, 0.259, 0.966)^t,$$

とした。ここで、視点 E_i の指定方法はつぎのようである。まず、 E_i の観測座標系を絶対座標系と一致させておき、その視線ベクトルを x 軸負の方向とする。

$\mathbf{e}_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)^t$ は、この観測座標系を順番に z 軸まわりに α_i , y 軸まわりに β_i , x 軸まわりに γ_i 回転させた視線ベクトルを表わす。この回転後の観測座標系を $\mathbf{d}_i = (d_{xi}, d_{yi}, d_{zi})^t$ だけ移動させることにより視点 E_i が決まる。回転行列 R_i は $\mathbf{e}_i$ より決まる。このような条件下で各視点で観測される OF を計算し、入力データとする。ただし、OF ベクトルには絶対値に対し $\pm 5\%$ 、偏角に対し $\pm 5^\circ$ の一様分布ノイズを与えた。3 次元速度ベクトル場のパラメータのうち、 $\phi = 45^\circ$, $\mathbf{l} = (0, 0, 0)^t$, $\mathbf{u}_i = 1/\text{frame}$ に固定し、 ω , θ をそれぞれ $0 \sim 3^\circ/\text{frame}$, $0 \sim 90^\circ$ の範囲で変化させて各視点からの OF を生成する。Fig. 3 に $\omega = 3^\circ/\text{frame}$, $\theta = 45^\circ$ のとき視点 E_1 に対して生成した OF 例を示す。

Fig. 3 Simulated optical flow of a moving sphere

なお、図中の実線は推定した射影回転軸を示す。

ω , θ を変化させ、解を求めたときの回転軸の方向ベクトルの推定誤差を Fig. 4 に示す。ただし、手順 B で一般 OF と判断されたもののみについて計算した。全体的に解がうまく求められているが、一般 OF が特別な場合の OF に漸近していくと解が真値から離れていくことがわかる。

実験 B： つぎに、水玉模様を描いた立方体を回転台上に載せて回転駆動し、同時に全体を並進させ、その運動を約 80 cm 離れた位置に 3 台のテレビカメラを近接配置し観測した (Photo. 1)。実験条件を Table

Fig. 4 Results of the experiment using simulated optical flow. The error in estimating the direction vector of the rotation axis (defined as $|\arccos(\mathbf{t}_{\text{estimated}} \cdot \mathbf{t}_{\text{true}})|$) by using the optical flow model given by eq. (4) is plotted as a function of ω and θ . The number of data is 10×11

Photo. 1 Experimental scene. Each of the three cameras is taking a sequence of a moving cube with black spots on its surface. The motion is given by translating the rotating mechanism on which the cube is placed

Table 1 Parameters showing conditions of the experiment using real optical flow. For camera data, $\mathbf{d}_i$ and $\mathbf{e}_i$ specify the location of the camera and the direction of the sight vector respectively

Camera data:

$$\begin{aligned} E_1: \mathbf{d}_1 &= (83.0, -7.40, 45.0)^t \text{ (cm)} \\ \mathbf{e}_1 &= (-1.65 \times 10^{-2}, -0.116, -2.32 \times 10^{-2})^t \text{ (rad)} \\ E_2: \mathbf{d}_2 &= (76.5, -21.1, 63.9)^t \text{ (cm)} \\ \mathbf{e}_2 &= (7.86 \times 10^{-2}, -0.469, -0.275)^t \text{ (rad)} \\ E_3: \mathbf{d}_3 &= (76.9, -5.49, 63.6)^t \text{ (cm)} \\ \mathbf{e}_3 &= (-3.39 \times 10^{-2}, -0.477, 2.00 \times 10^{-2})^t \text{ (rad)} \end{aligned}$$

Motion data:

rotational component:

angular velocity: $\omega = 2.07$ (degree/frame)

rotation axis: direction: $(0.412, 0.412, 0.813)^t$

displacement: $(10.8, -20.7, 11.4)^t$ (cm)

translational component:

$$\mathbf{u} = \alpha \cdot \mathbf{v}_1 + \beta \cdot \mathbf{v}_2 \text{ (mm/frame)}$$

$$\text{where } \mathbf{v}_1 = (0.707, 0.707, 0.0)^t,$$

$$\mathbf{v}_2 = (-0.707, 0.707, 0.0)^t$$

$$[\alpha = -3 \sim 3, \beta = 0] \text{ or } [\alpha = 0, \beta = -3 \sim 3]$$

1に示す。OFはHildrethの方法⁵⁾に準じて近似的に算出した。概略手順はつぎのようである。まず、ゼロクロス点を求めエッジ画像を求める。つぎに画像中の閉曲線を抽出する。各閉曲線につき、 $I_x \cdot dx + I_y \cdot dy + I_z = 0$ の制約条件のもとで閉曲線周りのOFベクトルの変化を最小とするような、すなわち、評価 $\Theta = \int |dV/ds|^2 ds$ ($V = d\mathbf{x}^*$) を最小にするようなベクトルの配置を求める。ただし、 I_x, I_y, I_z はそれぞれ画面上の1点における明度の x 方向、 y 方向、時間方向の微分係数であり、連続3フレームの画像から計算している。この方法でも、OF計算上、大きな誤差が混入することは避けられないので、別に閉曲線全体の重心の移動速度を計算しておき、閉曲線に属するOFベクトルの平均速度と比較する。その比が0.8から1.2の間にある閉曲線に属するOFベクトルを採用する。

三つのカメラで捕えた並進速度 $\mathbf{u} = 2 \cdot \mathbf{v}_1$ mm/frame ($\mathbf{v}_1$ はTable 1に示す)のときの画像に対して求めた各視点のOFをFig. 5に示す。これら三つのOF

(a) From left camera (b) From middle camera (c) From right camera

Fig. 5 Real optical flow of a moving cube with black spots on its surface

Fig. 6 Depth map of the cube estimated for optical flow observed from middle camera

Table 2 Results of experiment using real optical flow. (α, β) specifies translational component. $\Delta\omega/\omega$, $\arg(\Delta t)$, and $\Delta|l|$ show the estimation errors of the motion parameters ω , t , and l respectively. $\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{t}$ in parenthesis shows true value whereas one out of parenthesis does estimated one

(α, β)	$\Delta\omega/\omega$	$\arg(\Delta t)$ (deg)	$\Delta l $ (cm)	$\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{t}$ (mm/frm)
(-3, 0)	0.028	8.18	6.80	-3.181 (-1.746)
(-2, 0)	-0.052	6.29	3.97	-2.169 (-1.164)
(-1, 0)	-0.117	4.41	2.54	-1.122 (-0.582)
(0, 0)	-0.076	3.61	1.86	-0.358 (0.000)
(1, 0)	-0.080	3.15	2.31	0.418 (0.582)
(2, 0)	0.071	3.81	5.31	1.645 (1.164)
(3, 0)	0.246	8.27	11.1	2.362 (1.746)
(0, -3)	0.083	11.9	14.4	0.260 (0.000)
(0, -2)	-0.017	5.45	4.75	0.240 (0.000)
(0, -1)	-0.149	3.91	2.86	-0.187 (0.000)
(0, 1)	-0.118	4.28	2.21	-0.606 (0.000)
(0, 2)	-0.016	6.34	3.14	-0.823 (0.000)
(0, 3)	No solution			

に対する解を求め、Fig. 5(b)のOFを用いて物体の存在領域を推定し、3次元空間中の点群としてFig. 6に示す。大きい点ほど手前であることを示す。図中の実線は $\mathbf{u}_n = 0$ としたときの回転軸である。

Table 1の α, β を変化させ並進速度を変えて実験した結果をまとめてTable 2に示す。OF計算の際に原画像の雑音抑制のためボケを与えていること、本実験の配置では、Hildrethの方法を適用する条件は必ずしも満たされていないこと、画像によっては長い閉曲線周りで線積分を行っていること、正射影仮定が厳密には成り立っていないこと、などにより、OFの計算誤差があることを考慮すると妥当な結果と考えられる。ただし、 $(\alpha, \beta) =$

$(0, -3)$ のときは一つのカメラから撮像した画像からのOF計算

が発散しその誤差が極端に大きくなったため手順Cの6)で棄却されている。なお、OFが与えられた後の平均処理時間はSun 3/60で100秒前後であった。

8. おわりに

三つの視点からの動画像情報をつきあわせて剛体運動情報と物体の存在領域を求める方法を示した。本方法は、オプティカルフローが与えられたとき、対象物に関する剛体条件以外の事前知識やステレオ画像の特徴点間の対応付けを用いずに、運動の大域的な性質を比較して運動パラメータの抽出と対象物の存在領域の推定を行うものである。本方法の特長は、つぎのようになる。

- 1) オプティカルフローが多少不正確であってもステレオ画像間の冗長情報を利用して妥当な推定値に収束させることが可能である。
- 2) ステレオ画像間の対応付け問題を回避している。
- 3) ステレオ画像間で特徴点間の対応付けを行わないので、各視点が同一の運動剛体を観測している限り、必ずしも同一部分を視野に収めていなくてもよい。このため、3視点を用いても有効視野が狭まることはない。

問題点としては、つぎの点が挙げられる。

- 1) 使用する画像枚数が多い。
- 2) 正射影仮定が制限条件となる。
- 3) 特別な場合に漸近するとき解の誤差が大きくなる。

今後の課題としては、中心射影への拡張がある。

ご指導いただいた白井前制御部長（現大阪大学教授）、弓場知能システム部長、高瀬行動知能研究室長、貴重なコメントをいただいた谷内田大阪大学助教授、ご教示ご討論いただいた坂根、比留川両氏をはじめ研究室諸氏に深謝する。

参考文献

- 1) B. K. P. Horn and B. Schunck: Determining Optical Flow, *Artificial Intell.*, **17**, 185/203 (1981)
- 2) G. Adiv: Determining 3-D Motion and Structure from Optical Flow Generated by Several Moving Objects, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-7-4**, 384/401 (1985)
- 3) A. M. Waxman and S. Ullman: Surface Structure and 3-D Motion from Image Flow: A Kinematic Analysis, *Int. J. Robotics Res.*, **4-3**, 72/94 (1985)
- 4) K. Kanatani: Structure and Motion from Optical Flow under Orthographic Projection, *CVGIP*, **35**, 181/199 (1986)
- 5) E. C. Hildreth: The Computation of the Velocity Field, *Proc. R. Soc. Lond. B* **221**, 189/220 (1984)
- 6) J. D'Haeyer: Determining Motion of Image Curves from Local Pattern Changes, *CVGIP*, **34**, 166/188 (1986)
- 7) 古賀, 三池: 動画像からのオプティカルフローの検出, *電子情報通信学会論文誌*, **J70-D-8**, 1508/1515 (1987)
- 8) A. M. Waxman and K. Wahn: Contour Evolution, Neighbourhood Deformation and Global Image Flow: Planar Surfaces in Motion, *Int. J. Robotics Res.*, **4-3**, 95/108 (1985)
- 9) 飯間, 小野木, 西村: 時空間微分法によるオプティカルフローの検出可能性と3次元運動推定の一方法, *計測自動制御学会論文集*, **24-1**, 76/82 (1988)
- 10) D. H. Ballard and O. A. Kimball: Rigid Body Motion from Depth and Optical Flow, *CVGIP*, **22**, 95/115 (1983)
- 11) 山本正信: 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, *電子通信学会論文誌*, **J68-D-4**, 562/569 (1985)
- 12) W. Richards: Structure from Stereo and Motion, *J. Opt. Soc. Am. A*, **2-2**, 343/349 (1985)
- 13) A. M. Waxman and S. Sinha: Dynamic Stereo: Passive Ranging to Moving Objects from Relative Image Flows, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-8-4**, 406/412 (1986)
- 14) A. M. Waxman and J. H. Duncan: Binocular Image Flows: Steps towards Stereo-Motion Fusion, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-8-6**, 715/729 (1986)
- 15) 渡辺, 大田, 池田: 3眼ステレオ視による奥行き決定精度の改善, *情報処理学会論文誌*, **27-1**, 1086/1094 (1986)
- 16) 北村, 来海, 谷内田: エッジの連続性と画面の局所的性質を利用した三眼視, *電子情報通信学会論文誌*, **J70-D-9**, 1757/1764 (1987)
- 17) 安藤 繁: ステレオ画像の微分恒等式を用いた形状再現システム—並列形アルゴリズムとその実験的評価—, *計測自動制御学会論文集*, **23-4**, 319/325 (1987)
- 18) 志水, 相吉: 数理計画法, 昭晃堂 (1984)

- 1) B. K. P. Horn and B. Schunck: Determining Optical