

平行線分と速度場を利用した剛体運動の線形解法

准員 上古 琢人[†] 正員 伊藤 宏司[†]
 正員 辻 敏夫[†] 正員 寺内 睦博[†]

A Linear Algorithm for Motion of Rigid Objects Using Features of Parallel Lines and Optical Flow

Takuto JOKO[†], Associate Member, Koji ITO[†], Toshio TSUJI[†] and Mutsuhiro TERAUCHI[†], Members

あらまし 画像情報から剛体の3次元構造と運動を復元する問題に対して、さまざまなアプローチが提案されている。Ullman や Huang は点対応や直線対応を用いた解法を示しているが、これらは対応問題がうまく解けることを前提としている。一方、Prazdny らはオプティカルフローを用いた解法を示しているが、方程式が非線形になり、速度の2階微分を必要とする。本論文ではオプティカルフローとエッジ情報を組み合わせた手法を提案する。まず画像上のエッジから構成される線分に着目し、オプティカルフローの式を導出する。そして線分の平行性を利用することにより、3次元運動が線形式から復元できることを示す。本アルゴリズムを適用するためには対象中に2組の平行な線分対が存在することが必要である。本論文ではこの平行な線分対の抽出方法も示す。最後にシミュレーションにより本手法の有効性を確認する。

1. ま え が き

受動的照明下での単眼画像情報を用いて、物体の3次元運動および構造を復元する問題は、コンピュータビジョンの中でも重要かつ興味あるテーマの一つである。ただ、この問題は射影によって縮退した奥行き情報を2次元画像から復元することになるため、一般に不良設定 (ill-posed) 問題になる。従って、欠落した情報を補うため、何らかの仮定あるいは拘束を画像データに付加する必要がある。

運動復元問題は二つのアプローチに分類される⁽¹⁾⁻⁽³⁾。一つは連続する何枚かの画像から対応点を求め、これをもとに物体の運動を復元するアプローチであり、他の一つは画像面上に投影された、ある瞬間における運動の速度ベクトル (オプティカルフロー) を利用するアプローチである。

前者については、画像の特徴抽出をどのレベルまで行って画像間の対応をとるかにより手法が分かれる。

点より線、線より面の方が対応の信頼性は高くなる。Ullman⁽⁴⁾ は物体の剛体性を仮定して、点対応について基本的な解を得ている。すなわち、位置情報のみを用いた場合、3次元の構造と運動を復元するには正射影で4点3画面、中心投影で5点3画面あれば十分であることを示した。その後、Tsai と Huang⁽⁵⁾ は運動情報から得られる中間パラメータで構成される行列の特異値分解を使って、8個の未知数からなる線形方程式を導出し、中心投影で8点2画面から運動が復元できることを示した。

Yen と Huang⁽⁶⁾ は直線対応による運動復元に最初に着目し、単位球上への直線射影に基づいたアルゴリズムを提案している。更に、Liu と Huang⁽⁷⁾ は直線対応による運動復元では少なくとも3画面の画像が必要であることを示し、6本の直線と3画面を使った非線形アルゴリズムを提案している。また、Mitichi ら⁽⁸⁾ は剛体上の2本の直線がなす角の不変性を利用した手法を、Faugeras ら⁽⁹⁾ はカルマンフィルターを使った手法を提案している。これらはいずれも反復法によって解を得ているため、初期値の推定が問題であり計算量も多い。このため、Liu と Huang⁽¹⁰⁾ は線形解法を提案している

[†] 広島大学工学部, 東広島市
 Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima-shi, 724 Japan

が、13本の直線と3画面を必要とする。点对応より直線対応の方がより多くの画像データを必要とするのは、3次元空間で直線の方向を決めても直線がそれ自身に沿って動く自由度を有しているためである。

一方、オプティカルフローによる手法は画像面上の局所的な空間および時間微分を利用する。HigginsとPrazdny⁽¹¹⁾はオプティカルフローおよび剛体を構成する面がともに滑らかであるという仮定の下で、11個の未知数を含む12組の非線形方程式を導出し、これを解くことができれば剛体の運動が復元できることを示した。ただ、このアルゴリズムは解析解を得ることが困難である上に、オプティカルフローの2階の空間微分を必要とすること、および画像面に平行な並進速度成分がない場合には解が得られないなどの問題があった。このため、運動を回転あるいは並進のみに限定したり⁽¹²⁾、視野内の面が平面で近似できる⁽¹³⁾などの仮定を設けて方程式を単純化する試みが行われている。

これまで、直線対応を用いた運動復元は取り扱われているが、線分に着目してオプティカルフローを解く研究はなされていない。また、オプティカルフローによる手法は非線形問題となっている。そこで、本論文では、中心投影の下でオプティカルフローとエッジ(線分)情報から、物体の3次元運動を復元する手法を提案する。そして、視野内に平行な線分が存在することを仮定し、その性質を利用することで非線形方程式を線

形方程式に帰着できることを示す。平行な線分対を仮定することは問題を制約することになるが、そのようなシーンは十分存在すると考えられること、およびオプティカルフローを線形式で解くことは従来あまり行われていないことから有用な試みの一つであると考え

2. オプティカルフローと線分

オプティカルフローは画像面上の速度場を表すもので、本研究では中心投影を用いる。また、運動は対象物に対する観測者の相対的な動きで表す。これにより、どのような動きでも同じ座標軸で表すことができる。

線分のフロー(速度場)は線分の両端点のフローで表すことができる。本論文では、端点のフローとそれに

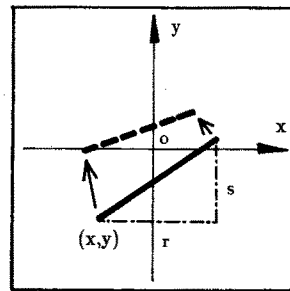


図1 画像面
Fig. 1 Image plane.

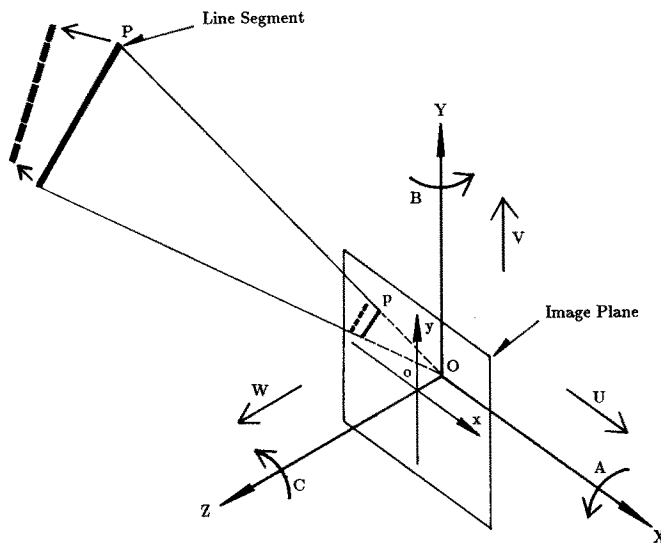


図2 空間座標系と画像面の関係
Fig. 2 Relationship between the space coordinate system and the image plane.

相対的なもう一つの端点のフローを合わせて「線分フロー」と呼ぶことにする。

図1は画像面上の線分フローを示したものである。一方の端点を (x, y) 、それに対するもう一方の端点の相対座標を (r, s) とする。このとき、線分フローをこれらの時間微分で定義し、これを u, v, μ, λ とおくと、

$$u = \dot{x}, v = \dot{y}, \mu = \dot{r}, \lambda = \dot{s} \quad (1)$$

となる。

2.1 端点のフロー

図2は空間上の線分の微小な動きを、原点 O が瞬間の視点となるようなデカルト座標系 $OXYZ$ で表したものである。観察者の動きの並進成分を U, V, W 、回転成分を A, B, C としよう。空間上の線分の端点 P の座標を $P(X, Y, Z)$ とすると、微小運動における P の速度成分は

$$\begin{aligned} \dot{X} &= -U - BZ + CY \\ \dot{Y} &= -V - CX + AZ \\ \dot{Z} &= -W - AY + BX \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。 $P(X, Y, Z)$ を画像面上に射影した点を $p(x, y)$ と表すと、両者の関係は、

$$x = \frac{X}{Z}, y = \frac{Y}{Z} \quad (3)$$

となる。

このとき、端点 $p(x, y)$ の速度成分 u, v は式(1)より

$$\begin{aligned} u &= \frac{\dot{X}}{Z} - \frac{X\dot{Z}}{Z^2} \\ &= \left(-\frac{U}{Z} - B + Cy\right) - x \left(-\frac{W}{Z} - Ay + Bx\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{\dot{Y}}{Z} - \frac{Y\dot{Z}}{Z^2} \\ &= \left(-\frac{V}{Z} - Cx + A\right) - y \left(-\frac{W}{Z} - Ay + Bx\right) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで、消点(動きの無限遠点)

$$x_0 = \frac{U}{W}, y_0 = \frac{V}{W} \quad (6)$$

を導入し、また $\omega = W/Z$ とおき、式(4)、(5)に代入すると

$$u = xyA - (x^2 + 1)B + yC + (x - x_0)\omega \quad (7)$$

$$v = (y^2 + 1)A - xyB - xC + (y - y_0)\omega \quad (8)$$

を得る⁽¹¹⁾。上式は x, y, u, v が画像データから得られるとすると、 $A, B, C, \omega, x_0, y_0$ を未知パラメータとする非線形方程式になる。

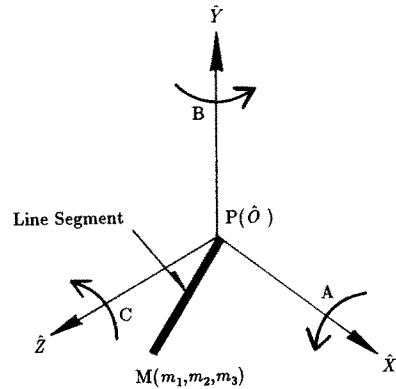


図3 点 P を原点とする相対座標系
Fig. 3 The coordinate system relative to the point P .

2.2 相対的な端点のフロー

次に図3のように、線分の端点 $P(X, Y, Z)$ を原点 \hat{O} とするデカルト座標系 $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ を定める。このとき、この座標系で表された線分のもう一方の端点を、 $M(m_1, m_2, m_3)$ とすると、 M は線分方向ベクトルを示す。 M の時間微分は、

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= -Bm_3 + Cm_2 \\ \dot{m}_2 &= -Cm_1 + Am_3 \\ \dot{m}_3 &= -Am_2 + Bm_1 \end{aligned} \quad (9)$$

となる。また、相対位置 r, s は m_1, m_2, m_3 を用いて次のように表すことができる。

$$r = \frac{m_1 - m_3x}{Z + m_3}, s = \frac{m_2 - m_3y}{Z + m_3} \quad (10)$$

このとき、式(1)の μ, λ は式(2)、(9)、(10)より、

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\dot{m}_1 - \dot{m}_3x - m_3\dot{x}}{Z + m_3} - \frac{(m_1 - m_3x)(\dot{Z} + \dot{m}_3)}{(Z + m_3)^2} \\ &= \frac{(-Bm_3 + Cm_2) - (-Am_2 + Bm_1)x - m_3u}{Z + m_3} \\ &\quad - \frac{(m_1 - m_3x)(-W - AY + BX - Am_2 + Bm_1)}{(Z + m_3)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\dot{m}_2 - \dot{m}_3y - m_3\dot{y}}{Z + m_3} - \frac{(m_2 - m_3y)(\dot{Z} + \dot{m}_3)}{(Z + m_3)^2} \\ &= \frac{(-Cm_1 + Am_3) - (-Am_2 + Bm_1)y - m_3v}{Z + m_3} \\ &\quad - \frac{(m_2 - m_3y)(-W - AY + BX - Am_2 + Bm_1)}{(Z + m_3)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。ここで $t = m_3/(Z + m_3)$ とおくと、式(10)より、方向ベクトル $M(m_1, m_2, m_3)$ は r, s, t を使って

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = (Z + m_3) \begin{bmatrix} r + tx \\ s + ty \\ t \end{bmatrix} \quad (13)$$

と書ける。これを式(11), (12)に代入すると, μ, λ は

$$\begin{aligned} \mu &= (ry + sx + txy + rs)A \\ &\quad - (2rx + t + tx^2 + r^2)B \\ &\quad + (s + ty)C + (1-t)rw - ut \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= (2sy + t + ty^2 + s^2)A \\ &\quad - (ry + sx + txy + sr)B \\ &\quad - (r + tx)C + (1-t)s\omega - vt \end{aligned} \quad (15)$$

となる。これらの式は $x, y, r, s, u, v, \mu, \lambda$ が画像データから得られるとき, A, B, C, ω, t を未知パラメータとする非線形方程式である。

3. 運動パラメータの推定アルゴリズム

式(7), (8), (14), (15)において, ω, t は奥行きに関する情報なので線分により異なる。つまり, 一つの線分の四つの方程式のうち2組のみ有効となる。よって, 5個の運動パラメータ A, B, C, x_0, y_0 を求めるためには3本の線分が必要になる。

しかし, 式(7), (8), (14), (15)は非線形方程式なのでこのままでは簡単には解くことができない。そこで式(14), (15)の A, B, C, ω の係数に含まれる未知パラメータが t のみであることに着目する。もし何らかの方法で t が求めれば, 式(14), (15)は線形方程式に帰着される。ここでは, 線分の平行性に着目し, 剛体上にいくつかの平行な線分が存在すると仮定し, その幾何学的性質を利用して t を求める。

3.1 線形解法

2本の線分 l_1 と l_2 が平行なとき, それらの方向ベクトルは向きが同じなので, 式(11)より,

$$\begin{bmatrix} r_1 + t_1 x_1 \\ s_1 + t_1 y_1 \\ t_1 \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} r_2 + t_2 x_2 \\ s_2 + t_2 y_2 \\ t_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

という関係が成立する。この式から α を消去し, t_1, t_2 について解くと,

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{r_2 s_1 - r_1 s_2}{s_2 x_1 - s_2 x_2 + r_2 y_2 - r_1 y_1} \\ t_2 &= \frac{r_2 s_1 - r_1 s_2}{s_1 x_1 - s_1 x_2 + r_1 y_2 - r_1 y_1} \end{aligned} \quad (17)$$

となる。このように, 2本の線分が空間上で平行な場合, t を求めることができ, 式(14), (15)を線形化することができる。 ω は線分により異なるので, 式(14), (15)から ω を消去すると,

$$\begin{aligned} s\mu - r\lambda &= (s^2 x + tsxy - try^2 - rsy - tr)A \\ &\quad + (r^2 y + trxy - tsx^2 - rsx - ts)B \\ &\quad + (s^2 + r^2 + trx + tsy)C - tsu + trv \end{aligned} \quad (18)$$

となる。式(18)は A, B, C を未知パラメータとする線形式であり, 3本の線分を用いれば解けるはずである。

しかし, 3本の線分がともに平行な場合, この方程式は1次従属となり解をもたない(証明略)。従って, この方法で解を求める場合, 2本の平行な線分が2組必要となる。

3.2 平行な線分の検出

さて, 式(18)を利用するためには, 3次元空間内で平行な線分を画像データから検出できなければならない。1枚の画像面上の位置情報のみを使った場合, 空間上で平行な線分を検出することは不可能である。しかし, 速度情報を使うことにより検出が可能になる。

本論文では, まず2本の線分2組の平行性を仮定して t を求め, 式(7), (8), (14), (15), (18)を用いて, A, B, C, x_0, y_0 を求める。次に, これらの式の冗長性を利用して平行な線分の抽出が可能なることを示す。

まず, 2本の線分を2組取り出し, それぞれの線分の t を求める。式(18)により A, B, C , 式(14), (15)により ω が求められると, 式(7), (8)は x_0, y_0 のみを未知数とする式になり, 4本の線分から4通りの値が求まる。もし選んだ2組の線分対がそれぞれ平行でなければ, これらの値は一致しないはずである。これを平行性のチェックに利用する。

つまり, このようなチェックを画像面上の2組の線分対のすべての組合せに対して行うことにより, 平行な線分対の抽出を行うことができる。

4. シミュレーション

ここで提案した運動パラメータ推定法の有効性を確かめるために, 計算機シミュレーションを行った。データは, 線分の両端点の空間座標を与え, 原点周りの並進, 回転を行い, 中心投影により線分フローを得たものを使用した。

本手法のアルゴリズムの流れを図4に示す。まず, 画像面上から2組の線分対を取り出す。次に, これらの線分を用いて運動パラメータを推定する。このとき, 平行性のチェックを行い2組とも平行な線分ならば運動パラメータを決定する。

4.1 平行性のチェック

まず, 3.2で示した平行性のチェック法の有効性を確

表1 平行性のチェック

 $U=0.6, V=0.8, W=0.2$

	真値	計算結果					
		a	b	c	d	e	f
A (rad)	0.01	0.01033	0.01049	-0.7205	0.008731	0.004048	-0.000226
B (rad)	0.01	0.01008	0.009285	-0.7207	0.008480	0.01256	-0.01715
C (rad)	0.01	0.01013	0.009926	-0.5380	0.008925	0.05625	0.02514
x_0 (平均)	3.0	2.976	3.007	3.789	2.395	3.072	5.087
y_0 (平均)	4.0	3.986	4.025	-5.953	3.078	0.4053	2.671
x_0 の変動係数		0.0447	0.0685	1.885	0.4423	0.5401	0.7680
y_0 の変動係数		0.04725	0.1042	1.490	0.4773	13.62	0.7827

表2 平行な線分対2組

	X	Y	Z	X	Y	Z	
線分 1	20	14	10	—	32	26	19
線分 2	8	-2	10	—	40	30	34
線分 3	18	27	10	—	30	24	15
線分 4	-3	-3	10	—	21	-9	20

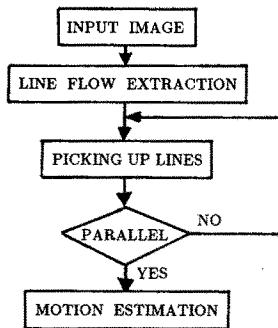


図4 処理の流れ

Fig. 4 The flow of the processing.

かめる。空間上の2本の線分の幾何学的関係として、次の三つがある。

- ① 平行である。
- ② 平行ではないが同一平面上にある。
- ③ ねじれの位置にある。

本手法は、2組の線分がともに平行である場合のみ正しい推定が可能である。2組の線分対のうちどちらか一方でも、②もしくは③の関係にあってはならない。

表1は、2組の線分対がそれぞれ①、②、③のどの関係をもつかによって分類し、式(18)を用いてパラメータ推定を行った結果である。線分の分類を以下に示す。

- a: 平行な線分対2組
- b: 平行な線分対2組が同一平面上にある場合
- c: 平行な線分対と、平行でないが同一平面上にある線分対
- d: 平行な線分対と、ねじれの位置にある線分対
- e: 平行ではないが同一平面上にある線分対2組

f: ねじれの位置にある線分対2組

また、 x_0 , y_0 を式(7), (8)により4通り求め、その変動係数(標準偏差/平均)を比較した。データは4本の線分の空間上の位置で与え、線分の一の方の端点のZ座標は10に統一し、長さは10~40とした。表2に、与えた線分の1例として2組の平行な線分対のデータを示す。

表1a, bは線分の平行性を用いて t を求め、正しい推定値を得ている。表1c~fは平行でない線分に対し平行性を仮定しており、正しい推定値が得られていない。平行性のチェックには x_0 , y_0 の変動係数を用いる。平行な線分対を2組用いた場合、bのように4本の線分が同一平面上にある場合でも x_0 , y_0 の変動係数はともに0.1程度である。一方、平行でない線分を含む場合はdのように1組が平行、もう1組がねじれの位置にある場合でも0.4以上である。この結果から、式(7), (8)を用いた線分対の平行性のチェックが有効であることがわかる。

4.2 計算精度

平行な線分対2組がうまく抽出できたならば、式(18)を用いて運動パラメータを推定することができる。但し、オプティカルフロー(速度場)は現在のところ2枚の画像の差分により求める以外有効な方法が見出されていない。従って、画像間の動きが大きくなると差分

値を近似微分とみなすことが難しくなり、推定精度が低下すると思われる。そこで、表2に示した2本の平行な線分2組のデータを用いて運動パラメータの大きさと推定精度の関係を調べた。

図5に運動パラメータの大きさと推定誤差の関係を示す。(a)はZ軸周りの角速度A、(b)はX軸方向の速度U、(c)はZ軸方向の速度Wと推定誤差の関係を示す。画像面上のデータのみから空間上の絶対並進

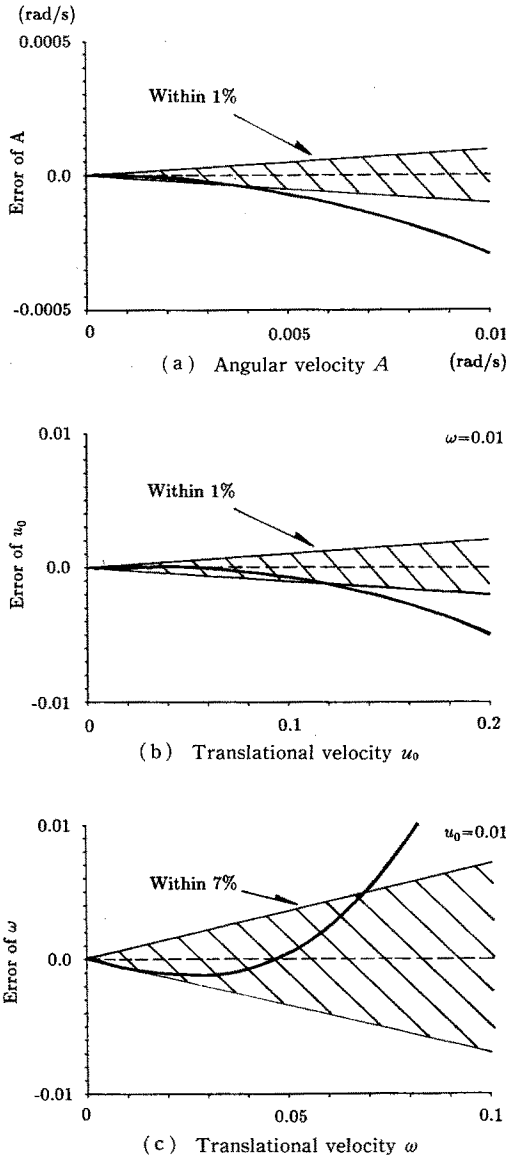


図5 運動パラメータと誤差の関係

Fig. 5 The relationship between the motion parameter and its error.

速度を推定するのは一般に不可能である。そこで、4本の線分の端点のZ座標を統一し、その値で規格化した。 u_0, v_0, ω はU, V, Wを規格化した値で

$$u_0 = \frac{U}{Z}, v_0 = \frac{V}{Z}, \omega = \frac{W}{Z} \quad (19)$$

である。図5(a), (b)は動きが大きくなるにつれて誤差が増加しているが、(c)はいったん減少しその後増加する。誤差を1%以内に抑えたい場合、Aは約0.004 rad以下に、 u_0 は0.12以下にあればよい。しかし、 ω は誤差が大きく、1%以内にすることは困難であり、7%以内に抑えたい場合、約0.07以下でなければならない。

実際の画像を扱う場合、対象物の絶対座標を求めることはできないため、ある対象物上の1点で規格化することは現実には不可能である。このため、並進成分については、奥行き成分との比である消点(x_0, y_0)に着目して誤差を評価する。図6に並進速度 ω が消点 x_0 の推定誤差に与える影響を示す。 ω が小さすぎても大きすぎても誤差が増加する。 ω が小さいときも精度が悪くなるのは、消点(x_0, y_0)の分母に奥行き成分Wがくるためである。 x_0 の誤差を5%以内に抑えるためには $\omega (= W/Z)$ を0.015以上0.08以下にしなければならない。このため、画像間のサンプリング間隔を各線分の ω の値が小さくなりすぎないように、適切に設定することが必要になる。なお、回転成分はWの影響を受けないので、画像間の動きが小さいほど精度が良くなる。

4.3 直方体への適用

平行な線分を含む剛体の具体例として、テクスチャをもった直方体を用い運動パラメータの推定を行った。ここでいうテクスチャとは線分(エッジ)として検出さ

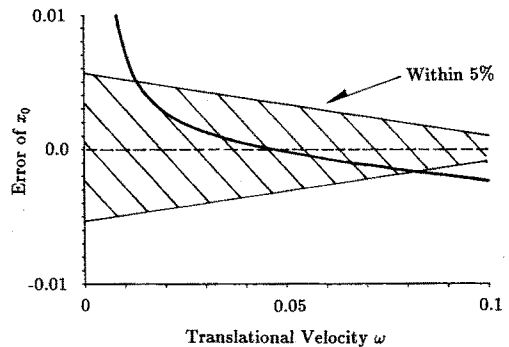


図6 Z方向並進速度と消点 x_0 の推定誤差の関係

Fig. 6 The relationship between the translational velocity and the error of the vanishing point x_0 .

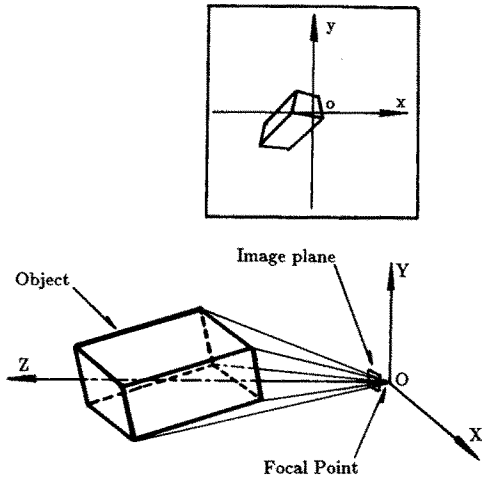


図7 シミュレーションモデル
Fig. 7 Simulation model.

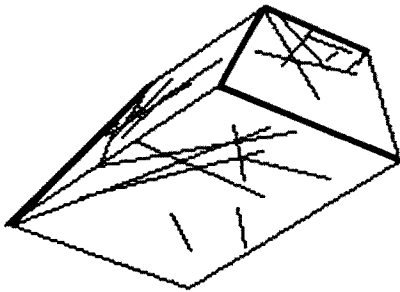
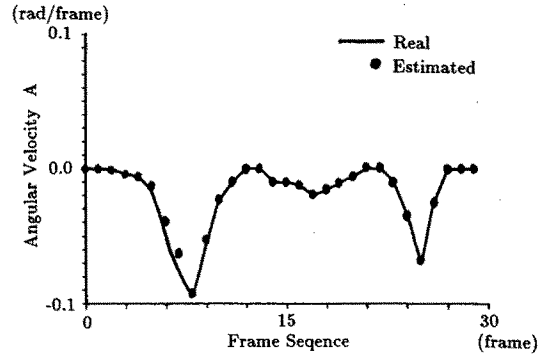


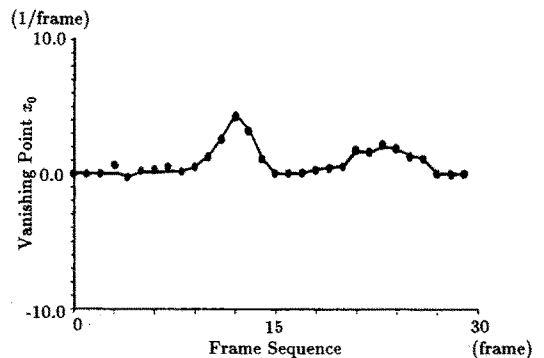
図8 平行線の検出例
Fig. 8 An example of selected parallel lines.

れるような物体面上の画素を意味する。図7にこのシミュレーションの概念図を示す。画像面は X, Y 平面に平行で、画像中心が $(0, 0, 1)$ となる平面である。また、画像の大きさは 1×1 の正方形とし、このとき、視角は 60° 前後となる。3次元データの作成にあたってはまず、原点を頂点とし、三つの辺が X, Y, Z 軸と一致するような各辺の長さ $(20, 30, 50)$ の直方体を作成した。次に、これをロール、ピッチ、ヨー各 $(10, 10, 40)$ 度回転し、 X, Y, Z 軸方向に各 $(-10, 10, 60)$ 移動したものをを用いた。

図8に対象物を画像面上に射影した結果を示す。太線は推定値のばらつきを用いた平行性のチェックにより抽出した2組の平行な線分対を示す。これらの線分対により推定された x_0, y_0 の変動係数はともに 0.1 以



(a) Angular velocity A



(b) Vanishing point x_0

図9 直方体によるシミュレーション
Fig. 9 Simulation result.

下である。

図9にさまざまな運動パラメータを順に与えたときの推定例を示す。(a)は角速度 A , (b)は消点 x_0 の真値と推定値である。横軸はフレーム系列、縦軸はフレーム間の角速度および並進速度である。

5. むすび

本論文では、線分フローと平行な線分の性質を使って、3次元上の剛体の運動パラメータを求める方法を示した。今後は、運動パラメータが滑らかに変化するという仮定を加えて連続運動の推定精度の向上を目指すことやフレーム間の動きが大きい場合への本手法の改良を検討する予定である。

本論文で示した方法を実画像に適用するためには、線分フローを求める必要があるが、オプティカルフロー抽出に関する手法とエッジ抽出に関する手法を組み合わせることにより得ることが可能である。すなわち、図1に示すように、線分上の速度場は単調に変化し、

また線分ごとに異なる方向ベクトルをもつ。従って、画像面上で得られたオプティカルフロー(速度場)を線分(エッジ)に対応させてグループ化することで線分フローを得られると考えている。

なお、本論文では運動パラメータの推定について述べたが、その後の処理として3次元構造復元問題がある。本手法では、各線分の方向ベクトルが得られ、幾何学的に同一平面に存在するかを簡単にチェックでき、表面構造復元に有効であると思われる。

文 献

- (1) D. Marr: "A computational investigation into the human representation and processing of visual information", W. H. Freeman and Company (1982).
 - (2) 北橋忠宏(構成): "特集「画像理解」", 人工知能学会誌, 4, 1, pp. 2-51 (1989).
 - (3) J. K. Aggarwal and N. Nandhakumar: "On the computation of motion from sequence of images — a review", Proc. IEEE, 76, 8, pp. 917-935 (1988).
 - (4) S. Ullman: "The interpretation of visual motion", MIT Press (1979).
 - (5) R. Y. Tsai and T. S. Huang: "Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid object with curved surface", IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell., PAMI-6, 1, pp. 13-27 (1984).
 - (6) B. L. Yen and T. S. Huang: "Determining 3D motion and structure of a rigid body using straight line correspondence", NATO ASI Series, F2, pp. 371-394 (1983).
 - (7) Y. Liu and T. S. Huang: "Estimation of rigid body motion using straight line correspondence", Comput. Vision, Graphics and Image Process., 43, pp. 37-52 (1988).
 - (8) A. Mitichi, S. Seida and J. K. Aggarwal: "Line-based computation of structure invariance", Proc. IEEE Computer Society Workshop on Motion, pp. 175-180 (1986).
 - (9) O. D. Faugeras, F. Lustman and G. Toscani: "Motion and structure from point and line matches", Proc. 1st Int. Conf. Computer Vision, pp. 25-34 (1987).
 - (10) Y. Liu and T. S. Huang: "A linear algorithm for motion estimation using straight line correspondence", Comput. Vision, Graphics and Image Process., 44, pp. 35-57 (1988).
 - (11) H. C. Longuet-Higgins and K. Prazdny: "The interpretation of moving retinal image", Proc. Roy. Soc. London, B-208, pp. 385-397 (1980).
 - (12) T. D. Williams: "Depth from camera motion in a real world scene", IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell., PAMI-2, 6, pp. 511-516 (1980).
 - (13) M. Subbaro: "Interpretation of Visual Motion — A Computational Study", Morgan Kaufman Pub. (1988).
- (平成元年11月17日受付, 2年4月2日再受付)



上古 琢人

昭63広島大・工・第2類(電気系)卒。現在、同大大学院工学研究科博士課程前期情報工学専攻在学中。コンピュータビジョン、生体工学などの研究に従事。計測自動制御学会会員。



伊藤 宏司

昭44名大大学院工学研究科修士課程了。昭45同工学部自動制御研究施設助手。昭54広島大学工学部第2類(電気系)助教授。現在に至る。生体システム解析, ロボティクス, マンマシン・インタフェースの研究に従事。計測自動制御学会, 電気学会, 日本ロボット学会, 日本エム・イー学会, IEEE等各会員, 工博。



辻 敏夫

昭60広島大大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻了。同年同大学工学部助手。現在に至る。生体工学, ロボット工学, マン・マシンシステムに関する研究に従事。計測自動制御学会, 電気学会, 日本ロボット学会, 日本人間工学会, IEEE各会員, 工博。



寺内 睦博

昭59関西大・工・機械卒。昭61同大大学院博士課程前期了。平1広島大大学院博士課程単位取得退学。同年同大助手。現在、コンピュータビジョン, 画像理解の研究に従事。AVIRG, IEEE, 情報処理学会, 日本人間工学会, 日本機械学会各会員。