

距離動画像を用いた非剛体運動パラメータの直接的推定法†

山本 正信^{††} ピエール・ボランジャー^{†††}
 アンジェロ・ベラルディン^{†††}
 マーク・リュウ^{†††} ジャック・ドメイ^{†††}

本論文は距離動画像を用いて非剛体物体の運動を解析する手法を述べている。本手法は画像間の対応付け操作を必要とすることなく、線形連立方程式を解くことにより物体の運動パラメータを推定することができる。この推定式はヤコビ行列による非剛体運動の表現式を距離動画像用に拡張した時空間勾配拘束式に代入することにより得られる。われわれは既にビデオレートで距離動画像が得られるレンジファインダを開発している。このレンジファインダを使って、実際に紙や布、皮膚やゴム風船などに代表される幾つかの非剛体物体の動きを解析した。さらに、距離動画像と同時に得られる濃淡動画像も併用することにより、動きの解釈時に起こる曖昧さの解消が可能になることを示した。

1. はじめに

剛体仮説は動画像の解析において中心的な役割を果たしてきた。しかしながら、厳密に言えば実世界には理想的な剛体は存在しない。剛体性は物体の動きを表すための1次近似にしか過ぎない。実際日常生活では、われわれは実に様々な非剛体物に囲まれている。例えば、この論文が印刷されている紙、われわれが着ている服、そしてわれわれ自身が非剛体である。実際の物体の動きを精密に解析しようとするれば、物体の非剛体性を考慮にいれざるを得ない。

本論文は剛体はもちろんのこと紙や布、皮膚やゴムなどの非剛体物体の運動パラメータを動画像から推定し、レンジフロー* (3次元移動ベクトル場) を決定する手法を述べている。

動画像解析では主に剛体運動の解析法が研究されてきた。物体の非剛体運動を扱った論文は少ない。それらの論文ではもっぱら単眼視からの濃淡動画像が使われてきた。Ullman¹⁰⁾ は剛体仮説に基づき動きから3次元構造を復元する理論が、非剛体物体の場合でも、その非剛体性がわずかならば使えることを示した。

Koenderink と van Doorn¹²⁾ は紙の動きに代表される折り畳み運動を三角パッチの多面体モデルによって解析した。Jasinski と Yuille¹⁰⁾ は Ullman¹⁰⁾ の手法と三角パッチの多面体モデルを組み合わせることにより折り畳み運動の解析を行った。Subbarao¹⁶⁾ はテンソルを使って非剛体運動によって引き起こされるオプティカルフローを解釈した。これらの研究はすべて画像間の対応付けがなされていると仮定している。しかしながら、対応付け問題を一般の場合に解くことは必ずしも容易ではない。さらに、非剛体運動のような複雑な動きを解析するためには、画像間の密な対応付けが必要とされるが、物体の表面が常に画像間の密な対応付けに都合の良い表面パターンに覆われているとは限らない。単眼視からの動画像解析は物体の3次元運動のみならず3次元構造をも復元できるという大きな利点を有する。しかし、多すぎる未知数の数(運動パラメータと深さ量)はノイズに対する解の安定性と質を損なわせている。

もし物体の3次元情報が、濃淡動画像と共に利用可能ならば、問題は3次元運動を決定することのみになり、ノイズに強い推定法が期待される。Terzopoulos¹⁷⁾ らは対応付けられたステレオ画像対とその動画像から指の3次元形状と動きを復元した。しかし、ステレオ画像対からは指の輪郭部の3次元情報しか得られない。指表面の3次元情報は対象物体が軸対称であることを仮定して輪郭から内挿している。もしレーザレンジファインダのようなアクティブセンサが物体の3次元形状を高速に測定することができるならば、対象物体の性質に依存した仮定を用いることなく、物体の3次元運動を細かくしかも精度良く得ることができよ

† Direct Estimation of Deformable Motion Parameters from Range Image Sequence by MASANOBU YAMAMOTO (Computer Vision Section, Electrotechnical Laboratory), PIERRE BOULANGER, J.-ANGELO BERARDIN, MARC RIOUX and JACQUES DOMEY (Photonics and Sensors Section, Division of Electrical Engineering, National Research Council of Canada).

†† 電子技術総合研究所知能システム部視覚情報研究室

††† カナダ国立研究協議会電気工学部光計測研究室

* オプティカルフローは画面上の2次元移動ベクトル場である。これに対して、空間中の3次元移動ベクトル場をレンジフローとよぶことにする。

う。最近, Beraldin ら⁵⁾ はビデオレートで距離動画像と濃淡動画像を得ることのできるレーザレンジファインダを開発した。われわれの手法はこの装置で得られた距離動画像と濃淡動画像を使っている。

距離情報の利用を前提にした動画像解析は、数は少ないが何人かの研究者によって試みられている。Ballard と Kimball²⁾ はオプティカルフローと距離情報から一般化ハフ変換を使って剛体の運動パラメータを推定した。Asada と Tsuji¹⁾ は既知の光源パターンの投影から動いている剛体の3次元形状を測定し、形状のマッチングにより物体の追跡を行った。Chen と Penna⁸⁾ は濃淡動画像間の対応付けとフォトメトリックステレオによって得られる距離情報の利用を仮定し、ある種の変形運動のパラメータを決定した。Kehtarnavaz と Mohan¹¹⁾ は、距離動画像間の対応付けをグラフマッチングの手法で決定し、剛体の3次元運動パラメータを推定した。Chaudhuri と Chatterjee⁷⁾ は動きの3次元ベクトルから局所的な変形の運動パラメータを推定した。これらの手法は濃淡動画像あるいは距離動画像間の対応付けを前提としている。しかしながら、変形運動のパラメータを推定するためには、先にも述べたように画像間の密な対応付けを必要とし、それは多くの場合必ずしも容易ではない。特に、距離動画像の場合、次の二つの理由が対応付けを困難にさせている。第一に、距離動画像には特徴点の数が濃淡動画像に比べて一般に少ない。第二に、たとえ特徴点が最初の画像で見つかったとしても、その点が後の画像では変形のため消失してしまう可能性がある。

濃淡動画像の解析では、これら特徴点对応付けの困難さを回避するために、画像間の対応付け問題を解く必要なく直接運動パラメータを推定する直接法⁶⁾ が研究されてきている。山本¹⁹⁾ Yamamoto²⁰⁾ や Horn と Weldon⁹⁾ らは濃淡動画像に対する直接法が距離情報の援用により剛体の3次元運動パラメータを線形演算で推定可能であることを示した。本論文は直接法が距離動画像にも拡張可能であり、剛体非剛体を問わずその運動パラメータが画像間の対応付け操作を必要とすることなく決定可能であることを示す。さらに、濃淡動画像と距離動画像の併用は動きの解釈の曖昧さをなくしうることを示す。

直接法は連続する画像間で物体の動きがごくわずかであることを仮定している。物体の動きに比べて、高速に距離動画像と濃淡動画像が撮像可能なカメラを次章で紹介する。第3章では、距離動画像における3次元移

動ベクトルの時空間拘束式を導き、それを使った剛体運動パラメータの推定法を示す。非剛体運動モデルの提案と非剛体運動パラメータの直接的推定法を第4章で述べる。この手法の実装法を第5章に、幾つかの種類の実験結果を第6章に示す。

2. ビデオレートレンジファインダ

本論文で使用したビデオレートレーザレンジファインダ⁵⁾ は、光源と検出器の同期走査方式¹⁴⁾に基づいている。図1はこのレンジファインダの構成図である。図2はセンサヘッドの外観を示す。この装置では、レーザビームが回転鏡により一秒間に15,750回水平方向に走査され、同時に垂直方向にもガルバノモータにより一秒間に60回のスピードで走査されている。シーンからの反射光はポジションセンサ、具体的には10 MHzの帯域を持つラテラルイフェクトフォトダイ

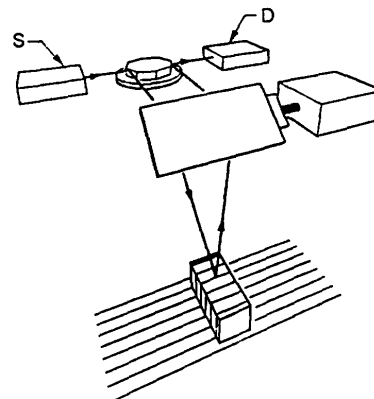


図1 ビデオレートレンジファインダの構成
Fig. 1 The configuration of video-rate range finder.

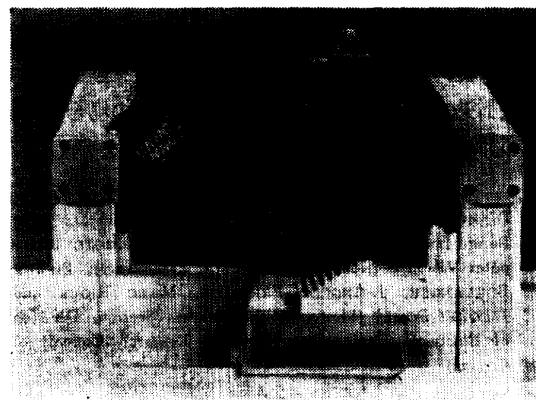


図2 センサヘッド
Fig. 2 An overview of the sensor head of the video-rate range finder.

オードで検出される。検出器の出力は距離と濃淡情報に変換され RS-170 信号⁴⁾で流される。このカメラの解像度と測定速度は横 512 縦 210 画素の画像が一秒間に 60 枚 (フィールド仕様) あるいは横 512 縦 420 画素の画像が一秒間に 30 枚 (フレーム仕様) である。つまり、通常のテレビ映像と同じ速度で距離画像が得られる。本論文では横 256 縦 256 に縮小した画像を使っている。距離の解像度は 8 ビットである。撮像空間は 5 cm 立方である。このカメラは反射光図 (濃淡画像) が距離の測定と同時に得られる。

3. 剛体運動パラメータの直接推定

3.1 動きの構造拘束

距離動画像における動きの基本的拘束式を導く。

シーンの座標系を直交座標系 (x, y, z) とする。レンジファインダはビデオレートで点 (x, y) における物体表面の高さ座標値 z が測定可能であるとする。したがって、時刻 t における物体面の形状は $z = F(x, y, t)$ と表される。物体面は小さなパッチの集合でもって近似することができる。図 3 に示されるように、この接パッチの接点と単位法線ベクトルをそれぞれ $(x_0, y_0, z_0)^T$ と $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ とする。ここで、 $z_0 = F(x_0, y_0, t)$ である。この接パッチが単位時間 $\Delta t (= 1)$ 中に $\vec{\Delta p} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 程平行移動したとする。物体としての運動は $\vec{\Delta p}$ であるが、面に各点が区別できるような模様がないければ、どの点がどの点に移動したのか観測できない。観測できるのはある方向に着目したとき、その面がその方向にどれだけ近づくか (あるいは遠ざかるか) である。その観測している方向を単位観測方向 $\vec{m} = (m_x, m_y, m_z)^T$ とし、

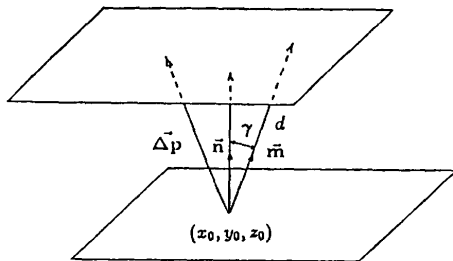


図 3 微小パッチの平行移動

Fig. 3 The patch in parallel translates with the displacement $\vec{\Delta p}$, where the \vec{n} , \vec{m} and d are surface normals of the patch, the direction of viewer, and the distance between two patches in the observation direction, respectively.

その方向への移動量を d とする。移動前と移動後のパッチ間の距離は $\vec{n} \cdot \vec{\Delta p}$ である。ベクトル \vec{m} と \vec{n} との間の角度を γ とすれば、 $\cos \gamma$ は $\vec{m} \cdot \vec{n}$ に等しい。したがって、

$$\vec{n} \cdot \vec{\Delta p} = d \vec{m} \cdot \vec{n} \quad (1)$$

もし d , \vec{m} および \vec{n} が既知であるならば、式(1)は $\vec{\Delta p}$ を未知数とする線形方程式である。

さて、観測方向 \vec{m} はセンサの測定方向に、ここでは z 軸方向にとるのが便利である。すなわち $\vec{m} = (0, 0, 1)^T$ とする。その時、 $d = F(x_0, y_0, t + \Delta t) - F(x_0, y_0, t)$ である。 d は F_i で 1 次近似できるので、式(1)は次のように書ける。

$$n_x \Delta x + n_y \Delta y + n_z \Delta z = n_x F_i \quad (2)$$

一方、接パッチの方程式は

$$n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0) = 0 \quad (3)$$

である。式(3)を x と y で微分し $x = x_0$, $y = y_0$, $z = z_0$ とおけば次式を得る。

$$n_x + n_x F_{x_0} = 0 \quad (4)$$

$$n_y + n_y F_{y_0} = 0 \quad (5)$$

ここで、 (F_{x_0}, F_{y_0}) は面 $z = F(x, y, t)$ の点 (x_0, y_0, z_0) に於ける接勾配である。 $n_x = 0$ のとき、 z 軸方向から面を観測することはできない。 $n_x \neq 0$ としよう。 $n_x = 0$ の場合は 4.3.2 項で議論する。式(4)と(5)を式(2)に代入し、点 (x_0, y_0, z_0) を面 $z = F(x, y, t)$ 上の任意の点 (x, y, z) とすれば次式を得る。

$$F_x \Delta x + F_y \Delta y - \Delta z + F_i = 0$$

さらに、 $\vec{F}_p = (F_x, F_y, -1)^T$ とすれば、上式は次のようにも書ける。

$$\vec{F}_p \cdot \vec{\Delta p} + F_i = 0 \quad (6)$$

F_x, F_y および F_i は距離動画像から容易に得られる。

3.2 剛体運動パラメータの推定

剛体運動パラメータの推定式を導く。

剛体物体上の点 $\vec{p} = (x, y, z)^T$ の 3 次元移動ベクトル $\vec{\Delta p} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ は並進速度ベクトル $\vec{T} = (T_x, T_y, T_z)^T$ と原点を中心とした角速度ベクトル $\vec{R} = (R_x, R_y, R_z)^T$ を使って次式で与えられる。

$$\vec{\Delta p} = \vec{R} \times \vec{p} + \vec{T} \quad (7)$$

式(7)を式(6)に代入すれば、剛体運動パラメータを未知数とする次の線形推定式が得られる。

$$(\vec{p} \times \vec{F}_p) \cdot \vec{R} + \vec{F}_p \cdot \vec{T} + F_i = 0 \quad (8)$$

ただし $\vec{F}_p \cdot (\vec{R} \times \vec{p}) = (\vec{p} \times \vec{F}_p) \cdot \vec{R}$ であることに注意。

この方程式が剛体上の 6 個以上の点からそれぞれ導かれたならば、運動パラメータは連立線形方程式の最小二乗解として得られる。得られたパラメータを式

(7)に代入してレンジフローが得られる。一意な解、すなわち剛体運動が一意に解釈できるためには、この連立方程式が線形独立であること、言い換えれば連立方程式の係数行列が正則であること、が必要である。動きが一意に解釈できない物体として、平面、屏風、球、円錐、円柱などがある。

4. 非剛体運動パラメータの直接推定

非剛体運動を、剛体運動を第1近似として、それに対する摂動とみなすことにする。本章では摂動としての非剛体運動の一つのモデルを提案し、その運動パラメータを直接的に推定する方法を述べる。

4.1 非剛体運動モデル

4.1.1 関連研究

小さな領域の非剛体運動はテンソル表現を使って式(7)を拡張することによってモデル化される^{7),8),16)}。しかし、剛体の運動モデルが剛体の動きを大域的にも局所的にも正しく表しているのに対し、テンソルに基づく非剛体の運動モデルは非剛体物体上の小さな面の運動は良く表し得るが、大域的な非剛体運動まで表すことはできない。

局所的にも大域的にも非剛体運動を表しうるモデルとして三角パッチの多面体モデルが提案されている^{10),12)}。このモデルは、運動時に物体表面上の距離を保存し紙の動きを表すことができる。

紙をも含む一般的な非剛体運動のモデルとして、Barr³⁾は局所的な変形運動モデルで表されるプリミティブをリンク結合することにより大域的な非剛体運動も表現可能なモデルを提案した。

一方、われわれは多関節マニピュレータの理論¹³⁾を手本に格子網状に結合されたリンクモデルにより、一般的な非剛体運動を表した。結果的に、われわれのモデルは Barr³⁾のモデルの離散系への拡張となっている。このモデルでは、位置の変位は各リンクの変形量を運動パラメータとしてそれらの線形結合によって表される。

4.1.2 変形ネットモデル

物体面は常に見え、簡単化のため隠れは起こらないと仮定しよう。図4に示すように、 $(2n+1) \times (2n+1)$ 個の節点をもつリンク結合ネットを非剛体物体のモデルとして考えよう。 $(2n+1) \times (2n+1)$ はネットの大きさとする。このネットの構成要素であるリンクは伸縮可能であるが曲がらないものとする。また、節点が繋がったリンクは自在に回転ができるとする。各リンク

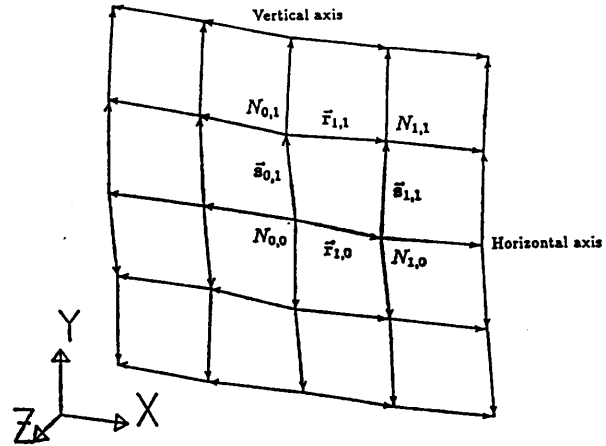


図4 変形ネットモデル
Fig. 4 A deformable net model.

の自由な回転はこのネットを紙や布のように変形させることができる。またリンクの伸縮を加えることにより皮膚やゴム風船のような動きも表すことが可能である。

各節点は $N_{i,j}$ と名付けられている。ここで $-n \leq i \leq n$ および $-n \leq j \leq n$ とする。特に $N_{0,0}$ をネットの中心節点とする。簡単化のためにネットの中心節点をシーンの原点に一致させておく。このネットはリンク鎖である水平および垂直パスの組み合わせからなる。これらのパスもそれぞれ整数値の名前を持つ。すなわち、垂直パスはそれを構成する節点の第一添え字で名付けられ、水平パスは同様に節点の第二添え字で名付けられている。特に、中心点を通る垂直パスをネットの垂直軸、水平パスを水平軸とよぶ。

このリンクをベクトルで表記する。図4に示すように、このベクトルはネットの中心から外に向かう向きに方向づけられている。節点 $N_{i,j}$ を終点とする水平パス上のリンクベクトルを $\vec{r}_{i,j}$ とする。ここで、ベクトルの長さを $r_{i,j}$ 、その方向を極座標表示で角度 $\theta_{i,j}$ と $\phi_{i,j}$ で表す。同様に $N_{i,j}$ を終点とする垂直パス上のリンクベクトルを $\vec{s}_{i,j}$ とする。その長さは $s_{i,j}$ 、向きは $\phi_{i,j}$ と $\psi_{i,j}$ で表される。ベクトルが直交座標および極座標で表記されているとき、ベクトル関数 \vec{h} で極座標値から直交座標値への変換を表す。

節点 $N_{i,j}$ の位置 $\vec{p}_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})^T$ は座標原点 $N_{0,0}$ を起点に水平軸を通り節点 $N_{i,0}$ を経由し i 番目の垂直パスを通り節点 $N_{i,j}$ に至るルート上のすべてのリンクベクトル和で表される。

$$\vec{p}_{i,j} = \vec{f}_{i,j}(\vec{q}) = \sum_{k=0}^i \vec{h}(\zeta_{k,0}) + \sum_{l=0}^j \vec{h}(\eta_{i,l}) \quad (9)$$

ただし, $\vec{\zeta}_{k,i} = (r_{k,i}, \theta_{k,i}, \phi_{k,i})^T$, $\vec{\eta}_{k,i} = (s_{k,i}, \phi_{k,i}, \psi_{k,i})^T$ とし, \vec{q} をすべてのリンクベクトルの極座標値の並び, $(\dots, r_{k,i}, \dots, \theta_{k,i}, \dots, \phi_{k,i}, \dots, s_{k,i}, \dots, \phi_{k,i}, \dots, \psi_{k,i}, \dots)^T$, $\vec{f}_{i,j}$ を \vec{q} から $\vec{p}_{i,j}$ へのベクトル関数と定義する. また $k=0$ と $l=0$ の場合は以下無視することにする.

節点の位置の微小移動量 $\vec{\Delta p}_{i,j} = (\Delta x_{i,j}, \Delta y_{i,j}, \Delta z_{i,j})^T$ は式(9)のリンクパラメータ \vec{q} における全微分によって表される.

$$\vec{\Delta p}_{i,j} = \mathbf{J}_{i,j} \vec{\Delta q} \quad (10)$$

ここで $\mathbf{J}_{i,j}$ はヤコビ行列 $\partial \vec{f}_{i,j} / \partial \vec{q}$ である. ただしリンクパラメータのうちベクトルの長さに関する偏微分値はそれぞれベクトルの長さ倍にしてある. また, 変位パラメータ $\vec{\Delta q} = (\dots, \Delta \alpha_{k,i}, \dots, \Delta \theta_{k,i}, \dots, \Delta \phi_{k,i}, \dots, \Delta \beta_{k,i}, \dots, \Delta \phi_{k,i}, \dots, \Delta \psi_{k,i}, \dots)^T$ をこの非剛体運動モデルのパラメータとする, ここで $\Delta \alpha_{k,i} = \Delta r_{k,i} / r_{k,i}$ と $\Delta \beta_{k,i} = \Delta s_{k,i} / s_{k,i}$ は各リンクの伸縮比を表している. これらの運動パラメータのうち, リンクの回転を表す $\Delta \theta_{k,i}, \Delta \phi_{k,i}, \Delta \psi_{k,i}$ をネットの曲げと振れのパラメータとよび, リンクの伸縮を表す $\Delta \alpha_{k,i}, \Delta \beta_{k,i}$ をネットの伸縮パラメータとよぶことにする.

4.1.3 内部干渉拘束

前章で提案した運動モデルにおいて運動パラメータの数はリンクの総数の三倍, $3(8n^2 + 4n)$ 個である. しかし, 独立な運動パラメータの数は, リンク同士が節点で互いに繋がっているため, これよりも少ない. 自由なパラメータの数はいくつであろうか. また, リンクの相互干渉によって実現不可能な動きといったものがあるであろうか.

ネット内で自由に決めうる運動パラメータと束縛される運動パラメータを次のように考える. まず最初にネットの垂直軸と水平軸を取り出して考える. この軸を独立した四本の多関節マニピュレータとみなすことができる. そのとき, マニピュレータの構成要素でもあるリンクの動きは自由に決めることができる. 軸以外のリンクの運動パラメータはネットの中心部から周辺部に向けて帰納的に決定していく. ここで自然数 K を $K = |i| + |j|$ とする. すなわち, K の増加の順に, 節点 $N_{i,j}$ を終点に持つリンクベクトル $\vec{r}_{i,j}$ と $\vec{s}_{i,j}$ の運動パラメータを決める. まず, $i > 0, j > 0$ の場合を考える. $K=2$, すなわち $N_{1,1}$ を終点とするリンクは $\vec{r}_{1,1}$ と $\vec{s}_{1,1}$ である. $\vec{r}_{1,1}$ の終点は, 既に位置の決まった垂直軸上の節点 $N_{0,1}$ と $\vec{r}_{1,1}$ との和

で表される. 同様に, $\vec{s}_{1,1}$ の終点は水平軸上の節点 $N_{1,0}$ と $\vec{s}_{1,1}$ との和で表される. この両リンクの終点は常に一致していなければならない. したがって, x, y および z についての位置の束縛は二つのリンク併せて六つの自由度を三つに減少させる. しかし, この三つの自由度は節点の位置を自由に決めうることを意味している. さらに, 二つのリンクが伸縮しないとすれば, 全自由度はたった一つとなる. もしこの二つのリンクの全自由度が三つ以下であれば, 節点 $N_{1,1}$ の動きが実現されない場合がある.

さて, $K-1$ までのすべての節点の位置が決まったとしよう. $i+j=K$ を満たす節点 $N_{i,j}$ を終点とするリンクベクトル $\vec{r}_{i,j}$ と $\vec{s}_{i,j}$ の終点も常に一致していなければならない. $\vec{r}_{i,j}$ の終点位置は節点 $N_{i-1,j}$ と $\vec{r}_{i,j}$ との和で表される. $N_{i-1,j}$ の位置はすでに決まっている (なぜならば, $(i-1)+j=K-1$ である) ので, その位置は原点からの経路によらず計算できる. したがって, その経路を $N_{0,0}$ を出発し垂直軸を通り, 節点 $N_{0,j}$ を経由し $N_{i-1,j}$ に至るようにとってもよい. 一方, $\vec{s}_{i,j}$ の終点は節点 $N_{i,j-1}$ の位置と $\vec{s}_{i,j}$ との和として与えられる. $N_{i,j-1}$ の位置も既に決まっているので, その位置は $N_{0,0}$ から水平軸を通り節点 $N_{i,0}$ を経由し, 垂直パス上を $N_{i,j-1}$ に至る経路上のリンクベクトルの和として与えられる. $i < 0$ または $j < 0$ の場合も同様にリンクの動きを決めることができる.

以上の議論をまとめてみよう. 節点 $N_{i,j}$ の位置は式(9)を導いたのと類似の方法で, 中心節点 $N_{0,0}$ を起点に垂直軸を通り, 節点 $N_{0,j}$ を経由し水平パス上を節点 $N_{i,j}$ へ至るルート上のすべてのリンクベクトル和によっても得られる.

$$\vec{p}_{i,j} = \vec{g}_{i,j}(\vec{q}) = \sum_{l=0}^j \vec{h}(\vec{\eta}_{0,l}) + \sum_{k=0}^i \vec{h}(\vec{\zeta}_{k,j}) \quad (11)$$

ただし, $\vec{g}_{i,j}$ は \vec{q} から $\vec{p}_{i,j}$ へのベクトル関数とする.

前章と同様に, 節点の位置の微小移動量 $\vec{\Delta p}_{i,j}$ は上記の式のリンクパラメータ \vec{q} における全微分によって表される.

$$\vec{\Delta p}_{i,j} = \mathbf{I}_{i,j} \vec{\Delta q} \quad (12)$$

ただし $\mathbf{I}_{i,j}$ はヤコビ行列 $\partial \vec{g}_{i,j} / \partial \vec{q}$ である. ただしリンクパラメータのうちベクトルの長さに関する偏微分値はそれぞれベクトルの長さ倍にしてある.

式(12)で表される移動ベクトル量は式(10)で表されるそれに一致しなければならないので, 次の関係式が

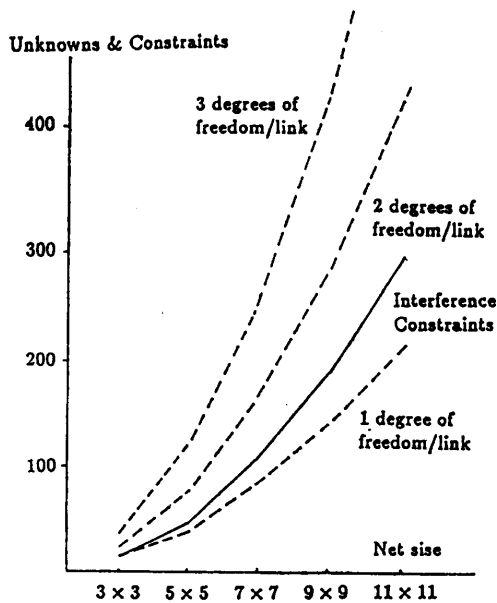


図5 ネットの大きさに対する干渉拘束と運動パラメータの数
Fig. 5 The number of unknowns and inner constraints vs. net size.

運動パラメータの拘束式として得られる。

$$(\mathbf{J}_{i,j} - \mathbf{I}_{i,j})\vec{\Delta}\mathbf{q} = \vec{0} \quad (13)$$

ネット上での拘束式(13)の総数は $12n^2$ 個である。これは軸上にない節点の数の三倍である。ネットモデルを自由に変動させるためには、この内部干渉拘束式(13)の総数よりも多くの運動パラメータを持つ必要がある。もし各リンクが三つの自由度を持っているとすれば、リンクの総数が $4n(2n+1)$ 個であるので、運動パラメータの数は $12n(2n+1)$ 個である。もし各リンクが伸縮しないとすれば、運動パラメータの総数は $8n(2n+1)$ 個。図5はネットの大きさに対する運動パラメータと干渉拘束式の関係を示している。リンクの自由度が一つの場合には運動パラメータは $4n(2n+1)$ 個となる。リンクあたり一自由度かつ $n > 1$ である場合を除いて、運動パラメータの数は内部干渉拘束式の数を上回る。

4.1.4 非剛体物体上のレンジフローモデル

位置ベクトル \vec{p} で表される節点以外の任意の点 P の運動をその点に最も近いリンクの運動で以下のように補間する。そのリンクは垂直パス上のリンクである場合もあるし、水平パス上のリンクである場合もある。ここでは一般性を失うことなく、このリンクを水平パス上のリンク $\vec{r}_{i,j}$ としよう。また、このリンクベクトルが節点 $N_{i,j}$ を起点にしているとしよう。点 P の

節点 $N_{i,j}$ に対する直交座標値はその極座標値 $\vec{\zeta} = (\gamma, \theta, \varphi)^T$ により $\vec{h}(\vec{\zeta})$ と表される。点 P の $\vec{\zeta}$ に対する微小変位 $\vec{\Delta}\mathbf{p}$ は $\partial\vec{h}/\partial\vec{\zeta}(\Delta\gamma/\gamma, \Delta\theta, \Delta\varphi)^T$ となるが、点 P の動きはリンク $\vec{r}_{i,j}$ と同じ運動とみなしている。点 P の動きは節点 $N_{i,j}$ に対する変位 $\vec{\Delta}\mathbf{p}$ と節点自身の変位 $\vec{\Delta}\mathbf{p}_{i,j}$ との和によって表される。

$$\vec{\Delta}\mathbf{p} + \vec{\Delta}\mathbf{p}_{i,j} = \hat{\mathbf{J}}_{i,j}\vec{\Delta}\mathbf{q}$$

ただし $\hat{\mathbf{J}}_{i,j}$ は $\mathbf{J}_{i,j}$ の運動パラメータ $\Delta\alpha_{i,j}, \Delta\theta_{i,j}, \Delta\varphi_{i,j}$ に対する要素に $\partial\vec{h}/\partial\vec{\zeta}$ を加えたものである。

さらにこのネット系が角速度ベクトル \vec{R} 、並進速度ベクトル \vec{T} で剛体運動しているとする。 $\vec{\Delta}\mathbf{p}_{i,j}$ と $\vec{\Delta}\mathbf{p}$ は1次の微小量である非剛体運動パラメータの線形結合によって表されており、回転も微小で \mathbf{R} も1次の微小量と仮定すれば、ネット変形後の点 P の位置 $\vec{p} + \vec{\Delta}\mathbf{p}_{i,j} + \vec{\Delta}\mathbf{p}$ は、 $\vec{R} \times \vec{\Delta}\mathbf{p}_{i,j}$ と $\vec{R} \times \vec{\Delta}\mathbf{p}$ の要素が2次以上の高次の微小量であるとして無視することができ、

$$\vec{R} \times (\vec{p} + \vec{\Delta}\mathbf{p}_{i,j} + \vec{\Delta}\mathbf{p}) + \vec{T} \approx \vec{R} \times \vec{p} + \vec{T}$$

程変位する。したがって、点 P の全変位、すなわち3次元移動ベクトル $\vec{\Delta}\mathbf{p}$ はネットの変形とネット底層系の剛体運動との線形和で表される。

$$\vec{\Delta}\mathbf{p} = \hat{\mathbf{J}}_{i,j}\vec{\Delta}\mathbf{q} + \vec{R} \times \vec{p} + \vec{T} \quad (14)$$

4.2 非剛体運動パラメータの線形推定式

非剛体運動のパラメータを推定する方程式を導こう。式(14)を式(6)に代入すれば、非剛体運動パラメータと剛体運動パラメータを未知数とする次の線形方程式が得られる。

$$\vec{F}_i^T \hat{\mathbf{J}}_{i,j}\vec{\Delta}\mathbf{q} + (\vec{p} \times \vec{F}_i) \cdot \vec{R} + \vec{F}_i \cdot \vec{T} + F_i = 0 \quad (15)$$

同じ物体上のいくつかの点から導かれる方程式(15)およびネット内部の干渉拘束式(13)からなる線形連立方程式を解くことにより、非剛体物体の運動パラメータが得られる。推定結果を式(14)に代入すればレンジフローが得られる。

ところで、この線形連立方程式は線形従属である。なぜならば、ネットの運動のうち剛体運動の回転成分は、ネットの非剛体運動によって表されるからである。ネットの中心節点 $N_{0,0}$ に繋がっている四つのリンク $\vec{s}_{1,0}, \vec{r}_{0,1}, \vec{s}_{-1,0}, \vec{r}_{0,-1}$ は、原点を通る任意の軸周りの回転運動をそれぞれ表すことができる。そして、この四つのリンクが全く同じ回転運動をし、残りのリンクが固定されたままだとすれば、このネットは剛体回転を非剛体成分だけで実現することができる。

この曖昧さを避けるために、推定過程を二つに分け

る。最初に、変形成分をゼロとしたままネットの剛体成分のみを求める。次いで、得られた剛体成分を固定したままネットの変形成分を計算する。

運動パラメータの数を実際の対象物体の性質に即して制限することは重要である。なぜならば、過剰なパラメータ数は解のノイズに対する感度を悪くするうえに、方程式自身を悪条件に陥れる可能性があるからである。実際、紙や布ではほとんど伸縮性がないと考えてよい。したがって、すべての i, j に対して $\Delta\alpha_{i,j} = \Delta\beta_{i,j} = 0$ とする。また風船の伸縮はいたるところ一様であると考えて、すべての i, j に対して $\Delta\alpha_{i,j} = \Delta\beta_{i,j} = \text{一定}$ とする。もし物体が剛体であるならば、モデルの非剛体成分は勿論考慮する必要はない。

4.3 運動に対する他の拘束条件

第2章で述べたように、剛体運動モデルでその運動パラメータが一意に決定できない物体がいくつかある。このような物体は非剛体運動モデルでもやはりその運動パラメータを一意に決めることができない。式(6)は物体の3次元形状に依存している。この方程式は深さ方向の動きに対しては強い拘束力を持っている。反面、物体の表面が平面かそれに近いならば、この拘束式は面に平行な動きを拘束することができない。もし表面形状の拘束のほかは物体の模様や物体の境界などを新たな拘束として利用することができるならば、運動パラメータの推定式が悪条件に陥り動きが一意に決定できない状態になるのを防ぎ、また解の精度を向上させるのにも資するであろう。本章では動きに課せられる新たな二種類の拘束式が述べられている。

4.3.1 濃淡拘束

本論文で使用したビデオレートレンジファインダは距離動画像ばかりではなく濃淡動画像も同時に得ることができる。時刻 t における物体上の点 $P(x, y, z)$ の濃淡値を $E(x, y, t)$ とする。点 P の3次元移動ベクトル $\vec{\Delta p}$ の x, y 成分は、次の1次式に近似的にはあるが拘束されることが知られている⁶⁾。

$$\vec{E}_p \cdot \vec{\Delta p} + E_t = 0 \quad (16)$$

ここで $\vec{E}_p = (E_x, E_y, 0)^T$ とし、 (E_x, E_y) は濃淡画像の空間勾配であり、 E_t は濃淡動画像の時間勾配である。

式(14)を式(16)に代入すれば次の運動推定式が得られる。

$$\vec{E}_p^T \vec{J}_{i,j} \vec{\Delta p} + (\vec{p} \times \vec{E}_p) \cdot \vec{R} + \vec{E}_p \cdot \vec{T} + E_t = 0 \quad (17)$$

式(15)と(17)を比較すれば、後者は z 方向の拘束が欠けていることが解かる。したがって、方程式(17)は

T_z 以外の運動パラメータを推定する。

4.3.2 境界拘束

構造拘束(6)は $n_z \neq 0$ と仮定している。 $n_z = 0$ の場合は z 軸方向から見た物体の境界に相当する。このとき z 軸方向の変位を知ることができない。観測できるのは法線 \vec{n} 方向の移動量 d である。そこで、観測ベクトル \vec{m} を物体面の法線ベクトル \vec{n} に一致させれば、式(1)は次のように書き改められる。

$$\vec{G}_p \cdot \vec{\Delta p} = d \quad (18)$$

ここで $\vec{G}_p = (n_x, n_y, 0)^T$ とし、 (n_x, n_y) は境界の法線ベクトルである。また d は法線ベクトル方向の境界の移動量である。これらの量は境界から容易に算出可能である。

式(18)もまた物体の動きを拘束する線形方程式である。式(16)中の E_x, E_y, E_t を夫々 $n_x, n_y, -d$ に置き換えても、この拘束式が形式的に得られる。つまり、式(14)を式(18)に代入すれば式(17)と類似の次に示す動きの線形推定式が得られる。

$$\vec{G}_p^T \vec{J}_{i,j} \vec{\Delta p} + (\vec{p} \times \vec{G}_p) \cdot \vec{R} + \vec{G}_p \cdot \vec{T} - d = 0 \quad (19)$$

第6章での最後の実験でこの境界拘束の有効性を示す。

5. 実 装

本章では提案した手法の計算機上への実現法について述べる。

ネットモデルの初期設定

$x-y$ 平面上にサイズ $(2n+1) \times (2n+1)$ で等間隔幅を持つ正方格子を考えよう。変形ネットの初期状態はその $x-y$ 面への投影がちょうど上に述べた正方格子になるように取る。すなわち、ネットの節点を物体面上にとりその x, y 座標値が丁度格子点になるようにする。このモデルからリンクベクトルをあらかじめ計算しておく。ヤコビ行列はこれらのリンクベクトルから得られる。

距離と濃淡動画像からの微分値

距離と濃淡動画像の空間勾配は Sobel のエッジ検出オペレータによって算出される。画像間の時間勾配は 3×3 の窓内の平均値の画像間差分値によって得られる。

連立線形拘束方程式の解

運動パラメータが内部干渉(13)、構造(15)、濃淡(17)、境界(19)の四種類の拘束方程式からなる線形連立方程式を解くことにより得られることを述べてきた。各拘束式には適当な重みかけられている。それ

表 1 剛体運動の推定結果
Table 1 Estimated result of rigid motion.

物体の種類	T_x	T_y	T_z	λ_x	λ_y	λ_z	Ω
手のひら	1.001	0.992	1.023	-0.569	-0.577	-0.586	0.957
布	1.029	1.067	1.047	-0.528	-0.583	-0.617	0.971
紙	1.006	0.990	1.000	-0.573	-0.584	-0.576	0.999
真の値	1.000	1.000	1.000	-0.577	-0.577	-0.577	1.000

は連立方程式が悪条件に陥らないようにするためである。

一般にこの連立方程式の解は十分精度が良いとはいえない。それは基本拘束式(6), (16)および(18)が単に動きを拘束するための1次近似式に過ぎないからである。より精度の高い解を得るためには、次に述べるような多次元ニュートン法に似た繰り返し演算が用いられる。

点 $(x, y, z)^T$ のレンジフロー $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ は推定式から得られた運動パラメータを式(14)に代入することによって得られる。もしこのレンジフローが正しければ $F(x, y, t) = F(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) - \Delta z$ であり、 $E(x, y, t) = E(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ である。そうでなければ、新たに距離画像と濃淡画像をそれぞれ $F'(x, y, t + \Delta t) = F(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) - \Delta z$ と $E'(x, y, t + \Delta t) = E(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ のごとく定義する。そしてこの新しい動画像を使って運動パラメータを再計算する。この手続きを推定残差の平方和が単調に減少しなくなるまで繰り返す。最終解は繰り返し時に得られた解の総和である。

6. 実験

本章では、われわれの方法を幾つかの物体、紙や布、ゴム風船や手のひら等の動きの推定に適用した。

単純化のため、カメラ視野内の物体面には新たな隠れや不連続は起こらないものとする。実験に使用された動画像の枚数は各実験で距離および濃淡画像とも連続二枚とした。

剛体運動

われわれの手法が正しいことを確認するために、まず距離動画像のみから剛体の3次元運動パラメータを推定した。この実験で使用した三種類の動画像の第一画像は図6, 9, 10の第一画像と同じ画像である。第二画像はこの第一画像を計算機内で各軸方向に1画素、回転軸 $\vec{\lambda} = (-1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3})$ の回りに $\Omega = 1^\circ$ 回転させて作製した。これは推定の精度を確認するためである。表1には剛体運動パラメータの推定結果が示されている。ここで、並進運動パラメータは画素で、回転角は度で表されている。ただし、 $\vec{R} = \Omega \vec{\lambda}$ 。

紙

一旦しわくちゃに丸めた紙を両手で引き延ばした時の紙の変形運動パラメータを求めた。この実験では距離動画像と共に濃淡動画像も使い、曲げと振れ(伸縮は含まれていない)および剛体運動のパラメータを求めた。図6は紙の距離画像に濃淡画像をテクスチャマッピングしz軸方向に対し若干斜方向から見た紙の立体画像表示である。実験はネットの大きさを 3×3 ,

図 6 紙の動き。ネットサイズ 5×5 。(左)時刻1 (右)時刻2

Fig. 6 Motion estimation of a sheet of paper using a 5×5 deformable net. Estimated sample range flow and a 5×5 deformable net with first (left) and second (right) range image frames painted in the intensity image.

図 7 紙の動き。ネットサイズ 3×3 。(左)時刻1 (右)時刻2

Fig. 7 Motion estimation of a sheet of paper using a 3×3 deformable net. Estimated sample range flow and a 3×3 deformable net with first (left) and second (right) range image frames painted in the intensity image.

図 8 紙の動き。ネットサイズ 9×9 。(左)時刻1 (右)時刻2

Fig. 8 Motion estimation of a sheet of paper using a 9×9 deformable net. Estimated sample range flow and a 9×9 deformable net with first (left) and second (right) range image frames painted in the intensity image.

図 9 推定された布の動き。(左)時刻1 (右)時刻2

Fig. 9 Motion estimation of a piece of cloth. Estimated sample range flow and a 5×5 deformable net with first (left) and second (right) range image frames painted in the intensity image of the cloth.

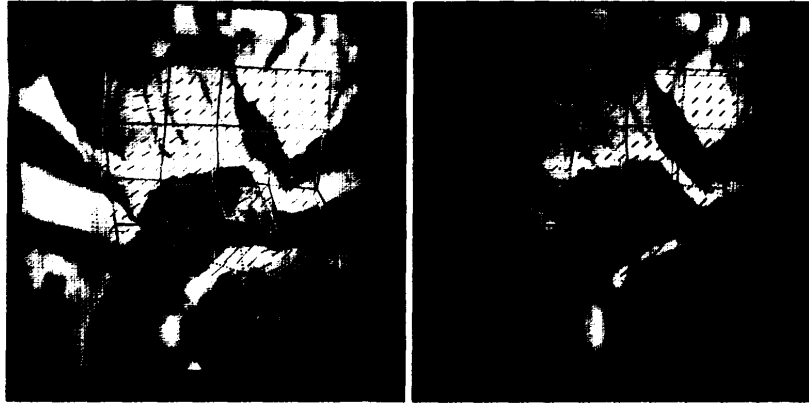


図 6
Fig. 6

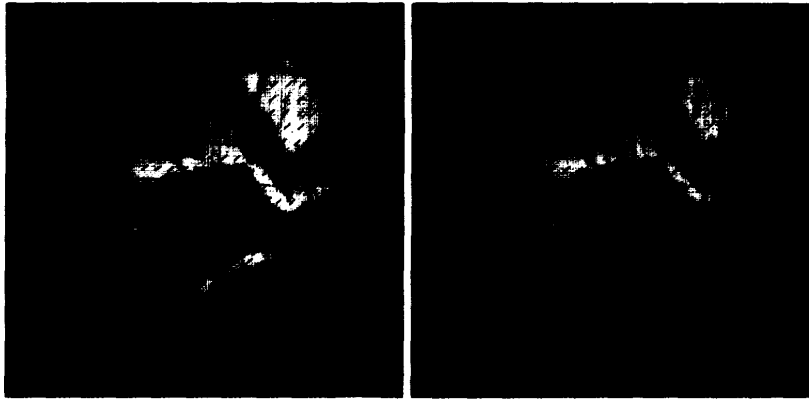


図 7
Fig. 7

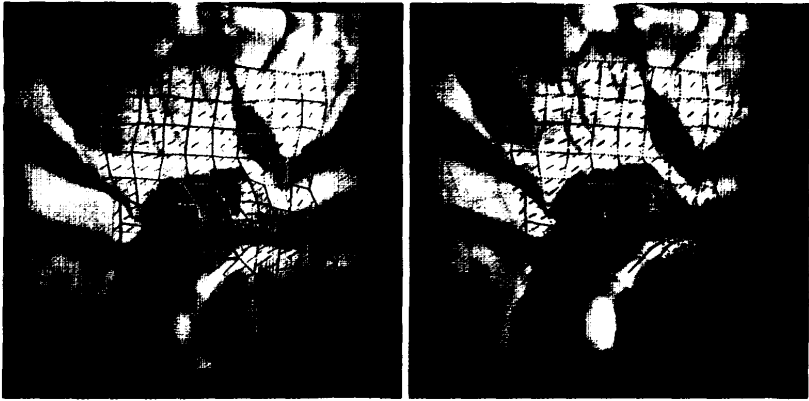


図 8
Fig. 8

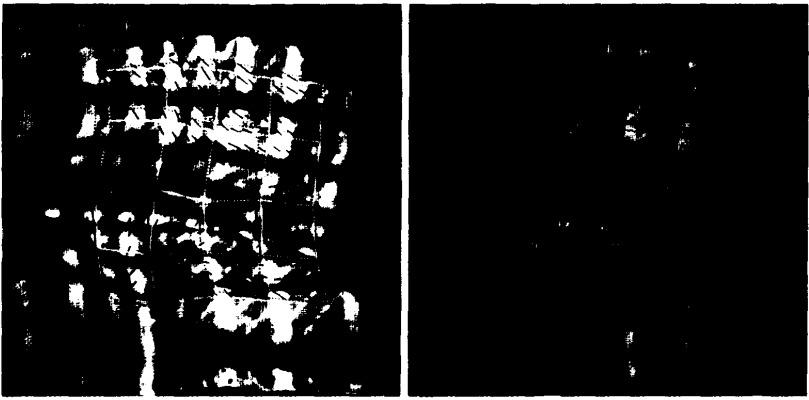


図 9
Fig. 9

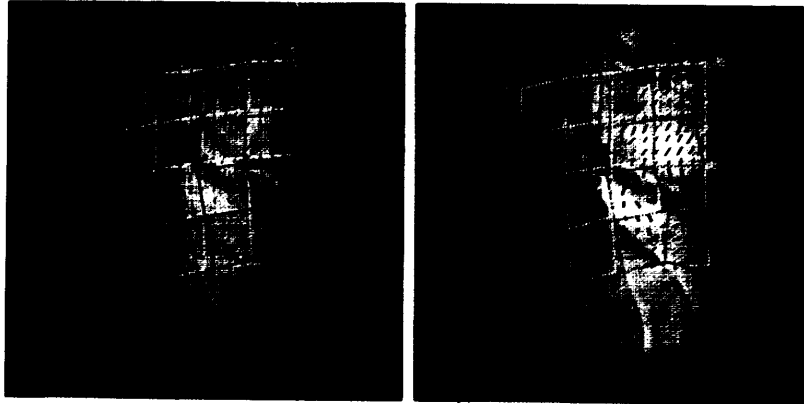


図 10
Fig. 10

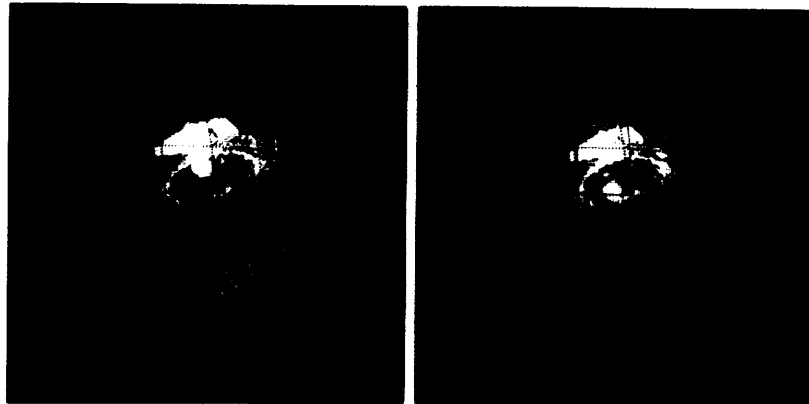


図 11
Fig. 11



図 12
Fig. 12

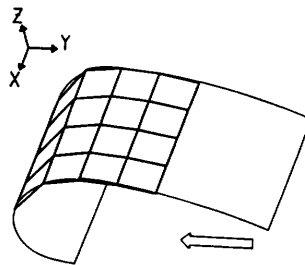


図 13
Fig. 13

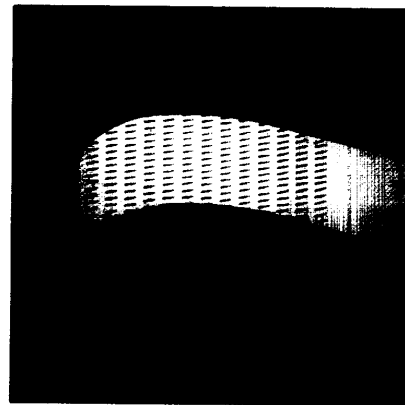


図 14
Fig. 14

図 10 推定された手のひらの動き。(左)時刻1 (右)時刻2

Fig. 10 Motion estimation of palm. Estimated sample range flow and a 5×5 deformable net with first (*left*) and second (*right*) range image frames painted in the intensity image of the palm.

図 11 推定されたゴム風船の動き。(左)時刻1 (右)時刻2

Fig. 11 Motion estimation of a rubber balloon. Estimated deformable net of 5×5 with first (*left*) and second (*right*) range image frames painted in the intensity image of the balloon.

図 12 ゴム風船のレンジフロー

Fig. 12 Estimated range flow of feature points on the intensity image of a shrinking balloon.

図 13 紙によるキャタピラ運動の実現方法と変形ネットモデル

Fig. 13 Caterpillar motion simulated by one sheet of paper, and the deformable net to be used in the experiment.

図 14 キャタピラのレンジフロー

Fig. 14 Estimated sample range flow of the caterpillar with the range images.

5×5 および 9×9 に変えてそれぞれ行われた。

図6にはネットの大きさが5×5の場合の初期ネット(黄色)と変形後のネット(緑色)がレンジフロー(赤と青色)と共に示されている。ネットが物体(紙)の後ろに隠されている部分は点線で表されている。また、レンジフローの赤色部分は見えている部分、青色部分は紙の裏側に隠されている部分である。ネットの大きさが3×3と9×9の場合はそれぞれ図7と図8に示されている。ネットの大きさの増大と共に動きの推定精度は良くなっている。しかし、ネットの精密化は動きの線形推定式を悪条件にさせる可能性がある。本論文ではどの程度のネットの大きさが最適なのかについては吟味していない。今後の課題である。

布

水平な面の上に置かれた布を両側から手で圧縮させたときの布の動きを推定した。この実験でも距離動画像と濃淡動画像を併用し、曲げと振れ(伸縮は含まれていない)と剛体運動のパラメータを求めた。濃淡画像でテクスチャマッピングされた布の距離動画像が図9にネットおよびレンジフローと共に示されている。

手のひら

閉じつつある手のひらの動きを推定した。濃淡画像でテクスチャマッピングされた手のひらの距離動画像が図10に示されている。この実験では距離動画像のみを使用した。実際、濃淡画像に見られた手相は明瞭さを欠き動きを拘束するのに十分とはいえなかったからである。運動パラメータは曲げと振れ、伸縮および剛体運動である。ただし、伸縮パラメータ $\Delta\alpha_{i,j}$ および $\Delta\beta_{i,j}$ はネット上で一様とした。推定されたネットの変形とレンジフローが図10に示されている。

ゴム風船

内部の空気が抜けつつあるゴム風船の動きを解析した。濃淡画像がテクスチャマッピングされたゴム風船の距離動画像を図11に示す。距離動画像と濃淡動画像を併用して、剛体と一様な伸縮の運動パラメータを推定した。(ここでは曲げや振れの運動パラメータは推定していない。すなわち、風船は相似変形するものと仮定している。) 距離動画像だけでは動きを一意に決定することができないことを注意しておく。なぜならば風船の表面が球面であるからである。推定されたゴム風船の変形運動が図11に示されている。また図12には風船面上の濃淡パターンの特徴点でのレンジフローが2枚の距離動画像と共に重ねて描かれている。この図には表面パターンがレンジフローと共に透

けて見えるように表されている。このレンジフローの向きは、始点部と終点部をそれぞれ赤と青の色分けて区別されている。

キャタピラ

第4章の最後に述べた境界拘束の有効性を示すために、キャタピラの動きを推定した。図13に示すように、キャタピラの動きを一枚の紙でシミュレートした。すなわち、紙の一端を水平面 $x-y$ 上に固定する。もう一方の端を持ち紙を曲げ水平面に平行に紙を押し出す。キャタピラの前面と二つの側面が動きの境界拘束となる。キャタピラの運動パラメータ、すなわち曲げ運動 $\Delta\psi_{i,j}$ と並進運動パラメータ、を距離拘束と境界拘束を使って求めた(濃淡画像は使用しなかった)。この場合の運動パラメータには回転運動を表すパラメータが含まれていないため、推定手続きは二段階に分ける必要がないことに注意。図14は推定したレンジフローを連続した距離動画像と共に示している。この表示方法は図12と同様に物体表面が透けて見えるようにしている。

運動パラメータの数が過剰な場合

運動パラメータの種類と数を制限しなかった場合には、推定式が悪条件に陥り解が一意に決まらなかった。ゴム風船の例では、ネットの曲げと振れのパラメータを加えたところ、解が一意に決まらなかった。これは次の理由による。球面の相似変形は伸縮運動のみならず曲げと振れの運動によっても表される。この曖昧さは濃淡拘束の併用によって解消させることも可能であるが、ネットの端では風船上の表面パターンが存在しなかったため拘束が働かなかったことによる。これに対し、手のひらの例では距離拘束のみを使っているにも拘わらず、曲げと振れおよび一様な伸縮パラメータが一意に決まった。しかし、伸縮比を各リンク独立にした場合、解は一意に決まらなかった。

7. おわりに

本論文では連続した画像間の対応付け問題を解くことなく、距離動画像から非剛体物体の運動パラメータを直接推定する手法を提案した。本手法は非剛体運動の解析に於て次の二つの利点を持っている。一つは、距離動画像は物体の表面形状を密に表しているため、局所的に細かな動きに至るまで十分に解析できることである。もう一つは、画像間の特徴点对応付け操作を前提にしていないため、変形運動による特徴点消失の影響を受けずに物体の動きを解釈できる点である。さ

らに、濃淡動画像の併用はゴム風船の運動解析の例で述べたように、運動解釈の曖昧さをなくすることが可能となった。一連の実験で得られた結果は提案した手法の有効性を示している。

本論文では、ネットを構成するリンクの変位を運動パラメータとしたが、ネットの節点の変位を運動パラメータとするモデルもある。Sederberg と Parry¹⁵⁾ は空間中の幾つかの点をモデルの制御点として選び、制御点の3次元変位を運動パラメータにとる非剛体運動モデルを提案した。このモデルは、われわれのモデルで各リンクが3自由度を持っている場合に相当し、式(13)のような変数間の拘束式を必要としないため簡潔ではある。しかし、このままでは常に変数の数が実際の対象に比べて過剰な状態になる。一意な解を得るためには、パラメータ間の束縛が必要となる。ところが、このモデルのパラメータは伸縮や曲げや捩れといった非剛体の物理的性質を直接表していないため、束縛式は複雑になり、われわれのモデルよりかえって扱いにくいものとなる。

謝辞 G. Godin 氏はグラフィックスマシン上に距離画像を表示する際にご尽力いただいた。N. Abdelmalek 氏は線形計算についてコメントをいただいた。F. Blais, L. Cournoyer, P. Gariepy の各氏はレンジファインダの設定と計算機環境の整備にそれぞれご協力いただきました。以上の方々に感謝いたします。第一筆者は常にご支援いただいている電総研弓場部長および大島室長に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Asada, M. and Tsuji, S.: Utilization of Stripe Pattern for Dynamic Scene Analysis, *Proc. 9th IJCAI*, pp. 895-897 (1985).
- 2) Ballard, D.H. and Kimball, O.A.: Rigid Body Motion from Depth and Optical Flow, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 22, pp. 95-115 (1983).
- 3) Barr, A.H.: Global and Local Deformations of Solid Primitives, *Comput. Gr.*, Vol. 18, No. 3, pp. 21-30 (1984).
- 4) Benson, K.B. ed.: *Television Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York (1985).
- 5) Beraldin, J.-A et al.: Video Rate Range Finder, Submitted for publication in *Appl. Opt.*.
- 6) Cafforio, C. and Rocca, F.: Methods for Measuring Small Displacements of Television Images, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. IT-22, No. 5, pp. 573-579 (1976).
- 7) Chaudhuri, S. and Chatterjee, S.: Estimation of Motion Parameters for a Deformable Object from Range Data, *Proc. CVPR*, pp. 291-295 (1989).
- 8) Chen, S. and Penna, M.: Shape and Motion of Nonrigid Bodies, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 36, pp. 175-207 (1986).
- 9) Horn, B.K.P. and Weldon, E.J., Jr.: Direct Methods for Recovering Motion, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 2, pp. 51-76 (1988).
- 10) Jasinschi, R. and Yuille, A.: Nonrigid Motion and Regge Calculus, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, No. 7, pp. 1085-1095 (1989).
- 11) Kehtarnavaz, N. and Mohan, S.: A Framework for Estimation of Motion Parameters from Range Images, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 45, pp. 88-105 (1989).
- 12) Koenderink, J.J. and van Doorn, A.J.: Depth and Shape from Differential Perspective in the Presence of Bending Deformations, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 3, No. 2, pp. 242-249 (1986).
- 13) Paul, R.P.: *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*, The MIT Press (1981).
- 14) Rioux, M.: Laser Range Finder Based on Synchronized Scanners, *Appl. Opt.*, Vol. 23, No. 21, pp. 3837-3855 (1984).
- 15) Sederberg, T.W. and Parry, S.R.: Free-form Deformation of Solid Geometric Models, *Comput. Gr.*, Vol. 20, No. 4, pp. 151-160 (1986).
- 16) Subbarao, M.: Interpretation of Image Flow: A Spatio-temporal Approach, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-11, No. 3, pp. 266-278 (1989).
- 17) Terzopoulos, D., Witkin, A. and Kass, M.: Constraints on Deformable Models: Recovering 3D Shape and Nonrigid Motion, *Artif. Intell.*, Vol. 36, No. 3, pp. 91-124 (1988).
- 18) Ullman, S.: Maximizing Rigidity: the Incremental Recovery of 3-D Structure from Rigid and Nonrigid Motion, *Perception*, Vol. 13, pp. 255-274 (1984).
- 19) 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, 信学論, Vol. J 68-D, No. 4, pp. 562-569 (1985).
- 20) Yamamoto, M.: A General Aperture Problem for Direct Estimation of 3D Motion Parameters, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-11, No. 5, pp. 528-536 (1989).

(平成3年3月5日受付)

(平成3年5月7日採録)

**山本 正信 (正会員)**

昭和 26 年 1 月 23 日生。昭和 48 年九州工業大学工学部制御工学科卒業。昭和 50 年東京工業大学大学院修士課程修了。同年、電子技術総合研究所入所。以来、動画像処理、コンピュータビジョン、知能ロボット等の研究に従事。現在、同所知能システム部視覚情報研究室主任研究官。この間、平成元～2年カナダ国立研究協議会招聘研究員。工学博士。昭和 62 年情報処理学会研究賞受賞。IEEE, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会各会員。

**ピエール ボランジャー**

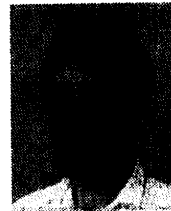
1980 年ラバル大学物理工学科卒業。1982 年同大学大学院修士課程修了。同年、Bausch & Lomb 入社。1985 年カナダ国立研究協議会入所。以来、距離画像解析、非線形光学、幾何モデル等の研究に従事。IEEE, カナダ物理学会各会員。

**アンジェロ ベラルディン**

1984 年シェルブック大学電気工学科卒業。1986 年オタワ大学大学院修士課程修了。同年、カナダ国立研究協議会入所。以来、センサ、信号処理、3次元ビジョン等の研究に従事。

**マーク リュウ**

1971 年ラバル大学物理工学科卒業。1976 年同大学院修士課程修了。同年、TEA 入社。1978 年カナダ国立研究協議会入所。現在、同所主任研究官。この間、レーザレンジファインダ、マシーンビジョンによる検査の自動化等の研究開発に従事。

**ジャック ドメイ**

1969 年モントリオール大学卒業。1972 年ロチェスター大学大学院修士課程修了。同年、カナダ国立研究協議会入所。現在、同所自動システム研究所長。この間、光学センサ、自動制御、3次元マシーンビジョン等の研究開発に従事。オンタリオ専門技術者協会、SPIE, IEEE 各会員。