

## 濃淡画像からの復元形状に基づく 3次元運動推定

正会員 山本正信<sup>†</sup>, 成 秀 炫<sup>†</sup>

## Determining 3D Motion by Shape-from-Shading

Masanobu Yamamoto<sup>†</sup> and Seong Soo Hyeon<sup>†</sup>

**Abstract** We propose a novel method of estimating three-dimensional (3D) motion parameters of an object using two successive images from a single camera. The method recovers 3D shape of the object from shading in each image, then estimates 3D motion parameters from two successive 3D shapes, and finally determines the optical flow, whereas the existing methods begin with optical flow estimation while assuming constant brightness during motion. Our method is useful even when the brightness of the pixel in motion does not remain constant.

## 1. ま え が き

人間はテレビや映画の2次元映像からでも対象の3次元的な動きを理解することができる。このような視覚機能をコンピュータで実現するために、次のような方法が一般的に行われている。

最初に、動画像から画面上での移動ベクトル(画像間対応付け)を測定し、ついで、対象が剛体であると仮定して移動ベクトルを3次元運動として解釈する。そのとき3次元形状も同時に得られる。この手法は2段階推定法と呼ばれている。後段での3次元運動の推定は、ノイズに対して非常に敏感であるため、前段での画像間の対応付けを正確に行わなくてはならない。

画像間を対応付ける方法として、(1)エッジやコーナーなど、画像上の特徴点を用いる方法と、(2)濃度値の不変性を拠り所とする時空間勾配法が知られている。これらの手法を適用する際には、様々な前提条件が存在する。

まず、特徴点の動きが物体の運動を正確に反映するためには、特徴点に対応する物体上の点の位置が物体の運動に不変であることが必要である。影やハイライト、隠れ境界などに対応する特徴点は、物体の動きを正確に表しているとはいえない。

また、時空間勾配法は、移動の前後で物体面上での濃淡値が不変であることが前提条件である。VerriとPoggio<sup>7)</sup>は、この条件が満たされるのは、定常光源下で並進移動をしている完全拡散反射面を観測している場合であり、一般の場合は必ずしも保証できないことを示した。そのため、時空間勾配法の精密化に多くの努力が払われている<sup>1)5)6)</sup>。

本論文では、身近な物体の中に、従来の対応付けの方法に必要な前提条件を満たしていない例があることを指摘する。そして、このような場合に、2段階推定法の手順を入れ換える手法を提案する。すなわち、先に3次元形状を求め、得られた距離画像から3次元運動を推定するのである。この手法は、濃淡情報から

キーワード：動画像解析、反射率分布図、距離画像、運動パラメータ、弛緩法

1995年12月20日、テレビジョン学会映像メディア部門冬期大会で発表。

1996年3月25日受付、1996年8月23日最終受付

<sup>†</sup>新潟大学 工学部 情報工学科 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050, TEL 025-262-7428)

<sup>†</sup>Department of Information Engineering, Niigata University (8050, Ikarashi 2-nocho, Niigata-shi, Niigata 950-21, Japan)

3次元形状の復元法と、距離動画像からの3次元運動推定法を道具として用いる。3章と4章でそれぞれの概説を行う。5章では、提案した手法の有効性を実験により評価する。

## 2. 逆2段階推定法

濃淡動画像から移動ベクトルを求めることが難しい場合を挙げよう。

図1は、鶏の卵がその中心を通る鉛直軸回りに回転しているときの動画像である。このときの鉛直軸は画像の縦軸に平行である。図2には、カメラと対象および光源との関係がカメラの真上から見た図として描かれている。投影モデルは正射影である。

まず、特徴点による対応付けを検討しよう。エッジやコーナーなどの特徴点は、濃淡値が急変する所として画像から検出される。図1の画像において、エッジとして検出されるのは卵の輪郭線である。この輪郭線から移動ベクトルを求めることはできない。なぜなら、輪郭線は隠れ境界線に対応しているので回転前後では卵上での位置が異なってくるからである。実際、図2において、最初の時刻での輪郭線は境界位置Cの投影である。この位置は次の時刻ではC'に移動している。しかし、次の時刻での輪郭線は境界位置Dの投影とし

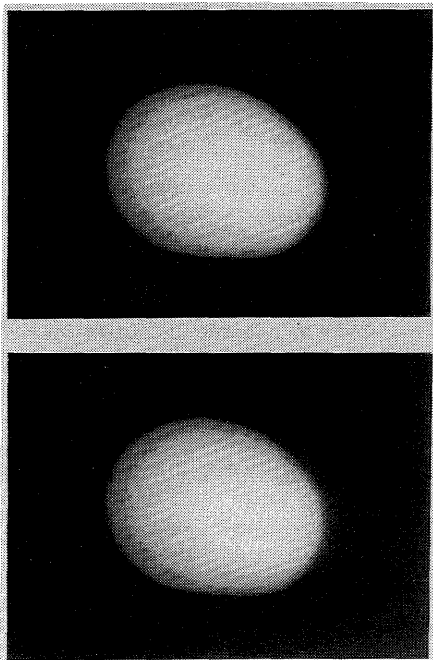


図1 卵の濃淡動画像。移動前(上) 移動後(下)  
Images of the egg. The first image (upper) and the second image (down).

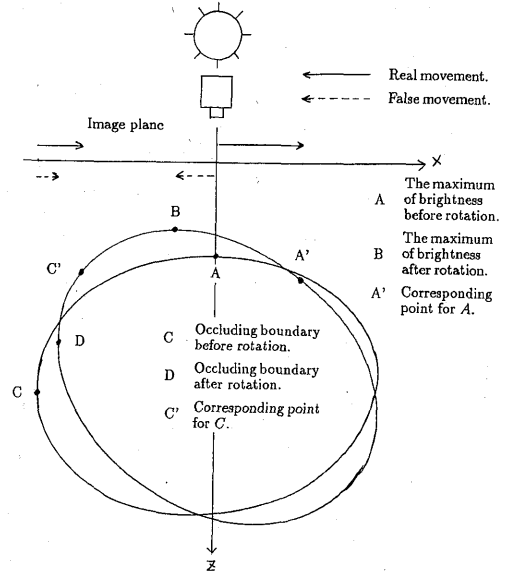


図2 対応付けの困難さ  
Problems in image correspondences.

て観測される。したがって、輪郭線(特徴点)の対応付けは正しい対応付けを表していない。

次に、時空間勾配法の適用を検討しよう。時刻  $t$  における画像上の点  $(x, y)$  の濃淡値を  $E(x, y, t)$  とする。点  $(x, y)$  が単位時間経過後  $(u, v)$  移動したとする。この  $(u, v)$  が移動ベクトルである。移動先での濃淡値  $E(x + u, y + v, t + 1)$  を  $(x, y, t)$  に関してテーラー展開する。

$$E(x + u, y + v, t + 1) = E(x, y, t) + E_x u + E_y v + E_t + O(2) \quad (1)$$

ここで、 $(E_x, E_y)$  は濃淡値の空間勾配であり、 $E_t$  は時間勾配である。それぞれ添字での偏微分により得られる。また、 $O(2)$  は2次以上の高次の微小項である。

移動先でも濃淡値が変化しないとすれば、 $E(x + u, y + v, t + 1) = E(x, y, t)$  である。さらに、高次の微小項  $O(2)$  を無視すれば、(1)式から移動ベクトル  $(u, v)$  を未知数とする次の1次方程式が得られる。

$$E_x u + E_y v + E_t = 0 \quad (2)$$

さて、卵面は完全拡散反射面(ランバート面)としてモデル化することができるので、面上の濃淡値は、図2に示されるように、光源と物体面との位置関係によって決定される\*。面の濃淡値が最大となる

\*説明の便宜上、図2では図1と光源の位置が多少異なっている。

のは、面の法線が光源の方向と一致しているときである。すなわち、回転前なら A 点、回転後なら B 点である。移動先での明るさの不変性を前提に対応付けを行えば、点 A は点 B に対応付くが、真の対応先は A' 点である。A 点と A' 点の濃淡値が異なるため、 $E(x+u, y+v, t+1) \neq E(x, y, t)$  となる。したがって、拘束式 (2) が導かれた仮定が崩れてしまう。

拘束式には濃淡値の変動分を説明するための補正項が必要となる。補正項の導入により、精密な基本拘束式が幾つか得られている<sup>1)5)6)</sup>。しかし、これらの結果を卵の問題に適用することはできない。なぜならば、時空間勾配法のもうひとつの前提条件として、濃度値の空間勾配が物体面の反射率の不均一性により生じていなければならないからである。卵面上の反射率はほぼ一定である。卵面上の濃度値の空間勾配は陰影によるもので、面上の反射率の差によるものではない。輪郭線は物体面と背景の境界であるため、輪郭線を挟む領域間の反射率に差がある。しかし、先に述べたように輪郭線に対応する物体面上の位置が変動するため、精密な時空間勾配法でも正しい対応付けを得ることができない。

鶏卵動画像からは、これまでの手法を適用して、画像間の対応付けを正確に求めることはできない。この卵の例は次のように一般化することができる。すなわち、反射率が様な滑らかな曲面を持つ物体の運動は、従来の画像間の対応付けに基づく動画像の解析手法を適用することができない。このような対象について、3次元運動が測定可能な手法を次に提案する。

対象物体面が完全拡散反射面であれば、Shape from shading の手法<sup>4)</sup>によって、輪郭情報から3次元形状を復元することが可能である。さらに、物体が剛体であれば各時刻間の3次元形状を照合することにより3次元運動を決定することができる<sup>8)</sup>。3次元運動パラメータが得られたならば、移動ベクトルの決定は容易である。すなわち、最初に動画像から各時刻の対象の3次元形状を復元し、次いで得られた3次元形状間の照合により3次元運動パラメータを推定する。最後に移動ベクトルを求めるのである。提案した手法は、従来の動画像解析の処理の流れと、順序が逆であるため、逆2段階推定法と呼ぶ。

### 3. 濃淡値からの3次元情報の復元

単眼カメラからの濃淡画像を使って、物体面の3次元形状を復元する手法は数多く提案されている<sup>2)3)</sup>。本論文では、池内<sup>4)</sup>によって提案された弛緩法を用いる。カメラ中心の座標系を  $(x, y, z)$  とする。このとき、

$z$  軸を光軸とし物体は  $(x, y)$  平面に正射影されるとする。光源は充分遠い位置に置かれ、物体面には平行光が照射されているとする。物体面の3次元形状を  $z = F(x, y)$  とする。 $(p, q) = (\partial F/\partial x, \partial F/\partial y)$  は面の勾配を表し、 $(p, q)$  平面は勾配空間と呼ばれる。面の法線ベクトルは、勾配  $(p, q)$  を使って  $(p, q, -1)$  と表される。光源の方向も勾配を使って表すことができ、照射光の方向ベクトルを  $(p_s, q_s, -1)$  とする。

物体面が完全拡散反射面であるならば、面の濃淡値は照射光の入射角の余弦に比例する。このとき、最大濃度値を1として正規化すれば、濃淡値は次式で与えられる。

$$R(p, q) = \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (3)$$

この濃淡値は面の勾配の関数とみなすことができる。これを反射率分布図と呼んでいる。

反射率分布図が与えられたならば、濃淡画像  $E(x, y)$  から面の勾配は次の画像照度方程式の解として得られる。

$$R(p, q) = E(x, y) \quad (4)$$

ただし、濃淡画像の最大濃度値も1に正規化している。

画像照度方程式は未知数が2つ ( $p$  と  $q$ ) 含まれているので、このままでは解を一意に決定することができない。そこで、物体面がなめらかであると仮定し、隠れ境界を利用して弛緩法により解を決定する。

図1の画像において、面の傾きを直ちに決定できるところがある。それは卵の輪郭部である。ここは隠れ境界と呼ばれ、面の法線ベクトルは視線と輪郭線に垂直な方向である。ただし、この法線ベクトルを  $(p, q)$  勾配値で表すことはできない。なぜなら勾配値が無限大になるからである。そこで、次の変換式を使って勾配空間を極投影平面  $(f, g)$  上の単位円内に1対1で対応付ける。

$$f = \frac{2p}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} + 1} \quad (5)$$

$$g = \frac{2q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} + 1} \quad (6)$$

このとき、反射率分布図を勾配  $(f, g)$  の関数として  $R_s(f, g)$  と書き換えることができる。

勾配  $(f, g)$  は、隠れ境界で与えられる勾配値を境界条件として、次の誤差関数を最小にする分布として求めることができる。

$$\int \int \{(E(x, y) - R_s(f, g))^2 + \lambda(f_x^2 + f_y^2 + g_x^2 + g_y^2)\} dx dy \quad (7)$$

ここで、第1項は画像照度方程式の誤差であり、第2項(添字の変数での偏微分を表す)は面のなめらかさを測る評価値である。また、 $\lambda$ は正則化定数と呼ばれ、2つの評価値のバランスを取る正值の重みである。

得られた勾配  $(f, g)$  から距離画像  $z = F(x, y)$  は次のように求める。まず、(5)、(6)式の逆変換

$$p = \frac{4f}{4 - f^2 - g^2}, \quad q = \frac{4g}{4 - f^2 - g^2} \quad (8)$$

により、勾配  $(f, g)$  から勾配  $(p, q)$  を求める。物体面上の任意の1点  $(x_0, y_0, z_0)$  を基準点とすれば、距離画像は基準点からの任意の曲線に沿って次の積分を実行することにより得られる<sup>3)</sup>。

$$z(x, y) = z_0(x_0, y_0) + \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} (pdx + qdy) \quad (9)$$

#### 4. 距離動画像からの運動推定

各時刻で濃淡動画像から得られた距離動画像は、距離動画像  $z = F(x, y, t)$  である。距離動画像から3次元運動パラメータの推定は次のように行う<sup>8)</sup>。

まず、濃淡動画像における時空間勾配法を距離動画像に拡張する。物体が運動するに伴い、物体上の点  $(x(t), y(t), z(t))$  も移動する。この点は距離動画像上の1点として測定されるので、次式を満たす。

$$z(t) = F(x(t), y(t), t) \quad (10)$$

両辺を時間  $t$  で微分すると、物体面上の3次元速度ベクトル  $(u, v, w) = (dx/dt, dy/dt, dz/dt)$  の拘束式が得られる。

$$w = pu + qv + r \quad (11)$$

ここで、 $r = \partial F / \partial t$  は距離の時間変化率であり、距離動画像の時間差分により容易に得られる。

一方、物体面上の3次元速度ベクトル  $(u, v, w)$  は、運動パラメータを用いて表すことができる。物体の中心を  $(x_c, y_c, z_c)$  としたとき、物体の運動は中心点回りの回転運動と並進運動の線形和で表すことができる。回転角速度ベクトル  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 、並進速度ベクトル  $(T_x, T_y, T_z)$  を運動パラメータとして、3次元速度ベクトルは次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

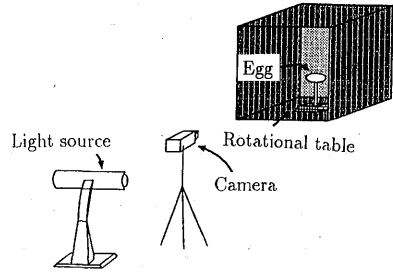


図3 撮影環境  
Experiment setup.

(12)式の  $u, v, w$  を(11)式に代入すれば、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。

$$\begin{aligned} pT_x + qT_y - T_z - \{q(z - z_c) + (y - y_c)\}\omega_x \\ + \{p(z - z_c) + (x - x_c)\}\omega_y \\ + \{q(x - x_c) - p(y - y_c)\}\omega_z + r = 0 \quad (13) \end{aligned}$$

物体面上の多数の点から導かれる(13)式を連立させて解けば、運動パラメータを求めることができる。

得られた運動パラメータを(12)式に代入すれば3次元速度ベクトルが得られる。そのうち  $(u, v)$  要素は、投影面上で観測される速度ベクトルである。本来、速度ベクトルは移動ベクトルの1次近似であるが、動きが小さな場合には移動ベクトルとみなしてよい。

#### 5. 実験による評価

実画像を用いて本推定法の評価を行った。

解析の対象は白い色をした鶏の卵である。卵の表面は完全拡散反射面に近いと考えられる。図3は実験データの撮影環境である。黒いラシャ紙で内張りされ、一方を解放した大きな箱を用意する。箱のサイズは門口が縦50cm横55cm奥行きが70cmである。卵は回転テーブル上に載せられ箱内に入口から約40cmの位置に置いた。

カメラと光源は対象から約2m離れた位置に設置した。カメラは市販のビデオカメラ(SONY, Handycam CCD-TR1000)\*を使用した。映像信号は、画像入力ボード(Xvideo, Parallax Graphics)を介してワークステーション(SUN Sparc Station 2)内にデジタル画像として格納される。光源は図3に示されるように、カメラの左手に約30cm離れた位置に置いた。

対象物体の大きさに比べて充分遠い位置に置かれたカメラから、ズームレンズを用いて撮影が行われた。

\*撮像素子は、768 × 494画素を持つ1/3インチのCCD個体撮像素子である。

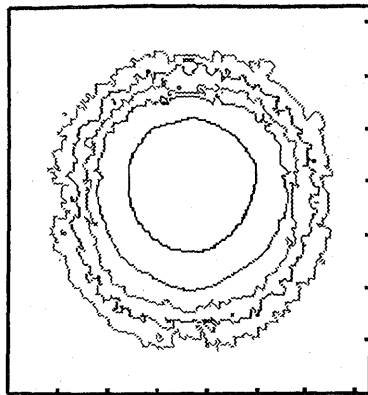


図4 反射率分布図  
Reflectance map.

このときのカメラの視野角は約 $5^\circ$ であった。このため、物体の動きが小さなとき、中心投影による縮小率は物体までの距離の変化にかかわらずほぼ一定となる。したがって、カメラモデルを正射影とみなすことができる。また、光源はカメラの近くに置かれた蛍光灯のみであり、対象物体の大きさに比べて十分に遠い位置にあるので、物体面上へは平行光が照射しているとみなせる。

卵の形はほぼ楕円体である。ただし、長軸の一方側の形状がほぼ球体であるのに対して、反対側は多少尖った形状をしている。まず、球体側をカメラに向けて撮影した。反射率分布図はこの画像から得られる。得られた反射率分布図を図4に示す。

対象物体である卵のサイズは、長軸の長さが約50mmである。長軸に直交する卵の断面形状はほぼ円と考えられるが、その大きさが最大となる位置の断面直径は約40mmである。

次に、回転前後の濃淡画像を撮影した。卵は長軸が水平になるように、かつカメラ光軸と直交するように回転テーブル上に置いた。回転テーブルは機械工作等で使用する角度割り出し盤を用いた。手でハンドルを回転し、回転量を目盛上で直接読むことにより回転角度を与えることができる。目盛は $1/10^\circ$ まで刻まれているが、目分量で $1/100^\circ$ まで読むことも可能とである。本実験で与えた回転角度は $3^\circ$ とした。このとき、回転軸は卵の中心を通る鉛直軸である。

撮影された卵の画像(図1)は、濃度値が256階調で、最も明るい濃度値が255、最も暗い濃度値が0に対応している。画像のサイズは $638 \times 480$ 画素である。図1は卵付近を画像から抜き出して表示したものである。画像上で観測された卵の長軸の長さは200画素、

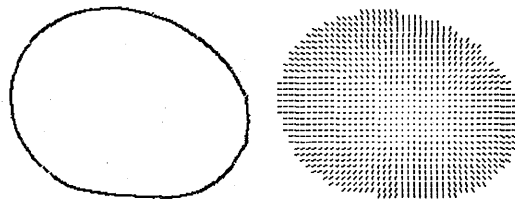


図5 卵の輪郭線(左)と勾配( $f, g$ )分布  
Occluding boundary (left) and needle diagram (right)  
on the egg.

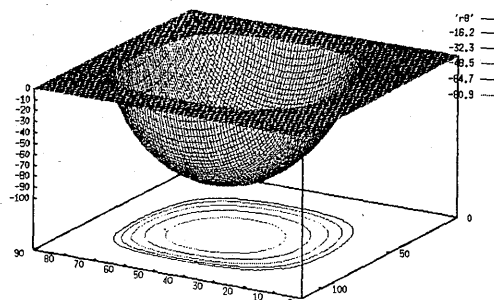
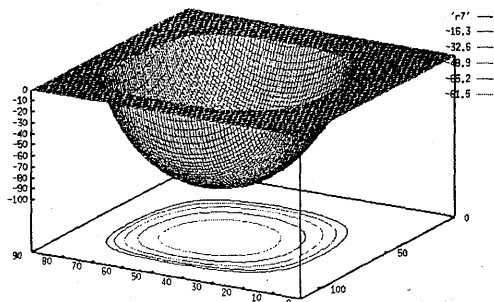


図6 距離画像の3次元および等高線表示、回転前(上)、回転後(下)

The depth maps of the egg at the 1st (upper) and the 2nd (down) frames.

長軸に直交する断面の最大直径は158画素であった。卵の長軸の実際の長さを50mmとすれば、 $0.25 \text{ mm}/\text{画素}$ となる。カメラモデルは正射影であるので、並進速度ベクトル( $T_x, T_y, T_z$ )の単位は、画素/フレーム、あるいは0.25倍して $0.25 \text{ mm}/\text{フレーム}$ \*となる。

卵面に比べて背景は暗いので、物体の隠れ境界線は濃度値の閾値処理により得られる。図5の左図に隠れ境界線を示す。この境界線となめらか拘束から弛緩法により面の勾配( $f, g$ )を求めたのが図5の右図である。約60回以上の繰り返し演算により収束値が得られる。

\*本実験では、対象の動きが画像の横軸方向に限られているため、カメラのアスペクト比は考慮しなかった。

表1 運動パラメータ推定結果  
Estimation of motion parameters.

	$T_z$	$\omega_y$
Real value	0.00000	3.00°
Estimation	-0.00967	2.92°

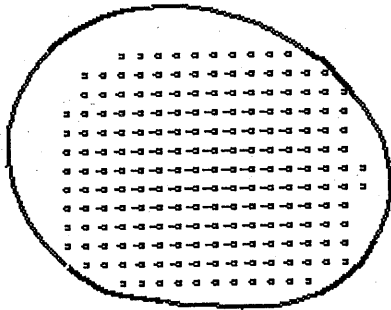


図7 移動ベクトル分布  
The displacement vectors field.

さらに、勾配  $(f, g)$  を勾配  $(p, q)$  に変換し、距離画像を復元した。その等高線および3次元表示が図6に描かれている。この距離動画像から運動パラメータを推定した。このとき、卵の像は投影面のほぼ中心付近に位置しているので、卵の中心点は  $(0, 0, 0)$  とした。卵の運動は  $y$  軸回りの回転であるので、推定すべき運動パラメータは  $\omega_y$  のみである。しかし、距離画像を復元するとき、距離の基準位置が物体の運動につれてずれるので、光軸方向の運動  $T_z$  も推定した。この  $T_z$  は基準位置のずれであり実際の物体の運動ではない。実際の光軸方向の並進運動は、カメラモデルを正射影としているので本手法では測定することはできない。推定された運動パラメータが表1に示されている。 $T_z$  の単位は画素/フレームである。

得られた運動パラメータから計算した移動ベクトルが図7に描かれている。輪郭線付近では移動ベクトルが得られていない。これは、隠れ境界付近では距離画像を正確に復元することができなかったためである。

## 6. む す び

変化を測定するためには、不変なものを拠り所としなくてはならない。従来の動画像解析では、特徴点の位置や濃淡値の不変性を仮定してきた。しかし、現実にはこれらの仮定が成り立たない場合がある。本論文では、対象が剛体であるとき形状の不変性を手がかり

として3次元運動を推定した。すなわち、濃淡画像からまず距離画像を求め、得られた距離動画像から運動パラメータを推定した。そして、最後に移動ベクトルを求めた。実画像による実験で、提案した手法が運動パラメータを精度良く推定できることを確認した。

本論文では鶏卵を対象としたが、対象物体の面が滑らかで反射率が一律な完全拡散反射面であれば、本手法は適用可能である。この条件を満たす対象として新雪に覆われた屋外風景が挙げられる。この応用は、雪上車の視覚システムとして期待できよう。

今後の課題としては、より正確な距離画像の復元による精度の向上やリアルタイム処理を目指した処理の並列化、などがあげられる。

## 【参 考 文 献】

- 1) N. Cornelius, T. Kanade: Adapting Optical Flow to Measure Object Motion in Reflectance and X-ray Image Sequences, in Proceedings of ACM SIGGRAPH/SIGART Interdisciplinary Workshop on Motion, Toronto, Canada (1983)
- 2) B.K.P. Horn: Obtaining Shape from Shading, In Winston, P.H. ed., The Psychology of Computer Vision, McGraw-Hill, New York (1975)
- 3) B.K.P. Horn: Robot vision, MIT Press, Cambridge (1986)
- 4) 池内克史: 反射地図に基づき二次元濃淡画像から三次元形状を再構成する2手法, 信学論, **J65-D**, 7, pp.842-849 (1982)
- 5) 野村厚志, 三池秀敏, 古賀和利: 時間変動する照明下での速度ベクトル場の検出, 信学論, **J76-D-II**, 9, pp.1977-1986 (1993)
- 6) 武川直樹: 動画像解析における光学モデル, 信学論, **J77-D-II**, 4, pp.711-718 (1994)
- 7) A. Verri, T. Poggio: Against Quantitative Optical Flow, In Proc. First Int'l Conf. Computer Vision, London, pp.171-180 (1987)
- 8) 山本正信, P. Boulanger, A.-J. Beraldin, M. Rioux, J. Domey: 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, 情処学論, **32**, 9, pp.1129-1141 (1991)



やまもと まさのぶ

**山本 正信** 1973年、九州工業大学工学部制御工学科卒業。1975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に入所。コンピュータビジョンの研究に従事。1989~1990年、カナダ国立研究協議会招聘研究員。1987年、情処学会研究賞受賞。1992年より、新潟大学工学部情報工学科教授。工学博士。正会員。



ソン スーヒョン

**成 秀炫** 1995年、新潟大学大学院情報工学専攻修士課程修了。現在、新潟韓国総領事館勤務。