

## 密な時系列点集合から得られる物体表面の 多重解像度オプティカルフロー

守田 了

山口大学工学部

宇部市常盤台 2557

morita@kde.yamaguchi-u.ac.jp

近年多視点画像から物体を復元する研究が盛んに行われている。多視点画像から物体の3次元点群が得られるが、このようにして得られた3次元点群をコンピュータグラフィックスなどで利用するためには面を構成する必要がある。またコンピュータグラフィックスではデータを圧縮し、レンダリングスピードを上げることの重要性が述べられている。そこで本稿では多視点画像から得られる色付きの密な時系列3次元点集合から、物体表面のさまざまな粗さにおける動きを検出する手法を提案する。まずさまざまな解像度の物体表面の色と形を復元し、得られた表面から多重解像度オプティカルフローを計算する。本手法は多視点画像から得られる時系列の3次元点群から動物体の表面の動きを抽出する場合に利用できる。実際に3次元デジタイザを用いて復元された時系列の物体表面から、多重解像度オプティカルフローを検出し有効性を示す。

キーワード 多重解像度解析, オプティカルフロー, 物体復元, 時系列画像

## Multiresolution Optical Flow based on Object Surface derived from Dense Time Sequential Point Set.

Satoru MORITA

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

2557 Tokiwadai, Ube, 755, Japan

We propose the multiresolution optical flow to recover the object surface using the colored point set derived from multiviewpoint images. At first we get the sampling points using the subdivision method. Next, we get the compressed surface with several scale for the target object using wavelet analysis. After that, the multiresolution optical flow is calculated using the compressed surface with several scale. We show the effectiveness using the real data about face, can and earth.

keyword: Multiresolution Analysis, Optical Flow, Object Surface, Time Sequential Images

## 1 はじめに

近年多視点から得られた画像を用いて物体を復元する研究が盛んに行われている [1]. 多視点画像から物体の3次元点群が得られるが, このようにして得られた3次元点群をコンピュータグラフィックスなどで利用するためには面を構成する必要がある. 他方コンピュータグラフィックスの分野で少ないポリゴン数で実物体を表現する技術が提案されている [2]. ここでの目的はデータの圧縮であり, レンダリングスピードを上げることである.

それに対して本研究の目的は多視点画像から得られる色つきの物体表面上の密な時系列点集合から, 物体表面の動きを抽出することである. Gibson は光の配列をオプティカルフローと呼び, 視覚心理学的立場からその重要性を述べている [3]. オプティカルフローは撮像されている物体に対してカメラが相対的に動いているときに, 観測される明るさパターンのみかけの動きである. 3次元点群の3次元空間中の動きを計算することの重要性が述べられている [4]. そこで本稿では通常視覚にとらえられた明るさパターンのみかけの動きを拡張し, 表面の局所的明るさパターンによるみかけの動きである3次元オプティカルフローを抽出する. さらに様々な解像度における明るさパターンのみかけの動きである多重解像度オプティカルフローを抽出する. まず物体表面上の密な点集合からウェーブレット変換 [5] に基づきさまざまなポリゴン数の物体表面の色と形を復元する. 復元されたさまざまな粗さの表面から物体表面のオプティカルフローを計算し, 3次元空間にマッピングすることにより, 3次元多重解像度オプティカルフローを抽出する. 多視点画像から得られる時系列の3次元点群から物体表面の明るさパターンのみかけの動きを抽出する場合に利用できる.

2. では物体表面に対する多重解像度オプティカルフローについて述べる. 3. では物体表面のオプティカルフローを計算する流れを示す. 4. では実データに本手法を適用し有効性を示す.

## 2 物体表面に対するウェーブレット変換

### 2.1 多重解像度解析

ウェーブレット  $\psi$  による関数  $h(x)$  の離散ウェーブレット変換は

$$d_k^{(j)} = 2^j \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j x - k)} \cdot h(x) dx$$

で与えられ, その逆変換は

$$h(x) \sim \sum_j \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j x - k)$$

で与えられる.

レベル  $j$  の関数  $f_j \in V_j$  を, レベル  $j-1$  の関数に分解するには  $f_j = f_{j-1} + g_{j-1}$  のように  $c_k^{(j)}$  から  $c_k^{(j-1)}$  と  $d_k^{(j-1)}$  を求める必要がある.

分解アルゴリズムは

$$c_k^{j-1} = \frac{1}{2} \sum_l g_{2k-l} c_l^{(j)}$$

$$d_k^{j-1} = \frac{1}{2} \sum_l h_{2k-l} c_l^{(j)}$$

レベル  $j-1$  の関数  $f_{j-1}(x) \in V_{j-1}, g_{j-1}(x) \in W_{j-1}$  から  $f_j(x) = f_{j-1}(x) + g_{j-1}(x)$  のようにレベル  $j$  の関数を構成するには,  $c_k^{j-1}$  と  $d_k^{j-1}$  から  $c_k^{(j)}$  を求める必要がある. したがって再構成アルゴリズムは

$$c_k^j = \sum_l [p_{k-2l} c_l^{j-1} + q_{k-2l} d_l^{j-1}]$$

が導かれる. 本論文ではこれらの手法を球面に拡張する手法を用いる.

### 2.2 物体表面に対するウェーブレット変換

球全体にハールウェーブレット変換を拡張する. 物体表面の面  $n$  とその面を四つに分解した面を  $ni, nj, nk, no$  とする.

$$\phi_n = \phi_{no} + \phi_{ni} + \phi_{nj} + \phi_{nk}$$

$$\psi_{ni} = g_o \phi_{no} + g_t \phi_{ni} + g_m \phi_{nj} + g_m \phi_{nk}$$

$$\psi_{nj} = g_o \phi_{no} + g_m \phi_{ni} + g_t \phi_{nj} + g_m \phi_{nk}$$

$$\psi_{nk} = g_o \phi_{no} + g_m \phi_{ni} + g_m \phi_{nj} + g_t \phi_{nk}$$

但し  $g_o = g_t = \frac{1}{2}, g_m = -\frac{1}{2}$  を用いている.  $\phi_n \perp \psi_{ni}, \phi_n \perp \psi_{nj}, \phi_n \perp \psi_{nk}, \psi_{ni} \perp \psi_{nj}, \psi_{ni} \perp \psi_{nk}, \psi_{ni} \perp \psi_{nk}$  アフィン不変であり, 正規直交関係を満たしている.  $\phi_n$  はもとの画像の性質を低域の周波数を残したものに对应する. ウェーブレット分解はこの計算により行われる.

一方ウェーブレット再構成は, 上記の方程式を  $\phi_{no}, \phi_{ni}, \phi_{nj}, \phi_{nk}$  について解いたものである. 分解時に  $\psi_{ni}, \psi_{nj}, \psi_{nk}$  を保存しておくことにより,  $\phi_{no}, \phi_{ni}, \phi_{nj}, \phi_{nk}$  が再構成される.

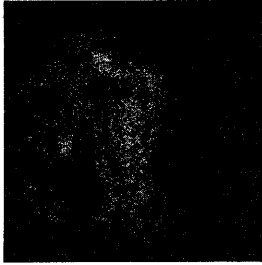


図 1: 多視点画像から得られた 3 次元点群

### 2.3 物体表面上の点のサンプリング

近年多視点画像から得られた物体の 3 次元表面点を得る研究が盛んに行われている。得られた画像から密な物体の表面の色とその 3 次元位置がわかる。本研究ではこれらの色がわかる密な物体の表面上の点から物体の表面を計算し、物体の動きを推定する。

物体表面を四面体を用いてサンプリングする。まず四面体を物体の重心におき、各四面体の頂点を物体の外側方向にむけて突き刺すベクトルの近傍の表面上の点から新たな四面体を構成する。このようにして得られた四面体を再帰的に四分分割する。この際分割により加えられる点は四面体上から外側にベクトルを突き刺し、そのベクトルの近傍点をサンプリング点とする。図 1 は物体を中心におきカメラを回転し、得られた時系列画像から物体表面の点群を復元したものである。

### 2.4 物体表面上の点のウェーブレット分解と再構成

本稿では各面の法線ベクトルと各面の重心の位置にウェーブレット変換をかける。これにより形状の大域的特徴を取り出す。各面の重心の位置における RGB の値に対してウェーブレット変換をかける。これにより色の大域的特徴を取り出す。

## 3 3 次元表面に対する多重解像度オプティカルフロー

$uv$  軸を座標軸と考えオプティカルフローを計算する。図に示すように物体表面を画像の左上半面に記述することにより画像における計算と同じようにオプティカルフローが計算できる。

撮像されている物体に体してカメラが相対的に動いている時に、観測される明るさパターンのみかけの動きは

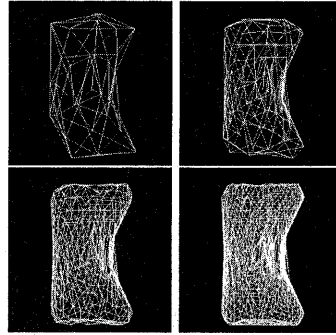


図 2: サンプルによるレベル 2-5 の缶

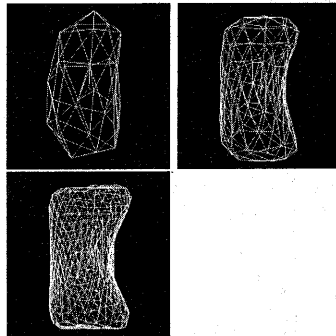


図 3: ウェーブレット変換によるレベル 2-4 の缶

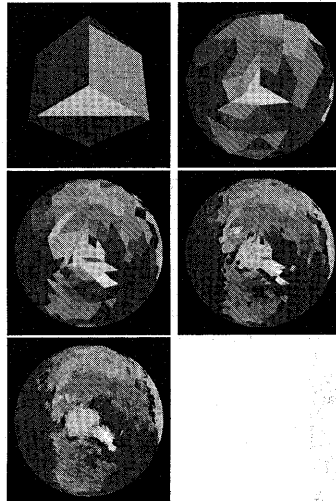


図 4: サンプルによるレベル 2-6 の地球

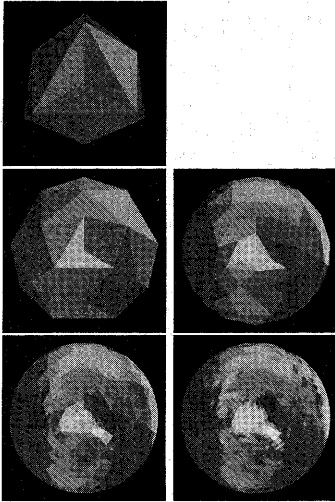


図 5: ウェーブレット変換によるレベル 2-6 の地球

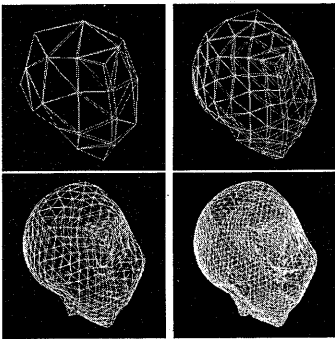


図 6: サンプルによるレベル 2-5 の顔

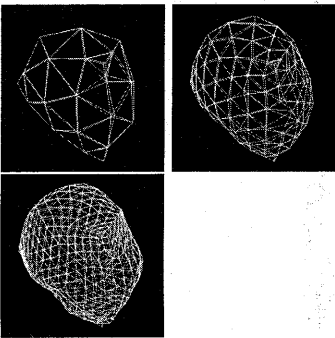


図 7: ウェーブレット変換によるレベル 2-4 の顔

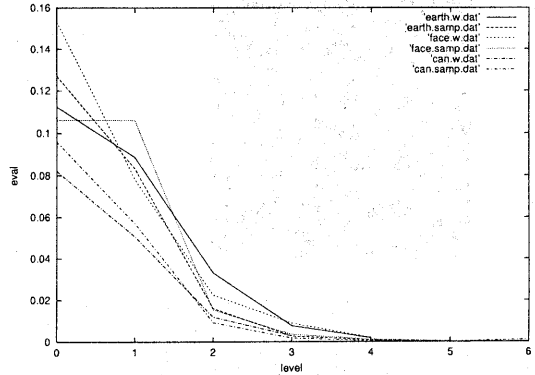


図 8: 評価

オプティカルフローと呼ばれている。Limbらは動画の帯域圧縮の研究から、物体の移動方向と明るさの勾配に関する近似式を発見し [6], Hornらはこの近似式からオプティカルフローを決定する近似式を導いている [7]. 本研究では動き場は画像のほとんどの部分において滑らかに変化するという仮定と物体上の点の明るさが不変であるという仮定から、オプティカルフローは以下の関数を最小化することにより得られる。

$$F(u, v, u_x, u_y, v_x, v_y) =$$

$$e_s = \int \int ((u_x^2 + u_y^2) + (v_x^2 + v_y^2)) dx dy$$

$$e_c = \int \int ((E_x u + E_y v + E_t)^2) dx dy$$

$u = \frac{dx}{dt}, v = \frac{dy}{dt}$   
 $E_x = \frac{\partial E}{\partial x}, E_y = \frac{\partial E}{\partial y}, E_t = \frac{\partial E}{\partial t}$  本稿では、多重解像度解析により得られるレベル  $n$  の表面  $(u_n, v_n)$  からオプティカルフローを計算するためにこれらの計算を以下のように拡張する。レベル  $n$  のサンプルされた表面から色を抽出する。

$$F(u_n, v_n, u_{x_n}, u_{y_n}, v_{x_n}, v_{y_n}) =$$

$$e_s = \int \int ((u_{n_x}^2 + u_{n_y}^2) + (v_{n_x}^2 + v_{n_y}^2)) dx dy$$

$$e_c = \int \int (E_x u_n + E_y v_n + E_t)^2 dx dy$$

$u_n = \frac{dx}{dt}, v_n = \frac{dy}{dt}$   
 $E_x = \frac{\partial E}{\partial x}, E_y = \frac{\partial E}{\partial y}, E_t = \frac{\partial E}{\partial t}$   
 本計算は以下の積分を最小化する変分法の問題になる。

$$\int \int F(u_n, v_n, u_{n_x}, u_{n_y}, v_{n_x}, v_{n_y}) dx dy$$

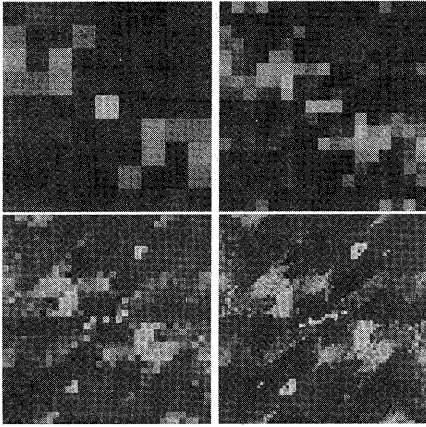


図 9: レベル 2-5 における表面画像

$$F = (u_{nx}^2 + u_{ny}^2) + (v_{nx}^2 + v_{ny}^2) + \lambda(E_x u_n + E_y v_n + E_t)^2$$

対応するオイラー方程式は次のようになり、

$$F_{u_n} - \frac{\partial}{\partial x} F_{u_{nx}} - \frac{\partial}{\partial y} F_{u_{ny}} = 0$$

$$F_{v_n} - \frac{\partial}{\partial x} F_{v_{nx}} - \frac{\partial}{\partial y} F_{v_{ny}} = 0$$

よってオイラーの方程式から次式が導かれる。

$$\nabla^2 u_n = \lambda(E_x u_n + E_y v_n + E_t) E_x$$

$$\nabla^2 v_n = \lambda(E_x u_n + E_y v_n + E_t) E_y$$

ここで

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

この 2 元連立の楕円型 2 階微分方程式は繰り返し法によって解くことができる。60 回の繰り返し演算により計算され、 $\lambda = 0.00001$  である。

#### 4 物体表面のオプティカルフロー計算の流れ

以下に示す計算の流れに従い、物体表面のオプティカルフローを計算する。

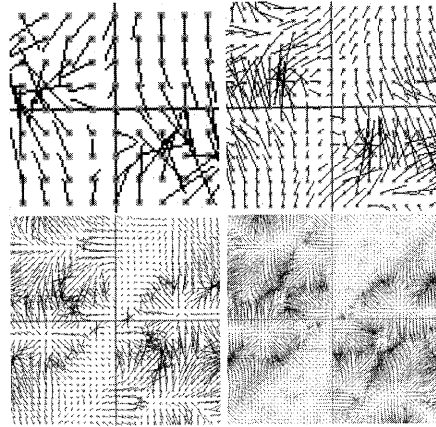


図 10: レベル 2-5 における表面のオプティカルフロー

- 多視点画像やレンジセンサなどから密な色づけられた動物体の 3 次元点集合を取得する。
- 3 次元点集合の重心を求め、その位置に四面体をセットする。
- 表面上の点のサンプリングを四面体を用いて一定のレベルまで再分割を行う。
- 一定のレベルサンプルされた面集合をウェーブレット変換を用いて圧縮する。
- 次の時刻の 3 次元点集合の重心をもとめ、その位置に四面体をセットする。
- 表面上の点のサンプリングを四面体を用いて一定のレベルまで再分割を行う。
- 一定のレベルサンプルされた面集合をウェーブレット変換を用いて圧縮する。
- 得られた表面の画像からオプティカルフローを検出し、物体表面にマッピングする。

実験では、地球、潰れた缶、顔から得られた点集合を用いてウェーブレット変換により物体表面形状を復元する。また地球についてはそれらの局所的表面の動きであるオプティカルフローを計算する。図 2 には缶の物体表面の点集合 10354 点からサンプルにより得られたレベル 2-5 の缶を示す。図 3 にはウェーブレット変換により再構成されたレベル 2-4 缶を示す。図 4 は地球の物体表面の点集合 13765 点からサンプルにより得られたレ

ベル 2-6 の地球である。図 5 はウェーブレット変換により再構成されたレベル 2-6 の地球である。図 6 は顔の物体表面の点集合 6845 点からサンプルにより得られたレベル 2-5 の顔である。図 7 はウェーブレット変換により再構成されたレベル 2-4 の顔である。ウェーブレット変換により再構成された形状は周波数が低域の緩やかな形状であり、サンプルにより得られた形状より滑らかになっている。サンプル数が少ない場合は、形状の大域的特徴しか表現できないため、ウェーブレット変換による再構成の方法がより大域的特徴を表している。サンプルによる方法では、サンプルする点によって形状が大きく変わってしまう。図 8 は得られた表面形状の評価を示している。物体表面上の点集合における、構成された面との距離を計算し、平均をとったものである。先に示した缶、地球、顔についてサンプルによる方法とウェーブレット変換による再構成による方法を比較したものである。結果からサンプル数が少ない時はウェーブレット変換による再構成の方法がより物体表面に近いが、サンプル数が多くなるとサンプルによる方法がよりもとの物体表面に近くなることわかる。多視点画像から得られる密な点群は、部分的にまばらに点が存在する場合がある。本手法では、点の分布と面との距離に基づき分割を制御することにより、少ないサンプル点により、よりもとの形状に近い表面を抽出できる。

さらに自転しながら公転する地球から、オプティカルフローを検出した。図 9 はオプティカルフローを計算するために得られた、物体表面の  $u, v$  軸を  $x, y$  軸に対応づけて色づけした画像である。但し、物体表面は展開すると三角形になるため、左上半分が物体表面であり、右下半分は面の連結性を考慮して、物体表面を貼り付けたものである。このようにして得られたレベル 2-6 の 2 枚からオプティカルフローが計算される。図 10 が物体表面のレベル 2-6 のオプティカルフローである。図からオプティカルフローが検出できていることがわかる。このフローを物体表面にマッピングすることにより、物体の局所的移動が視覚化される。また、得られた  $n$  レベルのオプティカルフロー  $(u_n, v_n)$  を加重平均することにより、より正確な物体表面のオプティカルフローを計算できる。

また 3 次元デジタイザを用いて図 11 に示す時系列のハムスターのぬいぐるみから、オプティカルフローを検出する。得られた物体表面の点数は 331944 点である。図 12 はオプティカルフローを計算するために得られた、物体表面の  $u, v$  軸を  $x, y$  軸に対応づけて色づけした移動前の画像である。但し、物体表面は展開すると三角形になるため、左上半分が物体表面であり、右下半分は面

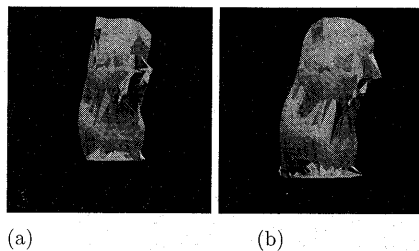


図 11: ハムスター (a) 移動前 (b) 移動後

の連結性を考慮して、物体表面を貼り付けたものである。このようにして得られたレベル 2-5 の 2 枚からオプティカルフローが計算される。図 13 が物体表面のレベル 2-5 のオプティカルフローである。図からオプティカルフローが検出できていることがわかる。ウェーブレット変換を用いて大域的特徴をとらえているため、少ないサンプルにより動きを検出したい場合に、急激な色変化による動きの誤検出をおこしにくい。これらの物体表面のオプティカルフローを 3 次元空間中の表面にマッピングすることにより、3 次元空間のシーンフローが得られる。

## 5 おわりに

多視点画像から得られるような色付きの密な時系列 3 次元点集合から、さまざまな解像度の物体表面の色と形を復元する手法を提案した。また得られた表面から多重解像度オプティカルフローを計算する手法を示した。本手法は多視点画像から得られる時系列の 3 次元点群から動物体の表面の動きを抽出する場合に利用できる。

## 謝辞

山口大学工学部在学中議論を頂いた吉田加奈子さんに感謝します。3 次元デジタイザをお貸しいただいた北海道大学田中譲教授ならびに研究室の杉瀬 剛史君に感謝します。

## 参考文献

- [1] A. W. Fitzgibbon, and A. Zisserman, "Automatic Camera Recovery for Closed or Open Image Sequences", ECCV, pp. 311-326, 1998.

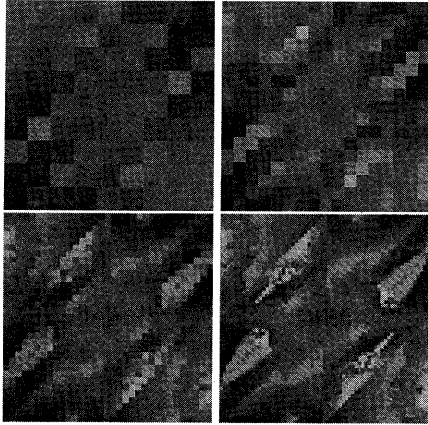


図 12: レベル 2-5 における移動前のハムスターの表面画像

- [2] A. Khodakovsky, P. Schroder, W. Sweldens, "Progressive Geometry Compression", SIGGRAPH2000, pp. 271-278, 2000.
- [3] E. J. Gibson, J. J. Gibson, O. W. Simith and H. Flock, "Motion Parallax as a Determinant of Perceived Depth," Journal of Experimental Psychology, vol. \*, No. 1, pp. 40-51, 1959.
- [4] S. Vedula, S. Baker, P. Rander, R. Collins, T. Kanade, "Three-Dimensional Scene Flow", proc. of ICCV99, pp. 722-729.
- [5] C. K. CHUI, "An Introduction to Wavelets", 1991.
- [6] J. O. Limb and J. A. Murphy, "Estimating the Velocity of Moving Images in Television Signals," CGIP, vol. 4, pp. 311-327, 1975.
- [7] B. K. P. Horn and B. G. Schunk, "Determining Optical Flow," Artificial Intelligence, vol. 17, pp. 185-203, 1981.

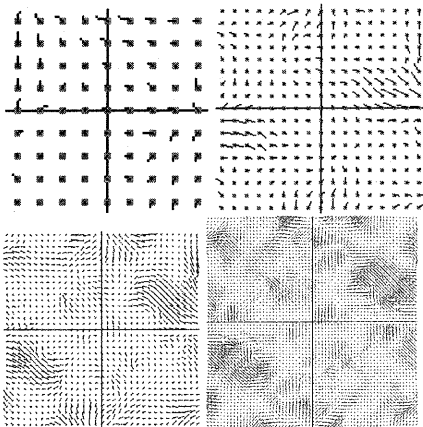


図 13: レベル 3-5 におけるオプティカルフロー