

球面レベルセット法と全方位複数輪郭抽出 Spherical Level Set Method and Extracting Omnidirectional Multiple Contours

原 健二[†] 岩下 友美[‡] 倉爪 亮[‡] 長谷川 勉[‡] 浦浜 喜一[†]
Kenji Hara Tomomi Iwashita Ryo Kurazume Tsutomu Hasegawa Kiichi Urahama

1. まえがき

近年、全方位球面画像処理の研究が盛んに行われており、全方位サーベイランスや没入型仮想現実感などへの応用が期待されている。例えば、複数カメラや超広角レンズを用いて得られた複数枚の画像を違和感なく統合して全方位球面画像を取得する方法 [15, 11], 球面調和関数や球面 wavelet 変換を用いて全方位球面画像を効率的に記述する手法 [4], 全方位球面画像のためのオプティカルフロー推定法 [7] などが提案されてきた。これに対し、全方位球面画像の物体領域を抽出する問題はほとんど解決されていない。

通常の平面画像の複数輪郭を抽出する問題では、当初、動的輪郭モデル (Snakes)[6] を複数輪郭に拡張した手法 [9, 1, 16] が提案された。これらの手法は平面曲線の分裂や統合の際の制御が複雑であるが、球面画像に適応させるためには平面曲線よりも厄介な空間曲線を扱わなければならない。曲線の制御はさらに複雑になる。

一方、レベルセット法 (level set method) [12, 14] を用いると平面画像の複数輪郭が単純かつ安定に抽出できることが報告されている [10, 13, 8, 17]。レベルセット法は、曲線 (面) を一次元高い補助関数のゼロ等高線 (面) とみなし、この補助関数に関する偏微分方程式を数値的に解くことにより、曲線 (面) の分裂・統合といったトポロジー変化にも適応しつつ曲線 (面) の運動を追跡する方法である。しかしながら、一般にレベルセット法はユークリッド空間 (\mathbb{R}^N) を運動する曲線 (面) を対象として定式化されており、そのままでは全方位複数輪郭抽出に用いることはできない。

本稿では、レベルセット法を球面上を運動する曲線の追跡に拡張し、これを用いて全方位球面画像の複数輪郭を抽出する手法を提案する。Bertalmioらは、レベルセット法を用いて曲面上の偏微分方程式を数値的に解く手法を提案した [2]。彼らは曲面それ自体をレベルセットとし、曲面上のスカラー場やベクトル場に関する微分方程式を効率的に解くことを目的としている。これに対し、本研究は曲面上で定義された関数をレベルセット関数とし、球面上を時間発展する曲線を時間大域的に追跡する問題を扱う。この枠組みを全方位球面画像に適用することにより全方位複数輪郭を抽出することが可能になる。

以下では、まず球面上で定義されたレベルセット関数に対する微分方程式を導出する。3章では、この微分方程式の数値解法について述べる。4章では、球面レベルセット法を用いた球面画像の領域抽出手法を説明する。5章で実験結果を紹介し、6章で結論を述べる。

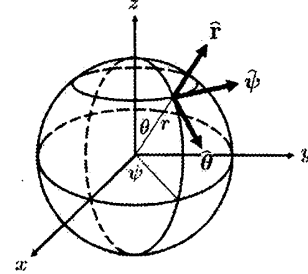


図 1: 極座標系と局所直交座標系

2. 球面上のレベルセット法

通常のレベルセット法はユークリッド空間を運動する曲線 (面) の運動の追跡に制限されている。本章では、レベルセット法を球面上の曲線の追跡に拡張した球面レベルセット法を提案する。以下では、球面上のレベルセット関数の運動を記述する偏微分方程式を導出する。

空間曲線 C 上のある点を P とし、その位置ベクトル \mathbf{r} を極座標を用いて

$$\mathbf{r} = (r \sin \theta \cos \psi, r \sin \theta \sin \psi, r \cos \theta) \quad (1)$$

のように表す。ここで、 r は原点からの距離、 θ は天頂角、 ψ は方位角である。いま、点 P が時刻 t によって動くとし、 \mathbf{r} , r , θ , ψ をそれぞれ $\mathbf{r}(t)$, $r(t)$, $\theta(t)$, $\psi(t)$ のように表す。このとき、点 P の速度ベクトルは、式 (1) の両辺を時刻 t で微分することにより

$$\mathbf{r}'(t) = r'(t) \hat{\mathbf{r}} + r(t) \theta'(t) \hat{\boldsymbol{\theta}} + r(t) \sin \theta(t) \psi'(t) \hat{\boldsymbol{\psi}} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 $r'(t)$, $\theta'(t)$, $\psi'(t)$ は $r(t)$, $\theta(t)$, $\psi(t)$ の時刻 t に関する微分を表す。また、 $\hat{\mathbf{r}}$, $\hat{\boldsymbol{\theta}}$, $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ はそれぞれ

$$\hat{\mathbf{r}} = (\sin \theta \cos \psi, \sin \theta \sin \psi, \cos \theta) \quad (3)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\cos \theta \cos \psi, \cos \theta \sin \psi, -\sin \theta) \quad (4)$$

$$\hat{\boldsymbol{\psi}} = (-\sin \psi, \cos \psi, 0) \quad (5)$$

であり、点 P における局所直交座標系の基底ベクトルとなっている (図 1)。ここで、空間曲線 C が常に単位球面上にのっているとすると、点 P は単位球面上を動くので、 $r = 1$, $r'(t) = 0$ を式 (2) に代入する。これにより、点 P の速度ベクトルは

$$\mathbf{r}'(t) = \theta'(t) \hat{\boldsymbol{\theta}} + \sin \theta(t) \psi'(t) \hat{\boldsymbol{\psi}} \quad (6)$$

と表される。したがって、時刻 t における点 P の位置ベクトルを原点、このときの $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ と $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ を直交基底とする 2

[†]九州大学大学院芸術工学研究院

[‡]九州大学大学院システム情報科学研究院

次元直交座標系 $\Sigma = (P; \hat{\theta}, \hat{\psi})$ を設定すると、点 P の速度ベクトルの Σ における座標 $(\mathbf{x}'(t))_{\Sigma}$ は

$$(\mathbf{x}'(t))_{\Sigma} = (\theta'(t), \sin \theta(t) \psi'(t)) \quad (7)$$

と表される。

いま、次式のように、単位球面上のある3変数関数 $\phi(\theta, \psi, t)$ (以下、レベルセット関数) のゼロ等高線として、曲線 C が与えられているとする。

$$\phi(\theta(t), \psi(t), t) = 0 \quad (8)$$

ϕ は滑らかとし、式(8)の両辺を時刻 t で微分すると、chain ruleにより

$$\phi_t + \theta'(t) \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \psi'(t) \frac{\partial \phi}{\partial \psi} = 0 \quad (9)$$

のようになる。式(9)は

$$\phi_t + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \theta}, \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \right) \begin{pmatrix} \theta'(t) \\ \sin \theta(t) \psi'(t) \end{pmatrix} = 0$$

と書けるので、式(7)を用いて次式を得る。

$$\phi_t + \nabla_{\theta\psi} \phi(\theta(t), \psi(t), t) \cdot (\mathbf{x}'(t))_{\Sigma} = 0 \quad (10)$$

ただし、 $\nabla_{\theta\psi}$ は極座標に関する空間微分を含む演算子で $\nabla_{\theta\psi} = \left(\frac{\partial}{\partial \theta}, \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \psi} \right)$ 、記号 \cdot は内積である。

ここで、球面上の曲線 C の法線ベクトルを定義する。一般に、空間曲線の法線ベクトルを一意に定めることはできない。ここでは、空間曲線 C の点 P における接ベクトルと直交する方向ベクトルの集合のうち、2次元直交座標系 Σ の2つの基底 $\hat{\theta}$ と $\hat{\psi}$ で張られる平面にのっているものを点 P における曲線 C の法線ベクトルとみなす。このとき、その単位法線ベクトルの Σ に関する座標 \mathbf{n}_{Σ} は

$$\mathbf{n}_{\Sigma} = \frac{\nabla_{\theta\psi} \phi}{|\nabla_{\theta\psi} \phi|} \quad (11)$$

と表される。このことを示すため、レベルセット関数 ϕ が時間の経過に不変で、かつ $(\mathbf{x}'(t))_{\Sigma} \neq 0$ となる定常状態の場合について考える。このとき、 $\phi_t = 0$ となるので、式(10)は

$$\nabla_{\theta\psi} \phi(\theta(t), \psi(t), t) \cdot (\mathbf{x}'(t))_{\Sigma} = 0 \quad (12)$$

となる。また、 $(\mathbf{x}'(t))_{\Sigma} \neq 0$ より、速度ベクトル $(\mathbf{x}'(t))_{\Sigma}$ の方向は曲線 C の接ベクトルの方向と一致する。式(12)より、この接ベクトルと $\nabla_{\theta\psi} \phi$ は直交する。したがって、この $\nabla_{\theta\psi} \phi$ を長さ1に正規化することにより、式(11)が得られる。

いま、点 P の速度ベクトル $(\mathbf{x}'(t))_{\Sigma}$ の \mathbf{n}_{Σ} 方向への成分を F (以下、成長速度)、すなわち $F = (\mathbf{x}'(t))_{\Sigma} \cdot \mathbf{n}_{\Sigma}$ とすると、式(10)は

$$\phi_t + F |\nabla_{\theta\psi} \phi| = 0, \quad \nabla_{\theta\psi} = \left(\frac{\partial}{\partial \theta}, \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \psi} \right) \quad (13)$$

と表すことができる。式(13)は各点が成長速度 F で運動する球面上の曲線をゼロ等高線としてもつレベルセット関数 ϕ がしたがう偏微分方程式を表している。本稿では、この式(13)を球面レベルセット方程式と呼ぶことにする。

ところで、レベルセット法では、曲線の時間発展の過程で不連続点 (shock) が生じるのをなるべく避けるため、曲線の各点に対して、曲率に依存した成長速度 F を与えることが多い。通常のレベルセット法と同様、球面レベルセット法においても、曲率をレベルセット関数によって定義することができる。本稿では、式(11)を導出したときの議論と同様、球面上の曲線 C の点 P における法ベクトル \mathbf{n}_{Σ} 方向の曲率 κ を

$$\begin{aligned} \kappa &= \nabla_{\theta\psi} \cdot \frac{\nabla_{\theta\psi} \phi}{|\nabla_{\theta\psi} \phi|} \\ &= \frac{\phi_{\theta\theta} \phi_{\psi}^2 - 2\phi_{\theta} \phi_{\psi} \phi_{\theta\psi} + \phi_{\theta} \phi_{\psi}^2 \cot \theta + \phi_{\psi\psi} \phi_{\theta}^2}{(\phi_{\theta}^2 + \frac{\phi_{\psi}^2}{\sin^2 \theta})^{3/2} \sin^2 \theta} \end{aligned} \quad (14)$$

のように定義する。ここで、 ϕ_{θ} は θ 、 ϕ_{ψ} は ψ についての偏微分を表す。

ところで、球面上曲線の点における成長速度 F を式(14)の曲率 κ を用いて決定するとき、曲線以外のところでは F の値が求まらない。この場合、レベルセット法では、最も近い曲線上の点における F を用いるアプローチがしばしばとられる。このようにして設定されるスカラー場は拡張成長速度場 (extension velocity field) と呼ばれる。通常のレベルセット法では、このときの距離の計量としてユークリッド距離が用いられるが、球面レベルセット法では測地的距離を用いるのが自然である。すなわち、単位球面上の2点 \mathbf{x}, \mathbf{y} ($|\mathbf{x}| = |\mathbf{y}| = 1$) の測地的距離 $dist(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ を

$$dist(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \arccos(\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}) \quad (15)$$

のように定義する。これに基づき、レベルセット法の標準的な高速化手法である narrow band approach[3] を球面レベルセット法にも適用することが可能となる。

3. 陰陽格子上的レベルセット法

3.1 離散化

極座標格子 (緯度経度格子) では極付近に格子点が集中し、CFL条件を満たすために時間分割幅を極端に小さくしなければならないという問題が生じる。これに対し、球面測地格子 (spherical geodesic grid) では格子点が均一に分布するという利点がある。球面測地格子は正20面体の4分割を再帰的に繰り返すことで容易に構築することができる。本稿では、この球面測地格子に基づき、球面レベルセット方程式(13)を次式のように離散化する。

$$\frac{\phi_i^{n+1} - \phi_i^n}{\Delta t} + \max(F_i, 0) \nabla^+ + \min(F_i, 0) \nabla^- = 0 \quad (16)$$

ここで、添え字 $n, n+1$ はそれぞれ時刻 $t, t + \Delta t$ での値、 ϕ_i^n は球面測地格子の i 番目の格子点における (時刻

t の) レベルセット関数の値, F_i は i 番目の格子点における成長速度で, 曲率に依存する場合は式 (14) が用いられる。また, Δt は時間の分割幅, 左辺の第二, 第三項は, upwind scheme[14] に基づくレベルセット関数の空間1階微係数に相当し, ∇^+ と ∇^- はそれぞれ次式のように表される。

$$\nabla^+ = \left[\max(D_i^{-\theta} \phi, 0)^2 + \min(D_i^{+\theta} \phi, 0)^2 + \max\left(\frac{D_i^{-\psi} \phi}{\sin \theta_i}, 0\right)^2 + \min\left(\frac{D_i^{+\psi} \phi}{\sin \theta_i}, 0\right)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$\nabla^- = \left[\max(D_i^{+\theta} \phi, 0)^2 + \min(D_i^{-\theta} \phi, 0)^2 + \max\left(\frac{D_i^{+\psi} \phi}{\sin \theta_i}, 0\right)^2 + \min\left(\frac{D_i^{-\psi} \phi}{\sin \theta_i}, 0\right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

ただし, $D_i^{-\theta} \phi$, $D_i^{+\theta} \phi$, $D_i^{-\psi} \phi$, $D_i^{+\psi} \phi$ はそれぞれ θ 座標に関する後進差分と前進差分, ψ 座標に関する後進差分と前進差分である。ただし, 時間変数の表記は省略している。また, (θ_i, ψ_i) は i 番目の格子点の極座標, h は極座標の分割幅である。 $\phi(\theta_i - h, \psi_i)$ の値を求めるため, 極座標 $(\theta_i - h, \psi_i)$ の単位方向ベクトルと球面測地格子の凸多面体 (geodesic dome) の交点を求めておき, その交点を囲む三角形要素の各格子点での ϕ の値を用いて線形補間する。 $\phi(\theta_i + h, \psi_i)$, $\phi(\theta_i, \psi_i - h)$, $\phi(\theta_i, \psi_i + h)$ についても同様である。

ここで, 式 (13) や式 (17), (18) には $\sin \theta$ (θ は天頂角) の逆数が含まれており, このままでは $\theta = 0, \pi$ となる極において計算を実行することができない。球面レベルセット方程式も含めて一般に極座標系の支配方程式にはこのような極問題が存在する。本研究では, この問題を回避するため, 次節で述べる格子系を導入する。

3.2 陰陽格子

極問題を解決する手段として, 最近, 地球科学の分野で, 陰陽格子 [5] と呼ばれる重合格子が注目されている。重合格子とは, 複数の要素格子を用いて計算領域全体を覆う格子系のことである。Kageyama ら [5] は, 極座標格子の低緯度領域 ($\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{4}$ かつ $\frac{\pi}{4} \leq \psi \leq \frac{7\pi}{4}$) からなる陰格子 (N-grid) と N-grid を回転させた陽格子 (E-grid) の二つの要素格子からなる重合格子を提案し, これを陰陽格子 (Yin-Yang grid) と呼んだ (図 2)。陰陽格子を用いると, 1) 極座標格子において格子点が極付近で集中する問題, 2) 極座標の支配方程式において数値的な特異点が極に存在する問題—を同時に解決することができる。

本研究では, この陰陽格子の要素格子を極座標格子から球面測地格子に修正し, 要素格子間の重複領域を除去する。まず, 前節で構成した球面測地格子の格子点のうち, 陰格子の領域 ($\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{4}$ かつ $\frac{\pi}{4} \leq \psi \leq \frac{7\pi}{4}$) に含まれる格子点の集合を陰格子, 陽格子の領域に含まれる格子点の集合を陽格子とする (図 3)。次に, 要素格子間の重複を除去するため, これらの両方に属する格子点に対して, より低緯度となる要素格子にのみ属するように修正する。すなわち, $|\cos \theta| < |\sin \theta \sin \psi|$ を満たす格子点は陰格子, それ以外は陽格子に属するようにする (図 3)。

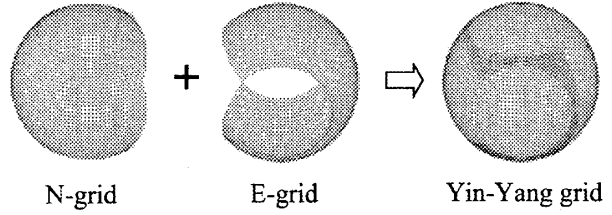


図 2: 陰陽格子

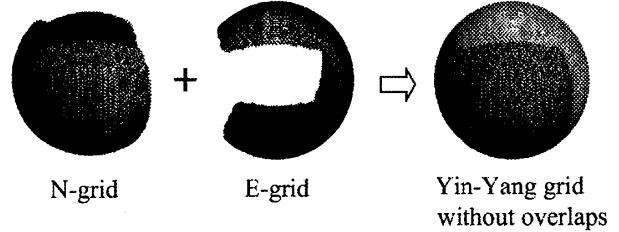


図 3: 球面測地格子からなる陰陽格子

4. 球面画像からの領域抽出

球面レベルセット法を用いて全方位画像上の曲線を追跡することで, 全方位複数輪郭を抽出することができる。Malladi ら [10] が平面画像の複数輪郭を抽出する際に導入した式に基づき, 球面レベルセット法における成長速度を

$$F(\kappa) = k_I (F_0 - F_1 \kappa) \quad (19)$$

のように定める。 F_0, F_1 は正の定数であり, k_I は

$$k_I = \frac{1}{1 + |\nabla G_\sigma * I(\theta, \psi)|} \quad (20)$$

のように表される。ただし, ∇G_σ は LoG (Laplacian of Gaussian) フィルタ, $I(\theta, \psi)$ は方向 (θ, ψ) における球面画像の輝度値である。これにより, 球面上の曲線は滑らかな形状を保ちながら時間発展し, 曲線上のすべての点が輝度勾配の大きな位置に到達した時点で運動を停止する。このように球面上の曲線が統合・分裂といったトポロジー変化を生じた後も, 球面上曲線の時間大域的な追跡が可能となる。

5. 実験結果

実画像を用いた実験を行い, 本手法の有効性を確認した。本実験では, NASA の衛星画像を球面測地格子に投影した球面画像を入力として用いた。球面レベルセット法により球面上の曲線が統合や分裂を繰り返され, 領域 (陸地) が抽出されていく様子を図 4 に示す。図 4 の一番上が初期曲線, 一番下が最終結果である。どの方向の領域においても良好に領域抽出がなされていることがわかる。

6. むすび

これまで, 平面画像における複数輪郭抽出手法がいくつか開発されてきた。しかし, 全方位画像に対しては有

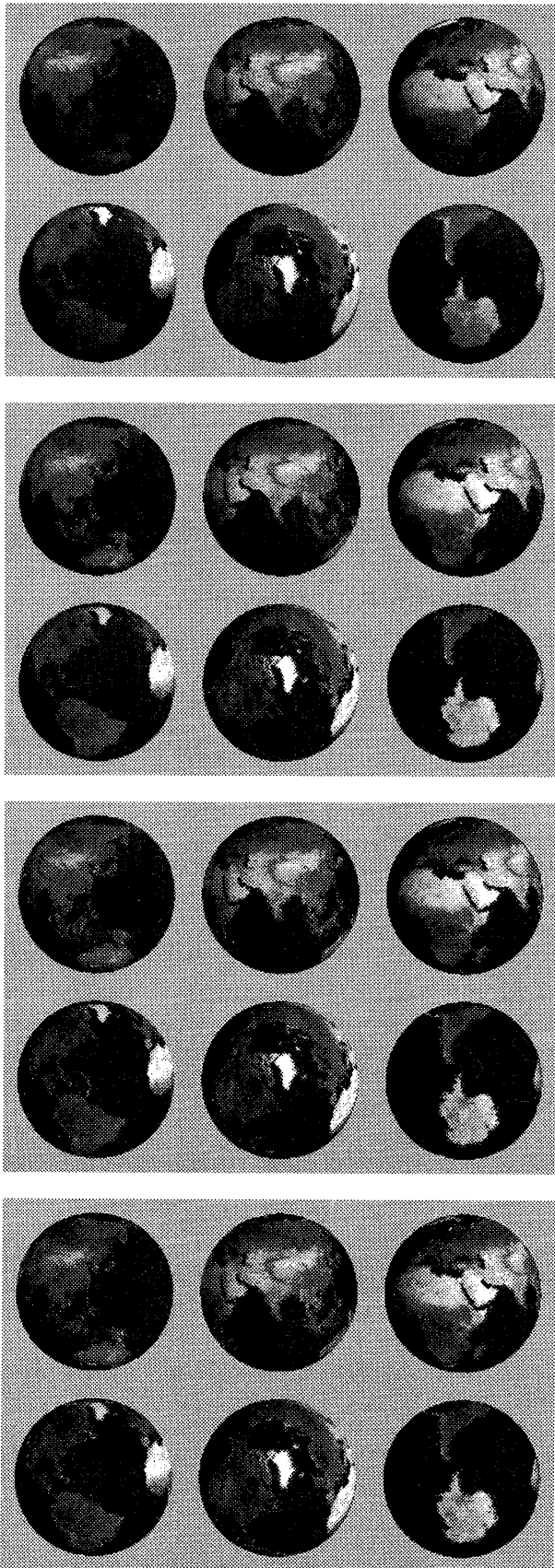


図4: 複数輪郭抽出過程

効な全方位複数輪郭抽出手法がほとんど存在しなかった。本稿では、レベルセット法を球面上で定義される空間曲線の制御・追跡に拡張することにより全方位複数輪郭抽出をおこなった。特に、球面上曲線の曲率の補助関数表現に基づく曲線の偏微分方程式を解くことにより、滑らかさを維持しつつ成長する球面上曲線の追跡が可能になった。今後は、この輪郭抽出手法を高速化し、全方位サーベイランスに応用していく予定である。

参考文献

- [1] 荒木 昭一, 横矢 直和, 岩佐英彦, 竹村 治雄: 複数物体の抽出を目的とした交差判定により分裂する動的輪郭モデル, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79-D-II, No.10, pp.1704-1711 (1996).
- [2] Bertalmio, M., Memoli, F., Cheng, L.T., Sapiro, G. and Osher, S.: Variational Problems and Partial Differential Equations on Implicit Surfaces, UCLA CAM Tech Report 02-17 (2002).
- [3] Chop, D.: Computing Minimal Surfaces via Level Set Curvature Flow, *Journal of Computational Physics*, Vol.106, pp.77-91 (1993).
- [4] 樋口正明, 高野孝英, 苗村 健, 原島 博: 球面直交展開を用いたパノラマ全周画像の記述, 3次元画像コンファレンス'99, pp.31-36 (1999).
- [5] Kageyama, A. and Sato, T.: The yin-yang grid: An overset grid in spherical geometry, *Geophys. Geophys. Geosyst.*, (2004). Q09005, doi:10.1029/2004GC000734;physics/0403123.
- [6] Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D.: Snakes: Active Contour Models, *International Journal of Computer Vision*, Vol.1, No.4, pp.321-331 (1988).
- [7] 木室義彦, 長田 正: 球面画像上でのオプティカルフロー計算, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79-D-II, No.11, pp.1862-1870 (1996).
- [8] 倉爪 亮, 由井 俊太郎, 辻 徳生, 岩下 友美, 原 健二, 長谷川 勉: Fast Level Set Method の提案とビデオ画像の移動物体のリアルタイム追跡, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.8, pp.2244-2254 (2003).
- [9] McInerney, T. and Terzopoulos, D.: T-Snakes: Topology Adaptive Snakes, *Medical Image Analysis*, Vol.4, No.2, pp.73-91 (2000).
- [10] Malladi, R., Sethian, J. and Vemuri, B.C.: Shape Modeling with Front Propagation: A Level Set Approach, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, No.2, pp.158-175 (1995).
- [11] 中野誠士, 李 仕剛, 千葉則茂: 球面画像の獲得のための魚眼カメラの校正, 情報処理学会研究報告 CVIM 141-12, pp.87-94 (2003).
- [12] Osher, S. and Sethian, J.A.: Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed: Algorithm Based on Hamilton-Jacobi Formulation, *Journal of Computational Physics*, Vol.79, pp.12-49 (1988).
- [13] Paragios, N. and Deriche, R.: Geodesic Active Contours and Level Sets for Detection and Tracking of Moving Objects, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.3, pp.266-280 (2000).
- [14] Sethian, J.: *Level Set Methods and Fast Marching Methods*, Cambridge University Press, UK (1999).
- [15] Swaminathan, R. and Nayar, S.K.: Nonmetric Calibration of Wide-Angle Lenses and Polycameras, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.10, pp.1172-1178 (2000).
- [16] 上田恭敬, 田中弘美: 領域のトポロジカルな構造抽出のための符号付き動的輪郭モデル, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1398-1405 (1997).
- [17] Wang, X., He, L. and Wee, W.: Deformable Contour Method: A Constrained Optimization Approach, *International Journal of Computer Vision*, Vol.59, No.1, pp.87-108 (2004).