

# 微生物トラッキングのための高速ビジョン用動的輪郭モデル

An active contour model for tracking a microorganism on a high-speed vision system

竹本 征人 (東大) 学 尾川 順子 (東大) 正 奥 寛雅 (科技機構さきがけ)  
正 石川 正俊 (東大) 正 橋本 浩一 (東大 / 科技機構さきがけ)

Masato TAKEMOTO(Univ. of Tokyo), Naoko OGAWA(Univ. of Tokyo), Hiromasa OKU(PRESTO JST),  
Masatoshi ISHIKAWA(Univ. of Tokyo), Koichi HASHIMOTO(Univ. of Tokyo / PRESTO JST)  
University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan  
PRESTO JST, 4-1-8 Honcho Kawaguchi, Saitama, Japan

Key Words: *active contour model, level set method, high-speed vision, microscope, amount of light*

We propose a novel active contour model for tracking a microorganism on a high-speed vision system. Our goal is to utilize microorganisms as micromachines with high-speed vision system. For extracting the target edge from the image captured by the high-speed vision, the active contour model can be effective. There has been, however, a problem that conventional methods extract all of the object in the view, thus it is not suitable for continuous tracking of specific target. In this paper, we adopt a novel method that tends to keep the intensity sum inside the target constant for tracking only the target. Experimental results show the usability of the proposed method.

## 1. はじめに

近年、微生物を計測、制御してマイクロマシンとして利用する研究が行われている<sup>1)</sup>。微生物の運動制御のためには微生物の動特性を調べる必要があるため、微生物をトラッキングし観察する必要がある。顕微鏡下では微生物の運動速度が相対的に速く、またマイクロマシンとしての精密な制御には高い時間分解能が必要なことから、視覚システムには高速性が要求される。そのためには高速ビジョン<sup>2)</sup>に適した微生物用の画像処理が必要となる。

微生物の画像処理で求められる要求にあった画像処理アルゴリズムとして動的輪郭モデルがある<sup>3)</sup>。これを高速ビジョンに適用し、高速処理を行う手法が提案されている<sup>4)</sup>。しかし、この手法では画面内にある微生物全てを抽出してしまうので、一匹の微生物を継続して抽出する用途には向いていない。そこで本論文では一匹の微生物を継続して輪郭抽出を行う新しい動的輪郭モデルを提案する。

## 2. 先行研究

2-1 動的輪郭モデル 微生物の輪郭抽出を行うためには、水中に漂う細かなゴミの輪郭は抽出しないこと、エッジが不明瞭であっても輪郭抽出が行えること、などが要求される。このような輪郭抽出アルゴリズムとして、動的輪郭モデルというアルゴリズムがある<sup>3)</sup>。動的輪郭モデルとは、画像上で閉曲線を動的に変化させて対象物の輪郭に一致させることで輪郭抽出を行う、という手法である。そして、閉曲線の形状によって定義される内部エネルギーと画像情報によって定義される外部エネルギーとの和  $E$  を最小化する問題として定式化されている。

動的輪郭モデルの一種に Level Set Method があり、これはある関数  $\phi(x, y)$  (Level Set 関数, 図 2.1 参照) を定義し、この関数の値が 0 となる平面で切断し、その断面で輪郭線を表現する、というものである。

また、この Level Set Method は従来、外部エネルギーに画像の勾配情報を用いていたが、画像の勾配情報を用いないモデル

Level Set関数

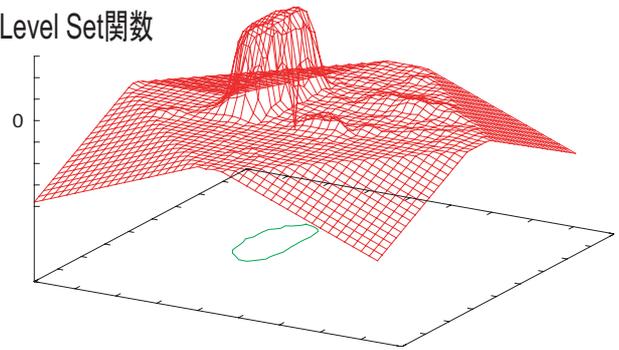


Fig. 2.1 Level Set 関数の例

も提案されている<sup>5)</sup>。

$$\begin{aligned}
 E(\phi) = & \mu \int_{\Omega} |\nabla H(\phi)|^2 dx dy \\
 & + \lambda_1 \int_{\Omega} |I - c_1|^2 H(\phi) dx dy \\
 & + \lambda_2 \int_{\Omega} |I - c_2|^2 (1 - H(\phi)) dx dy \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで  $I$  は画素値,  $\Omega$  は画像領域,  $c_1, c_2$  はそれぞれ輪郭内部, 外部の画素値平均,  $H(\phi)$  は Heaviside 関数である。右辺第 2 項, 第 3 項がこのモデルで提案されている外部エネルギーである。この外部エネルギーを用いることにより、それまでの画像の勾配情報を用いるモデルと比べて、対象の輪郭があいまいな画像に対しても輪郭抽出が行えるという利点をもつ。

一方、内部エネルギーには従来、曲線の曲率を使用していたが、高速ビジョンに適した内部エネルギーとして、Level Set 関数を膜と見たた膜の弾性エネルギー

$$\begin{aligned}
 E_{\text{int}} = & \int_{\Omega} |\nabla \phi|^2 dx dy \\
 = & \int_{\Omega} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 dx dy \quad (2)
 \end{aligned}$$

が提案されている<sup>4)</sup>。この内部エネルギーを用いると、SIMD型アーキテクチャ(高速ビジョン)<sup>2)</sup>で処理を行う場合は曲率を使用するよりも処理が少なくて済む、という利点がある。

2-2 問題点と本研究の目的 上記の Level Set Method では、画面に複数の物体が存在する場合はその全ての輪郭を抽出する。つまり、複数の対象の中から1つだけを抽出することは出来ない。そのため、このままでは1匹の微生物をトラッキングする用途には使えない。

よって、本研究では、同一個体を継続して抽出する動的輪郭モデルを提案する。

### 3. 同一の微生物を抽出し続ける方法

輪郭を1つの個体に絞るために、本研究では“1つの微生物から観察される光量が一定である”という性質を用いる。以下、このことについて説明する。

3-1 顕微鏡に入射する光量 顕微鏡の NA (Numerical Aperture) は非常に大きいので、顕微鏡の観察する範囲内では点光源を観察する場合に、点光源の場所が移動しても観察される光量はほとんど変わらない。

そのため、微生物が点光源によって構成されている発光体であると仮定すれば、観察される光量の総和は、微生物の位置や姿勢によらずほぼ一定となる。

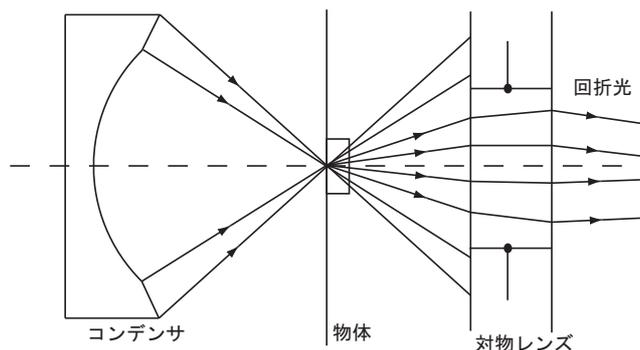


Fig. 3.1 暗視野照明.

3-2 暗視野照明下で観察される光量 本研究では、微生物を発光させる代わりに、暗視野照明を使用する。暗視野照明とは、図 3.1 のように特別なコンデンサを使い、標本を中空の円錐形をした光で照明する方法である。この照明光の NA は非常に大きく、標本によって散乱された光はほぼ 100% が対物レンズに入射し、それ以外の光はほとんど入射しないといつてよい。その結果、標本によって散乱された光が暗い背景に浮かび上がる。

ここで、微生物上の各点で散乱される光は照明の光のごく一部であるので、微生物の各点には一様な照明が当たっていると仮定する。また、微生物上の各点はほとんど一様な散乱を起こすものと仮定する。このような仮定のもとでは、微生物は発光体といえる。

この仮定の妥当性を検証するため、以下の予備実験を行った。対象の水平方向の位置が変化しても光量の総和が一定とみなせることはほぼ自明なので、深さ方向に動いた時にどうなるかを調べた。顕微鏡下の同一の対象(トルコキキョウの花

粉、大きさ約  $10 \mu\text{m}$ ) に対し、対物レンズを上下に動かすことで焦点面を変化させ、対象が深さ方向に移動したのと同じ状況を作った。いくつかの深さに対して高速ビジョン I-CPV (詳細は後述:  $128 \times 128$  画素, モノクロ 256 階調) を用いて対象を撮像し、画像の全画素値の合計を求めて、これを光量の総和とみなした。

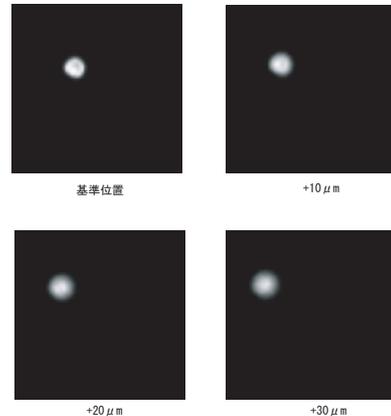


Fig. 3.2 深さを変化させた場合の画像

Table 1 各深さで観察される光量

基準位置からの距離 $v [\mu\text{m}]$	光量 $(S(v))$	$ S(v) - S(0) $
0	40655	0
50	42931	2276
100	44127	3472
150	46308	5652

焦点面を変えた時の画像を Fig.3.2 に、またそれぞれの場合の全画素値の合計を Table 1 に示す。ここで、画像は  $128 \times 128$  画素であるので、全画素値の合計に対する量子化誤差は、たかだか 16,384 である(これは全画素値合計の最大値 4,194,304 の 0.4% である)。Table 1 において、画素値のばらつきはこの範囲内に収まっている。よって、対象の位置によって光量の総和がほとんど変化しないという仮定は妥当だと言える。

以上のように、同一個体が発する光量は、その位置姿勢にかかわらず常に一定であるとみなすことができる。よって、動的輪郭モデルに輪郭線内部の光量を一定に保つ項を加えると、抽出している個体の光量が常に保つべき光量の目標値となる。もし別の個体も抽出すると輪郭線内部の光量が增大するので、光量を一定に保つ項の働きにより、その別の個体は抽出されない。つまり、一個体のみを継続して抽出できるようになる。この実現方法について次節で説明する。

3-3 同一の微生物を継続して抽出する動的輪郭モデル 以上のような、同一の微生物から観察される光量が一定であるという性質を利用し、同一の微生物を継続して抽出する動的輪郭モデルを提案する。これは輪郭線内部の光量を一定に保つように輪郭線を決めることで実現する。

本稿では，以下のようなエネルギーを提案する．

$$\begin{aligned}
 E = & \frac{\alpha}{2} \int_{\Omega} |\nabla\phi|^2 dx dy \\
 & + \beta \int_{\Omega} \{|I - c_1|H(\phi) + |I - c_2|(1 - H(\phi))\} dx dy \\
 & + \gamma \underbrace{\left| \int_{\Omega} IH(\phi) dx dy - S_0 \right|}_{=A \text{ とおく}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

右辺第1項と第2項はこれまでに提案されているエネルギー<sup>4,5)</sup>であり，第3項が本研究で提案するエネルギーである ( $\alpha, \beta, \gamma$  は正の定数， $\phi$ : Level Set 関数， $I$ : 画素値， $c_1$ : 輪郭内側の画素値平均， $c_2$ : 輪郭外側の画素値平均， $H(\phi)$ : Heaviside 関数， $S_0$ : 光量の目標値， $\Omega$ : 視界)．なお， $IH(\phi)$  は輪郭線内部にある各画素の光量を表すので，この項は輪郭線内部の光量総和と閾値  $S_0$  との差を表していることになる． $|A|$  の増大と，このエネルギー ( $\gamma|A|$ ) の増大は同値であるので，エネルギー全体を減少させて輪郭線を収束させる過程で  $|A|$  も 0 に近付いていく．これによって，輪郭線内部の光量が一定値  $S_0$  に保たれるようになる．この式を時間  $t$  で偏微分すると

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial\phi}{\partial t} = & \alpha \nabla^2 - \{\beta(|I - c_1| - |I - c_2|) \\
 & + \text{sign}(A)I\} \delta(\phi)
 \end{aligned} \tag{4}$$

となり，これを離散化すると

$$\begin{aligned}
 \frac{\phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n}{\Delta t} = & \alpha \frac{\phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j} + \phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1} - 4\phi_{i,j}}{8} \\
 & + \beta \frac{\{-|I_{i,j} - c_1| + |I_{i,j} - c_2|\}}{|\phi_{i,j} + 1|} \\
 & - \gamma \frac{\text{sign}(A)I}{|\phi_{i,j} + 1|}
 \end{aligned} \tag{5}$$

となる (格子間隔を  $h$ ，時間間隔を  $\Delta t$ ，格子点  $(x_i, y_j) = (ih, jh)$  における関数  $\phi(t, x, y)$  の近似を  $\phi_{i,j}^n = \phi(n\Delta t, x_i, y_j)$  とした)．これを用いて  $\phi$  を更新していくことにより，エネルギーを最小化する．

#### 4. シミュレーション

高速ビジョンに実装する前に，提案する手法の動作を確かめる為に PC 上でシミュレーションを行った．

ゾウリムシを高速カメラで撮影した動画画を入力とし，1枚の画像に対して20回の更新処理を行った．なお，高速カメラは「Vision Research 社製高速カメラ Phantom V4.0」を使用し，顕微鏡は「OLYMPUS 社製ステージ固定式正立顕微鏡 BX50WI」を用いた．その結果を Fig.4.1, 4.2 に示す．提案手法では1匹のみ抽出されていることがわかる．また，その際の Level Set 関数の様子を Fig.4.3, 4.4 に示す．従来手法では2匹目の部分でも Level Set 関数が増大しているが，提案手法では抑制されている様子が分かる．

#### 5. 実験

提案するアルゴリズムを，高速ビジョンシステムである I-CPV<sup>6)</sup> に実装し，その動作を確かめた．

I-CPV は高速ビジョンシステムとして開発されている CPV(Column Parallel Vision)<sup>7)</sup> の改良版である．これらは，128

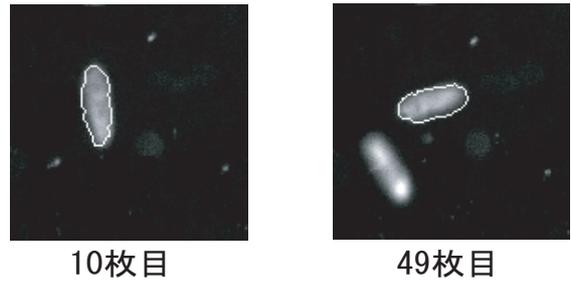


Fig. 4.1 提案手法によるゾウリムシの抽出結果

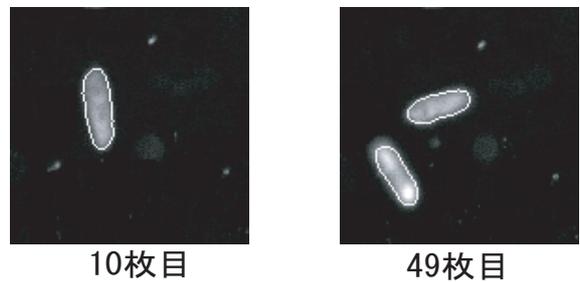


Fig. 4.2 従来手法によるゾウリムシの抽出結果

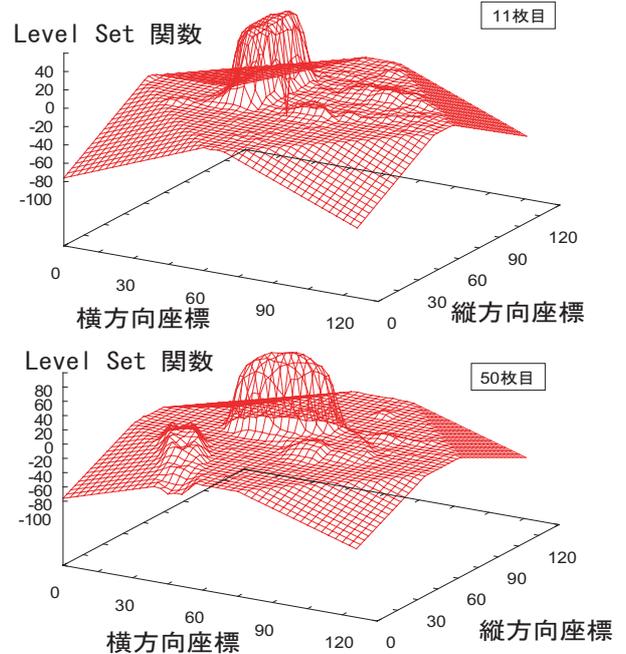


Fig. 4.3 提案手法での Level Set 関数

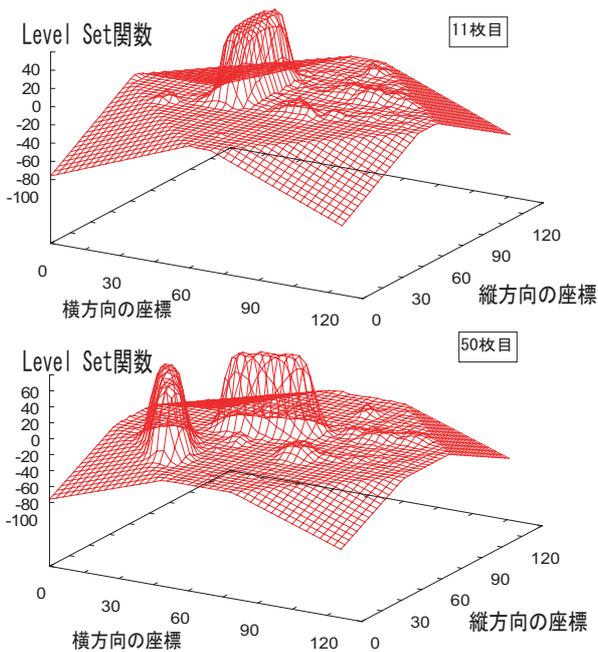


Fig. 4.4 従来手法での Level Set 関数

× 128 の PD (フォトディテクタ) アレイと 128 × 128 の PE (プロセッシングエレメント) アレイとを、128 列の列並列 AD 変換器アレイでつなぎ、画素毎に完全並列処理を行うことを実現している。さらに I-CPV はイメージンテンシファイアを使用しており、微弱光計測に対応している。

今回の実験では、水平移動するゾウリムシに対し、画像を 1 枚取得し輪郭の更新を 10 回行うという動作を 100ms 周期でオンラインで行った。ただし、動作周期が 100ms であるのは、抽出結果の確認用に画像を外部に転送しているためであり、トラッキングの際には対象の重心位置のみ転送すればよいので 1ms 周期で動作が可能である。図 5.1 にその結果を示す。左が従来手法であり、右が提案手法である。提案手法では 1 匹のみ抽出されていることがわかる。

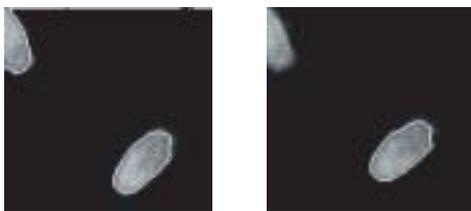


Fig. 5.1 ゾウリムシの抽出結果 (左:従来手法・右:提案手法)

## 6. まとめ

本研究では、同一個体のみを継続して抽出する動的輪郭モデルを提案した。そして、シミュレーション及び実験の結果、提案手法が同一個体のみを継続して抽出できることを確認した。

## 参考文献

1) Naoko Ogawa, Hiromasa Oku, Koichi Hashimoto and Masatoshi Ishikawa, "Motile Cell Galvanotaxis Control us-

ing High-Speed Tracking System," Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), Apr. 2004.

- 2) M. Ishikawa, K. Ogawa, T. Komuro, and I. Ishii, "A CMOS vision chip with SIMD processing element array for 1ms image processing," in *Dig. Tech. Papers of 1999 IEEE Int. Solid-State Circuit Conf. (ISSCC'99)*, pp. 206–207, 1999.
- 3) M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active Contour models," *Int. J. Computer Vision*, Vol. 1, pp. 321–331, 1988.
- 4) 新開 誠, "高速ビジョンのための動的輪郭モデルの研究," 東京大学情報理工学系研究科システム情報学専攻修士論文, 2003.
- 5) T. Chan and L. Vese, "Active Contours Without Edges," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 10, No. 2, pp. 266–277, Feb. 2001.
- 6) 豊田晴義, 向坂直久, 中村和浩, 宅見宗則, 水野誠一郎, 石川正俊, "イメージンテンシファイア機能付 1ms ビジョンシステム; I-CPV," 高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム 2001 講演論文集, pp.89–92, 2001.
- 7) 中坊 嘉宏, 石川 正俊, 豊田 晴義, 水野 誠一郎, "ビジュアルフィードバックのための 1ms 列並列ビジョン (CPV) システム," 第 5 回ロボティクスシンポジウム論文集, pp.375–380, 2000.