

# アクティブバルーンモデルによる 3次元物体の多重解像度表現と認識

木村 正孝      松尾 啓志      岩田 彰

名古屋工業大学電気情報工学科  
名古屋市昭和区御器所町

あらまし

3次元物体の形状の多重解像度表現を行い、物体の識別を行なう手法として、エネルギー制御型アクティブバルーンモデルを提案する。提案手法はアクティブバルーンモデルに幾つかのパラメータを導入し、解像度の異なる表現を可能とする。また、アクティブバルーンモデルの収縮結果を1つの解像度表現と捉え、その収縮結果を元にパラメータを修正して再収縮し、より高解像度の表現を得る。これにより多重解像度を表す木構造をトップダウン的に構成する事ができる。さらに本手法の有効性を計算機シミュレーションにより明らかにする。

キーワード: アクティブバルーンモデル, 解像度木, 多重解像度, 3次元物体認識

## 3-D Object Recognition by Multi Scale Active Balloon

Masataka Kimura, Hiroshi Matsuo and Akira Iwata

Department of Electrical and Computer Engineer, Nagoya Institute of Technology  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466

### ABSTRACT

We propose a new method that recognizes 3-D objects using multi scale descriptions. The proposed method is based on the Active Balloon model, which was proposed as an extension model of Snakes. The important extensions of this proposed method are that internal and external energies and a number of surfaces which make up the model are controlled at each shrinking steps, and each converged shape is regarded as one multi-scale shape.

Some experimental three dimensional recognition results of the proposed method are shown.

**Keywords:** Active Balloon model, Multi-scale tree, Scale space, 3D object recognition

## 1 はじめに

3次元物体の認識は応用範囲が広く、様々な方式が提案され研究されてきた。しかし、計算機に入力される情報は、離散的で、ノイズを少なからず含んでいて、かつ不完全なものであることが多い。そのため、3次元物体形状の再構成は不良設定問題になることが多く、このようなノイズを含んだ情報に対しては幾何学的手法での再構成を行うことができないことが多い。

そこで正則化理論を用いて不良設定問題を解こうとする試みが行われてきた。2次元画像の輪郭抽出に関する試みとして、Kassら[1]は標準正則化モデルを用い、エネルギー最小化アプローチによるノンパラメトリックな輪郭抽出モデル(Snakes)を提案し、2次元の濃淡画像から物体の輪郭の抽出を行った。その後WilliamsとShah[2]により、Snakesにグリーディングアルゴリズムを用いた場合の解析が示された。また、積山ら[3]はSnakesを網状にしたモデルであるActive Netを提案した。さらに土屋ら[10]によって、グリーディングアルゴリズムによるSnakesを3次元シェル構造に拡張したアクティブバルーンモデル(Active balloon model)が提案された。

一方、人間は3次元物体の形状を捉える際に、1つの物体形状として捉えるのではなく、物体の概形からしだいに局所的な構造に至るまでの複数の解像度で捉えている[12]。そこで物体を複数の解像度で捉え、それを認識に利用とする試みも多く行われてきた。輪郭図形に対して多重解像度表現を得る手段として、入力形状にガウス関数を畳み込み、形状を段階的にぼかしていく方法が一般的に用いられる。この理由として、2次元輪郭を形成する曲線の変曲点は、スケールを上げていく(よりぼかしていく)に従い単調に減少するという特徴が挙げられる。この性質を用いて、上田ら[5][6]や守田ら[4]は2次元輪郭に多重解像度を用い、認識に適した構造を得た。

ガウス関数の畳み込みによる多重解像度の構成

を3次元形状に適用する研究も多く行われている。しかし3次元閉曲面をガウス関数でぼかす場合、2次元輪郭での変曲点のような、スケール変化に対する単調性を持った特徴が得られない。そのため、2次元輪郭では必要でなかったさまざまな工夫が必要となった。佐藤ら[7]は、スケールの変化にともなう3次関数曲面の形状の変化を解析し、その変化を3種類に分類した。また守田ら[8]は、スケール変化を、形状を連続的に変化させるプロセスとして捉え、その過程で現れる特徴の非単調性をあくまで例外として扱う方法を示した。

一方で、ガウスのスケールによらない多重解像度表現の獲得も研究されている。船橋ら[11]は、面素で表された3次元形状を、位置ベクトル・法線ベクトルの近い要素を統合していき、多重解像度の木構造をボトムアップで構成し認識に使用する手法を提案した。

本研究では、アクティブバルーンモデルに多重解像度表現を取り入れ、多重解像度を表現する木構造をトップダウン的に構成し、より認識に適した構造を得る手法を提案する。第2章で多重解像度表現とそれを木構造に表すことの利点を挙げ、第3章でアクティブバルーンモデル(以下ABM)を拡張し多重解像度表現を獲得する手法、エネルギー制御型アクティブバルーンモデル(Energy Controlled Active Balloon Model; 以下EC-ABM)を提案する。そして第4章で計算機シミュレーションを行い、本手法の有効性を明らかにする。

## 2 多重解像度表現と解像度木

形状を単一の解像度のモデルで表現すると、モデルの解像度が低い時には、モデルのデータ量は少なく済むが、形状の細かな特徴を表現できないためマッチングに用いるデータとしては不十分となる。逆に高い解像度のモデルでは、形状を詳細に表現できる反面、モデルがノイズに影響され易く、またマッチングの際のモデル間の対応付けが困難になるといった欠点も持つ。

そこで一つの形状に対して複数の解像度のモデルを作ることにより，単一解像度のモデルで表現した場合の欠点を補い合うことが考えられた．これが多重解像度表現である．多重解像度表現を行うと，マッチングを行う時にモデルの低解像度部分で形状間の概形の類似を検討でき，必要に応じて解像度を上げて細部の類似の検討を行うといった段階的なマッチングを行えるようになる．

このとき，モデルの低解像度表現の一部分と，その部分に相当する高解像度表現の一部分とが対応づけられていると，低解像度間でのマッチングを行った後，より詳細に調べたい部分形状に関してのみ，解像度を上げたモデルでの形状比較が行える．

このように，低解像度の一部分が高解像度の一部分と結び付けられている状態は，最低解像度を根，途中の解像度の一部分を節，最高解像度を葉とした木構造と捉えることができる．以後この木構造をした多重解像度表現を，解像度木と呼ぶ(図1)．

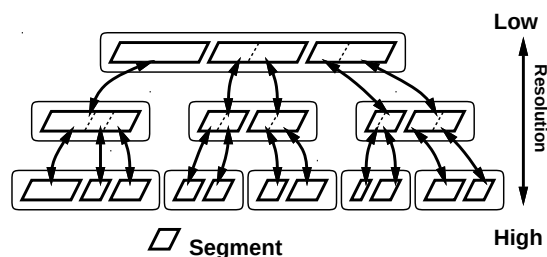


図 1: 解像度木

### 3 エネルギー制御アクティブバルーンモデル

解像度木を構成する最も単純な方法は，高解像度の表現を獲得した後，モデルの要素の統合をして低解像度の表現を得るという手順を繰り返す，ボトムアップ的な構成法である[11]．この構成法は，最高解像度の表現さえあれば容易に解像度木を構成できるが，例えば曲面を分割して作った面素を

統合する際に，微妙な分割の違いが統合の違いに現れ，低解像度での表現に違いが生じる(図2)．

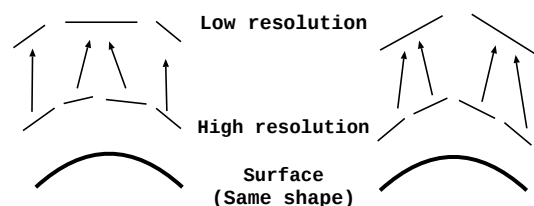


図 2: ボトムアップで解像度木を構成する時の問題

概形が似ている2物体は，その物体を多重解像度表現したときの低解像度の表現が似ているべきであるが，ボトムアップ的に解像度木を構成する方法では先ほど述べたような理由から低解像度の表現が近くなることが保証されない．しかし解像度木をなんらかの方法でトップダウン的に構成できれば，ボトムアップ的に解像度木を構成する際に生じる不具合を回避することが可能となる．

本手法は次の2つを特徴とするモデルである．

- (1) ABM の内部エネルギー，外部エネルギー，ABM を構成する三角形パッチの個数を解像度に応じて変化させることにより，低解像度としては物体の概略形状を，高解像度としては物体の詳細な構造を記述できる．
- (2) ABM の収縮結果を1つの解像度表現と捉え，さらにその収縮結果を ABM の初期形状として内部エネルギー，外部エネルギー，三角形パッチの個数を修正することにより，より解像度の高い形状を再構成するトップダウン的な多重解像度木生成法である．

#### 3.1 アクティブバルーンモデル

アクティブバルーンモデル[10]は，Kass ら[1]の提案した動的輪郭抽出モデル(Snakes)を3次元のシェル構造に拡張したモデルである．Snakes が2次元の濃淡画像から反復によるモデルのエネルギー極小化により物体のエッジ抽出を行うモデルであるのに対し，ABM は，離散的な3次元空

間中の情報（サンプル点）から反復によるモデルのエネルギー極小化により 3 次元物体の面の再構成を行う。

モデルの初期形状は正 20 面体の各面を 64 分割した 1,280 面体である。モデルは三角形パッチと呼ばれる三角形の要素から構成される。三角形パッチの頂点は節点と呼ばれる。これが Snakes のスネーク点に相当し、エネルギー極小化の対象となっている。

ABM の 1 節点のエネルギー関数を式 (1) で定義し、それぞれの節点をその連結点との局所的な状態から次の位置を決めるグリーディングアルゴリズムで移動させる。点  $x$  のエネルギー  $E_{point}(x)$  は、内部エネルギー  $E_{int}(x)$  と外部エネルギー  $E_{ext}(x)$  の和で表す。

$$E_{point}(x) = E_{int}(x) + E_{ext}(x) \quad (1)$$

この式に従い、各節点が独自にエネルギーの最小化を繰り返し、最終的にモデル全体のエネルギーを極小状態にする。

内部エネルギーは、モデル自体の内部で閉じたエネルギーで、各節点間の連結関係を滑らかにし、また節点同士が接近し過ぎない方向に働く。

外部エネルギーは、モデルがサンプル点（入力データ）から受けるエネルギーであり、節点が物体形状に近づく方向に働く。

### 3.2 解像度の導入

本手法では、アクティブバルーンモデルの多重解像度を表現するために、内部エネルギーの重み  $\alpha$ 、外部エネルギーのパラメータ  $\sigma$ 、三角形パッチ（節点）の数の 3 つのパラメータの導入を行う。このパラメータそれぞれの変化により、解像度の違いを表現することが可能となる。

内部エネルギーはモデルの形状が滑らかになる方向に働く。モデルの節点は式 (1) で示したように内部エネルギーと外部エネルギーの和の影響を受けるため、全エネルギーに対する内部エネルギー

の割合を制御すれば、モデルの形状の滑らかさを制御できる。そこで、式 (2) のように内部エネルギーの重みパラメータ  $\alpha$  を導入する。

$$E_{point}(x) = \alpha E_{int}(x) + E_{ext}(x) \quad (2)$$

パラメータ  $\alpha$  の変化はモデルの表現できる形状の自由度に影響を与える。 $\alpha$  が大きければモデルは物体形状に対しより滑らかな形となり、逆に小さければモデルは物体形状に近づきやすくなる。すなわち、 $\alpha$  が大きいときは、モデルが物体の細部の形状に影響されにくくなり、低解像度に対応し、また  $\alpha$  が小さいときには、モデルはより物体に近づきやすくなり高解像度に対応する。

モデルの節点  $x$  にかかる外部エネルギーは、式 (3) で定義されるポテンシャルエネルギーを用いて定義する。

$$E_{pot}(x) = \sum_{i \in \{\text{サンプル点}\}} -G_{\sigma}(i - x) \quad (3)$$

$G_{\sigma}$  は、標準偏差  $\sigma$  のガウス関数を表し、式 (4) で定義する。

$$G_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x \cdot x}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$E_{pot}$  で表されるポテンシャル空間は、物体形状をガウス関数の畳み込みによりぼかした形状によって形成される。モデルの節点はこの空間ポテンシャルに移動方向の影響を受ける。つまり、式 (4) の  $\sigma$  を変化させれば、モデルの節点の移動を制御できる。

そこで  $\sigma$  を外部エネルギーの解像度を規定するパラメータとする。パラメータ  $\sigma$  を大きくすると、空間ポテンシャルは物体形状を大きくぼかした状態となり、モデルの節点はぼかされた形状に近づいていく。逆に小さくすると空間ポテンシャルは物体形状に近くなり、モデルの節点は物体細部の形状にも沿いやすくなる。つまり  $\sigma$  の値が大きい時は低い解像度、小さい時は高い解像度に対応する。

本来の ABM では初期形状は正 20 面体の各面を 64 分割した 1,280 面体であった。しかし、モデル

の三角形パッチの数を変化させればモデルの表現できる形状に影響を与えられる．そこで本手法では，初期形状の面の数を制御可能なパラメータとし，解像度により変化させる方法をとる．本手法では，最低解像度の初期形状を正 20 面体とし，解像度を 1 つ上げるごとに面を 4 分割していく．これにより，解像度の低い状態ではモデル自身が表現できる形状の自由度が低く物体の細部にとらわれない概形を表現し，また解像度が上がるに従ってモデルはより物体に近い形状をとれるようになる．ただし，次節でも述べるが全ての面を無条件に分割する訳ではない．

### 3.3 解像度木の構成

本節では，各解像度間を結び付け，低解像度から高解像度へ向けてトップダウン的に解像度木を構成する手法を提案する．

ある解像度のモデルを得るには，その解像度でのモデルの初期形状，パラメータ  $\sigma$ ， $\alpha$  を設定し，ABM の収縮を行う．収縮が収まった時点でのモデルの形状をその解像度での表現と定義する．本来，このモデルの獲得は解像度ごとに独立しているが，モデルの初期形状と収縮形状を，それぞれ 1 つ低い解像度，1 つ高い解像度と関係付けられれば，そこから解像度木を構成する糸口が得られる．

そこで，本手法では，ある解像度の初期形状として，1 つ低い解像度の収縮形状の三角形パッチを 4 分割した形状を用いることを提案する．言い換えれば，ある解像度の収縮形状の三角形パッチを 4 分割した形状を，次の解像度の初期形状とする．

こうすることにより，2 つの解像度表現間で三角形パッチが分割・統合の関係を持つようになる．この関係を木構造として採用する．低解像度からのトップダウン的な解像度木の構成は，最低解像度から順に ABM の収縮，三角形パッチの分割を繰り返すにより可能となる（図 3）．

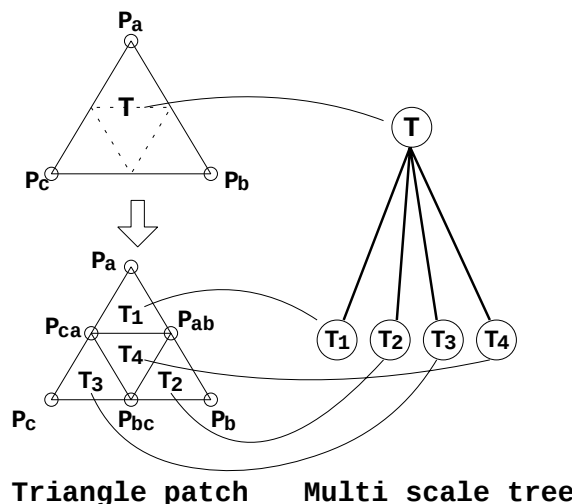


図 3: 三角形パッチの分割と解像度木の構造

しかし，単純に全ての三角形パッチを分割すると，物体形状の平面的な部分に相当する個所の三角形パッチの分割により生成された節点は，分割後外部エネルギーによって移動することが殆どなく，冗長なデータとなる．このような分割は，形状を表現する上で冗長となるだけでなく，モデル間のマッチングを取る際にも，対応付けの候補数を無駄に増やすことになる．そこで，このような無駄な分割を取り除く方法として，分割の際に条件テストを行うことを提案する．

以下に，提案する三角形パッチの分割の手法を示す．

1. 三角形パッチ  $T$  の頂点を  $P_a, P_b, P_c$  とする．
2. 点  $P_a, P_b$  の中点に新しく点  $P_{ab}$  を追加する．同様に点  $P_{bc}, P_{ca}$  も追加する．
3. 追加した 3 点の外部エネルギーの和  $e_1$  を求める．

$$e_1 = E_{ext}(P_{ab}) + E_{ext}(P_{bc}) + E_{ext}(P_{ca})$$

4. 点  $P_{ab}$  を外部エネルギーが小さくなる方向へ距離  $\epsilon$  だけ移動した点を  $P'_{ab}$  とする．但し  $\epsilon$  は次の解像度における反復時の移動度である．同様に点  $P'_{bc}, P'_{ca}$  も求める．

5. 求めた 3 点の外部エネルギーの和  $e_2$  を求める .

$$e_2 = E_{ext}(P'_{ab}) + E_{ext}(P'_{bc}) + E_{ext}(P'_{ca})$$

6.  $e_1 - e_2$  が閾値 以下なら , この三角形パッチの分割は行わず , 3 点  $P_{ab}, P_{bc}, P_{ca}$  の追加は取り止める .

そうでなければ三角形パッチは 3 点  $P_{ab}, P_{bc}, P_{ca}$  によって分割される .

7. 以上の操作を全ての三角形パッチについて行う .

この手法を導入することにより , 無駄な分割を抑えることが可能となる .

以下に , 本手法による多重解像度表現の解像度木を得るアルゴリズムを示す .

1. ( 初期解像度 ) モデルの初期形状を正二十面体とし , パラメータ  $\sigma$  ,  $\alpha$  の初期値をそれぞれ  $\sigma_0$  ,  $\alpha_0$  とする .
2. モデルの節点をエネルギー最小化により動かなくなるまで移動させる .
3. モデルの節点が移動しなくなったら , そのモデルの形状を現在の解像度での表現とする .
4. 現在の解像度が指定された最高解像度であるなら , ここで作業を終了する .
5. モデルの全ての三角形パッチに対して , 三角形パッチ分割の手順に従い分割を行う .
6. 以上の作業を行ったモデルの形状を次の解像度の初期形状とし , 新しいパラメータとして  $\sigma$  を  $\sigma - \Delta\sigma$  ,  $\alpha$  を  $\alpha/\Delta\alpha$  に変更し , 2. に戻る .

図 4 に , 立方体を入力として作成した EC-ABM の各解像度における形状を示す .

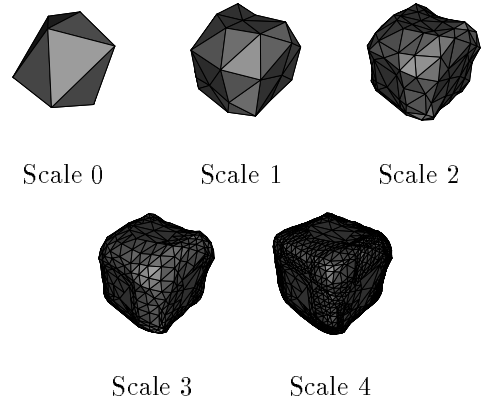


図 4: 立方体の多重解像度表現

## 4 認識実験

EC-ABM を用いた認識実験を計算機上で行った . 実験は実顔距離画像から得た三次元形状を対象に行った . マッチングは , EC-ABM の各解像度のモデルから , 三角形パッチの位置ベクトルと法線ベクトルを計算し , 船橋らが論文 [11] で提案した , マッチングを行う解像度を適応的に制御するマッチング手法 ( アダプティブスケール MEGI ) により相関値を計算することにより行った .

実験にはカナダ国立研究所から提供された実顔距離画像データベース中の正面を向いた 25 枚の顔画像を使用した [9] . この実験では , オリジナルの実顔距離画像から , 三次元形状を得て , それを入力として作成した EC-ABM を基本モデルとし , 実顔距離画像をもとに視点位置を変更した距離画像を計算し , そこから得た三次元形状を入力として作成した EC-ABM と , 基本モデルとのマッチングを行った . なお距離画像から入力三次元形状を得る際には , 距離画像中に含まれない背面の形状に楕円柱状の形状を仮定している . つまり回転角が例えば 10 度の場合 , 元形状が 10 度回転し , かつ 10 度分のデータが欠落することになる .

本実験では , 各パラメータを  $\sigma_0 = 10, \alpha_0 = 3.5, \Delta\sigma = 0.5, \Delta\alpha = 2$  とし , 解像度は 0 から 4 までの 5 段階とした . なお , このパラメータは経験

的に決定した。

図5に実験で用いた実顔距離画像の例を示す。実験では、視点の俯角を0度に固定し、方位角を0度から10度まで1度間隔で変化させた場合に各視点で得られた距離画像から三次元形状を得、EC-ABMを作成した。図6に図5の顔画像から得たEC-ABMの各解像度のモデルの様子を示す。比較対象として、同様の識別実験を船橋らの提案するボトムアップ的手法（以下従来手法）による認識実験を行った。



図 5: 実験に用いた実顔距離画像の例

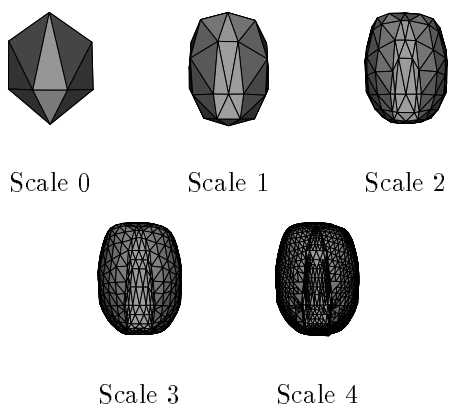


図 6: 顔画像の多重解像度表現

図7は、顔3を回転させて作成したモデルと、顔3の基本モデルとの間の相関値の関係と、顔3を除く全ての顔の基本モデルとの間で相関値の平均の様子を、従来手法、提案手法それぞれについて示したものである。顔3の基本モデルとの相関値

は、従来手法、提案手法のどちらも、方位角が大きくなるに従い、徐々に低くなっているのがわかる。これは、回転させた顔形状が、元形状に比べ少ない情報しか有しないことから自然である。

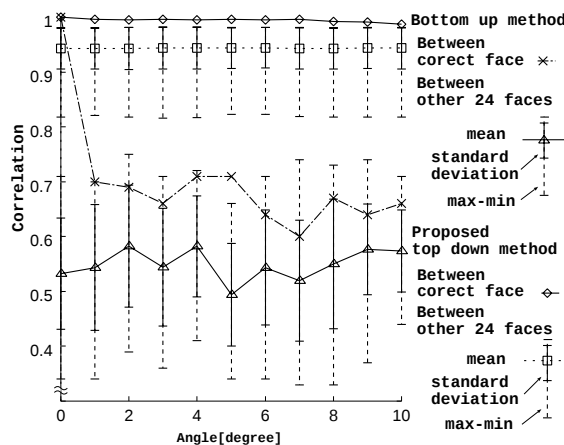


図 7: 方位角と相関値の関係

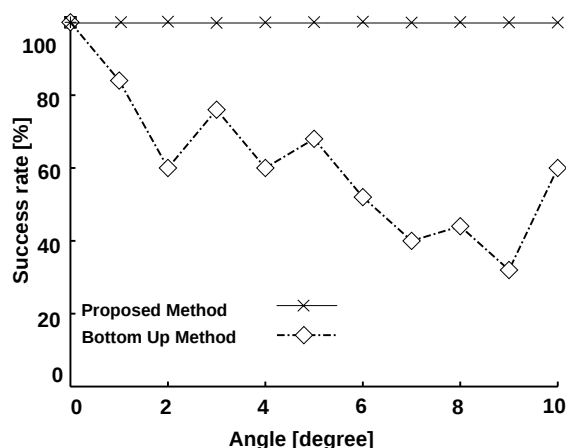


図 8: 方位角と認識成功率の関係

従来手法では、方位角が大きくなるに従って、顔3の基本モデルとの相関値が、他の顔の基本モデルとの相関値を下回っている。これに対し本手法では、0度から10度の範囲では顔3の基本モデルとの相関値が常に最大となっており、従来手法と比較して認識能力が向上していることが分かった。

また、他の全ての顔画像に対しても同様の実験を行った。図8は、方位角と認識成功率の関係を、

従来手法，提案手法それぞれについて示したものである．従来手法は方位角が大きくなるに従い認識成功率は低下しているが，本手法は0度から10度の範囲では認識に失敗していないことが分かる．これにより，本手法は従来手法と比べて有効であることを確認した．

## 5 まとめ

本論文ではアクティブバルーンモデルによる3次元物体の多重解像度表現法であるEC-ABMを提案した．アクティブバルーンモデルに多重解像度表現を導入することにより，より認識に適した物体の表現が可能となった．またこの多重解像度表現は木構造になっており，マッチングに使用する構造としても優れている．木構造の構成法はトップダウン的な手法を用いている．

計算機シミュレーションでは，人間の顔の距離画像について識別実験を行った．その結果，解像度木をボトムアップ的に構成する手法と比較して，良好な識別結果が得られ，本手法の方が高い識別能力を持つことが示された．

今後の課題としてノイズに対する認識能力の変化などを検討する．

## 参考文献

- [1] M.Kass,A.Witkin and D.Terzopoulos : Snakes:Active Contour Models Int. J. Comput. Vision, 1,4,pp.321-331(1988)
- [2] D.J.Williams and M.Shah:A Fast Algorithm for Active Contours In Proc. of Third Int. Conf. on Comput. Visoin,pp.592-595(1990)
- [3] 積山洋子，坂上勝彦，山本和彦：Active Net: 動的な網モデル情処学 CV 研報，63-2 (1989)
- [4] 守田了，川嶋稔夫，青木由直：輪郭線形状の階層的記述によるマッチング信学論 (D-II) Vol.J73-D-II No.5 pp.717-727, May 1990
- [5] 上田修功，鈴木智：多重スケールの凹凸構造を用いた変形図形のマッチングアルゴリズム信学論 (D-II) Vol.J73-D-II No.7 pp.992-1000, Jul. 1990
- [6] 上田修功，鈴木智：凹凸構造の一般化に基づく輪郭形状モデルの自動獲得信学論 (D-II) Vol.J74-D-II No.2 pp.220-229, Feb. 1991
- [7] 数井君彦，佐藤誠：尺度空間上の3次関数曲面の形態変化について信学技報 PRU92-161, pp.39-46, Mar. 1993
- [8] 守田了，川嶋稔夫，青木由直：三次元自由曲面に対する階層的記述の生成信学論 (D-II) Vol.J75-D-II No.8 pp.1353-1363, Aug. 1992
- [9] Rioux M. and Cournoyer L. : “the NRCC Three-dimensional Image Data Files”, National Research Council of Canada, Division of Electrical Engineering, Ottawa, Canada, K1A0R8(1988)
- [10] 土屋健一，松尾啓志，岩田彰：アクティブバルーンモデルと対称性仮設を用いた3次元再構成信学論 (D-II) J76-D-II No.9, pp.1967-1976, Sep. 1993
- [11] 船橋淳一郎，松尾啓志，岩田彰：適応型多重解像度木を用いた3次元物体の認識進学論 (D-II) J80-D-II No.5, pp.1113-1121, May 1997
- [12] Marr D.: Vision, W.H.Freeman, Sanfransisco (1982)

---

名古屋工業大学 電気情報工学科 岩田研究室

466 名古屋市 昭和区 御器所町

TEL 052-735-5446 FAX 052-735-5464