

三次元構造を考慮した アニメーション画像のフレーム間対応

塩原 守人 清水 誠也 後藤 敏行

株式会社 富士通研究所

三次元構造の推論に基づくセルアニメーション画像のフレーム間対応付け手法について述べる。最初に、面に分割された画像に対して隠蔽により生じる不連続性を利用して、視線方向での面の前後関係を推論する方法を示す。次に、その関係を用いて照合する面を限定することにより、物体の移動や変形に強い対応付けが可能な方法を示す。人物キャラクターを対象とした実験の結果、面の形状特徴のみで対応付ける手法と比較して、正しく対応できる確率が20%以上も向上し、本手法の有効性が確認できた。

A Method of Corresponding between Surfaces of Two Frames in Cell Animation Images using each Three Dimensional Structure

Morito SHIOHARA, Seiya SHIMIZU, and Toshiyuki GOTOH

Pattern Information Processing Laboratory

FUJITSU LABORATORIES LTD.

1015, Kamikodanaka Nakahara-Ku, Kawasaki, 211, Japan

We propose a method of corresponding between surfaces of two frames in cell animation images using each three dimensional structure. In this method, first, local three dimensional relations between neighboring surfaces from an observer's view point is detected from occluded contours of the surfaces. Then each surface in an image is corresponded to that of another by referring these relations. By this method, the candidates to correspond can be limited, and surfaces can easily be matched. Experimental results using person's cell animation images show that our method is effective: the percent accuracy of the surface correspondance improve more than 20 points.

1. はじめに

時系列画像において、形状や位置が変化する物体の動きや三次元構造を抽出する手段として、フレーム間の対応付けが重要である。従来の対応方法には、動物体の重心や面積等を特徴として対応付ける方法⁽¹⁾、輪郭や頂点の類似性^{(2) (3)}を用いた方法、隣接画素の濃度の分散⁽⁴⁾やガウス曲率⁽⁵⁾の特異な点を特徴とする方法等がある。これらの方法の多くはフレームごとに変形のない剛体のみを対象としており、しかも特徴量や特徴点の変化が微小であるという前提を設けている。また、動きに関しても物体を構成する部位のすべてが平行に移動するという予測のつきやすい条件になっている。こうした前提条件では、部位ごとに異なる動きをするような軟体物には対処できない。

筆者らは、三次元構造を利用した対応方法を考案した。この方法は、面積等、面の特徴の類似性による対応付けを基本としているが、このような対応付けでは、上記の従来技術と同様、移動によって重心の変動が大きいため誤対応が生じやすい。そこで、画像の絶対位置に依存しない特徴量を用い、かつ、移動や変形に対して変化の少ない画像の三次元構造を用いることによって、対応付けの候補となる面を限定すれば変形や動きに対処できると考えた。

面の候補を限定するために、その拘束条件として面の重なり関係を用いた。これは、隣接する面間の相対的な位置関係であり、物体の移動や拡大縮小の影響を受けにくいという特徴をもっている。既に対応付けが完了している面が存在する場合、それぞれの重なり関係を利用することによって隣接面の集まりの中から対応付けの候補を限定できる。また各候補の内、同一の重なり関係が存在するならば、さらに候補を限定できる。このように面の重なり関係を拘束条件として対応候補を絞ることにより、三次元構造が変化しない限り物体の動きや変形に強い対応付けが実現できる。

軟体物の時系列画像に対するフレーム間対応技術の第一歩として、上記の方法を用いて人物キャラクターのセルアニメーション画像を対象とした実験をおこなった。人物キャラクターは作家がその輪郭を手書きしてい

るため、同じ部位でもフレームごとに形状が異なり、軟体物としてみなす必要がある。特に、本実験では同じ特徴量を用い、その類似性のみで対応つける方法と比較し、手法の有効性を評価した。

以下、本稿では面の重なり関係を利用した対応付け方法とその評価実験の結果について述べる。

2. 面の重なり関係

人間は絵や写真等平面上に描かれた情景や物体だけでなく、図1のように意味のない対象を見たときでも奥行きを知覚することができる。これはあらかじめもっている対象のモデルを利用したのではなく、三次元情報を提供する要因が画像内に潜在していると考えられる。この要因について次のような解釈を与えた。

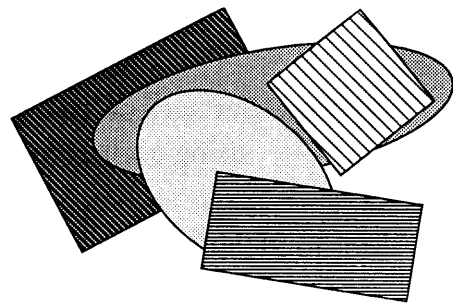


図1 意味のない対象からの三次元情報の知覚

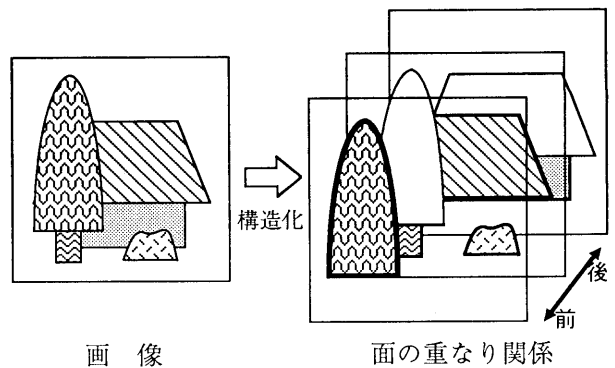


図2 面の重なり関係

図2に示すように、面単位のセグメンテーションされた画像は画像面に平行な面の集合と見なせる。また、この集合ではすべての面は必ずしも同一平面上に存在するようには見えない。一般に、隠蔽された面の輪郭は不連続であり、人間はおのおので隣接する面間で生じる不連続性を画像全体で総合的に評価することによって、二次元の画像から三次元が知覚できると解釈できる。

以上のように、観測者にとって面が重なり合っていることから、この画像面の法線方向における隣接面間の相対的な位置関係を面の重なり関係と呼ぶことにする。

2.1 重なり関係の抽出

重なり関係は、隣接する面間に存在する境界線がどちらの面の輪郭なのか、境界線の所属を判断することによって抽出することができる。たとえば、図3のように2つの面AとBが隣接し、境界線Lが存在する場合、面Aが面Bを隠蔽し、境界線Lが面Aの輪郭であるとすると、輪郭が見える面Aは面Bよりも観測者に対して手前に位置すると判断できる。(以降、前後の関係は観測者を基準とする。)しかし、実際には図3の場合は画像のみからは、境界線の所属は判断できない。

図4のように3つの面が隣接する場合、境界線の所属が推論できる。2面間に存在する境界線は点P(三面頂点)を端点としてL1、L2、L3の3本存在するが、そのうちの2本の境界線が点Pで連続するならばそれらの境界線は面の1本の輪郭であるとみなせる。図5のように、境界線L1、L2が連続すると仮定すると、境界線L3は点Pにおいて不連続であり本来L3'のようなL3を延長した境界線が存在していたと考えられる。境界線L3'が画像で存在しないのは面Aが面B、Cの境界線L3の一部分であるL3'を隠したからである。このことから面Aは点Pにおいて面B、Cよりも前に位置することが判断できる。このように、三面頂点における3つの境界線の連続性を評価することによって3つの面の重なり関係を抽出することができる。なお、残った不連続な境界線をもつ2面B、C間の関係はこの三面頂点では判断できない。

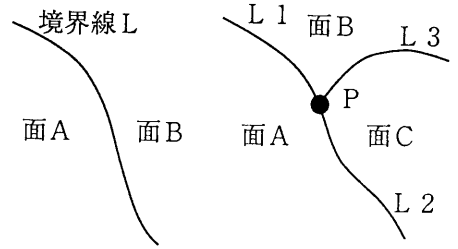


図3 境界線の所属

図4 三面頂点

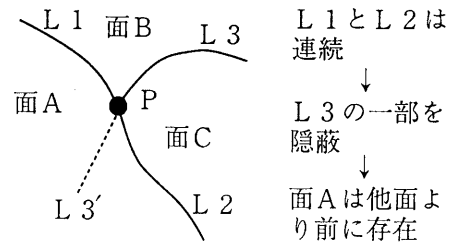


図5 重なり関係の判定

しかし、実際の画像では境界線の連続性を判断しにくい場合があり、それに対処するための具体的な判断方法を図6に示す。三面頂点Pを端点とし、他方の端点をもう一つの三面頂点とする3つの曲線分L1、L2、L3において、それぞれ両端点を結ぶ線分を初期値、閾値を2画素としてsplitting法を用いて折れ線近似⁽⁶⁾を行う。前に求めた各折れ線中で点Pを端点とする線分のみを抽出し、各々の2線分がなす角度を求める。その角度が π radに近ければその角度をなす2線分をもつ曲線が連続する可能性が高いことになる。そこで、角度の π への近さの度合いを2曲線が連続する確率として計算する。角度は分解能による誤差の影響を受けやすいので、求めた角度に対する誤差の影響の度合いをその角度のなす2線分の長さによって求め、その度合いと角度から連続する確率を求める方法を用いる。2線分の長さが長い程、線分の傾きは分解能の影響を受けにくくなり、2線分がなす角度の信憑性も高くなるからである。実際に2曲線が連続する確信度、言い

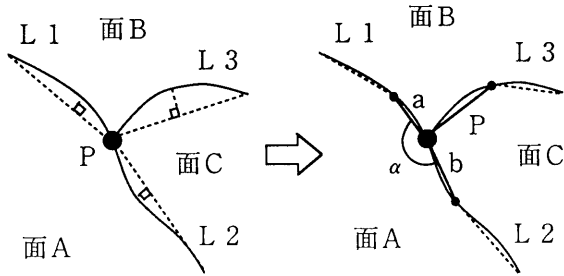


図6 splitting法による折れ線近似⁽⁶⁾

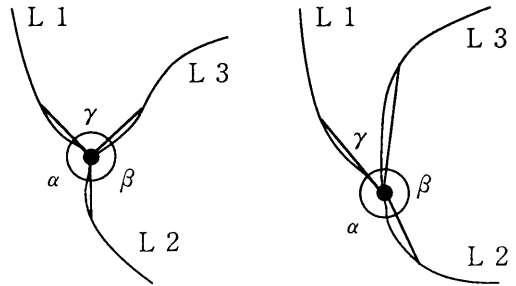
換えれば、連続する2境界を共に有する面が他の2面よりも前に位置する確信度を以下の式で算出する。図6において、線分L1、L2の長さをa、b、その2線分がなす角度を α とすると、面Aが面B、Cより前に位置する確信度CFは、

$$CF = \frac{\alpha}{\pi} - \frac{1}{100} \left(\frac{1}{2^a} + \frac{1}{2^b} \right) \times 2^4$$

である。 $(0 \leq CF \leq 1)$

次に、各三面頂点において上記で算出した確信度から面の重なり関係を決定する。しかし、すべての三面頂点が重なり関係を抽出できるような理想的なT型の頂点になるとは限らない。図7に重なり関係を抽出できない典型例を示す。(a)の場合は、3通りの重なり関係を指示する確率がすべて近い値となり、関係を明確に判断することができない。(b)の場合は、2面が残り1面よりも前に位置する確信度が同じ位高く、どちらの関係が正しいか判断し難い。各三面頂点において3通りの関係の確率からいずれかの場合であるか否かを判別し、関係決定の対象から除く必要がある。本手法では、各頂点での3通りの関係の確率を α 、 β 、 γ ($\alpha > \beta > \gamma$) とすると、平均E、分散Vを算出し、 $V \leq \text{閾値}$ (例えば0.0025) ならば(a)の場合、 $E \leq \beta$ ならば(b)の場合と判別する。それ以外の場合は、 α を確率にもつ関係をその頂点における重なり関係であると決定する。

なお、次章のフレーム間対応で利用し易いように、あるフレーム(前フレームは $x = F$ 、後フレームは $x = B$)での各面 y において1つ前に位置する面の集合



(a) $\alpha \doteq \beta \doteq \gamma$ (b) $\alpha \doteq \beta > \gamma$

図7 重なり関係を抽出できない典型例

$Sf_{F_x}(y)$ と1つ後に位置する面の集合 $Sf_{B_x}(y)$ として同じ関係の面同士をまとめる。

3. フレーム間対応

2フレーム間において同一物体を構成する部位を面単位で対応付ける。この方法では、面の重心等、画像の絶対位置に関する特徴を除外し、面積、周囲長、稠密度および輪郭の方向のヒストグラムなど、個々の面が有する特徴を用いた。具体的には、これらの4つの特徴から総合的に判断するため、類似度を定義し、これの高い面同士を対応付けることを基本としている。このように特徴の類似度から面を対応付ける場合、一方のフレームにおける一つの面に対して他方のフレーム内のすべての面との類似度を計算し、そのうち最も類似している面を評価する必要がある。しかし、選出する対象が広範囲であると誤対応を生じさせる可能性が高くなるという問題がある。

そこで、既に対応付いた面の組に着目し、面の重なり関係を使って面の前に位置する面同士と後に位置する面同士をそれぞれ個別に対応付けた。このように、重なり関係という三次元構造の類似性を利用して対応付ける対象を絞ることによって、2フレーム間の面の重なり関係や面の特徴が多少変化する場合でも、動きに対して誤対応の可能性を軽減できる。

3.1 特徴の類似度算出

異なるフレームにおける2面の類似度を算出するた

めに各面の面積、周囲長、稠密度及び輪郭の方向のヒストグラムの各々の特徴の類似度を計算する。このうち、面積、周囲長および稠密度の類似度については次式により算出する。

$$\text{類似度} = \frac{2}{1 + \exp(x)} \quad (0 \leq \text{類似度} \leq 1)$$

ただし、面積の場合 $x = \frac{|\text{面積差}|}{|\text{面積和}|}$
 周囲長の場合 $x = \frac{|\text{周囲長差}|}{|\text{周囲長和}|}$
 稠密度の場合 $x = \frac{|\text{稠密度差}|}{|\text{稠密度和}|}$

次に、方向のヒストグラムについては、面の慣性主軸を画像の縦軸と一致するように回転させ、輪郭を時計回りに追跡して求めたチェーンコードを8つのコードごとに累積して求める。この特徴の類似度は2つのヒストグラムの差の総和を画素数で正規化したもので評価した。具体的には、比較する2つの面のヒストグラムをそれぞれ $Ac1(c)$ 、 $Ac2(c)$ ($c=1\sim 8$) とするとき、次式で算出する。

$$\text{類似度} = \frac{\sum_{k=1}^8 |Ac2(k) - Ac1(k)|}{\sum_{k=1}^8 Ac1(k) + \sum_{k=1}^8 Ac2(k)} \quad (0 \leq \text{類似度} \leq 1)$$

以上で求めた4つの特徴に対する類似度の積を異なるフレームである2面の総合類似度 $Sm(A, B)$ とした。ただし、AとBは前フレーム及び後フレームに存在する面の集合をそれぞれ S_F 、 S_B の要素とする。この類似度の算出は2フレーム間の対応付けの対象となるすべての面の組み合わせに対しておこない、縦の欄を S_F の要素、横の欄を S_B の要素とした類似度表 $U(S_F, S_B) = \{Sm(x, y) \mid x \in S_F, y \in S_B\}$ に記録する。

3.2 類似性の評価

1フレーム内に存在する面は他のフレームでは1つだけ存在するか、もしくは存在しないと仮定する。この仮定により、異なるフレーム内にある2面が対応するための条件は以下のように普遍的に定義できる。

前フレームの面の集合 S_F 、後フレームの面の集合 S_B のそれぞれの部分集合 $S_{SF} \subseteq S_F$ 、 $S_{SB} \subseteq S_B$ において、各部分集合の要素 $x \in S_{SF}$ と $y \in S_{SB}$ とが対応するための必要十分条件は、

$$\begin{aligned} Sm(x, y) &= \max_{k \in S_{SB}} (Sm(x, k)) \\ \text{かつ} \quad Sm(x, y) &= \max_{k \in S_{SF}} (Sm(k, y)) \\ \text{部分類似度表 } U(S_{SF}, S_{SB}) &\subseteq U(S_F, S_B) \end{aligned}$$

である。

3.3 重なり関係による比較範囲の限定

重なり関係を利用して対応付けを進めるためには、種となる対応済の面の組(基準面)が必要である。そこで、類似度表 $U(S_F, S_B)$ において類似性の評価をおこない、基準面を求める。ここでは、これらの面の組の集まりを集合 P とする。

面の組を (x, y) $x \in S_F$ 、 $y \in S_B$ と表わすと、集合 P の要素のうち、最も信頼できる対応、即ち、

$Sm(a, b) = \max_{(x, y) \in P} (Sm(x, y))$
 を満たす要素 (a, b) を基準面として用いる。次に、これを利用して面 a と b の重なり関係から面 a および b の1つ前に位置する面の集合 $S_{FF}(a)$ および $S_{FB}(b)$ 、1つ後に位置する面の集合 $S_{BF}(a)$ および $S_{BB}(b)$ をそれぞれ分離して対応付ける。具体的には、おのおのの集合で、 $Sf(x) \ni m, n$ 、 $Sf(m) \ni n$ という集合の中に重なり関係が成り立つ面の組 $\langle m, n \rangle$ の集合を $Pa(x)$ とする。集合 Pa が存在する場合、同じ関係をもつ面の組同士を優先的に処理をおこなう。

たとえば、 $S_{FF}(a)$ と $S_{FB}(b)$ に対してそれぞれの集合 Pa を $Pa_{FF}(a)$ 、 $Pa_{FB}(b)$ とすると $Pa_{FF}(a) \ni \langle m_1, n_1 \rangle$ 、 $Pa_{FB}(b) \ni \langle m_2, n_2 \rangle$ において m_1 は m_2 と、 n_1 は n_2 とが次の条件を満たすならば同時に対応付ける。

面の組 $\langle p, q \rangle$ と $\langle r, s \rangle$ との類似度 PS を

$$\begin{aligned} PS(\langle p, q \rangle, \langle r, s \rangle) &= \sqrt{Sm(p, r) \times Sm(q, s)} \times W \\ U(S_{FF}(a), S_{FB}(b)) &\ni Sm(p, r), Sm(q, s) \\ W : \text{重み} & (= 1.2) \end{aligned}$$

と定義すると、 $\langle m_1, n_1 \rangle$ と $\langle m_2, n_2 \rangle$ とが対応する条件は、

$$\begin{aligned} PS(\langle m_1, n_1 \rangle, \langle m_2, n_2 \rangle) &= \max_{\langle x, y \rangle \in Pa_{FF}(a)} (PS(\langle x, y \rangle, \langle m_2, n_2 \rangle)) \\ \text{かつ} \quad PS(\langle m_1, n_1 \rangle, \langle m_2, n_2 \rangle) &= \max_{\langle x, y \rangle \in Pa_{FB}(b)} (PS(\langle x, y \rangle, \langle m_1, n_1 \rangle)) \end{aligned}$$

である。そのうち、最も PS の高い組を確率 PS をもつ (m_1, m_2) 、 (n_1, n_2) として集合 P に含め確定し、 $\langle m_1, n_1 \rangle$ と $\langle m_2, n_2 \rangle$ を $Pa_{FF}(a)$ 、 $Pa_{FB}(b)$ から取り除く。この対応付けは上記の対応の条件を満たす組がなくなるま

で繰り返す。ただし、 $P_{AFF}(a)$ 、 $P_{AFB}(b)$ 内に m_1, n_1 、 m_2, n_2 をもつ組が存在する場合、その組の対応は (m_1, m_2) 、 (n_1, n_2) に競合する対応はできない。同様に、 $Sf_{BF}(a)$ 、 $Sf_{BB}(b)$ に対してもおこなう。

この処理が終わったとき、まだ、 $Sf_{F1}(a)$ と $Sf_{F2}(b)$ 及び $Sf_{B1}(a)$ と $Sf_{B2}(b)$ のなかに未対応の要素が存在する場合、さらに対応付いた要素を削除したそれぞれの部分類似度表から 3.2 の対応条件を満たす面の組を求め、集合 P の要素に加える。

新しく生成した要素を集合 P に加えながら、全ての要素に対して上記の処理を繰り返す。最終的に、対応付けの結果は全ての処理が終了した後の集合 P の要素として得られる。

3.4 競合処理

生成された要素 (x, y) [$x \in S_F$ 、 $y \in S_B$] に対して集合 P の要素として、すでに (x, p) [$p \in S_B$] もしくは (q, y) [$q \in S_F$] が競合して存在することがある。この場合には、競合する要素のうち、類似度が最も高い要素を集合 P に残し、他の要素は誤対応として集合 P から排除するとともに、排除した要素の重なり関係から生成された要素も共に排除する。

競合した要素から派生した要素を容易に探索するために、対応付けの過程で生成された子要素を集合 P に追加するとき、親要素から子要素へアークを張り、生成の履歴を保存する (図 8 (a))。もし、生成された要素と同一要素が集合 P 内に存在する場合、親要素からすでに存在する子要素と同一の要素にアークを張り、

子要素は二重登録しない (図 8 (b))。このようにして得られた要素生成の履歴を用いて競合による排除要素を始点にアークをたどり、1つのみの親要素をもつ子要素があれば、その要素も排除する。

この競合処理によって、誤対応が対応付けの過程で生じた場合でも派生した対応を取り除ける。

4. 実験

セルアニメーション画像の人物キャラクターを対象として実験をおこなった。

実験データとしては、人物キャラクターが動作する 3 種類 (A、B、C) の時系列画像を用いた。系列 A はラケットを振るキャラクター、系列 B は歩行するキャラクター、系列 C は振り向くキャラクターである。対象の画像は、いずれも線画 (1024画素×1024画素×8ビット) で、閉曲線内部の領域に固有なラベルを割り当てており、連続する 10枚のラベル画像を一列としてしている。この実験では、各系列で連続する 2枚のラベル画像に対し、後フレームの画像の各ラベルに対応する前フレームの画像のラベルを求めることによって対応付けをおこなう。

対応付けの結果の評価では、あらかじめ同じ対象を人手で対応させたラベルの組を正解とし、後フレームにおけるキャラクターの面の総数に対する本手法で対応付けた結果と正解との合致数の比を正解率として用いた。ただし、面積が小さい (20画素以下) 面は分解能等のために特徴量の変動が大きく、値の信憑性が低いので今回の評価から除外した。

図 9～14に 3系列の内の系列 A における本手法の実験結果の一例を示す。なお、比較実験として、特徴量や類似度の計算等、本手法と同じであるが、比較する対象を限定せずに対応させた従来手法の結果も示す。図 9、10は前後フレームでの処理画像 F_a 、 F_b である。図 11は本手法の結果を画像 F_a のラベルに対して画像 F_b のラベルが正しく対応した面のみを表示させたものである。図 12は同様にして従来手法による結果画像である。図 13、14は次フレーム画像 F_c と本手法による画像 F_b と F_c の対応付けの結果である。

これらの結果より、従来手法では足のように特徴が

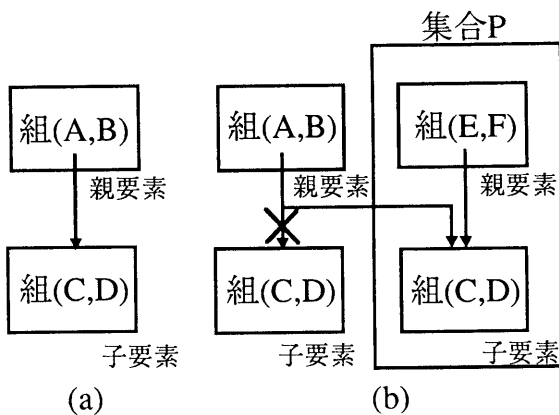


図 8 競合処理への対応

類似する部位が複数ある場合、靴のように動きが激しい場合、胴のように物体によって隠される場合等、対応付けができない。これに対して、本手法では正しい結果が導かれている。これは、足や胴のように面の重なり関係が両フレームとも変化しない場合、本手法により三次元構造が保存されていることに起因しており、本手法の有効性を示すものである。しかし、図13のFcのように右足の動きで左足が2つの面に別れるように隠蔽で1つの面が複数に分離される場合には、構造が似ていても対処できない。

次に、表1に各系列での本手法と従来手法で対応付けた結果のそれぞれの平均正解率とキャラクタを構成する面の数を示す。表1からわかるように、どの系列においても本手法が従来手法に比べ、正解率がおおよそ20%程向上しており、本手法がフレーム間の対応付けに効果があることがわかる。しかし、系列Bのように面積の小さい領域が多い場合、重なり関係が正しく推論されず、正解率が低くなる。

表1 正解率表

	系列A	系列B	系列C
面数(個)	3 2	5 4	4 5
本手法	8 1	7 3	7 9
従来手法	5 9	5 5	6 0

(%)

5. おわりに

面の重なり関係を用いた人物キャラクタのセルアニメーション画像に対するフレーム間対応付け方法とその評価実験について述べた。この方法は、隠蔽によって生じる隣接する面の輪郭の不連続性から面の重なり関係を推論し、その関係を用いて対応付けの候補となる面を限定するものである。実験の結果、2フレームの間で面の重なり関係が保持されている場合、面の不規則な動きや変形に対しても正解率の高い対応付けが可能である。なお、面の重なり関係は三次元構造としてステレオマッチング⁽⁷⁾、ピンピッキングシステム等に広く応用することができる。

参考文献

- (1)M. Yachida, M. Asada, and S. Tsuji: "Automatic analysis of moving images", IEEE Trans. PAMI, vol.3, no.1, pp.12-20 (1981).
- (2)M. Takagi and K. Sakaue: "The analysis of moving granules in a pancreatic cell by digital moving image processing", Proc. of 4th IJCAI, pp.735-739 (1978).
- (3)岩田耕一, 安居院猛: "セルアニメーション画像の間の閉領域同定方法に関する研究", 信学技報, vol. PRL80-9, pp.9-16 (1980).
- (4)H. P. Moravec: "Visual mapping by robot rover", Proc. of 6th IJCAI, pp.568-600 (1979).
- (5)L. Dreschler and H.-H. Nagel: "Volumetric model and 3D-trajectory of a moving car derived from monocular TV frame sequences of a street scene", CGIP, vol.20, no.3, pp.199-228 (1982).
- (6)D. H. Ballard and C. M. Brown: "COMPUTER VISION", Prentice-Hall, pp.295-296 (1982).
- (7)中川祐治, 瀬川智子, 塩原守人, 後藤敏行: "面単位のステレオ対応法", 情処学第39回全大, (1989).

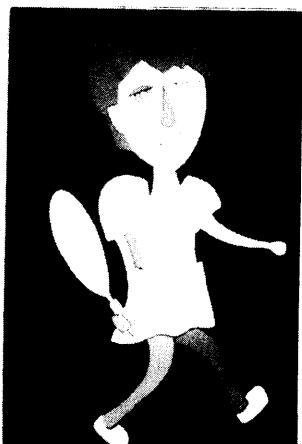


図9 対象画像F a (前フレーム)

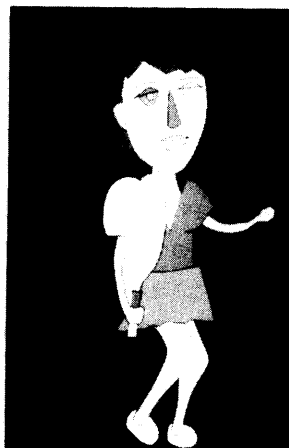


図10 対象画像F b (後フレーム)



正解率=82%

図11 本手法による対応付けの結果 (画像F b)



正解率=60%

図12 従来手法による対応付けの結果 (画像F b)



図13 画像F bの次フレーム画像F c



正解率=66%

図14 本手法による対応付けの結果 (画像F c)