

〔非公開〕

TR-C-0032

運動情報を用いた
人物画像からの特徴抽出

立平 靖	秋山 健二	小林 幸雄
YASUSHI TATEHIRA	KENJI AKIYAMA	YUKIO KOBAYASHI

1989. 4. 28

A T R 通信システム研究所

運動情報を用いた人物画像からの特徴抽出

1989年4月28日

ATR通信システム研究所 知能処理研究室

立平 靖 秋山 健二 小林 幸雄

1	背景	2
2	研究の目的	2
3	アプローチの方法	3
4	技術課題	3
5	技術課題に対する見通し及び従来研究の概観	3
6	研究内容	5
7	将来の課題	6
8	むすび	6
9	参考文献	7
10	図表	9
付録	従来 of 類似研究例の要約	
付録	オプティカル・フローの求め方	

1. 背景

通信のニーズは、遠隔地間に位置する人同士が「時」と「場所」を共有したいという願望から発している。科学技術の進歩はこれを可能にしつつあり、例えば電話により遠隔地の者同士が、時間を共有することができ、郵便や通信網の発達による物や文書の伝達により、場所（伝達されたものの存在する空間に限られるが）の共有が可能になった。さらに、近年にみられるテレビ会議やテレビ電話は、時と場所の共有というニーズを同時に満たそうという試みである。しかしながら、「通信者同士が同じ場所に共存している感覚」（これを本レポートでは臨場感と呼ぶ）は、残念ながら希薄で、時と場所を共有するという究極の通信の実現には到っていないのが現状である。

臨場感ある画像通信を実現するためには次の様な特徴のある通信システムを実現する必要がある。

- 1 相手の空間と自分の空間の連続性が感じられること。
- 2 自分が移動したり視線を移したりしたときに相手の空間の見え方に違和感のないこと

これを実現するための方法としては次の2つが考えられる。

1. 対地の画像と自分がいる部屋と連続的に見えるような周囲画像を作成し、その中に対地の人物を合成表示する。この際、自分の移動や視線の移動に伴い画像を変化させ違和感をなくす。

2. 仮想的な面談室の画像を作成し、その中に対地の人物と自分を送り込み仮想的な空間を共有する⁽¹⁾。

両者の手法において重要な要素技術となるのは、人物画像の分析合成技術である。即ち、人物の動作表情を送り側で分析する技術と、受け手側でその分析結果をもとに周囲画像（手法1の場合連続的に見える様に作成した周囲画像、手法2の場合仮想的な面談室の画像）と共に画像を合成する技術が重要な要素である。

2. 研究の目的

本研究では、人間の動作を分析する技術を検討する。人間の動作を分析するためには、人物画像を人間の動作の記述が可能ないように特徴抽出された画像（例えば人体の構造線の線分記述）に変換し、その記述と人間のモデルとを照合し、人物の動作の分析結果を探索により求めるアプローチ⁽¹⁾が有効である。図1にこの過程を示す。人間の構造線を捉え

る際に、画像から得られる情報として利用できるのは、人物の輪郭線、輝度情報、画像の動きベクトル、色情報などである。本研究では、人物画像の動きベクトルの情報を用いて、人物画像の構造線抽出を行う手法の研究をおこなう。動きベクトルの情報を用いる事は、複数フレームの情報を利用することであり単一フレームで行うより多くの情報を用いる事ができる点が有利であり、オクルージョン（隠れ）の問題を解決する1手法となる。また、人物の抜き出し処理や、輪郭抽出等を介さないで直接動作を解析できる可能性がある。また、従来あまり利用されなかった、テクスチャーや模様を有効活用できる可能性がある。

3. アプローチの方法

1. 人物が、撮影されている画像（動画）よりオプティカル・フローを計算する。
2. オプティカルフローの計算結果から、人物画像を抽出する。
3. さらに、オプティカル・フローの分布の情報を用いて、画像をパーツに分解し、人物の構造線（スケルトン）を得る。

本アプローチでは、人物を、複数の剛体が接続された物体(Jointed Rigid Objects⁽²⁾) であると考え人物画像を解析する。それぞれの剛体の中心線が人物の構造線(スケルトン)をなすと考えている。

本アプローチを図2に示す。

4. 技術課題

上記目的を実現するための技術課題は以下の2点である。

1. 画像からオプティカル・フローをどのように取り出すか。
2. 取り出された動きの情報をを用いてどのように領域分割を行い、人体のパーツである剛体に分割するか？
3. 剛体の分離の結果からどのように構造線をつくりあげるか？

5. 技術課題に対する見通し及び従来研究の概観

1. オプティカル・フローの計算方法

与えられた画像から動きベクトルを抽出する方法は、勾配法、ブロックマッチング、特徴点追跡の3つに分類される。これらの比較を表1に示す。本課題の場合画像内に複数の

運動物体を含むので表1より、勾配法⁽³⁾を基礎とする方法が適していると思われる。勾配法による動きベクトルの推定の性能は3~4ピクセル/フレーム程度のスピードまでの場合10%程度の誤差である⁽³⁾。この性能は反復勾配法⁽⁴⁾により改善される。またブロックマッチングによる動き抽出は一般に勾配法による方法より精度がよいとされるが、前出の反復勾配法ではブロックマッチングと同程度の性能が得られている。

勾配法による動きベクトルの検出に関しては文献⁽⁵⁾に詳述されており、参考にする必要がある。

2. オプティカル・フローの分布をもとにして、領域分割する方法

画像上に得られた動きベクトルは、1つの物体上に分布する物であれば同じ様な性質をもち他の物体と区別する事ができるはずである。この性質を用いて人体の領域分けをすることができる。オプティカルフローの場においてエッジ検出を行った例がある⁽⁶⁾。

複数物体の存在する画像から動きの情報を用いて物体を抽出する方法⁽⁷⁾や、領域分けを行う方法⁽⁸⁾⁻⁽¹²⁾が試みられている。特に文献(7)では、複数の運動物体が存在する画像から、勾配法により動きの情報を取り出し、これをもとにして、特定の物体を抽出している。文献(8),(9),(10)では、隣合う微小領域を統合するか分離するかを、オプティカルフローに関する評価関数により行っている。文献(11)においては、オプティカルフローと輝度の情報を併用し、輝度の情報から求めたエッジを手掛かりに加えている。文献(12)においては、画像データと、輝度勾配の間の関係が、一定スピードの領域では、一定の関係があることを示し、それによりセグメンテーションを行っている。

これらの技術を人物画像に適用可能かどうか検討する必要がある。

3. 各領域の中心線を取り出し人体の構造線を取り出す方法

人体のパーツ(胴体、上肢、下肢等)は棒状であるので、画像の領域の形から中心軸を決定することは比較的容易であると思われるが、運動の仕方によっては全てのパーツに分解できなったりする場合もあり、そのようなケースの対策を考える必要がある。

4. 運動情報を用いた人物画像処理技術

動きの情報を用いて人物の動きを認識した例として、東大・杉原らの研究⁽¹³⁾がある。彼らは、人物の関節の部分にランプをつけ、暗闇の中で歩行等の運動をさせ、その画像より光点の動きを追跡しその結果を解析し人物のスケルトンを再現している(図3参照)。この解析の際には、人物の運動に特有の運動拘束条件を用いている。同様に、光点の追跡により人物の体の部位を認識した例もある⁽¹⁴⁾。これらの研究は、動きの追跡を、光点の

追跡という比較的容易な問題で置き換え、人物の構造線の解析に動きの情報の利用が可能である事を示した研究例であるといえる。

また、勾配法を、顔の動画像に適用し運動視差の原理を利用して3次元構造の復元を行った例⁽¹⁵⁾がある。この研究例は、勾配法が人物画像の解析に有効な一つの手法であることを示している。

6. 研究内容

6. 1 概要

図4に検討課題とその流れを示す。まず始めに人物画像からオプティカル・フローを算出する方法を検討する。次に算出されたオプティカル・フローから変化点を見つけ領域分けを行う方法を検討する。最後にこれらの結果より人体の構造線を完成する方法を検討する。

6. 2 人物画像からの動きベクトルの検出

技術課題の項で述べたように、勾配法を人物の動画像に適用し動きベクトルを得る。勾配法により2次元の動きベクトルを得る方程式を解くためには、拘束条件を一つ付与する必要があるがこの条件を、この問題にあわせてうまく設定する事が重要である。この拘束条件に関する検討は文献⁽⁵⁾、⁽¹⁶⁾で行われており参考にする必要がある。人間の動き特有の拘束条件をいれることも考えられる。また画像のノイズ除去等の前処理も検出結果に影響を及ぼす可能性があり検討を要する。

6. 3 動きベクトルの情報を用いて領域分けをする方法

動きベクトルの変化点を検出し領域分けをする際に、境界付近の動きベクトルの発生の仕方が不規則になる可能性がある。この部分の処理を如何に行うか検討の必要がある。

6. 4 各領域の中心線を取り出し人体の構造線を取り出す方法

人体のパーツ（胴体、上肢、下肢等）は棒状であるので、画像の領域の形から中心軸を決定することは比較的容易あると思われるが、運動の仕方に寄っては全てのパーツに分解できなったりする場合もあり、そのようなケースの対策を考える必要がある。この段階での検討は、次のフェーズのモデルとのマッチングのシステムとあいまって検討する必要がある。

7. 将来の課題

本研究においては、動きの情報を用いて人物画像の領域分けを主に検討する。この結果得られる特徴抽出画像とモデルとのマッチングの検討は、画像認識技術の重要な課題であり、人体のモデルの構成法、効率的なマッチングの探索等を検討する必要がある。また動作分析結果から画像を合成する方法は、徐々に検討が行われている⁽¹⁷⁾ので、これらを統合して、「臨場感ある画像通信システム」をトータルな系として完成させる必要がある。

8. むすび

画像情報から人物の動作を分析する方法について、その必要とされる背景から、具体的な技術課題の解決の見通しまでを述べた。

9. 参考文献

- 1) 石橋、秋山、小林、「仮想空間通信における人物処理法の検討」、ATR テクニカルレポート, TR-C-0013
- 2) Jon A. Webb, "Structure Motion of Rigid and Jointed Objects", *Artif. Intell.*, Vol.19 (1982)
- 3) J.O. Limb, J.A. Murphy, "Estimating the Velocity of Moving Images in Television Signals", *CG&IP*, Vol.4 (1975)
- 4) 和田, 山口, 「反復勾配法による動画像信号の動き量検出」, *信学論*, Vol.J68-D, No.4 (1985)
 , Vol.J69-D, No.6 (1986)
- 5) Horn et al. "Determining Optical Flow", *Artif. Intell.*, Vol.17, No.1-13, (1981)
- 6) W. B. Thompson, "Dynamic Occlusion Analysis in Optical Flow Fields", *IEEE*
- 7) 山本, 「勾配法による動画像と距離情報からの複数動物体の3次元運動解析」, *信学論* Vol. J69-D, No.6 (1986)
- 8) J. L. Potter, "Scene Segmentation Using Motion Information", *CGIP*, Vol.6 (1977)
- 9) S. Tsuji, "Tracking and Segmentation of Moving Objects in Dynamic Line Images", *IEEE Trans, PAMI-2*, No.6 (1980)
- 10) W. B. Thompson, "Combining Motion and Contrast for Segmentation", *IEEE Trans, PAMI-2*, No.6 (1980)
- 11) Ramesh Jain "Segmentation Through the Detection of Changes Due to Motion", *CG&IP* Vol.11 (1979)
Trans, PAMI-7, No.4 (1985)
- 12) Fenema et al., "Velocity Determination in Scenes Containing Several Moving Objects", *CG&IP*, Vol.9 (1979)
- 13) 杉原、電子情報通信学会「知的コミュニケーションと符号化第3種研究会」第5回知的符号化部会, (1988.11)
- 14) Richard F. Rashid, "Towards a System for the Interpretation of Moving Light Displays", *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-2, No.6, (1980)

- 15) 森川他、「3次元構造情報の自動抽出と符号化への応用」、1988年画像符号化シンポジウム (1988)
- 16) Hildreth, "Computations Underlying the Measurement of Visual Motion", Artif. Intell. Vol. 23
- 17) 原島、「顔画像の分析合成符号化方式の動向」、テレビ学技報、ICS88-17, IPA88-11 (Feb. 1988)

10. 図表

- 図 1 人物の動作を捉える方法
- 図 2 本研究のアプローチ
- 図 3 光点の追跡による人物の復元
- 図 4 研究の流れ
- 表 1 運動の検出方法の比較

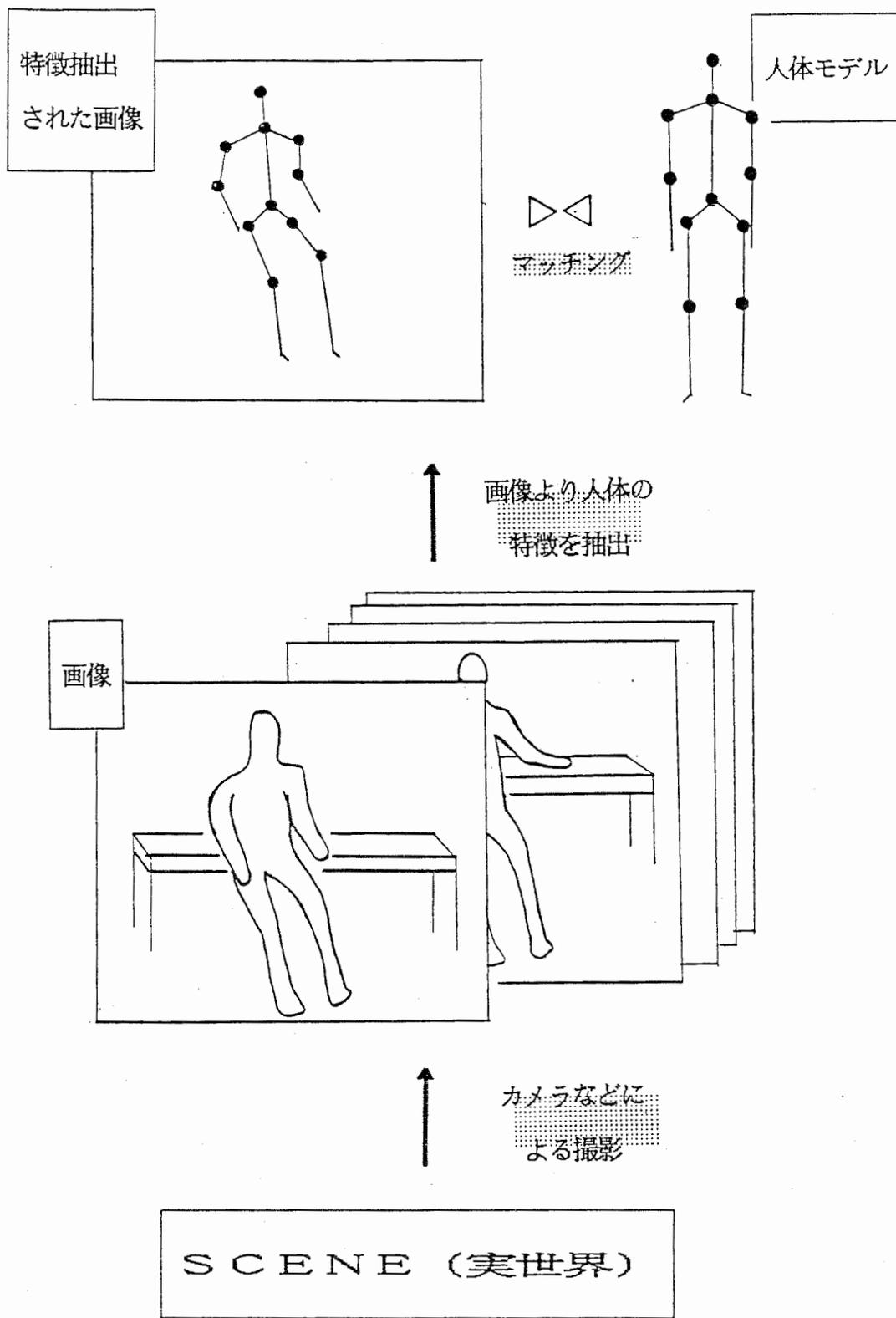


図1 人物の動作を捉える方法

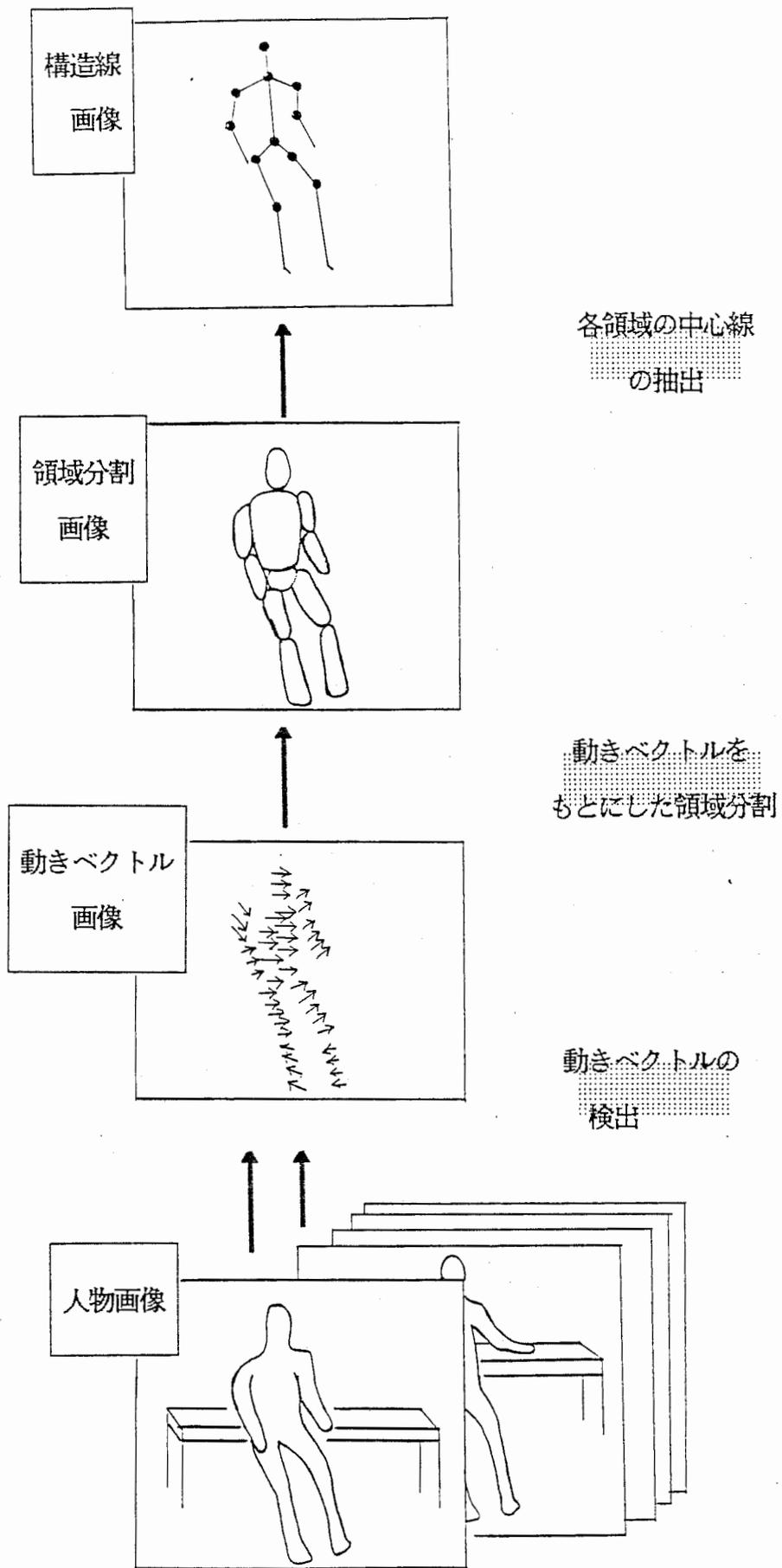
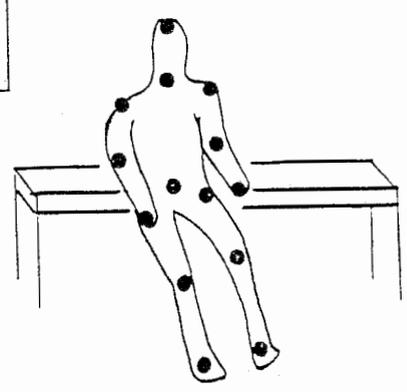


図2 本研究のアプローチ

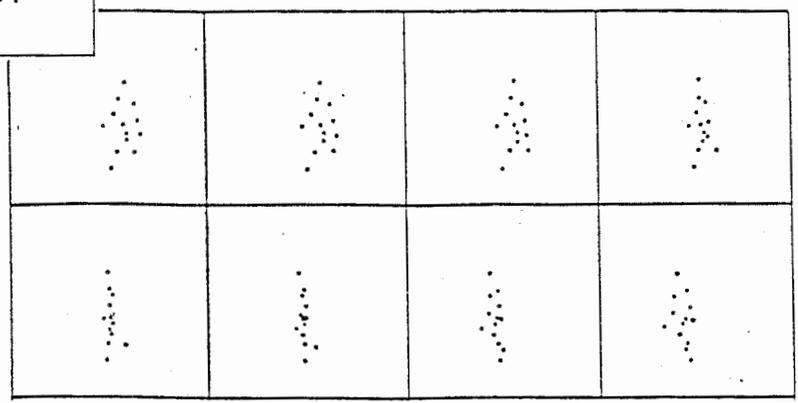
人物



ランプを
取りつける



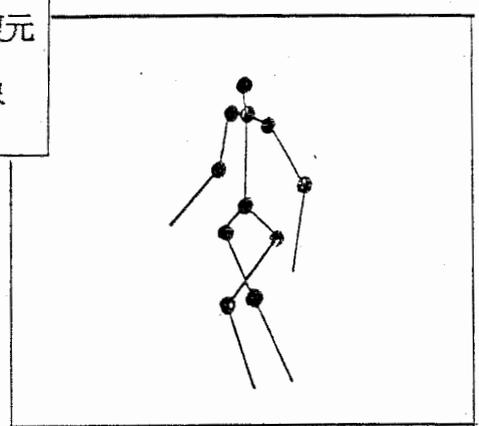
画像シーケンス (14)



運動している
ところを撮影



骨格復元
画像



人間の動きを考慮して
点をつなげる

図3 光点の追跡による人物の復元

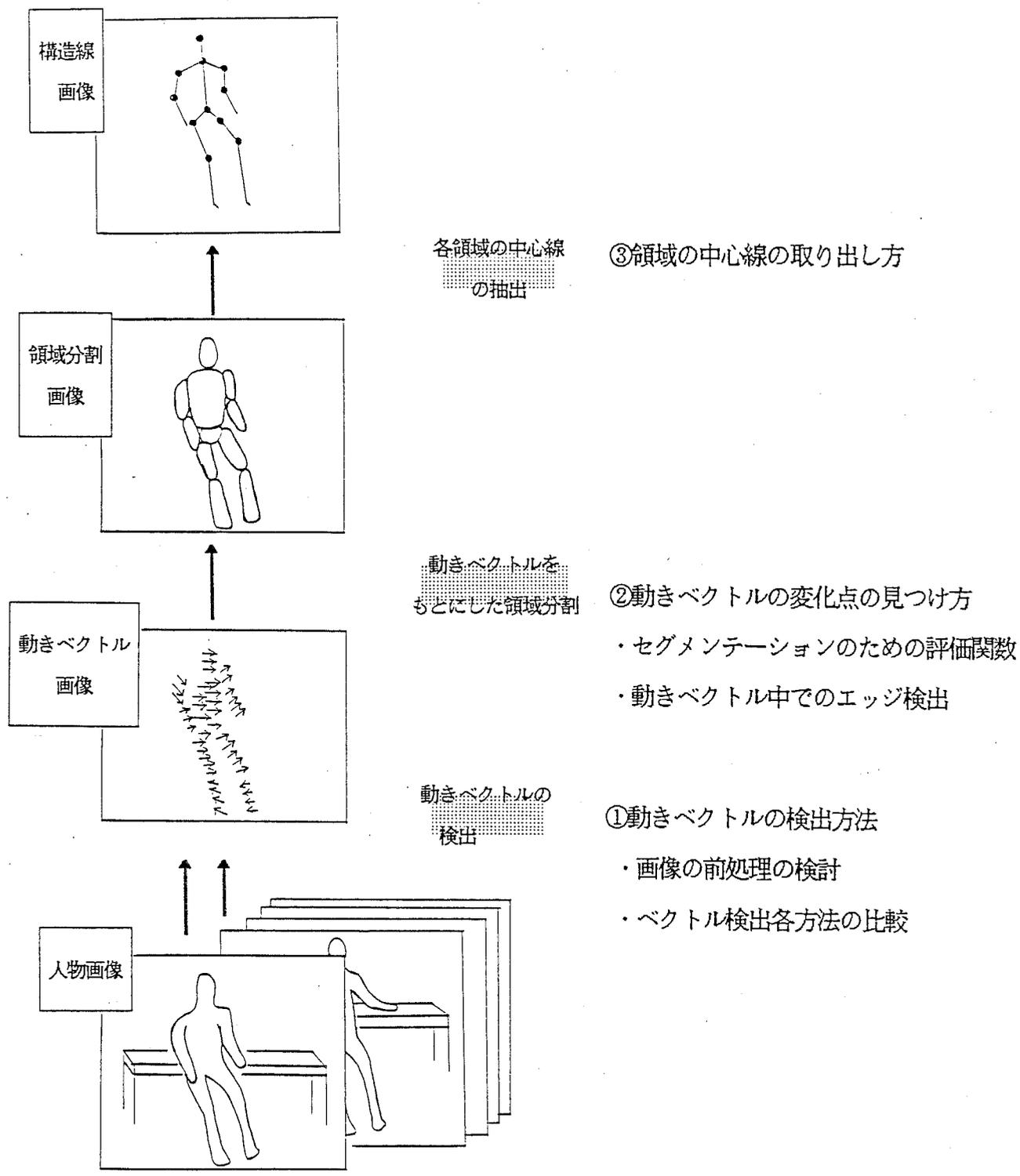


図4 研究の流れ

	勾配法	特徴点追跡	ブロックマッチング
精度	△	○	△
精度を限定する ファクター	勾配法で想定したモデルにマッチした絵柄かどうか	特徴点の検出精度	ブロックの大きさ
運動量の制約	○ 1.5sec で画面を横断するスピードまで	○ 無いが、速いと特徴点同士のマッチングが難しくなる	○ 無いが、速いと探索範囲が広がる。
動きベクトルの数	○ 画素毎に出てくる。	× 特徴点の数だけ。	△ ブロックの数だけ。
特徴点の必要性	○ (無)	× (有り)	○ (無)
複数の物体を含む画像 に対して	○ (動きベクトルが画素毎に出るので)	△ (特徴点が増えてしまう。)	△ (ブロックサイズの選び方が難しい)

表 1 運動の検出方法の比較

本課題に対しては、特徴点を必要としない点と、複数の物体を含む画像に対し適用可能な点から、勾配法が適していると思われる。

付録 1

従来類似研究例の要約

NO	内容・機関	適用領域	動き検出方法	領域分割方法	備考・問題点
(7)	勾配法による 3次元運動 の解析 (電総研)	ボール等の単 純な物体の実 写画像	勾配法	動き量に關す る評価関数のス レシヨルドで融 合か分離か決定	日本での勾配法を 用いた物体認識の 成果として参考に なる部分が多い
(8)	動き情報を用 いたセグメン テーション (ウイスコン シン大)	極めて単純な 図形のアニメ ーション	テンプレートマッ チング	動き量に關す る評価関数のス レシヨルドで融 合か分離か決定	動き検出の方法に 特徴がある。伸縮 するテンプレートを 用いる。
(9)	線画の動画に おける物体の 追跡とセグメ ンテーション (阪大)	線画のアニメ ーション	フレキシブル・マ ッチング	動き量に關す る評価関数のス レシヨルドで融 合か分離か決定	マンガ画像の理 解システムの一部
(10)	セグメンテー ションにおけ る動き情報と ントラスト情 報の併用 ミネソタ大	実写動画像	勾配法	動き量に關す る評価関数のス レシヨルドで融 合か分離か決定 輝度情報併用	勾配法を用いるメ リットとして、速 度が上がっても手 続きが複雑に成ら ないことと、複数 物体の存在が許さ れることを上げて いる。

NO	内容・機関	適用領域	動き検出方法	領域分割方法	備考・問題点
(11)	動きによる画像の変化を用いたセグメンテーション テキサス大	実写画像	ブロックマッチング	動き量に関する、価関数のスレシヨルドで融合か分離か決定	マッチングに用いたブロックの大きさは20ピクセル程度
(12)	複数物体を含むシーンにおける速度の決定 ミネソタ大	実写画像	勾配法	画像データより、 θ_G, V_G という値を計算すると、一つの速度に対応する点は、一つのサインカーブ上に分布する事を用いてセグメンテーション	勾配法の応用である。
(13)	光の軌跡の追跡による動きの解釈 (CMU)	人物の関節部分にランプをつけ動いた所を撮影した画像	特徴点の追跡	動き量に関する評価関数のスレシヨルドで融合か分離か決定 輝度情報併用	特徴点が既知のもとで行っている。

付録 2 オプティカル・フローの計算法

(1) Horn, Schunk等の方法 (文献No.5)

1) 拘束条件

$$E_x \cdot u + E_y \cdot v + E_t = 0 \quad 1.1$$

E_x : 輝度勾配

E_y : 輝度勾配

E_t : 時間変化

2) スムースネスの拘束条件

新たな拘束条件を付け加えないと、 u, v を求める事が出来ない。ここでは、フローベクトルが、滑らかに変化するというスムースネスの拘束条件を用いる。即ち、下式を最小化する。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \quad \text{and} \quad \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2. \quad 1.2$$

3) E_x, E_y, E_t の計算法

$$\begin{aligned} E_x &\approx \frac{1}{4}\{E_{ij+1,k} - E_{ij,k} + E_{i+1j+1,k} - E_{i+1j,k} \\ &\quad + E_{ij+1,k+1} - E_{ij,k+1} + E_{i+1j+1,k+1} - E_{i+1j,k+1}\}, \\ E_y &\approx \frac{1}{4}\{E_{i+1j,k} - E_{ij,k} + E_{i+1j+1,k} - E_{ij+1,k} \\ &\quad + E_{i+1j,k+1} - E_{ij,k+1} + E_{i+1j+1,k+1} - E_{ij+1,k+1}\}, \\ E_t &\approx \frac{1}{4}\{E_{ij,k+1} - E_{ij,k} + E_{i+1j,k+1} - E_{i+1j,k} \\ &\quad + E_{ij+1,k+1} - E_{ij+1,k} + E_{i+1j+1,k+1} - E_{i+1j+1,k}\}. \end{aligned} \quad 1.3$$

4) フローベクトルの、ラプラシアン of 計算法

$$\nabla^2 u \approx \kappa(\bar{u}_{ij,k} - u_{ij,k}) \quad \text{and} \quad \nabla^2 v \approx \kappa(\bar{v}_{ij,k} - v_{ij,k}),$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ij,k} &= \frac{1}{6}\{u_{i-1j,k} + u_{ij+1,k} + u_{i+1j,k} + u_{ij-1,k}\} \\ &\quad + \frac{1}{12}\{u_{i-1j-1,k} + u_{i-1j+1,k} + u_{i+1j+1,k} + u_{i+1j-1,k}\}, \\ \bar{v}_{ij,k} &= \frac{1}{6}\{v_{i-1j,k} + v_{ij+1,k} + v_{i+1j,k} + v_{ij-1,k}\} \\ &\quad + \frac{1}{12}\{v_{i-1j-1,k} + v_{i-1j+1,k} + v_{i+1j+1,k} + v_{i+1j-1,k}\}. \end{aligned} \quad 1.4$$

5) 最小化による、フローベクトルの算出

1) の拘束条件と2) の拘束条件を合わせて最小化するフローベクトル U, V を算出する。

$$\mathcal{E}_b = E_x u + E_y v + E_t,$$

$$\mathcal{E}_c^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2.$$

$$\mathcal{E}^2 = \iint (\alpha^2 \mathcal{E}_c^2 + \mathcal{E}_b^2) dx dy.$$

1.5

微分積分の計算により、このトータルエラーを最小化する条件を求めると、次式のようになる。

$$E_x^2 u + E_x E_y v = \alpha^2 \nabla^2 u - E_x E_t,$$

$$E_x E_y u + E_y^2 v = \alpha^2 \nabla^2 v - E_y E_t.$$

1.6

(4) 式のフローベクトルの、ラプラシアン計算方法を用いると、次式をえる。

$$(\alpha^2 + E_x^2)u + E_x E_y v = (\alpha^2 \bar{u} - E_x E_t),$$

$$E_x E_y u + (\alpha^2 + E_y^2)v = (\alpha^2 \bar{v} - E_y E_t).$$

1.7

これを、 u, v について解くと次式を得る。

$$(\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2)u = +(\alpha^2 + E_y^2)\bar{u} - E_x E_y \bar{v} - E_x E_t,$$

$$(\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2)v = -E_x E_y \bar{u} + (\alpha^2 + E_x^2)\bar{v} - E_y E_t.$$

1.8

6) α について

上式を変形して次式をえる。この式より、 α は、輝度の勾配が小さい時に大きな役割を果たす事がわかる。この値は、ノイズの $E_x^2 + E_y^2$ 位の値である。

$$\begin{aligned}
 (\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2)(u - \bar{u}) &= -E_x[E_x\bar{u} + E_y\bar{v} + E_t], \\
 (\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2)(v - \bar{v}) &= -E_y[E_x\bar{u} + E_y\bar{v} + E_t].
 \end{aligned}$$

7) 反復的な解法

ガウス・サイデル法のような反復的な解法により次の漸化式をえる。

$$\begin{aligned}
 u^{n+1} &= \bar{u}^n - E_x[E_x\bar{u}^n + E_y\bar{v}^n + E_t]/(\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2), \\
 v^{n+1} &= \bar{v}^n - E_y[E_x\bar{u}^n + E_y\bar{v}^n + E_t]/(\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2).
 \end{aligned}$$

1.9

ただし、

$$\begin{aligned}
 \bar{u}_{i,j,k} &= \frac{1}{6}\{u_{i-1,j,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i+1,j,k} + u_{i,j-1,k}\} \\
 &\quad + \frac{1}{12}\{u_{i-1,j-1,k} + u_{i-1,j+1,k} + u_{i+1,j+1,k} + u_{i+1,j-1,k}\}, \\
 \bar{v}_{i,j,k} &= \frac{1}{6}\{v_{i-1,j,k} + v_{i,j+1,k} + v_{i+1,j,k} + v_{i,j-1,k}\} \\
 &\quad + \frac{1}{12}\{v_{i-1,j-1,k} + v_{i-1,j+1,k} + v_{i+1,j+1,k} + v_{i+1,j-1,k}\}.
 \end{aligned}$$

1.9 式に初期値を入れ計算を繰り返し、計算結果の収束の程度により繰り返しの回数を変え、フローベクトル u, v を得る。

(2) 東大 原島等の方法 (文献 No.15)

動きベクトルを求める手法として、ゼロ交差上で、勾配法を用いる。

ゼロ交差に沿っての動きベクトルは滑らかに変化するという拘束条件を付加し、2.1式を最小化する解として動きベクトルをもとめる。2.1式において、 V は求める動きベクトル (u, v)、 N はゼロ交差に垂直な単位ベクトル、 V_T はゼロ交差に垂直な速度成分、 s はゼロ交差輪郭を表す。第1項が、測定データとのずれを表し、第2項が滑らかさの拘束条件を表す。

$$E(V) = \int \{ (V \cdot N - V_T)^2 + \lambda (dV/ds)^2 \} ds \quad 2.1$$

(3) ミネソタ大学 トンプソン等の方法 (文献No.12)

コントラストの情報を併用し、同じリージョンでは、同じ動きベクトルを持つという仮

定を入れる。

Hornらによれば、この仮定の下では回転体の様なものが扱えないという。

(4) 電総研 山本等のセグメンテーション (文献No.7)

対象が剛体運動をしているならば、剛体上の点 $r = (x, y, z)$ の微小運動ベクトル $V_p = (u, v, w)$ は、並進ベクトル $V_0 = (u_0, v_0, w_0)$ と角速度ベクトル $\Omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ を運動パラメータとして、次式で表される。

$$V_p = \Omega \times r + V_0$$

4.1

正射影を仮定しているので、 (u, v) の分布がオプティカル・フローである。

一方、勾配法で用いる、拘束条件は (2) 式で与えられる。

$$E_x \cdot u + E_y \cdot v + E_t = 0$$

4.2

(1) 式を (2) 式に代入すると、(3) 式を得る。

同じ剛体上の3点から導かれる方程式 (3) を連立させる事により、運動パラメータは、その最小2乗解として推定される。即ち、方程式

$$Ax = b$$

4.3

の最小2乗解は、

$$x_0 = (A^T A)^{-1} A^T b$$

4.4

となる。この解に対し、残差平方和は $e^2 = \int (Ax_0 - b)^2$ となる。このときが、単一の剛体に対応する3点であれば、残差平方和 e^2 は理論的にはゼロになる。従って、異なる動きをする物体上の点か、同一の物体上の点かをこの残差平方和を用いて判別することができる。