アフィン変換モデルを用いた動き検出のための簡易なアルゴリズム

A Simple Algorithm for Motion Detection with Affine Transform Model

正会員 山田 芳郎[†], 正会員 都築 伸二[†]

Yoshio Yamada[†] and Shinji Tsuzuki[†]

あらまし 回転や伸縮のような複雑な動きであっても、回転角度が比較的小さく、かつ伸縮率が1に近い場合には、ブロックマッチングによって「見かけの平行移動ベクトル」を近似的に検出できる。また、このような見かけの平行移動ベクトルの場を観測することによって、対応するアフィン変換パラメータが検出可能である。本論文では、アフィン変換モデルによって記述されるフレーム間の動きを上述の原理に基づいて簡易に検出するための手法を提案している。

キーワード：アフィン変換、動き検出、ブロックマッチング、見かけの平行移動ベクトル

1. ま え が き

回転や伸縮などを伴う複雑な動きを検出するために、幾何学変換モデルに基づく手法が提案されている¹⁾²⁾。たとえば、アフィン変換モデルの場合、回転や伸縮などの動きを記述するために、一般に4～6個のパラメータが用いられる。これによって、より複雑な動きを検出できるようになる。しかし、平行移動のみを検出する場合と比べて、動きを記述するパラメータが増加するため、ブロックマッチングの直接的な適用は演算量の大幅な増加を招くことになる³⁾。さらに、ブロックマッチングの際に、アフィン変換や画素間の補間を行うための演算が必要となり、このための演算量の増加も無視できない。

回転や伸縮のような複雑な動きがフレーム間に存在する場合であっても、回転角度が比較的小さく、かつ伸縮率が1に近い場合には、ブロックマッチング法によって「見かけの平行移動ベクトル」を検出することができる。この見かけの平行移動ベクトルは、アフィン変換パラメータにより一意に定まり、また逆に複数の見かけの平行移動ベクトルを観測することによって、アフィン変換パラメータを推定することができる⁴⁾。本論文では、このような原理に基づいて、アフィン変換モデルによって記述されるフレーム間の動きを簡易に検出するための手法を提案している。なお、本論文では、見かけの平行移動のみを検出する従来のブロックマッチング法を単にブロックマッチング法と呼ぶことにする。

2. アフィン変換パラメータの検出

図1に示されるような座標系 P および Q について考える。座標系 P における任意の点を p で表し、 P の原点 O から p に至るベクトルを p で表す。 P 上の点 p に対するアフィン変換を $Mp + d$ のように表す。ここに、 $d = [d_x \ d_y]^T$ は(純粋な)平行移動を表す動き成分であり、 T は転置を表す。また、行列 M は、一般に

$$M = \begin{bmatrix} s_x \cos \theta_x & -s_y \sin \theta_y \\ s_x \sin \theta_x & s_y \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

のように表せる。特に、 $s_x = s_y$ かつ $\theta_x = \theta_y$ の場合には、相似変換と呼ばれる⁵⁾。

本論文では、動き検出の対象となるフレームの系列を $\{I_n\}$ で表し、点 p における第 n 番目のフレーム I_n の明度を $I_n(p)$ で表す ($n = \dots, -1, 0, 1, 2, \dots$)。また、フレーム I_n および I_{n-1} の明度の関係を

$$I_n(p) = I_{n-1}(Mp + d) \quad (2)$$

のようにモデル化し、連続する2つのフレーム I_n および I_{n-1} が与えられたときに、これらから M および d を検出する問題を考える。

図1に示されるように、座標系 Q は P 上の点 r に原点 O' を持つものとし、 P 上の点 p に対応する位置にある Q 上の点を q で表す。 O から O' に至るベクトルを r 、 O' から点 q に至るベクトルを q で表すと、定義より $p = q + r$ の関係がある。したがって、 P 上のアフィン変換 $Mp + d$ は、 Q の上で

$$Mp + d - r = Mq + (Mr + d - r) \quad (3)$$

1999年5月6日受付、1999年5月21日採録

[†]愛媛大学 工学部

(〒790-8577 松山市文京町3, TEL 089-927-9788)

[†]Faculty of Engineering, Ehime University

(3, Bunkyo, Matsuyama-shi, Ehime 790-8577, Japan)

図1 座標系 P および Q
Coordinate systems P and Q.

図2 ブロック A および B の配置の一例
An example of the layout of blocks A and B.

のように観測されることになる。(3)式の右辺の第2項 $Mr + d - r$ は q に依存せず、 Q 上で平行移動ベクトルとして観測される「見かけの平行移動」を表している。ここでは、この見かけの平行移動の理論値を

$$\delta(r) = Mr + d - r \quad (4)$$

のように表すことにする。座標系 Q における $I_n(p)$ の観測値を $J_n(q) = I_n(q + r)$ で表すと、(2)式のモデルは

$$J_n(q) = J_{n-1}(Mq + \delta(r)) \quad (5)$$

のようにも書ける。

以下では、 $s_x = s_y (= s)$ および $\theta_x = \theta_y (= \theta)$ の場合、すなわち相似変換の場合について、提案手法の原理を説明する。この場合、動きを記述するパラメータは4個であるから、2つの見かけの平行移動ベクトルがわかれば s および θ を検出できる。一般に、アフィン変換の場合には、少なくとも3個の見かけの平行移動ベクトルを必要とするが、以下の議論を拡張して適用することができる⁷⁾。なお、以下においては、形式的に $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ を仮定しているが、後述のシミュレーションの結果からわかるように、見かけの平行移動を精度良く検出できる θ の範囲は、これよりかなり狭くなる。

さて、フレーム I_n において定義された2つの矩形のブロック A および B を考える。A と B の配置は任意に取ることができ、たとえば図2に示すように、タイル状に配置されていてもよいし、2つのブロックが互いに離れていたりオーバーラップしていても構わない。同図に

において、 d_A および d_B は、ブロック A および B における見かけの平行移動の観測値を表す。 P の原点 O からブロック A および B の中心へ至るベクトルをそれぞれ r_A および r_B で表し、 $r_A \neq r_B$ とする。ここで、ブロック A および B を含む周辺領域で M および d を一定と見なすことができ、その結果

$$\left. \begin{aligned} \delta(r_A) &= Mr_A + d - r_A \\ \delta(r_B) &= Mr_B + d - r_B \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

の関係が成立するものと仮定する。ブロック A および B について、見かけの平行移動ベクトルが正しく検出され、 $d_A = \delta(r_A)$ および $d_B = \delta(r_B)$ であったとすると

$$d_A - d_B + (r_A - r_B) = M(r_A - r_B) \quad (7)$$

の関係が成立する。 $u = s \cdot \cos \theta$ および $v = s \cdot \sin \theta$ を独立変数と見なすと、(7)式は2変数 u および v についての連立1次方程式になっており、これを解くことにより s および θ を求めることができる。すなわち

$$d_A - d_B + r_A - r_B = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$r_A - r_B = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

と置くと

$$s = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2}{b_1^2 + b_2^2}} \quad (10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_1 b_1 + a_2 b_2} \right\} \quad (11)$$

の関係が得られる。ここに、 $a_1 b_1 + a_2 b_2 \neq 0$ と仮定する。 $a_1 b_1 + a_2 b_2 = 0$ を満たす最も小さい回転角度は $\theta = \pm \pi/2$ であるが、このように θ が大きくなると、ブロックマッチング法による見かけの平行移動の検出そのものが原理的に不可能になることは明らかである。したがって、このような場合については本論文では議論しないこととする。ただし、見かけの平行移動ベクトルの検出誤りなどのために $a_1 b_1 + a_2 b_2 = 0$ となることは、実際には起こり得るから、この場合のオーバーフロー対策は不可欠である。ここでは、このような場合には、 $s = 1$ 、 $\theta = 0$ を採用することとする。

(10),(11)式の s と θ を用いて計算される M の推定値 $\hat{M}$ を次式のように定義する。

$$\hat{M} = \frac{s}{\sqrt{1+t^2}} \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix}, \quad t = \tan \theta \quad (12)$$

このとき、ブロック A または B の中心に原点を持つ座標系 Q における画素ごとの動きの推定値は、それぞれ $\hat{M}q + d_A$ 、および $\hat{M}q + d_B$ のように与えられる。なお、(7)式において見かけの平行移動ベクトルの差分を計算する過程で、アフィン変換の中心である原点 O への依存性が解消されていることに注意されたい。

図3 ブロック A, B および X の配置
Layout of the blocks A, B and X.

3. シミュレーション

シミュレーションの諸元を表1に示す。ここでは、一例として、図3に示すような位置関係にあるブロック A および B において観測される見かけの平行移動ベクトル $\mathbf{d}_A$ および $\mathbf{d}_B$ を用いてブロック X における $\hat{\mathbf{M}}$ を検出する場合の結果を示す。各ブロックにおける見かけの平行移動ベクトルは、探索範囲内で2乗誤差の総和を最小とするように定めるものとする。以下では、平行移動成分 $\mathbf{d}$ が存在しない場合の結果を示すが、平行移動成分 $\mathbf{d}$ が非零であっても、それによって見かけの平行移動の大きさがブロックマッチングの探索範囲を越えるようなことが生じなければ、検出精度（あるいは誤差電力）に対する影響は無視できることを予備的な実験を行って確かめてある。

見かけの平行移動ベクトルの検出誤りは、直ちに s および θ の計算値に大きな影響を与える。そこで、以下のシミュレーションでは、(10),(11)式より求めた s および θ を採用するか、それらを棄却して見かけの平行移動ベクトルのみを採用するかを選択を、誤差電力がより小さくなるように、ブロックごとに適応的に行っている。前者の場合、ブロック X における見かけの平行移動ベクトルを $\mathbf{d}_X$ とすると、同ブロック内でのアフィン変換の推定値は $\hat{\mathbf{M}}\mathbf{q} + \mathbf{d}_X$ で与えられる。後者の場合は、 $s = 1$, $\theta = 0$ と見なして、 $\mathbf{q} + \mathbf{d}_X$ を用いることになる。

テスト画像としては、画像のテクスチャや統計的な偏りの影響を避けるために、ランダム画像を用いた、本論文で用いたテスト画像の生成方法を図4に示す。ここに、入力のランダム系列は正規分布に従う擬似乱数系列⁶⁾である。アフィン変換 $I_{n-1}(\mathbf{p}) = I_n(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{p} - \mathbf{d})$ の計算において、標準化格子上的標本値を生成するために、双1

図4 ランダム画像系列の生成
Generation of random image sequence.

次補間を行っている。また、同図の LPF は、窓関数法を用いて設計した線形位相の FIR フィルタであり、インパルス応答の長さは 19×19 、標準化周波数で正規化した遮断周波数は 0.15 としている。信号電力は、フィルタ出力において、1 となるように正規化する。遮断周波数を高く設定し、より白色雑音に近いランダム画像を生成すると、見かけの平行移動ベクトルの検出精度が相対的に低下し、その結果として誤差電力が増加する傾向が見られた。しかし、この場合でも E_2/E_1 の相対値は、以下に示すシミュレーション結果と同様な傾向を示すことを実験的に確認している。

図5～図9に $s = 0.833 (\cong 1/1.2) \sim 1.2$ の場合の誤差電力 E_2 と $\theta (\geq 0)$ の関係を示す。同図には、比較のためブロックマッチング法による誤差電力 E_1 、およびブロック X の中心における見かけの平行移動ベクトルの理論値を $1/2$ 画素精度に丸めたものを用いたときの提案手法による誤差電力 (E_2^* で表す) も示してある。 E_2^* は、見かけの平行移動ベクトルがすべて誤りなく検出されたときに得られる実現可能な誤差電力の下限を表している。これらの誤差電力は、フレーム周辺における LPF の過渡的な応答の影響を避けるため、中央部分の 16×16 ブロック (256×256 画素) を対象として評価を行っている。図5～9から、おおむね $0.833 \leq s \leq 1.2$ の範囲の s に対しては $\theta = \pm 6^\circ$ の範囲で、また $0.9 \leq s \leq 1.1$ の範囲の s に対しては $\theta = \pm 12^\circ$ の範囲で、提案手法はブロックマッチング法の約 50% 以下の誤差電力を達成していることがわかる。逆に、この範囲を越えると、 E_2 と E_2^* の差が急速に増加することがわかる。NTSC 信号の毎秒フレーム数を想定すると、 $s = 1.2$ は毎秒約 237 倍のズームを表し、 $\theta = 12^\circ$ は毎秒 1 回転する映像を意味するから、提案手法によって検出可能な s および θ の範囲は、充分実用的なものと考えられる。

4. む す び

ブロックマッチング法を用いて検出される見かけの平行移動ベクトルの局所的な変化量を用いて、アフィン変換モデルに基づく動きパラメータを検出する簡易なア

表1 シミュレーションの諸元
Specifications of simulation

フレームサイズ	384×384 画素
ブロックサイズ	16 画素 × 16 画素
ブロックの中心間の間隔	32 画素
見かけの平行移動の検出精度	1/2 画素
見かけの平行移動の探索範囲	±32 画素

図 5 シミュレーション結果 ($s = 0.833$)
Simulation results ($s = 0.833$).

図 8 シミュレーション結果 ($s = 1.1$)
Simulation results ($s = 1.1$).

図 6 シミュレーション結果 ($s = 0.909$)
Simulation results ($s = 0.909$).

図 9 シミュレーション結果 ($s = 1.2$)
Simulation results ($s = 1.2$).

図 7 シミュレーション結果 ($s = 1.0$)
Simulation results ($s = 1.0$).

ルゴリズムを提案した。また、ランダム画像を用いたシミュレーション実験により、おおむね $0.833 < s < 1.2$ および $|\theta| < 6^\circ \sim 12^\circ$ の範囲で、誤差電力を約 50%以上低減できることを明らかにした。実動画画像へ適用した場合の性能評価が今後の課題である。

【文 献】

- 1) C. S. Fuh and P. Maragos: "Motion displacement estimation using an affine model for image matching", *Optical Engineering*, **30**, 7, pp.881-887 (1991)
- 2) 荒川, 安藤, 橋本: "アフィン変換を用いた動き補償予測の高速化", *映像学誌*, **51**, 7, pp.1114-1117, (1997)
- 3) 山田, 宮脇, 田崎, 都築: "アフィンマッチングによるカラー動画画像の動き抽出", *テレビ学技報*, VAI92-34 (1992)
- 4) 山田, 山本, 田崎, 都築: "単純なブロックマッチングを用いた回転・伸縮パラメータの検出法", *信学技報*, IT93-71 (1993)
- 5) 高木, 下田監修: 画像解析ハンドブック, p.427, 東海大学出版会 (1991)
- 6) 伏見正則: "乱数", 東京大学出版会, pp.65-67 (1989)
- 7) M. Mizuki, Y. Yamada, S. Tazaki and S. Tsuzuki: "Motion Compensation Using the Affine Transform Model Derived by Motion Vectors of Block Matching", pp.659-661, *Proc. Intern. Picture Coding Symposium* (1996)

やまの 芳郎 1974 年, 愛媛大学工学部電子工学科卒業。1976 年, 同大学院修士課程修了。1976 年, 愛媛大学工学部助手, 現在, 同助教授。この間, ベクトル量子化, 画像符号化, 信号処理, 画像処理等の研究に従事。工学博士。正会員。

つづき 伸二 1983 年, 愛媛大学工学部電子工学科卒業。1985 年, 同大学院修士課程修了。同年, 住友電気工業(株)入社。光 LAN 装置の開発に従事。1991 年, 愛媛大学工学部助手。現在, 同講師。この間, スペクトル拡散による通信方式, プロトコル等の研究に従事。工学博士。正会員。