複数候補ベクトルを用いた半画素精度 動きベクトル検出

野 中 雅 人[†], 正会員 松 尾 明 彦[†], 中 井 敏 久[†]

1. ま え が き

動画像符号化の標準のひとつに MPEG 2 がある。MPEG 2 は比較的高いビットレートをターゲットとしており、また放送への応用も考えられるため、CCIR Rec.601 以上の解像度の画像を扱う場合が多い。

94 年 3 月には MPEG 2 の DIS (Draft International Standard)¹⁾ が完成し、現在これに対応した LSI の開発も行われてきている。MPEG 2 の圧縮アルゴリズムは動き補償フレーム間予測と DCT によるハイブリッド符号化であり、MPEG 1・H.261 の符号化アルゴリズムと基本的には同じである。しかしながら、より高品質な画像を扱うため処理に要する演算量が非常に多くなっており、特に動き補償フレーム間予測における動きベクトル検出のための演算量の増加が、ハードウェア化の際の問題点となっている。また、MPEG 2 では動き補償に半画素精度の動きベクトルが扱え、より高能率な符号化が可能となっているが、単純に半画素精度の動きベクトル検出を「全点探索法」で行うと、さらに 4 倍の演算量が必要になる。

このため、MPEG 2-Test Model 4 (以後 TM 4 と記す)²⁾ では、第 1 段階で 1 画素精度の探索を行い、第 2 段階では第 1 段階で検出したベクトルの周辺のベクトルだけを半画素精度で探索することにより、演算量の削減を行っている。しかしながら、ハードウェアの小型化の要求から、さらなる演算量の削減が求められている。

すでに、演算量を削減しても動きベクトルの誤検出

を少なくする方式として、第 1 段階でサブサンプルした解像度の低い画像の全点探索により複数の候補ベクトルを検出し、第 2 段階で第 1 段階で検出した複数の候補ベクトルのみに対し、元の解像度で画像の動き検出を行う方式も提案されている³⁾。

本稿では、第 1 段階で解像度の低い画像の 1 画素精度の探索により複数の候補ベクトルを検出し、第 2 段階で第 1 段階で検出した複数の候補ベクトルの周辺ベクトルのみに対し、元の解像度の画像で半画素精度の動きベクトル検出を求める方式を提案し検討する。

計算機シミュレーションの結果は、提案方式によれば TM 4 の 1/3 の演算量で、TM 4 と同等の特性が得られることを示している。

2. 半画素精度の動きベクトル検出

2.1 全点探索による動きベクトル検出

一般に、動きベクトルはブロックマッチングを基本とした方式によって検出される。

「全点探索法」とは、現フレームの基準ブロック ($M \times N$ 画素) と、前フレームのベクトル探索範囲内に存在するすべての基準ブロックと同じ大きさの参照ブロックとを比較(ブロックマッチング)し、類似度の最も高い参照ブロックと基準ブロックとの位置関係(動きベクトル)を求める方式である⁴⁾。

現フレームの画素を $X(m, n)$ 、前フレームの画素を $Y(m, n)$ とすると、類似度の評価は次式で示される絶対誤差 $D(i, j)$ で行われることが多い。

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |X(m, n) - Y(m+i, n+j)| \quad (1)$$

ここで、 $D(i, j)$ が最小となる場合のベクトル (i, j) が動きベクトルになる。

半画素精度の動きベクトル検出は、前フレーム画像において半画素位置のデータを、隣接する整数画素位

[†] 沖電気工業株式会社 関西総合研究所
“Half-pel Motion Vector Search by Plural Candidates”
by Masato Nonaka, Akihiko Matsuo and Toshihisa Nakai
(Oki Electric Industry Co., Ltd, Osaka)

置のデータの平均で生成し、これと現フレームの整数画素位置のデータを(1)式に入力することで行う。

1個のベクトルの類似度の評価には差分、累計および絶対値演算が行われ、これらの演算量は2.5回の加算演算に相当する。(1)式の評価を行うベクトル(以下、試行ベクトルと呼ぶ)の数を S 個とすると、 $M \times N$ 画素サイズのブロックの動きベクトルの検出には $2.5 \times M \times N \times S$ 回の加算に相当する演算量が必要となる。ベクトル探索範囲を ± 15 画素(ライン)とすると試行ベクトル数は3844個になるため、ブロックサイズが 16×16 画素の場合、半画素精度のベクトル検出に必要な演算量は2,460,160回の加算相当になる。1フレームの画像サイズが704画素、480ラインで、フレームレートが30 Hzとすると、これをリアルタイムに処理する動きベクトル検出器には約100 GOPSの演算能力が必要になり、この演算量が1 chipのLSIでの実現を困難にしている。

2.2 MPEG 2-Test Modelの動きベクトル検出

前節で説明したように、半画素精度動きベクトル検出には膨大な演算量が必要であるため、TM 4では「2段階検出法」〔方式1〕を用いて演算量の削減を図っている。

水平方向の半画素精度ベクトル($i+0.5, j$)に対する類似度の評価演算を考えると、(1)式は次式のようになる。

$$\begin{aligned} D(i+0.5, j) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |X(m, n) - Y(m+i+0.5, n+j)| \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |X(m, n) - \frac{1}{2}(Y(m+i, n+j) \\ &\quad + Y(m+i+1, n+j))| \end{aligned} \quad (2)$$

一般にフレーム内の画素間の相関は強い⁵⁾

$$Y(m+i, n+j) \simeq Y(m+i+1, n+j) \quad (3)$$

といえる。したがって、整数画素精度の探索で類似度が高いとされたベクトルから半画素ずれたベクトルの類似度は高くなると考えられる。

この性質を利用し、TM 4では第1段階では整数画素精度のベクトル探索を行い、第2段階ではこの中で最も類似度の高いベクトル(候補ベクトル)の周辺8点に対し半画素精度の動きベクトル評価を行い、最後に候補ベクトルを含めた9個の試行ベクトルの中で、最も類似度の高いベクトルを動きベクトルとして出力している。TM 4を実現するための演算量は、前節と同じ条件(ブロックサイズ、探索範囲)の場合、第1および2段階の試行ベクトル数の合計が969個($31^2 + 8$ 個)となり、「全点探索法」と比較して約25%の演算量と

なる。

しかしながらLSI化を考えた場合、この演算量は依然大きな値であり、さらなる削減が望まれる。また、2段階検出では第1段階の他の試行ベクトルの評価値が候補ベクトルの評価値と大きな差がない場合には、半画素位置のデータを隣接する画素((2)式、 $Y(m+i+1, n+j)$)との平均で生成するため、半画素精度での動きベクトル検出では、候補ベクトル以外のベクトルの近傍の方が、類似度が高くなることが考えられる。このような時、真の動きベクトル(全点探索で求まる動きベクトル)を検出することができなくなり、符号化効率に影響してしまう。

3. 複数候補ベクトルによる多段階検出

3.1 間引きによる縮小画像を使用した方式

「多段階検出法」における動きベクトルの誤検出は候補ベクトルを1本に絞っていることが原因であり、これは候補ベクトル数を複数にすることで改善できる。

今回、次に示す方式〔方式2〕について検討を行った。

- 第1段階：1画素精度の動きベクトル検出を行い、類似度が高いと評価された複数のベクトルを候補ベクトルとして選択する。
- 第2段階：候補ベクトル周辺に対し半画素精度の動きベクトル検出を行い動きベクトルを得る。

以上の検出動作を図1に示す。

〔方式2〕では候補ベクトルを複数にしているため、第1段階での動きベクトル検出を簡略化しても第2段階で補償されると考えられる。そこで、第1段階の検

図1 候補ベクトルを複数にした方式
Vector search by plural candidates.

出にはブロック内の全画素を用いる〔方式2a〕, サブサンプリングにより水平方向の画素数を1/2に削減する〔方式2b〕, 同じく水平垂直方向共に画素数を1/2に削減する〔方式2c〕を比較する。

画素間の相関が強い場合, 第2段階における評価結果は基本的に第1段階の評価に準じると考えられるため, 第1段階での評価値の最小値より大きく外れる評価値となった試行ベクトルの周辺に, 真の動きベクトルが存在する可能性は低い。したがって, 第1段階の動きベクトル検出の評価値 $D(i, j)$ の最小値を元に関値を決め, 評価値 $D(i, j)$ が閾値以下になるベクトルをすべてを候補ベクトルにすれば, 最小値に近い評価値を持つ試行ベクトルをすべて候補ベクトルにすることができる。

しかしながら, 以上の方法では最悪の状況を考えると, 第1段階の試行ベクトルすべてを候補ベクトルにすることになり現実性がなくなる。また, 閾値が決定してから候補ベクトルを求めるため, 制御が複雑になるという問題も発生する。このため, 本稿では第1段階で類似度が高いとされた上位数個のベクトルを候補ベクトルに選ぶ方式を採用する。

〔方式2a~c〕とTM4に記述されている方式〔方式1〕とをシミュレーションにより比較した。

特性評価は, それぞれの方式で検出した動きベクトルを(1)式に当てはめ, 評価値 $D(i, j)$ を求めることで行った。評価値が小さい方がより類似度の高い動き

ベクトルを検出していることになる。これ以外に演算量の比較も行った。

シミュレーション条件を表1に示す。

候補ベクトル数の違いによる検出特性の変化を図2(a)~(c)に示す。ここで, 「全点探索法」の時の検出結果を〔方式0〕とし, 〔方式1〕および〔方式2〕と比較して示す。〔方式1〕は〔方式2a〕で候補ベクトルが1個の場合にあたる。図2で, 縦軸は(1)式による評価最小値の1フレーム内の全マクロブロックにわたる平均, 横軸は候補ベクトル数を表している。

図2より, 候補ベクトル数を増加させることで評価値が小さくなり, より類似度の高い動きベクトルを検出していることがわかる。特に, 第1段階でサブサンプリングを行っている〔方式2b〕, 〔方式2c〕では改善効果大きい。これは, 処理の簡略化により第1段階の検出結果が必ずしも正しいものとはいえなくなり, 第2段階で補償される場合が多くなっていること

表1 シミュレーション条件
Simulation parameters.

入力画像	Flower garden, Football, Susie
処理フレーム	1→2 frame (各シーケンス共)
候補ベクトル数	1, 2, 4, 8, 16 個
評価方法	1 フレームすべてのマクロブロックの評価値の平均

図2 候補ベクトル数による特性変化
Performance of method 2.

を示している。ブロックマッチングに用いる画素数が少なくなるに従い、この傾向は強くなっている。候補ベクトル数を増加させるに従い各方式の差は小さくなっており、複数の候補ベクトルを持つことで、サブサンプリングが原因の誤検出が抑えられている。また、候補ベクトル数を増加させるに従い、改善効果が小さくなっていることがわかる。これは、第1段階における類似度の順位の高い候補ベクトルの近傍に、真のベクトルの存在する場合が多いということを示しており、整数画素精度の探索で類似度が高いとされたベクトルから、半画素ずれたベクトルの類似度は高くなるという前章の推測に沿った結果である。

表2に、〔方式1〕、〔方式2〕について演算量をまとめて示す。

本シミュレーションにより処理を1/2~1/3程度簡略化しても、候補ベクトルを複数選ぶことで、TM4〔方式1〕と同等以上の特性を得ることができることを確認できた。

3.2 4画素平均による縮小画像を使用した方式

〔方式2c〕で候補ベクトル8個のときの各ブロックの評価最小値を図3に示す。この図において、Z軸は〔方式2c〕による各ブロックの評価最小値と〔方式0〕による評価最小値との差分、XY平面は画像のフレームを表している。

候補ベクトルを増加させることで、ほとんどのブロックで〔方式0〕と同じ評価最小値になるが、一部のブロックでは依然大きな差が現れている。前節では、第1段階の動きベクトル検出に単純な間引きによるサブサンプリング画像を用いていた。図3で評価最小値に大きな差が現れているブロックでは、サブサンプリングで失われた画素によって差分が発生していた。得ら

れた候補ベクトルにはサブサンプルで残った画素の情報しか含まれていないため、候補ベクトル数を増加させることによる改善効果は期待できない。

そこで、第1段階で隣接する4画素の平均による縮小画像を用いる方式〔方式3〕を検討した。4画素平均で縮小画像を生成するため各画素の特徴的な情報は失われるが、すべての画素情報を含んでいるため、図3に現れているような大きな差分の発生は抑えられると考えられる。また、〔方式3〕では前フレーム画像に対する縮小画像の生成は半画素位置のデータ生成と同じであるため、現フレームに対してのみ縮小画像を生成することになり、ハードウェア上の負担の増加は少ない。

〔方式3〕について、前節と同条件でシミュレーションを行った。その結果を図4に示す。図4は図3と同様に候補ベクトル数が8個の時の結果を各ブロックについて記したものである。

図4から、〔方式3〕では〔方式2c〕で〔方式0〕との評価最小値の差が大きくなっていたブロックが〔方式0〕とほぼ同じ値となり、改善されていることがわかる。一方、平均により各画素の特徴が失われることで、僅かに劣化しているブロックも現れている。次

図3 ブロック毎の評価値(方式2c)
Criterion of each block. (Method 2c)

図4 ブロック毎の評価値(方式3)
Criterion of each block. (Method 3)

表2 各方式における演算量 (加算回数)
Number of operations for each method.

	候補ベクトル数					
	0 (個)	1	2	4	8	16
方式0	(回) 2,460,160 (397%)	—	—	—	—	—
方式1, 2a	—	620,160 (100%)	625,280 (101%)	635,520 (102%)	656,000 (106%)	696,960 (112%)
方式2b	—	—	319,040 (51%)	330,560 (53%)	353,600 (57%)	399,680 (64%)
方式2c	—	—	165,280 (27%)	176,800 (29%)	199,840 (32%)	245,920 (40%)

図 5 方式 3 のベクトル検出特性
Performance of method 3.

に、フレーム全体の特性を図 5 に示す。〔方式 3〕では演算量を縮小画像を用いない〔方式 2a〕の約 1/3 に削減したにもかかわらず、ほぼ同等の特性が得られている。

4. む す び

本稿では、半画素精度の動きベクトル検出で「2 段階検出法」を用いる場合において、第 1 段階のベクトル探索に縮小画像を用い、ここで選択する候補ベクトルを複数にする方式を提案し、以下のことを確認した。

- 第 1 段階のベクトル検出にサブサンプルによる水平方向 1/2 縮小画像を用いた場合、TM 4 の 50～60% の演算量で TM 4 よりも類似度の高いベクトルを見つけることができた。
- 第 1 段階のベクトル検出に平均値で作成した 1/4

縮小画像を用いた場合、TM 4 の 30% の演算量で TM 4 より類似度の高いベクトルを検出することができた。

今回は、単純に評価値の小さい上位数個のベクトルを候補ベクトルとしたが、評価値およびベクトルの値から候補ベクトルを選択することで、より効率的な動きベクトル検出が可能であると思われる。また、今回はフレーム単位の動きベクトル検出に絞って検討を行ったが、今後フィールド単位の検出への適応も検討する必要がある。

〔参 考 文 献〕

- 1) ISO-IEC/JTC 1/SC 29/WG 11: "ISO/IEC 13818-2 Draft International Standard" (1994)
- 2) ISO-IEC/JTC 1/SC 29/WG 11: "Test Model 4 (Draft)" (1993)
- 3) 三宅, 堅田ほか: "動きベクトル検出方式の簡略化", 1993 年画像符号化シンポジウム, pp. 151-152 (1993)
- 4) 伊東晋, 竹村裕夫監修: "映像機器におけるデジタル信号処理技術", pp. 35-39, トリケップス (1990)
- 5) 吹抜敬彦: "画像のデジタル信号処理 増補版", pp. 127-132, 日刊工業新聞社 (1986)
- 6) 仙田裕三: "半画素精度動きベクトル探索の簡略化方式", 1994 年信学春大, D-339 (1994)

の なか まさと
野中 雅人 昭和 62 年、愛媛大学工学部電子工学科卒業。同年、沖電気工業(株)に入社。以来、テレビ電話・テレビ会議システムおよび画像処理用 LSI の研究開発に従事。

まつ お あきひこ
松尾 明彦 平成 3 年、神戸大学工学部システム工学科卒業。同年、沖電気工業(株)に入社。以来、動画像符号化および画像処理関連の研究開発に従事。正会員。

なか い としひさ
中井 敏久 昭和 58 年、大阪府立大学工学部電気工学科卒業。同年、沖電気工業(株)に入社。平成元年、南カリフォルニア大学修士課程修了。情報理論・通信理論応用および信号処理に関する研究開発に従事。