

3次元外積展開による 動画像データ圧縮

志水 安起良 村上 純 田所 嘉昭

豊橋技術科学大学・工学部・情報工学系

近年、TV電話や放送用TV等の動画像処理における画像デジタル化に伴い、扱うデータ量が膨大となり、通信・記録などの際におけるデータ圧縮技術の要求が高まっている。このような要求に基づいて、動画像データ圧縮の研究が進められている。現在のところ動画像データ圧縮技法に関する標準化が検討されている段階であるが、基本的には、動き補償+離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform : DCT) による手法が標準的に採用されている。我々は、3次元外積展開を利用した、動画像データ圧縮法の検討を行っている。この手法は、動画像を3次元配列として扱い、この配列をベクトルの外積による展開式を用いて近似する手法である。今回、標準画像を利用して疑似的に作成した動画像を対象として、3次元外積展開法と動き補償+DCT法を適用し、データ圧縮を行い、圧縮率と計算時間の比較をしたので報告する。

Data Compression of Moving Image by 3-Dimensional Outer Product Expansion

Akira SHIMIZU

Jun MURAKAMI

Yoshiaki TADOKORO

Department of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering,
Toyohashi University of Technology

We propose a new method for the data compression of the moving image. This method uses the 3-dimension (3-D) outer product expansion of a 3-D array. In this paper, we discuss our method and the discrete cosine transform (DCT) method, which is the standard data compression technique, for the efficiency of the compression and the computation time.

1. まえがき

近年、TV電話や放送用TV等の動画像処理における画像デジタル化に伴い、扱うデータ量が膨大となり、通信・記録の際におけるデータ圧縮技術の要求が高まっている。このような要求に基づいて、動画像データ圧縮の研究が進められている¹⁾。現在のところ動画像データ圧縮技法に関する標準化が検討されている段階であるが、基本的には、動き補償+離散コサイン変換(Discrete Cosine Transform: DCT)による手法が採用されている²⁾。この手法では、動き補償を行うことにより動画像の高効率なデータ圧縮が可能となるが、動きベクトルの検索・動き補償予測など複雑な計算が必要である。

我々は、3次元外積展開を利用して、動画像データ圧縮法の検討を行っている。この手法は、動き補償などを考えずに、動画像を3次元配列として扱い、この配列をベクトルの外積による展開式を用いて近似する手法である³⁾。この手法は次のような特徴を持っている⁴⁾。①動きの比較的単調な動画像については、効率の良いデータ圧縮が期待できること、②画像圧縮・復元に要する計算時間が、低ビットレートでは高速に行えること、③画像復元においては、基本的にベクトルの乗算のみで行うことができ、ハード化が容易であることなどである。

今回、標準画像を利用して疑似的に作成した動画像に対して、3次元外積展開法と動き補償+DCT法とを適用し、データ圧縮を行い、圧縮率および計算時間の比較を行った。比較の結果、3次元外積展開法は、動き補償+DCT法に比べて、データ圧縮率では劣るものの、画像圧縮・復元の計算時間では、低ビットレート(圧縮で0.5bit/pixel以下、復元で1.0bit/pixel以下)になるほど短縮できることがわかった。

2. 3次元外積展開法

2.1 特異値分解の計算法

静止画像行列Aは特異値分解により、

$$A = U \Lambda V^t \quad (1)$$

と展開できる。ここでU、V^tはそれぞれ直交行列およびその転置であり、 Λ は対角行列で、対角成分は特異値である。特異値を λ_n とすると、式(1)は、

$$A = \sum_{n=1}^r \lambda_n \vec{u}_n \vec{v}_n^t, \quad (2)$$
$$(\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_r)$$

と表すことができる。ここで \vec{u}_n 、 \vec{v}_n は行列U、Vの列ベクトルであり、特異ベクトルと呼ばれる。またrは行列Aのランクである。式(2)は行列Aが特異ベクトル \vec{u}_n と \vec{v}_n の外積と特異値 λ_n との積によって構成されるランク1の行列r個の和に展開されることを意味する。実際には、大きいほうから数個の特異値と特異ベクトルで行列Aを近似することができる⁵⁾。

2.2 3次元外積展開の計算法

式(1)の特異値分解はベクトルの外積を用いて

$$A = \sum_{n=1}^r \lambda_n (u_n \otimes v_n) \quad (3)$$

と表現できる。ただし、外積 $u_n \otimes v_n$ は(i, j)成分が

$$[u_n \otimes v_n](i, j) = u_n(i) v_n(j)$$

の行列を表している。特異値分解を3次元配列に拡張すると、3次元配列 A_3 は式(3)のように表現できる。

$$A_3 = \sum_{n=1}^R \lambda_n (u_n \otimes v_n \otimes w_n), \quad (4)$$
$$(\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_R)$$

ここで、外積 $u \otimes v \otimes w$ は(i, j, k)成分が

$$[u \otimes v \otimes w](i, j, k) = u(i) v(j) w(k)$$

の3次元配列である。

3次元外積展開は与えられた3次元配列を、3つのベクトルの外積で構成される3次元配列の和で表現していることがわかる。したがって、2.1の場合と同様に式(3)を適当な項数 m で打ち切って、

$$A_3 \approx \sum_{n=1}^m \lambda_n (u_n \otimes v_n \otimes w_n) \quad (5)$$

によりもとの配列を近似することができる⁶⁾。

2.3 べき乗法による3次元外積展開の計算

3次元外積展開の計算方法は一般に、非線形最適化法を用いて行われる。この手法は通常、膨大な計算量を必要とするので、大量のデータを扱う画像処理に適用するのは困難である。

我々は、べき乗法を応用して効率的に3次元外積展開を計算する手法を開発している²⁾。この手法を用いることにより計算時間を大幅に短縮することができたので、画像処理への応用が可能となった。

以下にべき乗法を用いた特異値分解と3次元外積展開の計算法を簡単に述べる。

①べき乗法による特異値分解の計算法

行列 A の特異値分解は式(2)で定義した。第1特異ベクトル \vec{u}_1, \vec{v}_1 は次のようにして計算する。初期ベクトル $\vec{u}_1^{(0)}, \vec{v}_1^{(0)}$ を任意に選んで、

$$\vec{v}_1^{(1)} = A \vec{u}_1^{(0)}, \quad (6)$$

$$\vec{u}_1^{(1)} = A^t \vec{v}_1^{(0)} \quad (7)$$

を計算し、左辺のベクトルについて正規化を行い、これらを次式のように新たに $\vec{v}_1^{(0)}, \vec{u}_1^{(0)}$ とする。

$$\vec{v}_1^{(0)} = \frac{\vec{v}_1^{(1)}}{\|\vec{v}_1^{(1)}\|} \quad (8)$$

$$\vec{u}_1^{(0)} = \frac{\vec{u}_1^{(1)}}{\|\vec{u}_1^{(1)}\|} \quad (9)$$

これらのベクトルを用いて、再び式(6)、(7)の計算を行う。以上の計算を反復ベクトルの変化が十分小さくなるまで繰り返すと、第1特異ベクトル \vec{u}_1, \vec{v}_1 が求められる。2番目以降の特異ベクトルについても同様に求められる。また特異値は、式(6)、(7)の計算から $\|\vec{v}_1^{(1)}\|$ または、 $\|\vec{u}_1^{(1)}\|$ として与えられる。

②べき乗法による3次元外積展開の計算法

式(4)で定義された3次元配列 A_3 の外積展開で、ベクトル $\vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1$ は次のようにして求める。初期ベクトル $\vec{u}_1^{(0)}, \vec{v}_1^{(0)}, \vec{w}_1^{(0)}$ を任意に選んで、

$$\begin{aligned} E &= A_3 \vec{w}_1^{(0)}, \\ F &= A_3^{(1)} \vec{u}_1^{(0)}, \\ G &= A_3^{(2)} \vec{v}_1^{(0)} \end{aligned} \quad (10)$$

により、行列 E, F, G を構成する。ただし $A_3^{(1)}, A_3^{(2)}$ は3次元配列 A_3 の添え字のローテーション

$$\begin{aligned} A_3^{(1)}(i, j, k) &= A_3(k, i, j) \\ A_3^{(2)}(i, j, k) &= A_3(j, k, i) \end{aligned} \quad (11)$$

を意味する。行列に E, F, G に対してそれぞれ①の特異値分解の手法を応用すれば、ベクトル $\vec{u}_1, \vec{v}_1, \vec{w}_1$ および λ_1 を求めることができる。第2項以降は、もとの配列と得られた第1項目との残差の配列について、同様の操作を行うと計算することができる。

2.4 動画データ圧縮への応用

画像データ圧縮への応用では、動画を3次元配列とみなして、この配列に対して3次元外積展開を適用する。具体的には、画像の1 pixelを配列の1要素と考える。式(5)を用いれば、この配列は、3つのベクトルの外積で構成された3次元配列と特異値の組、 m 個の和で表現できる。したがって、もとの配列のサイズを $M \times N \times L$ とすると、データ量を $m(M+N+L+1)$ とすることができる。

実際の画像データに適用してみると、主要な情報

は展開した配列の初めの数項に現れるので、上述の手法が有効である。画像データ圧縮では、多少の画質劣化を犠牲にして、圧縮率の向上を図るのが普通である。3次元外積展開も同様な考えに基づいてデータ圧縮を行う。

3. シミュレーション結果

3.1 対象とする動画像の構成

シミュレーションに用いた動画像は、標準画像により疑似的に作成した画像を用いた。標準画像としては、

- ・Girl (図1.1に示す128×128画素、256階調のモノクロ画像)における顔周辺部分の画像
- ・Plant (図1.2に示す256×256画素、256階調のモノクロ画像)における山周辺部分の画像

である。TV電話等の通信では顔画像が対象となるのでGirl画像を、またその他の画像の例として風景画像をとりあげ、Plant画像を用いた。動画像は、標準画像に32×32のウィンドウをかけ、そのウィンドウを少しずつ動かした時の画像を順次取り込んで作成した。ウィンドウの移動量は、1画素ずつとして32枚の画像から成る動画像とした。動画像の作成方法を図に描いたものを図2に示す(例として縦移動の場合)。動画像の動きの種類は、縦移動、斜め移動、ズームの3つとした。



図1.1 標準画像1 (Girl)

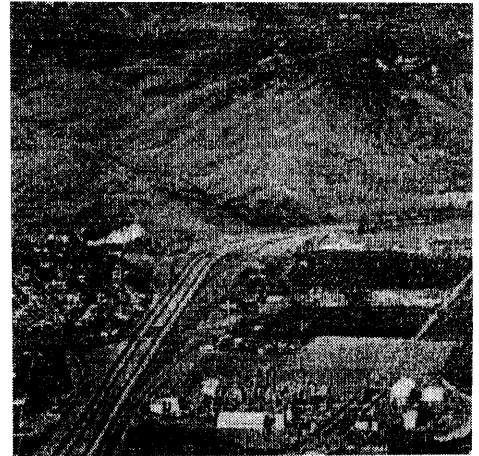


図1.2 標準画像2 (Plant)

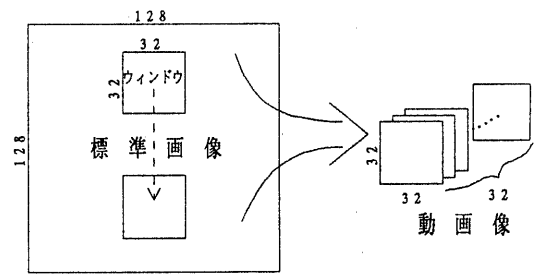


図2 動画像の作成方法(縦移動の例)

3.2 データ圧縮率の比較

3.1で作成した3つの動きパターンの動画像に、3次元外積展開法と動き補償+DC T法とを適用したときのデータ圧縮率について比較を行った。その結果をグラフに描いたものを図3、図4に示す。グラフは、横軸にビットレート、縦軸にSN比をとった。SN比(SNR)の計算は

$$SNR = 20 \log \frac{255}{(MSE)^{1/2}} \quad (12)$$

で行った。ただし、MSEは1画素あたりの2乗誤差である。また、3次元外積展開法において、動きのパターンによるデータ圧縮率の違いを比較したものを図5に示す。

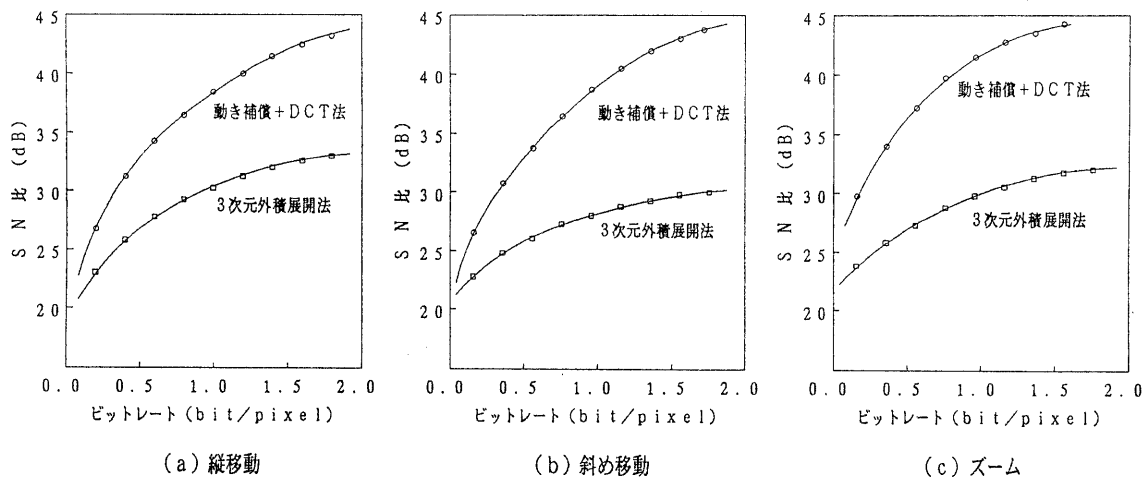


図3 Girl 画像から構成した動画のデータ圧縮率の比較

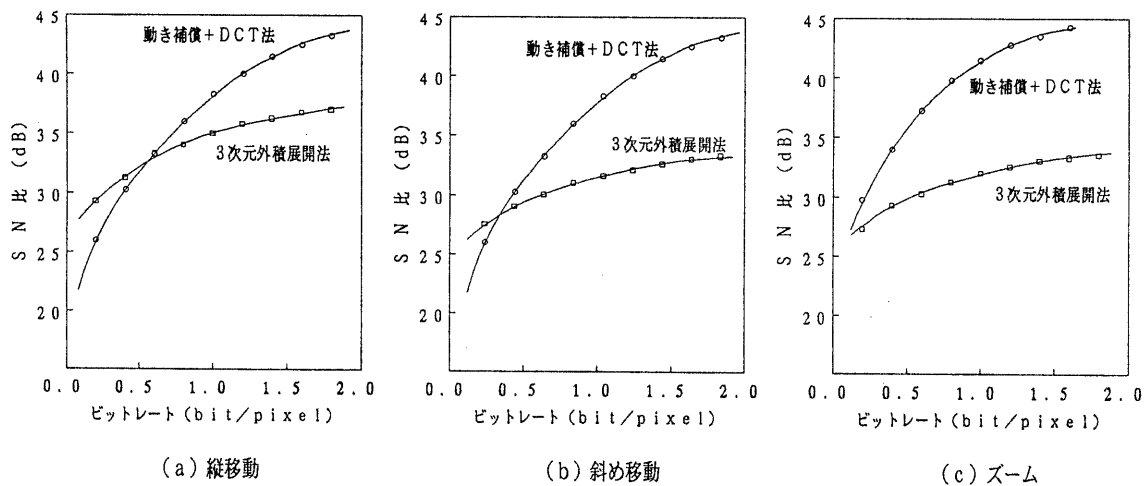


図4 Plant 画像から構成した動画のデータ圧縮率の比較

3次元外積展開法と動き補償+DCT法との比較では、全体的に後者を用いた方が良好なデータ圧縮率が得られる。その差は、Girl画像から構成した動画画像の場合、ビットレートが大きくなるにしたがって大きくなり、ビットレートが0.0~2.0bit/pixelのとき、数dB程度から15dB程度で、斜め移動のときが最も大きくなる。Plantの画像から構成した動画画像の場合もほぼ同様の結果であるが、画像的に低周波成分で構成されていて単純なので、低ビットレート（縦移動で、0.6bit/pixel以下）においては3次元外積展開法の方が圧縮率は良くなった。単純な画像の移動は式(5)の展開式では3次元的に冗長性が大きくなり、少数項で近似できるので、データ圧縮率が向上すると考えられる。

図5からわかるように、3次元外積展開法においては、3つの動きパターンのうち、縦移動の動画画像は、最も良好なデータ圧縮率が得られ、ズームに対して約1.0dB、斜め移動に対して約4.0dB程度良い圧縮率となる。3次元外積展開は、3次元配列を3つのベクトルの積に分解する手法であるから、縦（または横）方向の移動の情報はベクトル \vec{u}_n と \vec{w}_n （または \vec{v}_n と \vec{w}_n ）にのみ現れる。したがって、全体的には式(5)の展開式は少数項で近似できる。

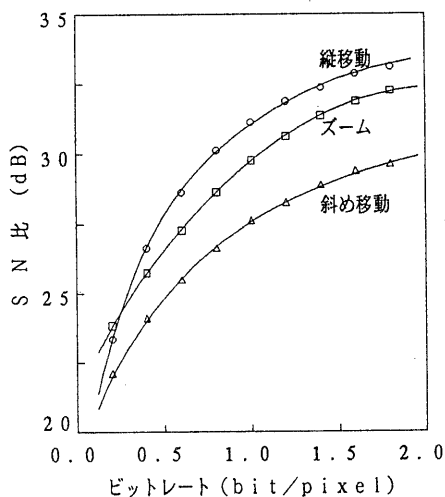


図5 3次元外積展開によるデータ圧縮率

3.3 画像圧縮に要する計算時間の比較

3次元外積展開法と動き補償+DCT法の画像圧縮に要する計算時間を測定した。CPUはSUN4C_60で計算を行った。結果を図6に示す。

比較の結果、0.5bit/pixel以下では、3次元外積展開法の方が計算が速いことがわかった。動き補償+DCT法では、計算時間がビットレートにほとんど依存しない。それに対して、3次元外積展開法では、ビットレートが低いと式(5)の近似項数が少なくすむので、計算は短時間で行うことができる。

3次元外積展開法によるデータ圧縮では、図3から0.5bit/pixel付近では約25dB (Girl画像から構成した動画画像) とかなり低い値となっている。しかし、ビットレートが低くなるに応じて速い計算時間が得られるので、画質の要求の低い画像を対象とした応用には有効な手法であると考えられる。

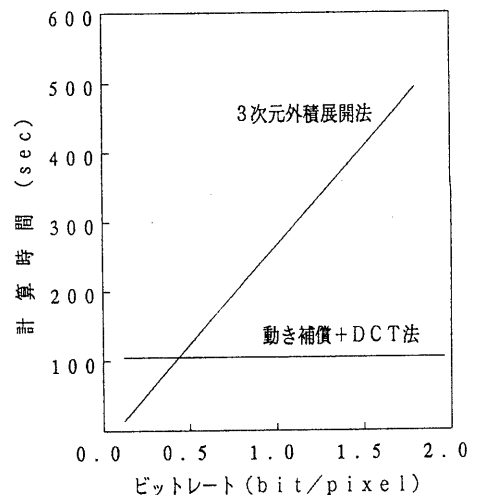


図6 画像圧縮に要する計算時間

3.4 画像復元における計算時間の比較

3次元外積展開法と動き補償+DCT法の画像復元における計算時間を測定した。CPUは同様に、SUN4C_60を用いた。結果を図7に示す。

比較の結果、1.0bit/pixel以下では、3次元外積展

開法の方が計算が速いことがわかった。動き補償+DCT法の画像復元における計算時間は、画像圧縮における計算時間と同様に、ビットレートにほとんど依存しない。それに対して、3次元外積展開法における画像復元は、ビットレートが低くなるにしたがって高速に復元できるので、3.3と同様に、画質の要求の低い画像を扱う場合は有効である。

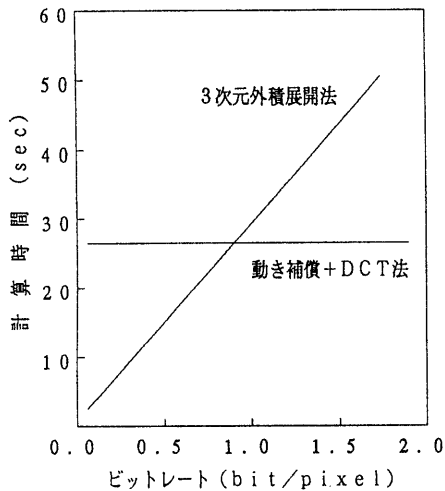


図7 画像復元に要する計算時間

4. むすび

標準画像を用いて疑似的に作成した動画像に対して、3次元外積展開法と動き補償+DCT法とを適用し、データ圧縮の比較を行った。3次元外積展開は、圧縮率では全般に、動き補償+DCT法に劣るが、単純な画像を対象とした場合は、低ビットレート(0.5bit/pixel以下)において比較的良好なデータ圧縮率が得られることがわかった。また、移動方向に関しては縦横方向に移動する画像の方が圧縮率は良いことがわかった。

画像圧縮・復元における計算時間は、動き補償+DCT法に比べて、低ビットレート(圧縮で0.5bit/pixel以下、復元で1.0bit/pixel以下)になるほど高速になる。しかし、0.5bit/pixel付近では、SN比が約25dBと画質的に低い値である。したがって、

3次元外積展開法は、画質的な要求よりも高速な計算が必要とされる画像処理の応用に向いていると言える。べき乗法による3次元外積展開の計算法は決して高速とは言えない。しかし、入力画像に応じた初期ベクトルを与れば、より高速な計算が期待できるので、圧縮時間はさらに高速化になると考えられる。

復元における計算では、基本的にベクトルの乗算のみで行うことができるので、ハード化が容易であると考えられる。また、画像の切り出し等の処理もベクトルの要素を指定するだけで容易に実行できるので便利である。

今後は、色々な動画像に対して評価を行うとともに、比較的単純な画像の高速な圧縮法として、また、再構成後の画像の切り出しや分割などの処理の容易な手法としての応用を考える予定である。

参考文献

- 1) A. K. Jain : Image Data Compression : A Review, Proc. IEEE, Vol. 69, No. 3, pp. 349-389(1981).
- 2) 画像データ圧縮の理解と応用, インターフェース, No.175, p.132-p.231, CQ出版(1991).
- 3) 村上純, 田所嘉昭: べき乗法による3次元配列の外積展開の計算, 情報処理学会研究報告, NA-39-3(1991).
- 4) 志水安起良, 村上純, 田所嘉昭: 3次元外積展開による画像データ圧縮の評価, 信学春全大, D-264(1992).
- 5) H. C. Andrews and C. L. Patterson : Singular Value Decomposition(SVD) Image Coding, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-24, pp. 425-432(1976).
- 6) 斉藤隆弘, 小松隆, 原島博, 宮川洋: 多次元外積展開による静止画像の符号化, 信学論, Vol. J68-B, No. 4, pp. 547-548(1985).