Title: ICA-DCT ハイブリッド符号化における，選出基底と適用領域の最適化

Abstract: JPEGに採用されている離散コサイン変換（DCT）は汎用的な基底により画像が必要とする統計的な特徴を抽出と保存できるが、ビットレートが低くなると視覚的な歪みが発生するため、人の視覚を考慮されていないと言える．そこで、人の視覚が扱う特徴を抽出と保存できる独立成分分析（ICA）と併用することで画像と人の両方が必要とする特徴の保存を目的としたDCT-ICAハイブリッド手法が提案されている．しかし，DCTとICAを併用するためには，DCTまたはICAを適用する領域の分類や，デコーダーへ送るICA基底のエントロピーの削減が課題となっている．この課題を解決するために，我々はICA基底を組み合わせることに着目した手法を提案した結果，従来手法を適用できない実用的なビットレートにおいてビットレートを削減できることが分かった．さらに，様々なビットレートの結果を比較できるようになったため，従来手法では分からなかったDCT-ICAハイブリッド符号化手法の特性が浮き彫りになった．

1. Introduction

国際的な画像符号化方式であるJPEGなどに採用されている離散コサイン変換（DCT）は，エネルギー圧縮を伴う直行変換に基づいた有効な方式の1つである．[1]どのような画像に対しても同一のDCT基底が適用され，Qテーブルにより高周波情報が削除される。そのため，画像が必要とする統計的な特徴を持つ領域の保存に有効である．しかし，低ビットレートではモスキートノイズやブロックノイズなどの視覚的な歪みが問題となることが知られている。ノイズが発生するということは、視覚的に必要となる情報が不足するためであり、DCTにより必要な情報までもが削除されていると考えられる．一方で，人間の初期視覚系をモデル化したスパースコーディングは，係数のスパース性に着目することでわずかな基底でブロック内の特徴を保存できる．[2,3] そのスパースコーディングの1つに独立成分分析（ICA）がある．ICAを画像に適用することで，人の視覚が扱う特徴を抽出できることが示唆されている[4,5]．そのため，DCTでは保存できない特徴を持つ領域にICAを適用することで，DCTでは困難であった人間が必要とする情報を保存できると考えられる．したがって，我々は，画像と人間の両方が必要とする情報の保存を目的としたDCT-ICAハイブリッド符号化を提案している．[6~8]　具体的には，入力画像の各領域の特徴は画像と人間どちらが必要としている情報なのかを分類し，DCTまたはICAを適用することで，目的の情報を保存することができると考えられる．画像内の領域の分類は，DCTのまたはICAを適用したときのビットレートを比較することで行われる．この時，各領域のビットレートは，DCTはQテーブルにより制御されるが，ICAでは使用するICA基底の選択により制御される．ここで，適切な基底が選択されなければビットレートは増加し，正しい分類を行えないため，目的の情報を保存できない可能性がある．そこで，極端に低いビットレートは，領域で使用される基底が少数であることに着目し，領域と基底間の類似性に基づいて基底を選択することで，目的の分類を行うことができた[6,7]．しかし，ビットレートが増加すると複数個のICA基底を組み合わせて領域の情報を保存する場合がほとんどである[8]ため，基底間の組み合わせが考慮されていない手法は実用的なビットレートにおいては適切でないと我々は考えている．

一方、ICAにより求められる基底群は入力画像毎に異なるため、エンコーダーとデコーダーで共有することが想定される。共有される情報は，画像全体で使用されるICA基底の種類に対応して増加するため，ICAを用いた符号化はビットレートが増加してしまう課題がある．そこで，各領域の画質を最大にできるICA基底達を評価し，上位の基底のみを使用することで，付加情報の削減がされている[7]．しかし，領域の画質を最大にできる基底以外にもDCTから画質を向上できる基底は存在しているため，各ICA基底の画像全体への影響を正しく評価できていないと我々は考えている．

本研究は，従来手法の貢献を踏まえて，実用的なビットレートを対象としたDCT-ICAハイブリッド符号化手法を提案する．実用的なビットレートでは，複数個のICA基底を組み合わせて領域の情報を保存する場合がほとんどであるため，使用する基底間の組み合わせを考慮した基底の選択方法を提案する．また，付加情報の削減では，従来手法では着目されていない基底を比較に加えることで，画像全体に対してより貢献できるICA基底のみを使用することができる．提案手法を自然画像に適用することで，対象とするビットレートにおいてDCTからビットレートを削減でき，画像と人間が必要とする情報の保存が可能となることを実証する．

2．

2.1　ICAのやつ

図、1　DCT基底、ICA基底の比較

2　係数を減らしたやつ

2.2　DCT-ICAハイブリッド符号化手法

図3にDCT-ICAハイブリッド符号化手法の構成図を示す．2.1節で述べたように，局所的な特徴を持つブロックの信号はICA係数がスパースとなるため，ICAを適用することでビットレートの削減が期待できる。一方，平坦な特徴や規則的な特徴を持つ領域はICA係数がスパース性を満たさないため、DCTを適用させたほうが有効である．そのため，DCTとICAによって制御されたビットレートを比較すると，局所的な特徴を持つ領域はICA Blocks，平坦な特徴や規則的な特徴を持つ領域はDCT Blocksへと分類されると考えられる．この時， ICAでは使用するICA基底の選択によりビットレートが制御される．そのため，適切なICA基底が選択されなければビットレートは増加し，正しい分類を行えないため，目的の情報を保存できない可能性がある．このときの基底は，ビットレートが最小のICA基底達を全探索により選択されることが最適である．しかし，ビットレートが変わると各領域で使用される基底の個数や種類も変わることが分かっているため，すべてのブロックで使用するICA基底を全探索により選択することは計算量が多いことから現実的ではない．そこで，[6,7]ではMP法[10]に基づいた基底の選択が提案されている．MP法はブロックとICA基底との信号の類似度が高い基底から選択される．この手法をあらかじめすべての領域に適用させ，選択される順序を求めておくことで，全探索よりも少ない計算量で同等の基底を選択することができた．しかし，ビットレートが高くなると複数個のICA基底を組み合わせて領域の情報を保存する場合がほとんどである[8]ため，従来手法は全探索とは異なる基底を選択する確率が高くなってしまう．そのため，我々はICA基底の組み合わせを考慮することで，実用的なビットレートにおいて全探索と同様の基底を選択できるのではないかと考えている．

一方、ICAにより求められる基底群は入力画像毎に異なるため、エンコーダーとデコーダーで共有することが想定される。共有される情報は，画像全体で使用されるICA基底の種類に対応して増加するため，ICAを用いた符号化はビットレートが大きく劣化してしまう課題がある．そこで，画像全体で使用するICA基底の種類を少数に削減することで，付加上のエントロピーを80%以上削減できていることが分かっている[6]．このとき，使用される基底は画像全体のビットレートを最小にできることが望まれる．従来手法[7]では，各領域の画質を最大にできる基底のDCTからの画質の向上値を求めることで，画像全体のビットレートを最小にできる基底達が使用される基底として選ばれた．しかし，領域の画質を最大にできる基底以外にもDCTから画質を向上できる基底は存在しているため，従来手法で選ばれた基底達では，画像全体のビットレートを最小にできない可能性があると考えられる．そのため，我々は[7]が着目していなかった基底達を[7]に加えることで，表面からでは分からなかった基底達を評価でき，各領域で使用できるのではないかと考えている．これにより，画像全体のビットレートをより削減でき，実用的なビットレートに対してDCT-ICAハイブリッド符号化手法を適用できるのではないかと考えられる．

最後に，1回目にICA Blocksと分類された領域でも，選ばれた基底を使用するとビットレートが増加する可能性があるため，2回目の分類が行われる．選ばれた基底を使用することでビットレートを削減できる領域のみをICA Blocks，それ以外をDCT Blocksに分類することで，一連の処理が終了する．上記したように，ビットレートが変わると各領域で使用される基底の個数や種類も変わるため，DCT-ICAハイブリッド符号化手法を1回適用させただけではすべてのビットレートに適した基底を決定することはできない．そのため，ビットレートごとに処理を分ける必要がある．これにより，すべてのビットレートにおいて画像と人間の両方が必要とする情報の保存が完了する．

図　3　DCT-ICAハイブリッド符号化手法のシステム図

3提案手法

従来手法とは異なる提案手法の特徴は，対象としているビットレートである．従来手法は極端に低いビットレートを対象に提案されたが，実用的なビットレートへの応用は考えられていなかった．そのため，我々は実用的なビットレートで明らかになっているICAの特徴を考慮することで，適用する領域の問題とICAの付加情報の問題を解決し，DCT-ICAハイブリッド符号化手法の適用可能なビットレートを拡大させる．図3の斜線文字は，今回の提案に対応している箇所を示している．

3.1領域分割のための基底の選択法

領域を保存するための基底の選択は全探索を用いるべきだが、すべてのブロックにおいて求めることは計算量の観点で現実的ではない。また，実用的なビットレートでは領域を保存するために複数種類のICA基底を同時に使用されることがほとんどであり，ビットレートごとに使用される基底は異なっている[8]。そのため，複数個の基底が組み合わされることを考慮した順序を領域ごとにあらかじめ求めることで，ビットレートに対応する適切な基底の選択が行われる．具体的な処理を以下に述べる．

1. 単一の領域において、MSEが最小となるICA基底Bi(𝑖 = 1,2, ⋯ ,64)を求め、その領域のP1基底とする。P1は，その領域を保存する場合に1番目に選択される基底である。
2. 1stを併用した場合にMSEを最小にできるICA基底Bn(𝑛 = 1,2, ⋯ ,64, where 𝑛 ≠ 𝑖)をその領域のP2基底とする。
3. この処理を優先度P64が決定されるまで続ける．
4. 1)~3)の処理をすべての領域に適用する．

ビットレートが選択されたとき，p1から順に選択される．例えば，基底を3個使用するビットレートの場合，P1~P3が選択される．これにより，全探索よりも少ない計算で使用する基底を選択できる．ここで，提案手法の画質が全探索よりも大きく劣化していた場合，使用する意味はない．a提案手法，b全探索，c従来手法により選択された基底を使用した時のMSEを表1に示す．表1では，従来手法は全探索と比較して大幅に画質が劣化しているが，提案手法は全探索とほぼ同じ画質である。この結果から、複数個の基底が選択される場合に画質が劣化するという従来手法の課題は，提案手法により解決できる．

表、１　優先度の画質比較

TABLE Ⅰ.

DEGRADATION OF IMAGE QUALITY FROM EXHAUSTIVE SEARCH DUE TO CHOICE OF COEFFICIENTS

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Number of  ICA basis used | Proposed Method | Conventional Method | Exhaustive Search |
| 1 | 382.9 | 440.2 | 382.9 |
|  | 277.9 | 351.2 | 276.9 |
|  | 216.5 | 297.3 | 214.6 |

3.2　付加情報の削減のための基底の評価法

提案手法は画像全体で使用するICA基底の種類を減らすことで，デコーダーへ送るための付加情報を削減する．極端に低いビットレートでは，画像全体で2種類前後のICA基底を使用するときの付加情報を係数のエントロピーに加えても，ビットレートを削減できることが分かっている[7]．そのため，提案手法は画像全体で最大3個までのICA基底を使用することとしている．また，領域の画質を最大にできる基底以外にもDCTから画質を向上できる基底は存在しているも分かっている．そこで，提案手法では，ICA基底のすべての組み合わせについて画質を求めて比較することで，ビットレートを最小にできる少数個のICA基底が選出される．具体的な処理を以下に示す．

1. ICA基底{a,b,c}を使用した場合の画像全体の画質の改善値を

とする．ここで，は原画像，はDCTを適用した時，は提案手法を適用した時の画質である．この時，画質が向上する領域のみを対象としており，各領域での基底の選択はPiに従っている．例えば，{16,51}としたときのQ16,51は，画像内のP1,2={{16,x},{51,x},{16,51}}の領域が向上できる画質の和である．

1. {a,b,c}のすべての組み合わせについてQa,b,cを求める．
2. {a,b,c}を使用した時に画質が向上する領域をICA Blocks，それ以外をDCT Blocksとしたときのエントロピーとし，{a,b,c}のエントロピーと合わせることで，付加情報を含めたビットレートを求める．
3. Qa,b,cが最大の組み合わせから順にDCTのビットレートと比較していき，最初にDCTからビットレートを削減できた{a,b,c}を使用する基底として選出される．この時のICA BlocksにICA，DCT BlockにDCTを適用する．

また，ビットレートが変わるとQa,b,cも変わるため，提案手法はビットレートごとに適用される．以上の処理により，画像全体に対する{a,b,c}の影響を求めることができ，付加情報を含めたビットレートを比較できるため，付加情報の課題が解決される．

4.実験結果

4.1　PSNRによる評価

256×256画素の自然画像「飛行機」、「バーバラ」、「カメラマン」、「マンドリル」に対して提案手法を適用した結果を図4に示します。従来手法は極端に低いビットレートであるため，図4には含めていない．図4を見ると提案手法はDCTからビットレートを削減できていることが分かる．また，高ビットレートではエントロピーの大きく削減され、低ビットレートでは画質の大きく向上している。これは、少数個の基底で画質を保存できるというICAの特性がDCT-ICAハイブリッド符号化手法に反映されたためであると考えられる．提案手法により様々なビットレートを比較できるようになったため，この特性が明らかになったと言える．

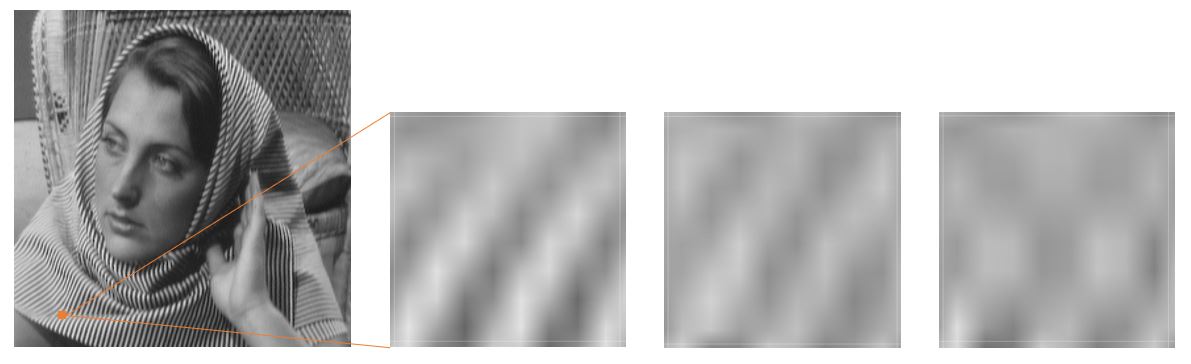
4.2 主観評価とビットレートごとの違い

画像「バーバラ」に提案手法を適用した時の再構成画像を図5に示す．図5を見ると提案手法を適用することで，DCTでは保存できなかった局所的な特徴をICAにより保存できていることが視覚的にも確認できる．また、画像「飛行機」に対して提案手法を適用した時に選出されたICA基底とICA Blocksを図6に示す。図6は、ICAの適用ブロックを原画で、DCTの適用ブロックを黒で示しています．図6を見ると、実用的なビットレートにおいてICA基底が3個使用されています。これは提案手法の上限であり、提案手法により係数のエントロピーが大幅に削減されたためである．このことから、将来的に4個以上のICA基底を使用できると考えられるため、更なるビットレートの削減が見込まれる。

図、4　PSNR（Airplane、Barbara、Cameraman、Mandrill）

　　5　主観評価（バーバラ）

6　基底と適用ブロック（提案）



原画像　　　　提案手法　　　　DCT

図5　29dBにおける再構成画像の比較

5.まとめ

DCT-ICAハイブリッド符号化は画像と人間の視覚が必要とする両方の情報を保存できるというメリットがある一方で、適用する領域の分類や，ICA基底を共有するための付加情報を削減する必要があった。本論文では、実用的なビットレートにおけるICAの特徴を考慮したICA基底の選択法と，画像全体に対するICA基底の評価法により，DCT-ICAハイブリッド符号化手法の適用できるビットレートの拡大を目指した．また，提案手法を自然画像に適用することで，実用的なビットレートにおいてDCTを単独で使用した場合からビットレートを削減できたため，従来のDCT-ICAハイブリッド符号化の課題を解決することができた。

また，図6のビットレートごとに使用されているICA基底は異なっているため、ビットレートごとに着目している特徴が異なっていると考えられる。そのため、ICAがビットレートごとに着目している特徴を明らかにすることが、我々の今後の課題である。

[1] W.B. Pennebaker, J.L. Mitchell, JPEG still image data compression standard, Van Nostrand Reinhold (1993).

[2]スパース表現の数理とその応用

[3]a survey of sparse representation: algorithms and application

[4]独立成分分析 村田

[5] 陳延偉

[6]亀田、川村

[7]富樫

[8]中田

[9] a class of neural networks for “”Kullback-Leibler””

[10] Matching pursuits with time fre…