IMQA2022 日本語版

アブストラクト

JPEGにおける離散コサイン変換（DCT）の基底セットは画像の統計的特性を考慮しているため、ビットレートが低くなると局所的な特徴で符号化画像の品質が劣化するという問題がある。一方、独立成分分析（ICA）の基底セットは与えられた入力画像の構造的特徴に対応しているため、DCTとICAのそれぞれの長所を生かすことを目的としたハイブリッド画像符号化方式が提案されています。ICAを用いた画像符号化では、送信側と受信側でICA基底を共有する必要があるため、ICA基底を保存するためのエントロピーが増大するという問題がある。本論文では、符号化性能向上のために適切なICA基底の組み合わせを選択することで、ICA基底のエントロピーが増加しても、DCTより符号化性能が向上することを示す。

1. イントロダクション

画像符号化方式として標準的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交変換に基づく有効な方式の1つである。どのような入力画像に対しても同一のDCT基底を適用し、人間の視覚特性に基づいてDCT係数を量子化するため、統計的特性を満足する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。一方、多次元信号解析の一つである独立成分分析（ICA）は、与えられた入力画像の構造的特徴に対応する基底の集合を得ることができ、ICA係数のスパース性に着目することにより、わずかな基底で画像の局所特徴を保持することができる[1, 2]。したがって、DCTとICAでは、画像の単一性を保持するための特徴が異なる。そこで，DCTでは保存が困難な特徴をICAで保存することにより，DCTとICAの両方の基底を用いたハイブリッドな画像符号化方式が提案されています[3, 4]．3, 4]では、与えられた入力画像を小さなブロックに分割し、DCTを適用するブロック（DCT\_Block）とICAを適用するブロック（ICA\_Block）の2種類に分類しています。得られたICA基底のセットは入力画像ごとに異なるため、送信側と受信側で共有することが想定される。高画質を得るためには、複数種類のICA基底を用いる必要があるが、ICA基底の保存に必要な情報が増えるため、ビットレートの観点からは好ましくない。そこで、[3, 4]では、エントロピーを約80％以上削減し、符号化性能を向上させるICA基底を重点的に選択することで、同等の画質を維持することを目的としています。4]では、各ブロックの画質を最大化するICA基底に着目し、ICA\_Blockの候補ごとにDCTから改善できる画質を評価することで、重要な基底の組み合わせを決定しています。ここで、ICA\_Blockの候補とは、64個のICA塩基を全て使用できる条件で、DCTよりも符号化性能を向上させることができるブロックとする。ICA\_Blockの候補を全てICA\_Blockとして使用すると、ICA基底を保存するためのエントロピーが著しく増大するため、あくまで各ICA基底の組み合わせの妥当性を評価し、ICA\_Blockの中から適切なICA\_Blockを選択することにしている。しかし、従来方式[4]では、基底のエントロピーが加算されると符号化性能が劣化し、性能が向上するビットレートはPSNRが20[dB]程度と非現実的な領域である。本論文では、ハイブリッド型画像符号化のアルゴリズムを実用的なビットレートに改善することが必要である。ブロック単位での符号化性能の向上という点では、従来法ではICA\_Blockの候補の画質を最適化する以外に有効な拠点が複数存在すると考えられる。そこで、提案手法では、ブロックの画質を最適化できなくても、画質を向上できる基底を評価に含めることで、符号化性能を向上できる重要なICA基底とICA\_Blockを決定する。提案手法では，従来手法の問題点を解決し，PSNR30~50[dB]の高ビットレートにおいてDCTよりも符号化性能が向上することが明らかになった．

1. ICAを用いた圧縮法
   1. ICAについて

独立成分分析(ICA)は、観測された多次元ランダムベクトルを、統計的に可能な限り独立な元の信号に変換する方法である。入力信号𝑋 = (𝑥ଵ , 𝑥ଶ , ⋯ , 𝑥௠) ்を独立な基底𝑆 = (𝑠ଵ , 𝑠 ) の線形結合によって表現すると 𝑋 =𝐴𝑆と書くことができる。(1) なお、↪L\_1D434↩は(↪Ll\_1D45A × 𝑛)行列で表される結合係数で、要素ᵄは入力信号𝑠に対する独立基底௜の寄与を表している。ICAは基底と係数の情報を持たないので、入力信号𝑋のみから基底𝑆を復元する必要がある。ǔの逆数をの近似をとすると、式（1）は変換される。(2) ICAでは、ICA基底の各成分ᵄを独立させるICA係数ᵄを求めることが目的である。独立性の評価基準としてKullback-Leibler情報量[5]が用いられ、Bellらが提案した最急降下法[6]に基づく方法を適用すると、相互情報量を最小化するᵄの更新則を得ることができる。𝑊 (3) ここでμは学習係数、Iは単位行列、φはᵄの確率密度関数の近似値である。通常、𝜑としてシグモイド関数が使用される。本論文では、提案手法の（8×8）画素のDCT基底に合わせて、ICA基底の数を64に決定した。図1は、入力画像として "Barbara "と "Airplane "を与え、式（3）を適用して得られたICA基底を示したものである。図1から、ICA基底は各入力画像の局所的な特徴に対応し、基底の形状は各入力画像によって異なっていることが分かります。図2(a)に、画像 "Barbara "の任意のブロックのICA係数を示す。図2(a)のブロックに対して、係数の値が大きいICA基底のみを用いて再構成したブロックを図2(b)に示す。図2より、入力画像の局所的な特徴を保持できるICA基底はわずかであるため、ICA係数はスパース性[7]を持っていることがわかります。したがって、ICA基底はDCTと比較して、局所的な特徴を持つブロックの信号を保存するために必要なエントロピーを低減できることが期待される。

* 1. 従来手法

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係数がスパースであるため、ICAを用いることでより少ないエントロピーで保存することができる。一方、確率的な領域はICA係数がスパース性を満たさないため、DCTを用いるとより少ないエントロピーで保存することができる。そこで、エントロピー低減の観点から、入力画像をDCT基底とICA基底で主に保存されるブロックに分類し、各ブロックをDCTとICAで符号化することで、画像全体のエントロピーを低減させることができます。DCTでは、DCT係数の量子化テーブルを用いることでエントロピーを制御しています。一方、ICA基底を保存するためのエントロピーの観点からICA基底の数を減らすために、[3, 4]では、MP法[8]に基づいてブロックと基底の類似度によりブロックの信号保存に対する各ICA基底の重要度を決定し、最も重要度が高い基底を選択してエントロピーを制御している。各ブロックに対して、MSEが同じという条件でDCTとICAを適用し、エントロピーを比較することでDCT\_BlockとICA\_Blockの候補を決定する。ICA\_Blockの候補は、64個のICA塩基を全て使用できる条件で、DCTより少ないエントロピーで済むブロックと定義される。ICA\_Blockの候補をICA\_Blockとして符号化すると、ICA基底を保持するためのエントロピーが大幅に増加するため、各ICA基底の組み合わせの評価にのみ使用し、ICA\_Blockの候補から適切なICA\_Blockを決定する。適切なICA基底の組み合わせが決まると、それが適用されるブロックをICA\_Block、それ以外のブロックをDCT\_Blockと定義する。ICA基底の選択において、[3, 4]は、各ブロックの画質を最適化するICA基底に着目し、ICA\_Blockの候補ごとに各基底がDCTから改善できる画質を評価し、重要な基底を決定しています。3]では，ハイブリッド型画像符号化により，DCTを用いた場合と同等の画質を保持するために必要なICA基底のエントロピーを80％以上削減できることが示されています．また、[4]では、ICA基底のエントロピーを加えることで、非常に低いビットレートにおいて、DCTよりも符号化性能が向上することが示されています。従来のハイブリッド型符号化方式には，次のような問題点がある．第一に、ICAの量子化において適切な基底が選択されていないことである。ICA係数は疎でありながら、唯一の基底でDCTと同等の画質を保てるブロックは限られているため、複数の基底を組み合わせて使用することになる。そのため、複数種類のICA基底を組み合わせる際には、ブロックの信号を保持することの重要性を考慮する必要がある。もう一つは、重要なICA基底の選択において、符号化性能向上の観点から、ブロック品質を最適化するICA基底以外にも有効なICA基底が存在することである。また、ICA 基盤を用いずに輝度値の平均値のみで再構成できるブロックが存在することも確認されている。したがって、複数のICA基底を用いる条件では、ICA\_Blockの候補と評価した従来手法における基底が符号化性能向上のために最適でないブロックが存在することになる。また、従来方式で符号化性能を向上できる範囲は、画質が20[dB]以下の極低ビットレート時のみである。sec.3では、上記の問題を解決し、DCTとICAの両基底を用いたハイブリッド型符号化アルゴリズムの符号化性能を向上させるために、ICA\_Blockにおける新たな手法を提案する。

1. 提案手法

提案するハイブリッド型画像符号化方式の構成を図3に示す。図3において、まず入力画像を（8×8）画素の一様なブロックに分割し、各ブロックに対してDCTとICAを適用してDCT係数とICA係数をそれぞれ求め、ICA基底を得る。提案手法では，DCTはJPEGベースの量子化テーブルにより量子化し，ICAはMP法によるMSEをもとにDCTの品質と同等になるように不要な基底を減らして量子化する．ブロック分割では，まず，各ブロックのDCT係数とICA係数のエントロピーを計算する．DCT係数のエントロピーはDCT係数の平均情報量として算出し、ICA係数のエントロピーはICA係数と輝度値のブロック平均を合わせた平均情報量として算出する。次に、ICA係数のエントロピーがDCT係数のエントロピーより小さいものをICA\_Blockの候補とし、それ以外をDCT\_Blockの候補として、入力画像の全ブロックをICA\_BlockまたはDCT\_Blockに一旦分類する。重要なICA基の選択では、ICA\_Blockの候補に対して、符号化性能の向上の観点から、各ICA基の組み合わせを評価する。前節で述べたように、ブロックの符号化性能を向上させることができるICA基底の組み合わせは、すべてこの評価に含まれる。そして、ICA基底を保存したエントロピーを加えてもDCTのエントロピー以下にできるICA基底の組み合わせのうち、画像全体の画質を最大化できるものを重要ICA基底と決定し、これらの基底が用いられているブロックと輝度値の平均のみで画質を改善できるブロックの両方を適正ICA\_Blockと決定する。ICA基底とICA\_Blockを決定し、DCT\_Blockはそれらに画像内の全ての領域を除外した後、各ブロックにDCTとICAを適用して画像符号化を行う。

3.1

画質評価はPSNRで行うため，提案手法では量子化で用いる重要度もMSEをベースにしている．ICA係数は疎であるが、固有のICA基底を持つDCTと同等の画質を保持できるブロックは少なく、画質を保持するために複数種類のICA基底を組み合わせることが多い。PSNR=31[dB]の画像 "Airplane "に従来法を適用した場合、ICA\_Blockの候補に対して保存が必要なICA基底の数とそれを必要としたブロック数を図4に示します。Fig.4から、固有のICA基底を用いてDCTと同等の画質を保持できるブロックは多いが、複数種類の基底を組み合わせることで保持できるブロックが多くなることがわかる。そこで、ICA基底の組み合わせを考える際に、ブロックの信号を保存する基底の重要度をMSEに基づいて提案することで、従来法のICAの量子化の問題点を解決しています。入力画像の各ブロックに対して、MSEが最小となるICA基底ᵃ(𝑖 = 1,2, ⋯ ,64)を求め、そのブロックに対してᵃを最も重要な基底とする。次に、ᵃと組み合わせたときにMSEを最小化できる他のICA基底ᵃ(𝑛 = 1,2, ⋯ ,64, where 𝑛 ≠ 𝑖)をそのブロックの2番目に重要な基底とする。この処理を64個のICA基底について重要度が決定されるまで続け、すべてのブロックについて基底の重要度順を求める。以上のような重要度によって画質を制御した場合に、DCTから改善される画質とエントロピーは、式（4）と式（5）を用いて求めることができる。the mean square error (MSE) with the original image when the block is reconstructed using ICA bases of 𝑖(𝑖 = 0,1,2, 3)を用いてブロックを再構成したときの原画像との平均二乗誤差である。また、𝐷ǔはDCTと𝐶{↪L\_1D4C↩}は係数の情報とブロック内の輝度値の平均値の情報を合計したエントロピーを表し、ブロックを𝑖(𝑖 = 0, 1,2,3). 式（4）、（5）が正となるブロック、すなわち、DCTよりも高画質でエントロピーが小さいブロックをICA\_Blockの候補とし、それ以外のブロックをDCT\_Blockの候補とする。

3.2

提案手法では、与えられた画像に対して64個のICA基底を計算する。これらは画像に固有であり、各基底は局所的な特徴を表すため、符号化性能の向上に有効なICA基底の種類はブロックごとに異なる。PSNR=30[dB]の画像「Barbara」に対して提案手法の量子化を適用し、ICA\_Blockの候補に分類したうち、23番目と40番目のICA基底によって最適化されたブロックを図5に示す。ICA基底の形状は、図5の左上に示す通りである。図5では、それぞれのICA基底が異なるブロックで使用されていることがわかる。しかし、複数のICA基底の組み合わせによるブロックの信号の保存を考えた場合、符号化性能を向上できる基底の組み合わせが複数存在することがわかります。表1は、PSNR=25[dB]の画像「飛行機」に対して、1000ブロック目の信号を保持した場合に、DCTよりも符号化性能を向上できるICA基底の組み合わせを示したものである。表1より、このブロックの信号を保持するのに有効なICA基底の組み合わせが複数存在することがわかる。従来法では、このブロックの符号化性能を向上させる基底として、ブロックの画質を最大化できるICA基底（表1（a））のみを評価し、表1（b）、（c）の基底は除外していたため、このブロックの符号化性能は向上しなかった。提案手法では、ICA基底の全ての組み合わせを評価に含めることで、ICA\_Blockの候補の保存に対するICA基底の各組み合わせの重要性を適切に評価することができる。既に[3, 4]より、低ビットレートではICA基底2つ程度のエントロピーを付加しても符号化性能が向上することが示されているため、提案手法では3つまでの基底を使用することとした。また，従来法のICA\_Blockは必ずICA基底を用いる必要があるが，ICA基底を用いずに輝度値の平均を用いるだけでDCTより高い画質を保持できるブロックがあることが確認された．図6は、PSNR=30[dB]の条件で画像BarbaraにICAを適用した場合に、ICA基底を用いずにDCTよりも高い画質を維持できるブロックを示している。図6より、PSNR=30[dB]という実用的なビットレートにおいても、輝度値の平均値のみで再構成できるブロックがあることがわかる。輝度値の平均値のみでブロックを保存する場合、ICA係数やICA基底を保存するためのエントロピーを必要としないため、性能向上の面で非常に効果的である。最適なICA基底の選択方法について以下に述べる。まず、各{𝑎}の画質改善度𝑄{𝑎}と削減ビットレート𝑎{𝑎}。は、式（4）と式（5）から求めた改善値の和である𝑎{𝑎}を用いて求める。6) と(6)式（6）、（7）におけるICA\_Blockは、図6において基底を必要としないブロックを除き、先に計算されたICA\_Blockの候補に相当するものである。以上の処理により、ICA基底の全ての組み合わせについて、DCTから削減できるエントロピーと改善できる画質の両方が決定される。その結果、ICA基底を追加した場合のエントロピーを考慮して符号化性能の向上を評価できるため、ICA基底の組み合わせごとに基底を保持するために必要なエントロピーとDCTから削減できるエントロピーを比較することができる。ICAによる画像符号化は、ICA係数と各ブロックの輝度値の平均にICA基底のエントロピーを加算して算出するため、基底のエントロピーを必要としないDCTよりも符号化性能が劣化する可能性があります。したがって、ICA基底のエントロピーを考慮して符号化性能が向上するような基底選択方法を評価する必要がある。図6のブロックの信号を保存するエントロピーをᵃ 𝐴とすると、式（8）を満たし、式（6）のᵄ{ᵄ}を最大化するǔ{ᵄ}がICA基底として選択される。が入力画像の保存に重要なICA基底として選択され、｛𝑎︓｝を用いたICA\_Blockが画像中の適切なICA\_Blockとして決定される。 (8)の基底を保存するエントロピーで、式（8）からICA基底保存用のエントロピーを加えても、全体のエントロピーはDCTより小さくなることが示唆される。以上の処理により、ICA基底のエントロピーを考慮して、全体の画質を最適化できるICA基底の組み合わせとICA\_Blockを決定することができる。

1. 実験結果

画像「飛行機」に対して提案手法を適用して得られた、PSNR=30[dB]と25[dB]の条件下での適正なICA\_Blockを図7に示す。図7は、提案手法と従来手法の適正なICA\_Blockを比較したもので、ICA\_Blockを原画で、DCT\_Blockを黒で示しています。Fig.7(b),(c) は、ビットレートによってICA\_Blockが異なることを示しています。図7（b）、（c）、（d）、（e）から、提案手法のICA\_Blockは従来手法よりも多くなっていることがわかる。これは、提案手法がICA基底の組み合わせを考慮しているためである。ICA\_Blockの候補によって各ICA基底の組み合わせが変わるため、提案手法ではビットレートごとに選択されるICA基底も異なることになります。次に、256×256画素の画像「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、PSNRとエントロピーの比較を行った結果を図8に示します。図8では、DCTと提案手法の結果を比較しています。ICA\_Blockが増加することは，同じPSNRであればDCTよりも少ないエントロピーでより多くのブロックを保存できることを意味し，符号化性能の向上が期待される．Fig.8より，提案手法の符号化性能はDCTよりも優れていることがわかる．実用的なビットレートであるPSNR=30[dB]において，提案方式はDCTのエントロピーよりも平均0.0025[bit/pel]少ないエントロピーを節約することが可能であることがわかる．なお，提案手法のエントロピーは，ICA係数のエントロピー，ICA\_Blockの輝度値の平均値を保存するためのエントロピー，ICA基底を保存するためのエントロピーの合計である．また、PSNR=25[dB]程度の低ビットレートでは、最大0.03[bit/pel]のエントロピーを節約できることが分かりました。PSNR=50[dB]の条件下で、画像「Airplane」に提案手法を適用した結果を図9に示します。図9より、提案手法はDCTよりも符号化性能が優れていることが分かります。以上より、提案手法は、実用的なビットレートにおいて、DCTよりも符号化性能を向上させることが可能であることがわかりました。

1. まとめ

本論文では、ICAとDCTを用いたハイブリッド画像符号化方式の性能を向上させるために、ICA基底選択法を提案した。提案手法は、入力画像を8×8のブロックに分割し、DCTを適用したブロック（DCT\_Block）とICAを適用したブロック（ICA\_Block）の2種類に分類している。ICAを用いた画像符号化では、送信側と受信側でICA基底を共有する必要があるため、ICA基底を保存するためのエントロピーが増大するという問題がある。これらの問題を解決するために、ICA基地の各組み合わせを画質の観点から評価し、各ICA基地の組み合わせが削減できるエントロピーとICA基地を保存するために必要なエントロピーを比較し、最適なICA基地の組み合わせと適切なICA\_Blockを決定しました。その結果、ICA 基地を保存するためのエントロピーを加えても、PSNR 30~50[dB] 程度の符号化性能に改善されることが確認されました。提案方式では、ビットレートによって使用するICA基底とICA\_Blockの組み合わせが異なるため、ビットレート毎の処理が必要となり、提案方式の処理コストの低減が今後の課題として残されています。