

色空間範囲を考慮した電子透かし埋め込み方法の検討

A Watermark embedding method based on the color space range

片山 淳 中村 高雄 山室 雅司[†]NTT サイバースペース研究所[‡]

1. はじめに

印刷物やディスプレイ装置上の画像を携帯電話機内蔵カメラで撮影して行う電子透かし読み取りは、デジタル画像データからの読み取りに比べ難易度が高い。その理由は、画像に対し、幾何変形、ピンぼけによるフィルタ処理、および入出力機器固有の色空間への強制変換が施されるためである。本稿ではこれらの変換の中の色空間変換に着目し、色空間変換によって電子透かし信号が減衰するメカニズムを明らかにし、色空間変換に対して透かし信号が減衰しない電子透かし埋め込み方法を提案する。

2. 課題

電子透かしは元画像に人間の目で感知しにくい微小変調を施すことによって情報を埋め込むが、変調後の画像が媒体や機器上で表現可能な色空間範囲を逸脱した場合は、変調が媒体上では完全に表現できず、その媒体を撮影した画像からは電子透かし復調に失敗してしまう問題がある。

電子透かしの変調(埋め込み)から復調(読み出し)までの色空間の遷移を図1に示す。系全体では4つの変換関数があり、 f_1 :元画像色空間→変調色空間、 f_2 :変調色空間→出力媒体上色空間、 f_3 :出力媒体上色空間→キャプチャ機器色空間、および f_4 :キャプチャ機器色空間→復調色空間である。 f_1 と f_4 は既知だが、 f_2 と f_3 は出力媒体とキャプチャ機器に依存する未知関数であり推定しなければならない。

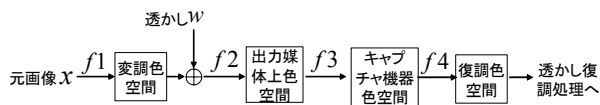


図1 色空間遷移

透かし変調信号を維持するため、画像信号はいずれの色空間範囲をも逸脱しない必要がある。逸脱回避のためには、色空間から逸脱する画像信号を空間範囲内へ押し込む信号圧縮処理が有効であるが[1]、圧縮を人間が感知しにくいように行うべきであり、そのための適切な圧縮アルゴリズムが必要である。

電子透かしの復調は処理能力の低い携帯電話機上で行われる場合がある。したがって復調に複雑な処理が必要な方式は、応答時間が延び、ヒューマンインタフェース上望ましくない。復調にはキャプチャ機器色空間から復調色空間への変換処理も含まれることから、この変換処理が簡単な復調色空間を選ぶ必要がある。

3. 提案方式

3.1 復調色空間選定

復調色空間(=変調色空間)はキャプチャ機器色空間であるRGBから線形演算で変換可能な、ITU-R BT. 601によるY, (B-Y), (R-Y)空間を採用し、携帯電話機上での高速処理を可能にする。(B-Y), (R-Y)チャンネルは撮影条件および撮影後の画像圧縮による影響が大きいため、実用的に変復調に用いられるチャンネルはYチャンネルのみである。そこで変換関数ではYチャンネルのみ考慮する。

3.2 未知関数推定

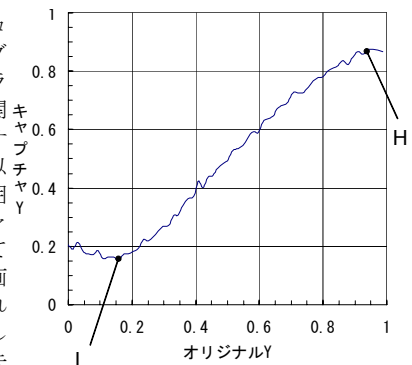
未知関数 f_2 , f_3 を色票データの出力と撮影により推定する。色票データを図2に示す。色票は、Yがデジタル表現可能最小値から最大値まで徐々に円周方向に変化する円環状の帯を配した背景灰色の正方形である。円環状である理由は、カメラで撮影した際のコサイン4乗則による撮影画像内Y値変化の影響を低減するた

めである。背景が灰色である理由は、カメラのオートホワイトバランスの影響を低減するためである。背景が正方形である理由は、撮影画像をオリジナルデータの幾何形状に戻す逆射影変換を容易にするためである。本色票を測定対象出力装置である印刷機で印刷するか、ディスプレイで表示しておく。次に表示された色票



図2 色票

画像を測定対象入力装置であるカメラによりキャプチャする。撮影画像は射影変換を受けているので、背景の正方形四隅を手がかりに逆射影変換を施し、色票のオリジナルデータと同じ形状に戻す。色票の円環状帯部の画素毎のY値をキャプチャデータとオリジナルデータからそれぞれ取得し、キャプチャデータのY値を縦軸に、オリジナルデータのY値を横軸にプロットした例が図3のグラフである。このグラフが f_2 と f_3 の合成関数を示す。図3ではオリジナルデータのL以下とH以上のY値範囲の変化がキャプチャデータでは表現できておらず、この範囲の画像信号に透かしを入れても、「つぶれ」てしまい透かし信号が消失してしまうことが分かる。

図3 f_2 f_3 合成関数

3.3 画像Y値圧縮

既知関数 f_1 , f_4 はデジタル処理であり、データ範囲を処理過程でクリッピングしない限り、画像信号の消失、減衰は生じない。したがって、透かし変調信号が消失あるいは減衰しないためには、 f_2 , f_3 の適用過程で色空間範囲を逸脱しなければ良い。すなわち、元画像 x に f_1 を適用した後、透かし信号 w を加えた画像 $f_1(x)+w$ が、上記未知関数推定で求めたL~Hの範囲に収まるよう $f_1(x)$ を圧縮すれば良い。圧縮関数 g の条件は、式(1)である。

$$\left. \begin{array}{l} \min g(y) - m/2 = L \\ \max g(y) + m/2 = H \\ \frac{dg(y)}{dy} \geq 0 \\ y = f_1(x) \end{array} \right\} \dots (1)$$

但し、 m は透かし変調振幅最大値

g の微分が負になるのを禁じているのは、元画像と圧縮後画像で2点間のYの大小の逆転を防ぐためである。

上記の条件を満たす g は多数あるが、元画像をY値範囲がLからHとなるように圧縮する点では同じなので、埋め込んだ透かし信号がつぶれること無く保存されるかの観点ではいずれの関数を用いても性能は同等である。しかし、圧縮後画像品質は g の選び方により異なる。画質低下の小さい g を選ぶために次の2つの評価基準を用いる。

(a) 色差

元画像と圧縮後画像の同一位置画素2点間の知覚的相違の差を画像全体で積分し、その値が小さいほど圧縮による品質の低下が少ないとする。2点間の色の知覚的相違は色差と呼ば

[†]Atsushi Katayama, Takao Nakamura, Masashi Yamamuro

[‡]NTT Cyber Space Laboratories

れ、色差を定量的に表す方法として、国際照明委員会(CIE)により勧告された CIELAB 色空間あるいは CIELUV 色空間での 2 点間距離を用いる方法が一般的である。しかしながら、CIELAB 色空間、CIELUV 色空間とも数式の単純さを求めたため、色差を正確に表しているのではない[3]。そこで、元画像と圧縮後画像では Y 値のみが異なる点と、CIELAB 色空間も CIELUV 色空間も視覚の 1/3 乗則 (人間の感じる視覚強度は、視覚刺激の 1/3 乗に比例する) に基づいて実験的に求めたものである点を考慮して、本発明では色差として 2 点の Y 値をそれぞれ 1/3 乗した値の差を用いる。

(b)微小変化分圧縮率変動

色差のみを考慮すると、図 4 のような折れ線関数が最良となる。しかし、この関数では元画像の Y 値が $L+m/2$ 以下と $H-m/2$ 以上の領域の濃淡は消え、平坦な黒と白に変換されてしまい、見た目が不自然である。そこで、元画像内の任意 2 点間の Y 値差(濃淡) Δy と圧縮後画像の対応する 2 点の Y 値差 Δy_c の比 $\Delta y_c/\Delta y$ (これを微小変化分圧縮率と呼ぶことにする) を導入し、画像中のこの値の変動を評価基準とする。

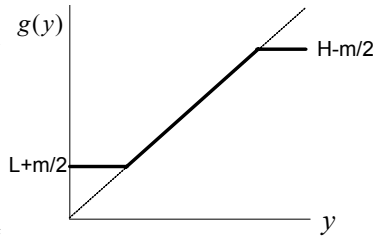


図 4 色差最小折れ線関数

ここで g として簡単なべき乗関数式(2)を用い、 g の形による上記 2 つの評価基準の振舞いを吟味する。

$$g(y) = (H - L - m)y^a + L + m/2 \quad \dots (2)$$

g は a の値により形を変えるが、常に式(1)を満足する。 a の値による 2 つの評価基準の変動をプロットしたものが図 5 と図 6 である。図 5 の色差では $a=1.2$ が最適であり、図 6 の微小変化分圧縮率変動では $a=0.5$ が画像内での変動が最も少なく最適である。両評価基準が人の画質に対する感覚にどの程度寄与するかは、続く主観評価実験により明らかにする。

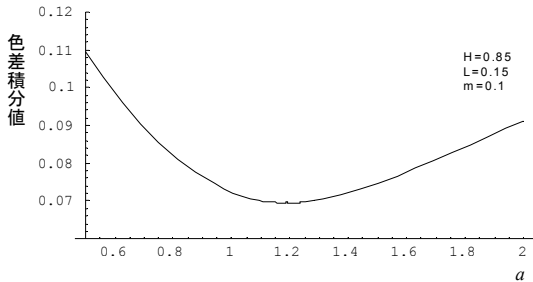


図 5 色差積分値

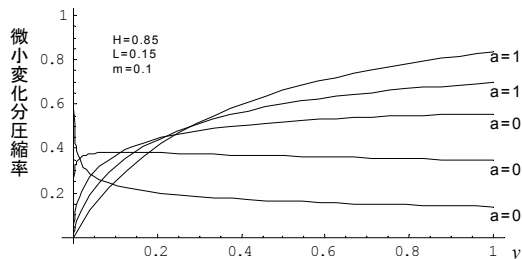


図 6 微小変化分圧縮率変動

4. 評価実験

4.1 画像圧縮による画質劣化

Y 圧縮率が 10%, 30%, 50% となるように H, L, m を定めた式(2)の圧縮関数の a を 0.4 から 2.0 まで 5 段階に変化させ、3 種類の画像に適用し、45 枚の圧縮サンプルを作成する。 a のみが異なる同種類、同 Y 圧縮率の画像 5 枚とオリジナル画像を印刷したものを被験者

に提示し、オリジナルに近いと思われるものから順に 5 点, 4 点, 3 点, 2 点, 1 点を付与させる。19 名の被験者に対して全ての圧縮サンプルを提示して得た結果が図 7 である。Y 圧縮率 30% 以下では $a=1.2$ が最も評価が高かった。またいずれの Y 圧縮率においても、微分変化圧縮率の最適値である $a=0.5$ 付近の評価は低かった。

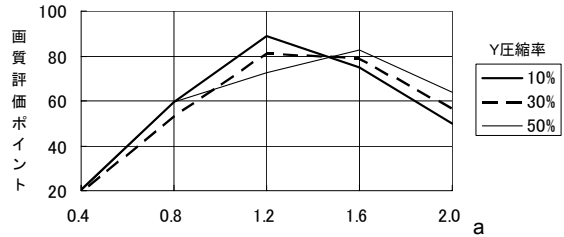


図 7 画質主観評価結果

4.2 電子透かし読み取り

印刷機として Xerox DocuCentre500、カメラ付き携帯電話機として NTT DoCoMo F505i を用いた系の色空間表現能力を本稿提案の色票により測定し H, L を得る。電子透かし方式として中村の方式[2]を用い、 m を得る。これら実測値から $H-L-m=0.77$ が得られたので、Y 値圧縮率を 23% とする。元画像に対しそのまま透かしを埋め込んだ画像(図 8)と、式(2)に $a=1.2$ を適用した関数を用い 23% 圧縮後に透かしを埋め込んだ画像(図 9)との電子透かし読み取り成功率を評価した。印刷サイズは一辺 5cm である。

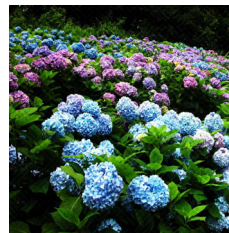


図 8 無圧縮+透かし埋め込み



図 9 23%圧縮+透かし埋め込み

カメラ付き携帯電話機 F505i で撮影し、埋め込みデータを誤りなく読み取れた場合のみを成功とカウントし、それ以外は全て失敗とした。結果を表 1 に示す。

表 1 透かし読み取り性能

	無圧縮	23%圧縮
読み取り成功回数	35	487
総試行回数	500	500
読み取り成功率	7%	97%

5. 考察とまとめ

図 5 と図 7 より、Y 値圧縮率が 30% 以下では主観的な画質劣化は色差積分値が主要因であることが分かる。ただし、Y 値圧縮率が 50% では、色差積分値の最小値ではない $a=1.6$ が最も評価が良く、予想外の結果となった。 $a=1.2$ と $a=1.6$ では後者の方が絵の暗い面積が増え引き締まった感を受ける。この事が好評価を与えていると想像するが、50% もの圧縮が必要となる状況は現実の出力機器とカメラでは生じないため、理由の吟味は将来の課題としたい。表 1 より、原画に透かしを埋め込んだ場合は透かし読み出しが困難であった画像に対し、圧縮適用後透かし埋め込みを行った場合、透かし読み取り性能が大きく向上(この場合は 10 倍以上)することが確認できた。本実験では、画質劣化を最小とするため圧縮関数として $a=1.2$ を式(2)に代入したものをを用いた。図 8 と図 9 の比較から分かるように圧縮は画質にほとんど影響しない。

6. 参考文献

[1]大橋俊夫他, 小型印刷カラー画像に対応した電子透かし, 信学会総合大会, 2003
 [2]中村高雄, 片山淳他, カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式, 信学論(D-II), 掲載待
 [3]大田登著, 色彩工学第 2 版, 東京電気大学出版局, 2003.