遺伝的アルゴリズムを用いた複数濃淡画像からの多階調画像生成

正員 齊藤文彦 (岐阜大学)

Image Generation with Smooth Gradations from Plural Gray-scaled Images Using Genetic Algorithm

Fumihiko Saitoh (Gifu University)

This paper proposes a method to generate an output image with good contrast and smooth gradations from plural gray-scaled input images that have different exposures. The proposed method generates an output image with a wide gray-scaled dynamic range and delicate gradations from an accumulated image of plural input images using the genetic algorithm. The chromosome of an individual is represented by the array of genes that have all gray-scales included in the accumulated image. The fitness of each individual is evaluated by the liner differential value that is obtained in the output image. The experimental results show that the output images with delicate and smooth gradations were generated by the proposed method. The qualities of the output images were also evaluated using the method based on the delta-histograms. The output images by the proposed method recorded the good sharpness factors.

キーワード： 濃淡画像，多階調画像，コントラスト強調，遺伝的アルゴリズム

Keywords: gray-scaled image, smooth gradations, contrast enhancement, genetic algorithm

1. はじめに

カメラによって各種のシーンを撮影する場合、コントラストの高い画像を取得することが重要である。通常は、照明、露光時間、レンズの絞り、ビデオアンプの利得、ガンマ補正などを調整することによって、極力コントラストが良好な画像を得ることが試みられる。しかし、シーンが広い輝度ダイナミックレンジを持っている場合や、撮影装置の性能や調整が不十分な場合は、コントラストが良好な画像を取得できるとは限らない。一般的に、画像のコントラスト感、表示明度のダイナミックレンジが広いことに加えて、表示されている階調数の影響を受けると考えられる。すなわち、表示装置が表示可能な階調数全体を有効に利用する濃度分布を持つ画像を取得することが望ましい。

本論文では、カメラを固定し、露出を変化させて撮影した複数枚の濃淡入力画像から、表示装置の階調数に適合した高コントラストな出力画像を生成する手法を提案する。撮影した各々の入力画像の階調数は、一般的に表示装置の階調数よりも少ないが、複数枚の入力画像から得られる総階調数は、表示装置の階調数を超えることになる。提案手法では、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) ^{(1),(2)} を用いて、表示装置の階調数を超える多階調画像から、表示装置の階調数に適合した出力画像を生成する。

2. 多階調画像生成法

入力画像のコントラストが不十分な場合、画像に含まれる濃度のダイナミックレンジを拡大する手法が用いられる。一般的には、入力画像内の各濃度値を出力画像の最小濃度

図 1 線形濃度変換による濃度ヒストグラムの変化
Fig.1 Change of gray-levels histogram by the liner gray level conversion

と最大濃度の間に線形変換する手法、入力画像から得られる濃度分布ヒストグラムを均等化する手法などが用いられる^{(3)~(5)}。これらの手法は、撮影した 1 枚の入力画像から出力画像が得られるため、適用が容易であるという長所があるが、図 1 に示す入力画像と出力画像の濃度ヒストグラムの関係からわかるように、入力画像に含まれる階調数を持つ出力画像しか得られない。つまり、出力画像の濃度ダイナミックレンジは拡大されるが、表示される階調数は入力画像も出力画像も基本的に同一であるため、出力画像の濃度値が一部欠落することによって、濃度変化が荒くなり、擬似輪郭等が発生する場合も生じる。

一方、カメラの露光時間やレンズの絞りを変化させて撮影した複数枚の入力画像を合成して 1 枚の高コントラスト

な画像を生成する手法が考えられる。この場合、各々の入力画像に含まれる階調数は少なくとも、多数の入力画像を合成することによって、広い濃度ダイナミックレンジと出力画像の階調範囲を有効に利用した多階調な画像が得られることが期待される。しかし、各々の入力画像から、高コントラストかつ多階調な出力画像に適した階調部分を抽出する必要がある。このように、多段階の露出画像から多階調画像を得る方法としては、画素単位に露光条件を調整できるように、露光時間を電子シャッターによって制御するシステムが提案されている⁽⁶⁾。これは、高精度な画像を得るための実用的なシステムであるが、カラー画像を対象としており、露光時間を外部から制御可能なハードウェアが必要となる。同様に、電子シャッターを可変させて撮影した複数枚の濃淡画像から高速にダイナミックレンジの広い濃淡画像を得るシステムが提案されているが^{(7)~(9)}、やはり特殊なカメラとハードウェアを用いている。他には、画像内の明度と色度に着目した評価関数を最適化することによって、色彩の精度を向上させる画像合成方法⁽¹⁰⁾が提案されているが、カラー画像に用途が限定されている。濃淡画像を対象とした方法としては、各入力画像内における濃淡表示の精度が高い部分とトーンカーブの傾きの相関性に着目した画像生成法⁽¹¹⁾が提案されているが、入力画像から抽出される濃度範囲内の階調が不連続な場合、全階調を使う出力画像が得られない可能性もある。

提案手法では、露出の異なる複数枚の濃淡入力画像を累積した画像から、高コントラストかつ多階調な出力画像が得られるように、適切な階調を動的に選択する。入力画像の枚数が多い場合、累積画像は多くの濃度値を持つようになるが、これらの濃度値を出力画像における適切な階調に割り当てるために、大局的な解探索に優れたGAを用いる。これによって、階調範囲を有効に利用した出力画像を得ることが可能となる。

3. GAによる多階調画像生成

提案手法では、図2に示すように、複数枚の入力画像から多階調の累積画像を生成し、次に、累積画像の全階調数を出力画像の階調数に変換する。出力画像の全階調を有効に利用するために、GAを用いて、累積画像に含まれる全濃度範囲を出力画像の各階調に非線形に分割する。一般的に、各入力画像の階調数は256よりも少ないが、累積画像の階調数は256よりも多くなり、出力画像の階調数はちょうど256となる。以下に、提案手法について具体的に述べる。

3.1 累積画像の生成

まず、固定カメラを用いて、明るさの異なる複数枚の濃淡画像を撮影する。提案手法では、電子シャッターなどによる露光状態の厳密な調整は必要ない。つまり、手動によって、レンズの絞りを狭めた状態から、絞りを広げた状態までの範囲内で、適当な画像を複数枚撮影すればよい。

入力画像と出力画像の最大階調数を共に256とした場合、例えば、すべての入力画像に64階調以上の濃度値が含まれ

図2 提案手法の流れ

Fig.2 Process flow of the proposed method

ているとすると、4枚以上の画像があれば、256階調のうち、ほぼすべての濃度値を持つ出力画像を得ることが可能と考えられる。従って、撮影する画像の枚数は、入力画像に含まれる階調数に依存することになるが、一般的には、露出不足あるいは露出オーバーな画像であっても、数十階調程度の濃度値は含まれるので、4枚から8枚程度で充分と予想される。これらの入力画像を画素単位に累積した結果を累積画像と呼ぶことにする。各入力画像を $I_{x,y}(m)$ ($m=0,1,2,\dots,N_f-1$) とすると、累積画像の各画素の値 $A_{x,y}$ は、次式によって求められる。

$$A_{x,y} = \sum_{m=0}^{N_f-1} I_{x,y}(m) \quad (1)$$

N_f は入力画像の枚数である。ここでは、余裕を見て、 $N_f=8$ とする。ノイズなどの影響を無視すれば、ある露光状態で撮影した入力画像内における任意の画素間の濃度の大小関係は、異なる露光状態で撮影した入力画像でも逆転する可能性はほとんどないので、これらの入力画像を累積することによって、256以上の濃度値を持つ累積画像を得ることができる。この累積画像の全濃度範囲を256階調に等分割すれば、256階調すべてを持つ出力画像が得られる。しかし、累積画像は、露光状態を適当に設定した入力画像を累積したものであるため、各画素間の濃度の大小関係は保持されていても、濃度差に関しては、最適な状態にあるとは限らない。従って、累積画像の全濃度範囲を等分割して得られた出力画像は、濃度表現が不自然となる可能性がある。そこで、提案手法では、累積画像の全濃度範囲を非線形に分割して、256階調の出力画像に変換する。

3.2 染色体の表現

累積画像に含まれる最小濃度を I_{min} 、最大濃度を I_{max} とする。累積画像は、複数枚の濃淡画像を加算したものであるため、最小濃度と最大濃度の差は、単独の濃淡画像よりも広くなる。但し、累積画像には、 I_{min} から I_{max} までの濃度範囲内の

図3 累積画像の濃度値を表すテーブル

Fig.3 Table to represent gray-levels in accumulated image

全濃度値が含まれている保証はなく、一般的には、一部の濃度値は存在しない可能性が高いと考えられる。すなわち、累積画像に含まれる全濃度値の数を G_n とすると、

$$G_n \leq I_{\max} - I_{\min} + 1 \quad (2)$$

となる。累積画像に含まれていない濃度値に関しては、処理の対象となり得ないので、ここでは、累積画像に実際に含まれている各濃度値を出力画像における 0 から 255 までの各階調に変換する関係を求める。累積画像に実際に含まれる濃度値を表すために、図 3 に示すような、累積画像内の各濃度値とその濃度値の番号を表す 1 次元のテーブル G_{conv} を作成する。この例では、累積画像内の最小濃度が $I_{\min}=10$ の場合、 G_{conv} の要素 10 に最初の濃度値の番号を表す 0 が格納され、次に、 $I_{\min}$ の次に小さな濃度値が 16 の場合、要素 16 に 2 番目の濃度値の番号を表す 1 が格納される。そして、最後に、 G_{conv} の要素 $I_{\max}$ に累積画像に含まれる濃度値の数を表す G_n-1 が格納される。

個体の染色体は、図 4 に示すように、累積画像に含まれる G_n 個の各濃度値を表す遺伝子を 1 次元に並べた配列とする。染色体内には、出力画像における各階調 0~255 を表す整数値を持つ遺伝子が各々 1 つだけ含まれている。これら出力画像の各階調数を表す遺伝子の並び順は、染色体の左側からとする。なお、GA における最初の世代では、各個体の染色体にはランダムな遺伝子情報を与える。すなわち、各個体の染色体内から、ランダムに 255 個の遺伝子を選択し、左端から順に選択した各遺伝子に 0 から 255 までの整数値を与える。そして、0 から 255 までの整数値が与えられなかった遺伝子には 0 を格納する。

次に、この染色体において、ある整数 $n(n \geq 1)$ と $n+1$ の間に位置する遺伝子の値を n に変換することによって、図 4 に示すような累積画像内の濃度値の番号と出力画像の階調を直接的に表す濃度変換テーブル L_{ui} を得る。図 4 に示した染色体の場合、この染色体から得られる L_{ui} によって、累積画像内の濃度値番号 0 と 1 は出力画像の階調 0 に変換され、累積画像内の濃度値番号 2 から 4 が出力画像の階調 1 に変換される。そして、累積画像内の濃度値番号 G_n-3 から G_n-1 が出力画像の階調 255 に変換される。すなわち、累積画像内の濃度値 $i_u(I_{\min} \leq i_u \leq I_{\max})$ は、次式によって、出力画像の階調 o_u に変換される。

図4 染色体の表現と濃度変換テーブル

Fig.4 Representation of chromosome and conversion table of gray-levels

$$o_u = L_{ui}(G_{\text{conv}}(i_u)) \quad (3)$$

3. 3 個体の適応度評価

次に、各個体の適応度を評価する。ある個体 k の染色体が表す濃度変換テーブルを用いて得られた出力画像が良好なコントラストを持つ場合に、その個体 k に高い適応度を与える。一般的には、暗部につぶれがなく、かつ明部に白飛びが発生せず、しかも中間階調の表現が滑らかな出力画像が望ましいと考えられる。ここでは、画像全体に亘るコントラスト感が高い出力画像を得る目的で、画像全体から得られる 1 次微分値を個体の適応度とする。画像の 1 次微分値は、主に画像内に含まれる対象物のエッジ部分の明瞭さを表すため、画像のコントラストを表す尺度のひとつと考えることができる^{(11)~(13)}。具体的には、次式に示すように、個体 k の染色体によって生成された出力画像 $O_{x,y}(k)$ に Prewitt オペレータを適用した結果画像 $E_{x,y}(k)$ の全画素値の平均を個体 k の適応度 $f(k)$ とする。

$$f(k) = \frac{1}{N_p} \sum_x \sum_y E_{x,y}(k) \quad (4)$$

但し、 $E_{x,y}(k)$ は画素 (x,y) におけるエッジ強度を表し、

$$E_{x,y}(k) = \sqrt{\Delta X_{x,y}(k)^2 + \Delta Y_{x,y}(k)^2} \quad (5)$$

である。ここで、 $\Delta X_{x,y}(k)$ 、 $\Delta Y_{x,y}(k)$ は、各々、画素 (x,y) における Prewitt オペレータによる X 方向および Y 方向への一次微分値である。また、 N_p は全画素数である。上記の適応度 $f(k)$ が大きいほど、個体 k は集団進化に有効性が高いとする。

3. 4 進化方法

個体の選択淘汰には、ランク方式を用いた⁽²⁾。 G 個の全個体の中で、適応度が上位 $S\%$ の個体だけを次世代に存続させ、下位個体は淘汰する。そして、上位個体間の交叉によって、淘汰した個体と同数の個体を増殖させる。各世代における最大適応度が 30 世代の間一定値を記録した時点で、GA における進化が完了したと見なす。

3. 5 交叉方法

3. 2 節で述べた染色体の表現方法では、染色体の左端の遺伝子から順に濃度変換の関係を表している。従って、一般的な交叉方法として知られる 1 点交叉や 2 点交叉を用いた場合、子供個体の染色体では、左端からの遺伝子に含まれる整数値の順序が逆転する可能性があり、その結果、交叉によって、大量の致死個体が発生する危険性が生じる。このような問題を回避するために、ここでは、両親の個体に含まれる同一の整数値を持つ遺伝子の位置に応じて交叉

図 5 交叉方法
Fig.5 Crossover method

図 6 突然変異方法
Fig.6 Mutation method

図 7 入力画像の例 ((a)child)
Fig.7 Example of input images ((a)child)

を行う⁽¹⁴⁾。

出力画像の階調数が 256 であるので、各個体の染色体には、左端からの並び順で 1 から 255 までの整数値を持つ遺伝子が各々 1 個だけ含まれている。まず、子供個体の染色体に含まれるすべての遺伝子の値を 0 に設定する。そして、図 5 に示すように、2 つの親個体の染色体について、各々 1 の値を持つ遺伝子の位置を求める。次に、これらの遺伝子の位置も含め、双方の遺伝子の間にある子供個体のランダムな位置にある遺伝子の値を 1 にする。同様に親個体の染色体について、各々 2 の値を持つ遺伝子の位置を求め、これらの遺伝子の位置も含め、双方の遺伝子間のランダムな位置にある子供個体の遺伝子の値を 2 にする。以下、同様にして、255 までの整数値を子供個体の染色体の各遺伝子に設定する。但し、いずれかの親個体の染色体について、 n の値を持つ遺伝子の位置が、子供個体の染色体で $n-1$ の値を持つ遺伝子の位置と同じか、あるいは左側にある場合が起こり得る。この場合は、子供個体の染色体で $n-1$ の値を持つ遺伝子と、もう一方の親個体の染色体で n の値を持つ遺伝子の間にある、子供個体の染色体のランダムな位置にある遺伝子の値を n にする。図 5 では、子供個体の染色体への 3 と 4 の設定が、この場合に該当する。以上の交叉方法では、親個体の染色体情報を大きく変形させることなく子供個体

に継承することができる。

3. 6 突然変異方法

突然変異率 $M\%$ にて、集団内からランダムに選択した個体を突然変異の対象とする。対象となる個体の染色体から、1 から 255 までの値を持つ遺伝子をランダムにひとつだけ選択し、この遺伝子の位置を隣り合う値を持つ遺伝子間のランダムな位置に移動させる。例えば、図 6 に示すように、3 の値を持つ遺伝子が選択されたら、この遺伝子の位置を 2 の値を持つ遺伝子と 4 の値を持つ遺伝子の間のランダムな位置に移動させる。

4. 実験と結果

提案手法を用いて、複数枚の濃淡画像から、出力画像を生成する実験を行った。

4. 1 実験条件

レンズの絞りを変化させて、8 枚の入力画像として撮影した。各々の入力画像の最大階調数は 256 であるが、これら全階調を表す濃度値が画像内に含まれるとは限らない。また、レンズの絞りの位置は、入力画像の濃度が各々に異なるように調整した。

入力画像すべてに 256 種類の濃度値が含まれる場合、累積画像には、最大 2048 種類の濃度値が含まれる可能性があ

図 8 出力画像 ((a)child, 左上: 入力画像中の原画像, 右上: 線形濃度変換手法, 左下: 累積画像の全濃度範囲を等分割する手法, 右下: 提案手法)
Fig.8 Output images ((a)child, upper-left: original image in input images, upper-right: the method to convert gray-levels linearly, lower-left: the method to separate the range of accumulated gray-levels equally, lower-right: the proposed method)

るため、3. 2 節で述べた、累積画像に含まれる濃度値を表すテーブル G_{conv} の要素数は 2048 とした。従って、染色体内の遺伝子の最大数は 2048 となる。GA におけるパラメータは、集団内の個体数 $G=500$ 、個体の次世代への存続率 $S=50\%$ 、突然変異率 $M=0.1\%$ とした。

4. 2 出力画像の生成結果

図 7 は、8 枚の入力画像の例((a)child)を示す。この例は、雪面を背景とした黒っぽい衣服を着た人物画像であり、明暗のダイナミックレンジが広いので、雪面の模様、人物の顔、衣服の皺などの微妙な濃淡変化を 1 枚の入力画像だけで表現することは困難である。図 8 は、図 7 に示した 8 枚の入力画像から、各手法によって生成した結果画像を示す。左上の画像は、8 枚の入力画像中、最も階調数が多かった画像を示し、右上の画像は、左上に示した 1 枚の画像に対して、線形な濃度変換によるコントラスト強調を行った結果である。また、左下の画像は、8 枚の入力画像を加算した累積画像の全濃度範囲を 256 階調に等分割する手法による結果である。右下の画像は、提案手法による結果である。まず、背景部分では、右上の 1 枚の入力画像からのコントラスト強調結果、および右下の提案手法による結果では、雪面の濃淡変化が明確に表現されている。人物の顔部分に関しては、左下と右下に示した複数枚の入力画像を用いた手法では、微妙な濃淡変化が表現されている。次に、衣服部分では、右上の 1 枚の画像からのコントラスト強調結果では、完全に黒つぶれを起こしているが、左下と右下の複数画像を用いた手法では、皺の状態が把握できる。左下の累積画像の全濃度範囲を等分割する手法と、右下の提案手法による結果を比較すると、後者の方が雪面の模様が明確で、

図 10 世代と最大適応度の関係
Fig.10 Relation between generation and the maximum fitness

しかも衣服部分のコントラストも良好であることがわかる。次に、他の画像について同様な実験を行った結果を図 9 に示す。いずれの画像についても、右上に示した 1 枚の入力画像からのコントラスト強調結果では、入力画像に含まれる階調数が不十分なこともあって、特に暗部のディテールが大幅に失われている。これに対して、左下の累積画像の全濃度範囲を等分割する手法、および右下の提案手法による結果では、暗部も明部も良好な濃淡表現が実現されている。但し、これら両者には差異が認められ、提案手法による結果の方がより微妙な濃淡変化が表現されている。例えば、提案手法による結果では、(b)watch における皮バンド部分のテクスチャがより明瞭である。同様に、(c)floppy では、背景のプラスチック表面のコントラスト感が高い印象を受ける。また、(d)cloth では、布表面の質感や布と紐の分離状態がより明瞭である。(e)house では、僅かではあるが、室内にある円形温度計の目盛の視認性が高い結果が得られている。以上に示したように、提案手法では、累積画像の全濃度範囲が非線形に分割されるため、明部と暗部の双方について、良好な濃淡変化が表現されていると考えられる。

4. 3 進化過程

図 10 は、上記の 5 種類の実験用画像について、提案手法によって最終的な出力画像を得るまでの世代と最大適応度の関係を示す。いずれの画像についても、世代が進むにつれて最大適応度が微増し、300 から 400 世代程度で進化が完了した。進化に要した平均時間は、処理系に Pentium III -1GHz を用いて 33.4 秒であった。次節でも述べるが、今回の実験では、累積画像に含まれる濃度値の数は、1300 から 1900 程度であった。GA によって、1300 から 1900 程度の濃度数を 256 種類の各階調に分割する過程では、各濃度の割り当てについて、微妙な調整が行われると考えられる。進化過程の第 0 世代では、ランダムな初期染色体情報を持つ全個体の中から解が抽出されるが、4. 2 節で述べた累積画像の全濃度範囲を等分割する

(b)watch

(c)floppy

(d)cloth

(e)house

図9 出力画像の例 (左上：入力画像中の原画像，右上：線形濃度変換手法，左下：累積画像の全濃度範囲を等分割する手法，右下：提案手法)

Fig.9 Examples of output images ((a)child, upper-left: original image in input images, upper-right: the method to convert gray-levels linearly, lower-left: the method to separate the range of accumulated gray-levels equally, lower-right: the proposed method)

手法とほぼ同程度の画像が得られることが多かった。図 10 に示したように、後続の世代では、最大適応度の増加傾向は軽微ではあるものの、進化過程を経て、画像の階調表現には明らかな向上が見られた。

提案手法は、GA における進化過程に計算コストを要することが欠点である。しかし、処理時間を費やしても、視覚的により良好かつ微妙な階調表現を持つ画像を表示したい場合は有効性が高いと考えられる。一般的に、提案手法で用いる入力画像を得る場合、レンズの絞りを手動で変化させて 8 枚の画像を撮影する作業に数十秒程度の時間が必要である。従って、目的によっては、処理時間が大きな問題とならない場合も多いと考えられるが、今後は、計算コストを削減するために、個体数の最適化、エッジ強度算出の高速化等について検討する必要がある。

4. 4 画質の定量的評価

次に、4. 2 節で示した各手法による結果画像の画質について、定量的評価を試みた。画像から受けるコントラスト感の厳密な評価は困難と考えられるが、ここでは、自然画の鮮明度を表す尺度である MTF (Modulation Transfer Function)^{(15),(16)} による画像の評価結果と高い相関があると報告されているデルタヒストグラムによる評価方法を用いた⁽¹⁷⁾。

デルタヒストグラムは、全画素について、周辺画素との平均濃度差をヒストグラム化したものである。すなわち、濃度値 $g(x,y)$ を持つある画素 (x,y) について、8 近傍画素間との絶対濃度差の平均値 $H(x,y)$ を次式によって求める。

$$H(x,y) = \frac{1}{8} \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 |g(x,y) - g(x+j,y+i)| \quad (6)$$

表 1 出力画像の SF 値
Table 1 SF values of output images

画像		(a)child	(b)watch	(c)floppy	(d)cloth	(e)house
	累積画像内の最小濃度 I_{min}	0	36	12	0	88
	累積画像内の最大濃度 I_{max}	1338	1692	1430	1591	1964
	累積画像内の濃度範囲 $I_{max}-I_{min}+1$	1339	1657	1419	1592	1877
	累積画像内の濃度値数 G_n	1309	1587	1334	1568	1877
	SF	原画像	0.83	2.97	4.01	2.00
線形濃度変換手法		1.20	2.97	5.45	2.00	1.45
累積濃度範囲を等分割する手法		1.29	4.12	8.83	2.37	1.50
提案手法		1.73	5.42	11.34	2.97	1.79

対象画像内の全画素について横軸に $H(x,y)$ 、縦軸に画素数を示す累積ヒストグラムを作成し、これをデルタヒストグラム D_o とする。一方、対象画像に対してガウシアンフィルタを施した平均化画像について、同様にデルタヒストグラム D_b を得て、デルタヒストグラム D_o と D_b との差 $SF(Sharpness Factor)$ を次式によって求める。

$$SF = \frac{1}{N_p} \sum_{n=0}^{255} |D_o(n) - D_b(n)| \tag{7}$$

ここで、 N_p は全画素数である。対象画像の鮮明度が高い場合は、ガウシアンフィルタによる画像のぼけ具合が大きくなるため、デルタヒストグラムの変化が著しくなり、その結果として SF の値は大きくなる。一方、対象画像の鮮明度が低い場合は、平均化処理による変化が顕著ではないため、 SF の値は小さくなる。

表 1 は、5 種類の実験用画像に関して、原画像および各手法による出力画像について、 SF の値を求めた結果を示す。参考のため、累積画像の最小濃度 I_{min} 、最大濃度 I_{max} 、濃度範囲 $I_{max}-I_{min}+1$ 、および累積画像に含まれる濃度値の数 G_n も示している。画像によっては、累積画像の濃度範囲よりも濃度値の数の方が少ないことから、一部の濃度値が累積画像に含まれていないことがわかる。また、累積画像に含まれる濃度値の数は、1300 から 1900 程度と、1 枚の濃淡画像に含まれる最大階調数 256 と比較して、はるかに多いことがわかる。表 1 が示すように、いずれの画像についても、提案手法による出力画像は、最も高い SF 値が得られている。これらの結果から、提案手法によって、コントラスト感が高く鮮明な結果画像が得られていることが示唆される。

4. 5 ヒストグラム均等化法との比較

2 章でも述べたように、コントラスト強調を目的とした代表的な手法として、ヒストグラム均等化法がある。ヒストグラム均等化法は、濃度分布に関するエントロピーを最大化する効果があり、強力なコントラスト強調手法として知られている。しかし、入力画像によっては、画素濃度が大幅に変化してしまう場合があるため、強調具合が過多となったり、あるいはノイズがかった結果画像となることが

図 11 ヒストグラム均等化法による出力画像 (左側：1 枚の画像からの結果、右側：累積画像からの結果)
Fig.11 Output images by the histogram equalization method (lefts side: results from single image, right side: results from accumulated image)

指摘されている^{(11),(12)}。

図 11 は、ヒストグラム均等化法によって生成した結果画像を示す。ヒストグラム均等化法では、同一濃度の画素の中から濃度変換を行う画素を選択する際に、ランダムに画素を選択する方法と、周辺画素の平均濃度に応じて画素を選択する方法があるが、ここでは、一般的により良好な結果が得られる後者の方法を用いた。各々、左側の画像は、図 8 および図 9 の各々左上に示した 1 枚の濃淡画像に対して、ヒストグラム均等化法を実行した結果である。また、各々、右側の画像は、累積画像の全濃度範囲をヒストグラム均等化法によって 256 階調に分割した結果である。

まず、左側に示した 1 枚の画像からの強調結果では、特に均一な濃度領域内の各画素が各々異なる濃度に変換されるため、ノイズが目立ち、強調度合が高すぎる不自然な画像となっている。一方、右側に示した累積画像に対してヒストグラム均等化法を適用した結果は、(e)house のように、提案手法とほぼ同等な階調表現を持つ出力画像が得られている場合もある。また、全般的に、濃淡の変化状態が容易に視認可能な結果画像が得られている。しかし、1 枚の画像からの結果と同様、強調度合が極めて高く、例えば、(a)child の衣服や(c)floppy の背景部分は、素材の質感も含めて濃淡表現に不自然な印象を受ける。また、(d)cloth では文字部分に白飛びが発生しており、また、黒色の紐と布とのコントラストは、実物を目視によって観測した印象と大きく異なっている。

以上に述べたように、ヒストグラム均等化法は、濃淡の変化状態を観測する目的では、強調度合が極めて高いため、画像によっては適する場合もある。しかし、今回の目的のように、視覚的に自然で滑らかな階調表現を持つ画像を得たい場合は、提案手法の方が適していると考えられる。

5. ま と め

露光状態が異なる複数枚の濃淡画像から、出力画像の全階調を利用した高コントラストな 1 枚の濃淡画像を生成する手法を提案した。提案手法では、複数枚の画像を累積した多階調画像に含まれる全濃度値を出力画像の各階調に適切に割り当てるために、GA を用いている。実験の結果、提案手法によって、画像の暗部から明部に至るまで、微妙な濃淡変化の表現が可能な出力画像が得られた。また、デルタヒストグラムを用いた画質の定量的評価を行ったところ、提案手法による出力画像は、高い鮮明度が得られた。今回は、濃度値の数が 1300 から 1900 程度の累積画像から、256 階調への変換を行ったが、今後は、更に多くの階調間の変換、および処理の高速化について検討する予定である。

(平成 13 年 10 月 24 日受付, 平成 14 年 3 月 11 日再受付)

文 献

- (1) J.H.Holland: "Adaptation in Natural and Artificial Systems", The Univ. Michigan Press (1975).
- (2) D.E.Goldberg: "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley (1989).
- (3) A.Rosenfeld and A.C.Kak: "Digital Picture Processing", Academic Press (1976).
- (4) E.L.Hall: "Digital Image Processing and Pattern Recognition", Academic Press (1979).
- (5) D.J.Ketcham: "Real-time image enhancement techniques", SPIE, Vol.74, OSA Image Processing, pp.120-125 (1976).
- (6) 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊: "多重絞りカラー画像の解析", 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.10, pp.1338-1348 (1991).
- (7) 稲垣 修, 寺田利之, 福田英寿, 小関広明, 井上 淳, 柿沼 実: "高精度ランダムアクセスカメラ及び広ダイナミックレンジカメラの開発", 第 8 回外観検査の自動化ワークショップ講演集, pp.24-28 (1996).
- (8) 塚田敏彦, 山田啓一, 山本 新, 松尾啓志, 岩田 彰: "周囲環境照度変化にロバストな搬送部品の印字文字認識", 電気学会論文誌, Vol.118-C, No.9, pp.1322-1328 (1998).
- (9) 山田啓一, 中野倫明, 山本 新: "車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式", 電子情報通信学会論文誌, Vol.178-D-II, No.10, pp.1439-1449 (1995).
- (10) 森脇耕介: "適応露光によるカラー画像の入力方式", 電子情報通信学会論文誌, Vol.176-D-II, No.9, pp.1894-1901 (1993).
- (11) 平野邦彦, 佐野桜太, 宮道壽一: "多段階露出画像の統合による画像のディテール強調", 電子情報通信学会論文誌, Vol.181-D-II, No.9, pp.2097-2103 (1998).
- (12) 斉藤文彦: "遺伝的アルゴリズムによる画像コントラスト強調", 電子情報通信学会論文誌, Vol.181-D-II, No.11, pp.2606-2616 (1998).
- (13) 斉藤文彦: "コントラスト強調のための空間的特徴に関する考察", 電気学会論文誌, Vol.120-C, No.10, pp.1372-1379 (2000).
- (14) 斉藤文彦: "遺伝的アルゴリズムを用いた濃淡画像の階調削減法", 電子情報通信学会論文誌, Vol.182-D-II, No.7, pp.1140-1149 (1999).
- (15) J.C.Dainty and R.Shaw: "Image science", Academic Press (1974).
- (16) J.S.Arney, C.D.Arney, M.Katsube and P.G.Engelndrum: "An MTF analysis of papers", Journal of Imaging Sci. Technol., Vol.40, No.61, pp.19-25 (1996).
- (17) Y.Miyake, Y.Satoh, H.Yaguchi and T.Igarashi: "An evaluation of image quality for color images with different spatial frequency characteristics", Journal of Photogr. Sci., Vol.38, pp.118-122 (1990).

斉藤 文彦

(正員) 1981 年慶大・工・数理卒。同年日本 IBM 入社。1995 年日立製作所入社。1998 年岩手県立大学助教授。1999 年岐阜大学工学部応用情報学科助教授。マシンビジョン、視覚情報処理の研究に従事。博士(情報科学, 工学)。1998 年小田原優秀論文賞受賞。電子情報通信学会, 画像電子学会, 精密工学会等会員。