

遺伝的アルゴリズムによる画像コントラスト強調

斉藤 文彦[†]

Image Contrast Enhancement Using Genetic Algorithm

Fumihiko SAITOH[†]

あらまし 濃淡画像のコントラストを強調するための手法として、輝度線形変換法とヒストグラム均等化法が広く知られている。これらの手法は、原画像によっては、良好なコントラストをもつ画像が得られなかったり、不自然な印象を受ける結果画像となる場合がある。これは、画像に含まれる空間的な特徴を無視し、画像全体の輝度分布情報のみを特徴量として輝度変換を行っているためと考えられる。本論文では、遺伝的アルゴリズムによって原画像と結果画像間の輝度入出力関係を決定するコントラスト強調手法を提案する。結果画像内に含まれるエッジ強度の累積値を集団内の各個体の適応度として評価し、集団を進化させることによって原画像に適切な輝度入出力関係を決定する。本手法によるコントラスト強調画像に関して主観的評価実験を行ったところ、従来手法と比較して良好な結果が得られた。また、コントラストの定量的評価を試みた実験においても良好な結果が得られた。

キーワード コントラスト強調, 遺伝的アルゴリズム, ルックアップテーブル

1. ま え が き

画像のコントラストは、その画像から受ける主観的な画質に大きな影響を与える。良好なコントラストをもつ画像を取得することは、画像センシングにおける重要な要求項目である。しかし、現実には被写体、外光、光学システム、カメラ、画像処理装置等の制限から、必ずしも良好なコントラストが得られるとは限らない。取得した濃淡画像のコントラストが良好でない場合、原画像から得られる輝度分布ヒストグラムの特徴を利用してコントラストを強調する、輝度線形変換法 [1]~[3] およびヒストグラム均等化法 [1]~[4] が代表的な手法としてよく用いられる。特にヒストグラム均等化法は、輝度に関するエントロピーを最大にすることが可能であり、強力なコントラスト強調手法として知られている。しかしながら、これらの手法では、画像全体の輝度分布情報を用いて各画素の輝度を変換しており、2次元画像における各画素間の空間的な情報は無視されている。そのため、画像の種類によっては効果的にコントラストが強調されなかったり、視覚的に不自然なコントラストをもつ画像に変換されるこ

とがある。各種の画像に関して、視覚的に自然で、かつ良好なコントラストをもつ画像を得るためには、画像に含まれる空間的な情報を有効に利用する必要があると思われる。

本論文では、画像内に含まれる空間的なエッジ強度を適応度の評価関数とする遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用い、濃淡画像のコントラストを強調する手法を提案する。GA がもつ大局的な探索能力によって、原画像を良好なコントラストをもつ画像に変換するための輝度入出力関係を決定する。また、本手法を各種の画像に適用した実験結果について述べると共に、従来の輝度線形変換法およびヒストグラム均等化法と比較して、本手法の有効性を確認する。

2. コントラスト強調手法

濃淡画像内の最小輝度 $I_{\min}$ と最大輝度 $I_{\max}$ の差が小さな画像のコントラストを強調する場合、図 1 に示すように、 $I_{\min}$, $I_{\max}$ を各々、画像が表現できる最低輝度 0 と最高輝度 $G_{\max}$ となるように各画素の輝度を線形変換する手法がよく用いられる [1]~[3]。この場合、原画像の輝度分布ヒストグラムは、 $I_{\min}$ から $I_{\max}$ の範囲から画像が表現可能な最大の輝度範囲に拡大される。この輝度線形変換法は、原画像の各画素間の輝

[†] 岩手県立大学ソフトウェア情報学部, 岩手県
Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural
University, 152-52 Sugo, Takizawa, Iwate-ken, 020-0173 Japan

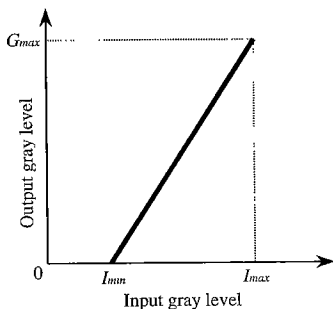


図 1 輝度線形変換法

Fig. 1 Gray level linear transform method.

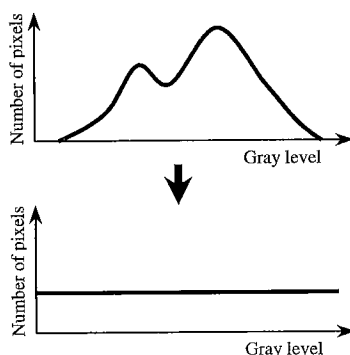


図 2 ヒストグラム均等化法

Fig. 2 Histogram equalization.

度差を線形に保持したまま輝度のダイナミックレンジを拡大できるため、視覚的に自然なコントラスト強調画像が得られるという特長がある。しかし、最小輝度 $I_{\min}$ と最大輝度 $I_{\max}$ の差が比較的大きく、しかも最小輝度付近と最大輝度付近に多くの画素が分布している画像の場合、輝度線形変換法では、原画像と変換後画像がほとんど変化しないため、必ずしも良好なコントラストをもつ画像を得ることはできない。ヒストグラム均等化法 [1]～[4] は、このような場合に有効な手法であり、図 2 に示すように、画像全体の輝度分布ヒストグラムにおける各輝度をもつ画素数が互いに等しくなるように輝度変換を行う。ヒストグラム均等化法は、輝度のエントロピーを最大化するため、視覚的にも極めてコントラスト感の高い画像を得ることができるが、反面、原画像と比較して不自然なほどコントラストが強調されていると感じられることも多い。また、原画像内にはほぼ均一な輝度をもつ広い領域が存在する場合、その領域内の画素が各々異なる輝度に変換されるため、全体的にノイズがかった印象の画像とな

る。更に、 γ 補正による各種の輝度変換もよく行われるが [3]、これらは、原画像においてコントラストを強調する輝度領域があらかじめ判明している必要があり、汎用的なコントラスト強調手法とは言いがたい。

以上のように、一般的に、濃淡画像のコントラストを強調する場合、各種の手法を適用してみて、視覚的に適切な結果が得られる手法を選択する必要がある。そして、最適なコントラスト強調手法は、原画像によって異なることが多い。幅広い種類の画像に対応できる汎用的なコントラスト強調処理を実現するためには、画像によって輝度変換のための入出力関係を最適化させる必要がある。輝度線形変換法およびヒストグラム均等化法では、扱う特徴量は基本的に画像全体の輝度分布情報であり、画像が本来もっている空間的な情報はほとんど切り捨てられている。画像の空間的な特徴情報を利用することによって、視覚的により適切なコントラスト強調を実現することが、本手法の特長である。

3. GA によるコントラスト強調

3.1 本手法の原理

濃淡画像のコントラストを強調する場合、原画像の各画素の輝度とコントラスト強調後画像の各画素の輝度の関係は、一般的に、輝度の入出力関係を定義するルックアップテーブル (LUT: Look Up Table) によって表すことができる。今回対象とする濃淡画像の輝度階調は 256 レベルとする。従って、LUT の入力と出力は、ともに 0 から 255 までの 256 種の輝度レベルをもつ。ある原画像に関して、良好なコントラストをもつ画像を得るためには、LUT の輝度入出力関係をその原画像に合った最適な状態に設定する必要がある。しかし、最適な輝度入出力関係は、原画像によって異なるのが普通である。256 種類の各々の入力輝度レベルに対して最適な出力輝度レベルを決定することは、膨大な組合せ総数となるが、これらの中で最適と思われる入出力関係を解として決定する必要がある。本手法では、大域的な解探索能力に優れている GA を用い、この LUT の輝度入出力関係を決定する。GA は、生物の進化規則に着想を得て、集団内の個体への選択淘汰、交叉、増殖、突然変異などの遺伝的操作によって集団を進化させ、工学的課題の準最適解を求めるための手法である [5]～[8]。近年は、GA を画像認識に適用した事例も多く報告されている [9]～[13]。GA を具体的な課題に適用するためには、個体

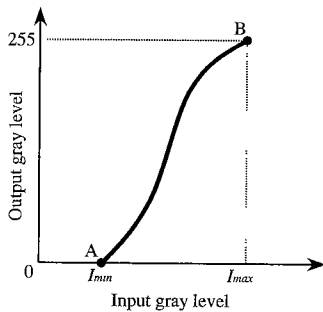


図 3 LUT によって表される輝度入出力関係

Fig. 3 Relation between input gray level and output gray level represented by LUT.

の性質を表す染色体の表現、各種の遺伝的操作、個体の環境への適応度等を設定する必要がある。本手法では、染色体の情報は、単調非減少な LUT の輝度入出力関係を表す曲線の形状とし、また、個体の適応度は、画像全体のエッジ強度の総和から求める。そして、遺伝的操作によって集団を進化させ、進化完了時に最大適応度をもつ個体の染色体情報から、最終的な LUT の輝度入出力関係を求める。

3.2 染色体の定義

最小輝度が $I_{\min}$ 、最大輝度が $I_{\max}$ の原画像のコントラストを強調する場合、輝度のダイナミックレンジを最大にする意味で、輝度 $I_{\min}$ を輝度レベル 0 に、また、輝度 $I_{\max}$ を輝度レベル 255 に変換する必要がある。この場合の LUT の輝度入出力関係は、図 3 に示すように、点 A が始点で点 B が終点となる曲線によって与えられる。本手法では、この LUT における曲線 AB 部分の形状を表すデータを個体の染色体として扱う。染色体は、 $I_{\max} - I_{\min}$ 個の要素をもつ 1 次元配列とする。この 1 次元配列は、LUT の輝度入出力関係を示す曲線を表すが、各要素に含まれるデータは、直前のデータ、すなわち配列内で左隣のデータとの変位を示している。コントラスト強調処理では、原画像における輝度の大小関係が輝度変換後画像で逆転することは不自然であるため、LUT の出力輝度レベルは、入力輝度レベルに対して単調非減少とする。それに伴い、染色体の 1 次元配列の各要素には 0 か 1 のビットが与えられる。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ビット列を与える。染色体の j 番目の要素内のビット値を $b(j)$ とする場合、次式に示すように、最初の要素から j 番目の要素までのビット値の総和 $B(j)$ を求める。

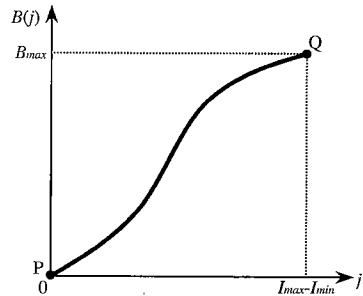


図 4 染色体によって表される曲線

Fig. 4 Curve represented by a chromosome.

$$\begin{aligned} B(j) &= 0 & (j=0) \\ B(j) &= B(j-1) + b(j-1) & (1 \leq j \leq I_{\max} - I_{\min}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 j を横軸、 $B(j)$ を縦軸とすると、図 4 に示すような曲線 PQ が得られる。この曲線 PQ の最大値 $B_{\max}$ は、この染色体に含まれるビット 1 の総数によって決定される。次に、この曲線 PQ の端点 P および Q を図 3 に示した LUT における点 A および点 B に各々一致するように、曲線 PQ の縦軸に関する正規化を行い、この結果を LUT における点 A から点 B までの輝度入出力関係とする。すなわち、LUT の入力輝度レベル i に対応する出力輝度レベル $O(i)$ は、次式によって表される。

$$O(i) = 255B(i - I_{\min}) / B_{\max} \quad (I_{\min} \leq i \leq I_{\max}) \quad (2)$$

従って、染色体に設定される初期値によって、LUT の輝度入出力関係を表す曲線の形状が変化することになる。

3.3 適応度の定義

次に、個体の環境への適応度を定義する。コントラストの優れた画像に関する一般的な定義は困難ではあるが、視覚的にコントラストが良好と感じる画像は、明暗がはっきりしているだけでなく、エッジ部分が鮮明であることが重要な条件となっている [14]。そこで、本手法では、画像内のエッジ強度を個体の適応度とする。具体的には、ある個体の染色体によって表される LUT を用いて原画像の輝度変換を行い、その変換後画像に含まれるエッジ強度の総和をその個体の適応度とする。エッジ強度の算出には、Prewitt オペレータを用いる。ある個体 k の染色体によって表現される LUT の入出力関係を用いて得られた輝度変換後画像の各画素の輝度を $g_k(x, y)$ とした場合、次式からその画像全体に含まれるエッジ強度の総和 $E(k)$ を求

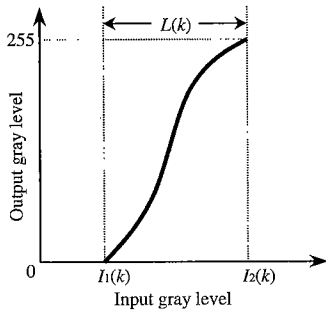


図 5 LUT における $L(k)$ の意味
Fig. 5 Meaning of $L(k)$ in LUT.

める。

$$E(k) = \sum_x \sum_y \sqrt{\delta h_k(x, y)^2 + \delta v_k(x, y)^2} \quad (3)$$

但し、

$$\begin{aligned} \delta h_k(x, y) &= g_k(x+1, y-1) + g_k(x+1, y) \\ &\quad + g_k(x+1, y+1) - g_k(x-1, y-1) \\ &\quad - g_k(x-1, y) - g_k(x-1, y+1) \\ \delta v_k(x, y) &= g_k(x-1, y+1) + g_k(x, y+1) \\ &\quad + g_k(x+1, y+1) - g_k(x-1, y-1) \\ &\quad - g_k(x, y-1) - g_k(x+1, y-1) \end{aligned}$$

エッジ強度の算出に Prewitt オペレータを選んだ理由は、縦および横方向ともに 1 次微分を求める際に、3 画素の総合輝度差を用いるためにノイズの影響を受けにくく、比較的安定なエッジ検出が可能であるためである。次に、その輝度変換後画像のコントラストを評価するために、画像内のエッジ強度の総和 $E(k)$ から、次式に示す $C(k)$ を求める。

$$C(k) = E(k) + \eta L(k) \quad (4)$$

ここで、 $L(k)$ は、図 5 に示すように、この個体 k の染色体によって表現される LUT の出力輝度レベルが 0 となる入力輝度レベル $I_1(k)$ と、LUT の出力輝度レベルが 255 となる入力輝度レベル $I_2(k)$ の差 $I_2(k) - I_1(k)$ を表す。つまり、式 (4) における $L(k)$ の項は、図 3 に示した LUT の点 A と点 B の位置をクランプする働きがあり、原画像がもつ輝度範囲をできるだけ広く活用することを目的としている。式 (4) における η は、正の係数である。次に、この個体 k の適応度 $F(k)$ は、次式によって求める。

$$F(k) = C(k)/C_0 \quad (5)$$

この適応度評価式の分母 C_0 は、原画像に関して得られた式 (4) の値である。従って、式 (5) は、原画像に対する輝度変換後画像のコントラスト強調の比を表し

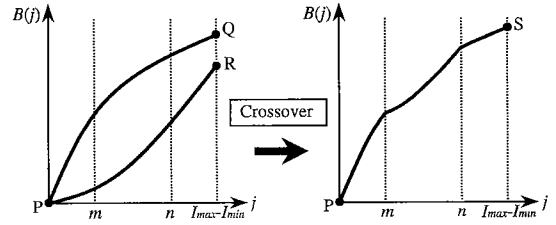


図 6 交叉による新しい曲線の生成
Fig. 6 Generated new curve by crossover.

ていることになる。

視覚的なコントラストに影響を与える空間的な特徴要因としては、エッジ強度の総和以外にも、例えば、エッジ強度の最大値や分散、あるいはエッジ強度のエントロピーなども考えられるが、これらをパラメータとする場合、適応度評価式が複雑化するため、ここでは最も単純にエッジ強度のみを用いた。なお、適応度評価式 (5) を変更することによって、画像に含まれるさまざまな特徴量を用いた輝度変換を容易に実現できることが本手法の特長でもある。

3.4 進化規則

次に、本手法における選択淘汰および増殖の進化規則について述べる。集団内の個体数を G とし、まず、存続率 $S\%$ で、全数 G 個の個体の中から次の世代へ存続させる個体 $G \cdot S/100$ 個を選択する。この場合、式 (5) によって各個体の適応度を求め、集団内において適応度が上位 $S\%$ の個体のみを選択する。これらの個体に関しては遺伝子操作を行わず、そのまま次の世代に存続させる。選択されなかった適応度が下位 $(100-S)\%$ 、すなわち $G(100-S)/100$ 個の個体は、存続の資格がないとみなして、集団から淘汰させる。次に、存続を許可した上位個体の中からランダムに 2 個の親を選び、これら親同士を交叉させ、新たに子供となる一つの個体を生成する。子供は淘汰した個体の総数、すなわち $G(100-S)/100$ 個だけ生成する。従って、集団内の個体総数 G は各世代を通して一定に保たれる。

3.5 交叉

次に、交叉方法について述べる。次の世代に存続を許可した個体の中から、ランダムに親 1 および親 2 となる個体を選び、2 点交叉法によって双方の親の染色体を分離、結合して、子供となる個体を生成する。例えば、親 1 および親 2 の各々の染色体のビット配列が、図 6 に示す曲線 PQ および曲線 PR を表し、交叉

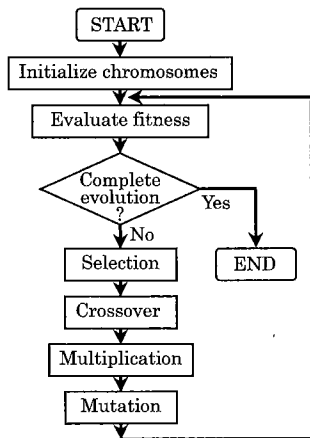


図 7 GA の流れ
Fig. 7 Flowchart of GA.

点として m 番目のビットと n 番目のビットがランダムに選ばれた場合、交叉によって、 m 番目のビットから n 番目のビットまでの範囲が曲線 PR、それ以外のビットの範囲が曲線 PQ の形状を受け継ぐ、新たな形状の曲線 PS を表す染色体をもつ子供が作られる。このように、交叉によって、親の染色体によって表現される曲線の形状の一部を受け継ぐ、さまざまな形状の曲線が生成される。子供個体の染色体によって表される LUT の輝度入出力関係は、3.2 にて述べたように、曲線 PS を正規化することによって得られる。

3.6 突然変異

突然変異には、最も一般的なビット反転方式を用いた。すなわち、すべての個体のすべての染色体の要素の中から、突然変異率 $M\%$ にてランダムに要素を選択し、この要素に含まれるビットが 1 であれば 0 に、0 であれば 1 に反転させる。

3.7 進化完了条件

以上に述べた遺伝的規則と方法によって、図 7 に示す流れに従って GA を適用し、集団進化の中で、各世代において最大適応度をもつ個体を抽出する。過去 10 世代にわたる最大適応度の増加量が一定値未満を記録した場合、進化がほぼ完了したと判断してアルゴリズムを終了させ、この時点で最大適応度をもつ個体の染色体を GA によって得られた解とする。すなわち、この個体の染色体を用いて、3.2 にて述べた方法によって LUT を設定し、この LUT の入出力関係によって原画像を輝度変換した結果画像を最終的に得られたコントラスト強調画像とする。

4. 本手法による処理結果

6 種類の実験用画像について、輝度線形変換法、ヒストグラム均等化法および本手法を用いてコントラスト強調を行った結果画像を図 8 に示す。各々、左上が原画像を表し、右上、左下、右下が、各々輝度線形変換法、ヒストグラム均等化法および本手法によるコントラスト強調画像を表す。各画像サイズは 256×240 画素、輝度階調は 256 レベルである。輝度線形変換法およびヒストグラム均等化法は、2. にて述べたように、ともに原画像の輝度分布情報のみを用いる汎用的な手法であり、特にパラメータ等を設定することなく、最大能力を発揮することができる。但し、ヒストグラム均等化法については、原画像内において同一輝度をもつ画素を各々別の輝度に変換する場合、ランダムに画素を抽出する手法と、近傍画素の平均輝度が高い順に画素を抽出する手法があるが、ここでは、ノイズが少ない画像が得られるという特長がある後者の手法を用いた [1], [2]。一方、本手法では、パラメータの値として、式 (4) における係数 $\eta=0.5$ 、集団内の個体数 $G=100$ 、次世代への個体の存続率 $S=50\%$ 、突然変異率 $M=0.1\%$ とした。また、GA は、過去 10 世代にわたる最大適応度の増加量が 0.01 未満となった時点で、進化が完了したとみなして終了させた。表 1 は、各コントラスト強調手法による結果画像に関して、式 (5) によって適応度を求めた結果を示す。本手法における最終的な最大適応度は、すべての実験用画像に関して、輝度線形変換法およびヒストグラム均等化法と比較して高い値となった。また、図 9 は、本手法によって求められた各々の実験用画像に関する LUT の輝度入出力関係を示す。進化の結果、各原画像によって、各々異なる輝度入出力関係が得られていることがわかる。

5. 考 察

5.1 コントラスト評価

5.1.1 主観的なコントラスト評価

6 種類の実験用画像を各手法によってコントラスト強調した結果画像について、視覚による主観的なコントラストを評価する実験を行った。被験者数は 8 名である。表 2 に実験条件を示す。実験は図 8 に示したように、原画像と同時に輝度線形変換法、ヒストグラム均等化法および本手法による 3 種類の結果画像をディスプレイに並べて表示し、原画像と比較して良好かつ

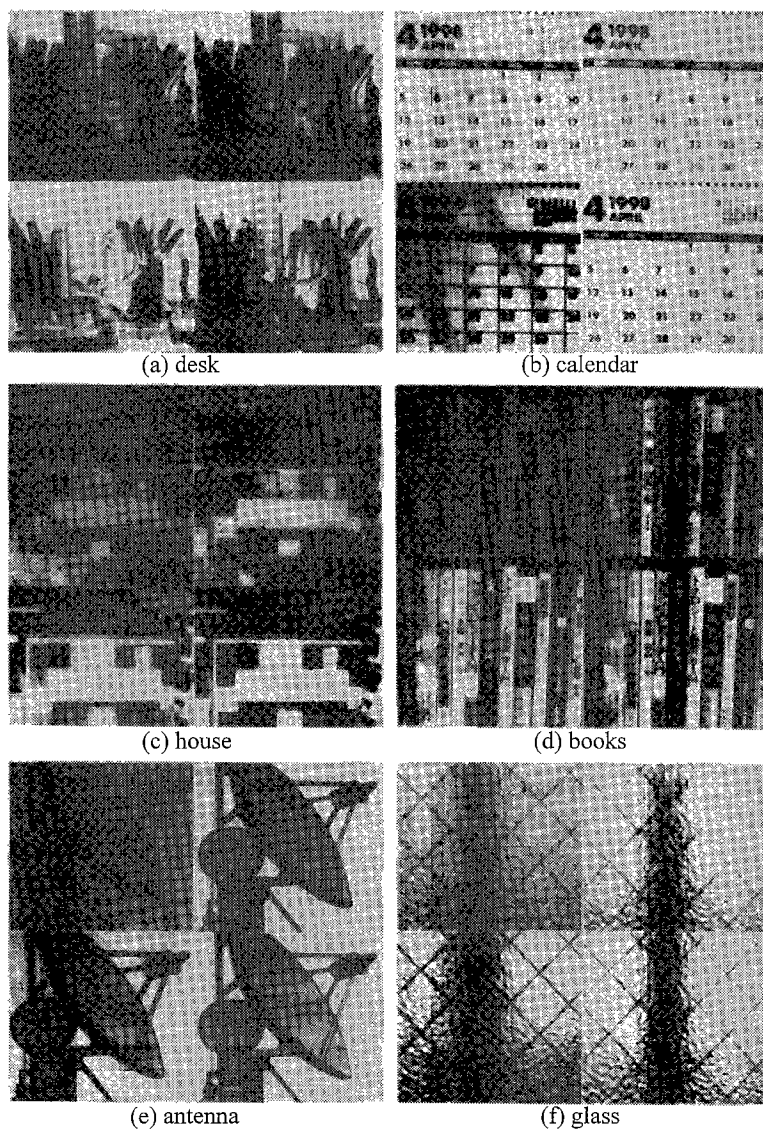


図 8 コントラスト強調処理結果 (左上：原画像，右上：輝度線形変換法，左下：ヒストグラム均等化法，右下：本手法)

Fig. 8 Contrast enhanced images (upper left: original image, upper right: by gray level linear transform, lower left: by histogram equalization, lower right: by the proposed method).

表 1 各コントラスト強調手法における適応度
Table 1 Fitness by contrast enhancement methods.

Images	Gray level linear transform	Histogram equalization	Proposal method (the last fitness)
(a) desk	1.19	1.41	1.43
(b) calendar	1.16	1.42	1.44
(c) house	1.13	1.38	1.41
(d) books	1.50	1.70	2.02
(e) antenna	1.38	1.59	1.70
(f) glass	1.30	1.74	1.78

自然なコントラストをもつ画像を被験者が1位から3位まで順位付けすることによって行った。表3は、各手法による結果画像に対して1位から3位まで順位付けした被験者の数と、各手法に関する平均順位を示す。すべての実験用画像について、本手法による結果が平均順位で最高位となり、また、(f)glass 以外の

画像については、ほとんどの被験者が本手法による結果を1位とした。輝度線形変換法とヒストグラム均等化法との比較では、総合的な順位としては、輝度線形

変換法がわずかに上位であったが、原画像によって、順位が明確に入れ替わる結果となった。特に、ヒストグラム均等化法は、コントラストの強調度合が高すぎるために、結果に不自然な印象を受ける被験者が多く、また、(b)calendarのように、均一な輝度をもつ広い領域が原画像内に存在する場合、この領域内の各画素が異なる輝度に変換されるために、ノイズが目立つ画像と評価される傾向があった。一方、輝度線形変換法は、原画像によらず自然な結果が得られるが、視覚的なコントラストが良好ではないという評価が多かった。これらと比較して、本手法による結果では、コントラストは良好であり、しかもヒストグラム均等化法のような不自然な印象がないという評価が多かった。つまり、輝度線形変換法とヒストグラム均等化法では、どちらがより良好な結果画像が得られるかは、原画像によって異なるが、本手法では原画像によらず、主観的に良好なコントラストをもつ結果画像が得られている。

5.1.2 DV と BV によるコントラスト評価

画像の視覚的なコントラストを定量化することは困難であるが、一つの尺度として、画像のDV (Detail Variance) とBV (Background Variance) による評価方法がある[15]。DV とBV の各値は、次のようにして求められる。まず、画像内の各画素について、その近傍領域内に含まれる画素の輝度分散を求める。次に、求められた輝度分散がしきい値以上の場合、そ

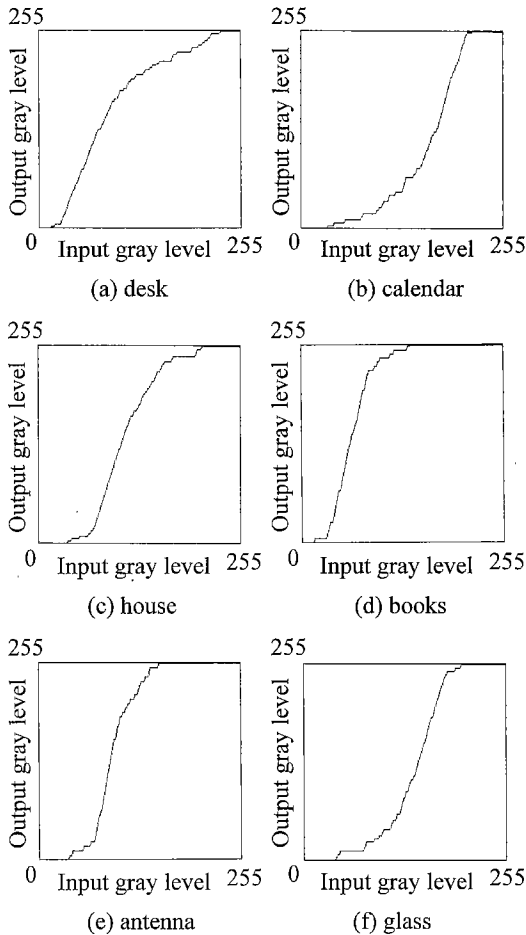


図 9 本手法によって求められた LUT の輝度入出力関係
Fig.9 Relations between input gray level and output gray level resulted by the proposed method.

表 2 主観的コントラスト評価実験の条件
Table 2 Conditions for evaluating subjective contrast.

項目	条件
被験者数	8名 (ソフトウェア技術者)
視距離	3H (H: 画面高)
室内照明	蛍光灯
室内照度	72lx
画面ピーク輝度	75cd/m ²
使用ディスプレイ	14 インチカラーモニター (ソニー製 PVM-1442Q)

表 3 主観的コントラスト評価実験の結果
Table 3 Experimental result of subjective contrast evaluation.

Methods	Gray level linear transform				Histogram equalization				Proposed method			
	1	2	3	Averaged ranking	1	2	3	Averaged ranking	1	2	3	Averaged ranking
(a) desk	0	2	6	2.8	1	5	2	2.1	7	1	0	1.1
(b) calendar	0	8	0	2.0	0	0	8	3.0	8	0	0	1.0
(c) house	1	7	0	1.9	0	0	8	3.0	7	1	0	1.1
(d) books	0	1	7	2.9	2	5	1	1.9	6	2	0	1.3
(e) antenna	1	7	0	1.9	0	0	8	3.0	7	1	0	1.1
(f) glass	1	2	5	2.5	3	2	3	2.0	4	4	0	1.5
Total ranking	3	27	18	2.3	6	12	30	2.5	39	9	0	1.2

表 4 コントラスト強調手法による DV と BV の比較
Table 4 Comparison of DV and BV by contrast enhancement methods.

Images	Original image		Gray level linear transform		Histogram equalization		Proposed method	
	DV	BV	DV	BV	DV	BV	DV	BV
(a) desk	314.8	16.8	382.3	18.5	477.1	33.3	685.8	19.8
(b) calendar	706.4	18.4	1010.2	13.8	1047.8	40.3	1786.4	22.2
(c) house	231.7	14.3	375.5	18.2	532.9	35.0	661.3	25.0
(d) books	237.1	30.4	652.6	31.6	863.3	35.0	1457.9	30.9
(e) antenna	217.7	11.7	641.9	10.5	806.8	33.3	1543.0	16.3
(f) glass	206.1	42.7	494.2	46.4	714.9	63.7	922.0	40.7

の画素は前景に属する画素とし、しきい値未満の場合は、背景に属する画素とする。そして、前景と背景の各々に属するすべての画素に関する近傍領域内の輝度分散の平均値を求め、それぞれを DV, BV とする。つまり、DV は周囲の輝度変化が激しい領域内の輝度分散を表し、逆に BV は均一な輝度をもつ領域内の輝度分散を表す。これらの値の性格から、原画像と比較して、結果画像の DV が増加し、BV が変化しない場合に、良好なコントラスト強調が行われていると考えることができる [15], [16]。表 4 は、各実験用画像について、原画像と輝度線形変換法、ヒストグラム均等化法および本手法による各結果画像に関して DV と BV を求めた結果を示す。なお、近傍領域範囲は 5×5 画素、しきい値は 100 とした。本手法では、いずれの画像についても、輝度線形変換法およびヒストグラム均等化法と比較して DV が最も大きく、また、BV も原画像に比較的近い値が得られており、良好なコントラスト強調が行われていることを示唆している。これに対して、ヒストグラム均等化法は、輝度線形変換法よりも DV は大きい、BV が原画像と比較してかなり増加する傾向がある。また、輝度線形変換法は、全般的に原画像と比較して BV は近い値であるが、DV はさほど増加しない傾向がある。以上の結果に見られる傾向は、しきい値を変化させても同様であった。DV と BV の評価結果だけから画像のコントラストを定量化することは困難と思われるが、これらの値は、視覚的なコントラストとよく似た傾向をもつことが報告されており [16]、今回の実験においても、主観的なコントラスト評価の結果とほぼ同様な傾向が見られた。

5.2 進化過程について

図 10 に各実験用画像に関する進化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順調に増加し、50 世代までに進化が完了した。図 11 は、参考として、実験用

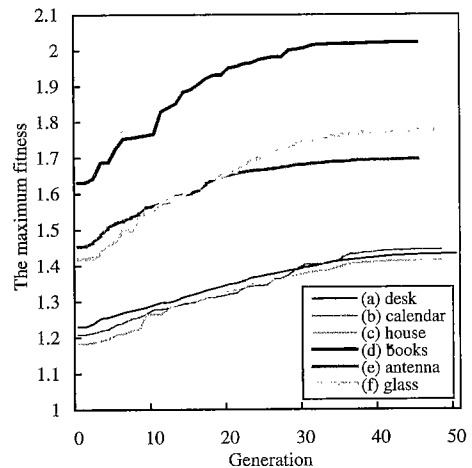


図 10 世代と最大適応度の関係
Fig.10 Relation between generation and the maximum fitness.

画像の (a) desk と (b) calendar に関して、各世代における最大適応度をもつ個体の染色体が表す LUT の輝度入出力関係の推移を示す。各々、横軸が入力輝度レベル、縦軸が出力輝度レベルを表している。世代が進むにつれて、LUT の輝度入出力関係が原画像に適応するように徐々に変化していく様子がわかる。

5.3 結果の安定性について

GA では、解の精度と探索効率は、染色体に設定される初期値によって影響を受けることが指摘されている [13]。ある処理において満足できる解が得られたからと言っても、その解に到達する安定性に欠けるようでは、実用化は困難と言える。ここでは、本手法による結果の安定性を確認するために、各実験用画像について、10 回コントラスト強調処理を行い、各処理結果を評価した。表 5 に各画像の処理結果に関する DV と BV の平均値と標準偏差を示す。いずれの画像に関しても 10 回の処理結果のばらつきは十分に小さな値であり、結果画像も視覚的にほぼ同様であった。ま

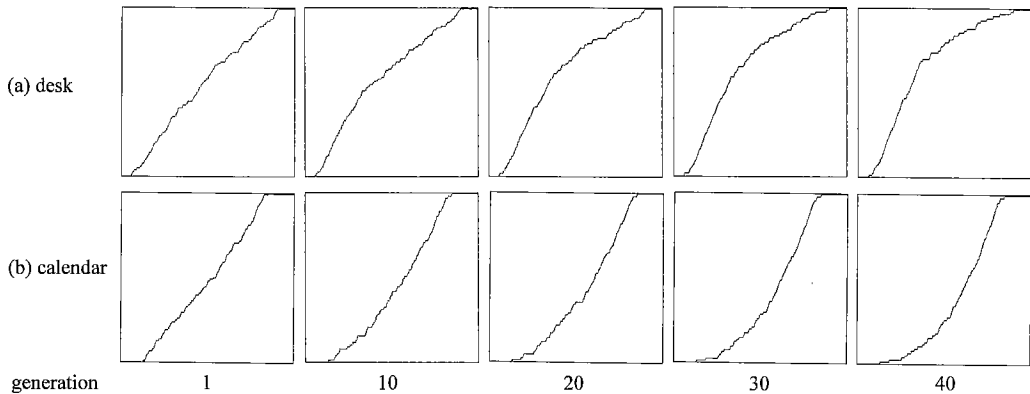


図 11 輝度入出力関係の推移

Fig. 11 Changes of relations between input gray level and output gray level.

表 5 10 回の処理の DV と BV の平均値と標準偏差
Table 5 Averages and standard deviations of DV and BV of 10 times processing.

Images	DV		BV	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
(a) desk	672.4	33.6	19.6	0.9
(b) calendar	1677.6	85.4	22.5	3.5
(c) house	644.7	22.3	25.1	0.7
(d) books	1474.1	46.0	30.9	1.8
(e) antenna	1469.9	50.9	16.2	0.5
(f) glass	866.4	38.8	44.6	3.2

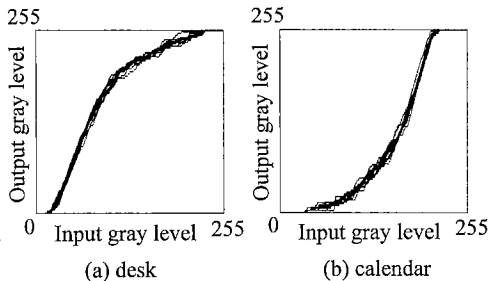


図 12 10 回の処理の入出力関係

Fig. 12 Relations between input gray level and output gray level of 10 times processing.

た、図 12 は、実験用画像の (a) desk と (b) calendar に関して、10 回の各処理の結果得られた LUT の輝度入出力関係を示す。各処理ごとに、入出力関係を表す曲線の全体的な形状がほぼ一致していることがわかる。他の実験用画像に関しても同様な結果が得られ、染色体への初期値が最終的な LUT の輝度入出力関係に与える影響は少なく、安定した結果が得られた。また、進化に要する世代数に関しても、初期値の影響は

ほとんど見られず、すべての処理について 50 世代以内に最終解が求められた。

5.4 パラメータの値について

GA を工学的な課題に適用する場合、パラメータの最適値を決定することは一般的に困難である [17], [18]。本手法においても、各種の画像を用いた予備実験を通して、安定した結果が得られる状態の中で、処理時間をできるだけ短縮させるという観点から、個体数 G 、存続率 S 、突然変異率 M を 4. にて述べた値に設定した。特に個体数 G は、多い方が結果の安定性は向上するが、逆に処理時間を要するようになる。 $G=50$ 程度でも良好な結果が得られたが、若干の安全性を考慮して、ここでは $G=100$ とした。次に、係数 η であるが、これは、3.3 にて述べたように、適応度評価のための式 (4) において、図 5 に示す LUT の輝度入出力関係を表す曲線の両端をクランプするために導入した曲線の幅 $L(k)$ の重みである。原画像がもつ輝度範囲を有効に利用したコントラスト強調を行うためには、曲線の幅 $L(k)$ が、原画像の輝度範囲に近いことが望ましい。しかし、 η の値が小さな場合、曲線の両端のクランプが安定せずに、適切なコントラスト強調が行われない可能性が生じる。 η の値を変化させた場合の曲線のクランプの安定度を評価した結果を図 13 に示す。縦軸は、LUT の輝度入出力関係を表す曲線の幅と原画像の輝度範囲との差を示しており、各実験用画像について 10 回コントラスト強調処理を行った結果の中の最大値である。 $\eta \geq 0.4$ では、曲線の幅は原画像の輝度範囲と常に一致しており、両端のクランプは安定している。一方、 $\eta < 0.4$ では、曲線の幅

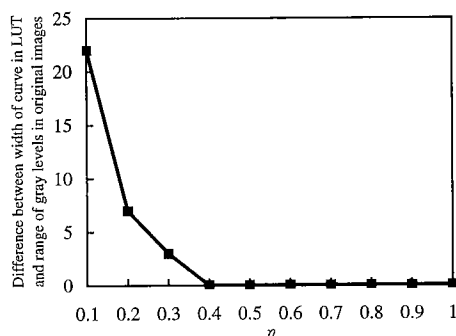


図 13 係数 η と LUT の入出力曲線の幅と原画像の輝度範囲との差の関係

Fig.13 Relation between the coefficient η and the difference between width of curve in LUT and range of gray levels in original images.

表 6 コントラスト強調手法による処理時間の比較(s)

Table 6 Comparison of processing time by contrast enhancement methods (s).

Gray level linear transform	Histogram equalization	Proposed method
0.02	1.4	9.5

が原画像の輝度範囲よりも狭くなる傾向があった。 $1.0 < \eta \leq 2.0$ の範囲の実験も行ったが、 $0.4 \leq \eta \leq 1.0$ の場合と同様な結果であった。本手法では、式(4)に示すエッジ強度の総和が適応度評価のための重要な要素であるという観点から、曲線の両端のクランプが安定する範囲内における最小の η の値 0.4 に若干の安全率を考慮して $\eta=0.5$ とした。

5.5 処理時間

各実験用画像について、輝度線形変換法、ヒストグラム均等化法および本手法によってコントラスト強調を行った場合の処理時間の平均値を表 6 に示す。処理系には Pentium II (333 MHz) を用いた。輝度線形変換法は、原画像の最小輝度と最大輝度から各画素の輝度を決定できるため、最も処理時間が短い。一方、本手法では、進化の過程において、各個体が表す LUT の輝度入出力関係によって輝度変換を行い、その結果画像に含まれるエッジ強度の総和を求める処理を繰り返し実行する必要があるため、最も処理時間を要している。より効率的な解探索のために遺伝的操作等を改良し、本手法の処理時間を短縮することが今後の課題である。

5.6 ランダム探索との比較

次に、本手法にて提案した GA による解探索が有

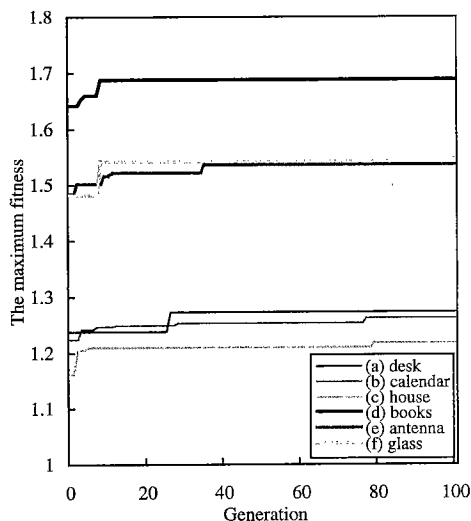


図 14 ランダム探索による世代と最大適応度の関係

Fig.14 Relation between generation and the maximum fitness by random search.

効に働いていることを確認するために、ランダム探索との比較を行った。図 14 に各実験用画像に関してランダム探索を行った場合の最大適応度の推移を示す。いずれの画像に関しても、100 世代を経過しても満足できる解を得ることはできなかった。この結果から、本手法における解探索が有効に働いていることがわかる。

6. む す び

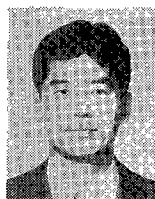
本論文では、GA によって濃淡画像のコントラストを強調する手法を提案した。本手法では、輝度変換を行うための LUT の最適な輝度入出力関係を遺伝的操作によって求める。また、個体の適応度として、画像全体に含まれるエッジ強度の総和を用いる。従来の輝度線形変換法やヒストグラム均等化法によるコントラスト強調処理では、画像の輝度分布情報を特徴量として用いるが、本手法では、画像の空間的な特徴量を利用している。各種の画像について本手法によるコントラスト強調を行ったところ、輝度線形変換法とヒストグラム均等化法と比較して、視覚的に良好な主観的評価結果が得られ、また、コントラストに関する定量的評価を試みたところ、同様に優れた結果が得られた。また、繰返し処理においても安定した結果が得られた。本手法では、適応度の評価関数を変更することによって、画像から得られる各種の特徴量を用いた輝度

入出力関係を設定することが可能である。今回はエッジ強度のみを特徴量として用いたが、視覚的により良好なコントラストを得るための最適な評価関数を検討すること、および処理時間を短縮することが今後の課題である。

文 献

- [1] 松山隆司, “画像解析の手法(1)前処理,” 画像処理ハンドブック, 尾上守夫編, 第11章, pp. 263-266, 昭晃堂, 1987.
- [2] 興水大和, “濃淡画像と画質改善・画質強調,” コンピュータビジョン, 谷内田正彦編, 第3章, pp. 27-31, 丸善, 1990.
- [3] 河田 聡, 南 茂夫, “科学計測のための画像データ処理,” 第5章, pp. 95-109, CQ 出版社, 1994.
- [4] E. L. Hall, R. P. Kruger, S. J. Dwyer, R. W. McLaren, and G. S. Lodwick, “A survey of preprocessing and feature extraction techniques for radiographic images,” IEEE Trans. on computer, vol. C-20, pp. 1032-1044, 1971.
- [5] 北野宏明, “遺伝的アルゴリズムの基礎,” 遺伝的アルゴリズム, 北野宏明編著, 第1章, 産業図書, 1993.
- [6] 北野宏明, “遺伝的アルゴリズム,” 人工知能誌, vol. 7, no. 1, pp. 26-37, Jan. 1992.
- [7] 北野宏明, “遺伝的アルゴリズム,” テレビ誌, vol. 50, no. 5, pp. 609-616, May 1996.
- [8] 安居院猛, 長尾智晴, “ジェネティックアルゴリズム,” 第1章, 昭晃堂, 1993.
- [9] 小林直樹, 斎藤英雄, “遺伝的アルゴリズムを用いた疑似濃淡表示法,” 信学論(D-II), vol. J78-D-II, no. 10, pp. 1450-1459, Oct. 1995.
- [10] 齊藤文彦, “群化の要因に基づく遺伝的アルゴリズムを用いた輪郭線抽出手法,” 画電学誌, vol. 25, no. 5, pp. 495-503, Oct. 1996.
- [11] 齊藤文彦, “遺伝的アルゴリズムによる液晶ディスプレイ領域輝度むら検出,” 画電学誌, vol. 25, no. 5, pp. 514-521, Oct. 1996.
- [12] 長尾智晴, 安居院猛, 長橋 宏, “遺伝的アルゴリズムを用いた直線抽出,” 信学論(D-II), vol. J75-D-II, no. 4, pp. 832-834, April 1992.
- [13] 川西寛之, 萩原将文, “遺伝的アルゴリズムを用いた複数図形の検出,” 電学論(C), vol. 116, no. 8, pp. 891-897, Aug. 1996.
- [14] 樋渡潤二, “感覚と工学,” 第6章, pp. 68-88, 共立出版, 1976.
- [15] G. Ramponi, “A simple cubic operator for sharpening an image,” Proc. of 1995 IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, pp. 963-966, 1995.
- [16] 菅原一孔, 山本久範, 小西亮介, “ファジー理論に基づく適応的な画像強調手法,” 信学論(D-II), vol. J80-D-II, no. 7, pp. 1786-1792, July 1997.
- [17] 伊庭斉志, “遺伝的アルゴリズムの基礎,” pp. 244-247, オーム社, 1994.
- [18] 安居院猛, 長尾智晴, “ジェネティックアルゴリズム,” 第4章, pp. 101-107, 昭晃堂, 1993.

(平成10年2月23日受付, 5月25日再受付)



齊藤 文彦 (正員)

昭和56慶大・工・数理卒。同年日本アイ・ピー・エム(株)入社。平7(株)日立製作所中央研究所入所。平8立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程了。平10岩手県立大学ソフトウェア情報学部助教授。マシンビジョン, 視覚情報処理, マルチメディアシステムに関する研究に従事。工博。映像情報メディア学会, 画像電子学会, 精密工学会, 情報処理学会, 人工知能学会等各会員。