

絵画をまねた画像強調方法

田中 敏光* 田中 祐治† 大西 昇※

- * 名古屋大学大型計算機センター, 〒464-01 名古屋市千種区不老町
- † 東邦ガス
- ※ 名古屋大学大学院工学研究科, 〒464-01 名古屋市千種区不老町
理化学研究所, 〒456 名古屋市熱田区六番町 3-8-31

あらまし コントラストの大きな画像を単純に256階調で量子化すると、ハイライト周辺が白く抜けた
り、影の部分が黒くつぶれたりする。一方、絵画では同様のシーンも物体輪郭の濃淡を強調したり暗部
を実際より明るく描くことでディテールを失うことなく描写される。これらの技法は、画家が自らの目
で外界を翻訳した結果、つまり、人間の視覚系の特性を反映したものと考えられる。そこで、視細胞の
順応や視神経の側抑制を取り入れた画像強調手法で、絵画のように画像の細かい明暗を維持しつつ輝度
のダイナミックレンジを圧縮する。

キーワード 輝度補正, 画像強調, 画像処理, コンピュータグラフィックス

Image enhancement like paintings

Toshimitsu Tanaka* Yuji Tanaka† Noboru Ohnishi※

- * Nagoya University Computation Center, Furo-cho, Chikusa, Nagoya 464-01
- † Toho Gas
- ※ School of Engineering., Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya 464-01
RIKEN, 3-8-31, Rokuban, Atsuta, Nagoya 456

Abstract This paper has presented a method which enhances images like paintings. Highlights and shadows increase image reality, however, since pixel intensity is over 256 in highlights and nearly zero in shadows, details in the areas can not be recognized. This is because usual CRTs have insufficiently small number of intensity levels. On the other hand, painters append darkness around highlights and brightness inside shadows and/or on the border of objects to represent highly-contrasted scenes in narrow intensity range limited by paints. The techniques may be based on human perception, so that we emulated photoreceptor cell and receptive field of human eyes to compress dynamic range of CG images.

Keyword intensity conversion, image enhancement, image processing, computer graphics

1. はじめに

光源が物体表面に写り込むことで生じるハイライトは、物体の立体形状を知る有力な手がかりとなるため、画像の写実性を高める上で不可欠の要素である。このため、コンピュータグラフィックスでもハイライトを含む画像が日常的に生成されている。一方、カラーCRTやプリンタなどの画像表示装置ではRGBそれぞれの明暗を高々256階調しか表現できず、コントラストも十分ではない。従って、明暗の差が大きなCG画像を線形変換で256階調に圧縮したのでは、暗部の輝度差が小さくなり、黒くつぶれて何が写っているのか判別できなくなる。暗部が判別できるように全体の輝度を上げると、ハイライト周辺の輝度が255を超えてしまうため、画像の一部が白く飛んでしまう。この白飛びと黒つぶれは画像に含まれる情報を減らすので、避けなければならない。

一般的に用いられている γ 補正でも黒つぶれを改善することは出来る。しかし、暗部の輝度を高めるために明部の輝度差を圧縮するので、メリハリのない画像になってしまう。ガンマ補正のような画像全体を画一的にあつかう輝度変換では、ある明るさの範囲に多くの階調を与えると他で使える階調が減ってしまうので、コントラストの大きな画像を表示する問題の解決にはならない。

絵画の世界でも、絵の具で表示できる明るさには限りがあるので、明暗の大きく異なる場面を表現する技法が求められた。例えば点描派の画家たちは、輪郭線を描く代わりに物体の周囲の濃淡を強調することで、物体の輪郭を浮き上がらせた。図1はスーラの絵であるが、同じ明るさであるべき背景の水面を、人物の肌の明るい部分では暗く、影になっている部分では明るく描いている。この結果、人物の輪郭線に十分な濃淡の差が与えられている。同様の技法は多くの絵画に見られる。図2はゴッホの作であるが、やはり人物を縁取るように輝度が高められている。さらにランプ周囲を実際より暗く、ランプから離れた場所を明るく描くことで、影になった人物のディテールも描写している。このように、絵画に描かれた濃淡は物理的な輝度値とは一致していないが、違和感を感じることは少ない。これは画家が自らの目で外界を翻訳した結果として絵画の濃淡強調が与えられているためと考えられる。そこで、人間の視覚特性を模倣することで絵画のような自然な輝度補正の実現をめざす。

絵画風CGの作成方法はこれまでもいくつか報告されている。筆[5,8]やペン[9]のタッチをまねる手法が多いが、画像の写実性を落とさずにダイナミックレンジを圧縮する目的には役立たない。G-Buffer[4]を用いた手法では輪郭線の描画による強調や墨絵風の画像生成を行っているが、絵画に見られるような局所的な輝度強調は考えられていない。そこで、順応や側抑制などの視覚特性を模倣した局所的な輝度変換により、明暗のディテールを失うことなく輝度を256階調に圧縮する。

2. 人間の視覚特性

人の視覚系について次の生理学的な知見が得られている[1,2]。光は網膜上の視細胞で神経パルスに変換され、神経節細胞を経て脳に伝達される。視細胞は錐状体と杆状体に分けられるが、色を知覚することができるのは錐状体だけである。錐状体視細胞は網膜上の中心窩と呼ばれる部分に集中して分布している。このため、中心窩で最も視力が高くなるが、その範囲は外径で視角にして5度、底の部分では1.3度にすぎない。錐状体の感度曲線は周囲の明るさに順応してシフトするので、明るいところでも暗いところでも、相対的な明暗を知覚できる。これはカメラのオートゲインに相当する機能である。他方、杆状体視細胞は中心窩から離れた場所に分布し、明暗のみを知覚する。錐状体より感度は高いがほとんど順応を示さない。絵画は外界を詳細に観察して色付きで描くものなので、絵画の明暗は中心窩の錐状体視細胞で得た輝度情報を脳で統合した結果と考えられる。順応特性により、このとき知覚される明暗は局所領域の平均輝度に対する相対的な値である。

1つの神経節細胞には複数の視細胞の出力が加算される。脳に伝達されるのは視細胞の出力そのものではなく統合された結果である。出力を加算する範囲を受容野と呼ぶ。加算の重みが受容野の中心と周辺で逆符号となっているので、周辺部に与えられた光刺激は中心部の光刺激による出力を小さくするよ

うに働く。この側抑制と呼ばれる効果により、濃淡変化の少ない部分では神経節細胞の出力が小さく、明暗の境界では出力が大きくなる。スーラの絵における人物周辺の濃淡の強調や心理学でマッハバンドとして知られている現象はこの側抑制を使って説明できる。

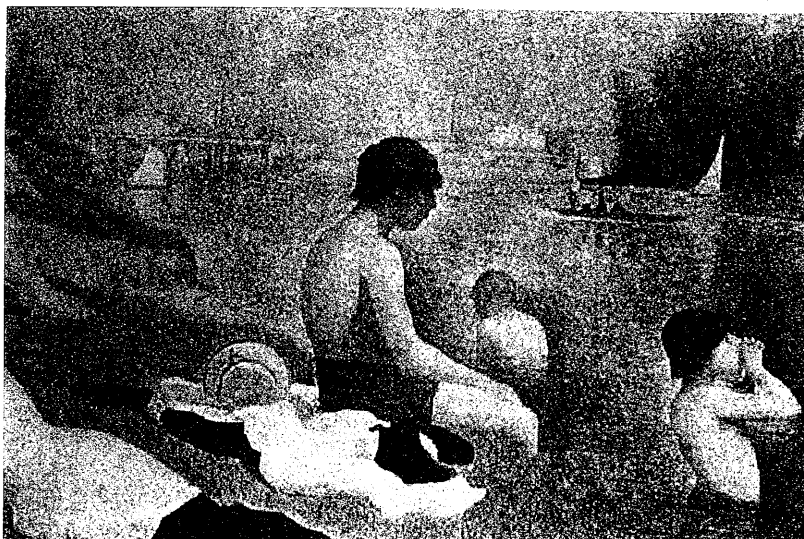


図1 点描派の画家スーラの陰影表現



図2 ゴッホの陰影表現

3. 輝度補正アルゴリズム

画素の1つ1つは一組の色相、彩度、輝度の値で表現できる。我々の目的は細かい輝度差を失うことなく画像を256階調に量子化することにあるので、輝度成分のみを増減し、色相と彩度は不変とする。人間の視覚は複雑で不明な点も多いので、この目的に役立つ一部の視覚特性だけを模倣して輝度を補正する。具体的には、順応と側抑制を利用する。

○順応による輝度補正

はじめに入力画像を画像全体の平均輝度が1となるように正規化する。画像上に中心窩に相当する局所領域をとり、そこに含まれる画素の輝度値を2次元ガウス関数で重み付けして平均する。得られた輝度が視細胞の順応輝度となる。視細胞の出力特性は厳密には順応輝度により異なるが、ここでは簡単のため、注目画素の輝度値 I_n と注目画素を中心とする局所領域の平均輝度 I_a との比だけで決まるものとする。視細胞は入力が大きくなると出力が飽和する性質があるので、これを近似する関数 $f(x)$ を

$$f(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ x & (0 \leq x \leq 1) \\ \log(x) + 1 & (1 < x) \end{cases} \quad (1)$$

で定義する。以上の仮定により、変換された輝度値は $f(I_n/I_a)$ で与えられる。

○側抑制による輝度補正

側抑制による受容野の結合係数は図3に示すような2つのガウス関数の組み合わせで定義される[1]。従って、側抑制による輝度補正は微分フィルタを掛けることと等価である。輝度エッジを強調する目的には内側のガウス関数はシャープなほうが良いので、中央画素の値だけで代表させることにする。この場合、輝度の補正量は、入力画像と入力画像を正規化したガウスフィルタで畳み込んで得られる輝度画像との差で与えられる。

順応処理の結果が側抑制処理の入力となることが順当だが、かなり大きなサイズのガウスフィルタを2回掛けなければならないため計算コストが大きい。また、順応処理は局所領域の平均輝度に逆比例して輝度差を拡大/縮小するので、低輝度部分では輝度差が増大するが高輝度部分では縮小してしまう。このため、高輝度領域の輝度エッジこそ強調する必要がある。そこで、側抑制処理を元の輝度画像に対して行うことにする。順応の局所領域と側抑制の受容野を同じ大きさにすればフィルタ処理も一度で済む。この場合、補正後の輝度値 I_t は、

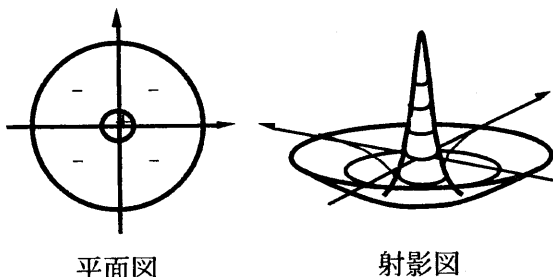


図3 受容野の結合係数

$$I_t = f(I_n/I_a) + C_d(I_n - I_a) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 C_d はエッジ強調の程度を決める重み係数である。

○大域的輝度の付加

画像中に局所領域よりも大きな明るさ一定の部分が存在すると、その輝度値が高くても低くても順応処理後は同じ値になってしまう。このため、画像全体での明暗の分布が失われる。これを防ぐため、原画像の輝度値を重み付けして加えることで大域的な輝度変化を与える。したがって、最終的には輝度値は

$$I_t = f(I_n / I_a) + C_d(I_n - I_a) + C_n I_n \quad (3)$$

で計算される。式中の I_n は原画像の輝度値で I_a はガウスフィルタを畳み込んだ輝度値である。また、 C_d 、 C_n はそれぞれエッジ強調、原画像輝度の重みである。

最後に輝度値を線形拡大してから 256 階調に量子化する。順応の考え方から行けば画像の平均輝度が表示できる階調数の中央値となるように変換すべきであるが、光源が映り込む画像ではハイライト周辺の白抜けが大きくなるので、高輝度側に余裕を持たせて平均輝度を 100 としている。

4. 計算機実験

4.1. CG 画像の輝度変換

実験にはティポットを面光源で照明した CG 画像を用いた。量子化誤差による悪影響を排除するため、CG 画像の輝度値は不動小数点演算で求めた。実験に用いた画像を図 4 (a) に示す。この画像は画素の 99.5% で輝度値が 255 未満となるように線形変換してから量子化されている。印刷の都合で濃淡表示しているが、元はカラー画像である。画像の視野は横方向で 40 度で、視野角 4 度の範囲を局所領域に選んでいる。これは、中心窩の外径や受容野とほぼ同じ大きさである。重み係数は $C_d=0.3$ 、 $C_n=0.2$ に設定した。提案手法で輝度変換した結果を図 4 (b) に示す。また、一般的に使われている $\gamma=2$ の指数関数で輝度変換した結果を図 4 (c) に示す。これらの画像も同様に画素の 99.5% が 255 未満となるように線形変換されている。

原画像では判別が難しい影の中の輪郭線も提案手法による補正画像にははっきりと示されている。暗部のディテールを判別できる分だけ補正画像は多くの情報を提示していると言える。順応は画像の明るい部分と暗い部分の輝度差を下げる方向に働くが、側抑制により明暗境界線の両側では輝度差が増大するので、画像のメリハリは失われていない。ただし、背景のように輝度が連続的に減少する領域では、輝度輝度勾配が小さくなる。ガンマ補正では暗部の輝度は増幅されるものの、明暗境界での輝度差は小さくなるため、提案手法に比べて平板な画像となっている。

図 5 に 3 枚の画像のヒストグラムを示す。原画像とガンマ補正画像では低輝度部分に 2 つのピークが見られるが、これがポットの陰影に相当する。2 つの輝度値に総画素数の 20% にあたる約 6 万画素が集中しており、広範囲の黒潰れの原因となってい

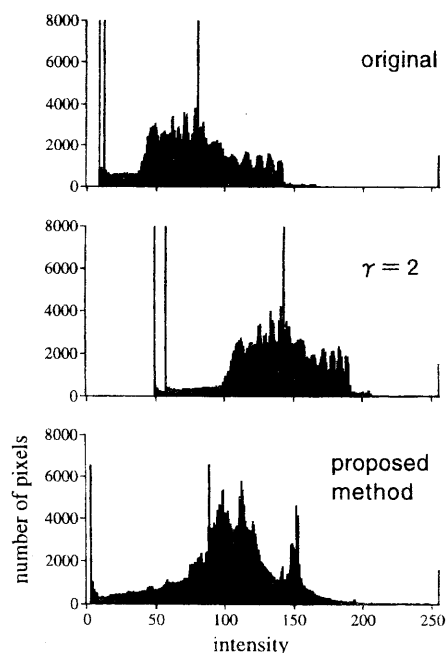


図 5 実験画像のヒストグラム

る。ガンマ補正ではヒストグラムは形を保ったまま高輝度方向に移動するため、画像は全体的に明るくなる。ただし、低輝度側を持ち上げる分だけ高輝度での輝度差が減少するので、主要な輝度の範囲は圧縮されてしまう。これが画像のメリハリをなくす原因になっている。これに対し、提案手法は影の内部の輝度を影の輪郭から遠ざかるにつれて連続的に持ち上げるので、輝度値が分散する。この結果、どの輝度値も7000画素以下になっている。また、平均輝度の周辺で画素が増加している。これは局所領域の相対輝度値を使うためである。また、提案手法による補正画像は他の二つの画像に比べヒストグラムが広がっており、階調が有効に使われていると言える。

場所ごとの輝度の増減を比べるため、原画像と提案手法による補正画像との差を

$$(\text{差画像}) = (\text{提案手法}) - (\text{原画像}) + 128$$



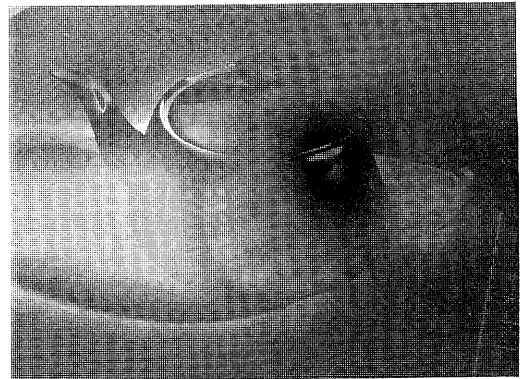
(a) 原画像



(b) 提案手法による強調画像



(c) ガンマ補正画像



(d) 原画像と提案手法の差画像

図4 CG画像の輝度補正実験

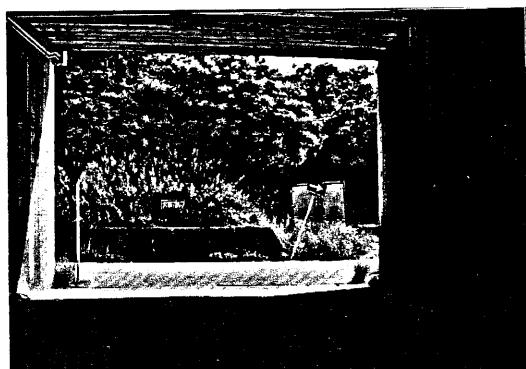
で定義する。つまり、差画像は白い画素ほど輝度値が大きく増加し、黒い画素ほど輝度値が大きく減少したことを示す。平均輝度の移動による影響を除くため、差画像と補正画像を平均輝度が同じになるように線形変換してから差を求めた。結果を図4(d)に示す。ポットの注ぎ口や影をとりまくように背景の輝度が高められていることがわかる。これはスーラやゴッホの絵に示されたの同様の絵画的な画像強調である。提案手法は暗部の輝度を増しハイライト周辺の輝度を減らすことで黒つぶれを防ぎつつダイナミックレンジを縮小していることがわかる。

4.2. 実画像への応用

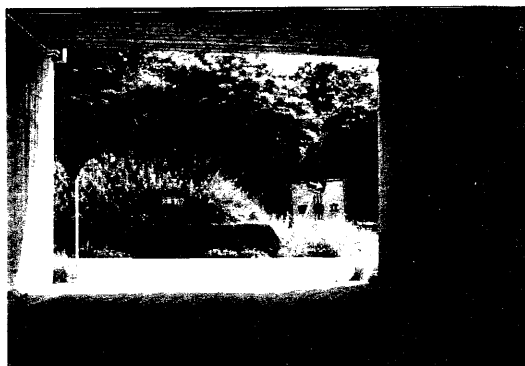
実画像に対して提案手法を適用する。実画像はイメージスキャナでRGB各8 bitsに量子化されている。図6に原画像と提案手法による補正画像、ガンマ補正画像、差画像を示す。画像の視野は横方向で35度である。重み係数は4.1節と同様に $C_d = 0.3$, $C_n = 0.2$ とした。ただし、実験画像には高周波成分が多く含まれるので、局所領域を視角にして1度に設定している。これは、中心窩の窪みに相当する大きさである。



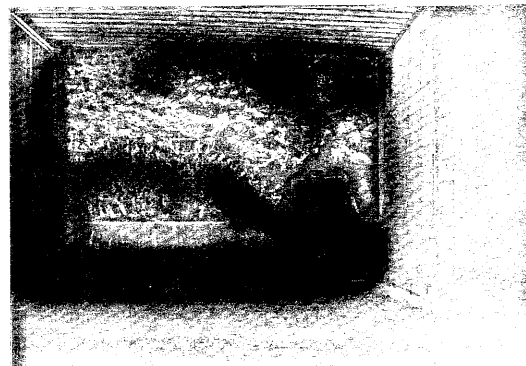
(a) 原画像



(b) 提案手法による強調画像



(c) ガンマ補正画像



(d) 原画像と提案手法の差画像

図6 実画像の輝度補正実験

図5に示されるように、原画像では黒くつぶれてしまうトンネルの壁面やトンネル内の路面の様相も提案手法でははっきりと判別できる。また、側抑制によるエッジ強調で全体的に見やすくなっている。これに対し、ガンマ補正画像は暗部の判別が不十分で、全体にぼんやりしている。どの画像にも含まれる情報量に差はないが、提案手法では認知できる情報が格段に増加している。この結果から、提案手法は実画像の強調にも有効であるといえる。ただし、原画像が256階調に量子化されているので、暗部では量子化誤差も拡大されてノイズが目立つ。また、白く飛んだ部分は255で打ち切られているため、補正処理を行っても改善されない。これらの問題を解決するには、入力画像の輝度分解能を高くする必要がある。

5. むすび

細かい輝度差を失うことなく高ダイナミックレンジ画像を256階調に量子化するため、人間の視覚特性を模倣した輝度補正手法を提案した。具体的には、視細胞の順応をまねた局所領域での相対輝度計算で大域的な輝度変化を圧縮した。また、神経節細胞の側抑制をまねて明暗の境界線を強調した。CG画像を用いた実験では影の領域のわずかな輝度差を表示するために物理的な輝度値よりずっと大きな明暗が与えられた。他方、明暗境界線の周囲では輝度差を増大させるように輝度値が補正された。これらの効果は絵画における輝度強調手法と一致している。

実画像を用いた実験でも提案した輝度補正手法の有効性が示された。256階調の画像にも十分な効果があるが、量子化誤差の悪影響を排除するには高い輝度分解能を持つ画像を用いることが望ましい。画像を得る方法はいくつか報告されている[3,7]ので、提案手法と組み合わせてより効率的な画像表示方式を検討している[6]。

局所領域の大きさは画像に応じて適切に選ぶ必要がある。絵画風のCG画像を生成する目的ならば、大きさをパラメータとして輝度補正を繰り返しても問題はないが、監視カメラなどに利用する場合には自動的に最適値が選択されることが望ましい。適切な局所領域の大きさは画像に含まれる空間周波数の分布で決まると思われるが、設定方法は今後の課題である。

参考文献

- [1] 福島邦彦：“視覚の生理とバイオニクス”，電子通信学会 (1976).
- [2] 永野俊，梶真寿，森晃徳：“視覚系の情報処理”，啓学出版 (1993).
- [3] 山田啓一：“車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式”，信学論 Vol. J-78-D-II, No. 10, 1439-1449 (1995).
- [4] Saito T., Takahashi T., “Comprehensible Rendering of 3D Shapes”, Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, 197-206 (1990).
- [5] Heaberli P., “Paint By Number: “Abstract Image Representations”, Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, 207-214 (1990).
- [6] 佐橋 他：“人間の視覚特性を加味したダイナミックレンジ圧縮手法”，平成8年度電気関係東海支部大会論文集, p.384 (1996)
- [7] 曾我 他：“カラーTVのダイナミックレンジ拡大とその表示方法”，平成8年度電気関係東海支部大会論文集, p.268 (1996)
- [8] Meier B., “Painterly Rendering for Animation”, Proc. SIGGRAPH'96, 477-484 (1996).
- [9] Salisbury M. et al, “Scale-Dependent Reproduction of Pen-and-Ink Illustrations”, Proc. SIGGRAPH'96, 461-468 (1996).