

目次

第1章 緒論	4
第1章の参考文献	7
第2章 本論文に関わる基礎事項	9
2.1 概要	9
2.2 色覚[2-1]	9
2.2.1 三原色説	10
2.2.2 反対色説	10
2.2.3 段階説	10
2.3 HSI(HSV)色空間	13
2.3.1 C-HSI色空間[2-2]	13
2.3.2 HSV色空間[2-3]	15
2.3.3 HSL色空間[2-4]	18
2.4 第2章のまとめ	20
第2章の参考文献	21
第3章 従来 of 諸研究	22
3.1 概要	22
3.2 従来 of HSI(HSV)色空間 of 改良に関する研究	22
3.2.1 色域問題を解決した HSI色空間(E-HSI色空間)	22
3.2.2 オブジェクト追跡 of 性能向上 of ための HSV色空間 of 修正	23
3.3 従来 HSI色空間 of での処理結果が RGB色空間外に became した信号 of HSI色空間から RGB色空間へ of 変換法	24
3.3.1 クリッピング	24
3.3.2 正規化処理	26
3.3.3 彩度補正を伴う HSI色空間から RGB色空間へ of 変換	26
3.4 RGB色空間 of 等色相平面上 of での処理手法	28
3.4.1 NAIKら of 方法[3-5]	29
3.4.2 村平ら of 方法[3-6]	29
3.4.3 植田ら of 方法[3-7],[3-8]	31
3.4.4 その他 of 方法	33

3.5 第3章のまとめ	33
第3章の参考文献	34
第4章 RGB色空間と同一の色域をもつHSI色空間	35
4.1 概要	35
4.2 RGB色空間と同一の色域を持つHSI色空間	36
4.2.1 RGB色空間から新しいHSI色空間への変換則	39
4.2.2 HSI色空間からRGB色空間への変換則	39
4.3 第4章のまとめ	40
第4章の参考文献	41
第5章 HSI色空間からRGB色空間への彩度補正を伴う変換方法	42
5.1 概要	42
5.2 C-HSI色空間	42
5.3 彩度補正を伴うC-HSI色空間からRGB色空間への従来の変換法[5-10]の問題点	44
5.4 提案する彩度補正を伴うC-HSI色空間からRGB色空間への変換法	44
5.5 適用結果	47
5.6 第5章のまとめ	51
第5章の参考文献	52
第6章 RGB色空間での明度と彩度に対する任意処理の実現	53
6.1 概要	53
6.2 色相が保存される条件	54
6.3 提案法	56
6.3.1 相対的距離で彩度を定義する場合の明度のみを変換する処理形態	56
6.3.2 絶対的距離で彩度を定義する場合の明度のみを変換する処理形態	60
6.3.3 彩度を変換する処理形態	65
6.4 適用例	67
6.4.1 相対的距離で彩度を定義した明度の強調処理と彩度強調処理	67
6.4.2 彩度の定義の違いによる明度強調結果の比較	74
6.5 第6章のまとめ	80
第6章の参考文献	81
第7章 結論	82

第1章 緒論

いわゆるカラー画像にはいくつかの種類が存在する。最も一般的なカラー画像は画像、映像機器等から取得され、ヒトが見るための、鑑賞対象としての画像である。衛星観測において複数の波長帯を観測して、それぞれをカラー画像信号の3原色である赤、緑、青に割り当ててカラー画像とすることも多い。さらに、サーモグラフィ画像のように本来は1次元量の画像(濃淡画像)ではあるが、疑似カラー表示をしてカラー画像化することもある。

衛星画像や疑似カラー表示画像においては色自体に物理的な意味はない。これら画像の強調処理においては RGB 色空間における信号分布を広げる、均等化させる処理を構築すれば良い、代表的な処理は3次元ヒストグラム平坦化[1-1]-[1-3], ヒストグラムエクスポージョン法[1-4]-[1-6]等がある。これら処理では強調画像は原画像に比べて色の数は増え、かつ、原画像と強調画像では色自体が変化することになる。

一方、ヒトが見ることを前提したカラー画像においては、色は絶対的な意味を持つ。例えば、赤いリンゴを画像処理後に黄色にすることはできない。よって、ヒトが見ることを前提とするカラー画像処理においては色を司る色相を変化させてはならない。本論文では、ヒトが見る、鑑賞するためのカラー画像を処理対象とする。

ヒトの色の3属性で色を表す表色系がマンセル表色系である[1-7]。マンセル表色系では色相(Hue), 彩度(Chroma), 明度(Value)で色を表現する。マンセル表色系は 3 次元の色立体の形状をもち、明度軸を中心軸とし双三角錐の形状をしている。明度との垂直な断面を極座標に見立てて、中心が明度軸との交点で原点となり無彩色である。中心からの距離が彩度、そして、角度が色相に対応する。マンセル表色系では、色相、明度、彩度はヒトの感覚に合わせて目盛りが振られていてヒトの感性を体現した色空間と言える。

しかし、マンセル表色系は電子的に扱える色空間ではないことから、マンセル表色系を模擬した電子的(PC や映像機器等)に扱える色空間を定義することが必要であり、HSI 色空間[1-8], HSV 色空間[1-9]が明らかにされた。カラー画像の取得は RGB 色空間で行われることから、RGB 色空間と HSI 色空間または HSV 色空間の相互の変化則が与えられている。HSI 色空間や HSV 色空間はヒトの色の 3 属性に則した色空間であるからヒトのカラー画像に対する識別行為を模擬できるものと考えられ、画像内の領域検出[1-10]-[1-14], 画像検索[1-15]-[1-16]にそれら色空間が用いられている。

画像内の領域検出において最も多く用いられているのが顔(肌色)領域の検出である[1-10]-[1-13]。また、影領域が彩度、色相はその他の領域とほぼ同じで明度のみ異なる性質を用いてその検出が行われている[1-17]。画像検索においても色(色相)の情報は重要であることから多くの方法が提案されている。

HSI(HSV)色空間の問題点として、RGB 色空間より色空間自体の体積が大きいことがあげられる。RGB 色空間から HSI(HSV)色空間に変換し、単に表色系(色のラベリング)を変える目的であれば、色空間の体積の

差は何ら問題とならない。よって、これらの色空間で画像内の領域検出や画像検索を行うことに対して問題は生じない。しかしながら、HSI(HSV)色空間で画像強調等の画像処理を行うとその処理結果が RGB 色空間外に飛び出すことがあり、RGB 色空間内に逆変換できず、表示可能性に問題が生じる。この問題を色域問題と呼んでいる。本論文では画像処理の最も有名な書籍[1-8]にて示されている、色相と明度の定義が適切な HSI 色空間を用いる。そして、その HSI 色空間を本論文では C-HSI(Conventional-HSI)と呼び、その色空間の色域問題に対して多方向からその解決策を示すことにする。

第 1 の解決策は RGB 色空間と同じ色域をもつ HSI 色空間を定義することである。正規化された RGB 色空間を考える。C-HSI 色空間は黒(0,0,0)を頂点とした三角錐で底辺が白(1,1,1)と接する。C-HSI 色空間の体積は RGB 色空間の 4.5 倍ではあるが、RGB 色空間の体積 1/2 部分が C-HSI 色空間と共有している。そこで、本論文では CMY 色空間から定義される HSI 色空間を定義する。この HSI 色空間は(1,1,1)を頂点とした三角錐で、(0,0,0)で RGB 色空間と接する。この色空間も RGB 色空間の体積 1/2 部分が領域を共有する。本論文の第 4 章では C-HSI 色空間と CMY 色空間から変換される HSI 色空間を色相と明度の値に応じて切り換えることで、RGB 色空間と色域が同じである HSI 色空間を与える。色域問題を解決する HSI 色空間が文献[1-18]で明らかにされているが、この色空間の場合、RGB 色空間よりも色域はやや小さく、色域の同一性は実現できていない。

第 2 の解決策は、C-HSI 色空間から RGB 色空間の変換に工夫を加えることである。C-HSI 色空間での処理において RGB 色空間外にその処理結果が飛び出したとき、C-HSI 色空間から RGB 色空間の変換時、もしくは変換後に RGB 色空間へ戻そうとする処理である。最も簡単な処理は、RGB 各 8 ビット(階調値は 0 ~ 255)の画像を仮定したとき、255 を超えた要素を 255 にして RGB 空間に戻す、クリッピングである。この方法では、色相の変化が生じてしまうため、ヒトを見ることを前提にした処理の場合は適用することは好ましくない。さらに、一般的な方法としては処理結果の RGB 各成分の最大値を a としたとき、 $a > 255$ であれば、全ての成分に対して $255/a$ 倍を施すことで RGB 色空間外の信号を RGB 色空間の境界へ移動させることができる。この方法を正規化処理と呼ぶ[1-19]。正規化処理では色相は不変であるが明度も小さい値となり、コントラストの低下が生じる。文献[1-19]では C-HSI 色空間と RGB 色空間の関係を考慮することで正規化処理よりも優れた変換則を与えた。C-HSI 色空間と RGB 色空間の関係を厳密に明らかにし、さらに、RGB 色空間外に位置することを RGB 色空間に変換することなく判定する方法も含めた彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換法が文献[1-20]で与えられた。文献[1-20]の方法では RGB 色空間外の信号は全て RGB 色空間の境界に移動させるような彩度補正となっており、彩度の補正方法に改善を要する。本論文の第 5 章では、適切な彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換法を明らかにする。この方法では補正した彩度値は第 4 章で明らかにする RGB 色空間と同じ色域をもつ HSI 色空間の彩度の値と同じになる。

第3の解決策はHSI(HSV)色空間に変換することなく、RGB色空間で色相を保存する拘束下で処理を行う方法である。言い換えれば、RGB色空間において等色相平面で処理を行う方法である。そして、等色相平面に閉じた処理とすれば色域問題が回避される。等色相平面における色域問題の生じない処理スキームが文献[1-21]で明らかにされた。この方法の特徴は明度に対して濃淡画像における任意の処理を適用可能なことであるが、彩度は明度結果に付随して定まってしまう。そして、彩度の低下が起きてしまうことが欠点である。基本的には文献[1-21]の処理スキームであるが、それを改善することで処理結果の彩度低下を抑えた方法が種々提案されている[1-22]-[1-24]。しかしながら、それら方法は全て彩度を独立に処理することができないという欠点を回避できていない。本論文の第6章では、等色相平面において「明度のみを独立に処理する方法」と「彩度のみを独立に処理する方法」を明らかにする。すなわち、明度と彩度のそれぞれに対して任意の処理を適用可能とした。カラー画像処理の場合、明度の処理がコントラストを、彩度の処理がカラフルネスをコントロールできることから、提案する方法ではコントラスト、カラフルネス共に所望した結果を導くことができる。

これまで明らかにされてきたHSI(HSV)色空間では色域問題から明度、彩度処理の観点からはヒトが見るための画像に対して利用が困難であったが、本論文ではその色域問題を解決する3つの方法を明らかにした。これらの方法によって、ヒトの色の3属性に則した色空間で自由に柔軟な処理を与えることが可能となった。濃淡画像ではなく、カラー画像としての独自性の高い処理アルゴリズムを本格的に議論可能な環境が整ったと考えている。

第1章の参考文献

- [1-1] P. E. Trahanias and A. N. Venetsanopoulos, "Color image enhancement through 3-D histogram equalization," in Proc. 15th IAPR Int. Conf. Pattern Recognition, Aug.-Sep. 1992, vol. 1, pp. 545-548.
- [1-2] A. K. Forrest, "Colour histogram equalisation of multichannel images," in Proc. IEEE Vis. Image Signal Process., Dec. 2005, vol. 152, no. 6, pp. 677-686.
- [1-3] J-H Han, S. Yang and B-U Lee, "A novel 3-D color histogram Equalization method with uniform 1-D gray scale histogram," IEEE Trans. on Image Processing, vol. 20, no. 2, pp. 506 - 512, February 2011.
- [1-4] P.H. Mlsna and J.J. Rodriguez, "A multivariate contrast enhancement technique for multispectral images," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.33, pp.212-216, Jan. 1995.
- [1-5] P.H. Mlsna, Q.Z. Zhang, and J.J. Rodriguez, "3- D histogram modification of color images," Proc. IEEE International Conference on Image Processing, pp.1015-1018, 1996.
- [1-6] 池田吉徳, 田口 亮, "ヒストグラム調整によるマルチチャネル信号の強調," 信学論(A), vol.J84-A, no.6, pp.848-859, June 2001.
- [1-7] 篠田博之, 藤枝一郎, 色彩工学入門ー定量的な色の理解と活用ー, 森北出版株式会社, 2007年5月.
- [1-8] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing 3rd ed., Pearson Education, Inc., 2008.
- [1-9] デジタル画像処理編集委員会, デジタル画像処理[改訂第二版], 公益財団法人画像情報教育振興協会(CG-ART), 2016
- [1-10] S. Elaw; W. M. Abd-Elhafiez and M. Heshmat, "Comparison of Video Face Detection methods Using HSV, HSL and HSI Color Spaces," Proc. 2019 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES), December 2019.
- [1-11] M. A. Rahman, I K. E. Purnama and M. H. Purnomo, "Simple method of human skin detection using HSV and YCbCr color spaces," Proc. 2014 International Conference on Intelligent Autonomous Agents, Networks and Systems, August 2014.
- [1-12] S. Sopasoap and J. Srinonchat, "Facial space detection and eyes surrounded object detective technique on color image YCbCr and HSV," Proc. 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), March 2017.
- [1-13] G. Zhao, S. Wang, T. Wang and J. Chen, "HSV Color Space and Face Detection Based Objectionable Image Detecting," Proc. 2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia, December 2008.

- [1-14] P Ganesan, V. Rajini, B.S. Sathish and K. B. Shaik, "HSV color space based segmentation of region of interest in satellite images," Proc. 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), December 2014.
- [1-15] C-H. Su, H-S. Chiu and T.-M. Hsieh, "An efficient image retrieval based on HSV color space", Proc. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, September 2011.
- [1-16] Y. An, M. Riaz and J. Park, "CBIR Based on Adaptive Segmentation of HSV Color Space," Proc. 2010 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation, March 2010.
- [1-17] X. Wang, K. Jia and Z. Sun, "An efficient method of shadow elimination based on image region information in HSV color space," Proc. 2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, December 2015.
- [1-18] C-L Chien and D-C Tseng, "Color image enhancement with exact HSI color model", International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.7, No.12, pp.6691-6710, Dec. 2011.
- [1-19] D. Yu, L-H. Ma and H-Q. Lu, "Normalized SI Correction for Hue-Preserving Color Image Enhancement," Proc. 2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, August 2007.
- [1-20] A. Taguchi and Y. Hoshi, "Color Image Enhancement in HSI Color Space without Gamut Problem", IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E98-A, No.2, pp.792-795, Feb. 2015.
- [1-21] S. K. Naik and C. A. Murthy, "Hue-preserving color image enhancement without gamut problem," IEEE Trans. Image Processing, vol.12, no.12, pp.1591-1598, 2003.
- [1-22] B. Lee, S. Yang, "Hue-preserving gamut mapping with high saturation," Electron. Lett. 49(19), 1221-1222 (2013)
- [1-23] 村平宏太, 田口 亮, "色相を保存した RGB 色空間におけるカラー画像処理形態の一提案," 信学論(A), vol.J96-A, no.5, pp.264-272, May 2013.
- [1-24] K. Inoue, K. Hara and K. Urahama, "On hue-preserving saturation enhancement in color image enhancement, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E98-A, No.3, pp.927-931, March 2015.

第2章 本論文に関わる基礎事項

2.1 概要

本論文はカラー画像処理に関わる研究であるが、特にヒトが見ることを前提にしたカラー画像処理を扱う。デジタル映像機器等では、赤(R)・緑(G)・青(B)を3原色とする加法混色系であるRGB色空間で色を扱っている。しかしながら、ヒトの色に対する3属性は色相(H)・彩度(S)・明度(IまたはV)であり、HSI(HSV)色空間で考える必要がある。本章ではヒトの色覚の3属性がHSI(V)であることの説明と、種々定義されているHSI(HSV)色空間を紹介する。

2.2 色覚[2-1]

色覚とは、光のスペクトルによって起こる視覚の質的差のことである。色覚を生じるにはある程度以上の光の強さが必要で、それを色覚閾という。脊椎動物では網膜の視細胞のうち、波長の感受性の異なる複数の種類の錐体細胞が反応し、それらの割合が脳皮質の視覚中枢に伝わり認知される。

ヒトは網膜中心部で錐体細胞の密度が高く、可視光の波長が約400 nm～800 nmで、長波長の光(赤～黄～緑)に感度の高いL錐体(赤錐体)、短波長の光(青～紫)に感度の高いS錐体(青錐体)、その間の波長(緑～青)に感度の高いM錐体(緑錐体)の3種類があり、3色型色覚である(3つの錐体の相対感度特性を図2-1に示す)。単色光の波長による色の違い及び、複数の単色光3色(RGB)から任意の色を作ることができ、またそれらは他の色から加法混色で作ることができないので、光の三原色と呼ばれる。

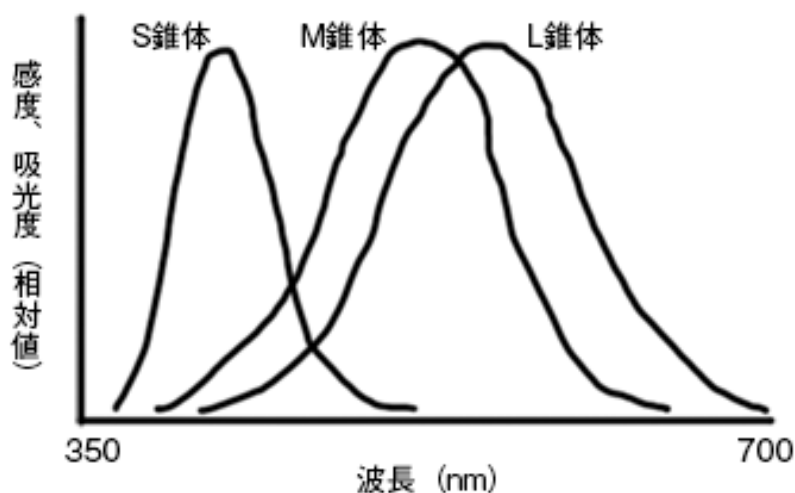


図 2-1 3つの錐体の分光感度特性

まず、ここでは、ヒトの色覚が RGB を 3 原色で行うのでは HSI(HSV)が 3 属性 であることを説明するために、網膜から大脳への信号処理過程を説明する。

2.2.1 三原色説

三原色説は、1802 年にヤングが提案し、その後 1894 年にヘルムホルツが定量化し発展させたものである。「網膜には赤色・緑色・青色に感じる 3 種の錐体が存在し、全ての色の特性は、これら錐体の応答量の割合で示される」と説明している。三原色説は、赤色・緑色・青色光の適切な混合で、ほぼ全ての色が再現される実験に基づいており、論理的に導かれたものではない。RGB を 3 原色とする加法混色系で全ての色が再現できる根拠でもある。三色説によれば、色光は 3 種類の光受容器をある割合で応答させ、この応答の割合の違いにより色光の色が区別される。このため、たとえ物理的には異なる光であっても、光受容器に生じる応答が等しければ区別することができない。

2.2.2 反対色説

1878 年にヘーリングは「網膜には、赤色-緑色、黄色-青色、白色-黒色に応答する 3 種の受光器が存在し、全ての色の特性は、これら受光器の応答量の割合で示される」という仮説を提案した。これは黄色味のある赤はあるが、緑色味のある赤はなく、緑色と赤色は反対色であると考えられる経験的事実に基づいており、反対色説と呼ぶ。反対色説では、基本的な色として、赤色・緑色・黄色・青色の 4 色を考えるので、四色説とも呼ばれている。反対色説によれば、視覚系には赤-緑過程と黄-青過程という 2 種類の色処理過程が存在し、光の波長に応じて互いに拮抗する応答を示す。極性の違いを正と負で表わすと、赤-緑過程で生じる正の応答が赤の感覚、負の応答が緑の感覚に対応する(応答の正負と色の組み合わせは恣意的なものである)。黄-青過程においても同様である。特定の光によって生じるのは正か負の応答のいずれかであるので、赤と緑、あるいは黄と青を同時に感じることはない。赤-緑過程と黄-青過程の応答の組み合わせで、色の感覚は説明される。このほかに、明るさの感覚を媒介する白-黒過程も仮定されている。こうした反対色過程を仮定することで、色順応においてある色光に順応するとその反対色(補色)に対する感度が相対的に向上すること、色残像(継時的対比)が刺激色の反対色となること、色対比現象(周囲との差を強調する方向に色が誘導される現象)において誘導色が反対色となること、などを説明することができる。しかし、全ての色を作る説明はできない。

2.2.3 段階説

心理実験と顕微分光測定・電気生理学的測定の結果に基づいて、錐体での三原色応答とその後での反対色応答を考えるモデルである段階説が、最も有力であるとされている。図 2-2 は、Vos と Walraven が 1971

年に提案した色覚モデルである。第1段階として杆状体の明るさ応答と錐体の赤色(R)・緑色(G)・青色(B)応答を仮定している。ここでは三色説的な処理が行なわれる。錐体は、光を吸収してそれを神経信号へと変換する形で応答する。多くのヒトの眼には錐体が3種類存在し、波長領域に応じて感度が良い錐体に変化する。光が眼に届くと、各錐体の感度に応じて異なる強度の応答が生じる(図 2-1)。杆体の応答は、そのまま暗視所での明るさ応答 $V'(\lambda)$ となるが、3種の錐体の応答 R, G, B は、R と G の出力から黄色(Y)信号が合成され、その後、図 2-2 に示すように、各信号の引き算が行われて、2つの反対色応答である2つの色差($R - G$)と($Y - G$)が得られる。ここでは、反対色で説明される処理が行われるとされている。

2つの色差は直交関係にあり、明度とも直交関係となり、ヒトの色空間は図 2-3 で示されるような3次元空間となる。2つの色差で作られる平面は直交座標系を成しているが、明度軸を原点として極座標表示されれば、明度軸からの距離(半径)が彩度に対応し、偏角が色相に対応する。すなわち、ヒトは HSI 色空間で色を認識していることになる。

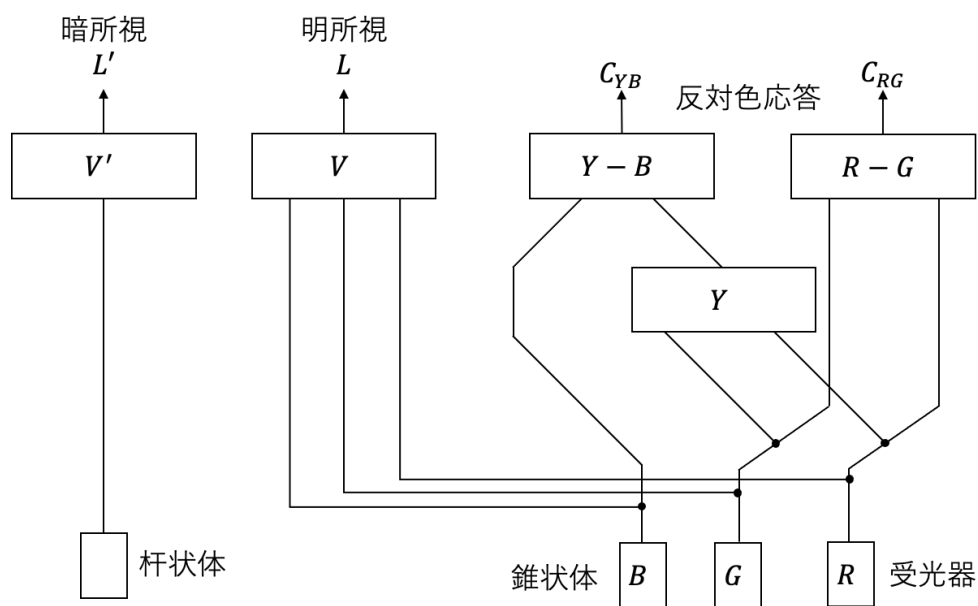


図 2-2 段階説による色覚モデル

明度軸

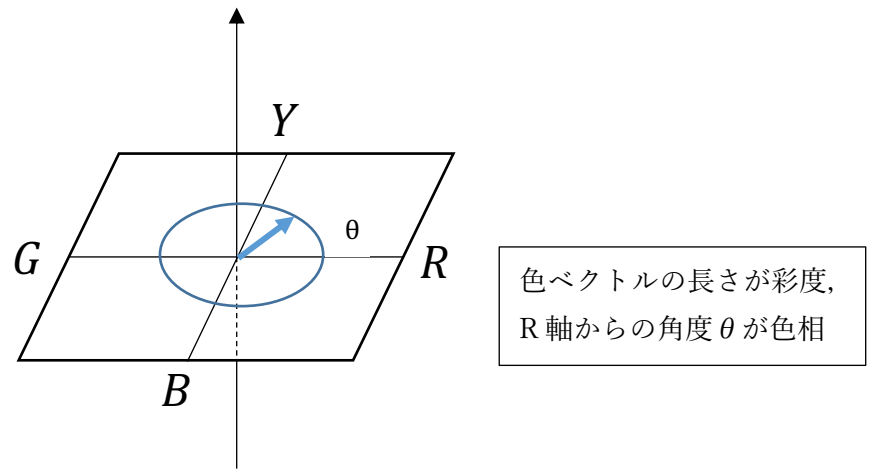


図 2-3 段階説による大脳に伝達される際の色空間

2.3 HSI(HSV)色空間

ヒトの視覚特性を考慮した場合、色は RGB 色空間で扱うことは不適當であり、ヒトの色の 3 属性である。

HSI(HSV)色空間で扱うことが適當である。本節では、種々提案されている HSI(HSV)色空間を紹介する。

2.3.1 C-HSI 色空間[2-2]

文献[2-2]で示されている HSI 色空間(本論文では従来の HSI 色空間:C-HSI(Conventional HSI 色空間と呼ぶ)で、本論文で採用している従来の HSI 色空間である。この HSI 色空間と RGB 色空間の関係は図 2-4 により示される。なお、RGB 色空間は正規化されている(RGB 値は範囲[0,1])ものとする。

HSI 色空間は三角錐の形状をしていて RGB 色空間が内接している。図から明らかのようにこの HSI 色空間は RGB 色空間より大きく、色空間の体積で言えば、4.5 倍となっている。

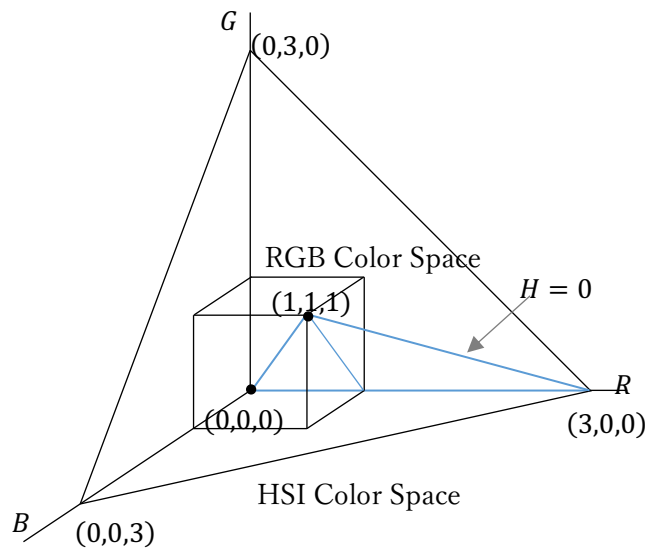


図 2-4 C-HSI 色空間とRGB色空間

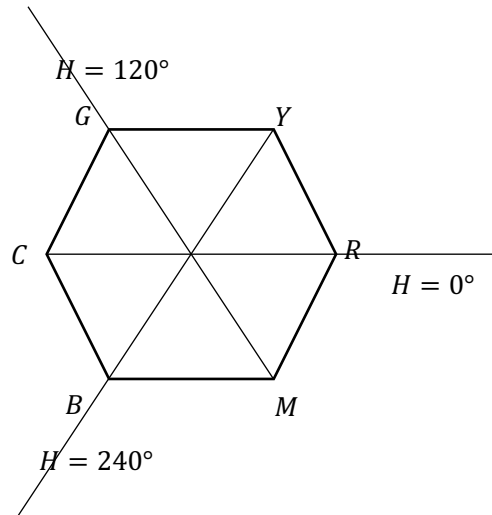


図 2-5 C-HSI 色空間における色相の定義

(0,0,0)と(1,1,1)を結んだ直線が明度軸である(無彩色)RGB 色空間において白(1,1,1)から黒(0,0,0)を見たとき, RGB 色空間は図 2-1 のような六角形になり 6 つの頂点が RGB とシアン(C), マゼンタ(M), イエロー(Y)に対応する. 明度軸から赤(1,0,0)を0°すれば色相が定義される. すなわち, 明度と色相の定義が適切であることが分かる.

以下では, RGB 色空間と C-HSI 色空間の変換則を示す.

(1) RGB 色空間から C-HSI 色空間への変換

RGB 値は範囲[0,1]で正規化されているものとする. 明度は次のように定義されている.

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (2-1)$$

この式は(0,0,0)と(1,1,1) を結ぶ直線を意味する

色相は次のように定義されている.

$$H = \begin{cases} \theta(B \leq G) \\ 360 - \theta(B > G) \end{cases} \quad (2-2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\{(R - G) + (R - B)\}/2}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right] \quad (2-3)$$

次に, 彩度は次のように与えられる.

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)] \quad (2-4)$$

なお, (R, G, B) = (0,0,0)の場合, 式(2-4)の第 2 項の分母は 0 になり計算することはできないことから彩度 S を 0 と定義する.

(2) C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換

C_1, C_2, C_3 を表 2-1のように定義すると, C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換式は次のようになる.

$$C_1 = I(1 - S) \tag{2-5}$$

$$C_2 = I \left[1 + \frac{\cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \tag{2-6}$$

$$C_3 = 3I(C_1 + C_2) \tag{2-7}$$

表 2-1 HSI 色空間から RGB 色空間への変換

H	$0^\circ - 120^\circ$	$120^\circ - 240^\circ$	$240^\circ - 360^\circ$
	$H = H$	$H = H - 120^\circ$	$H = H - 240^\circ$
C_1	B	R	G
C_2	R	G	B
C_3	G	B	R

2.3.2 HSV 色空間[2-3]

HSV 色空間は色相(Hue), 彩度(Saturation, Chroma), 明度(Value, Brightness)の3成分からなる. 色相は, $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲にあり, 0° を赤, その反対の 180° をシアンとする. 彩度は, $0 \sim 100\%$ の範囲にあり, 色の彩度の低下につれて, 灰色さが顕著になり, くすんだ色になる. 明度は $0 \sim 100\%$ の範囲である.

HSV 色空間は一般的にコンピュータグラフィックアプリケーションに用いられる. 色々なアプリケーションでユーザは個々のグラフィックス要素に適用する色を選択する必要がある. このような場合, HSV 色環がよく用いられる(図 2-6 の円環). これは, 円状の領域に色相が表現されたもので, それとは別に図 2-6 に示すように三角形の領域が彩度と明度の表現に用いられることがある. 三角形の水平軸は明度を指示し, 垂直軸は彩度に対応する. このような形式のインターフェースでは, 最初の操作で環状の領域から色相を選択し, 三角形の領域から所望の彩度と明度を選択する.

HSV 色空間の別の視覚化方法は円錐である(図 2-7). この表現では, 色相は色環の三次元円錐状の構造に描かれる. 彩度はその円錐の中心からの距離, 明度は円錐の頂点からの距離で表される. 円錐ではなく六角形の錐体で表現するものもある(図 2-8). この方法は単一の物体で HSV 色空間全体を視覚化するのに適している. 三次元形状のため二次元のコンピュータインターフェースにおける色の選択に利用するには不向きである.

HSV 色空間は円柱状の物体として視覚化されることもある(図 2-9). 上記と同様に色相は円柱の外周に沿って変化し, 彩度は中心からの距離に伴って変化する. 明度も頂点から底へ向かって変化する. このような

表現は HSV 色空間のモデルとして数学的に厳密であると考えられるかもしれないが, 視覚化された彩度レベルと色相の精度は黒に近づくにつれて減少する. さらに, 通常コンピュータは有限の範囲で RGB 値を格納する. 精度の制限は人間の色認知能力の限界とも関連し, ほとんどのケースで円錐による視覚化はより現実的とされている.

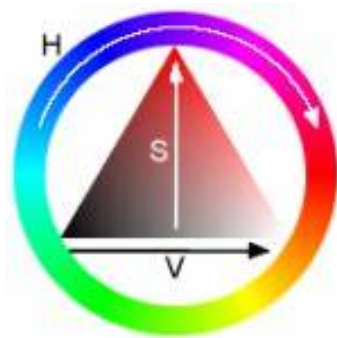


図 2-6 環状の HSV 色空間

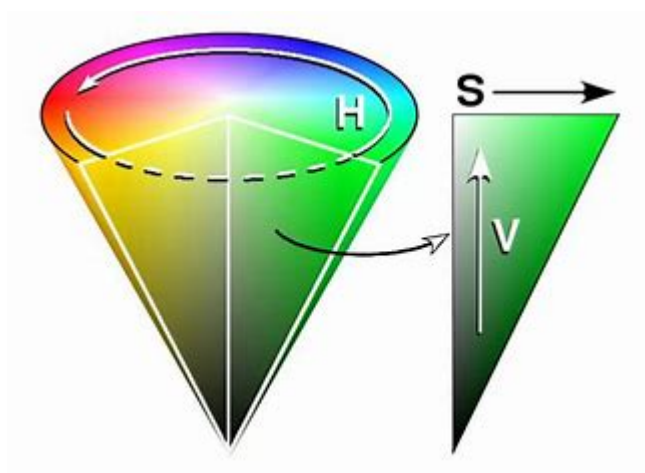


図 2-7 円錐モデルの HSV 色空間

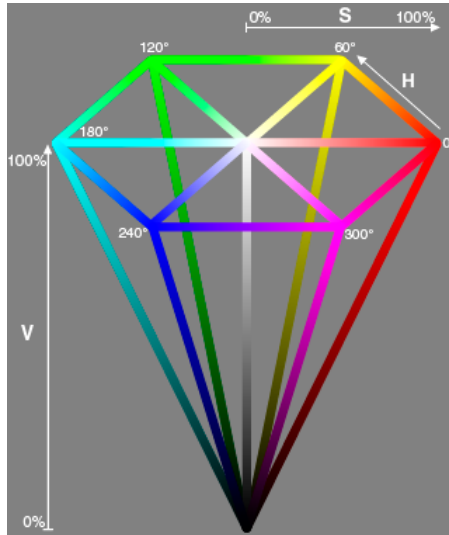


図 2-8 六円錐モデルの HSV 色空間

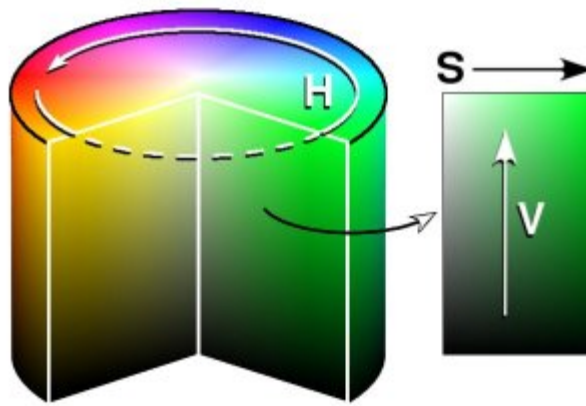


図 2-9 円柱モデルの HSV 色空間

(1) RGB 色空間から HSV 色空間への変換

R, G, B それぞれの成分の最小値が 0, 最大値が 1 の範囲にあり, (R, G, B) で定義された色が与えられたとする. (H, S, V) の成分は以下の式で求められる.

$$H = \begin{cases} \text{undefined}, & \min(R, G, B) = \max(R, G, B) \\ 60^\circ \cdot \frac{G - R}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + 60^\circ, & \min(R, G, B) = B \\ 60^\circ \cdot \frac{B - G}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + 180^\circ, & \min(R, G, B) = R \\ 60^\circ \cdot \frac{R - B}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + 300^\circ, & \min(R, G, B) = G \end{cases} \quad (2-8)$$

$$V = \max(R, G, B) \quad (2-9)$$

■ 円錐モデル

$$S = \max(R, G, B) - \min(R, G, B) \quad (2-10)$$

■ 六角錐モデル

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} \quad (2-11)$$

■ 円柱モデル

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\min(R, G, B)} \quad (2-12)$$

(2) HSV 色空間から RGB 色空間への変換

H が色相を配置した色環に沿って 0.0° から 360.0° の範囲で変化する角度で表記され、彩度を意味する S、明度を意味する V がそれぞれ 0.0 から 1.0 の間で変化する。このような (H, S, V) 値によって定義されたある色が与えられとき、 (R, G, B) 成分に変換する式を以下に与える。

■ 円柱モデルからの変換

$$C = V \cdot S \quad (2-13)$$

■ 円錐モデルからの変換

$$C = S \quad (2-14)$$

$$H' = \frac{H}{60^\circ} \quad (2-15)$$

$$X = C(1 - |H' \bmod 2 - 1|) \quad (2-16)$$

$$(R, G, B) = (V - C)(1, 1, 1) + \begin{cases} (0, 0, 0), & H = \text{undefined} \\ (C, X, 0), & 0 \leq H' < 1 \\ (X, C, 0), & 1 \leq H' < 2 \\ (0, C, X), & 2 \leq H' < 3 \\ (0, X, C), & 3 \leq H' < 4 \\ (X, 0, C), & 4 \leq H' < 5 \\ (C, 0, X), & 5 \leq H' < 6 \end{cases} \quad (2-17)$$

2.3.3 HSL 色空間[2-4]

HSL 色空間とは、色相(Hue)、彩度(Saturation)、輝度(Lightness/Luminance/Intensity)の3成分からなる色空間。HLV 色空間によく似ている。しかしながら、HLS 色空間の彩度は、純色から彩度が落ちるといことは、灰色になっていくという考え方に基づいている。また明度は、輝度 0%を黒、100%を白とし、その中間を純色とする。色相は HSV 色空間と同様に $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲にあり、 0° を赤、その反対の 180° をシアンとする。

(1) RGB 色空間から HSL 色空間への変換

$$H = \begin{cases} \text{undefined, } \min(R, G, B) = \max(R, G, B) \\ 60^\circ \cdot \frac{G - R}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + 60^\circ, \min(R, G, B) = B \\ 60^\circ \cdot \frac{B - G}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + 180^\circ, \min(R, G, B) = R \\ 60^\circ \cdot \frac{R - B}{\max(R, G, B) - \min(r, G, B)} + 300^\circ, \min(R, G, B) = G \end{cases} \quad (2-18)$$

$$L = \frac{\max(R, G, B) + \min(R, G, B)}{2} \quad (2-19)$$

■ 双円錐モデル(図 2-9)

$$S = \max(R, G, B) - \min(R, G, B) \quad (2-20)$$

■ 円柱モデル

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{1 - |\max(R, G, B) + \min(R, G, B) - 1|} \quad (2-21)$$

(2) HSL 色空間から RGB 色空間へ変換

まず, RGB 色空間へ変換する前に, 最大値と最小値を求める.

■ HSL 色空間の円柱モデルから変換する場合

$$Max = L + \frac{S \cdot (1 - |2 \cdot L - 1|)}{2} \quad (2-22)$$

$$Min = L - \frac{S \cdot (1 - |2 \cdot L - 1|)}{2} \quad (2-23)$$

■ HSL 色空間の双円錐モデルから変換する場合

$$Max = L + \frac{S}{2} \quad (2-24)$$

$$Min = L - \frac{S}{2} \quad (2-25)$$

求めた最大値と最小値を色相分けし, RGB が以下のように定義される.

$$(R, G, B) = \begin{cases} (Max = Min, Max = Min, Max = Min), H = undefined \\ \left(Max, Min + (Max - Min) \cdot \frac{H}{60^\circ}, Min \right), 0 \leq H < 60^\circ \\ \left(Min + (Max - Min) \cdot \frac{120^\circ - H}{60^\circ}, Max, Min \right), 60^\circ \leq H < 120^\circ \\ \left(Min, Max, Min + (Max - Min) \cdot \frac{H - 120^\circ}{60^\circ} \right), 120^\circ \leq H < 180^\circ \\ \left(Min, Min + (Max - Min) \cdot \frac{240^\circ - H}{60^\circ}, Max \right), 180^\circ \leq H < 240^\circ \\ \left(Min + (Max - Min) \cdot \frac{H - 240^\circ}{60^\circ}, Min, Max \right), 240^\circ \leq H < 300^\circ \\ \left(Max, Min, Min + (Max - Min) \cdot \frac{360^\circ - H}{60^\circ} \right), 300^\circ \leq H < 360^\circ \end{cases} \quad (2-26)$$

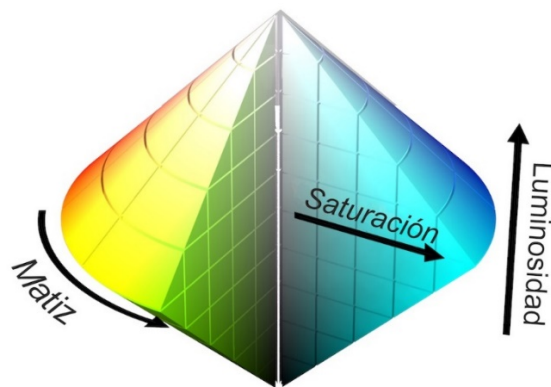


図 2-10 双円錐 HSL モデル

2.4 第 2 章のまとめ

カラー信号は 3 次元空間で表現されるが、その根拠がヒトの色に対するセンシングが 3 つの錐体で行われていることであることを明らかにした。3 つの錐体のセンシングはほぼ RGB 色空間で行われるが、網膜から大脳への伝達過程の信号処理により、知覚レベルでは HSI (HSV) 色空間で成されていることを説明した。

本論文におけるカラー画像処理はヒトが見ることを前提するカラー画像を前提とすることから、HSI 色空間で行うが、従来の HSI 色空間と、その類似の代表的なヒトの色の 3 属性との関わりの深い色空間を紹介した。

第 2 章の参考文献

- [2-1] 大田 登, 色彩工学, 東京電機大学出版局, 2001
- [2-2] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing 3rd ed., Pearson Education, Inc., 2008.
- [2-3] デジタル画像処理編集委員会, デジタル画像処理[改訂第二版], 公益財団法人画像情報教育振興協会(CG-ART), 2016

第3章 従来の諸研究

3.1 概要

本論文に扱う研究は以下の3つに分類可能である.

3.2 従来の HSI (HSV) 色空間の改良に関する研究

3.3 従来 HSI (HSV) 色空間での処理結果が RGB 色空間外になった時の HSI 色空間から RGB 色空間への変換法

3.4 RGB 色空間の等色相平面上での処理手法

本章では、それぞれの研究分野に対する従来の代表的な研究を紹介する.

3.2 従来の HSI (HSV) 色空間の改良に関する研究

第2章で明らかにしたように、ヒトの色覚の3属性(色相, 彩度, 明度)に基づく色空間が複数定義されている. これら定義されている色空間は共通して RGB 色空間よりその色域が大きい. しかしながら, これらの色空間は主にカラー画像の識別, 検索, 分類等に利用されているため, RGB 色空間との色域の差異が問題にならない場合が多い. 従来の HSI (HSV) 色空間の改良に関する研究の数は少ない. 以下では, 本論文の一部として行った色域問題を解決する HSI 色空間の紹介と, 認識問題に適用するための HSV 色空間の修正に対する研究を紹介する.

3.2.1 色域問題を解決した HSI 色空間 (e-HSI 色空間)

HSI (HSV) 色空間は種々定義されているが, 本論文で取り扱う HSI 色空間[3-1]は図 3-1 に示す三角錐で色域が示され, RGB 色空間を大きく包みこむ形態をとり, 色空間の体積においては RGB 色空間の 4.5 倍となっている[3-2]. HSI 色空間を RGB 色空間内で定義された e-HSI 色空間が文献[3-3]により定義された. e-HSI 色空間と RGB 色空間の関係は図 3-1 で示される. RGB 色空間に e-HSI 色空間が接して定義されており, 厳密には RGB 色空間の方がその色域が大きい. また, RGB 色空間に e-HSI 色空間の変換則は複雑であることも難点である.

この研究は第4章で示す RGB 色空間と色域が同一な HSI 色空間と目的を同じにする研究であるが, 本論文で提案する HSI 色空間は RGB 色空間と全く同一な色域をもち, その変換法は単に CMY 色空間から導出する HSI 色空間と併用するだけで変換法は理解しやすく簡便である.

3.2.2 オブジェクト追跡の性能向上のための HSV 色空間の修正

最も一般的な HSV 色空間は、図 3-2 に示される六角錐で定義されている。RGB よりヒトの知覚に近い表現であり、RGB 色空間からの変換も簡便なため、画像認識等の処理に広く採用されている。しかしながら、その色空間の形状からも理解できるように、色相の分解のその分解能を図 3-3 に示すように不均一であり、色分類が不正確になる可能性がある。あくまでも認識が目的ため、色相に対する修正を加えて問題ない。文献[3-4]では HSV 色空間の色相を 60° 回転させた修正された HSV 色空間が提案されている。この時の色相の分解は図 3-4 に示すようになる。修正を加えた HSV 色空間がオブジェクト追跡アルゴリズムに対して有効であることを明らかにしている。

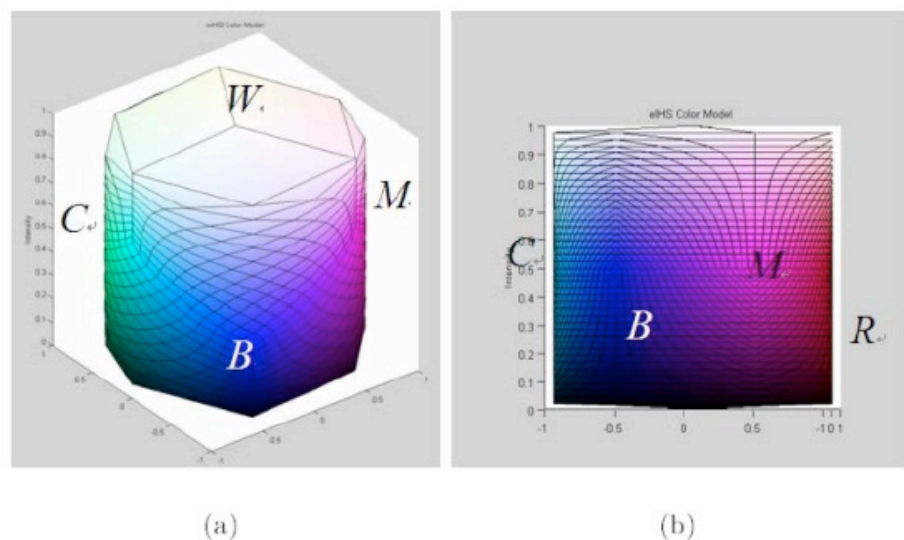


図 3.1 e-HSI 色空間と RGB 色空間の関係

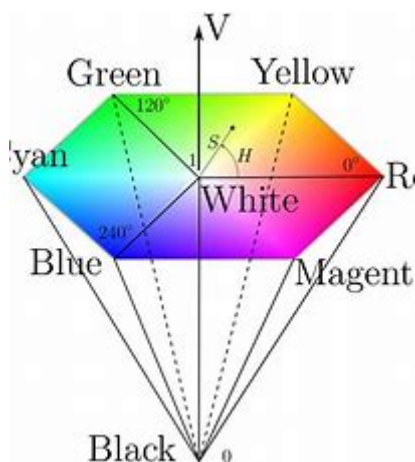


図3-2 HSV 色空間の形状

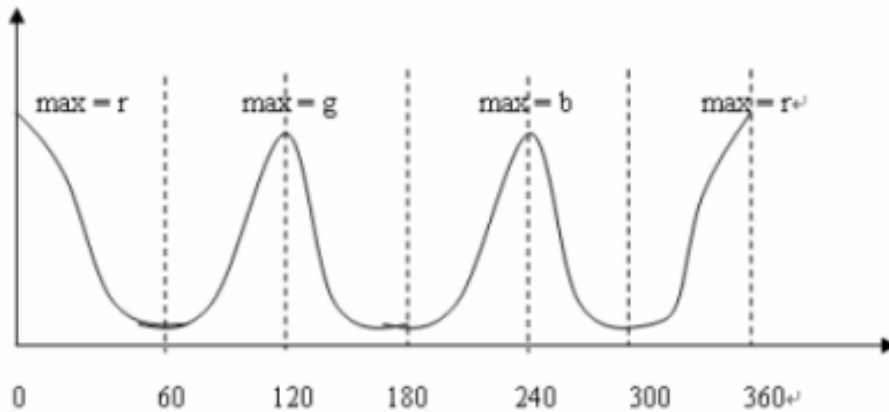


図 3-3 HSV 色空間の色相の分解能

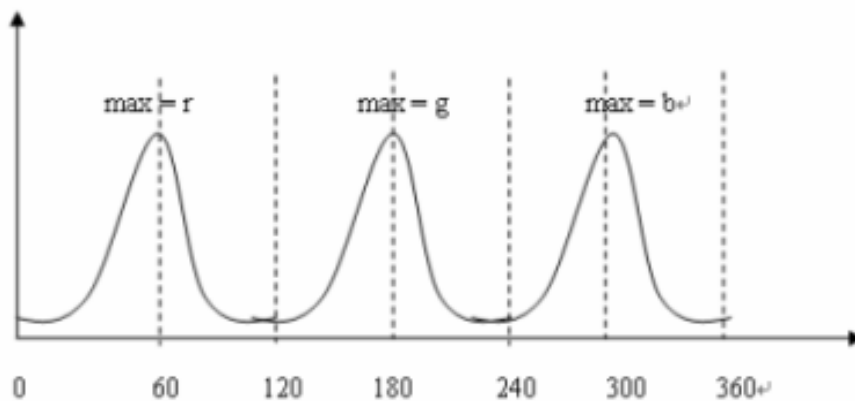


図 3-4 修正を施した HSV 色空間の色相の分解能

3.3 従来 HSI 色空間での処理結果が RGB 色空間外になった信号の HSI 色空間から RGB 色空間への変換法

文献[3-1]で明らかにされている HSI 色空間と RGB 色空間の関係は図 3-5 のように示され HSI 色空間は RGB 色空間の 4.5 倍の体積を持つ[3-2]. 例えば, 色相が 0° の等色相平面を図 3-6 に示す. 図 3-5 の図上にも色相 0° の断面を黒三角 (RGB 色空間の断面), 青三角 (HSI 色空間の断面) で表記している. 特に明度が大きい場合は HSI 色空間と RGB 色空間の差異が大きくなり, 仮に HSI 色空間で画像処理を行った場合, その処理結果が RGB 色空間外となる可能性が高まる. 処理結果が RGB 色空間外にある場合, HSI 色空間から RGB 色空間への変換に工夫を加え, RGB 色空間内に変換する必要がある.

3.3.1 クリッピング

最も簡単な方法で, 例えば, RGB 各 8 ビットの画像を考えると, HSI 色空間上で何らかの処理を行い, そ

の後, RGB 色空間に変換を行ったとき, RGB 各成分のなかで 255 を超えた成分が存在した場合, その値を 255 に置き換える処理である. この処理は簡便であるが信号の色相が変化してしまうため, 一般には採用できない方法である.

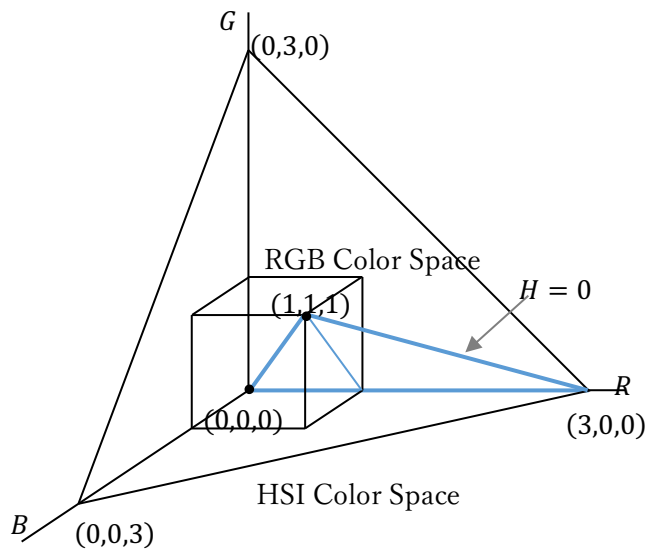


図 3-5 RGB 色空間と従来の HSI 色空間

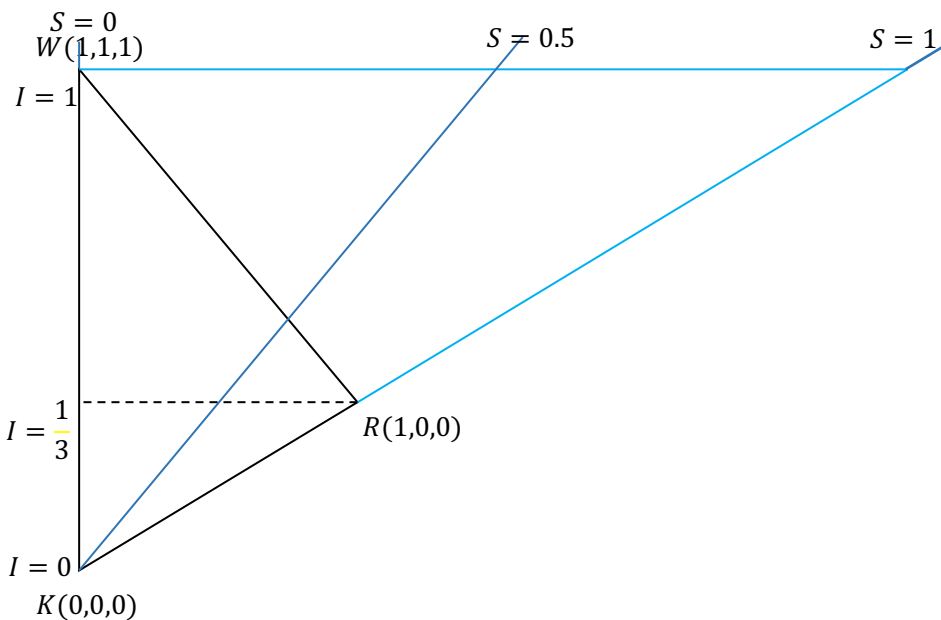


図 3-6 色相 $H=0^\circ$ における等色相平面 (黒三角: RGB 色空間の断面, 青三角: HSI 色空間の断面)

3.3.2 正規化処理

クリッピングにおいては信号の色相を変化させてしまうため、色相を変化させずに RGB 色空間外の信号を RGB 色空間の境界に移す方法が要求される。ここでも、RGB 各 8 ビットの画像に HSI 色空間上で何らかの処理を行い、その後、RGB 色空間に変換を行ったとする。変換後の RGB 成分の最大値を MAX とするとき、 $MAX > 255$ の時に全ての成分に「 $255/MAX$ 」を乗ずることにより、信号を RGB 色空間の境界へ移動させる。

この処理を図 3-7 を用いて説明する。HSI 色空間での処理結果が色相 $H = 0^\circ$ であり図 3-7 の点 A であると仮定する。正規化処理は点 A と原点を結んだ直線と色空間の境界との交点 C に移動させることに対応する。この方法では色相を不変であるが、明度も小さくなるため、HSI 色空間で行った処理の効果が下がってしまう。

3.3.3 彩度補正を伴う HSI 色空間から RGB 色空間への変換

正規化処理では信号の明度が減少してしまうことから、例えば、HSI 色空間でコントラスト強調を行った場合、その効果が失われてしまう。図 3-7 で説明すれば、点 A を点 B (RGB 色空間の境界) に移動させることで明度を保存して RGB 色空間内へと移動させることができる。すなわち、HSI 色空間から RGB 色空間に変換する際に彩度補正を併用すればよい。その方法が文献[3-2]で明らかにされている。

文献[3-2]では第 2 章で説明した従来の HSI 色空間から RGB 色空間の変換則を変形させて以下のよう
に与えられている。

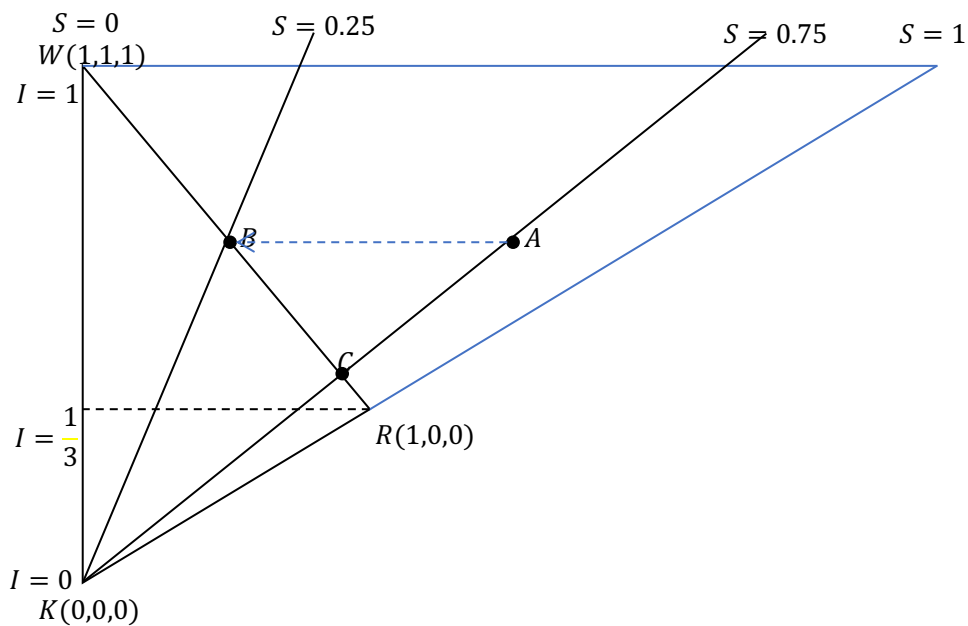


図 3-7 RGB 色空間外の信号に対する補正方法

(Case 1) $0^\circ \leq H < 60^\circ$

この場合はカラー信号の3成分のなかで C_2 が最大であるから C_2 の値が1より大きい場合は RGB 色空間外に信号が位置すると判断される。よって、まず、 C_2 を従来の以下の変換式を用いて求める。

$$C_2 = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-1)$$

(1-a) $C_2 \leq 1$

この場合は信号が RGB 色空間内であるので従来の HSI 色空間から RGB 色空間への変換則を用いることができる。 C_2 は式(3-1)で既に求まっているので C_1 と C_3 を以下の式で求める。

$$C_1 = I(1 - S) \quad (3-2)$$

$$C_3 = 3I - (C_1 + C_2) = I \left[1 + \frac{S(\cos(60^\circ - H) - \cos H)}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-3)$$

(1-b) $C_2 > 1$

この場合は、信号が RGB 色空間外であり、HSI 色空間から RGB 色空間への変換の際に彩度を補正して RGB 色空間境界に移すことにする。

ここでは、 $C_2=1$ において、式(3-1)から彩度を逆算することで補正された \hat{S} を導出する。具体的には補正された \hat{S} は次式で与えられる。

$$\hat{S} = \frac{(1 - I) \cdot \cos(60^\circ - H)}{I \cdot \cos H} \quad (3-4)$$

C_1 と C_3 は補正された \hat{S} を用いて

$$C_1 = I(1 - \hat{S}) \quad (3-5)$$

$$C_3 = I \left[1 + \frac{\hat{S} \{ \cos(60^\circ - H) - \cos H \}}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-6)$$

と求まることになる。

(Case 2) $60^\circ \leq H < 120^\circ$

この場合はカラー信号の3成分のなかで C_3 が最大であるから C_3 の値が1より大きい場合は RGB 色空間外に信号が位置すると判断される。 C_3 は次式で与えられる。

$$C_3 = I \left[1 + \frac{S \{ \cos(60^\circ - H) - \cos H \}}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-7)$$

(2-a) $C_3 \leq 1$

この場合は C_1 と C_2 は共に1未満であるから、従来の変換則が適用可能であり、 C_1 と C_2 はそれぞれ式(3-2)と式(3-1)で導出される。

(2-b) $C_3 > 1$

この場合は、信号が RGB 色空間外であるから $C_3=1$ とおいて、式(3-3)から彩度を逆算することで補正された \hat{S} を導出する。具体的には補正された \hat{S} は次式で与えられる。

$$\hat{S} = \frac{(1 - I) \cdot \cos(60^\circ - H)}{I \cdot \{\cos(60^\circ - H) - \cos H\}} \quad (3-8)$$

そして、 C_1 と C_2 は補正された \hat{S} を用いて以下のように求める。

$$C_1 = I(1 - \hat{S}) \quad (3-9)$$

$$C_2 = I \left[1 + \frac{\hat{S} \cdot \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3-10)$$

この方法では、HSI 色空間から RGB 色空間への変換をすることなく RGB 色空間の内外であることを判断でき、HSI 色空間から RGB 色空間への変換に彩度補正を含ませている。この方法の決定は RGB 色空間外の信号が全て RGB 色空間の境界へ移動することで、修正されて信号における彩度が理想の値からずれていくことになる。ここで、理想的な彩度の値とは、RGB 色空間と色域が同じである HSI 色空間で定義されている彩度のことである。この欠点を解決する方法を第 5 章で明らかにしている。

3.4 RGB 色空間の等色相平面上での処理手法

ヒトの視覚特性を考慮するとカラー画像は HSI(HSV) 色空間で処理をすべきである。しかし、HSI(HSV) 色空間の色域は RGB 色空間より大きいいため、色域問題が生じる。その解決策としては RGB 色空間において色相を保存する拘束下、すなわち、等色相平面でカラー画像処理を行うことが上げられる。

入力カラー画像の RGB 成分を (R_{in}, G_{in}, B_{in}) 、出力カラー画像の RGB 成分 $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ とする。このとき、色相を保存する拘束条件は以下ようになる。

$$\begin{aligned} R_{out} &= \alpha R_{in} + \beta \\ G_{out} &= \alpha G_{in} + \beta \\ B_{out} &= \alpha B_{in} + \beta \end{aligned} \quad (3-11)$$

全ての成分に対して同じスカラー倍と同じシフト量が要求される。この拘束条件は等色相平面上での拘束条件ともいえる。この条件を満たす処理手法がいくつか提案されている。

3.4.1 Naik らの方法[3-5]

式(3-11)を満たす方法として文献[3-5]が最初に明らかにされた。ここでは、等色相平面($H = 0^\circ$)を利用してその処理手法を紹介する。

Naik らの処理は明度に対して任意の階調変換関数を適用可能な方法である。入力信号は等色相平面で処理されるため色相は不変であり、明度は任意の変換が可能であるが、彩度は明度の決定に付随しなされる。言い換えれば彩度は明度に従属して独立に処理を行うことができない。

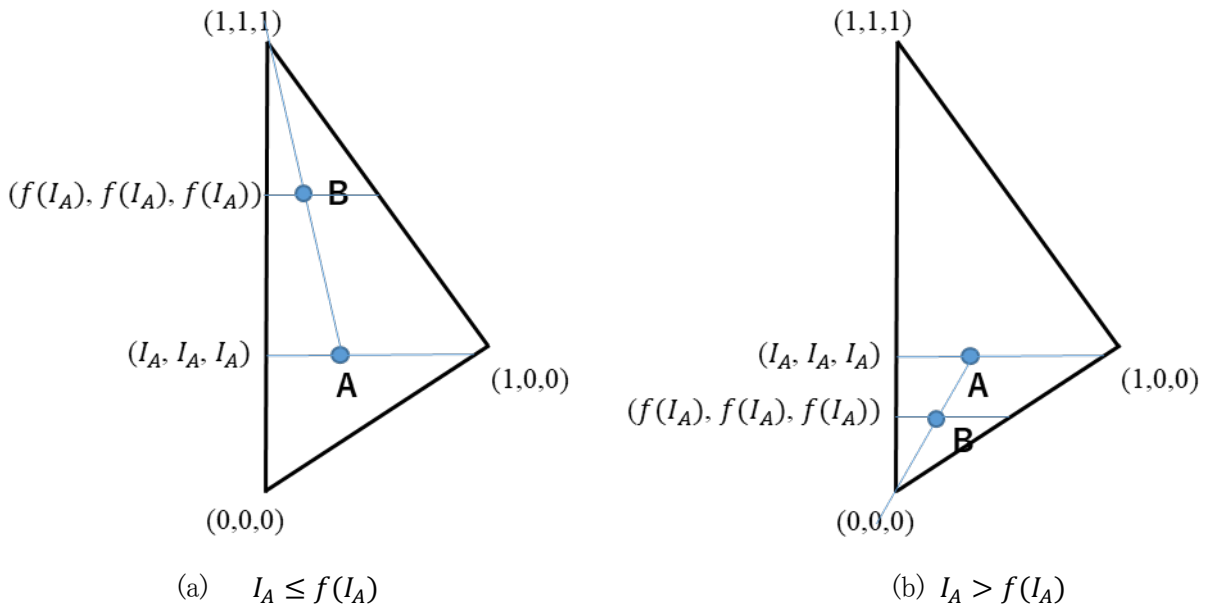


図 3-8 Naik らの方法

入力信号の色相 H が 0° であると仮定する。図 3-8(a), (b)が色相 $H = 0^\circ$ の等色相平面で、入力信号を点 A とする。点 A の明度を I_A とし、その明度に階調変換を行った結果を $f(I_A)$ とする。 I_A と $f(I_A)$ の大小関係で2つの場合に分けられる。図 3-8(a)に $I_A \leq f(I_A)$ の場合の出力信号を、図 3-8(b)に $I_A > f(I_A)$ の場合の出力信号を共に点 B として図示している。 $I_A \leq f(I_A)$ の場合は出力信号が RGB 色空間内であることを保証するため、点 A と白 $(1,1,1)$ を結ぶ直線上を移動させて出力信号(点 B)を得る。一方、 $I_A > f(I_A)$ の場合は出力信号が RGB 色空間内であることを保証するためには、点 A と黒 $(0,0,0)$ を結ぶ直線上を移動させて出力信号(点 B)を得る必要がある。

彩度はカラー画像のカラフルネスを決定する要素である。彩度は $(0,0,0)$ と $(1,1,1)$ を結ぶ明度軸からのス垂直方向への距離で定量化される。よって、この方法においては、色域問題の回避のために入力信号の彩度に対して、出力信号の彩度は明度軸に近づくことになり、画像のカラフルネスが減少することになる。

3.4.2 村平らの方法[3-6]

Naik らは RGB 色空間の等色相平面での処理手法を明らかにした。この手法では、出力信号が RGB 色

空間内であることを保証するため、明度に対しては任意の処理を可能にしたものの、彩度の出力結果は明度の出力結果に不随して決定することになる。そして、この方法では出力信号の彩度は入力信号の彩度より減少してしまい、画像のカラフルネスが低下する。出力画像のカラフルネスの減少を防ぐための方法として村平らが新たな方法を提案した[3-6]。村平らの方法も Naik らの方法と同様に、明度に対しては任意の処理を適用できるが彩度は明度に不随してその出力値が決定する。しかしながら、出力信号の明度と彩度の関係が Naik らの方法と異なるため、村平らの方法では彩度(カラフルネス)が高い出力画像を得ることが可能である。村平らの方法の説明に際しても入力信号の色相 H が 0° であると仮定し、色相 $H = 0^\circ$ の等色相平面上における出力信号の振る舞いを明らかにすることで Naik らの方法との比較のもとでその特徴を明確化する。

ここでも、入力信号の色相 H が 0° であると仮定する。図 3-9(a), (b)が色相 $H = 0^\circ$ の等色相平面で、入力信号を点 A とする。点 A の明度を I_A とし、その明度に階調変換を行った結果を $f(I_A)$ とする。村平らの方法でも I_A と $f(I_A)$ の大小関係で 2 つの場合に分ける。図 3-9(a)に $I_A \leq f(I_A)$ の場合の出力信号と、図 3-9(b)に $I_A > f(I_A)$ の場合の出力信号を共に点 B として図示している。

$I_A \leq f(I_A)$ の場合は Naik らの方法とことなり、点 A と黒(0,0,0)を結ぶ直線上をまずは移動させ、RGB 色空間の境界まで移動させる。その後、RGB 色空間の境界上明度が $f(I_A)$ となるまで移動させて出力信号(点 B)を得る。一方、 $I_A > f(I_A)$ の場合は点 A と(1,1,1) (白)を結ぶ直線上をまずは移動させて信号を RGB 色空間の境界まで移動させる。その後、RGB 色空間の境界を明度が $f(I_A)$ になるまで移動させて出力信号である点 B を得る。

図 3-8 と図 3-9 の比較から明らかのように、村平らの方法での出力信号は Naik らの方法での出力信号と比較して常に明度軸からの距離が長い。すなわち、彩度が高く、画像のカラフルネスが高いことを意味している。

村平らの方法でも明度と彩度の処理を独立に行うことができない。彩度が画像のカラフルネスを決定する要素であることを考えると明度とは独立に任意の処理を行えることは望ましい。その処理を実現した方法を第 6 章で明らかにする。

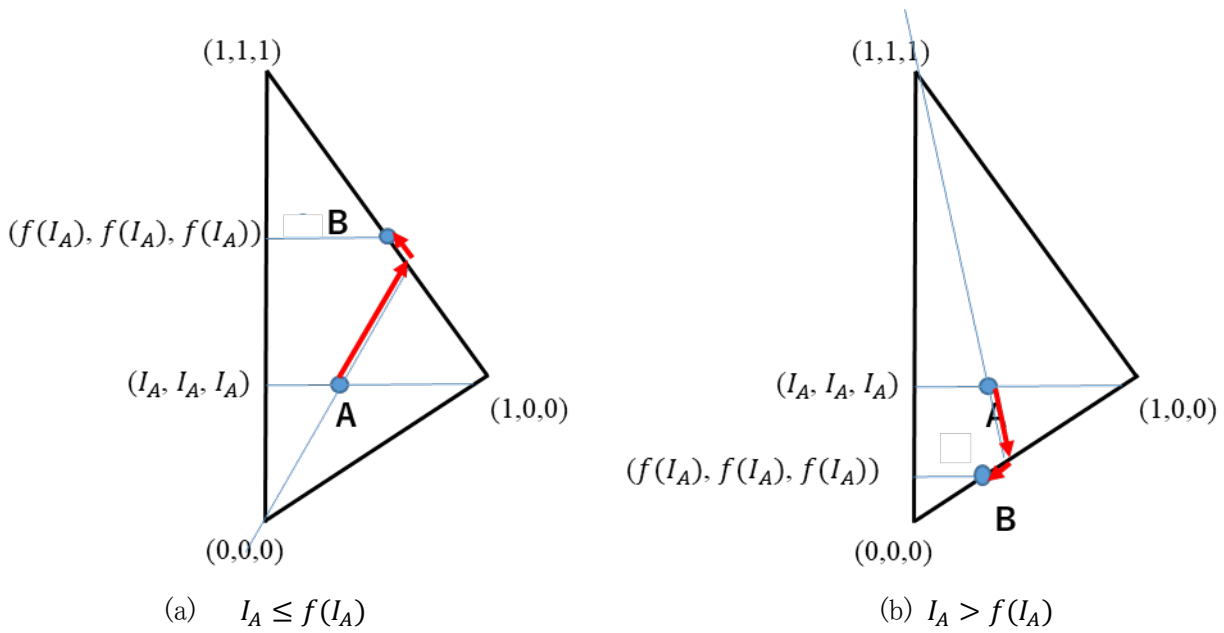


図 3-9 村平らの方法

3.4.3 植田らの方法[3-7],[3-8]

植田らは文献[3-7],[3-8]で本論文では、RGB 色空間内の等色相平面上で画素分布を広げることで、色域を保証した色相保存可能なコントラスト強調法を提案している。具体的には、入力画像の各画素を白、黒、純色の三点の凸結合で表現する。凸結合は各係数が 0~1 であり係数の総和が 1 と等しいという性質を満たすことで各画素は白、黒、純色 (RGB 色空間の辺上の点) の 3 点の凸包の中に含まれるため、RGB 色空間の色域内であることが保証される。この方法では白、黒、純色の係数に対し、濃淡画像のヒストグラムマッチング法 [3-1] をそれぞれ適用し、各係数の分布を広げることで、画素の色空間内での分布を広げる処理が行われる。

図 3-10 のように RGB 色空間の等色相平面を考える。このとき、等色相平面上の点 \mathbf{x} は凸結合によって

$$\mathbf{x} = a_w \mathbf{w} + a_k \mathbf{k} + a_c \mathbf{c} \quad (3-12)$$

と表すことができる。

凸結合の 3 つの係数は以下の式に従って算出される[3-9].

$$a_w = \min(\mathbf{x}) \quad (3-13)$$

$$a_k = \max(\mathbf{x}) - \min(\mathbf{x}) \quad (3-14)$$

$$a_c = 1 - \max(\mathbf{x}) \quad (3-15)$$

この時、

$$a_w + a_k + a_c = 1 \quad (3-16)$$

$$0 \leq a_w, a_k, a_c \leq 1 \quad (3-17)$$

を満たし、 \mathbf{x} , \mathbf{w} , \mathbf{k} , \mathbf{c} は同一の平面 (等色相平面) に存在し、1 つの \mathbf{x} は \mathbf{w} , \mathbf{k} , \mathbf{c} の内点であり、RGB 色空間内であることを保証する。

この凸結合の3つの係数への処理を通じてコントラスト強調処理を行う方法が提案されている。具体的にはヒストグラムマッチングを採用し、図 3-11 に示す三角形上で信号の空間上での分布を広げるために、分布を司る係数ベクトルの分布を広げる処理を行う。基本的には、各頂点色方向に画素分布を広げることでコントラスト強調が実現できる。しかしながら、原画像のコントラストが極端に低い場合、分布を広げすぎると過度な強調につながってしまう。したがって、元の分布の広がり度合いをある程度維持しつつ、白、黒、純色の方向に画素分布を広げることが理想的な変換である。ここでは、各係数ヒストグラムを平滑化する際のパラメータによってコントラスト強調度合いの調節を図る方法が示された。

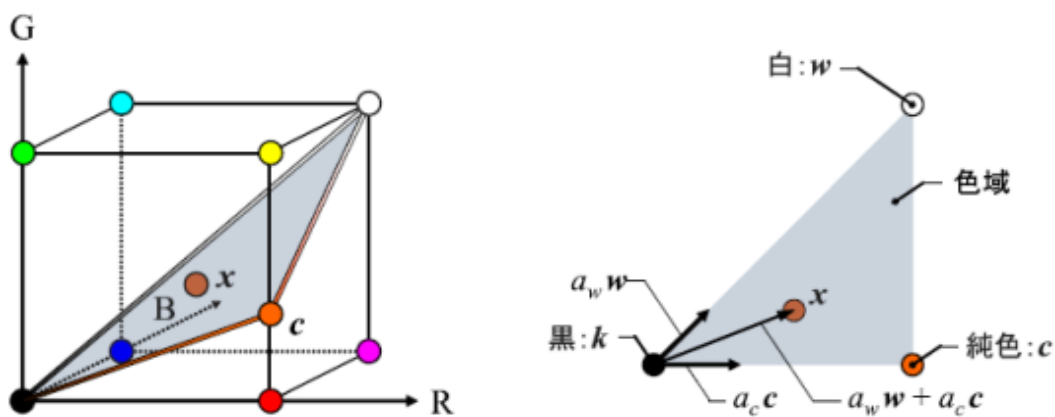


図 3-10 等色相平面の白、黒、純色三点の凸結合での表現

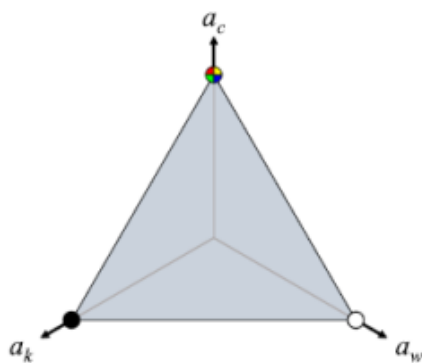


図 3-11 係数ベクトル空間

ヒストグラムマッチングとは定めた(所望の)ヒストグラムを定め、そのヒストグラムに変換する手法である。ここで示された方法は各係数ベクトルの正規化ヒストグラムをガウシアンフィルタで平滑化して結果を理想のヒストグラムとしてマッチングを行うものとする。ガウシアンフィルタは σ の値を変えることで平滑化の度合い(強調の度合い)を可変できることになる。

3.4.4 その他の方法

その他の方法としては、井上らは、村平の方法よりも彩度強調の度合いを強めた、彩度が最大化されるように変換を行う手法を提案した[3-10]。しかしながら、井上らの手法では彩度が過度に上昇するといった問題がある。さらに、井上らの手法では原画像の彩度にかかわらず彩度が最大化される。したがって、原画像の彩度の情報が失われてしまい、後処理によって彩度の調整を行うことが困難になってしまう。

Nikolovaらは、RGB色空間内で色域を保証した変換法を提案した[3-11]。Nikolovaらの手法では、exact Histogram Specification [3-12]に基づき、コントラスト強調が行われる。Nikolovaらの手法の処理結果は、原画像と比較して鮮やかさが適度に上昇し、全体的に良好な結果が得られる。しかしながら、色域を保証しつつ色相不変の彩度強調を適用する必要がある、煩雑な処理が必要になってしまう。

3.5 第3章のまとめ

本論文はヒトの視覚の3属性である色相、彩度、明度で記述したHSI色空間でのカラー画像処理についての研究を行った。

映像機器等のカラー画像データ取得系とディスプレイ等の表示系はRGB色空間で色を扱っているため、RGB色空間とHSI色空間の相互変換が要求される。まずは、第2章で明らかにしたRGB色空間とHSI色空間の変換則の改良に関わる研究について紹介した。

ヒトを対象とするカラー画像信号処理では画像の色相を保存した処理が要求される。そのため、HSI色空間で処理を行うことになる。従来のHSI色空間での処理では色域の問題から処理結果がRGB色空間外に位置することが頻繁に発生する。そこで、RGB色空間外になった信号をRGB色空間に移す方法について紹介した。

色域の問題の解決のためにはRGB色空間において等色相空間で処理を行うことが得策である。等色相空間での処理には拘束条件が課せられるが、その制約のもとで、高彩度の画像を得る方法、柔軟度の高い方法を紹介した。

第3章の参考文献

- [3-1] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing, 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2007.
- [3-2] A. Taguchi and Y. Hoshi, “Color Image Enhancement in HSI Color Space without Gamut Problem”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E98-A, No.2, pp.792-795, Feb. 2015.
- [3-3] C-L Chien and D-C Tseng, “Color image enhancement with exact HSI color model”, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.7, No.12, pp.6691-6710, Dec. 2011.
- [3-4] L. Shuhua and G. Gaizhi, “The application of improved HSV color space model in image processing”, Proc. 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, pp.V2-10 - V2-13, May 2010.
- [3-5] S.K. Naik and C.A. Murthy, “Hue-preserving color image enhancement without gamut problem,” IEEE Trans. Image Process., vol.12, no.12, pp.1591-1598, 2003
- [3-6] 村平宏太, 田口 亮, “色相を保存した RGB 色空間におけるカラー画像処理形態の一提案,” 信学論 (A), vol.J96-A, no.5, pp.264-272, May 2013.
- [3-7] 植田祥明, 三澤秀明, 古川翔大, 古賀崇了, 末竹規哲, 内野英治, “平滑化係数ヒストグラムを用いた RGB 色空間における色相保存かつ色域を保証したコントラスト強調法,” 信学論 (A), vol.J102-A, no.4, pp.152-163, April 2019.
- [3-8] Y. Ueda, H. Misawa, T. Koga, N. Suetake, and E. Uchino, “Hue-preserving color contrast enhancement method without gamut problem by using histogram specification,” 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.1123-1127, 2018.
- [3-9] 玉垣庸一, 宮崎紀郎, 小原康裕, “HSV カラーモデルとオストワルト表色系の類縁性: コンピュータグラフィックスにおける色立体(3),” デザイン学研究, vol.54, no.3, pp.9-18, 2007.
- [3-10] K. Inoue, K. Hara and K. Urahama, “On Hue-Preserving Saturation Enhancement in Color Image Enhancement,” IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E98-A, No.3, pp.927-931, March. 2015.
- [3-11] M. Nikolova and G. Steidl, “Fast ordering algorithm for exact histogram specification,” IEEE Trans. Image Process., vol.23, no.12, pp.5274-5283, 2014.
- [3-12] M. Nikolova and G. Steidl, “Fast hue and range preserving histogram specification: Theory and new algorithms for color image enhancement,” IEEE Trans. Image Process., vol.23, no.9, pp.4087-4100, 2014.

第4章 RGB 色空間と同一の色域をもつ HSI 色空間

4.1 概要

ヒトが見ることを前提にするカラー画像の強調では、画像処理の前後で色相成分を保存する必要がある。色相が変化すると、画像の色味が変わってしまうため、カラー画像の品質が低下する。色相を保存するため、カラー画像では多くの場合、従来の C-HSI 色空間(H:色相, S:彩度, I:明度) [4-1]等のヒトの色に対する3属性で表示される色空間で処理が行われる。C-HSI 色空間はヒトの色の3属性による表色系であるから、その利点を活かして領域検出[4-2], [4-3], センメンテーション[4-4], [4-5], 画像検索[4-6], 画像強調[4-7]-[4-9]等の研究が行われている。

しかしながら、C-HSI 色空間を初め、ヒトの3属性に基づく色空間は RGB 色空間よりも大きく(色域が大きく)、その色空間で処理した結果を表示等のために RGB 色空間に変換した場合、RGB 色空間外に飛び出す色域の問題が発生することが良くある。C-HSI 色空間の場合は 2.3 節で説明したように RGB 色空間の体積比で言えば 4.5 倍であり、C-HSI 色空間で明度/彩度を処理した場合、色域の問題が頻繁に発生する。一般的に、この問題はクリッピングまたは正規化によって解決している[4-10]。しかしながら、クリッピングは、色相を変化させてしまい、正規化では、明度の変更なされるため、画像強調においてはその処理の効果が低下する。

本章では、RGB 色空間と同じ色域を持つ新しい HSI 色空間を提案する。提案する HSI 色空間では、CMY (C:シアン, M:マゼンタ, Y:イエロー)色空間から新たな HSI 色空間を定義し、その HSI 色空間と C-HSI 色空間を色相と明度の条件によって切り替えることで、RGB 色空間と同じ色域を持つ新しい HSI 色空間が定義されることになる。

4.2 RGB 色空間と同一の色域を持つ HSI 色空間

本節では, RGB 色空間と同一の色域を持つ HSI 色空間を明らかにする. すなわち, RGB 色空間と新しい HSI 色空間の変換則を提案する.

提案する変換則では, CMY 色空間を利用する. 2.3 節で示した RGB 色空間と C-HSI 色空間の変換則において赤(R)をシアン(C)に, 緑(G)をマゼンタ(M)に青(B)をイエロー(Y)に置き換えて HSI 色空間を導出すれば図 4-1 の HSI 色空間が導出される. この HSI 色空間は C-HSI 色空間とポジネガ反転の関係になっている.

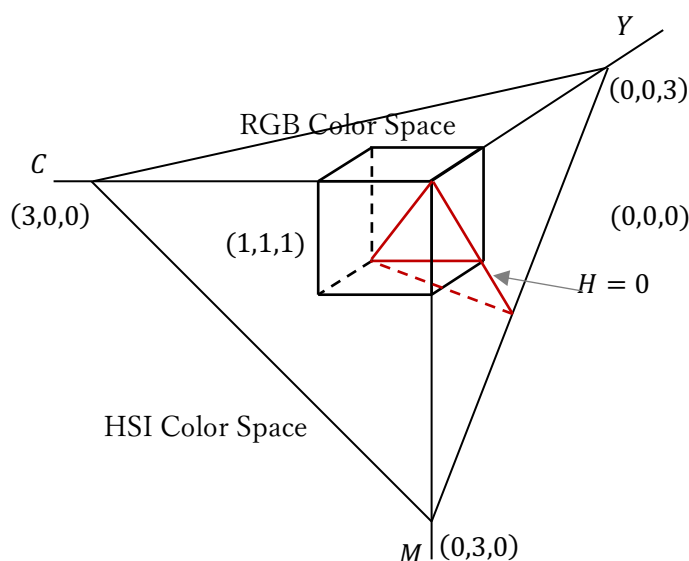


図 4-1 CMY 色空間から導出した HSI 色空間

RGB 色空間から変換された C-HSI 色空間の色相 0° の SI 平面(青線)を図 4-2 となり, さらに, CMY 色空間から変換した HSI 色空間における色相 $H = 0^\circ$ の SI 平面(赤線)を重ねたものが図 4-3 となる. 図 4-3 の青い三角形は, CMY 色空間から変換された C-HSI 色空間の SI 平面である. この図から明度が $0 \leq I \leq 1/3$ のときは RGB 色空間から変換した C-HSI 色空間, 明度が $1/3 < I < 1$ のときは CMY 色空間から導出した HSI 色空間を切り替えて用いることで, RGB 色空間の色相 $H = 0^\circ$ のときの SI 平面(黒い三角形)と一致する. すなわち, 色相 $H = 0^\circ$ の場合は明度 $I = 1/3$ を境に C-HSI 色空間と CMY 色空間から導いた HSI 色空間を切り替えればよい. 言い換えれば, 色相 $H = 0^\circ$ の時は明度が $0 \leq I \leq 1/3$ の範囲で RGB 色空間と C-HSI 色空間が一致しているため, その範囲で C-HSI 色空間を採用している. よって, 色相を変化させたとき RGB 色空間と C-HSI 色空間の一致する範囲がどのように変化するかを明らかにすればよい.

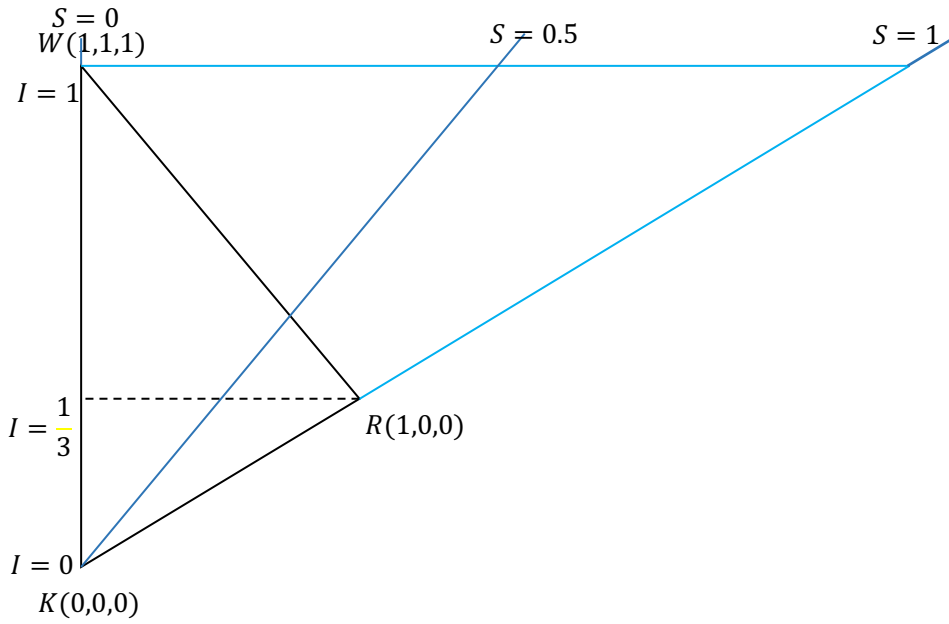


図 4-2 C-HSI 色空間の色相 0° の等色相 (SI) 平面

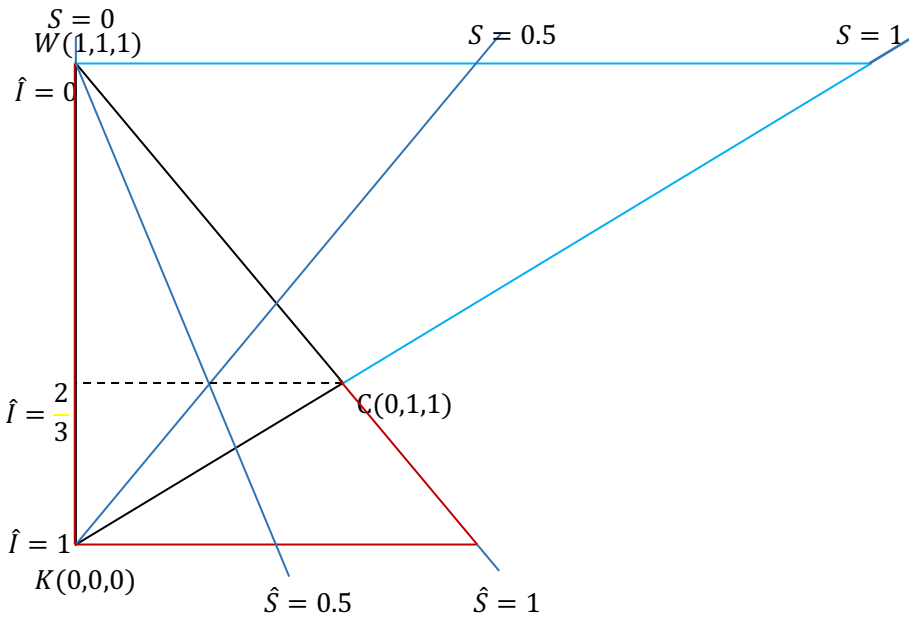


図 4-3 C-HSI 色空間の色相 0° の断面と CMY 色空間から変換した HSI 色空間の色相 0° の断面の関係

2.3 で説明したように色相は $0^\circ \sim 120^\circ$ の範囲にのみで検討すればよい。既に色相 $H = 0^\circ$ の C-HSI 色空間の SI 平面 (等色相平面) を図 4-2 に示し、明度 $I = 1/3$ までは RGB 色空間と C-HSI 色空間が一致することを示した。さらに、ここでは、色相 $H = 30^\circ$ と 60° の時の平面を図 4-4 に示す。この図から $H = 30^\circ$ の時は、 $I = 1/2$ 、 60° の時は、 $I = 2/3$ までは RGB 色空間と C-HSI 色空間が一致することが分かる。 $H =$

60° (= 180°, = 300°)の時, RGB 色空間と C-HSI 色空間の一致する範囲が最大になる.

全ての色相において RGB 色空間と C-HSI 色空間の一致する明度の境界値を示したものが図 4-5 である. 図 4-5 の赤線より下の領域の色相と明度の値の組み合わせにおいては RGB 色空間と C-HSI 色空間は一致している. 逆に, 赤線より上の領域の色相と明度の組み合わせにおいては RGB 色空間と CMY 色空間から導いた C-HSI 色空間が一致する. すなわち, 赤線が各色相における明度の切り替えの値を示している.

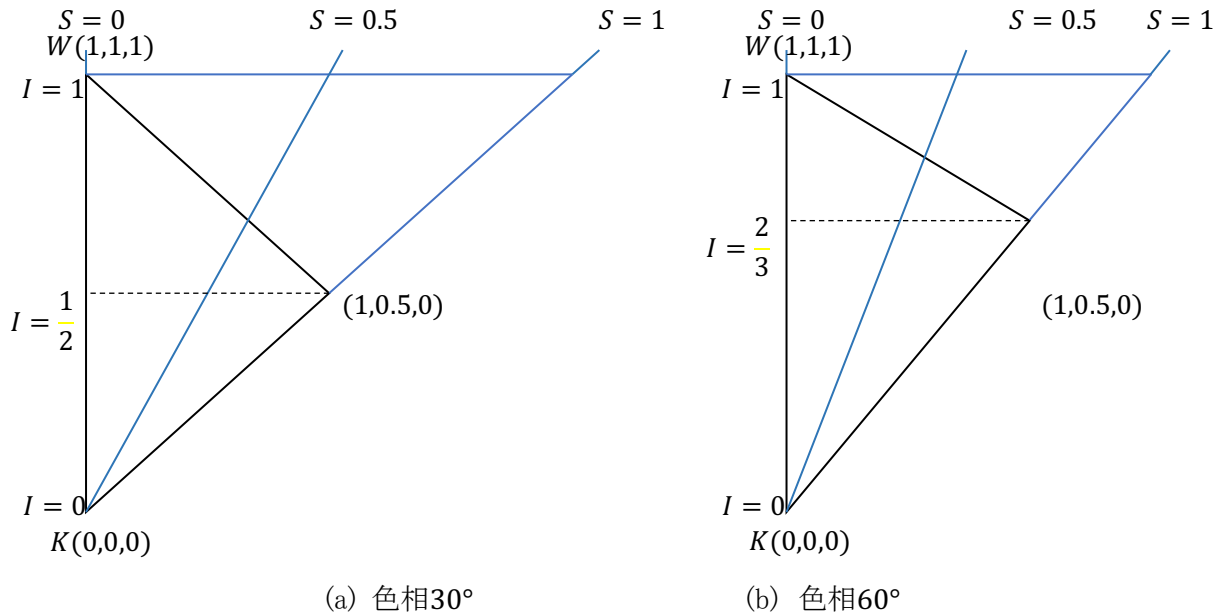


図 4-4 C-HSI 色空間の色相30°, 60°の等色相 (SI) 平面

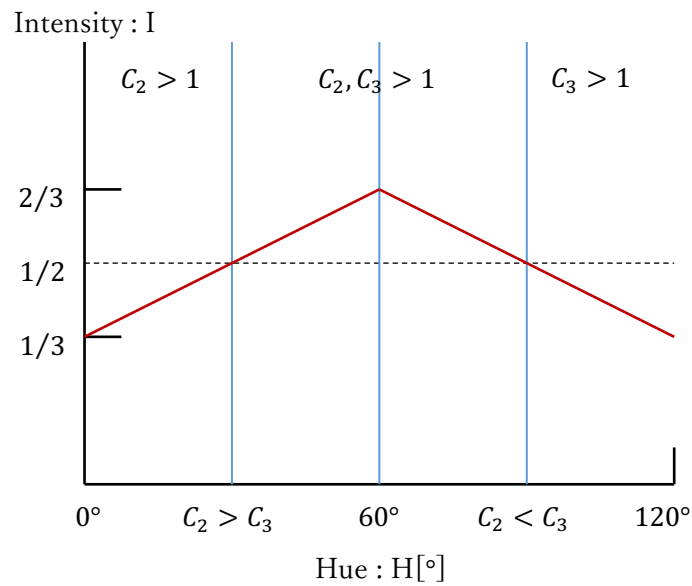


図 4-5 RGB 色空間と C-HSI 色空間が一致する条件

以上の検討から、C-HSI 色空間と CMY 色空間から導出した HSI 色空間を色相と明度の値によって切り替えることで RGB 色空間と色域が同じである HSI 色空間が定義される。具体的には、図 4-5 において赤線の境界の下の領域で C-HSI 色空間を上領域で CMY 色空間から導いた HSI 色空間を選択することであり、具体的な変換則を以下に示す。

4.2.1 RGB 色空間から新しい HSI 色空間への変換則

2つの HSI 色空間の明度は同一であり、式(2-1)により求める。

色相と彩度は図 4-5 の赤線を境界に 2つの HSI 色空間を切り替えることで求める。

$$\begin{aligned} \text{条件(A)} \quad & 0 \leq I \leq \left(\frac{\theta}{180} + \frac{1}{3}\right) : 0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ \\ & 0 \leq I \leq \left(-\frac{\theta}{180} + 1\right) : 60^\circ \leq \theta < 120^\circ \end{aligned}$$

条件(A)は C-HSI 色空間を用いる条件(図 4-4 の赤線の下の領域)であり色相は式(2-2),(2-3)、彩度は式(2-4)を用いて導出する。

$$\begin{aligned} \text{条件(B)} \quad & \left(\frac{\theta}{180} + \frac{1}{3}\right) < I \leq 1 : 0^\circ \leq \theta < 60^\circ \\ & \left(-\frac{\theta}{180} + 1\right) < I \leq 1 : 60^\circ \leq \theta < 120^\circ \end{aligned}$$

条件(B)は CMY 色空間から求めて HSI 色空間を用いる条件である。

色相は条件(A)同様であり、式(2-2),(2-3)で与えられる。

彩度は、CMY 成分($C = 1 - R$, $M = 1 - G$, $Y = 1 - B$)を使用して導出する。彩度の範囲は 0~1 である。

$$S = \hat{S} \tag{4-1}$$

$$\hat{S} = 1 - \frac{3}{(C + M + Y)} \{\min(C, M, Y)\} \tag{4-2}$$

(C, M, Y) = (0,0,0), (R, G, B) = (1,1,1)の場合、式(4-2)の分母は 0 になる。そのため、この場合の彩度を 0 と定義する。

4.2.2 HSI 色空間から RGB 色空間への変換則

次に提案する HSI 色空間から RGB 色空間への変換則を示す。

$$\begin{aligned} \text{条件(A)} \quad & 0 \leq I \leq \left(\frac{\theta}{180} + \frac{1}{3}\right) : 0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ \\ & 0 \leq I \leq \left(-\frac{\theta}{180} + 1\right) : 60^\circ \leq \theta < 120^\circ \end{aligned}$$

この場合、C-HSI 色空間と RGB 色空間が一致していることから C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換則である式(2-5)から式(2-7)を用いる。

$$\text{条件(B)} \quad \begin{cases} \left(\frac{\theta}{180} + \frac{1}{3}\right) < I \leq 1: 0^\circ \leq \theta < 60^\circ \\ \left(-\frac{\theta}{180} + 1\right) < I \leq 1: 60^\circ \leq \theta < 120^\circ \end{cases}$$

条件(B)の場合, CMY 色空間から導出された HSI 色空間を利用していることから, RGB 色空間の代わりに CMY 色空間を考える. CMY 色空間から変換された HSI 色空間は点(1,1,1)を原点と見なすため色相は 180° シフトする.

$$\hat{H} = \begin{cases} H + 180^\circ (0^\circ \leq \theta < 180^\circ) \\ H - 180^\circ (180^\circ \leq \theta < 360^\circ) \end{cases} \quad (4-3)$$

CMY 色空間から変換された HSI 色空間の彩度と明度は \hat{S} と \hat{I} を C-HSI 色空間の彩度 S と明度 I を用いて, 次のように与えられる.

$$\hat{S} = S \quad (4-4)$$

$$\hat{I} = 1 - I \quad (4-5)$$

C-HSI 色空間から RGB の成分を求める変換式を用いることで CMY 色空間から基づく HSI 色空間から CMY の成分を求めることができる. さらに, $R = 1 - C, G = 1 - M, B = 1 - Y$ の関係を用いることで RGB 成分が以下の通り導出される.

$$C_1 = 1 - \hat{I}(1 - \hat{S}) \quad (4-6)$$

$$C_2 = 1 - \hat{I} \left[1 + \frac{\hat{S} \cos \hat{H}}{\cos(60^\circ - \hat{H})} \right] \quad (4-7)$$

$$C_3 = 3I(C_1 + C_2) \quad (4-8)$$

ここで, C_1, C_2, C_3 の定義は表 2-2 と同じである.

4.3 第 4 章のまとめ

HSI 色空間はヒトの色覚の 3 属性である色相, 彩度, 明度による表色系である. そのため, ヒトを見ることを前提にしたカラー画像の強調, セグメンテーション, および認識に関する多くの応用は HSI 色空間で行われてきた. これまで明らかにされている C-HSI 色空間は RGB 色空間よりその色域が大きく, C-HSI 色空間で処理を行うとその処理結果が RGB 色空間外に飛び出してしまう, 色域問題が発生していた. その解決のためには RGB 色空間と色域を同じにする HSI 色空間が定義できれば良い.

本論文では, CMY 色空間から変換する HSI 色空間を与え, その HSI 色空間と C-HSI 色空間を併用することで RGB 色空間と同じ色域をもち HSI 色空間を明らかにした. そして, RGB 色空間と新しい HSI 色空間の変換則を明らかにした.

第 4 章の参考文献

- [4-1] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing 3rd ed., Pearson Education, 2008.
- [4-2] H.F. Hashem, “Adaptive technique for human face detection using HSV color space and neural networks,” Proc. National Radio Science Conference (NRSC 2009), pp.1-7, 2009.
- [4-3] L. Gao and X. Ling, “Color edge detection based on mathematical morphology in HSI space,” Proc. 2010 International Conference on Computer and Information Application, pp.5-8, 2010.
- [4-4] L.J. Ubong, S.T. Chee, and W.N. Giap, “A comparison of RGB and HSI color segmentation in real-time video images: A preliminary study on road sign detection,” Proc. International Symposium on Information Technology, pp.1-6, 2008.
- [4-5] J. Zengwei, C. Jiazhong, and Z. Jingli, “Image segmentation based on the HSI color space and an improved mean shift,” Proc. International Conference on Information and Communications Technologies (IETICT 2013), pp.135-140, 2013.
- [4-6] C.-H. Su, H.-S. Chiu, and T.-M. Hsieh, “An efficient image retrieval based on HSV color space,” Proc. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, pp.5746-5749, 2011.
- [4-7] M.-S. Shyu and J.-J. Leou, “A genetic algorithm approach to color image enhancement,” Pattern Recognition, vol.31, no.7, pp.871-880, July 1998.
- [4-8] A.R. Weeks, G.E. Hague, and H.R. Myle, “Histogram equalization of 24-bit color images in the color difference (C-Y) color space,” J. Electron. Imaging, vol.4, no.1, pp.15-22, 1995.
- [4-9] D. Yu, L.-H. Ma, and H.-Q. Lu, “Normalized SI correction for hue-preserving color image enhancement,” Proc. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp.1498-1503, 2007.
- [4-10] S.K. Naik and C.A. Murthy, “Hue-preserving color image enhancement without gamut problem,” IEEE Trans. Image Process., vol.12, no.12, pp.1591-1598, 2003

第5章 HSI 色空間から RGB 色空間への彩度補正を伴う変換方法

5.1 概要

ヒトを見ることを前提とするカラー画像処理においてはヒトの色の属性である色相, 彩度, 明度で表現される HSI 色空間による処理が不可欠であり, 代表的な HSI 色空間が C-HSI 色空間である[5-1]. C-HSI 色空間で種々のカラー画像処理の研究が行われている[5-2]-[5-9].

C-HSI 色空間の色域は RGB 色空間よりも大きい. 認識, 検索等の処理では RGB での色表現を HSI の色表現に変えることが目的であるから, 色域の相違は問題ではない. しかしながら, 画像強調等においては C-HSI 色空間での処理が伴い, 表示等のためにその結果を RGB 色空間に戻す必要があることから色域の問題が発生することになる.

C-HSI 色空間での処理において RGB 色空間に飛び出した信号に対して, C-HSI 色空間から RGB 色空間の変換時に彩度補正を行い飛び出した信号を RGB 色空間境界に移動させる方法が文献[5-10]で明らかにされた. この方法では明度値を保存するため C-HSI 空間で行った処理効果を保つことが可能となる. しかしながら, RGB 色空間外の信号は全て RGB 色空間の境界に移動するため境界に信号が集中することになる. すなわち, 文献[5-10]では理想的な値に彩度値が補正されていないことを意味する.

本章では, 新しい彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換法を提案する. この方法では, 第 4 章で明らかにした RGB 色空間と色域を同じとする HSI 色空間で処理を行った結果の彩度値と同様になるような彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換則を明らかにする.

5.2 C-HSI 色空間

既に C-HSI 色空間に関しては第 2 章で説明を行ったが, ここでは, RGB 色空間との関係と等色相平面における等彩度線について復習をしておく.

RGB 色空間と C-HSI 色空間の関係は図 2-4 に示されているように C-HSI 色空間は(1,1,1)で RGB 色空間に接する三角垂であり, その体積が RGB 色空間の 4.5 倍である. 体積が 4.5 倍になる原因は彩度の定義が不適切であることにある. 色相 $H = 0^\circ$ の時の等彩度線を図 5-1 に示す. 図 5-1 から明らかなように等彩度は明度軸が 0 であり(0,0,0)ともう一つの頂点を結ぶ辺の彩度が 1 となる. 等彩度線は原点(黒)から放射状になっていることが分かる. 彩度の定義が不適当であることから, C-HSI 色空間は明度が大きくなるとその空間が広がっていくことになる.

彩度の理想的な定義は図 5-2 に示す赤線が等彩度線である. すなわち, 明度軸を彩度 0 とし, 他の 2 辺

(RGB 色空間の境界)を 1 とするものである. この彩度の定義は第 4 章で説明した RGB 色空間と色域が同一の HSI 色空間の彩度の定義でもある. 本章では, C-HSI 色空間で処理を行った後, RGB 色空間に変換するとき, 理想的な彩度に補正する方法を伴った C-HSI 色空間から RGB 色空間の変換法を与えるものである.

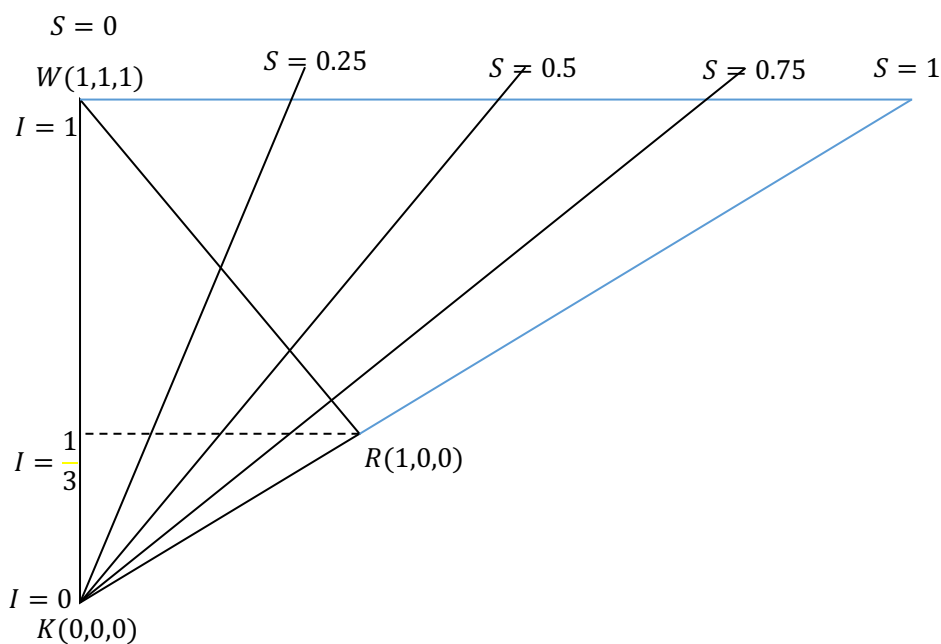


図 5-1 C-HSI 色空間の色相 $H=0^\circ$ における等彩度線

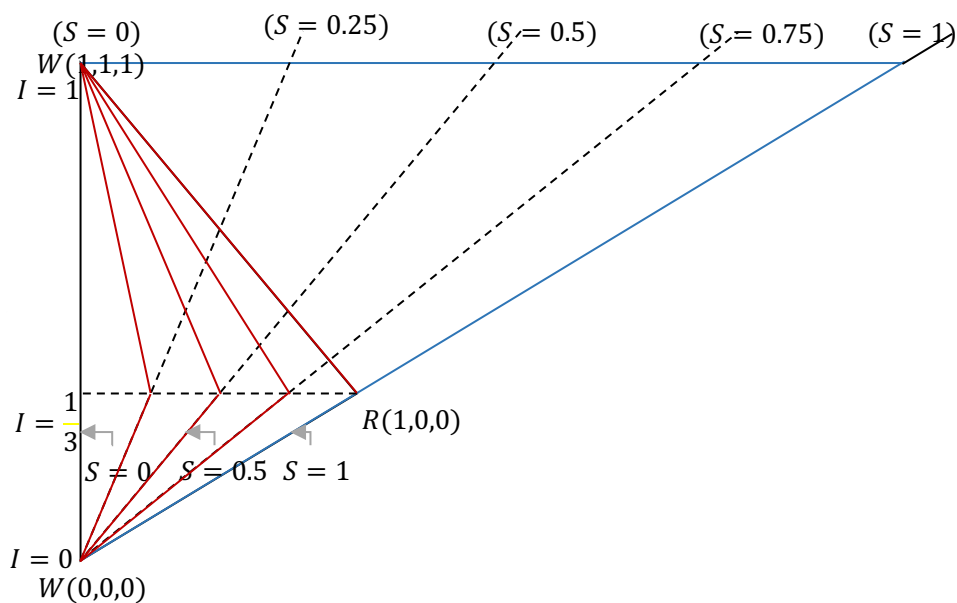


図 5-2 色相 $H = 0^\circ$ における理想的な等彩度線

5.3 彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への従来の変換法[5-10]の

問題点

文献[5-10]で明らかにされている方法は C-HSI 色空間での処理結果が RGB 色空間外に飛び出したときに限定し、その飛び出した信号の彩度を補正し、図 3-7 に示すように RGB 色空間の境界へ移動させるものである。図 5-2 には色相 $H = 0^\circ$ における C-HSI 色空間の等彩度線(青線)と理想的な等彩度線(赤線)と一緒に示している。この場合、RGB 色空間と C-HSI 色空間が共通するのは明度が $I \leq 1/3$ のときだけである。よって、理想的な等彩度線と C-HSI 色空間の等彩度線が一致するのは、明度が $I \leq 1/3$ のときのみである。明度が $I > 1/3$ のときは、C-HSI 色空間の処理結果が RGB 色空間を飛び出さない時でも彩度値は理想と異なることになる。

以上、纏めると、例えば、色相 $H = 0^\circ$ においては、C-HSI 色空間で処理結果の明度が $I > 1/3$ であったら RGB 色空間時に彩度補正を行う必要があり、さらに、理想的な彩度値への補正を行うことが要求される。

5.4 提案する彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換法

本節では C-HSI 色空間で処理結果を RGB 色空間へ変換する際に、理想的な彩度値になるような補正法を伴った C-HSI 色空間で処理結果を RGB 色空間への変換法を明らかにする。

C-HSI 色空間の処理結果が C-HSI 色空間と RGB 色空間の共通領域である場合は彩度補正が不要であるから、その場合は C-HSI 色空間と RGB 色空間の変換法を用いることができる。C-HSI 色空間と RGB 色空間の共通領域は明度と色相の値に依存していて、図 4-5 の赤線より下の明度と色相の値であれば RGB 色空間と C-HSI 色空間は一致している。図 4-5 の赤線は色相を変化させた時の等色相平面の黒(0,0,0)と白(1,1,1)を除く、もう一つの頂点の明度値の軌跡と捉えることができる。いま、もう一つの頂点の明度値を ε とする。

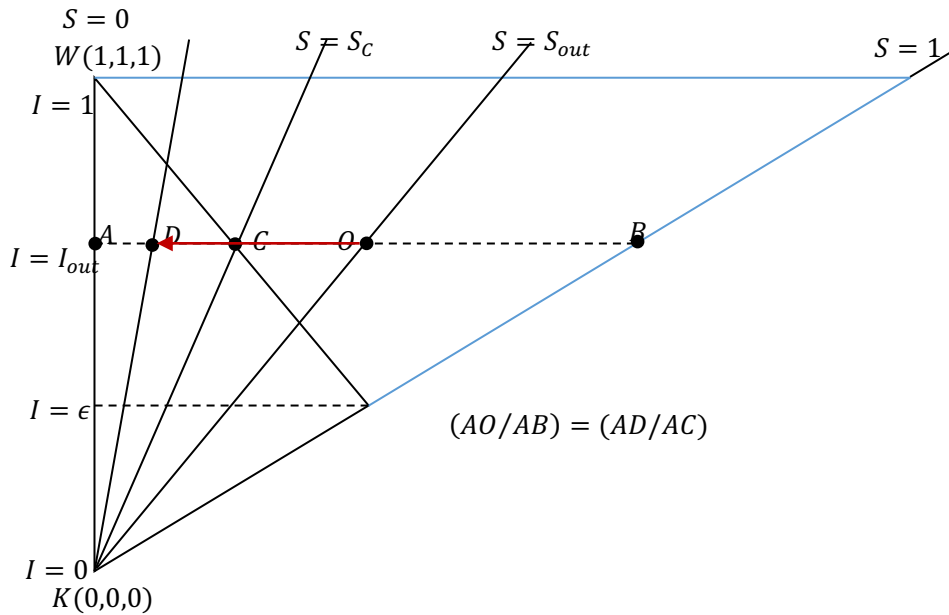


図 5-3 提案法における彩度補正の考え方

図 5-3 に提案法における彩度補正法の考え方を示した。点 O を C-HSI 色空間での画像処理結果とする。点 A と点 C を点 O と同じ明度を持つ等色相平面 (三角形) の边上の 2 点とする。理想的な彩度は $(0,0,0)$ と $(1,1,1)$ を結ぶ明度軸上の点は彩度 0 となり、残りの 2 边上の信号の彩度値は 1 となるため、点 C の彩度値は理想的な彩度では 1 となる。文献[5-10]の方法では点 O を点 C の移動させる方法を与えているが、点 C は点 O の補正結果として不適當である。適切な変換値は点 C ではなく図上の点 D となる。この点 D は、 $(AD/AC) = (AO/AB)$ の条件を満たす点である。 (AO/AB) は C-HSI 色空間の彩度値を示し、 (AD/AC) が理想的な彩度値を示す。提案する補正方法では、点 O が点 D に変換する方法となる。

点 D は $(AD/AC) = (AO/AB)$ の条件を満たす点である。ここで、AD は点 A と点 D の間の長さを示している。 (AO/AB) は C-HSI 色空間の彩度値を意味し、 (AD/AC) は I-HSI 色空間の同じ彩度値を意味する。理想的な彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換手順を以下に示す。

任意の等色相平面において明度が ϵ 以下の時、RGB 色空間と C-HSI 色空間が一致する。よって、C-HSI 色空間での処理結果におけり明度値 I_{out} が $I_{out} > \epsilon$ のとき彩度補正を伴う C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換が必要となる。

図 4-5 から、 ϵ は次のように求められる。

$$\epsilon = \begin{cases} \left(\frac{H}{180} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) : 0 \leq H < 60 \\ -\left(\frac{H}{180} \right) + 1 : 60 \leq H < 120 \end{cases} \quad (5-1)$$

(1) $0^\circ \leq H < 60^\circ$

(1-a) $I_{out} \leq \varepsilon$

C-HSI 色空間での処理結果の明度, 彩度の値をそれぞれ, I_{out} , S_{out} とする. 入力画像の色相を H_{in} とする場合, 当然, 色相には処理を加えないので色相値は不変である. 条件(1-a)の場合, C-HSI 色空間と RGB 色空間は一致しているので従来の C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換則をそのまま使うことができる. すなわち, 式(2-5), (2-6), (2-7)において C_1 , C_2 , C_3 は, $H = H_{in}$, $S = S_{out}$, $I = I_{out}$ とおくことで求められる.

(1-b) $I_{out} > \varepsilon$

図 5-3 における点 O の C-HSI 色空間における彩度値は (AO/AB) となる. 点 B が C-HSI 色空間における彩度値が 1 の直線上の点となっている. 理想の彩度の彩度値 1 を与える点が点 C である. その点 C の C-HSI 色空間における彩度値は $C_2 = 1$ ($0^\circ \leq H < 60^\circ$ においては $C_2 \geq C_3 > C_1$ が成立[5-10])となる彩度値であり, 以下の式で与えられる.

$$S_C = \frac{(1 - I_{out}) \cdot \cos(60^\circ - H)}{I_{out} \cdot \cos H} \quad (5-2)$$

理想の補正值である点Dは $(AD/AC) = (AO/AB)$ の条件を満たす点である. 点 B が C-HSI 色空間の彩度値が 1 の点であり, 点 C が理想の彩度では 1 となるため, 図 5-3 の点 D の彩度値は次のようになる.

$$S_D = S_{out} \cdot S_C \quad (5-3)$$

よって, 式(2-5), (2-6), (2-7)において, C_1 , C_2 , C_3 は, $H = H_{in}$, $S = S_D$, $I = I_{out}$ と設定することで得られる.

(2) $60^\circ \leq H < 120^\circ$

(2-a) $I_{out} \leq \varepsilon$

条件(2-a)の場合, C-HSI 色空間と RGB 色空間は一致しているので従来の C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換則をそのまま使うことができる. すなわち, 式(2-5), (2-6), (2-7)において C_1 , C_2 , C_3 は, $H = H_{in}$, $S = S_{out}$, $I = I_{out}$ とおくことで求められる.

(2-b) $I_{out} > \varepsilon$

この領域では, $C_3 \geq C_2 > C_1$ が満たされているから 図 5-3 の点 C は $C_3 = 1$ となる. 式(2-7)から, 点 C の彩度値は以下の式で与えられる.

$$S_C = \frac{(1 - I_{out}) \cdot \cos(60^\circ - H)}{I_{out} \cdot \{\cos(60^\circ - H) - \cos H\}} \quad (5-4)$$

よって, 理想的な彩度補正值は以下の式で求められる.

$$S_D = S_{out} \cdot S_C \quad (5-5)$$

そして、 C_1, C_2, C_3 は、 $H = H_{in}, S = S_D, I = I_{out}$ と置くことで式(2-5), (2-6), (2-7)から導出される。

5.5 適用結果

ここでは、C-HSI 色空間で明度成分と彩度成分に独立してヒストグラム平坦化を適用し、カラー画像を強調する。強調処理後、次の3つの方法を使用して、強調画像をC-HSI 色空間からRGB 色空間に変換する。

- (1) クリッピングを適用
- (2) 文献[5-10]の方法
- (3) 提案する方法

RGB 各8ビットの原画像をC-HSI 色空間で強調処理を行い、3つの方法でRGB 色空間へ変換した結果画像およびそれら画像のRGB色空間での信号分布を図5-4に示す。

例えば、男性と女性の顔の部分に注目すると分かるに、方法(1)の結果では色相のずれが生じている。文献[5-10] (方法(2))と提案する方法(方法(3))の強調結果は、コントラスト、彩度ともに優れている。提案する方法は文献[5-10]の方法と比較して自然な強調結果である。一方、文献 [5-10]の強調結果は特に顔の肌の色と床のカーペットの色が濃くなりすぎており、彩度値が大きくなりすぎていることが分かる。

図5-5に示すRGB 色空間における信号分布から、提案する方法が原画像の分布形状を保持していることがわかる。さらに、図5-6～図5-8に視点を変更した信号分布図を示す。図5-6～図5-8では、信号分布図の黄色で示された信号がRGB 色空間の境界に移動した信号である。方法(1)と(2)では、R成分が255の面に信号分布が集中していることが分かる。信号分布からも、提案する方法が適切な彩度補正を行っていることが理解される。

最後に、彩度の平均値と標準偏差を使用して評価する。彩度は、C-HSI 色空間における彩度値で評価する。表5-1に3つの方法でRGB 色空間に変換したカラー画像信号の彩度成分の平均値と標準偏差を示している。方法(1)は多くの信号がRGB 色空間の境界に分布しているため、他の2つの方法よりも平均値が大きく、標準偏差が小さくなっている。提案する方法(方法(3))では、RGB 色空間の境界に信号が分布することなく適切な彩度補正が行われていることから原画像とその平均値が近く、さらに、画像の信号形状を尊重した良好な強調結果を裏付けるように、標準偏差は大きくなっている。



(a) 原画像



(b) クリッピングを適用

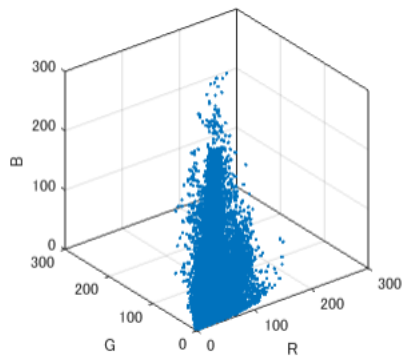


(c) 文献[5-10]の方法

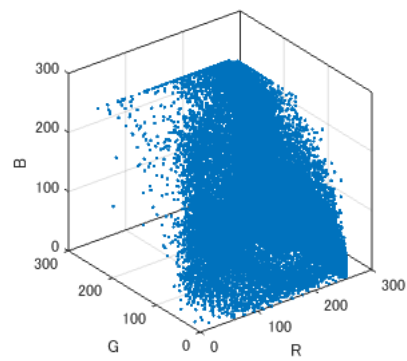


(b) 提案する方法

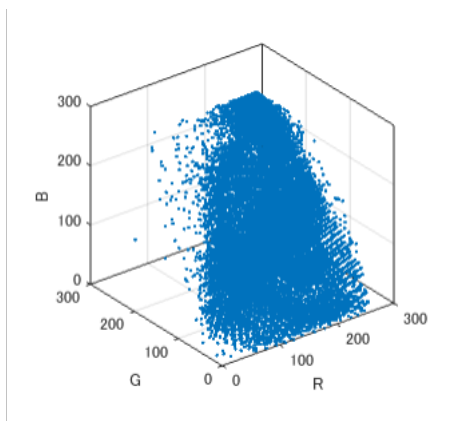
図 5-4 強調結果



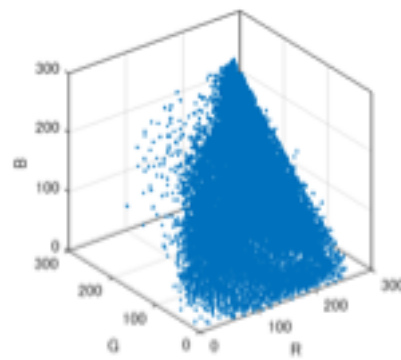
(a) 原画像



(b) クリッピングを適用



(c) 文献[5-10]の方法



(b) 提案する方法

図 5-5 適用結果

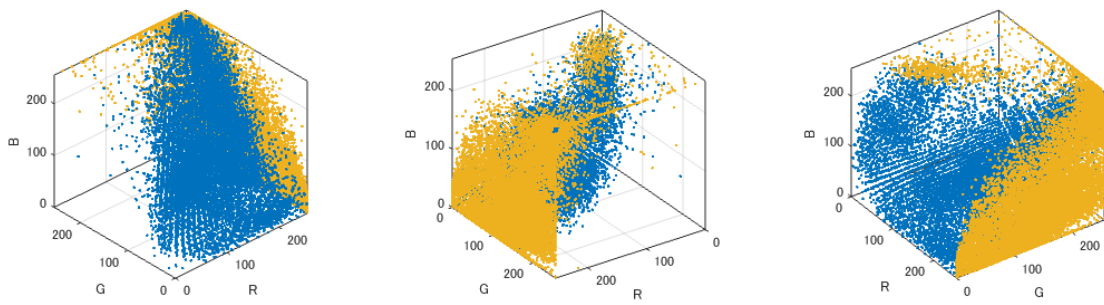


図 5-6 クリップングを適用した時の信号分布図

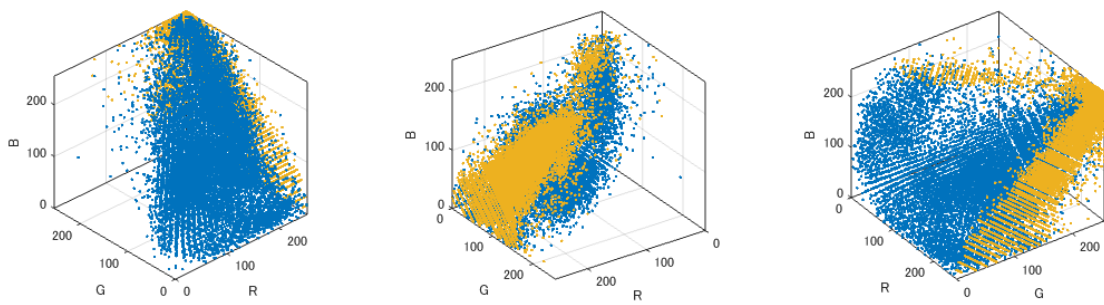


図 5-7 文献[5-10]の方法の信号分布図

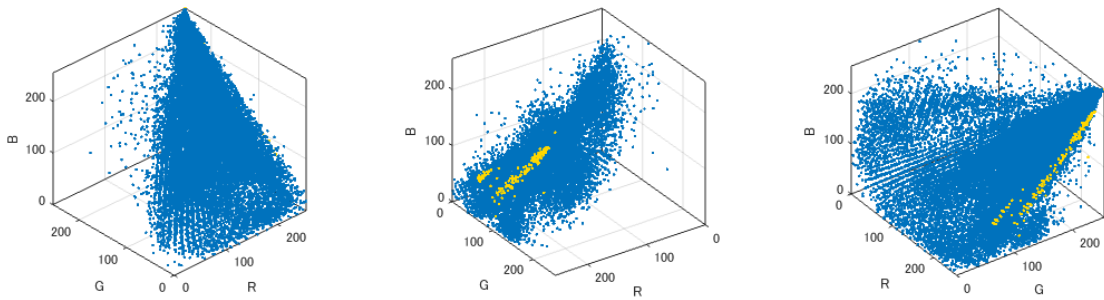


図 5-8 提案する方法の信号分布図

表 5-1 彩度の平均値と標準偏差

Image	平均	SD
原画像	0.321	0.039
(1) クリッピングを適用	0.478	0.069
(2) 文献[5-10]の方法	0.415	0.074
(3) 提案方法	0.361	0.082

5.6 第 5 章のまとめ

C-HSI 色空間で画像処理を行った後に RGB 色空間に変換するとしばしば色域の問題が発生する. これまでクリッピング, 正規化, そして文献[5-10]の方法により, RGB 色空間外に飛び出した信号を RGB 色空間に移動させてきた.

文献[5-10]の方法では, C-HSI 色空間での処理結果が RGB 色空間の外側にあると判断された場合, その信号を RGB 色空間の境界に変換するために彩度修正を行った. よって, この方法では RGB 色空間外に飛び出したすべての出力信号を RGB 色空間の境界に移動させることになり, 理想的な彩度補正が成されていないことが分かる.

本章では, C-HSI 色空間から彩度補正を伴う RGB 色空間への新しい変換方法を明らかにした. この提案する変換方法では, 彩度値は RGB 色空間と色域を同じにする HSI 色空間(第 4 章) で定義する彩度値と同一の値に変換される. 画像強調結果から, 提案する方法により自然な強調結果が得られることを示した.

第 5 章の参考文献

- [5-1] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital Image Processing 3rd ed., Pearson Education, 2008.
- [5-2] H.F. Hashem, “Adaptive technique for human face detection using HSV color space and neural networks,” Proc. National Radio Science Conference (NRSC 2009), pp.1-7, 2009.
- [5-3] L. Gao and X. Ling, “Color edge detection based on mathematical morphology in HSI space,” Proc. 2010 International Conference on Computer and Information Application, pp.5-8, 2010.
- [5-4] L.J. Ubong, S.T. Chee, and W.N. Giap, “A comparison of RGB and HSI color segmentation in real-time video images: A preliminary study on road sign detection,” Proc. International Symposium on Information Technology, pp.1-6, 2008.
- [5-5] J. Zengwei, C. Jiazhong, and Z. Jingli, “Image segmentation based on the HSI color space and an improved mean shift,” Proc. International Conference on Information and Communications Technologies (IETICT 2013), pp.135-140, 2013.
- [5-6] C.-H. Su, H.-S. Chiu, and T.-M. Hsieh, “An efficient image retrieval based on HSV color space,” Proc. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, pp.5746-5749, 2011.
- [5-7] M.-S. Shyu and J.-J. Leou, “A genetic algorithm approach to color image enhancement,” Pattern Recognition, vol.31, no.7, pp.871-880, July 1998.
- [5-8] A.R. Weeks, G.E. Hague, and H.R. Myle, “Histogram equalization of 24-bit color images in the color difference (C-Y) color space,” J. Electron. Imaging, vol.4, no.1, pp.15-22, 1995.
- [5-9] D. Yu, L.-H. Ma, and H.-Q. Lu, “Normalized SI correction for hue-preserving color image enhancement,” Proc. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp.1498-1503, 2007.
- [5-10] A. Taguchi and Y. Hoshi, “Color Image Enhancement in HSI Color Space without Gamut Problem”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E98-A, No.2, pp.792-795, Feb. 2015

第6章 RGB 色空間での明度と彩度に対する任意処理の実現

6.1 概要

既に、述べてきているように、ヒトが見ることを前提するカラー画像処理においては色相の保存が要求される。そこで、第4章、第5章においては、ヒトの色の3属性である色相、彩度、明度で色を教示する HSI 色空間に変換し、その変換領域で色相を保存して画像処理を行うことを前提とした研究を行った。しかしながら、最も一般的な HSI 色空間である C-HSI 色空間[6-1]は RGB 色空間の 4.5 倍の体積を持つことから色域の問題が発生していた。その色域の問題を解決するために、第4章では、RGB 色空間と色域を同一とする HSI 色空間を提案し、第5章では C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換の際に彩度補正を併用する方法を提案した。

本章では画像データの取得・表示系が RGB 色空間で行われることに着目し、処理系も取得・表示系と同様に RGB 色空間で行うことを考える。RGB 色空間におけるヒトを対象とするカラー画像処理においては色相を保存する拘束が必要となる。S.K.Naik らは、RGB 色空間で色相を保存できる処理形態を明らかにした[6-2]。その処理への拘束は RGB 各成分に対して同スケールリングとシフティングを行うことである。そして、S.K.Naik らは、この条件に基づいた処理結果が RGB 色空間であることを保証した処理形態を提案している。この処理形態は、濃淡画像に対する任意の階調値変換処理をカラー画像に適用可能であり、明度に対して所望の処理が可能である。しかしながら、彩度の対しては制御できず、明度に対する処理に付随してその出力値が決定してしまう。また、S.K.Naik らの処理形態では、処理後のカラー画像の彩度は処理前に比較して低下してしまう欠点がある。村平らは S.K.Naik らの処理形態における彩度低下の欠点を解消する処理形態を提案した[6-3]。また、その修正法が文献[6-4]-[6-6]において明らかにされている。しかしながら、これらの処理形態においても彩度は明度の処理に付随して決定してしまい彩度に対して所望の処理を施すことができない。

本章では、RGB 色空間上の処理において「色相と彩度を不変として明度のみを変換する処理形態」と「色相と明度を不変として彩度のみを変換する処理形態」を提案する。これら処理は独立であるから、2 つの処理を組み合わせることで、明度と彩度に対しても所望の処理を施すことが可能となる。彩度はカラー画像のカラフルネスを決定する要素であることから、例えば、コントラストが十分で明度に処理を施す必要のない画像に対してもコントラストは変えずカラフルネスを改善できることになる。なお、彩度は明度軸から色空間の境界までの相対的な距離で定義することも、絶対的な距離で定義することもできるため、2 つの場合に対して「彩度を変化させず明度のみを変換する手法」を明らかにする。

さらに、本章では、提案する処理形態での具体的なカラー画像強調法を提案する。その方法は、明度と彩度に対して独立に S 型階調値変換を施すものである。S 型階調値変換には 2 つのパラメータがあり、その調整によって多様な階調値変換を可能としている。そこで、コントラストとカラフルネスを評価する指標としてエントロピーを計算し、信号分布の広がり性を評価する。エントロピーから、明度と彩度に対する S 型階調値変換におけるパラメータ設定法を具体的に与える。さらに、適用例を通じて提案する強調法の有効性を明らかにする。

6.2 色相が保存される条件

ヒトのためのカラー画像処理において色相の保存は不可欠である。ここでは、まず、色相が保存できる RGB 色空間上での処理方法を明らかにする。

カラー画像における、入力信号の RGB 成分を (R_{in}, G_{in}, B_{in}) とし、出力信号を $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ とする。ここで、入力信号の RGB 各成分は $[0,1]$ に正規化されているものとする。

RGB 色空間上において、各成分に同じスカラー倍 (α 倍) と同じシフト処理 (シフト量 β) を施した場合、処理前後の色相は不変であることが知られている。

$$\begin{aligned} R_{out} &= \alpha \cdot R_{in} + \beta \\ G_{out} &= \alpha \cdot G_{in} + \beta \\ B_{out} &= \alpha \cdot B_{in} + \beta \end{aligned} \quad (6-1)$$

色相は RGB 成分を用いて

$$H = \begin{cases} \theta, & (B \leq G) \\ 360 - \theta, & (B > G) \end{cases} \quad (6-2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)]/2}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} \quad (6-3)$$

と定義されることから、 (R_{in}, G_{in}, B_{in}) と $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ の色相が同じであることが確認できる。RGB 色立体を白 $(1,1,1)$ から黒 $(0,0,0)$ に向かって見ると、図 6-1 のような正六角形になる。このとき、赤を色相の基準となる 0° とすれば緑は 120° 、青は 240° となり、式(6-2)、(6-3)の定義に沿ったものである。

また、CMY 色空間における処理においても、 $C = 1 - R, M = 1 - G, Y = 1 - B$ であるから、入出力信号に対する CMY 成分に

$$\begin{aligned} C_{out} &= \alpha \cdot C_{in} + \beta \\ M_{out} &= \alpha \cdot M_{in} + \beta \\ Y_{out} &= \alpha \cdot Y_{in} + \beta \end{aligned} \quad (6-4)$$

が成立すれば入出力信号の色相は変化しない。CMY 色空間においても、3 成分に対して同じスケールン

(α 倍)とシフティング(シフト量 β)を施しても色相は不変である。

図 6-3(a)に $H = 0^\circ$ (赤), 同図(b)に $H = 210^\circ$ (シアンと青の間)の 2 つの等色相平面を示す。正規化された RGB 色空間における等色相平面は黒(0,0,0)と白(1,1,1)と RGB 色空間の辺上の 1 点を結んだ三角形となる。白と黒以外の色立体の辺上の 1 点の色が色相を決定する。白と黒以外の頂点の明度値は色相に依存して決定される。

図 6-3 において図中の $K(0,0,0)$ と $W(1,1,1)$ を結んだ直線は明度軸であり, 彩度値は 0 である。一方, 等色相平面の明度軸以外の 2 つの辺の彩度値は 1 とすることで, 明度軸からの相対距離に基づく彩度が定義される。

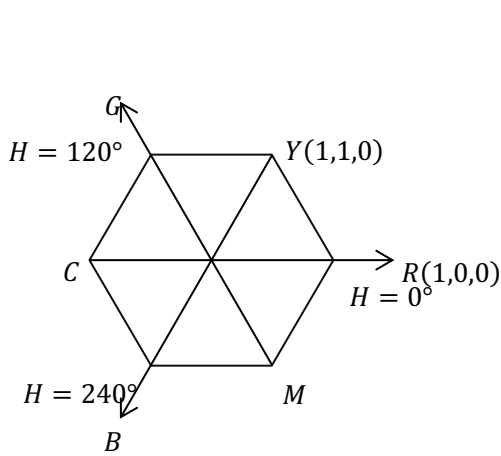


図 6-1 色相の角度

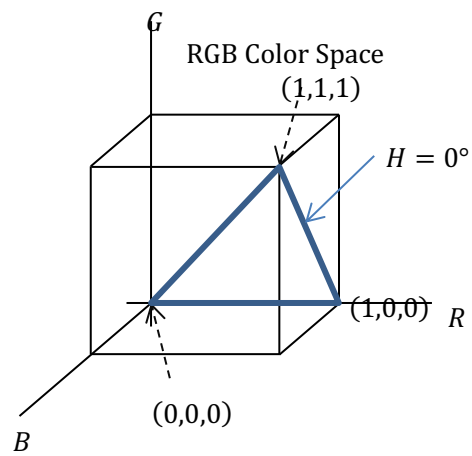
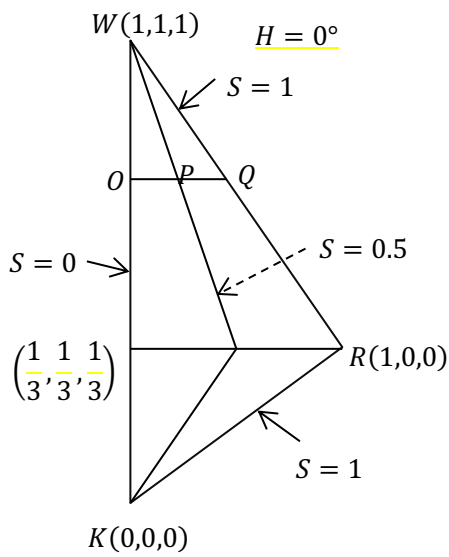
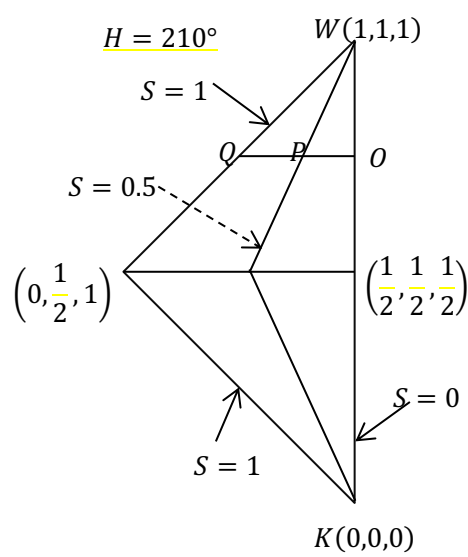


図 6-2 RGB 色空間



(a) $H = 0^\circ$



(b) $H = 210^\circ$

図 6-3 等色相平面

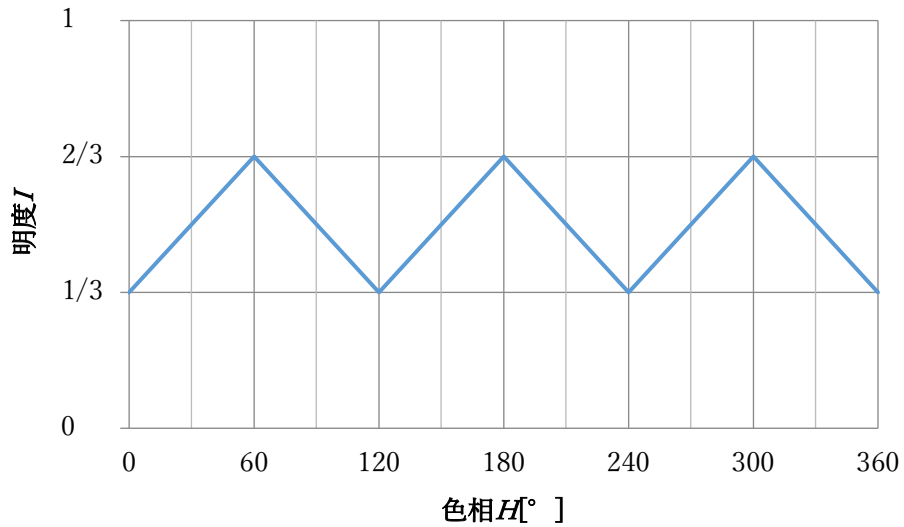


図 6-4 RGB 色空間と HSI 色空間の互換可能な明度の範囲

6.3 提案法

6.3.1 相対的距離で彩度を定義する場合の明度のみを変換する処理形態

RGB 色空間における等色相平面は三角形となるが、その三角形の 2 頂点は白(1,1,1)と黒(0,0,0)であり、もう一つの頂点の明度の値は色相に依存する。

提案する方法では入力信号がこの頂点を与える明度値より小さい場合は RGB 成分で、その値よりも大きな場合は CMY 成分で処理を行う。

式(6-2)、(6-3)で色相を求め、その色相値から図 6-4 を用いて求めた等色相平面の三角形の白、黒以外の頂点の明度値 ϵ を l_1 と $f(l_1)$ と比較することで、4 つの場合に分けて出力信号を算出する。

まず、RGB 色空間における入力信号を黒(0,0,0)と白(1,1,1)を結ぶ直線に投影することで、一次元信号を作成する。すなわち、入力信号の RGB 成分(R_{in}, G_{in}, B_{in})から一次元信号 l_1 を得る。

$$l_1 = \frac{R_{in} + G_{in} + B_{in}}{3} \quad (6-5)$$

濃淡画像に対する階調値変換関数を $f(\cdot)$ とする。このとき、 l_1 とその変換結果 $f(l_1)$ との比 α_1 を定義する。

$$\alpha_1 = \frac{f(l_1)}{l_1} \quad (6-6)$$

一次元信号 l_1 の変換結果 $f(l_1)$ から出力信号の RGB 成分($R_{out}, G_{out}, B_{out}$)の算出を α_1 が 1 以下か否かの 2 条件に分けて行う。

条件(1- α) $l_1 \leq \epsilon, f(l_1) \leq \epsilon$

この場合は, S.K.Naik らによる処理形態の条件(1)と同様の変換となる. $K(0,0,0)$ と (R_{in}, G_{in}, B_{in}) を結ぶ等彩度線上を移動させて $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ が得られる.

出力信号を $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ とすれば,

$$f(l_1) = \frac{(R_{out} + G_{out} + B_{out})}{3} \quad (6-7)$$

であり, 更に式(6-5), (6-6)から

$$f(l_1) = \alpha_1 \cdot \frac{(R_{in} + G_{in} + B_{in})}{3} \quad (6-8)$$

となる. よって,

$$\begin{aligned} R_{out} &= \alpha_1 \cdot R_{in} \\ G_{out} &= \alpha_1 \cdot G_{in} \\ B_{out} &= \alpha_1 \cdot B_{in} \end{aligned} \quad (6-9)$$

とすればよい.

式(6-9)は式(6-1)の条件を満たしているので, 処理前後の色相は保存される. 式(6-9)での処理は図 6-5(a)に示すように入力信号をその信号と点を結ぶ直線上を移動させることによって所望の明度値を得る. 彩度の値は明度の決定に付随して求まっている.

条件(1-β) $l_1 \leq \epsilon, f(l_1) \geq \epsilon$

この場合の一例を図 6-5(b)に示す. 点 A が入力信号であり点 C を出力信号とする. 点 A と点 C は同彩度(等彩度線上の 2 点)である. この場合は, 2 段階に分けて変換する.

まずは, $K(0,0,0)$ と (R_{in}, G_{in}, B_{in}) を結ぶ直線上を明度 ϵ の等明度線と交わるまで移動させ, その交点 $(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ を求める. ここで, l_1 と ϵ の比を β_1 とする.

$$\beta_1 = \frac{\epsilon}{l_1} \quad (6-10)$$

$(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ は式(6-9)と同様に, 次式で求まる.

$$\begin{aligned} \hat{R}_{in} &= \beta_1 \cdot R_{in} \\ \hat{G}_{in} &= \beta_1 \cdot G_{in} \\ \hat{B}_{in} &= \beta_1 \cdot B_{in} \end{aligned} \quad (6-11)$$

$(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ からは $(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ と白 $(1,1,1)$ を結ぶ等彩度線上を移動させる. そこで, CMY 成分に変換して処理を行う. ϵ と $f(l_1)$ から l_2 と $g(l_2)$ を求める.

$$\hat{l}_2 = 1 - \epsilon = \frac{\hat{C}_{in} + \hat{M}_{in} + \hat{Y}_{in}}{3} \quad (6-12)$$

$$g(l_2) = 1 - f(l_1) \quad (6-13)$$

\hat{l}_2 と $g(l_2)$ の比を $\hat{\alpha}_2$ とする.

$$\hat{\alpha}_2 = \frac{g(l_2)}{\hat{l}_2} \quad (6-14)$$

そして, $(C_{out}, M_{out}, Y_{out})$ は式(6-11)と同様に次式で求める.

$$\begin{aligned} C_{out} &= \hat{\alpha}_2 \cdot \hat{C}_{in} \\ M_{out} &= \hat{\alpha}_2 \cdot \hat{M}_{in} \\ Y_{out} &= \hat{\alpha}_2 \cdot \hat{Y}_{in} \end{aligned} \quad (6-15)$$

条件(2- α) $l_1 > \epsilon, f(l_1) < \epsilon$

この場合の一例を図 6-5(c)のに示す. この場合も $(1 - \beta)$ と同様に, 2 段階に分けて変換し出力信号を求める.

まずは, 白 $(1,1,1)$ と (R_{in}, G_{in}, B_{in}) を結ぶ直線上を移動させて等明度線 ϵ との交点を $(\hat{C}_{in}, \hat{M}_{in}, \hat{Y}_{in})$ とする. よって, CMY 色空間で信号の変換を考える必要がある. そこで, l_1 と ϵ から, l_2 と $\hat{g}(l_2)$ を求める.

$$l_2 = 1 - l_1 = \frac{C_{in} + M_{in} + Y_{in}}{3} \quad (6-16)$$

$$\hat{g}(l_2) = 1 - \epsilon \quad (6-17)$$

l_2 と $\hat{g}(l_2)$ の比を β_2 とする.

$$\beta_2 = \frac{\hat{g}(l_2)}{l_2} \quad (6-18)$$

$(\hat{C}_{in}, \hat{M}_{in}, \hat{Y}_{in})$ は式(6-11)と同様に次式で求まる.

$$\begin{aligned} \hat{C}_{in} &= \beta_2 \cdot C_{in} \\ \hat{M}_{in} &= \beta_2 \cdot M_{in} \\ \hat{Y}_{in} &= \beta_2 \cdot Y_{in} \end{aligned} \quad (6-19)$$

CMY 成分を RGB 成分に変換することで $(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ を得る. 次に, $(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ からは $(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ と黒 $(0,0,0)$ を結ぶ等彩度線上で信号を移動させる. まず, \hat{l}_1 を求め, \hat{l}_1 と $f(l_1)$ の比を $\hat{\alpha}_1$ とする.

$$\hat{l}_1 = \frac{\hat{R}_{in} + \hat{G}_{in} + \hat{B}_{in}}{3} \quad (6-20)$$

$$\hat{\alpha}_1 = \frac{f(l_1)}{\hat{l}_1} \quad (6-21)$$

式(6-15)と同様に $(\hat{R}_{in}, \hat{G}_{in}, \hat{B}_{in})$ と黒 $(0,0,0)$ を結ぶ等彩度線上を移動させることで $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ を次式で求める.

$$R_{out} = \hat{\alpha}_1 \cdot \hat{R}_{in} \quad (6-21)$$

$$G_{out} = \hat{\alpha}_1 \cdot \hat{G}_{in}$$

$$B_{out} = \hat{\alpha}_1 \cdot \hat{B}_{in}$$

条件(2-β) $l_1 > \epsilon, f(l_1) \geq \epsilon$

このときは, S.K.Naik らによる処理形態の条件(2)と同様の処理となる. すなわち, 白(1,1,1)と (R_{in}, G_{in}, B_{in}) を結ぶ等彩度線上を移動させる. 式(6-9)によって出力信号 $(C_{out}, M_{out}, Y_{out})$ を求めその出力信号を RGB 成分に変換することで $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ を得る.

条件(1-α)と同様に出力信号値の RGB 成分を求めると, $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ の最大値が 1 を超えて RGB 色空間の表示可能範囲を飛び出してしまうおそれがある. そこで, $C = 1 - R, M = 1 - G, Y = 1 - B$ の関係を用いて, 入力信号の RGB 成分を CMY 成分に変換する. そして, $f(l_1)$ に対応した出力信号の CMY 成分を求める.

ここで, l_1 と $f(l_1)$ から l_2 と $g(l_2)$ を次式で求める.

$$l_2 = 1 - l_1 = \frac{C_{in} + M_{in} + Y_{in}}{3} \quad (6-22)$$

$$g(l_2) = 1 - f(l_1) \quad (6-23)$$

そして, l_2 と $g(l_2)$ の比を α_2 とする.

$$\alpha_2 = \frac{g(l_2)}{l_2} \quad (6-24)$$

入力信号の CMY 成分に対して α_2 を乗じることで, $g(l_2)$ に対応した出力信号の CMY 各成分が求まる.

$$C_{out} = \alpha_2 \cdot C_{in}$$

$$M_{out} = \alpha_2 \cdot M_{in} \quad (6-25)$$

$$Y_{out} = \alpha_2 \cdot Y_{in}$$

式(6-25)は式(6-4)を満たす色相不変な処理である. そして, 求めた CMY 成分を $R = 1 - C, G = 1 - M, B = 1 - Y$ の関係を用いて RGB 成分に変換することで, 出力信号の RGB 成分 $(R_{out}, G_{out}, B_{out})$ が求まる.

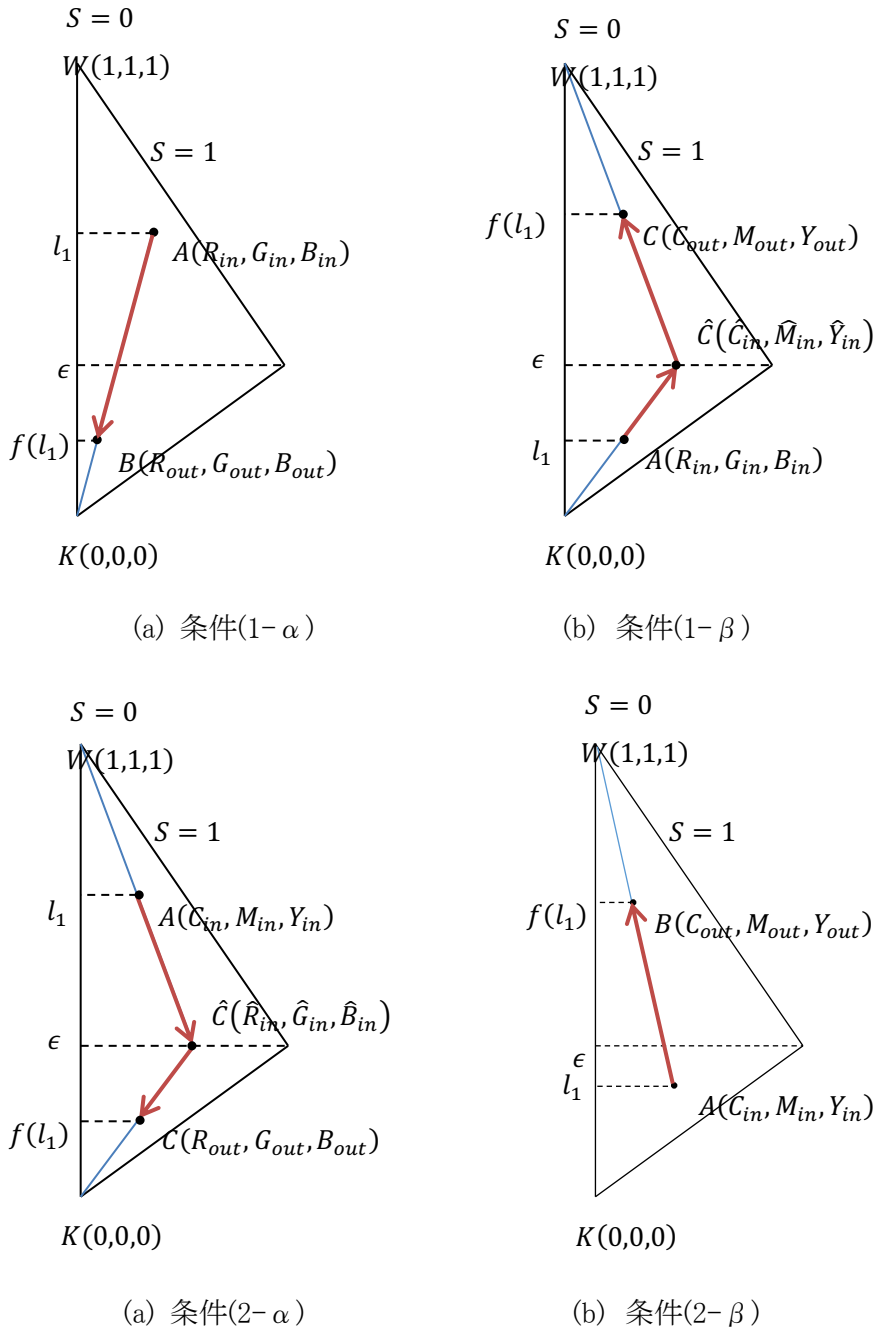


図 5 相対的な彩度定義の明度変換

6.3.2 絶対的距離で彩度を定義する場合の明度のみを変換する処理形態

6.3.1 では、相対的な距離で彩度を定義して等彩度線を与え、その線上で明度を変換する方法を明らかにした。一方、彩度はマンセル表色系やL*a*b*均等色空間では、明度軸からの絶対的な距離として彩度が定義される。ここでは、彩度を明度軸からの絶対的な距離として定義し、等彩度線を求め、その線上で明度を変換する方法を明らかにする。

図 6-6 に等色相平面とその平面上の絶対的な距離に基づく等彩度線の一例を青線で示した。明度軸か

ら絶対的な距離で彩度定義した場合の等彩度線は図 6-6 に青線で示す. 図 6-6 上では白(図中では W), 黒(図中では K)以外の 3 つ目の頂点を P としている. まず, 入力信号(点 A)と頂点 P の頂点の明度値を求める.

$$I_a = \frac{R_{in} + G_{in} + B_{in}}{3} \quad (6-26)$$

$$I_p = \frac{R_p + G_p + B_p}{3} \quad (6-27)$$

I_a が I_p より小さい場合と大きい場合に分けて出力信号を求める.

条件(1) $I_a < I_p$

この場合の一例を図 6-6(a)に示す. 入力信号を点 A, 出力信号を点 D とする.

I_a と I_p (図中では ϵ)を用いて, 入力信号の等明度線と明度軸以外の等色相平面の辺との交点を点 F とするとき, その RGB 成分は次式で求まる.

$$\begin{aligned} R_f &= \frac{I_a}{I_p} \cdot R_p \\ G_f &= \frac{I_a}{I_p} \cdot G_p \\ B_f &= \frac{I_a}{I_p} \cdot B_p \end{aligned} \quad (6-28)$$

点Fと点 A(入力信号)の明度軸上の点(I_a, I_a, I_a)とのそれぞれの距離 l_1 と l_2 を求める.

$$l_1 = \sqrt{(R_f - I_a)^2 + (G_f - I_a)^2 + (B_f - I_a)^2} \quad (6-29)$$

$$l_2 = \sqrt{(R_{in} - I_a)^2 + (G_{in} - I_a)^2 + (B_{in} - I_a)^2} \quad (6-30)$$

点Eを式(6-31)で求める.

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{l_2}{l_1} \cdot R_f \\ G_e &= \frac{l_2}{l_1} \cdot G_f \\ B_e &= \frac{l_2}{l_1} \cdot B_f \end{aligned} \quad (6-31)$$

出力信号(点 D)の明度値 I_d はベクトル信号 $KD=KA+\alpha AE$ の関係から,

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{R_{out} + G_{out} + B_{out}}{3} \\ &= \frac{[R_{in} + \alpha(R_{in} - R_e) + G_{in} + \alpha(G_{in} - G_e) + B_{in} + \alpha(B_{in} - B_e)]}{3} \end{aligned} \quad (6-32)$$

と与えられる。出力信号を求めるための α は以下のようになる。

$$\alpha = \frac{I_d - I_a}{I_a - I_e} \quad (6-33)$$

ここで、 I_e は点 E の明度値とする。

出力信号の RGB 成分は次式で導出される。

$$\begin{aligned} R_{out} &= R_{in} + \alpha(R_{in} - R_e) \\ G_{out} &= G_{in} + \alpha(G_{in} - G_e) \\ B_{out} &= B_{in} + \alpha(B_{in} - B_e) \end{aligned} \quad (6-34)$$

$\max(R_{out}, G_{out}, B_{out}) > 1$ のとき

出力信号の RGB 成分の最大値が 1 より大きい場合、RGB 色空間外に出力信号が飛び出してしまっている。そのため、RGB 色空間の境界面に移動させる処理を行い、出力信号を修正する。修正した出力信号を $(\hat{R}_{out}, \hat{G}_{out}, \hat{B}_{out})$ とする。

まず、出力信号の RGB 成分の最大値を式(6-35)で求める。

$$X_d = \max(R_{out}, G_{out}, B_{out}) \quad (6-35)$$

出力信号を等明度線に沿って境界面に移動させるための β を式(6-36)、(6-37)で求める。

$$X_d + \beta(I_d - X_d) = 1 \quad (6-36)$$

$$\beta = \frac{1 - X_d}{I_d - X_d} \quad (6-37)$$

修正された出力信号は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \hat{R}_{out} &= R_{out} + \beta(I_d - R_{out}) \\ \hat{G}_{out} &= G_{out} + \beta(I_d - G_{out}) \\ \hat{B}_{out} &= B_{out} + \beta(I_d - B_{out}) \end{aligned} \quad (6-38)$$

条件(2) $I_a \geq I_p$

この場合、条件(1)と条件(2)はポジネガの関係になっていることから、入力信号を RGB 成分から CMY 成分に変換して処理を行う。まず、入力信号と等色相平面の黒と白以外の頂点 P の明度値(ネガ)を求める。この場合の一例を図 6-6(b)に示す。

$$\bar{I}_a = 1 - I_a = \frac{C_{in} + M_{in} + Y_{in}}{3} \quad (6-39)$$

$$\bar{I}_p = 1 - I_p = \frac{C_p + M_p + Y_p}{3} \quad (6-40)$$

\bar{I}_a と \bar{I}_p を用いて、入力信号の等明度線と明度軸以外の等色相平面の辺の交点 F の CMY 成分を求める。

$$\begin{aligned}
C_f &= \frac{\bar{I}_a}{\bar{I}_p} \cdot C_p \\
M_f &= \frac{\bar{I}_a}{\bar{I}_p} \cdot M_p \\
Y_f &= \frac{\bar{I}_a}{\bar{I}_p} \cdot Y_p
\end{aligned} \tag{6-41}$$

点Fと明度軸上の $(\bar{I}_a, \bar{I}_a, \bar{I}_a)$ の距離 \bar{l}_1 と入力信号と明度軸上の $(\bar{I}_a, \bar{I}_a, \bar{I}_a)$ の距離 \bar{l}_2 を求める.

$$\bar{l}_1 = \sqrt{(C_f - \bar{I}_a)^2 + (M_f - \bar{I}_a)^2 + (Y_f - \bar{I}_a)^2} \tag{6-42}$$

$$\bar{l}_2 = \sqrt{(C_{in} - \bar{I}_a)^2 + (M_{in} - \bar{I}_a)^2 + (Y_{in} - \bar{I}_a)^2} \tag{6-43}$$

点Eの CMY 成分は \bar{l}_1 と \bar{l}_2 を用いて

$$\begin{aligned}
C_e &= \frac{\bar{l}_2}{\bar{l}_1} \cdot C_f \\
M_e &= \frac{\bar{l}_2}{\bar{l}_1} \cdot M_f \\
Y_e &= \frac{\bar{l}_2}{\bar{l}_1} \cdot Y_f
\end{aligned} \tag{6-44}$$

と求まる.

出力信号の明度値 \bar{I}_d は条件(1)の時と同様な考え方で求めるところができる.

$$\begin{aligned}
\bar{I}_d &= \frac{C_{out} + M_{out} + Y_{out}}{3} \\
&= \frac{[C_{in} + \bar{\alpha}(C_{in} - C_e) + M_{in} + \bar{\alpha}(M_{in} - M_e) + Y_{in} + \bar{\alpha}(Y_{in} - Y_e)]}{3}
\end{aligned} \tag{6-45}$$

ここで、 $\bar{\alpha}$ は以下のようになる.

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{I}_d - \bar{I}_a}{\bar{I}_a - \bar{I}_e} \tag{6-46}$$

よって、出力信号の CMY 成分は式(6-47)から以下のように求められる.

$$\begin{aligned}
C_{out} &= C_{in} + \bar{\alpha}(C_{in} - C_e) \\
M_{out} &= M_{in} + \bar{\alpha}(M_{in} - M_e) \\
Y_{out} &= Y_{in} + \bar{\alpha}(Y_{in} - Y_e)
\end{aligned} \tag{6-47}$$

$\max(C_{out}, M_{out}, Y_{out}) > 1$ のとき

この場合も条件(1)と同様に、RGB 色空間の外側に飛び出した場合、出力信号に修正を加える必要がある.

まず、出力信号の CMY 成分の最大値を求める.

$$\bar{X}_d = \max(C_{out}, M_{out}, Y_{out}) \quad (6-48)$$

次に、出力信号を等明度線に沿ってRGB色空間の境界まで移動させる。

$$\bar{X}_d + \bar{\beta}(\bar{I}_d - \bar{X}_d) = 1 \quad (6-49)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1 - \bar{X}_d}{\bar{I}_d - \bar{X}_d} \quad (6-50)$$

修正された出力信号は次式となる。

$$\begin{aligned} \hat{C}_{out} &= C_{out} + \beta(\bar{I}_d - C_{out}) \\ \hat{M}_{out} &= M_{out} + \beta(\bar{I}_d - M_{out}) \\ \hat{Y}_{out} &= Y_{out} + \beta(\bar{I}_d - Y_{out}) \end{aligned} \quad (6-51)$$

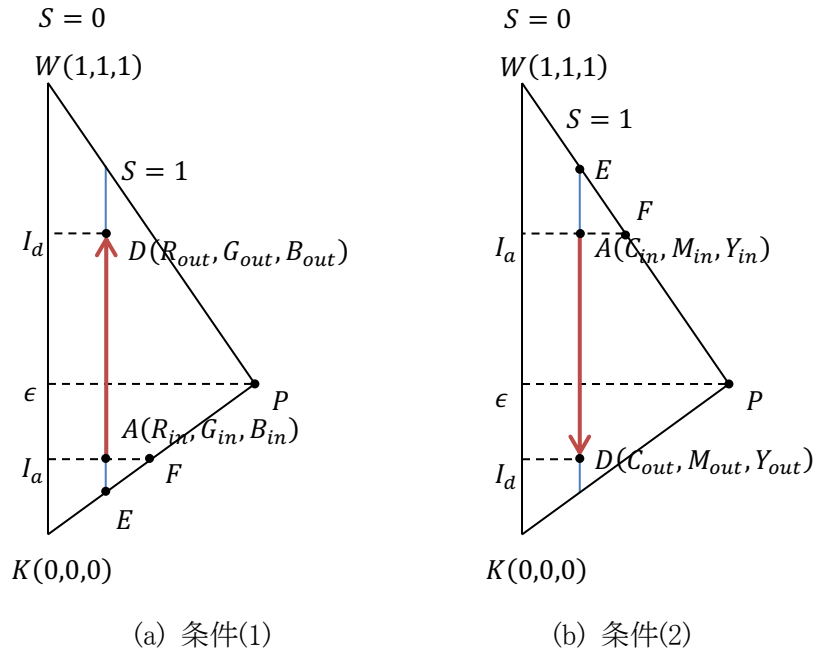


図6 絶対的な距離で定義した明度変換

6.3.3 彩度を変換する処理形態

6.3.1, 6.3.2 では, 色相と彩度を保存して明度のみ変換する処理形態を RGB 色空間上で与えた. 明度に処理を施すことで, カラー画像のコントラスト向上(強調)が可能であるが, カラフルネス(色彩感)の向上は期待できない. カラー画像のカラフルネスの強調のためには彩度への処理が必要となる. ここでは, 色相と明度を保存して彩度のみを階調値変換関数を用いて変換する処理形態を明らかにする.

まず, カラー画像の入力信号(R_{in}, G_{in}, B_{in})における明度を求める.

$$I_{in} = \frac{R_{in} + G_{in} + B_{in}}{3} \quad (6-52)$$

式(6-2), (6-3)を用いて入力信号の色相を求め, その色相値から図 6-4 を用いて等色相平面の白と黒以外の頂点の明度値 ϵ を導き, その ϵ と I_{in} を比較することで, 2 つの場合に分けて出力信号を求める.

条件(1) $I_{in} \leq \epsilon$

入力信号の RGB 成分の最小値を求める.

$$X_{in} = \min(R_{in}, G_{in}, B_{in}) \quad (6-53)$$

例えば, 図 6-7 の点A(R_{in}, G_{in}, B_{in})の彩度を明度からの相対距離で求めると,

$$S_{in} = 1 - \frac{\min(R_{in}, G_{in}, B_{in})}{I_{in}} \quad (6-54)$$

と求めることができる. S_{in} を所望する階調値変換関数を用いて変換させた結果である S_{out} を求める. 入出力において3成分のうちの最小の成分は不変であるため, S_{out} は出力信号の RGB 成分を用いて次式のように与えられる.

$$S_{out} = 1 - \frac{\min(R_{out}, G_{out}, B_{out})}{I_{in}} = 1 - \frac{X_{out}}{I_{in}} \quad (6-55)$$

ここで, 出力信号を($R_{out}, G_{out}, B_{out}$)としている. S_{out} は図 6-7 から明らかなように, ベクトル信号で考えると $\mathbf{KG} = \mathbf{KA} + \alpha\mathbf{HA}$ と求まる. 入出力で最小の成分は同一であるから

$$X_{out} = X_{in} + \alpha(X_{in} - I_{in}) \quad (6-56)$$

となる. 式(6-55)に式(6-56)を代入し, α について解くと,

$$\alpha = \frac{I_{in}(1 - S_{out}) - X_{in}}{X_{in} - I_{in}} \quad (6-57)$$

と求まる. よって, 出力信号は次式で得られる.

$$\begin{aligned} R_{out} &= R_{in} + \alpha(R_{in} - I_{in}) \\ G_{out} &= G_{in} + \alpha(G_{in} - I_{in}) \\ B_{out} &= B_{in} + \alpha(B_{in} - I_{in}) \end{aligned} \quad (6-58)$$

条件(2) $I_{in} > \epsilon$

I_{in} から, CMY 成分に対応した \bar{I}_{in} を求める.

$$\bar{I}_{in} = \frac{C_{in} + M_{in} + Y_{in}}{3} = 1 - I_{in} \quad (6-59)$$

$$\bar{X}_{in} = \min(C_{in}, M_{in}, Y_{in}) \quad (6-60)$$

$$\bar{S}_{in} = 1 - \frac{\min(C_{in}, M_{in}, Y_{in})}{\bar{I}_{in}} \quad (6-61)$$

\bar{S}_{in} を所望の階調値変換関数を用いて変換させた結は \bar{S}_{out} である. \bar{S}_{out} には,

$$\bar{S}_{out} = 1 - \frac{\min(C_{out}, M_{out}, Y_{out})}{\bar{I}_{in}} = 1 - \frac{\bar{X}_{out}}{\bar{I}_{in}} = 1 - \frac{\bar{X}_{in} + \bar{\alpha}(\bar{X}_{in} - \bar{I}_{in})}{\bar{I}_{in}} \quad (6-62)$$

の関係が成立することから, $\bar{\alpha}$ は以下のように求まる.

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{I}_{in}(1 - \bar{S}_{out}) - \bar{X}_{in}}{\bar{X}_{in} - \bar{I}_{in}} \quad (6-63)$$

式(6-58)と同様にして出力信号の CMY 成分は次式で求まる.

$$\begin{aligned} C_{out} &= C_{in} + \bar{\alpha}(C_{in} - \bar{I}_{in}) \\ M_{out} &= M_{in} + \bar{\alpha}(M_{in} - \bar{I}_{in}) \\ Y_{out} &= Y_{in} + \bar{\alpha}(Y_{in} - \bar{I}_{in}) \end{aligned} \quad (6-64)$$

求まった CMY 成分を RGB 成分に変換することで出力信号が得られる.

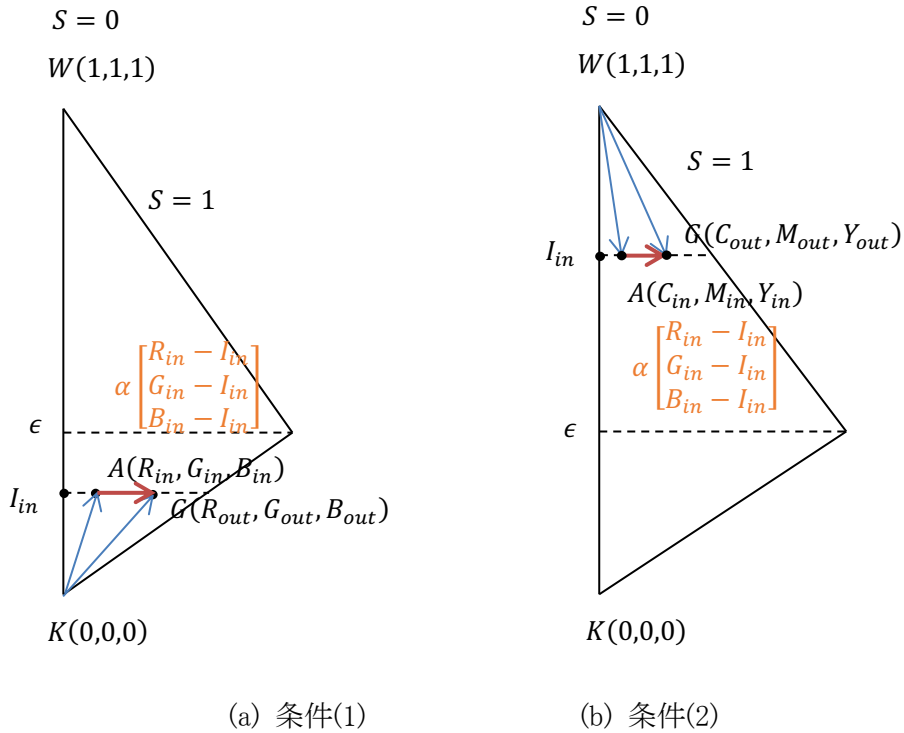


図 6-7 彩度を変換する処理形態

6.4 適用例

6.4.1 相対的距離で彩度を定義した明度の強調処理と彩度強調処理

本論文で提案した相対的距離で彩度を定義した時の明度に対する処理形態と彩度に対する処理形態において、具体的な強調手法を明らかにする。

画像強調のための階調値変換関数として S 型変換を用いる。S 型変換は、

$$f_{m,n}(x) = \begin{cases} \delta_1 + (m - \delta_1) \left(\frac{x - \delta_1}{m - \delta_1} \right)^n, & (\delta_1 \leq x \leq m) \\ \delta_2 - (\delta_2 - m) \left(\frac{\delta_2 - x}{\delta_2 - m} \right)^n, & (m \leq x \leq \delta_2) \end{cases} \quad (6-65)$$

で与えられる。 δ_1 と δ_2 は x の最小値、最大値を意味し、 m が S 型変換の変曲点となる。 n を 1 より大きく設定すると、 x の分布は m の方向へ移動し、 n を 1 より小さく設定すると、 x の分布は最大値、最小値の方向へ移動する。この S 型変換を明度の処理と彩度の処理それぞれに適用する。明度変換と彩度変換に対する S 型変換の 2 つのパラメータをそれぞれ (m_I, n_I) 、 (m_S, n_S) とする。

コントラストとカラフルネスの評価は信号分布の広がりを用いて行うことができる。コントラストは明度分布の広がり进行评估すれば良く、その評価に明度に対するエントロピーを用いる。明度に対するエントロピー P_I は、

$$P_I = - \sum_{k=0}^{255} \frac{I(k)}{N} \log_2 \frac{I(k)}{N} \quad (6-66)$$

で与えられる。

また、コントラストとカラフルネスを合わせた評価を信号の RGB 色空間上の広がりで評価する。本来は 3 次元色空間でのエントロピーで評価すべきであるが、そのエントロピー計算のコストが莫大である。そこで、RGB 色空間での信号分布を RG 平面、GB 平面、BR 平面へ投影したときの、2 次元色空間における 3 つのエントロピー P_{RG} 、 P_{GB} 、 P_{BR} を求めて、その和である $P_{RGB} = P_{RG} + P_{GB} + P_{BR}$ を用いて色空間上で信号分布の広がり进行评估する。 P_{RG} 、 P_{GB} 、 P_{BR} は以下のように求める。

$$P_{RG} = - \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} \frac{RG(i,j)}{N} \log_2 \frac{RG(i,j)}{N} \quad (6-67)$$

$$P_{GB} = - \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} \frac{GB(i,j)}{N} \log_2 \frac{GB(i,j)}{N} \quad (6-68)$$

$$P_{BR} = - \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} \frac{BR(i,j)}{N} \log_2 \frac{BR(i,j)}{N} \quad (6-69)$$

ここで、 P_{RG} 、 P_{GB} 、 P_{BR} はそれぞれ、RG 平面、GB 平面、BR 平面のヒストグラムを示している。

適用例に用いるカラー画像は図 6-8(a)~11(a)に示す, Balloon, Couple, Airplane, Aerial である. 画像のサイズは, 256×256 で RGB 各 8 ビットである.



図 6-8 Balloon の強調結果

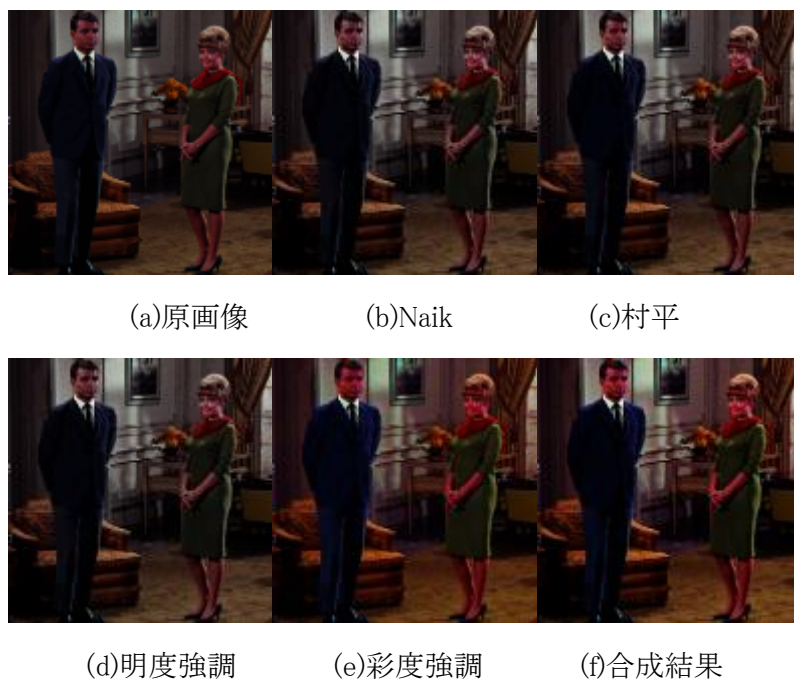


図 6-9 Couple の強調結果

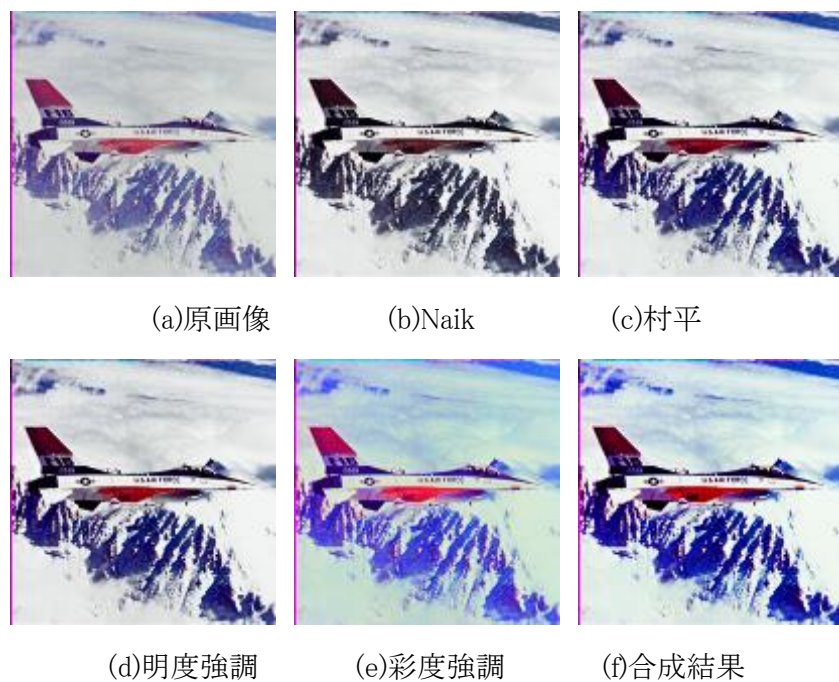


図 6-10 Airplane の強調結果

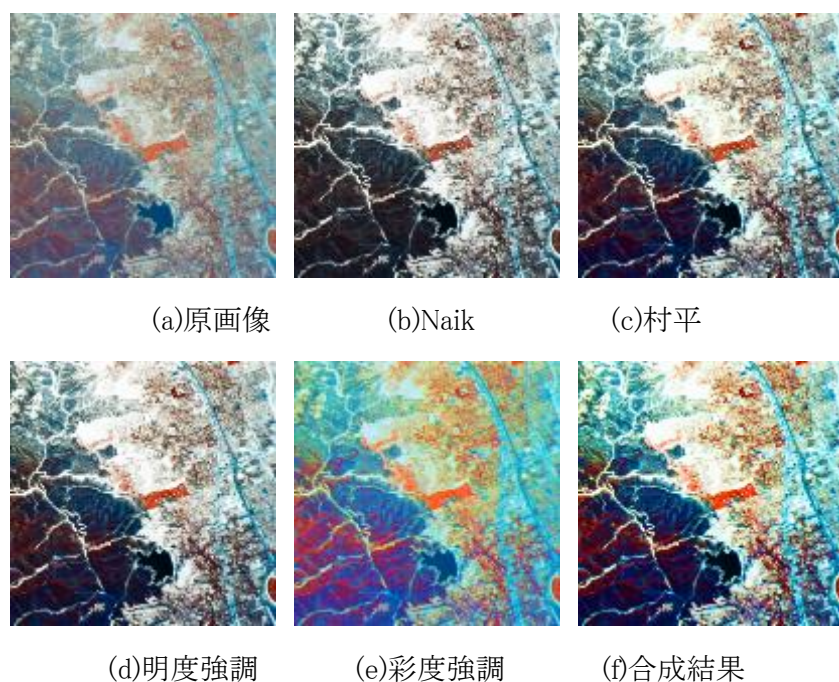


図 6-11 Aerial の強調結果

図 6-8～図 6-11 までの各図(b)に S.K.Naik らの処理結果, 各図(c)に村平らの処理結果, 各図(d)に提案法における明度のみの強調結果, 各図(e)に提案法の彩度のみの強調結果, 各図(f)に明度強調と彩度強調を組み合わせた結果を示した。

S.K.Naik らの処理形態による強調結果では, 彩度の低下がみられる。しかしながら, 提案法では明度強

調によってコントラスト, 彩度強調によってカラフルネスが向上していることが分かる. 例えば, Balloon の処理結果から明らかなように, 明度の処理のみではカラフルネスが不足し, 彩度の処理のみではコントラストが不十分である. 2 つの処理を合成した結果はすべての画像に対してコントラストとカラフルネス共に, 良好な結果である.

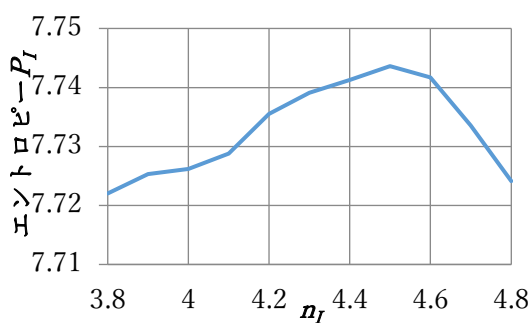
次に, 表 6-1, 表 6-2 に明度のエントロピーと空間分布エントロピーを示す. また, 明度のみを強調させる処理においてを変化させたときのエントロピーの変化を図 6-12~図 6-15 の(a)に, 彩度のみを強調させる処理においてを変化させたときのエントロピーの変換を図 6-12~6-15 の(b)に示す.

表 6-1 明度エントロピー

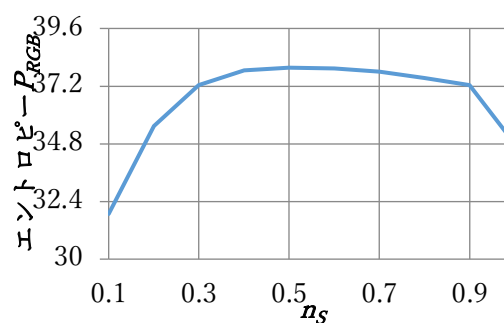
	原画像	S.K.Naikら	村平ら	提案法
Balloon	6.599	7.747	7.745	7.743
Couple	6.424	6.503	6.500	6.509
Airplane	6.624	7.082	7.072	7.080
Aerial	7.140	7.856	7.823	7.861

表 6-2 空間分布エントロピー

	原画像	S.K.Naikら	村平ら	提案法
Balloon	34.8	35.6	38.0	38.0
Couple	31.7	32.4	32.5	33.4
Airplane	32.0	31.0	33.0	33.4
Aerial	40.1	38.9	41.5	41.8

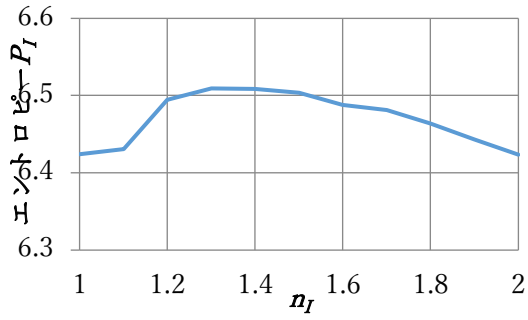


(a)明度

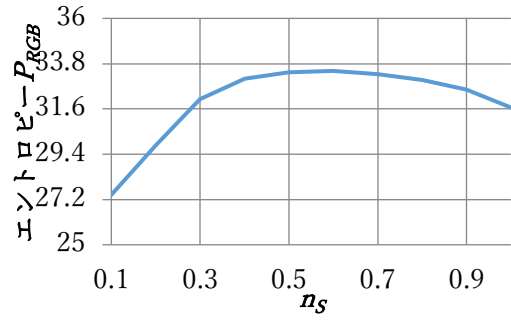


(b)空間分布

図 6-12 Balloon のエントロピー

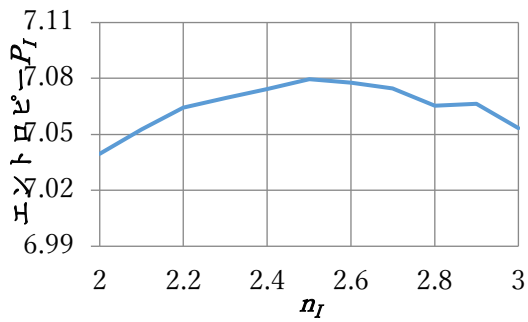


(a) 明度

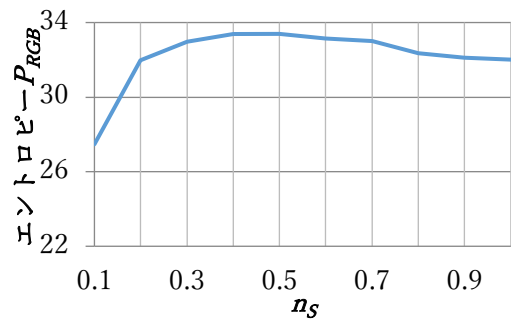


(b) 空間分布

図 6-13 Couple のエントロピー

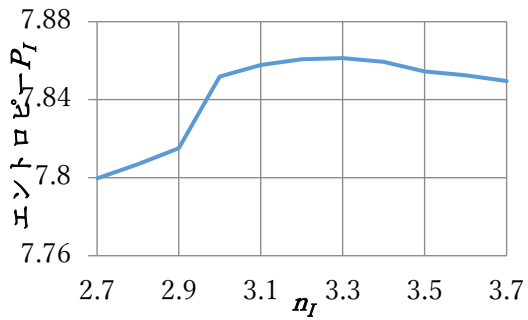


(a) 明度

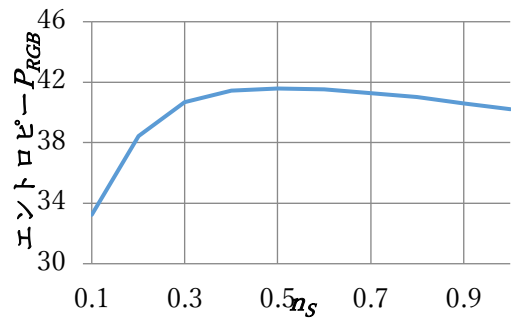


(b) 空間分布

図 6-14 Airplane のエントロピー



(a) 明度



(b) 空間分布

図 6-15 Aerial のエントロピー

表 6-3 に各画像の S 型階調値変換のパラメータを示す.

表 6-3 S 型変換のパラメータ

	m_I	n_I	m_S	n_S
Balloon	140	4.5	127	0.5
Couple	33	1.3	127	0.6
Airplane	183	2.5	127	0.5
Aerial	143	3.3	127	0.5

次に, RGB 色空間における信号分布を図 6-16~図 6-19 に示す.

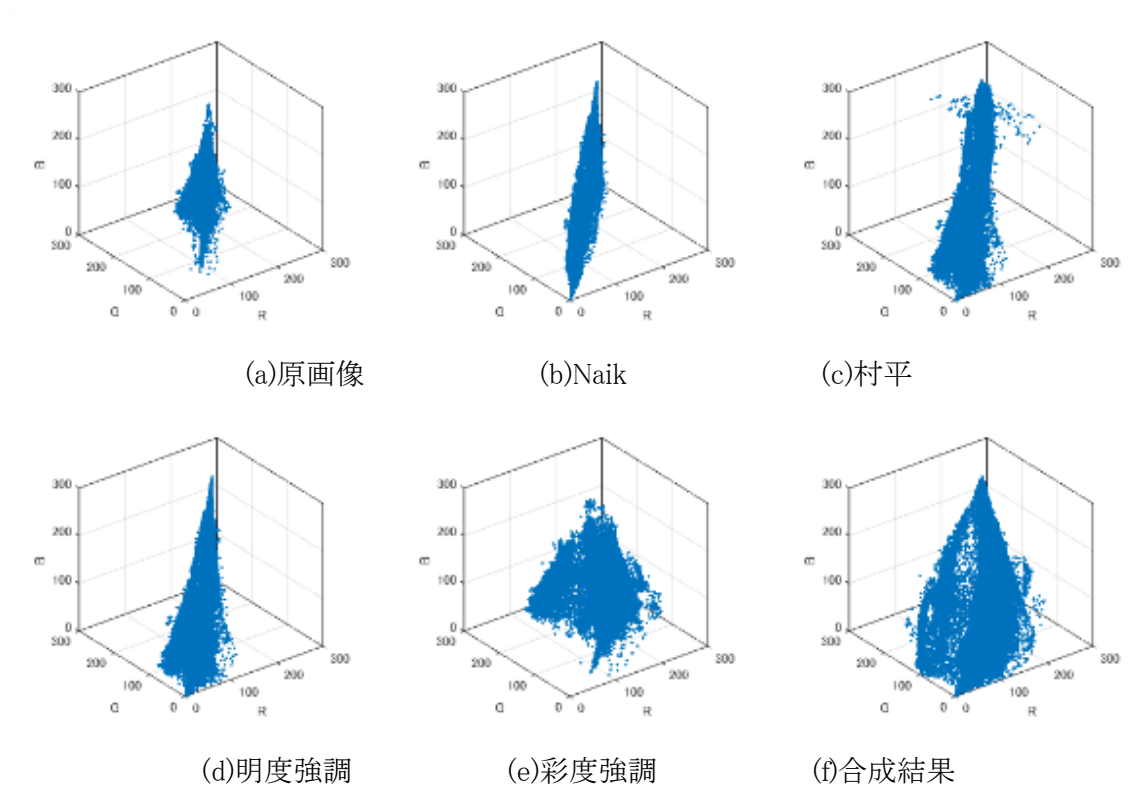
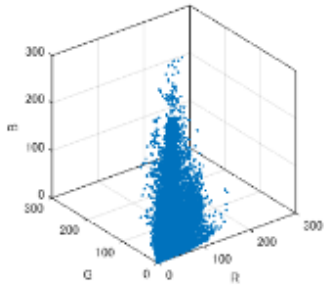
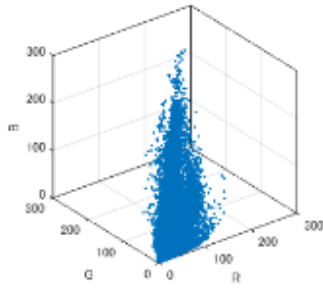


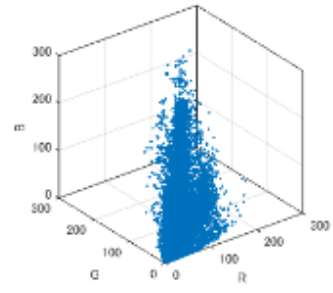
図 6-16 Balloon の散布図



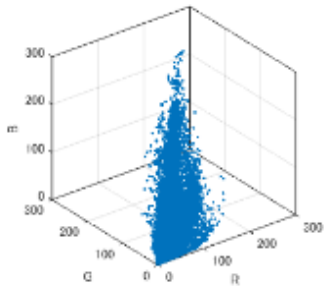
(a)原画像



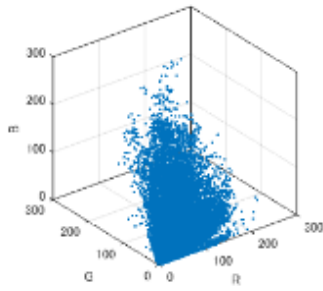
(b)Naik



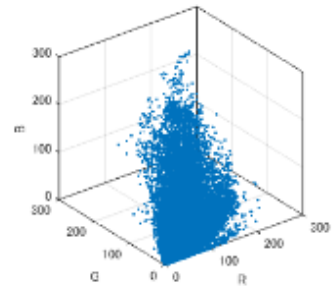
(c)村平



(d)明度強調

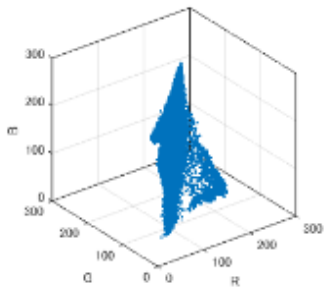


(e)彩度強調

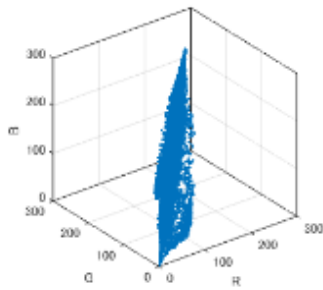


(f)合成結果

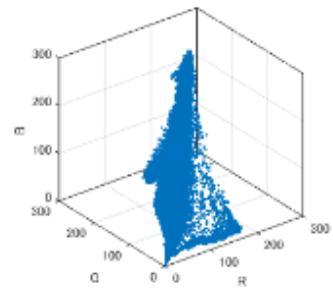
図 6-17 Couple の散布図



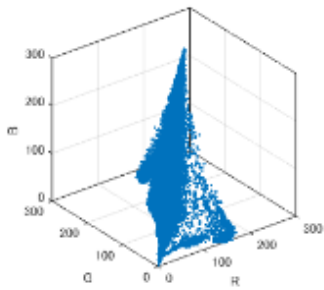
(a)原画像



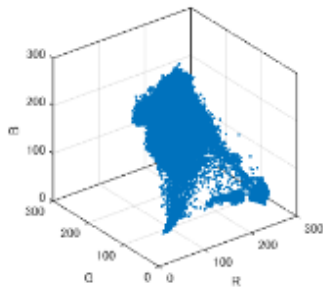
(b)Naik



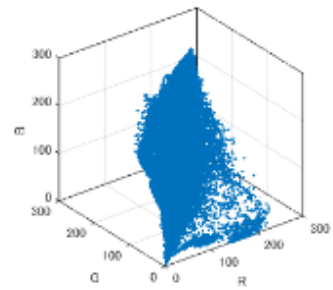
(c)村平



(d)明度強調



(e)彩度強調



(f)合成結果

図 6-18 Airplane の散布図

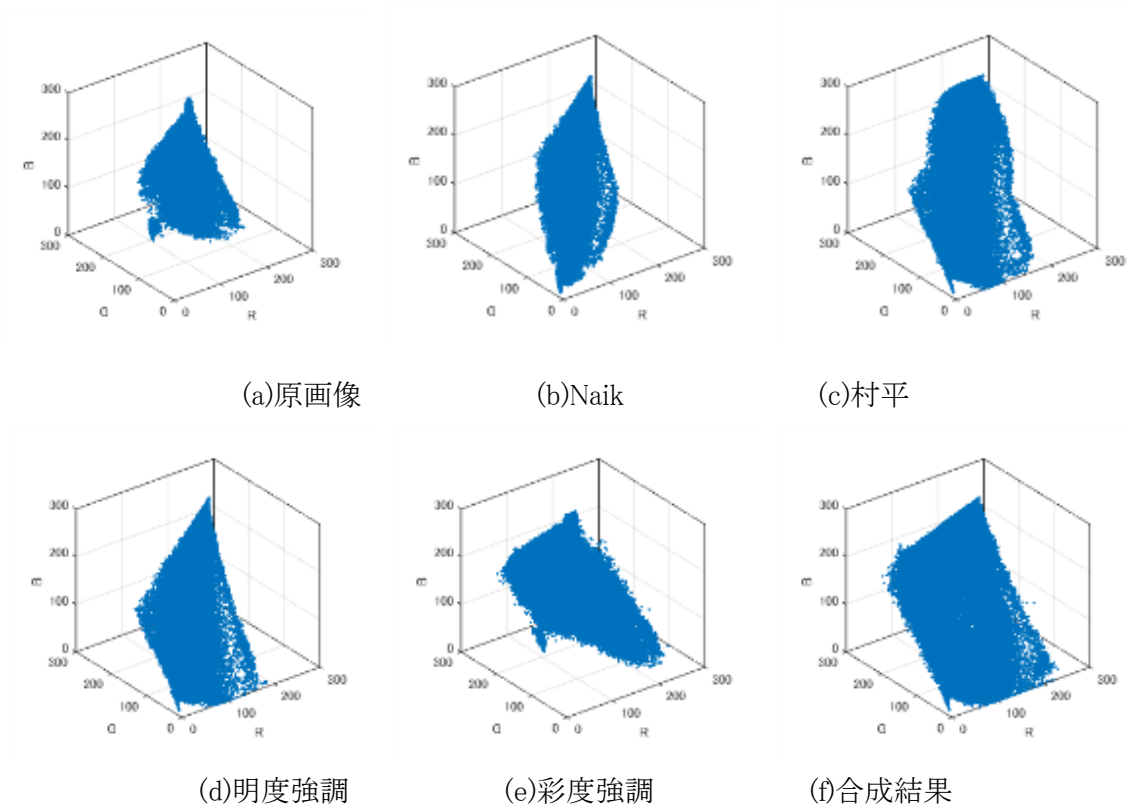


図 6-19 Aerial の散布図

図 6-16～図 6-19 の(a)に原画像, (b)に S.K.Naik らの処理結果, (c)に村平らの処理結果, (d)に明度強調のみを行ったときの結果, (e)に彩度強調のみを行ったときの結果, (f)に明度強調と彩度強調を合わせたときの結果の信号分布図を示す. (d)より明度強調処理により明度軸方向に分布が拡張し, (c)より彩度強調をする処理によって明度軸と垂直の方向に分布が拡張していることがわかる. (b)の S.K.Naik らの処理結果では, 明度軸上に分布が広がっているが, 原画像に比べ分布が明度軸に近くなっているのが分かる.

6.4.2 彩度の定義の違いによる明度強調結果の比較

次に, 明度のみを変換する処理形態において彩度を明度軸からの相対的距離で定義した場合と絶対的距離で定義した場合の, 等彩度処理結果の比較を行う.

本論文では, 画像強調のための階調値変換関数としてヒストグラム平坦化を適用する. 図 6-20～6-23 に強調結果を示す.



(a) 原画像 (b) 相対 (c) 絶対

図 6-20 Balloon の強調結果



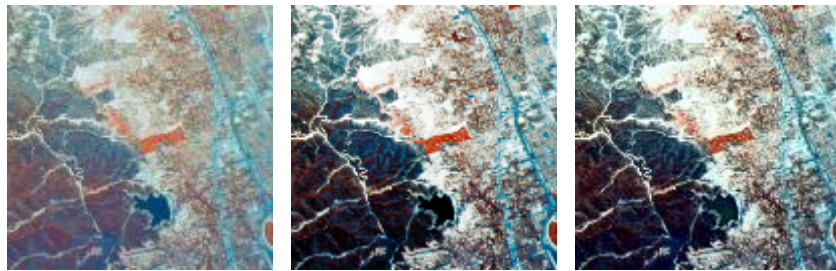
(a) 原画像 (b) 相対 (c) 絶対

図 6-21 Couple の強調結果



(a) 原画像 (b) 相対 (c) 絶対

図 6-22 Airplane の強調結果



(a) 原画像 (b)相対 (c)絶対

図 6-23 Aerial の強調結果

図 6-20～図 6-23 の(a)に原画像, (b)に明度軸からの相対的な距離で彩度を定義した明度変換の結果, (c)に明度軸からの絶対的な距離で彩度を定義した明度変換の結果を示した. 図 6-21 の Couple では, ストールやカーペットを見ると(b)は(c)よりも彩度が低下している. (a)の原画像とのカラフルネスを比較した場合, 主観的には(b)よりも(c)に近い. 一方, Airplane や Aerial では(b)は(c)と比較して鮮やかになっている. 原画像と比較した場合, この場合も絶対的な距離で定義した(c)の結果の方が(b)の結果よりも近い.

次に, 表 6-4 に明度分布のエントロピー, 表 6-5 に空間分布エントロピーを示す.

表 6-4 明度エントロピー

	原画像	相対	絶対
Balloon	6.599	6.659	6.574
Couple	6.424	6.220	6.241
Airplane	6.624	6.413	6.333
Aerial	7.140	7.077	7.055

表 6-5 空間分布エントロピー

	原画像	相対	絶対
Balloon	34.782	36.309	37.081
Couple	31.670	34.056	35.851
Airplane	32.012	33.950	33.047
Aerial	40.096	40.500	41.207

最後に、信号分布図を図6-24～6-31示す。図6-28～図6-31の信号分布図は、RGB色空間の黒(0,0,0)と白(1,1,1)の点を重ねて見たときの分布図である。

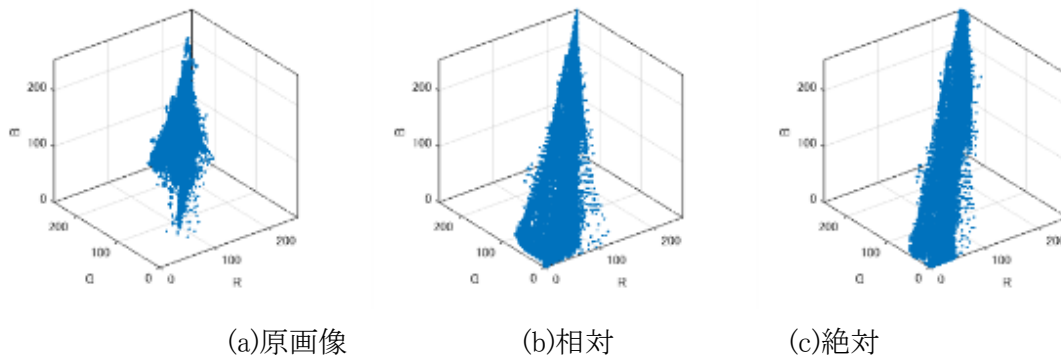


図 6-24 Balloon の散布図

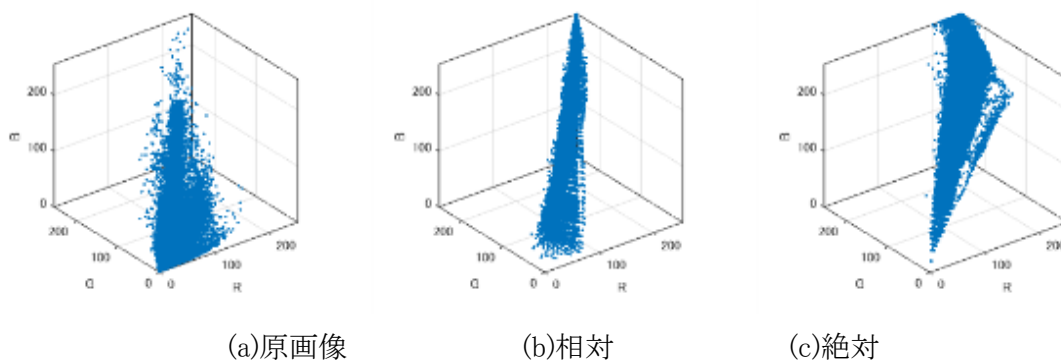


図 6-25 Couple の散布図

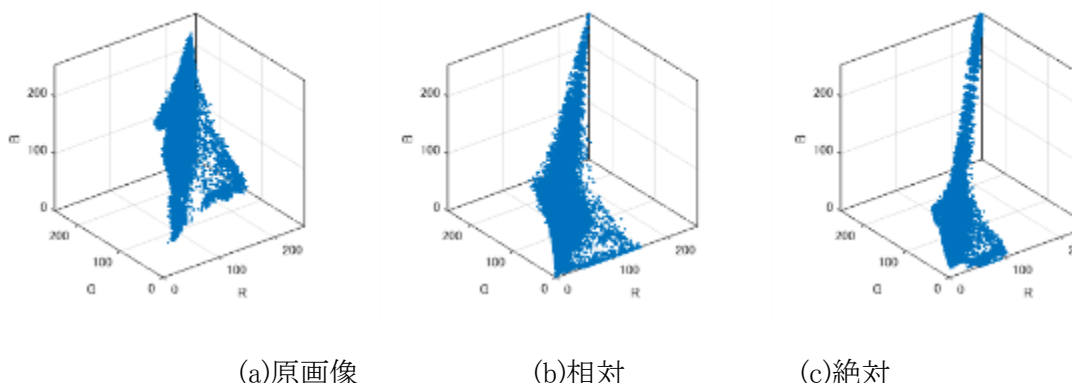
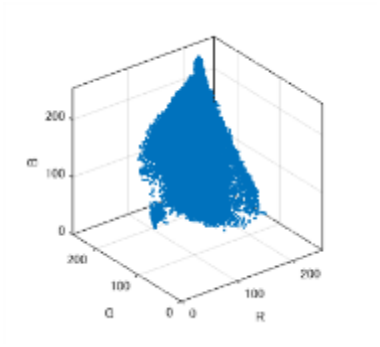
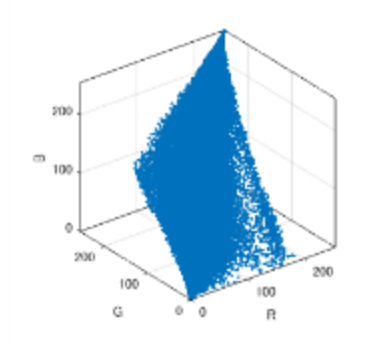


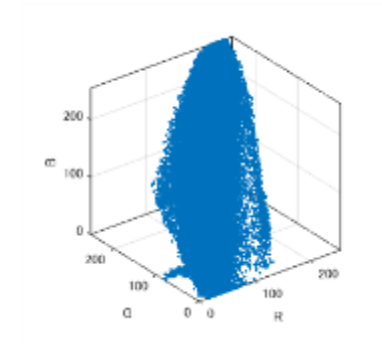
図 6-26 Airplane の散布図



(a)原画像

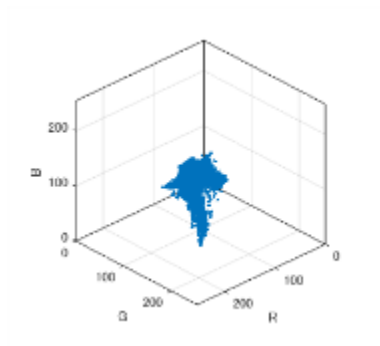


(b)相対

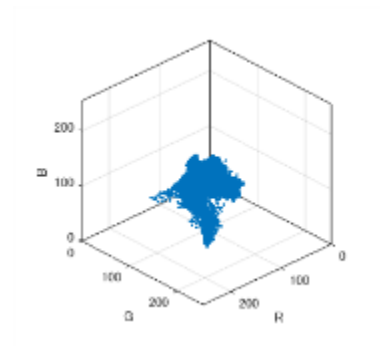


(c)絶対

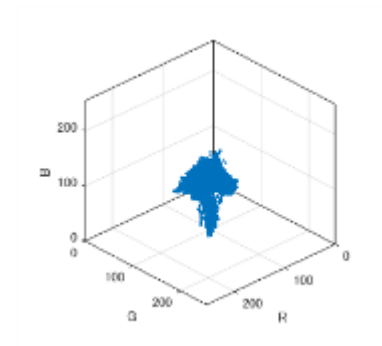
図 6-27 Aerial の散布図



(a)原画像

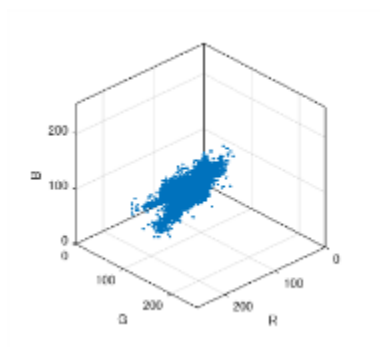


(b)相対

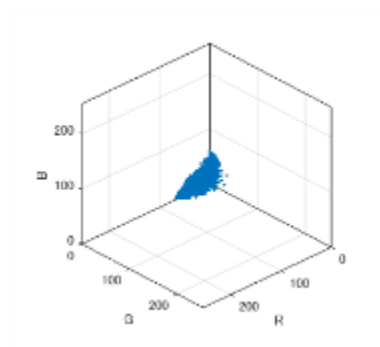


(c)絶対

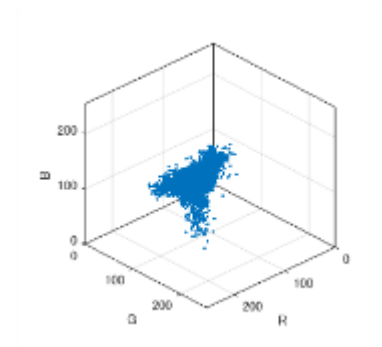
図 6-28 Balloon の散布図



(a)原画像

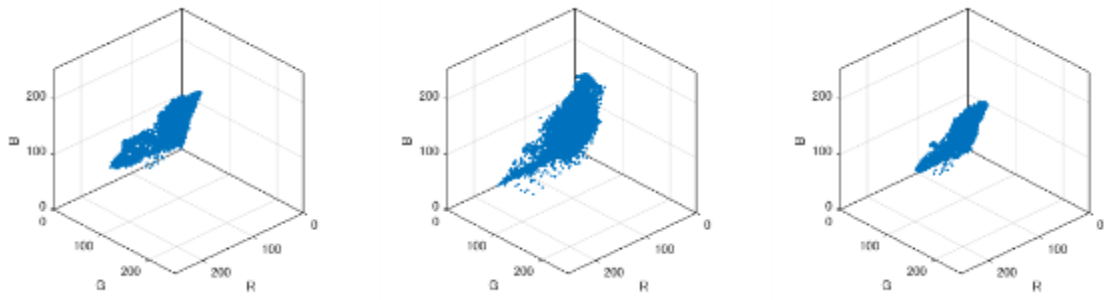


(b)相対



(c)絶対

図 6-29 Couple の散布図

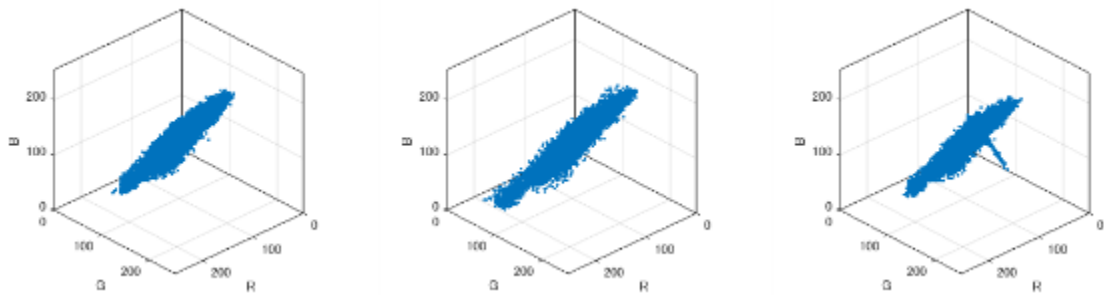


(a)原画像

(b)相対

(c)絶対

図 6-30 Airplane の散布図



(a)原画像

(b)相対

(c)絶対

図 6-31 Aerial の散布図

図 6-24～図 6-31 の(a)に原画像, (b)に明度軸から相対的な距離で彩度を定義したときの明度変換, (c)に明度軸から絶対的な距離で彩度を定義したときの明度変換の信号分布図を示している. 図 6-24～図 6-27 より, (b), (c)共に原画像よりも明度軸に沿って分布が広がっていることが確認できる. 明度軸と垂直の断面の広がりが彩度と密接な関係を持つが, その分布を図 6-28～図 6-31 から確認することができる. 相対的な距離で彩度を定義した場合, Balloon, Airplane, Aerial の分布は, 原画像の分布よりも明度軸に垂直な方向にも広がっていて, Couple の分布は縮小していて, 分布の広がりに変化が見られる. 一方, 絶対的な距離で彩度を定義した場合, 明度軸からの垂直な断面での分布形状が, ほぼ, 原画像と同じであり変化が少ないことが確認できる.

6.5 第6章のまとめ

ヒトのためのカラー画像処理においては色相を保存することが要求される。色域問題の回避のためには RGB 色空間で色相を保存する条件下で処理を行うことが得策である。色相を保存する処理とは等色相平面での処理に他ならない。

本章では、等色相平面上に処理形態として「色相と彩度を不変として明度のみを変換する処理形態」と「色相と明度を不変として彩度のみを変換する処理形態」の2つを提案した。2つの処理は独立であり、組み合わせることで、明度と彩度に対して所望する処理を施すことが可能となった。

ここでは、2つの処理形態に S 型階調値変換を適用する具体的な方法を示し、明らかにした2つの処理形態を組み合わせることでコントラストとカラフルネスを独立にコントロール可能であることを示した。

第 6 章の参考文献

- [6-1] R. Gonzalez and R. Woods, Digital Image Processing, 3rd ed. Englewood Cliffs. NJ, USA: Prentice-Hall, 2007.
- [6-2] S. K. Naik and C. A. Murthy, "Hue-preserving color image enhancement without gamut problem," IEEE Trans. Image Processing, vol.12, no.12, pp.1591-1598, 2003.
- [6-3] 村平宏太, 田口 亮, "色相を保存した RGB 色空間におけるカラー画像処理形態の一提案," 信学論 (A), vol.J96-A, no.5, pp.264-272, May 2013.
- [6-4] J.-H. Han, S. Yang, and B.-U. Lee, "A novel 3-D color histogram equalization method with uniform 1-D gray scale histogram," IEEE Trans. Image Process., vol.20, no.2, pp.506-512, Feb.2011.
- [6-5] S. Yang and B. Lee, "Hue-preserving gamut mapping with high saturation," Electronics Letters, vol.49, no.19, pp.1221-1222, 2013.
- [6-6] K. Murahira and A. Taguchi, "Hue-preserving color image enhancement in RGB color space with rich saturation," Proc. 2012 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications System (ISPACS), pp.266-269, 2012.

第7章 結論

カラー画像の取得や表示は RGB 色空間で行われるが、ヒトが見る、鑑賞するためのカラー画像に対する処理はヒトの色の 3 属性(色相, 彩度, 明度)で表現する色空間である HSI 色空間で色相を保存して処理を行う必要があった。しかしながら, 既存の HSI 色空間は RGB 色空間よりも大きく, 仮に, HSI 色空間で明度や彩度に処理を施したとき, RGB 色空間外に飛び出すことも多く, これを色域問題と呼んだ。特に明度が高くなればなるほど色域問題の発生確率が增大する。本論文では, 3 つのアプローチによりこの色域問題の解決を図った。

第 1 の解決策が色空間自体の改善である。RGB 色空間と色域が同じである HSI 色空間を定義できれば良いことになる。そこで, CMY 色空間から導出する HSI 色空間を新たに定義し, 従来の HSI 色空間と組み合わせることで RGB 色空間と同一の空間をもつ HSI 色空間を得ることができた。

第 2 の解決策は既存の HSI 色空間(C-HSI 色空間)と RGB 色空間の変換則の枠組みで, C-HSI 色空間から RGB 色空間への変換に工夫を加えることで色域問題の解決を図った。提案する方法では, C-HSI 色空間での処理結果が C-HSI 色空間と RGB 色空間の共通部分に存在しているか否かを判断し, 共通部分に存在する場合は従来の変換法を, 共通部分に存在しない場合は, 彩度への適切な補正を伴って C-HSI 色空間から RGB 色空間に変換する方法を与えた。彩度の適切な値とは, RGB 色空間と同一の空間をもつ HSI 色空間で定義された彩度値を意味する。

第 3 の解決策は RGB 色空間における等色相平面での処理方法を与えるものである。従来も等色相平面での処理方法は研究されてきた。従来の方法は明度に対して任意の処理を施すことは可能であるが, 彩度値は明度値が決定すると付随して決定していた。よって, カラフルネスを支配する彩度をコントロールすることができなかった。本論文では等色相平面において, 「色相と彩度を不変として明度のみを変換する処理形態」と「色相と明度を不変として彩度のみを変換する処理形態」を与えた。そしてそれら処理では任意の処理を適用可能である。この方法の提案によって, コントラストに対する要求(明度処理)とカラフルネスに対する要求(彩度処理)を独立に設定し, その両方の要求を実現可能とした。

画像処理の研究と言えば濃淡画像に対する研究が主であり, ここまでカラー画像・映像が普及しているにもかかわらず, カラー画像・映像のための独自性のある研究は少ない。その要因の 1 つは, カラー画像処理はヒトの色の 3 属性で表現できる色空間で処理する必要があり, その色空間が色域問題を抱えていたことがあげられる。本論文では, その色域問題に対して有効な解を導いたものと考えている。本論文で示した方向を土台にカラー画像処理のアルゴリズム開発等の研究が本格化することが期待される。

謝辞

本研究を遂行し、論文を作成するにあたり、多くの方々からご指導を得ることができましたことを、深く感謝申し上げます。

東京都市大学 教授 田口亮博士には、研究の進め方、論文の執筆方法など、研究に関する全てにおいて御指導、御助言を頂きましたことに、深く敬意と謝意を表し、お礼申し上げます。

東京都市大学 理工学研究科 情報専攻 教授 包躍博士、同准教授 張英夏博士、同准教授 新家稔央博士には、本論文をまとめるにあたり貴重な意見をいただきましたことを、深く感謝を申し上げます。

最後に、ここまでの研究と論文の作成を進めるにあたり、多くの励ましをもらった家族、友人に対して、心から感謝を申し上げます。