

(千葉大学学位申請論文)

画像の色域記述子による適応的マッピング に関する研究

2004年1月

齋藤 了一

目次

論文概要	1
第1章 緒論	4
1.1 背景と目的	4
1.2 カラードットの配置モデル	5
1.3 画像色域計算の研究	5
1.4 色域記述子の研究	6
1.5 色域マッピング	7
1.5.1 色域マッピングの研究	7
1.5.2 ICCにおける色域圧縮	9
1.6 画像依存3次元色域マッピングの考え方	10
第2章 併置加法混色によるプリンタの色域に関する検討	11
2.1 はじめに	11
2.2 ドット配置モデルによる再現域	11
2.2.1 カラードットの配置モデル	11
2.2.2 色立体の外郭面	12
2.2.3 色域の解析	13
2.3 実験結果と考察	17
2.3.1 計算条件とディザマトリックス	17
2.3.2 2次色の解析	18
2.3.3 色立体外郭と内部点の観察	21
2.3.4 各色立体の体積	25
2.4 Yule-Neilsen による N 値の検討	27
2.5 まとめ	29

第3章 色立体の色域抽出と体積算出	30
3.1 はじめに	30
3.2 色立体の体積算出法	31
3.2.1 理論モデルにおける体積算出	31
3.2.2 乱雑な色度点群からの体積算出	32
3.3 インクジェットプリンタの色域体積計算の適用結果	36
3.4 自然画像の体積計算への適用	39
3.5 モニタとプリンタの色域比較	44
3.6 外郭面の表面積と凹包度	45
3.7 まとめ	46
第4章 画像の色域記述子	47
4.1 はじめに	47
4.2 <i>r-image</i> による画像色域の記述	47
4.2.1 画像色域の抽出	47
4.2.2 3次元色域記述としての <i>r-image</i>	50
4.3 <i>r-image</i> の圧縮によるコンパクトな <i>GBD</i>	52
4.3.1 DCT による <i>r-image</i> の圧縮	52
4.3.2 SVD による <i>r-image</i> の圧縮	52
4.4 実験結果	53
4.4.1 特異値分解と主成分	53
4.4.2 DCT と SVD の縮減パラメータからの色域形状の再構築	55
4.5 まとめ	57
第5章 色域記述子を用いた3次元色域マッピング	59
5.1 はじめに	59
5.2 色域外郭の記述	59
5.2.1 色域圧縮の集中点	59
5.2.2 デバイス色域外郭	60
5.2.3 画像依存マッピング (<i>I-D GMA</i>) への適用	63

5.3	実験結果	64
5.3.1	心理評価実験	64
5.3.2	実験1 -集中点の位置-	65
5.3.3	実験2 -出力装置の色域外郭-	73
5.4	考察とまとめ	79
第6章	色域伸張への拡張	81
6.1	はじめに	81
6.2	ヒストグラム変換	82
6.2.1	ヒストグラム平坦化	82
6.2.2	ヒストグラム特定化	83
6.2.3	ヒストグラム伸張化(ストレッチ)	84
6.3	実験結果	85
6.3.1	ヒストグラム平坦化による明度伸張	85
6.3.2	ヒストグラム特定化(ガウス分布化)による明度伸張	86
6.3.3	ヒストグラム伸張化(ストレッチ)による明度伸張	87
6.3.4	ヒストグラム伸張化(ストレッチ)による明度と彩度の伸張	88
6.4	まとめ	90
第7章	双方向 Versatile 色域マッピングへの展開	91
7.1	はじめに	91
7.2	評価用画像源の収集と分類	91
7.3	画像源とデバイスの3次元色域の定量的比較アルゴリズムの確立	93
7.4	色域伸張アルゴリズムプロトタイプの開発	95
7.5	画像源 GBD のコンパクトな表現	95
第8章	結論	96
8.1	研究成果	96
8.1.1	併置加法混色によるプリンタの色域	96

8.1.2	色立体の色域抽出と体積算出	96
8.1.3	画像の色域記述子	96
8.1.4	色域記述子を用いた3次元色域マッピング	97
8.1.5	色域伸張への拡張	97
8.2	研究課題と今後の展望	98

謝辞	99
----	----

参考文献	100
------	-----

発表論文	104
------	-----

論文概要

従来の写真、印刷に代わり、豊かな色彩を表現する様々なカラー画像機器が登場する中で、**機器独立 (Device Independent)** の概念による**色管理システム(CMS: Color Management System)** の標準化が進み、各機器の色域内の色は正しく交換できるようになった。一方、色域外の色に対しては、**色域マッピング方式(GMA: Gamut Mapping Algorithm)** の研究が活発に行われており、異種メディア間の色の見えの一致を図るための必須技術となっている。

GMA の設計思想には、[1]**Device-to-Device(D-D)** と[2]**Image-to-Device(I-D)** の二つの概念がある。従来法の大半は、CRT画像のプリントに代表されるように「色域圧縮」を目的とした**D-D GMA** が主流であり、主に2次元の明度-彩度(L-C)平面で実現されてきた。**D-D GMA** は、画像源の色域境界とは独立に圧縮論理を決定できるので、アルゴリズムが簡素となる利点がある。しかし画像源が常にデバイス色域を充填していることは少なく、圧縮による色情報の損失を生じる。一方、**I-D GMA** では画像の色域境界とデバイスの色域境界との相対関係を基に写像を行うので、情報損失が最小限に押さえられる。また色は本来3次元情報であるから、2次元よりは3次元で扱うことが望ましい。

かかる観点から、筆者らは、画像依存の概念に基づく**3D I-D GMA** の研究開発に取り組んできた。しかし、**3D I-D GMA** の実行には、画像毎に3次元色域境界を抽出し、かつ画素毎に色域境界を参照して写像点の色座標を計算する必要があり、計算負荷が増大する。

この問題を解決するために、筆者は、まず、代表的な出力デバイスである2値記録プリンタの数学的混色モデルを基に、デバイスの3次元色域計算アルゴリズムを確立し、具体的な色域外郭形状とその体積計算に応用した。

次に主題である、画像源の3次元色域境界の記述子 **GBD(Gamut Boundary Descriptor)** の研究に取り組み、3次元色域を2次元の濃淡画像で表現する独自の **r-image** 法を見出した。

r-image 法は従来の **GBD** と比較して、

1. 画像の複雑な3次元色域形状を簡便な2次元濃淡画像で記述。
2. 画像源とデバイスの**r-image**の画素対画素比較により、色域外色点を即時に抽出可能。
3. **r-image**の画素対画素の輝度値の相対比から、**I-D GMA**の写像計算が極めて容易。
4. **r-image**は空間的相関が強いので、変換符号化による効率的な圧縮が可能。

などの特長を有する。

GMA の第一の目的は、広色域画像源から狭色域のデバイス色域内への圧縮にある。本論文後半には、**r-image** 法の **3D I-D GMA** への具体的な適用例を掲げ「色域圧縮」の効果

を論じた。

他方、昨今の電子メディアの色域は格段に改良されてきており、照明環境や撮像条件によっては、画像源の色域がデバイス色域よりもはるかに「狭色域」であることも多い。退色した画像はもとより低照度下でのカメラ画像などには、圧縮とは逆の「色域伸張」による見えの改善が期待できる。しかしながら伸張を目的とした *GMA* は未だ希少である。*r-image* 法は、写像方向を逆転すれば、圧縮モデルと同様に「色域伸張」にも適用することができる。ただし、この場合、目標とすべき原画像は一般に不明であるので、伸張関数と適切なスケーリングの設定が課題となる。本論文では、*3D I-D GMA* による *r-image* 法の「色域伸張」への適用についてもその具体的実施効果を紹介している。

各章の概要を以下に要約する。

第1章 緒論

本章では、ハードコピー記録における2値記録方式のプリンタの発色、色空間上に示される対象物の色域、現在の色域マッピングの主要方式の整理をし、現行方式が抱えている問題点を把握する。本論文におけるこれら問題点の解決に対する考え方を述べ目的を明らかにする。

第2章 併置加法混色によるプリンタの色域に関する検討

第2章では、本論文の主題である色域記述子を数学的なモデルで取り扱うことを目的として、代表的な記録デバイスである2値記録方式のプリンタの3次元色域を解析した。プリンタの混色モデルを基に、色域を拡大させる発色モデルについて論じる。2値記録方式のプリンタでは、連続調の画像を表現するためにドットの空間的な密度を変調して擬似的に濃淡画像を表現している。新しい併置加法混色モデルについて3つの方式を提案し、従来のランダム混色モデルや同心混色モデルとの比較を論じる。これらの数学的モデルから、3次元色域表面の具体的な計算法を導出し、その形状の視覚化を行っている。

第3章 色立体の色域抽出と体積算出

第3章では、色空間上に示される対象物の色域について、その大きさを3次的に比較する計算法について取り上げる。ランダムな色分布から抽出された外郭面に表裏判定を取り入れて体積計算する新規に開発した手法について、プリンタの理論モデルと比較検討した結果を論じ、自然画像色域の抽出と体積値の計算結果を示す。

第4章 画像の色域記述子

第4章では、3次元の色域立体を記述するモデルとして *r-image* を提案する。*r-image* を圧縮・復元する際に効率的な方法として、画像の特徴を保持しながら圧縮する特異値分解(SVD)による検討を行ない、JPEG 圧縮等で用いられる離散コサイン変換 DCT と比較した結果を紹介する。

第5章 色域記述子を用いた3次元色域マッピング

第5章では、提案した色域記述モデル *r-image* を応用し、画像の特徴に依存した3次元色域圧縮への適用を考察する。色域圧縮法は2次元で扱われている方法がほとんどで、3次元で行なわれたものでも全てデバイス依存であり、画像依存で行なう優位性について検証実験した結果を元に報告する。

第6章 色域伸張への拡張

画像源の色域がデバイス色域よりもはるかに「狭色域」である場合には、「色域伸張」による見えの改善が期待できる。第6章では色域伸張への適用について、ヒストグラムの平坦化、特定化、および伸張化を利用し、その具体的実施効果を報告する。

第7章 双方向 Versatile 色域マッピングへの展開

筆者らが提唱してきた *r-image* による色域記述子(GBD)は、画像およびデバイスの3次元色域比較と高速写像に適し、圧縮と伸張の双方向色域変換へ展開できれば革新技術となる。第7章では GBD を利用した双方向色域変換への具体的な展望を述べる。

第8章 結論

本研究全体を通して得られた成果を要約し、今後の課題と展望について要約する。

第1章 緒論

1.1 背景と目的

近年、様々な画像メディア機器の進展に伴いカラー化が急速に進んでいる。インクジェットプリンタやカラーレーザープリンタ等に代表されるデジタルプリントでは、面積階調法を用いる2値記録方式プリンタが、目覚ましい性能の向上により急速に普及したが、再現色域の限界が色再現上の重要な問題となっている。一方、カラー画像はオープン環境におけるコンピュータと人間との視覚インターフェースとしての中心的な役割を果たしつつあり、異種メディア間の色管理技術は益々重要性を増しつつある。デバイス独立色の概念は画像の入出力デバイスにおける色管理システムの基本設計思想となっている。デバイス独立色を用いて、メディア間の色情報を正確に伝達することが可能になった。しかし、異種メディア間の色の見えの不一致を改善するためには、物理的な色域の相違を画像処理により吸収または緩和する手段が求められ、色域マッピング手法の導入が必要不可欠である。

本論文では、異種メディア間の新しい色域マッピング手法の開発を目的として、ハードコピーにおける2値記録方式のプリンタの発色、デジタルハーフトニングによる色再現の混色モデルの検討から研究を始めた。面積階調法を用いるデジタルプリントではランダム配置や同心配置のモデルが色再現予測に使われるが、デジタル制御では併置配置モデルが実現可能である。本研究では、以下のステップで目的へのアプローチを行った。

第一に、各配置による混色モデルを定式化し、再現色域の定量的解析を試みた。均等色空間での3次元色域形状を視覚化し、その体積の定量化を図ることによりそれぞれの色域を正確に把握する。そして、各種デバイスのみならず、様々な画像に対しても、色域を定量的に把握することで、色域の違いによる色再現性を評価する礎とした。

第二には、3次元の色域立体を的確かつ簡素に記述する数学モデルの構築に取り組んだ。色域境界の記述子 (**GBD: Gamut Boundary Descriptor**) による色域データを画像に付加して送受信すれば、ユーザ側のデバイスに適応した色域マッピングを行うための指針とすることが出来る。色域データの送受信に当たっては、その圧縮・復元方法についても検討を行う必要がある。

第三は、色域記述子の色域マッピングへの具体的な応用手法の確率である。理想的な色域マッピング方式 (**GMA: Gamut Mapping Algorithm**) は、画像源とデバイスの相互の3次元色域境界を用いた **3D Image-to-Device GMA(3D I-D GMA)** とされるが、**GBD** を導入することにより、画像の特徴に依存した簡便な3次元色域圧縮が可能となる。色域圧縮法は2次元へ射影した形で扱う方法がほとんどで、3次元による先行研究もあるが、デバイス依

存の *Device-to-Device (D-D) GMA* を基本としている。画像依存で行なえば再現画像の高画質化、特に階調再現特性において優位性が得られる。

以上を基本思想として取り組んだが、昨今の画像出力デバイスおよび記録メディアの高画質化は目覚しく、プリンタを始めとして出力デバイスの再現色域は飛躍的に拡大しつつあり、入力画像の色域は必ずしも出力デバイスより広いとは限らない。長期保存による退色画像はもとより、撮像条件や照明環境により、出力デバイスよりも著しく「狭色域」の画像源を対象とすることも数多い。

そこで第四には、従来のマッピングが広色域から狭色域への「色域圧縮」を中心としていたのとは逆に、狭色域から広色域への「色域伸張」への拡張アルゴリズムについて検討した。この場合「色域圧縮」とは異なり、一般に目標とすべき原画像は不明であるので、伸張の限界を規定することに困難があるが、*I-D GMA* の基本概念の基に画像とデバイス双方の色域記述子 (*GBD*) を適用することにより、この問題に取り組んだ。

最終的には、画像に依存して「色域圧縮」と「色域伸張」を適応的に切替え、双方向のマッピングを行える *Image-to-Device Versatile GMA* の完成を目指している。最後に、この目標へのシステムデザインについて触れる。

1.2 カラードットの配置モデル

現在、低価格で高品質なカラープリンタが広く使われるようになってきた。美しいカラー画像はデジタルハーフトーニングと色複製技術によって再現されている。面積階調法を用いるデジタルプリントでは、減法混色による2次色、3次色の発生比率が再現色の色域決定を支配する。典型的な混色モデルでは、Neugebauer理論が根底にあり色点面積率の組合せで示される¹。ここではCMY各ドットはランダムに配置されるDemichelモデルが通常考えられるが、近年のデジタルプリントではこの配置は当てはまらない。デジタルプリントで使われる最も単純なモデルは同心配置(以下 coaxial 配置と呼ぶ)で、CMY各ドットは同じ位置に配置される^{2,36}。このモデルはシャープなエッジを作り出す反面、彩度の低い2次色を発生する。一方、CとMインクの混色において、互いの重なりを避けた併置配置ではより鮮やかな青味の色を作り出せることが報告されている²。本論文では、2次色の発生を抑える min-med、min-max、min の併置配置3モデルを提案し、それぞれのモデルにおける色域を解析して比較検討を行った。

1.3 画像色域計算の研究

画像全体の色域を把握する上で、画像色立体の色域外郭及びその体積を知ることは非常

に重要である。CIELAB 空間上での色立体表面の形状や体積を知ることができれば、色域を議論する上で非常に都合がよい。しかし、非線形空間での立体の体積を求めることは容易ではない。体積を求める試みとして、Kappele は CIELAB 空間上での色立体を a^*-b^* 面に投影し、その面積を積算する方法を³、Mahy は Neugebauer 式を細密化して求めた色度点を、明度および色相角ごとに数える手法を⁴、Tanaka らは立体を四面体の塊で分割した計算法⁵などを報告している。

本研究では、第2章において、明度で均等に分割された a^*-b^* 面に投影した面積を計算し、積算する方法での比較を行った。第3章では色域の最外郭点抽出をしてポリゴンメッシュを作り、中心点との四面体で体積計算をすることによって、立体的に体積を正確に算出する方法を探る。この時、色域の最外郭点抽出にはサンプル点均等分割法を用い、体積算出の際には、ポリゴンメッシュの表裏判定を取り入れた。

1.4 色域記述子の研究

画像やデバイスの色域を記述する色域記述子 (GBD) については色域マッピングの研究に付随して幾つかの報告が成されている。Herzogは解析的なコンパクトGBDを提唱しており、それは単位立体の色域がデバイス色域に一致するように変形される。彼は明度と色相の関数としての最大の彩度により色域表面を表した。そしてプリンタの色域表面は明度-色相平面のChroma Mountainsとして視覚化される¹³。Braun and Fairchildはまた円筒状のCIELAB色度座標によってCRTデバイスのGBDを示し、ここでは色域表面上の彩度 Cab^* は明度-色相の L^*hab 平面内での三角格子点で与えられ、Chroma Mountainsに似たMountain-rangeで視覚化している¹⁵。Cholewo and Loveは色域を2次元のDelaunay網にして三角形格子の凸面に生成されるAlpha-shape法を使ったプリンタのGBDを定義した⁴⁰。Morovic and Luoは、色空間を極座標で分割し、それぞれの分割区域内で最も外側の色を抽出して表すSegment Maxima GBD (SMGBD)を紹介している⁶。これらの方法はどれもプリンタまたはCRTなどのデバイスのGBDを表すために適用された。

本研究では、画像とデバイスのどちらに対しても、CIELAB 座標上の色度値を極座標で分割した空間内で中心からの最外郭点を抽出し、そのベクトル距離を2次元の白黒値で大小を判断する *r-image* と定義することを提案する。色域を一旦 *r-image* として表せば、この情報を画像自体に付随して伝送することで画像再現の指標として利用できるし、また、画像とデバイスの色域を素早く判断できるので圧縮や伸張の指標となり得る。

1.5 色域マッピング

1.5.1 色域マッピングの研究

現在までに多くの色域マッピングアルゴリズム(*GMA*)が報告されているが^{6-18,39-44}、それらは2次元の平面を使用したものがほとんどであり、いずれも機器依存法 (Device-to-Device; *D-D*) での色域を元に考えている。2次元平面は、色域をR、Y、G、C、B、Mの6色相に分割した Fig.1-1 に示すような明度-彩度平面が用いられる。プリンタ色域の外側にあつてマッピングを必要とする色 *s* は、次式に示されるディスプレイの色域 *m* とプリンタの色域 *o* の比率によって目標色 *t* へマッピングされる。

$$\vec{pt} = \vec{po} \cdot \left(\frac{\vec{ps}}{\vec{pm}} \right) \quad (1-1)$$

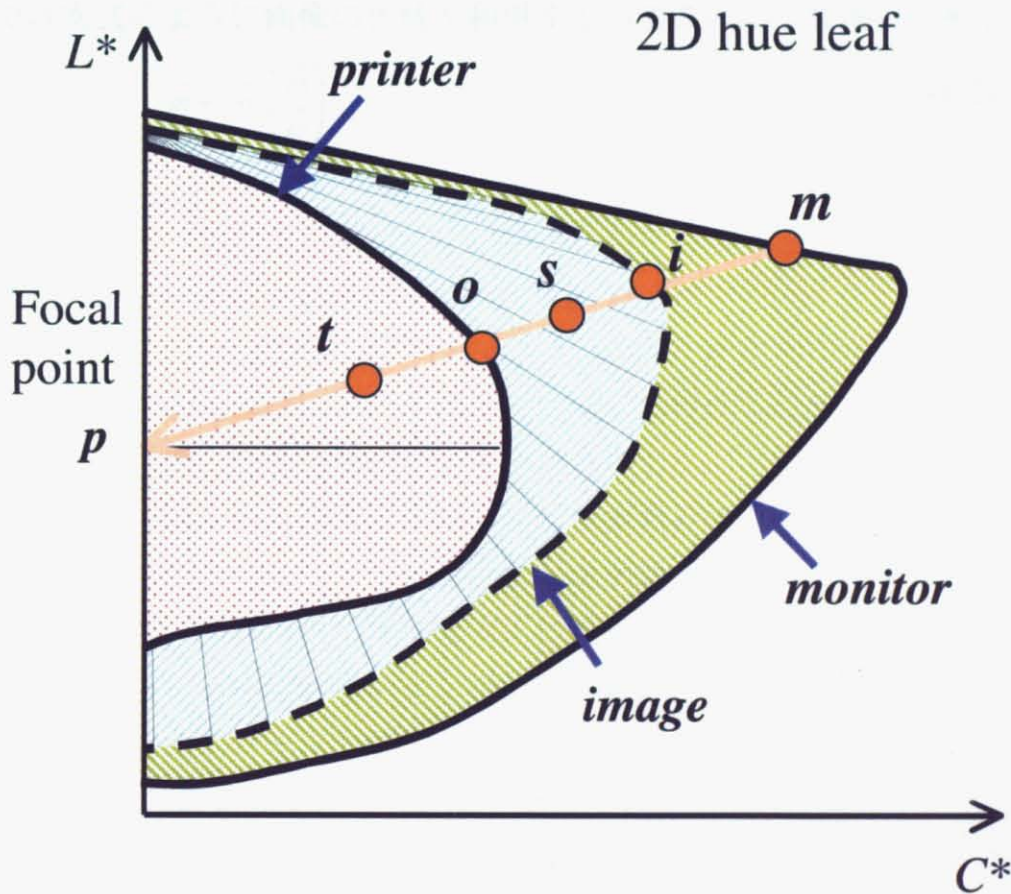


Fig. 1-1 明度-彩度平面でのマッピングの基本概念

この2次元平面において、明度・彩度を2段階に分けて圧縮する LLIN 法、LCLIP 法、LNLIN 法が報告されている。また、明度・彩度をある集中点へ同時に圧縮する SLIN 法、CUSP 法、LSLIN 法が紹介されている。一方で、高彩度色の彩度は出来るだけ保存するようにした GCUSP 法、TRIA 法、CLLIN 法、および CARISMA 法が提案されている⁶。さらには、集中点を平面内の一定点とはせずに、高明度・低明度・高彩度の3つの色領域に分けた Ito と Katoh の方法⁹、明度軸よりもマイナス無限大に集中点を定め明度はほとんど平行移動にした Herzog と Buring の方法¹⁸、 L_{upper} と L_{lower} の分岐点を定めて中間部は平行に L_{upper} と L_{lower} の上下は分岐点方向に集中させるようにした Kang らの方法¹⁶がある。

しかしながら、これら **D-D** ではマッピング後に色情報の損失が起こり得る。なぜならば、画像の色情報はディスプレイ色域を常に満たしている訳ではないからである。そこで我々は、画像色域境界を使う画像依存法 (Image-to-device; **I-D GMA**) を提案した¹⁰。**I-D** では次式のように画像の色域を利用するのでこのような損失を最小限に抑えられる。

$$\vec{pt} = \vec{po} \cdot \left(\frac{\vec{ps}}{\vec{pi}} \right) \quad (1-2)$$

1.5.2 ICCにおける色域圧縮^{19,20}

コンピュータおよびカラー・パブリッシング業界のメンバーが、カラーマネージメントについての共通のアプローチを目指して 1993 年に国際カラー・コンソーシアム (ICC) を形成した。ICC ではレンダリング・インテントと名付けて、あるデバイスの色空間をマッピングして別のデバイスの色空間に変換している。レンダリング・インテントには、知覚、彩度、相対的な色彩を保持、絶対的な色彩を保持の 4 つがある。

・知覚

オリジナル画像中の 1 つないしそれ以上のカラーが、対象とする色空間の色域からはみ出してしまう場合に、あるデバイスの色空間の全色域を圧縮して、対象とするデバイスの色空間に合わせる。この方式だと、全体の色空間を狭め、色域内のカラーも含めてすべてのカラーをシフトさせるから、圧縮の前と後で、カラーの視覚的な関係は保持される。

・彩度

目標デバイスの色空間に変換した場合でも、オリジナル画像の彩度（鮮明さ）を再現する。この方式では、ある色域から別の色域に変換した際にも、カラーの相対的彩度が維持される。このレンダリング・インテントは、そもそもビジネス・グラフィックス向けに考案されたもので、写真などの場合に必要とされるカラー間の正確な関係よりも、明るく彩度のあるカラーが重視される場合に利用される。

・相対的な色彩を保持

色空間内のあるカラーが、目標の色空間の色域からはずれる場合に、このカラーをマッピングして目標の色空間内のできるだけ近いカラーに置き換える。一方で目標の色域内に収まるカラーは、何ら変更されない。目標対象とする色域からはずれるカラーだけが変換される。このレンダリング・インテントを利用すると、元の色空間では異なって見える 2 つのカラーが、目標の色空間では同一になってしまうという現象が起こる。この現象は「クリッピング」と呼ばれている。相対的な色彩を保持は、Photoshop 4.0 およびそれ以前のバージョンにデフォルトで組み込まれていたカラー変換方式である。

・絶対的な色彩を保持

画像の輝度を変更する可能性がある白色点と黒点に調整を施さずに、カラーを正確にマッチさせる。絶対的な色彩を保持はたとえば、イーストマン・コダック社の黄色、コカコーラ社の赤のように、商品を特定するために重要な「商標カラー」をレンダリングする場合に有効な方式である。

上記 4 手法では、「知覚」は **D-D** で集中点へ圧縮する方法、「彩度」はビジネスグラフ

ィックス向けの特種なもの、「相対的な色彩を保持」は明度を圧縮してからのクリッピング、「絶対的な色彩を保持」は明度を変化させないクリッピングと言える。印刷・デザインにおいて商用ベースで浸透しつつあるようだが、画像の色域という概念はやはり含まれていないので階調の損失が多いと思われる。

1.6 画像依存 3次元色域マッピングの考え方

3次元マッピング方式については、いくつかの提案があるがまだ少ない。Katoh と Ito はクリッピング法を利用して色差が最小となる点への圧縮法を⁹⁾、Spaulding らは CG のモーフィング手法を用いた圧縮法を⁸⁾、それぞれ紹介しているが、いずれも **D-D** 圧縮法である。

3次元 **I-D GMA** は色情報の損失を抑えてプリンタの色域内部にディスプレイ上の画像を割当てて理想的な方法であると言える。我々はプリンタ色域をオーバーした画像に対してプリンタ外郭と画像の各色度点とのベクトル計算による理想的な **3D I-D GMA** を提案したが、各々の画素が色域外郭に交差する点を求めるために複雑なアルゴリズムと多大な計算時間を要した¹¹⁾。 **3D I-D GMA** を効果的に行なうためには簡便な色域記述方法

(Gamut Boundary Descriptor; **GBD**) が必要となる。多くの **GBD** が提案されているが主に機器に対してのものであり、画像においては行なわれていない。本研究では、画像色域とデバイス色域とを比較する新しい簡便な方法を提案する。提案した **GBD** を **3D I-D GMA** に利用する方法を紹介し、被験者による検証実験を示す。

第2章 併置加法混色によるプリンタの色域に関する検討

2.1 はじめに

画像やデバイスの色域を扱う上で、まず、代表的な出力デバイスである2値記録プリンタの数学的混色モデルを基に、デバイスの3次元色域を探ることから研究を始めた。ここでは、デバイスの色域立体を数学的に記述することを目的として、各種の混色モデルを利用することを試みた。現実のプリンタの混色プロセスには、印写系の非線形性や光学的あるいは機械的ドットゲイン等の影響を伴うが、本章は精密なプリンタモデルの構築が目的ではなく、色域記述子の研究を進める上で、最も典型的な対象としてプリンタを取り上げている。

面積階調法を用いるデジタルプリントでは、減法混色による2次色、3次色の発生比率が再現色の色域決定を支配する。典型的な混色モデルでは、Neugebauer理論が根底にあり¹、ここで、単位面積は最大8つの色点面積率の組合せで示される。すなわち、白紙であるホワイトW、1次色のC、M、Y、2次色のR、G、B、そして3次色ブラックKが、C、M、Y各色材のランダムな混合によって生じる。これら8つの基本色は色立体の12の外郭稜線を作る。一方、これらの稜線に囲まれた色立体は、1次色のドット配置によって決定される。白紙上の1次色混色において、2つの色を同じ場所へ重ねるよりも、併置をすることによって高彩度発色することが報告されている²。

本章では、1次色の混色を3つの場合に拡張して、より広い色域が得られる併置混色について3次元域での検討を行った²⁵⁻²⁷。

2.2 ドット配置モデルによる再現域

2.2.1 カラードットの配置モデル

デジタルプリンタでの混色の理論的モデルは良く知られたNeugebauer式で述べられる。この式は印刷技術で使われる網点スクリーンの計算に応用されてきた。Fig.2-1 (a)はDemichelによって与えられた3原色インクのランダム混色モデルを表す。一方、近年のカラーデジタルプリンタでのドットの配置はDemichelのものとは異なる。例えば、Fig.2-1 (b)は典型的なモデルを示し、これを「coaxialモデル」と呼ぶ。ここでは、CMY原色インクドットはそれぞれ同じ位置に配置され、単位面積は最大4つの色点面積で構成される。すなわち、1つの1次色、1つの2次色、ブラックKそしてホワイトWである。coaxialモデルはデジタル技術を用いた正確なドット位置制御により実現される。これはシャープなエッジを作り出せる反面、飽和度が不足する2次色の比率が大きくなる。

Fig.2-1 (c),(d)および(e)は2次色の発生を抑える3つの異なったモデル「min-med」、
「min-max」、「min」を示す。ここに、1次色インク P, Q, S はドット面積率 p, q, s を
持つ単位面積内に置かれる。min-med モデルでは、P と Q のドットは重なりが最小になる
ように反対側に置かれ、S は P と Q に垂直に置かれるので、平均（中間）的な重なりを成
す。min-max モデルはP と Q は min-med と同様に置かれるが、S は P, Q いずれかと同一
に置かれるので重なりは大きくなる。一方、min モデルでは、P, Q, S のスタート点が等
間隔で $1/3$ ずつずれており、相互の平均的な重なりが最小になる。

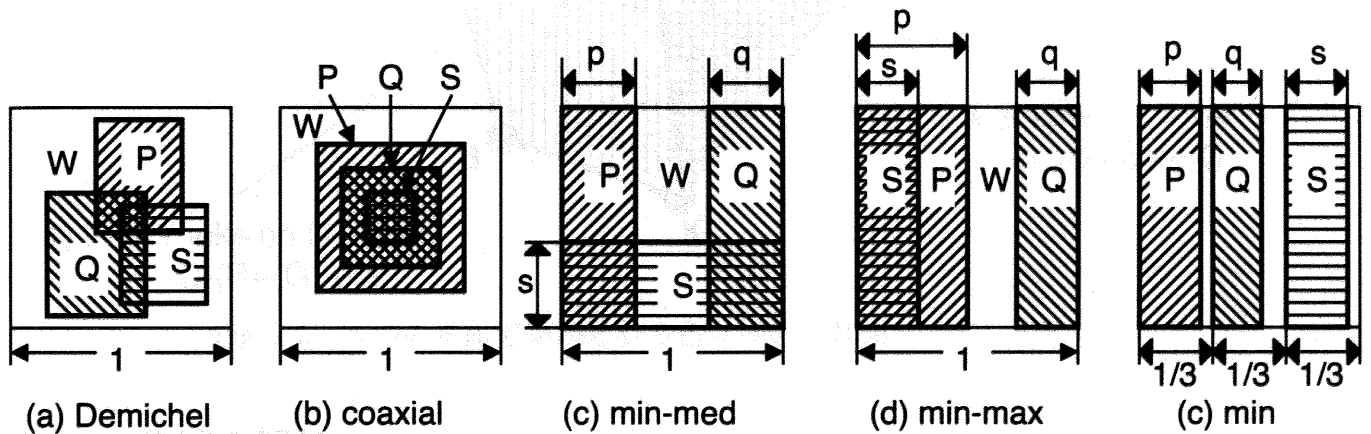


Fig. 2-1 2値プリンタにおける色ドット配置の基本モデル

2.2.2 色立体の外郭面

色立体の外郭面は Fig.2-2 で示す6つの平面で決まる。

- (1) M and Y inks on W : W-M-Y-(R)
- (2) C and Y inks on W : W-C-Y-(G)
- (3) C and M inks on W : W-C-M-(B)
- (4) M and Y inks on C : C-(B)-(G)-(K)
- (5) C and Y inks on M : M-(B)-(R)-(K)
- (6) C and M inks on Y : Y-(G)-(B)-(K)

括弧内の色は2次色と3次色を示す。それぞれの平面はフラットではなく、1次色インク
のドット配置を基にして作られる混色4面体の表面を形成する。

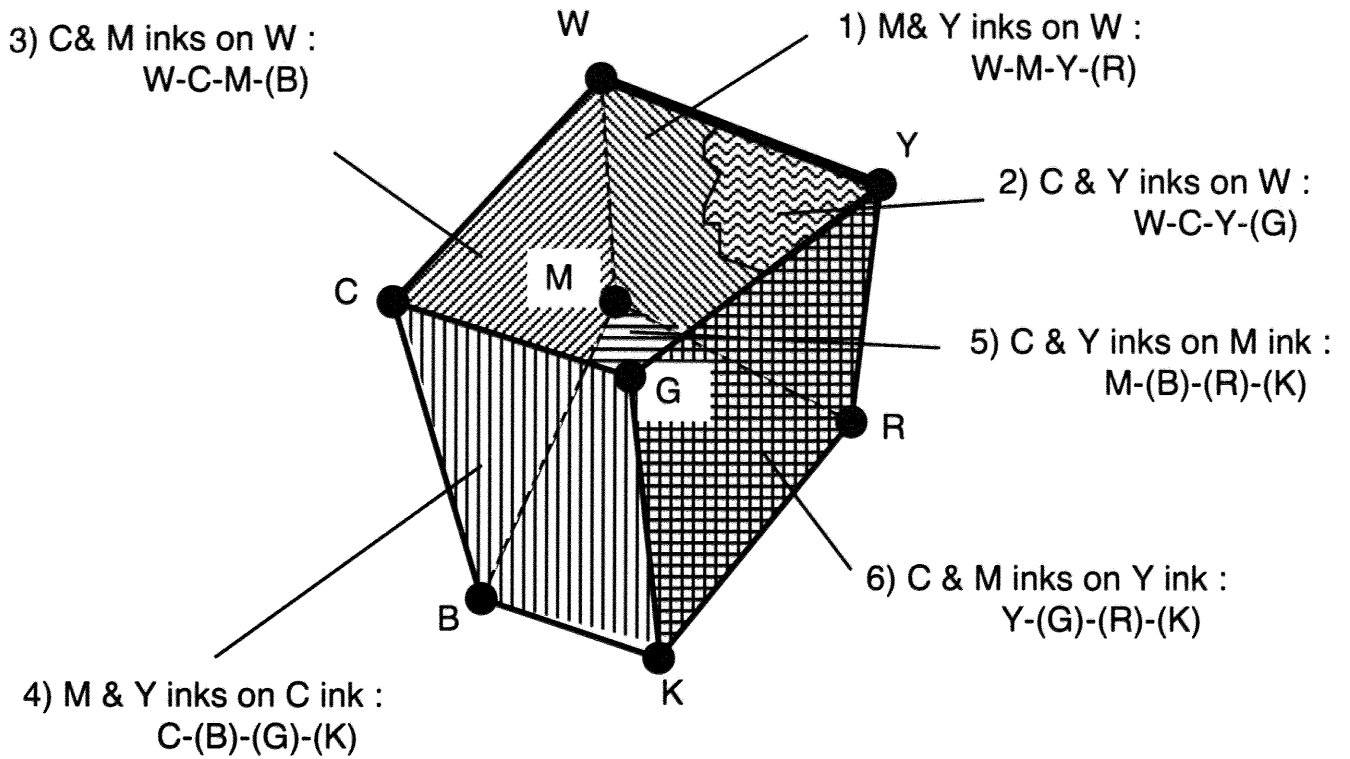


Fig. 2-2 6つの平面で構成される色立体の外郭面

2.2.3 色域の解析

単位面積の3刺激値ベクトル T は以下に示すように、各々のカラー面積率 i に対する3刺激値ベクトル T_i の加法混色として各モデルともに Neugebauer 式で与えられる。

(Demichel モデル)

8つのカラー面積率は C, M, Y のランダムな混色の結果として表される。

$$T = \sum_{i=1}^8 a_i T_i \quad ; \quad i = \{W, C, M, Y, R, G, B, K\} \quad (2-1)$$

(coaxial モデル)

最大で4つのカラー面積率が表され、 CMY からの P と Q の選択によって6つの異なった場合が生じる。式中で P は1次色の、 Q は2次色の中の1つの色を示す。

$$T = \sum_{i=1}^4 a_i T_i \quad ; \quad i = W, P, PQ, K \quad (2-2)$$

$$P = \max(C, M, Y)$$

$$PQ = \max(C, M, Y) \cap \text{mid}(C, M, Y)$$

(min-med モデル)

CMY からの S の選び方により 3 つ、そして、 $p+q < 1$ または $p+q > 1$ の 2 つの状態により異なった場合が生じる。それぞれの場合について 6 つのカラー面積率を持つ。

$$T = \sum_{i=1}^6 a_i T_i \quad ; i = \begin{cases} W, C, M, Y, PS, QS & ; \text{for } p+q \leq 1 \\ P, Q, R, G, B, K & ; \text{for } p+q > 1 \end{cases} \quad (2-3)$$

(min-max モデル)

6 つの異なる場合が生じる。それぞれの場合について 4 つのカラー面積率を持つ。

$$T = \sum_{i=1}^4 a_i T_i \quad (2-4)$$

(min モデル)

$i=4 \sim 6$ のカラー面積率を持ち、全部で 60 の異なる場合が、以下の範囲の組み合わせによって生じる。

$$0 \leq p, q, s < \frac{1}{3} \quad , \quad \frac{1}{3} \leq p, q, s < \frac{2}{3} \quad , \quad \frac{2}{3} \leq p, q, s \leq 1 \quad (2-5)$$

Table 2-1 は Demichel、coaxial モデルと比較して、min-med モデルの色点面積率を示す。同様に、Table 2-2 は min-max モデル、Table 2-3 は min モデルの色点面積率を示す。いずれも $P=C$ 、 $Q=M$ 、 $S=Y$ における場合を示しており、後の実験結果もこの色配置で行った。Demichel では 8、coaxial モデルでは 4、min-med では 6、min-max では 4、min モデルでは 4～6 のカラー面積率になり、これらの混合によってそれぞれの色域を作り出している。

Table 2-1 Demichel, coaxial, min-med 各モデルの色点面積率

Demichel		coaxial model		min-med model (C M ⊥ Y)		
color i	area ratio a_i	color i	area ratio a_i	color i	area ratio a_i ($c+m < 1$)	area ratio a_i ($c+m > 1$)
W	$(1-c)(1-m)(1-y)$	W	$1-\text{Max}(c,m,y)$	W	$(1-c-m)(1-y)$	0
C	$c(1-m)(1-y)$	P	$\text{Max}(c,m,y)-\text{Mid}(c,m,y)$	C	$c(1-y)$	$(1-m)(1-y)$
M	$(1-c)m(1-y)$	PQ	$\text{Mid}(c,m,y)-\text{Min}(c,m,y)$	M	$m(1-y)$	$(1-c)(1-y)$
Y	$(1-c)(1-m)y$	K	$\text{Min}(c,m,y)$	Y	$y(1-c-m)$	0
R	$(1-c)my$			B	0	$(c+m-1)(1-y)$
G	$c(1-m)y$			G	cy	$(1-m)y$
B	$cm(1-y)$			R	my	$(1-c)y$
K	cmy			K	0	$(c+m-1)$

Table 2-2 min-max モデルの色点面積率

min-max model	W	C	M	Y	B	G	R	K
$c+m < 1, c < y$	$1-c+m$	$c-y$	m	0	0	y	0	0
$m+y < 1, y > c$	$1-m-y$	0	m	$y-c$	0	c	0	0
$c+y > 1, m+y < 1$	0	$1-m-y$	$1-c$	0	$c+m-1$	y	0	0
$m+y > 1, c+m < 1$	0	0	$1-y$	$1-c-m$	0	c	$m+y-1$	0
$m+y > 1, c > y$	0	0	$1-c$	0	$c-y$	$1-m$	0	$m+y-1$
$c+m > 1, c < y$	0	0	$1-y$	0	0	$1-m$	$y-c$	$c+m-1$

Table 2-3 min モデルの色点面積率

		W	C	M	Y	B	G	R	K
1	$c < 1/3, m < 1/3, y < 1/3$	$1-c-m-y$	c	m	y	0	0	0	0
2	$c < 1/3, m < 1/3, 1/3 < y < 2/3, c > y - 1/3$	$2/3-c-m$	$c-y+1/3$	m	$1/3$	0	$y-1/3$	0	0
3	$c < 1/3, m < 1/3, 1/3 < y < 2/3, c > y - 1/3$	$1-m-y$	0	m	$y-c$	0	c	0	0
4	$c < 1/3, m < 1/3, y > 2/3, m > y - 2/3$	$1/3-m$	0	$m+2/3-y$	$2/3-c$	0	c	$y-2/3$	0
5	$c < 1/3, m < 1/3, y > 2/3, m < y - 2/3$	$1-y$	0	0	$y-c-m$	0	c	m	0
6	$c < 1/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, m - 1/3 > y$	$1-c-m$	c	$m-y$	0	0	0	y	0
7	$c < 1/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, m - 1/3 < y$	$2/3-c-y$	c	$1/3$	$y-m+1/3$	0	0	$m-1/3$	0
8	$c < 1/3, 1/3 < m < 2/3, 1/3 < y < 2/3, c > y - 1/3$	$1/3-c$	$c-y+1/3$	$1/3$	$2/3-m$	0	$y-1/3$	$m-1/3$	0
9	$c < 1/3, 1/3 < m < 2/3, 1/3 < y < 2/3, c > y - 1/3$	$2/3-y$	0	$1/3$	$y+1/3-c-m$	0	c	$m-1/3$	0
10	$c < 1/3, 1/3 < m < 2/3, y > 2/3$	0	0	$1-y$	$1-c-m$	0	c	$m+y-1$	0
11	$c < 1/3, m > 2/3, y < 1/3, c > m - 2/3$	$1/3-c$	$c-m+2/3$	$2/3-y$	0	$m-2/3$	0	y	0
12	$c < 1/3, m > 2/3, y < 1/3, c > m - 2/3$	$1-m$	0	$m-c-y$	0	c	0	y	0
13	$c < 1/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, c > m - 2/3 > y - 1/3$	$1/3-c$	$c-m+2/3$	$1/3$	0	$m-y-1/3$	0	$1/3$	$y-1/3$
14	$c < 1/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, c > y - 1/3 > m - 2/3$	$1/3-c$	$c-y+1/3$	$1/3$	0	0	$y-m+1/3$	$1/3$	$m-2/3$
15	$c < 1/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, m - 2/3 > y - 1/3 > c$	$1-m$	0	$m-y$	0	0	0	$y-c$	c
16	$c < 1/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, m - 2/3 > c > y - 1/3$	$1-m$	0	$m-c-1/3$	0	$c-y+1/3$	0	$1/3$	$y-1/3$
17	$c < 1/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, y - 1/3 > c > m - 2/3$	$2/3-y$	0	$1/3$	$y-c-1/3$	0	$c-m+2/3$	$1/3$	$m-2/3$
18	$c < 1/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, y - 1/3 > m - 2/3 > c$	$2/3-y$	0	$1/3$	$y+1/3-m$	0	0	$m-1/3-c$	c
19	$c < 1/3, m > 2/3, y > 2/3, c > m - 2/3$	0	0	$1-y$	$1/3-c$	0	$c-m+2/3$	$y-1/3$	$m-2/3$
20	$c < 1/3, m > 2/3, y > 2/3, c > m - 2/3$	0	0	$1-y$	$1-m$	0	0	$m+y-c-1$	c
21	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y < 1/3, c - 1/3 > m$	$1-c-y$	$c-m$	0	y	m	0	0	0
22	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y < 1/3, c - 1/3 < m$	$2/3-m-y$	$1/3$	$m-c+1/3$	y	$c-1/3$	0	0	0
23	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, 1/3 < y < 2/3, c - 1/3 > m$	$2/3-c$	$c-m+1/3-y$	0	$1/3$	m	$y-1/3$	0	0
24	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, 1/3 < y < 2/3, c - 1/3 < m$	$1/3-m$	$2/3-y$	$m-c+1/3$	$1/3$	$c-1/3$	$y-1/3$	0	0
25	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y > 2/3, c - 1/3 > m > y - 2/3$	$2/3-c$	$c-m-1/3$	0	$1/3$	$m-y+2/3$	$1/3$	0	$y-2/3$
26	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y < 2/3, c - 1/3 > y - 2/3 > m$	$2/3-c$	$c-y+1/3$	0	$1/3$	0	$y-m-1/3$	0	m
27	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y < 2/3, m > c - 1/3 > y - 2/3$	$1/3-m$	0	$m-c+1/3$	$1/3$	$c-y+1/3$	$1/3$	0	$y-2/3$
28	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y < 2/3, m > y - 2/3 > c - 1/3$	$1/3-m$	0	$m-y+2/3$	$1/3$	0	$1/3$	$y-c-1/3$	$c-1/3$
29	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y < 2/3, y - 2/3 > c - 1/3 > m$	$1-y$	0	0	$y-c$	0	$c-m$	0	m
30	$1/3 < c < 2/3, m < 1/3, y < 2/3, y - 2/3 > m > c - 1/3$	$1-y$	0	0	$y-m-1/3$	0	$1/3$	$m-c+1/3$	$c-1/3$
31	$1/3 < c < 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, m - 1/3 > y$	$2/3-m$	$1/3$	$1/3+m-c-y$	0	$c-1/3$	0	y	0
32	$1/3 < c < 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, m - 1/3 < y$	$1/3-y$	$1/3$	$2/3-c$	$y+1/3-m$	$c-1/3$	0	$m-1/3$	0
33	$1/3 < c < 2/3, 1/3 < m < 2/3, 1/3 < y < 2/3$	0	$2/3-y$	$2/3-c$	$2/3-m$	$c-1/3$	$y-1/3$	$m-1/3$	0
34	$1/3 < c < 2/3, 1/3 < m < 2/3, y > 2/3, c > y - 1/3$	0	0	$2/3-c$	$2/3-m$	$c-y+1/3$	$1/3$	$m-1/3$	$y-2/3$
35	$1/3 < c < 2/3, 1/3 < m < 2/3, y > 2/3, y - 1/3 > c$	0	0	$1-y$	$2/3-m$	0	$1/3$	$m+y-c-2/3$	$c-1/3$
36	$1/3 < c < 2/3, m > 2/3, y < 1/3, c > m - 2/3$	0	$1-m$	$1-c-y$	0	$c+m-1$	0	y	0
37	$1/3 < c < 2/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, m - 1/3 > y$	0	$1-m$	$2/3-c$	0	$c+m-y-2/3$	0	$1/3$	$y-1/3$
38	$1/3 < c < 2/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, y > m - 1/3$	0	$2/3-y$	$2/3-c$	0	$c-1/3$	$y+1/3-m$	$1/3$	$m-2/3$
39	$1/3 < c < 2/3, m > 2/3, y > 2/3, c > y - 1/3$	0	0	$2/3-c$	0	$c-y+1/3$	$1-m$	$1/3$	$y+m-4/3$
40	$1/3 < c < 2/3, m > 2/3, y > 2/3, c > y - 1/3$	0	0	$1-y$	0	0	$1-m$	$y-c$	$c+m-1$
41	$c > 2/3, m < 1/3, y < 1/3, c - 2/3 > y$	$1-c$	$c-m-y$	0	0	m	y	0	0
42	$c > 2/3, m < 1/3, y < 1/3, c - 2/3 < y$	$1/3-y$	$2/3-m$	0	$y+2/3-c$	m	$c-2/3$	0	0
43	$c > 2/3, m < 1/3, 1/3 < y < 2/3$	0	$1-m-y$	0	$1-c$	m	$c+y-1$	0	0
44	$c > 2/3, m < 1/3, y > 2/3, m > y - 2/3$	0	$1/3-m$	0	$1-c$	$m+2/3-y$	$c-1/3$	0	$y-2/3$
45	$c > 2/3, m < 1/3, y > 2/3, y - 2/3 > m$	0	$1-y$	0	$1-c$	0	$c+y-m-1$	0	m
46	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, c - 2/3 > m - 1/3 > y$	$1-c$	$c-m$	0	0	$m-y$	0	0	y
47	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, c - 2/3 > y > m - 1/3$	$1-c$	$c-y-1/3$	0	0	$1/3$	$y+1/3-m$	0	$m-1/3$
48	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, m - 1/3 > c - 2/3 > y$	$2/3-m$	$1/3$	$m+1/3-c$	0	$c-y-1/3$	0	0	y
49	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, m - 1/3 > y > c - 2/3$	$2/3-m$	$1/3$	$m-y-1/3$	0	$1/3$	0	$y+2/3-c$	$c-2/3$
50	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, y > c - 2/3 > m - 1/3$	$1/3-y$	$1/3$	0	$y+2/3-c$	$1/3$	$c-m-1/3$	0	$m-1/3$
51	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y < 1/3, y > m - 1/3 > c - 2/3$	$1/3-y$	$1/3$	0	$y+1/3-m$	$1/3$	0	$m+1/3-c$	$c-2/3$
52	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, 1/3 < y < 2/3, c - 1/3 > m$	0	$2/3-y$	0	$1-c$	$1/3$	$c-m+y-2/3$	0	$m-1/3$
53	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, 1/3 < y < 2/3, c - 1/3 < m$	0	$2/3-y$	0	$2/3-m$	$1/3$	$y-1/3$	$m+1/3-c$	$c-2/3$
54	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y > 2/3, c - 1/3 > m$	0	0	0	$1-c$	$1-y$	$c-m$	0	$m+y-1$
55	$c > 2/3, 1/3 < m < 2/3, y > 2/3, m > c - 1/3$	0	0	0	$2/3-m$	$1-y$	$1/3$	$m+1/3-c$	$c+y-4/3$
56	$c > 2/3, m > 2/3, y < 1/3, c - 2/3 > y$	0	$1-m$	$1-c$	0	$c+m-y-1$	0	0	y
57	$c > 2/3, m > 2/3, y < 1/3, y > c - 2/3$	0	$1-m$	$1/3-y$	0	$m-1/3$	0	$y+2/3-c$	$c-2/3$
58	$c > 2/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, m - 1/3 > y$	0	$1-m$	0	0	$c+m-y-2/3$	0	$1-c$	$y-1/3$
59	$c > 2/3, m > 2/3, 1/3 < y < 2/3, y > m - 1/3$	0	$2/3-y$	0	0	$c-1/3$	$y+1/3-m$	$1-c$	$m-2/3$
60	$c > 2/3, m > 2/3, y > 2/3$	0	0	0	0	$1-y$	$1-m$	$1-c$	$c+m+y-2$

2.3 実験結果と考察

2.3.1 計算条件とディザマトリックス

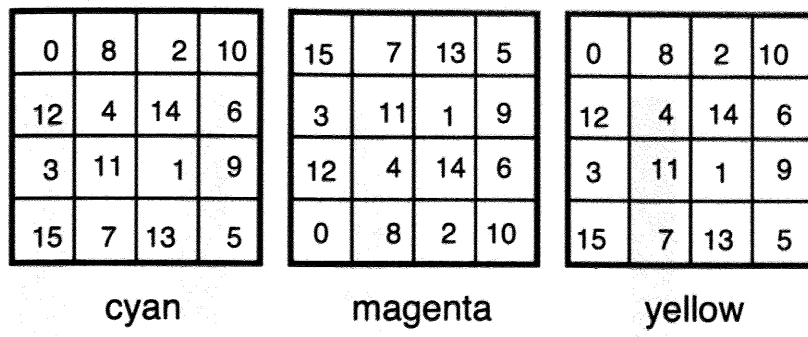
各モデルの色域を計算するために、インクジェットカラープリンタ（EPSON 製 PM-700C）の値を用いた。このプリンタによるベタの1次、2次および3次色の色票から測色した基本8色の3刺激値を Table 2-4 に掲げる。なお、印刷用紙はスーパーファイン専用紙を用い、色補正なしモードでプリントした。また、測色には分光測色計（グレッタ製 スペクトロリノ）を用いた。

Table 2-4 基本8色の3刺激値

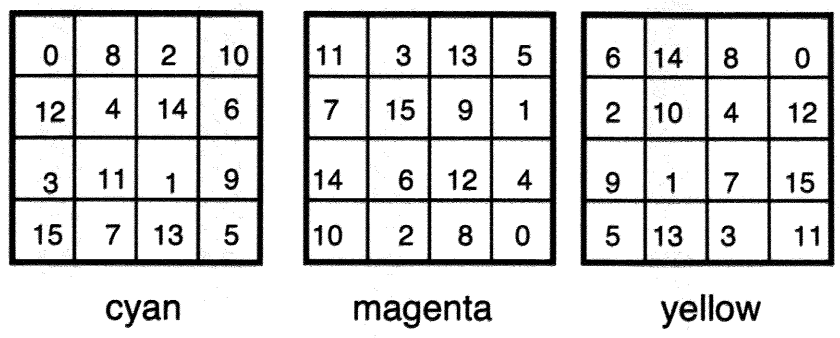
color <i>i</i>	X	Y	Z	L*	a*	b*
W	82.97	84.46	78.95	93.65	2.98	-8.11
C	10.33	14.61	43.25	45.1	-25.85	-55.99
M	33.8	16.98	14.29	48.23	75.7	-0.78
Y	66.54	62.74	4.27	83.31	13.84	96.65
CM(B)	5.22	4.19	15.33	24.29	15.5	-44.71
CY(G)	5.44	10.49	4.59	38.71	-44.03	17.94
MY(R)	32.22	17.48	4.24	48.86	67.43	37.44
CMY(K)	1.87	1.92	1.66	15.06	0.46	-0.87

Fig.2-3 にカラー描画のためのディザマトリックスの例を示す。ここで、Fig.2-3(a)は C と M マトリックスの閾値が min-max モデルでの最小重なりを作り出すように順方向と逆方向に配置されている。Fig.2-3(b)では min モデルに対応して各色の閾値を 1/3 ずつ回転的にずらせて配置している。ここでは基本的な 4×4 組織的ディザマトリックスを示したが、8×8、16×16 のようなこれより大きいマトリックスでも同様な方法で簡単に決められる。これらのマトリックスを使うことにより coaxial モデルとは異なる彩度のカラー画像を作成できる。

このようにして 8 色方向。これは、Fig.2-3(b)に示すとおり、M と Y の重なりが 50% 以下では重なりがないように併置され、50% 以上では M と Y の重なりで 1/3 重なりが生じるようになるからである。Fig.2-3(c)には、CIE L*a*b* 空間に 3 色線の色票を並べた。Fig.2-4 の BGR グラデーションパターンの実測値を丸印でプロットしてある。Fig.2-3(d)はこれを 1/3 重なりへ投影した結果を示す。両図から観察されるように実測値は計算値によく一致している。



(a) min-max model



(b) min model

Fig. 2-3 カラー描画のためのディザマトリックスの例

2.3.2 2次色の解析

Fig.2-4 はモデル間の典型的な色の違いを示している。ここで、BGR 階調パターンは2つの原色、C+M, C+Y, M+Y を混ぜて生成してある。例えば、coaxial モデルは C と M が完全に重なっているために、飽和度の低い B 階調になっているのに対し、C と M を併置した場合 (side by side) は異なった B の発色をしている。R 階調、G 階調でも同様に2つのモデルでは異なった発色になる。Fig.2-5 は RGB 階調がモデルによって如何に変化するかを示す。例えば、M と Y が同じ%で混ぜられた時に、R 階調が異なった軌跡を描くことを示している。Fig.2-5(a)に示すように coaxial モデルでは、点線のように R 階調は W から R に直線的に変化するのに対し、side by side モデルでは、実線で示すように全く異なった色相移動を示す。色相の軌跡は面積率が 50%の点までは MY 軸上を動き、その後は屈曲して R へ向かう。これは、Fig.2-5(b)に示すとおり、M と Y のインクは 50%以下では重なりがないように併置され、50%以上では M と Y の重なりで2次色 R が生じるようになるからである。Fig.2-5(c)には、CIELAB 空間に2色重ねの計算値を実線で示し、Fig.2-4 の BGR グラデーションパターンの実測値を丸印でプロットしてある。Fig.2-5(d)にはこれを a*-b*平面へ投影した結果を示す。両図から観察されるように実測値は計算値によく一致している。

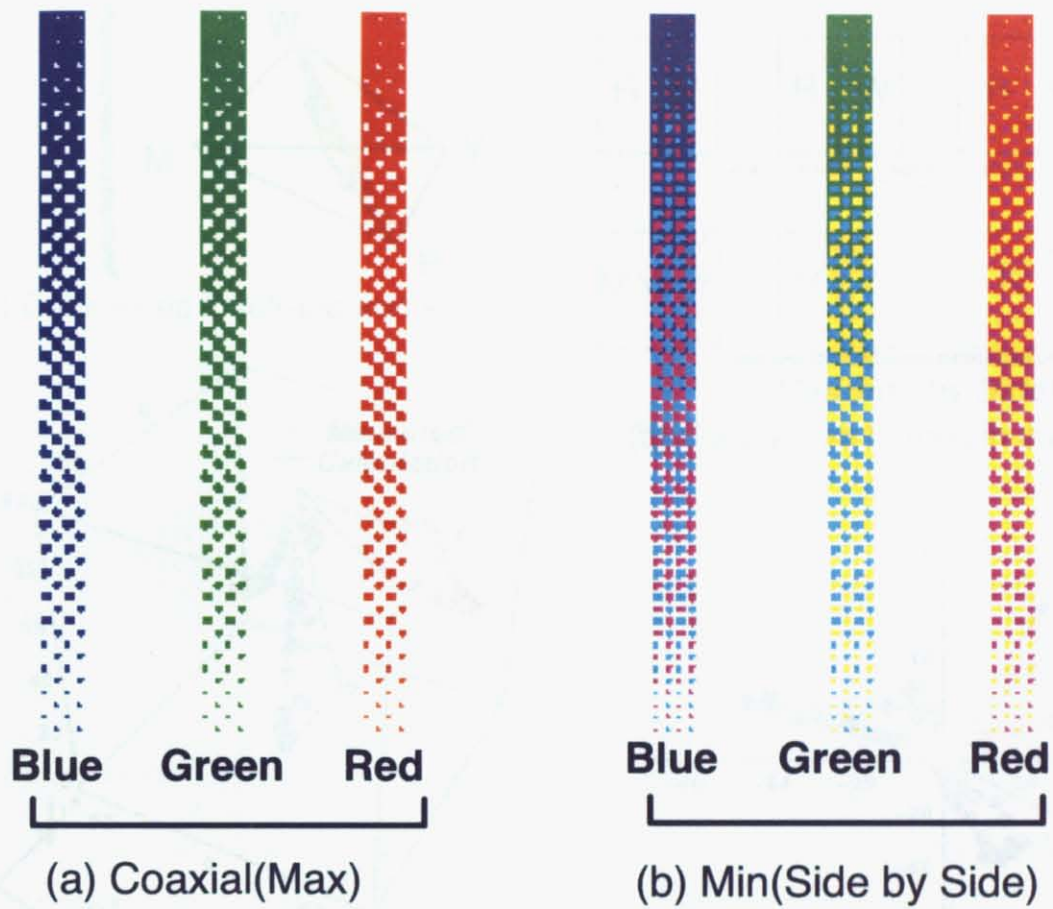
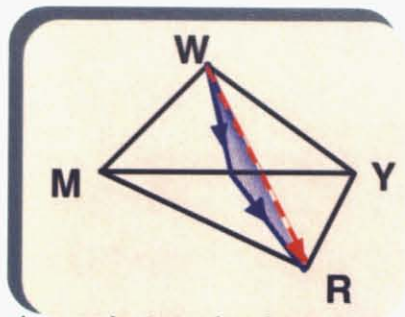
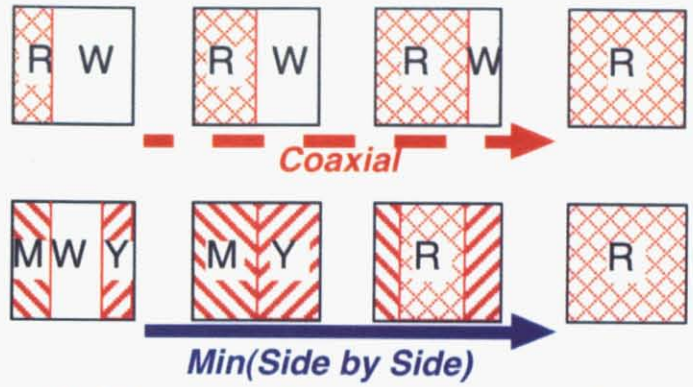


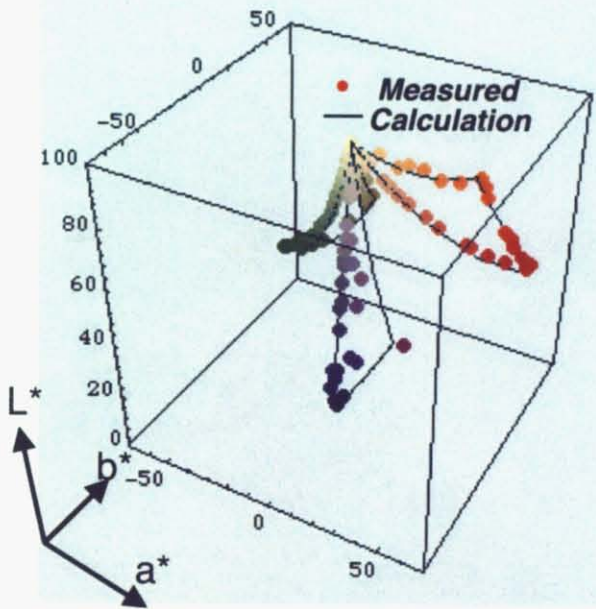
Fig. 2-4 coaxial モデルと min モデルの重ね合わせ発色の違い



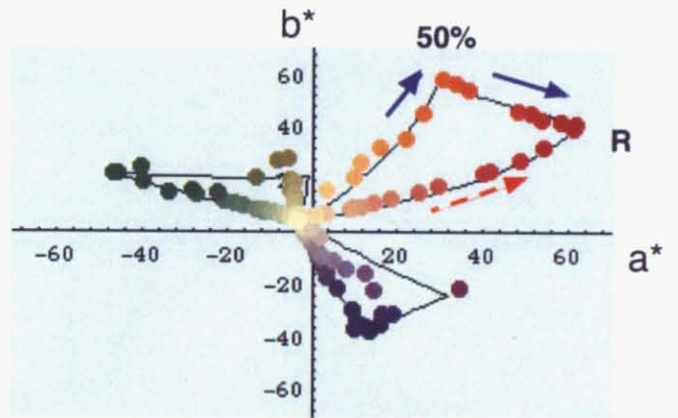
(a) Color locus in tetrahedron space.



(b) Color areas formed in the case of $p=q$.



(c) 3D view in $L^*a^*b^*$ space.



(d) Locus in a^*-b^* plane.

Fig. 2-5 coaxial モデルと min モデルの RGB 階調の違い

2.3.3 色立体外郭と内部点の観察

色立体の外郭表面は6つの平面から構成され、それぞれ W-M-Y(R), W-C-Y(G), W-C-M(B), C-(B)-(G)-(K), M-(B)-(R)-(K), Y-(G)-(B)-(K)の色点を結ぶ4面体からなる。Fig.2-6 は計算によって得られた W-C-M-(B)表面の例を示す。一般に W,C,M,B は同じ平面上にはなくそれぞれのドット配置により特定の4面体を作る。min-med、min-max、min 各モデルは coaxial モデルよりも外郭表面がより広く形成されている。

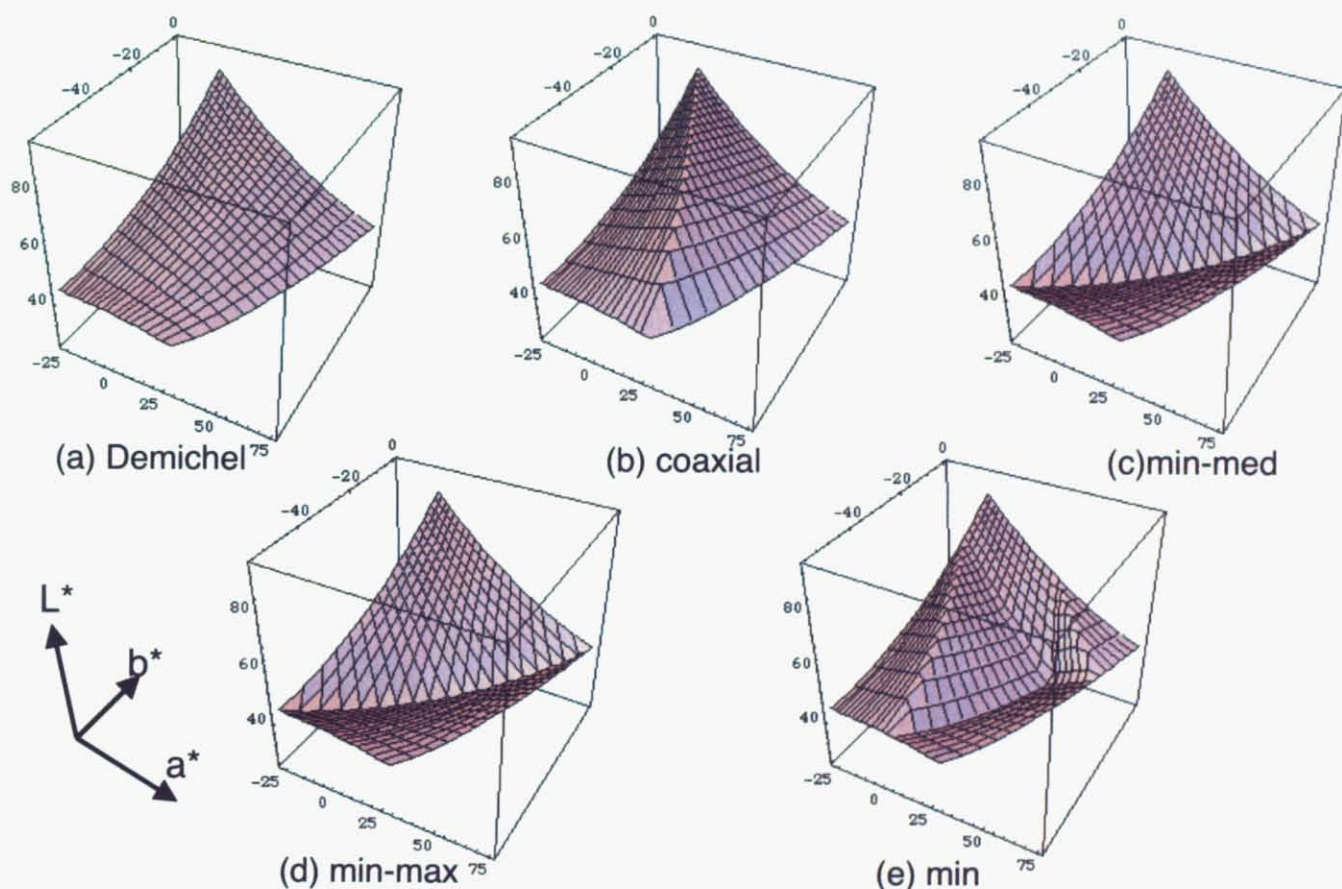


Fig. 2-6 各モデルによる W-C-M-(B)表面の計算例

色立体の3次元外郭表面は6つの4面体の合成で得られる。Fig.2-7 は各モデルでの外郭表面の計算結果を示す。min-med、min-max 両モデルではCとMを併置した場合を示している。デジタルプリンタで使われている coaxial モデルはこれらの中で一番小さい色域と観察される。min モデルは不規則な形をしているが、min-med、min-max 両モデルと同様に、併置混色の各モデルは色立体が大きくなっているように観察される。

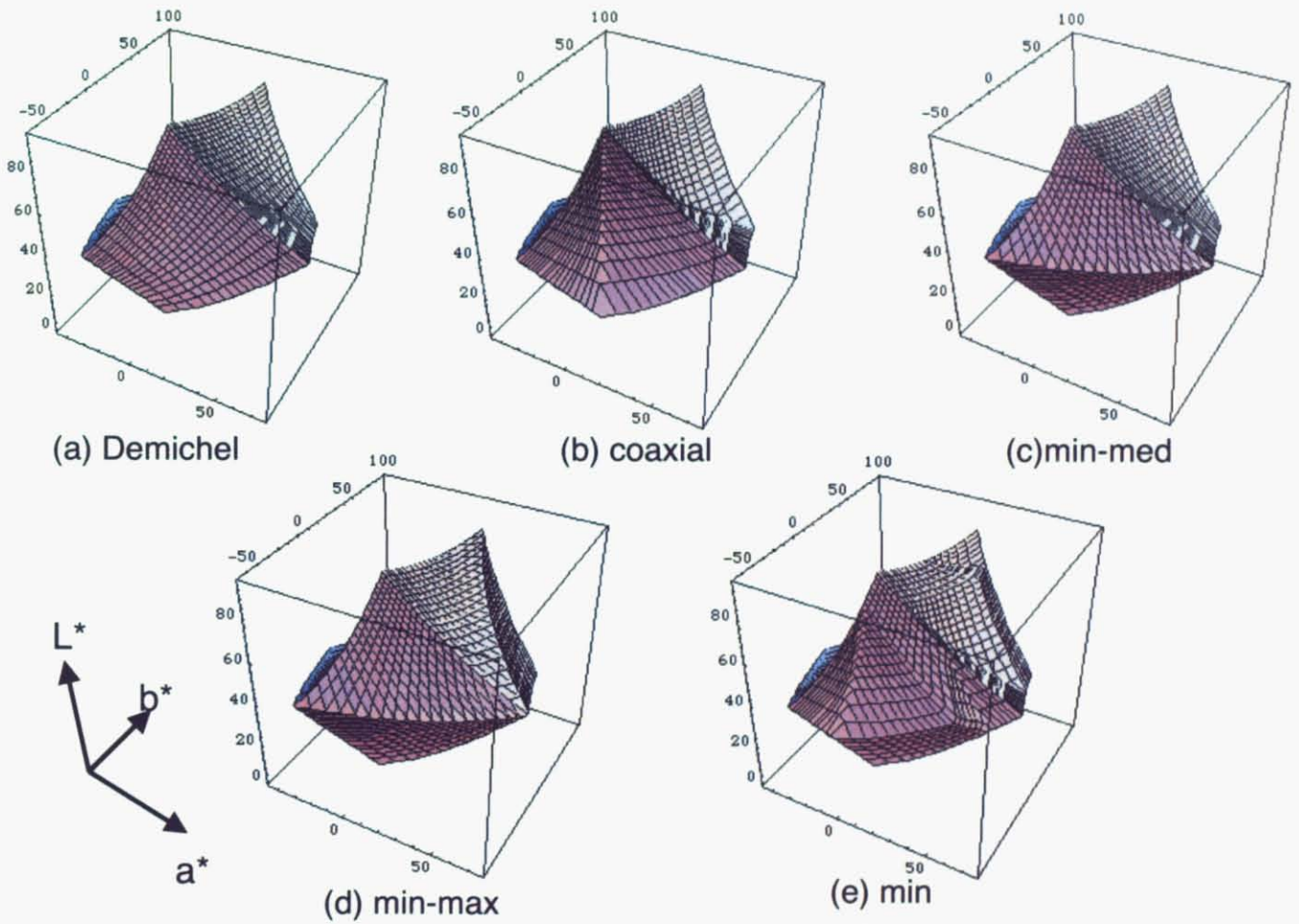


Fig. 2-7 各モデルの外郭表面の計算結果

色域の詳細を色立体の内部で綿密に調べるために、c,m,y 各1次色インクの比率を0から1まで0.1ステップずつ変化させて $11^3=1331$ 色を計算し、色立体の内部を3次元表示して各モデルを比較したのが Fig.2-8 である。coaxial モデルは色立体の内部の分布が最も不規則で、空間内部に隙間が見られる。これは色立体内部で再現不可能な色域があることによる。min-med、min-max 両モデルは同じようにバランスの良い分布を示し、Demichel、min モデルも CMY 各1次色からのバランスの良い混色を作り出している。

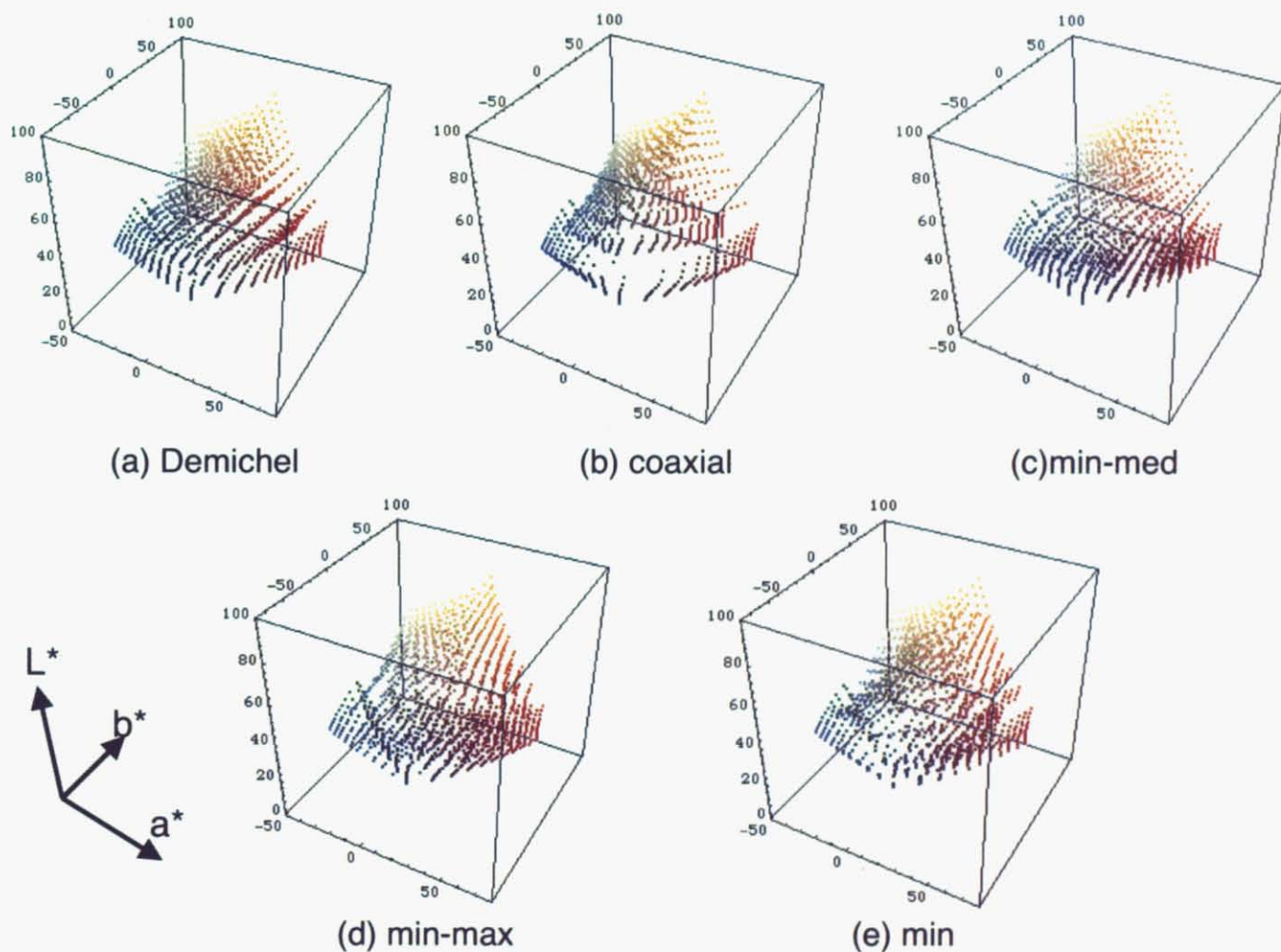


Fig. 2-8 各モデルの色立体内部の色点分布

色域の違いは、ある明度で切り取った2次元表示を行うことにより明瞭になる。Fig.2-9は $40 < L^* < 60$ で切り取った a^*-b^* 平面での再現色域の比較である。coaxial モデルは他のものに比べて、きめの粗い分布になっており、2次色の B が発生しやすく十分な青味の色域を満たしていない。これに対し、min-med、min-max、min 各モデルはそれぞれ特に青味の色で広い色域を与えている。

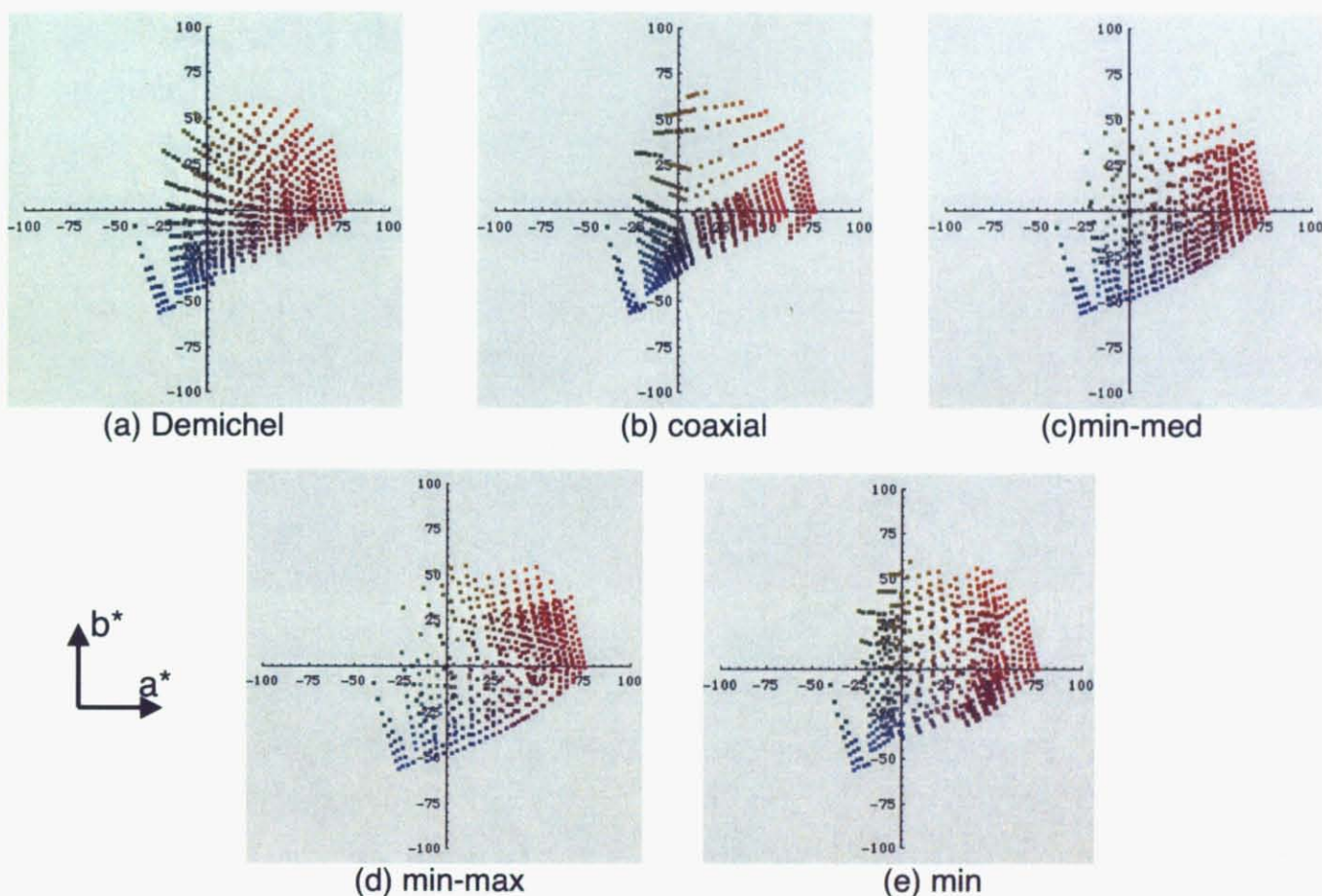


Fig. 2-9 各モデルの a^*-b^* 平面での再現色域の比較 ($40 < L^* < 60$)

2.3.4 各色立体の体積

各モデルで示される色立体の CIELAB 空間上での体積を比べることができれば、色域を議論する上で都合がよい。しかし、非線形空間での立体の体積を求めることは容易ではない。Kapple は CIELAB 空間上での色立体を a^* - b^* 面に投影し、Green の定理²¹を用いて、その面積を計算する方法を示している³。また、Maphy は各種線数の印刷物で Neugebauer 式を細密化して求めた色度点を、明度ごと、色相角ごとに数えた結果を示している¹⁴。色域立体の体積については第3章で詳しく検討するが、ここでは Green の定理による線積分から求める方法を示す。

Green の定理は閉曲線(S)内の面積(A)を以下の線積分で表す。

$$A = \frac{1}{2} \oint_S (x dy - y dx) \quad (2-6)$$

具体的には、次のように計算する。ある始点(i)と隣り合う点(i+1)の2点について、x 軸での平均値に y 軸での差分値を掛けた値から、x 軸での差分値に y 軸での平均値を掛けた値を引く。これを反時計方向に順に行って足し合わせていき、最後に始点に戻る。x を a^* に、y を b^* に対応させて示すと以下のようなになる³。

$$A = \frac{1}{2} \sum_S \left\{ \frac{a^*_{i+1} + a^*_i}{2} (b^*_{i+1} - b^*_i) - \frac{b^*_{i+1} + b^*_i}{2} (a^*_{i+1} - a^*_i) \right\} \quad (2-7)$$

各モデルの色立体外郭面について、c,m,y 各1次色インクの比率を0から1まで0.04 ステップずつ変化させた $26 \times 6 = 4056$ 点の計算値に対して、 L^* を4刻みでスライスして適当な色相角ごとに a^* と b^* を選んだ。各モデルの $41 < L^* < 45$ の場合について、選出した a^* と b^* の点を Fig.2-10 に示す。



Fig. 2-10. a^* - b^* plane projection of color gamuts for various color models.

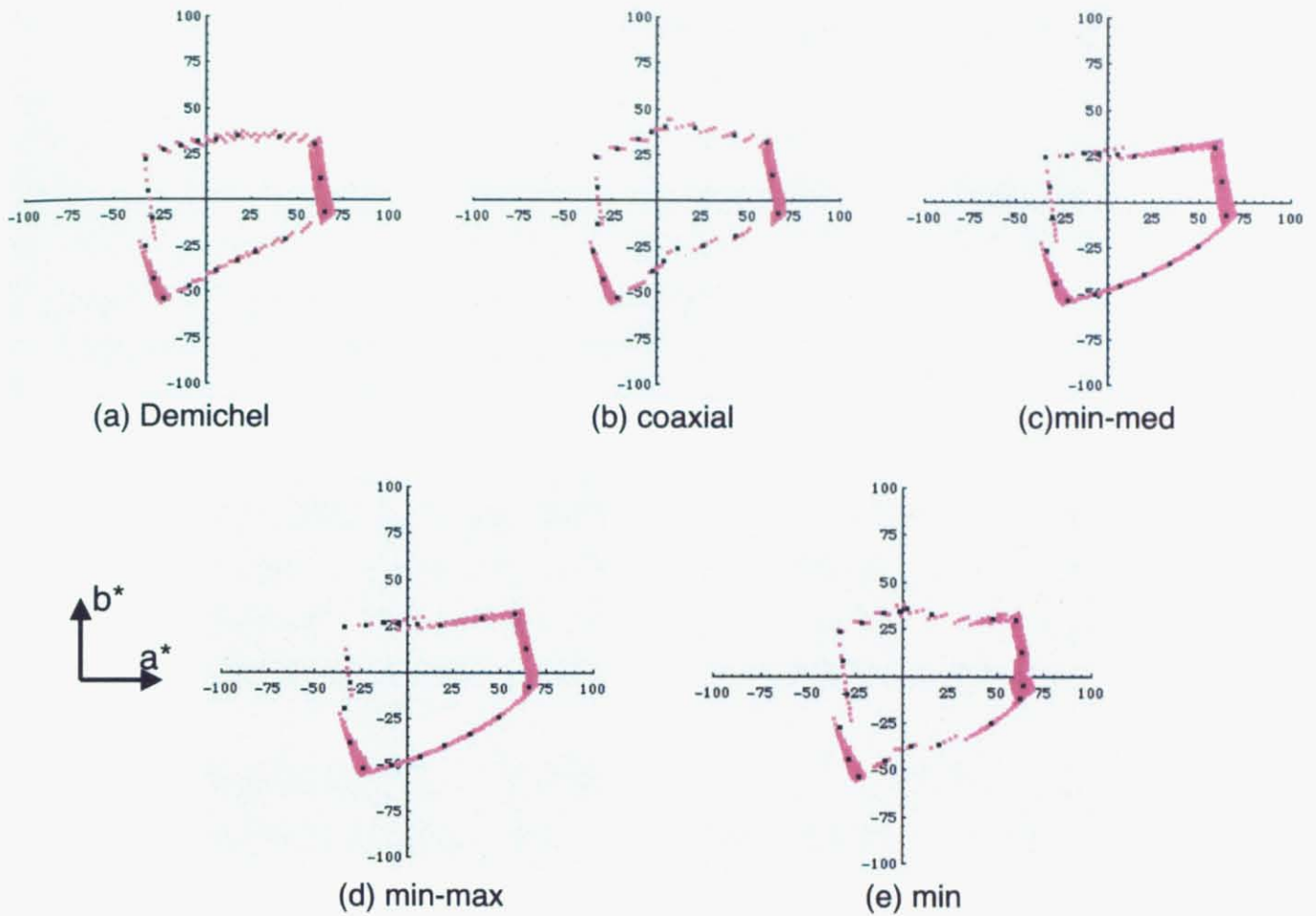


Fig. 2-10 各モデルの色立体外郭面での $41 < L^* < 45$ で選出した a^* と b^* の点

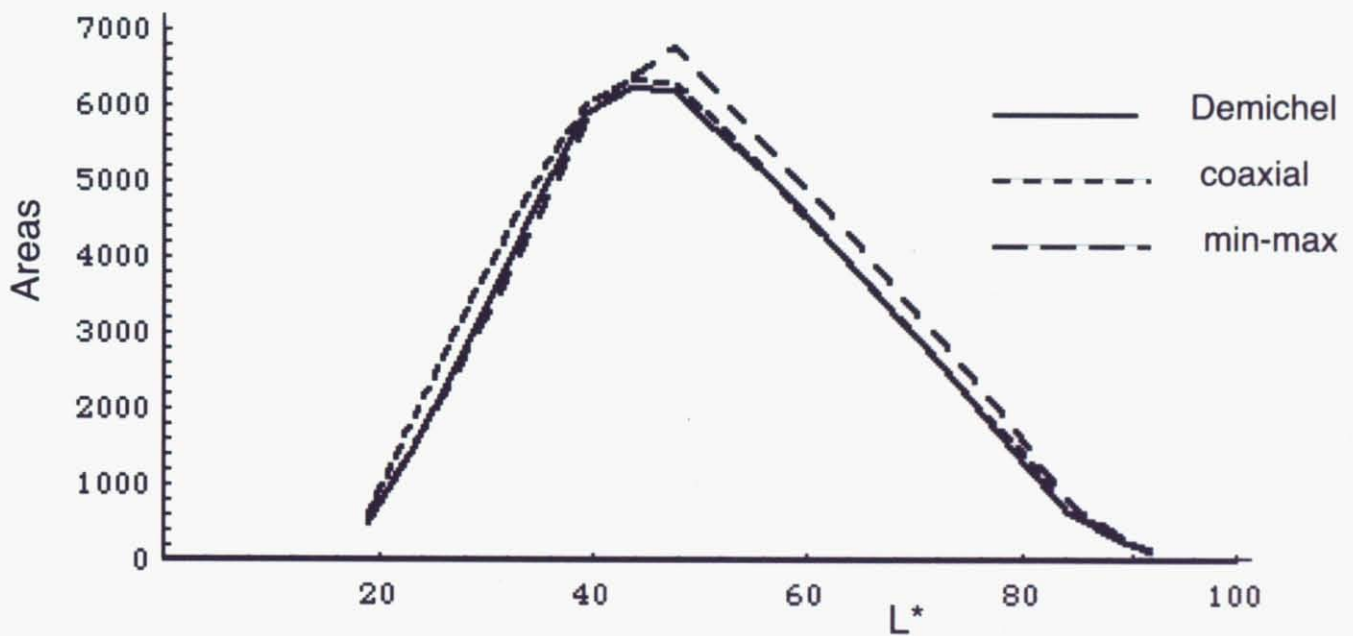


Fig. 2-11 Demichel、coaxial、min-max 3モデルの各 L^* スライスでの面積計算結果

(2-6)式を使って各 L*スライス間での面積を計算し、Demichel、coaxial、min-max の 3 モデルについての結果を L*の段階ごとに Fig.2-11 のように示した。coaxial モデルは他のモデルよりも低明度側で面積が大きくなり、min-max モデルは中明度から高明度側で面積が大きくなっている。min-med、min、両モデルは min-max モデルと同様の結果を示したが、その程度は min-max モデルよりも小さく、見づらくなるので Fig.2-11 では割愛してある。

coaxial モデルが低明度側で面積が大きくなる理由としては、Fig.2-10 で見られるように、Y 方向に若干広がっており、高明度発色の Y が減法混色の 2 次色による濁りで、低明度側へ引っ張られて色域が拡大されたものと考えられる。また、min-max モデルが中明度から高明度側で面積が大きくなる理由としては、併置配置によって加法混色となるために、濁りがとれて明るく再現されるためである。特に C と M が 50%までは重ならないように配置されているため、Fig.2-10 で見られるように B 方向の濁りが大きく改善されている。min-med モデルも同様に B 方向の濁りが改善される。min モデルでは cmy の配置が 1/3 づつのずれのために min-max、min-med 両モデルよりも改善度合いが若干小さい。

2.4 Yule-Neilsen による N 値の検討

紙上での 2 値記録方式の階調再現を予測する時に、光学的ドットゲインが問題となることがある。Yule と Neilsen は紙中の光の挙動を考察し、単色階調でのモデルを示した²³。Yule-Neilsen 効果を考慮すると Demichel での Neugebauer 式は以下のように示される。

$$T = \sum_{i=1}^8 \left(a_i T_i^{1/n} \right)^n \quad (2-8)$$

ここで、n 値は Yule-Neilsen パラメータで、幾つかの要因によって影響を受ける。それは、ドットサイズ、ドットの重なり、紙質が 3 つの大きな要因である。式(2-8)によって n=2 における Demichel の Neugebauer 予測値を算出し、n=1 と比べた結果が Fig.2-12 である。Fig.2-12 では L*-a*面へのプロットで、色立体の内部点は除き外側の点だけを示した。大きい淡色点は n=1 の場合を示し、小さい黒点は n=2 の場合を示す。全体的に n=1 よりも n=2 の場合に明度が低くなっている。彩度について見てみると、高明度部では、中明度以下に比べて n=1 よりも n=2 の場合に彩度が広がっている。Fig.2-13 では式(1-7)によって各 L*毎の色域面積を算出した結果を示す。n=2 の色域は n=1 よりも低明度部では小さいが、中明度部から高明度部では大きくなり全体としては広い色域となる。各モデルで面積累積値を算出した結果を Table 2-5 に示す。他の 4 つのモデルでも同様な結果を示した。coaxial モデルは n 値が 1 より大きくなると色域がより大きくなっていることが注目される。n 値はドットの配置状態によって異なる。各モデルにおける n 値と色域の関係も興味深い。

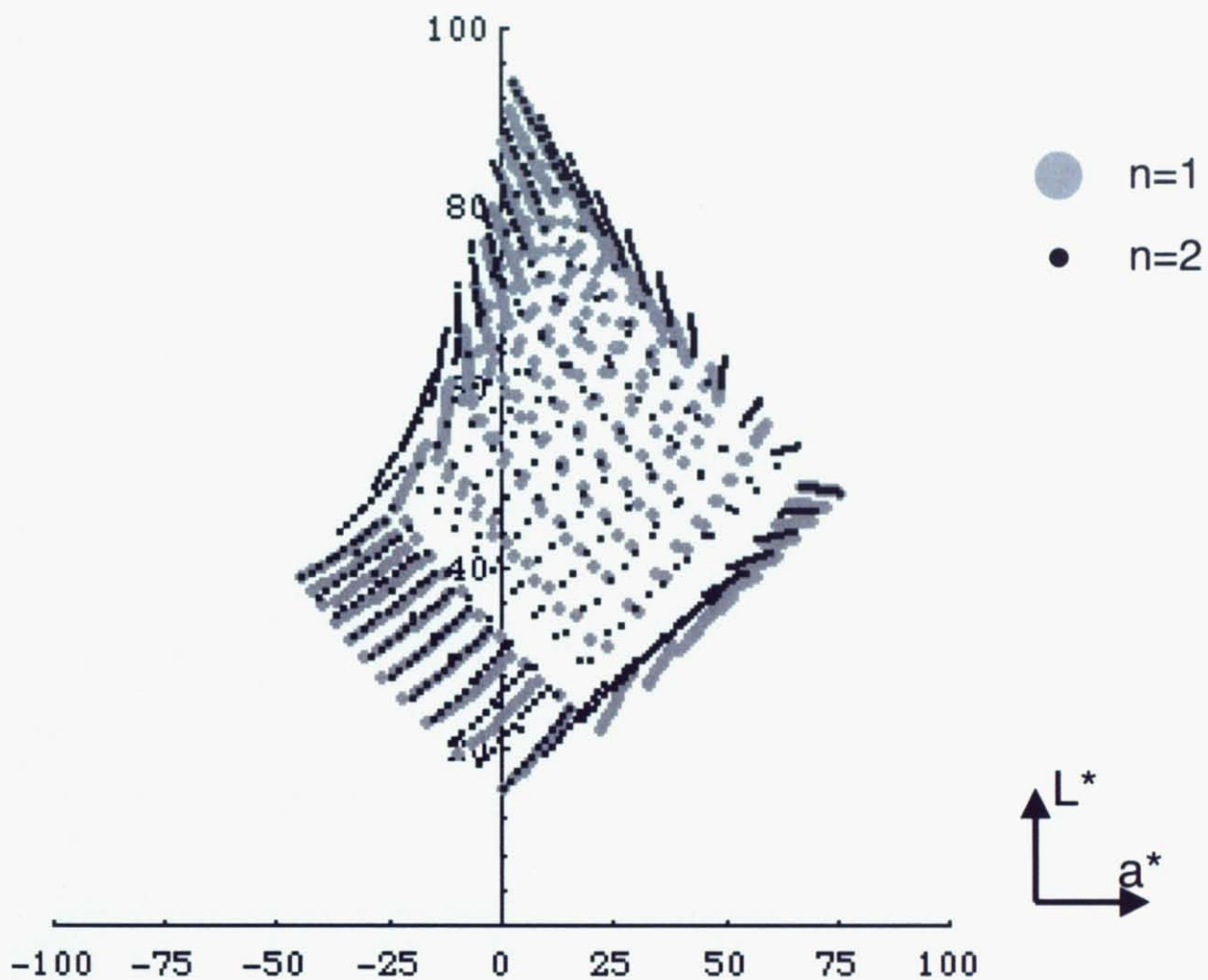


Fig. 2-12 n=1 と n=2 での Demichel の Neugebauer 予測値を比較した結果

Table 2-5 各モデルの n=1 と n=2 での面積累積値の比較

		Demichel	coaxial	min-max	min-med	min
n=1	0<L*<50	30187.62	32342.82	30506.68	30187.80	30032.20
	50<L*<100	28443.46	28835.67	31521.70	29404.90	28217.92
	Total	58631.08	61178.49	62028.37	59592.70	58250.11
n=2	0<L*<50	28295.42	30142.09	27457.18	27223.64	27500.78
	50<L*<100	36651.40	38465.88	39327.71	36537.35	35892.68
	Total	64946.81	68607.97	66784.89	63760.99	63393.45

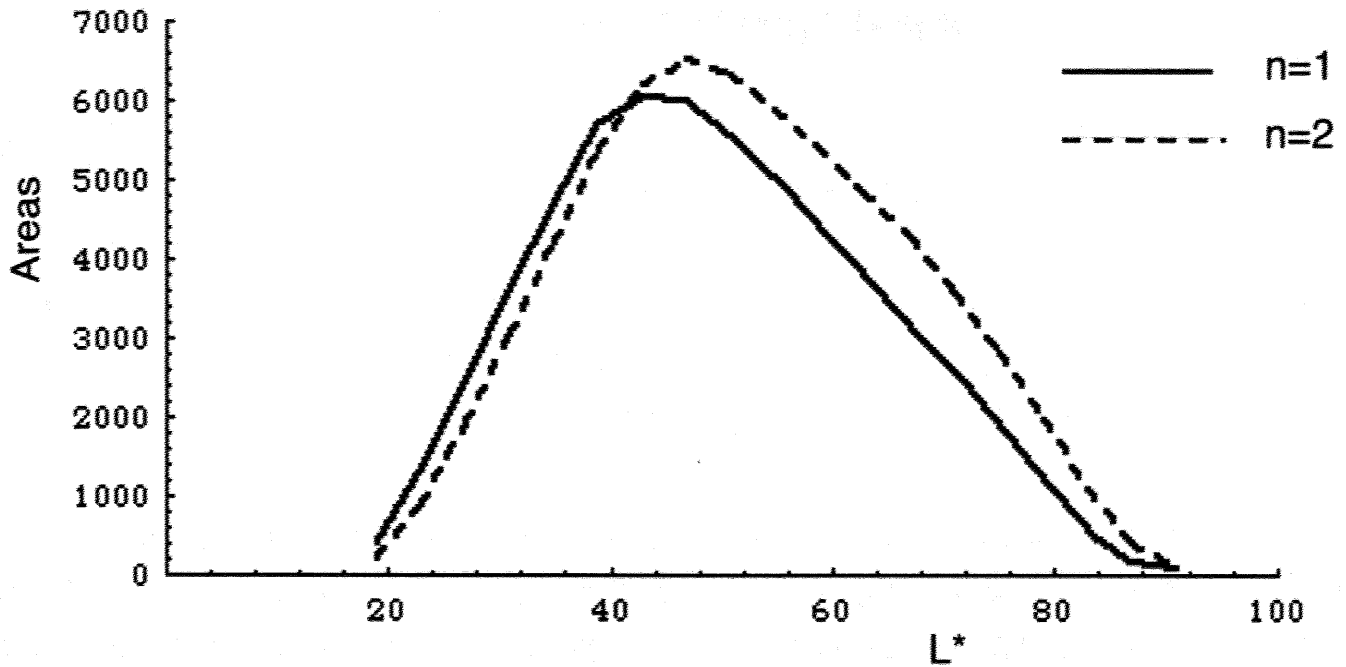


Fig. 1-13 n=1 と n=2 での Demichel モデルの各 L*毎の色域面積算出結果

2.5 まとめ

CMY インクの加法混色によりデジタルドット配置モデルでの基本的な色立体の構造を解析した。色立体の外郭表面は平らではなく 4 面体の混色で決められる。3つの基本的な併置配置モデルでの 3次元色域を典型的な coaxial のものと比較検討を行い、以下のことを解明した。

- ・ coaxial モデルは色立体内部の分布に粗密ができ、再現できる色に偏りが生じる。色立体の外郭では低明度側において濁りにより暗い方向へ色域が広がる。
- ・ 3つの併置配置モデルは色立体内部の分布がバランス良く、偏りのない色再現が出来る。色立体の外郭は、中明度から高明度側では加法混色により濁りがとれて明るい方向へより広い色域を与える。特にブルーの濁りが改善される。
- ・ Yule-Neilsen パラメータの n 値は各ドット配置モデルの色域の大きさに影響を与える。正確な色域の大きさは各モデルの正確な n 値の測定が必要である。一方で、Viggiano が分光値での Neugebauer 式を報告しているように²⁴、n 値も分光値に適用するべきかもしれない。

これらのモデルを実際の自然画像に適用するために、それぞれのディザ法に対するアルゴリズムを開発することが必要である。また、この根本的な構想は誤差拡散法でのドット配置に拡張する方針である。

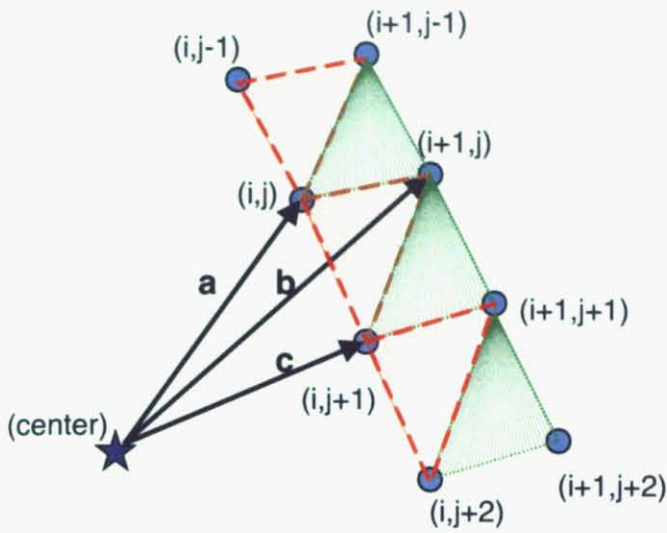
第3章 色立体の色域抽出と体積算出

3.1 はじめに

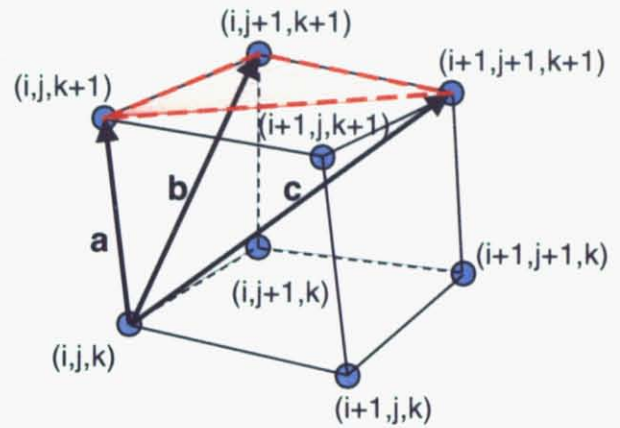
近年、インターネットの急速な普及や印刷データの電子化に伴い、入力から出力の各デバイス間での色域を調整するカラーマネージメントの研究が活発に行われているが、画像全体の色域を把握する上で、画像色立体の色域外郭及びその体積を知ることが非常に重要である。CIELAB 空間上での色立体表面の形状や体積を知ることができれば、色域を議論する上で非常に都合がよい。しかし、非線形空間での立体の体積を求めることは容易ではない。

第2章でも、立体を等間隔に切って断面形状を求め、各面積を積算する方法を応用して体積算出の検討を試みた。この方法でも体積を算出できるが、対象とした面積間での立体形状に凹凸があるような場合には不正確となるし、間隔を細かく取り過ぎることも得策とは言いきれない。本章では四面体の体積計算を利用することによって、立体的に体積を正確に算出する方法を探る。

理論モデルでは色空間上の色度点配列から四面体を構成して体積計算を行える。しかし、自然画像においては画素の色空間上での色度点はわかっているが、その配列順を知ることは難しい。分布した色度点から色相と明度を極座標分割により最外郭点を配列順に抽出し、中心点から構成される四面体で体積を計算する手法を考案した。^{28,29} 色立体の中心点から成す四面体において、中心からのベクトル方向に対して最外郭3点で構成した面が外向きか内向きかを判定し、四面体の体積値に正負を与えて高精度で体積計算した³⁰⁻³³。プリンタ混色モデルにおいて、この方法を用いた計算値と理論値との良好な一致を確認することができた。自然画像での外郭抽出と体積算出結果、および代表的なデバイスであるモニタとプリンタの色域算出結果を併せて紹介する²⁸⁻³³。



(a) The case of known surface points.



(b) The case of known inner points.

Fig.3-1 色立体の色度点配列が既知の場合の四面体による体積算出

3.2.2 乱雑な色度点群からの体積算出

自然画像では、画素の CIELAB 空間上での色度点分布は与えられるが、その配列順は未知である。立体をあるスライス面に投影した面積率を積算するか、配列を決定づける何らかの方法が必要となる。乱雑な色度点群に対して、配列順に格子を形成して、最外郭点を抽出できれば、その最外郭 3 点と中心点とで四面体を構成し、ベクトルのスカラー 3 重積で体積が求められる。

以下に、色立体の外郭点を抽出して配列を作成する詳細な手順を示す。

- (1) 3次元色空間の一軸当たりの最小分割単位を知るために画像（画素数 N ）の立方根 R_t を求める。

$$R_t = \sqrt[3]{N} \quad (3-5)$$

- (2) 画像の平均（中心点）を求める。

$$(L^*, a^*, b^*)_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (L^*_i, a^*_i, b^*_i) \quad ; i \text{ は画素番号を表す。} \quad (3-6)$$

一般の画像では画素数の立方根をとると端数が出るので、その端数分は中心点から至近距離にある色点を端数分だけ画素数から差し引く。

- (3) 最高明度点 L^*_{max} の座標点と最低明度点 L^*_{min} の座標点を求める。

(4) 画像の中心点からの色相角を求める。

$$H_{angle} = \tan^{-1} \left(\frac{b^* - b^*_{avg}}{a^* - a^*_{avg}} \right) \quad (3-7)$$

(5) Fig.3-2(a)に示すように、画素数が Rt の 2 乗個数で一定になるように色相を分割する。
(色相角の分割数が Rt 個だけできる。)

(6) 分割された一つの色相角内で、中心点を L*軸に沿って伸ばした中心軸に対する L*の
角度 L^*_{angle} を計算する。

$$L^*_{angle} = (\pi/2) + \tan^{-1} \left(\frac{L^* - L^*_{avg}}{[(a^* - a^*_{avg})^2 + (b^* - b^*_{avg})^2]^{1/2}} \right) \quad (3-8)$$

(7) Fig.3-2(b)に示すように、 L^*_{angle} を画素数が Rt の個数で一定になるように分割する。(L*
角度の分割数が Rt 個だけできる。)

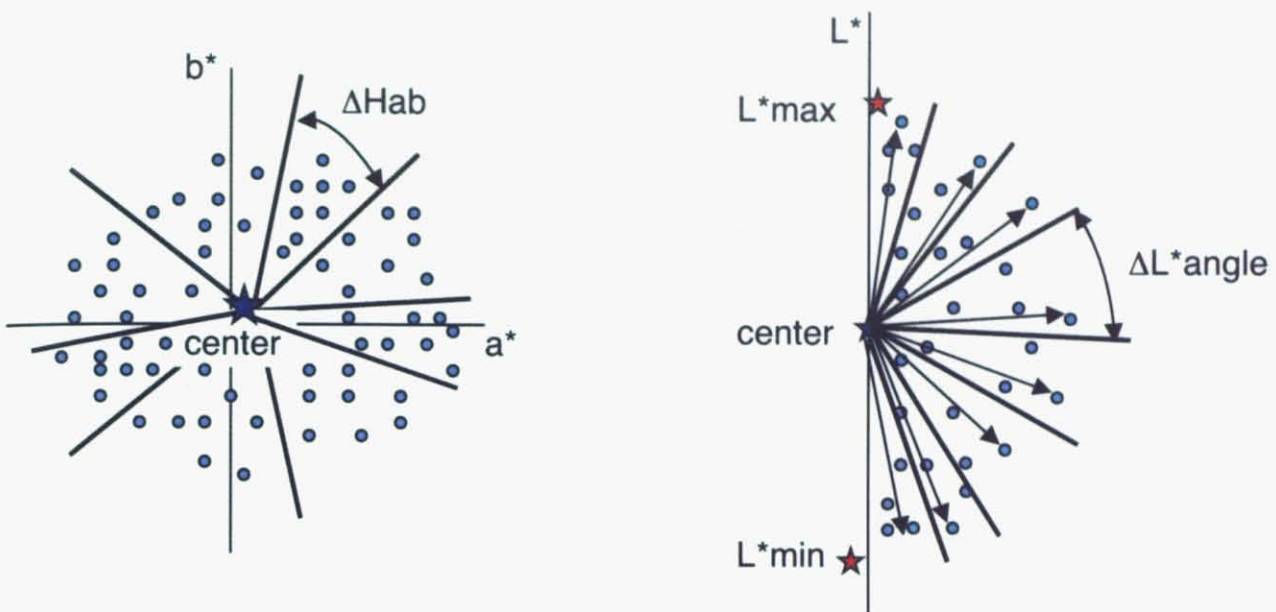
(7) 初期の発案では L*値自体で分割をしたが、自然画像の凹部への対応が悪く、L*を角
度で分割することにした²⁸⁻³³。

(8) 分割された一つの L*内で最外郭点を選ぶ。

$$(L^*, a^*, b^*)_{EXT} = \text{Max}_j \left\| \sqrt{(L^*_j - L^*_{avg})^2 + (a^*_j - a^*_{avg})^2 + (b^*_j - b^*_{avg})^2} \right\| \quad (3-9)$$

(9) 一つの色相角内で各 L*分割内の最外郭点を選んだら、 L*max の座標点と L*min の
座標点を両端に加えて一つの行とする。

(10) 分割された全ての色相角について (9) の処理を行ってそれぞれの行を作成し、最
初の行を最終行に加えて全体の行列を完成させる。(Fig. 3-3)



(a) Hue angle division.

(b) L* angle division and color values selection.

Fig. 3-2 色度点分布からの色域分割法

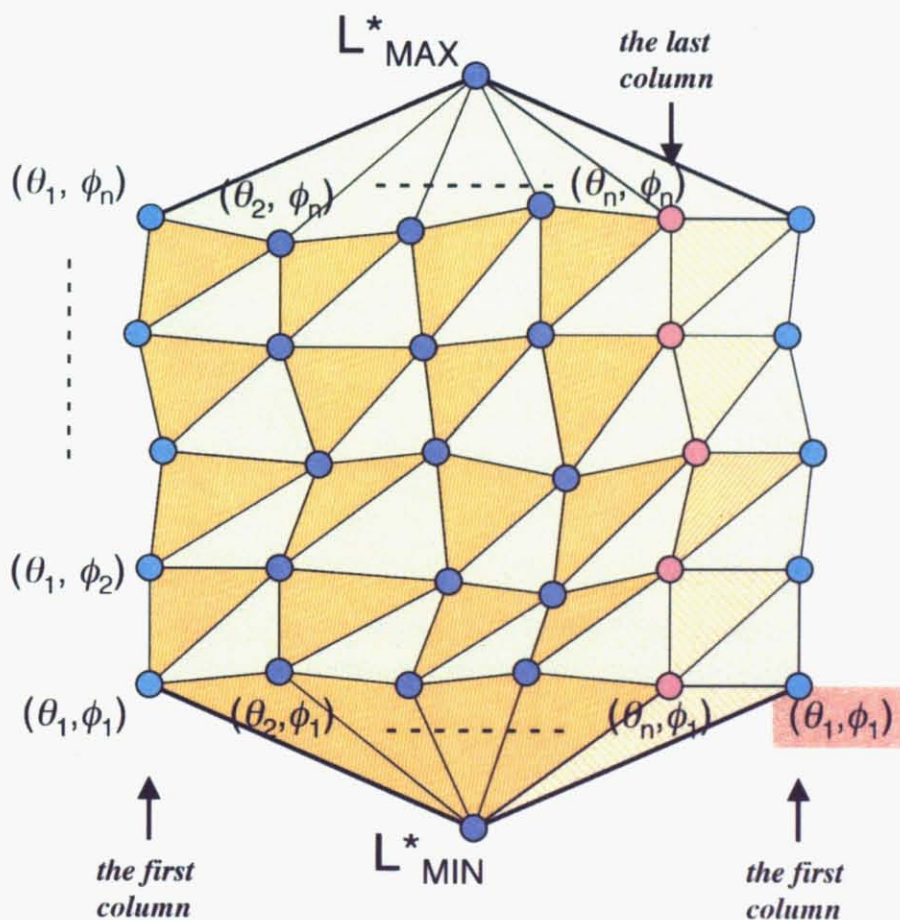


Fig. 3-3 色立体の外郭点を抽出して作成された配列

画像の色分布には疎密の偏りがあるため、分布数を一定に行う本分割方式では各分割空間の大きさが異なり、抽出された外郭点は一様な並びをなさない。このため配列の順番に三角面を構成しても、Fig.3-4(a)の法線ベクトルの向きに示すように、必ずしもその面が中心点から外側を向いているとは限らない。内側を向いている面があると、Fig.3-4(b)の四面体断面を示した模式図のように体積計算において重複による計算ミスが生じ、実際の体積よりも大きな値となってしまう。正確な体積値を求めるためには、Fig.3-4(c)のように重複部を取り除いて体積算出をする必要がある。抽出面の向きを判定するには、抽出面の法線ベクトルと中心点から抽出面に向かう放射ベクトルとの内積結果による符号の±によって判定できる。³⁵

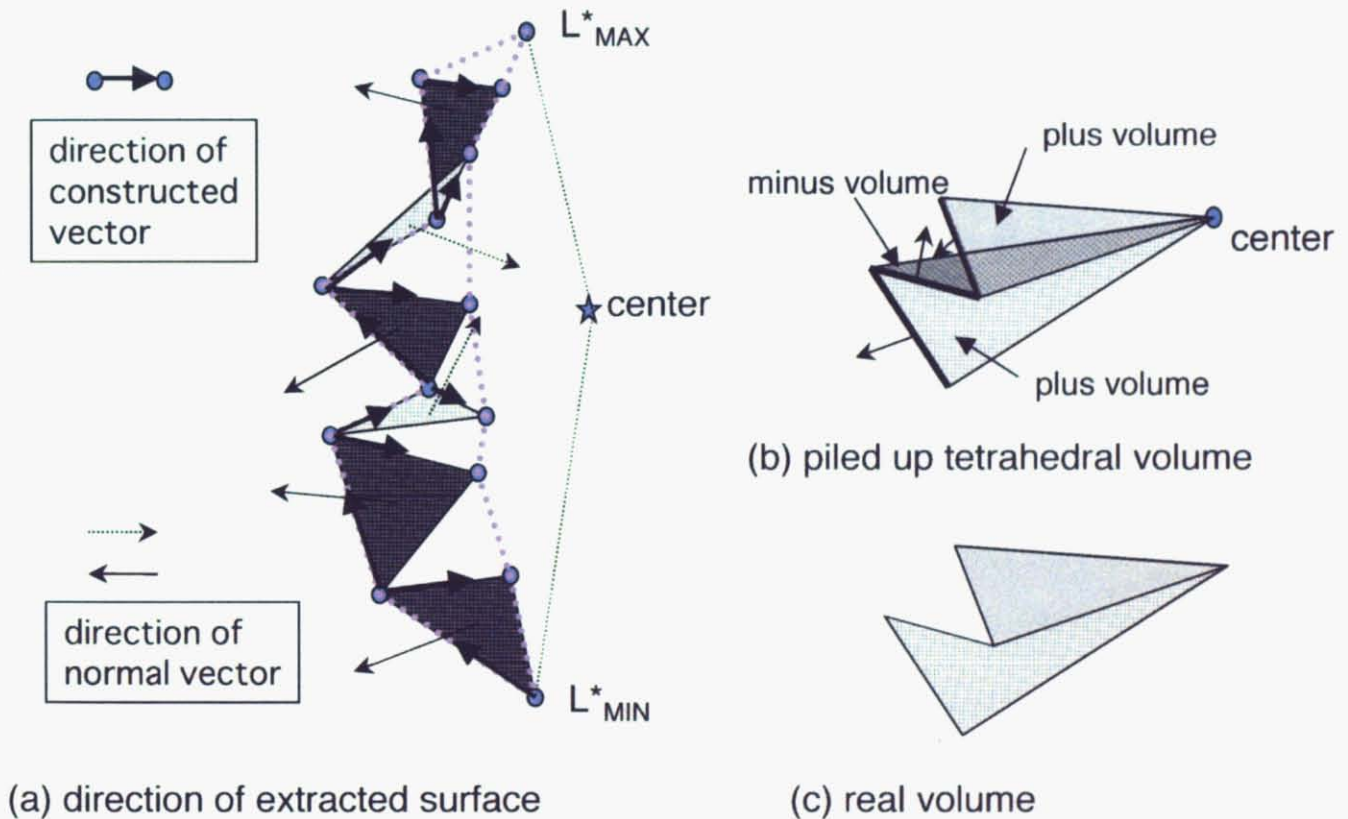


Fig. 3-4 四面体における重複を取り除く体積算出手順

以下に重複を取り除く体積算出手順を示す。

(1) 抽出した最外郭点 $(L^*, a^*, b^*)_{EXT}$ について、 $\{(i, j), (i, j+1), (i+1, j)\}$ と $\{(i, j+1), (i+1, j+1), (i+1, j)\}$ の2種類の順番で得られる表面を三角形の面で覆い、各々の法線ベクトル \mathbf{nv} を求める。

3.2 色立体の体積算出法

3.2.1 理論モデルにおける体積算出

理論モデルにおいては、色立体の色度点配列がわかるので、四面体により体積を算出することが出来る。最外郭点の配列が既知であれば、その点と中心点での四面体を構成して、ベクトルのスカラー3重積で体積が求められる。 Fig.3-1(a)に示すように、 $\{(i,j),(i,j+1),(i+1,j)\}$ と、中心点からのベクトル $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ を求め、(3-1)式に示す四面体の体積計算を行い、この順番で積算していく。次に $\{(i,j+1),(i+1,j),(i+1,j+1)\}$ と中心点からのベクトルを求め、同様に四面体の体積計算を行い、式(3-2)のように積算して画像全体の体積を求める。

一方、色度点配列の内部点が既知の場合も近隣点で四面体を構成して同様に体積計算を行って画像全体の体積を求める。 Fig.3-1(b)に示すように、 $\{(i,j,k),(i,j,k+1),(i,j+1,k+1),(i+1,j+1,k+1)\}$ で一組が構成され、以下残りの組み合わせは、 $\{(i,j,k),(i,j+1,k),(i,j+1,k+1),(i+1,j+1,k+1)\}$ 、 $\{(i,j,k),(i+1,j,k),(i+1,j+1,k),(i+1,j+1,k+1)\}$ 、 $\{(i,j,k),(i+1,j,k),(i+1,j,k+1),(i+1,j+1,k+1)\}$ 、 $\{(i,j,k),(i,j+1,k),(i+1,j+1,k),(i+1,j+1,k+1)\}$ 、 $\{(i,j,k),(i,j,k+1),(i+1,j,k+1),(i+1,j+1,k+1)\}$ で、計6種類の四面体から3次元物体の体積を計算する。積算の表現としては式(3-3)のようになる。

$$V_T = \frac{1}{6} |\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})| \quad (3-1)$$

$$V_G = \sum_{i,j=1}^{n-1} V_n \{(i,j),(i+1,j),(i,j+1)\} + \sum_{i,j=1}^{n-1} V_n \{(i,j+1),(i+1,j),(i+1,j+1)\} \quad (3-2)$$

$$V_G = \sum_{i,j,k=1}^{n-1} V_n \quad (3-3)$$

スカラー3重積の計算は、また、4次の行列式の絶対値として式(3-4)のように求められる。

$$V_T = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (3-4)$$

(a_0, b_0, c_0) は中心点を示す。

$$nv = \{nx, ny, nz\}$$

$$\begin{aligned} nx &= (a^*_{i+1} - a^*_i)(b^*_{i-1} - b^*_{i+1}) - (b^*_{i+1} - b^*_i)(a^*_{i-1} - a^*_{i+1}) \\ ny &= (b^*_{i+1} - b^*_i)(L^*_{i-1} - L^*_{i+1}) - (L^*_{i+1} - L^*_i)(b^*_{i-1} - b^*_{i+1}) \\ nz &= (L^*_{i+1} - L^*_i)(a^*_{i-1} - a^*_{i+1}) - (a^*_{i+1} - a^*_i)(L^*_{i-1} - L^*_{i+1}) \end{aligned} \quad (3-10)$$

(2) 中心点からの放射ベクトルと各三角面の法線ベクトル nv との内積 A をとり、計算結果の符号から外向きか内向きかを判定する。

$$\begin{aligned} A &= (L^* a^* b^*)_{avg} \cdot nv \\ &= |(L^* a^* b^*)_{avg} \cdot nv| \cos \theta \\ &= L^*_{avg} n_x + a^*_{avg} n_y + b^*_{avg} n_z \end{aligned} \quad (3-11)$$

(3) 理論モデルでの外部点配列が既知の場合と同様に、中心点からのベクトルを求め、式(3-3)によって四面体の体積計算を行い、面判定の結果から内向き面により構成された四面体は負の値にして、式(3-2)で積算して画像の体積を求める。

3.3 インクジェットプリンタの色域体積計算の適用結果

第2章で用いた Table2-4 に示すインクジェットプリンタでの基本8色の測色値を用い、色度点を理論式により算出した。外郭点だけが必要な場合は、c,m,y 各1次色インクについて1色を0又は1に固定し、2色の比率を0から1まで0.04ステップずつ変化させた各26ステップで $6 \times 26^2 = 4056$ 色、0.05ステップずつ変化させた各21ステップで $6 \times 21^2 = 2646$ 色、0.1ステップずつ変化させた各11ステップで $6 \times 11^2 = 726$ 色、の3種類を算出して比較した (Table3-1 中の known order surface)。

内部点も発生する場合は、c,m,y 各1次色インクの比率を0から1まで0.04ステップずつ変化させた各26ステップで $26^3 = 17576$ 色、0.05ステップずつ各21ステップで $21^3 = 9261$ 色、0.1ステップずつ各11ステップの $11^3 = 1331$ 色、の3種類を算出して比較した。1331色で算出した各モデルの色度点は Fig.1-8 に示すような分布をしている。Fig.2-5 には、この1331色について最外郭点抽出提案法で求めた最外郭点から構成される三角形で表面を貼り、各理論モデル色立体の外郭を表した図を示す。

各理論モデルの体積値について、各体積算出法で計算した結果を Table3-1 に示す。外郭点配列が既知な理論モデルで算出した値(known order surface)は、色度算出のステップ数が細くなるに従って体積値は減少するが、その差は僅かであり、より真の体積に近づくことを示している。

Table 3-1 各モデルの体積算出結果

	Neugebauer	coaxial	min-max	min-med	min
known order surface					
26step	237780	248590	251356	241225	235223
21step	237821	248696	251407	241269	235275
11step	238137	249386	251787	241614	235652
direction no care					
26step	253310	266479	289567	272432	272958
21step	249109	258953	283132	264890	259735
11step	247294	261915	276649	262251	264345
proposed method					
26step	237512	247048	252504	242689	235841
21step	238092	248248	254061	244257	235423
11step	239755	249220	253764	248883	239626

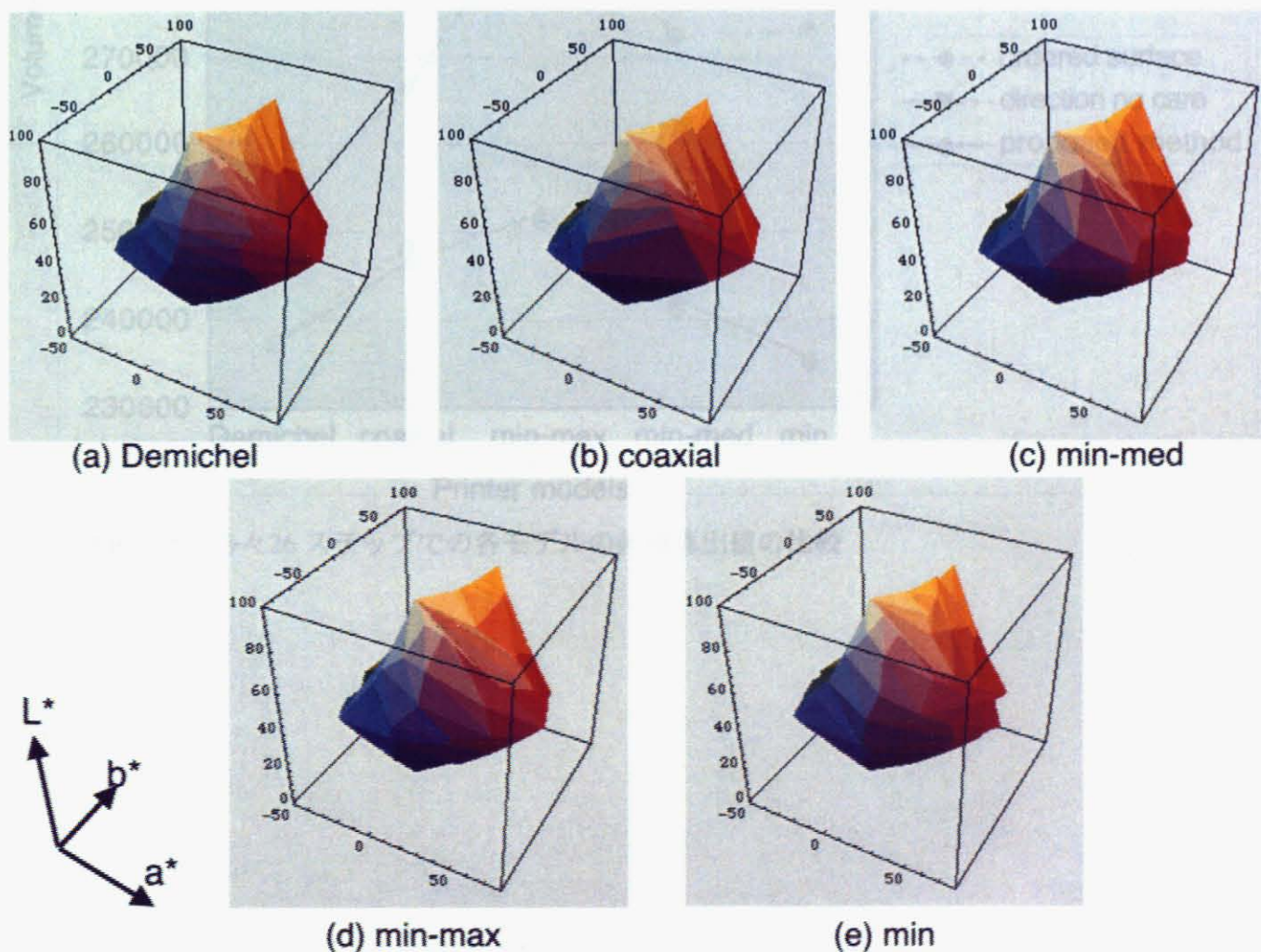


Fig. 3-5 最外郭点抽出提案法から構成されるポリゴン表面で表した各モデルの3次元色域形状 (インクジェットプリンタ色域)

3.4 3Dプリンタの体積算出値の比較

各々26ステップでの体積値の比較を Fig.3-6 に示す。最外郭点抽出提案法において、外郭面の面判定を考慮に入れない方法で求めた体積値(direction no care)はいずれも過剰な値となっている。これに対し、面判定を考慮して求めた体積値(proposed method)は配列既知の理論モデルと同等の値が算出され良好な結果となった。

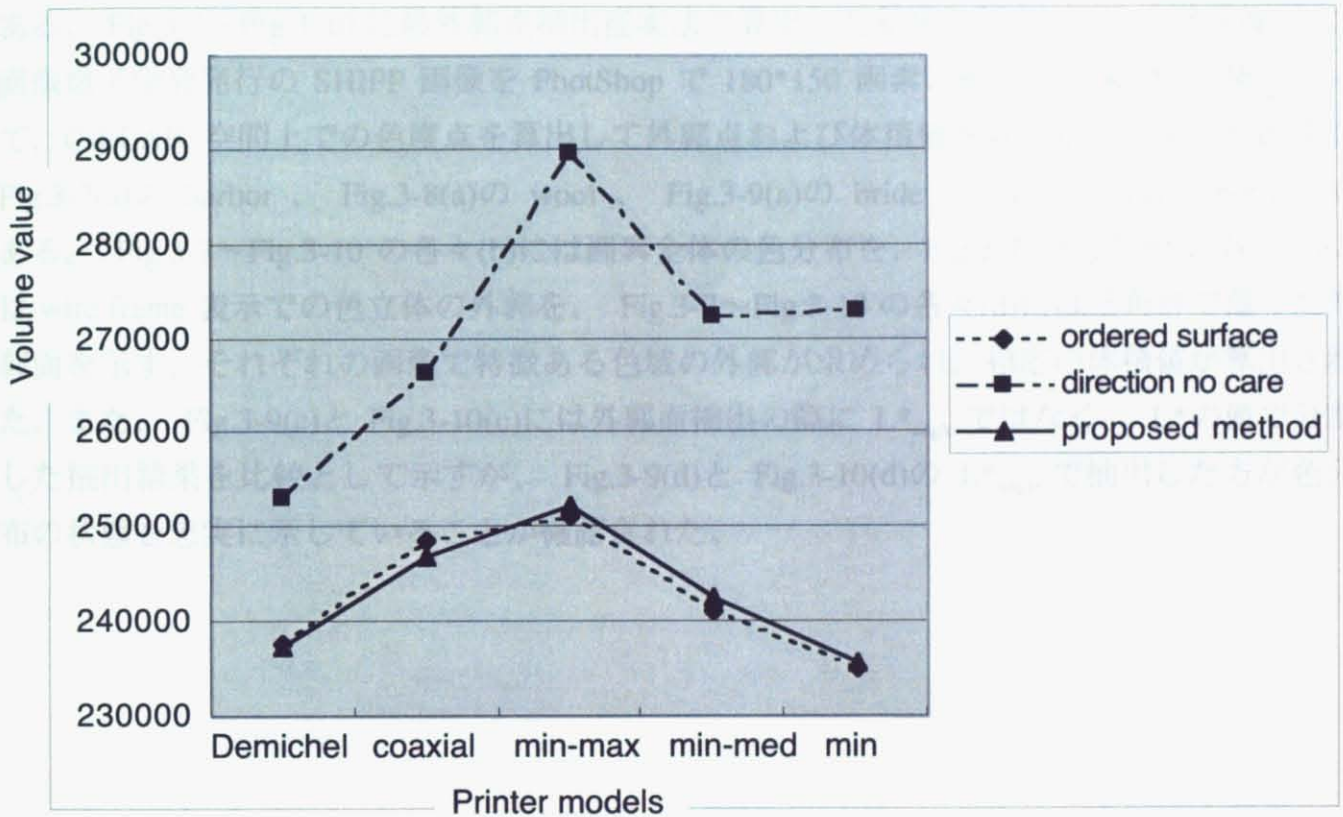


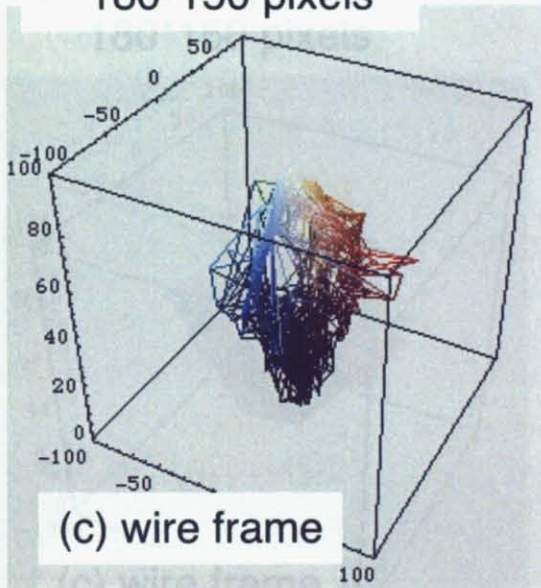
Fig. 3-6 各々26ステップでの各モデルの体積算出値の比較

3.4 自然画像の体積計算への適用

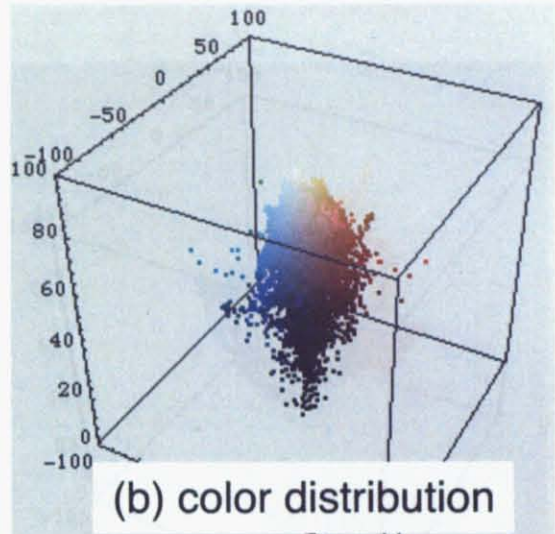
自然画像では、画素の CIELAB 空間上での色度点から外郭点を抽出できれば色域が求められる。色空間を均等に分割する場合には、色度点が個々の分割内では一定でなく、外郭点の抽出をするためには人的介入を必要とするか、抽出した色度点間に保管を必要とするのかしないのか、複雑なアルゴリズムを必要とする。本報で提案する画素数から色相角と明度角の分割数を決定する方法では、自然画像の外郭点および体積値の自動抽出が容易である。Fig.3-7~Fig.3-10 に最外郭点抽出提案法で算出した結果を示す。入力自然画像には、画像電子学会発行の SHIPP 画像を PhotShop で 180*150 画素に縮小した RGB 画像について、CIELAB 空間上での色度点を算出して外郭点および体積値を算出した。用いた画像は Fig.3-7(a)の harbor、Fig.3-8(a)の wool、Fig.3-9(a)の bride、Fig.3-10(a)の bottles である。Fig.3-7~Fig.3-10 の各々(b)には画素全体の色分布を、Fig.3-7~Fig.3-10 の各々(c)には wire frame 表示での色立体の外郭を、Fig.3-7~Fig.3-10 の各々(d)には三角形で覆った外郭面を示す。それぞれの画像で特徴ある色域の外郭が求められ、相応の体積値が算出された。また、Fig.3-9(c)と Fig.3-10(c)には外郭面抽出の際に L^*_{angle} ではなく、 L^* の値で分割した抽出結果を比較として示すが、Fig.3-9(d)と Fig.3-10(d)の L^*_{angle} で抽出した方が色分布の状態を忠実に示していることが確認された。



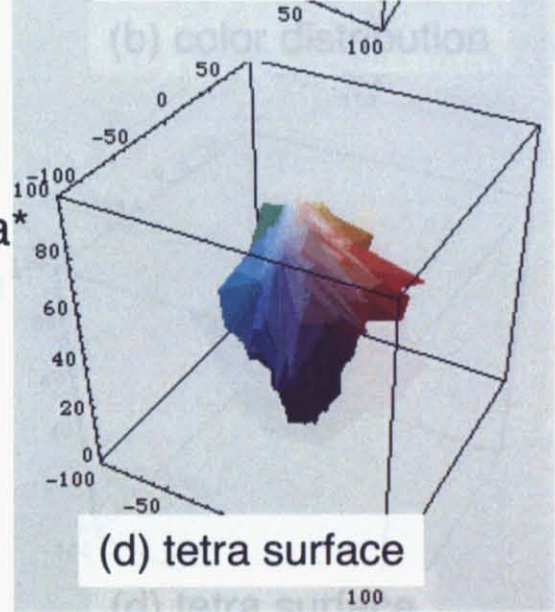
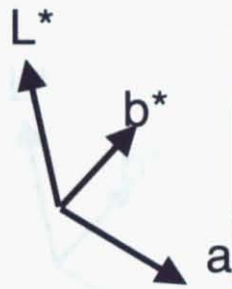
(a) original(harbor)
180*150 pixels



(c) wire frame



(b) color distribution

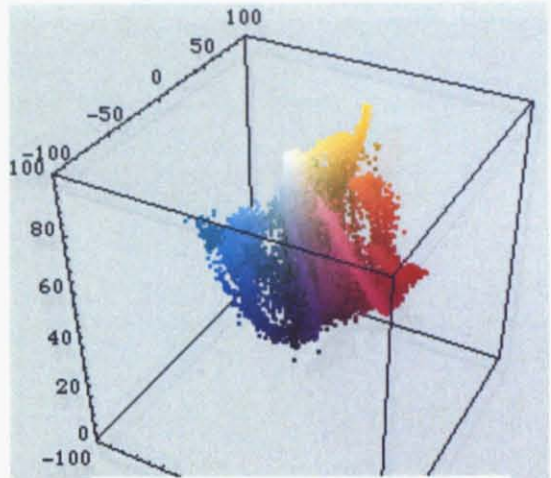


(d) tetra surface

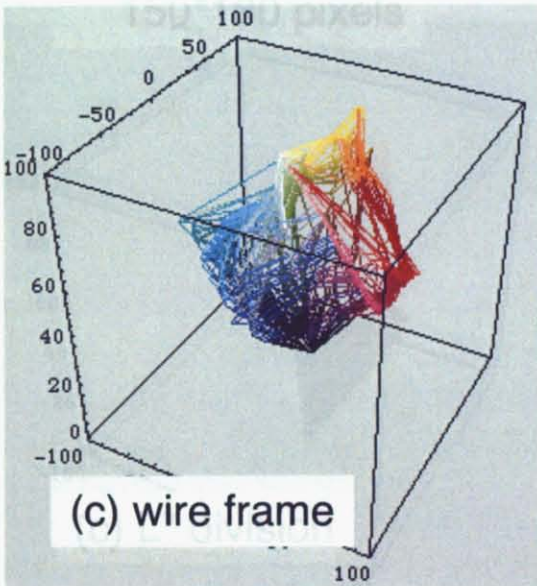
Fig. 3-7 自然画像"harbor"の原画、色分布、ワイヤーフレーム、ポリゴン外郭面
体積算出値は 126540



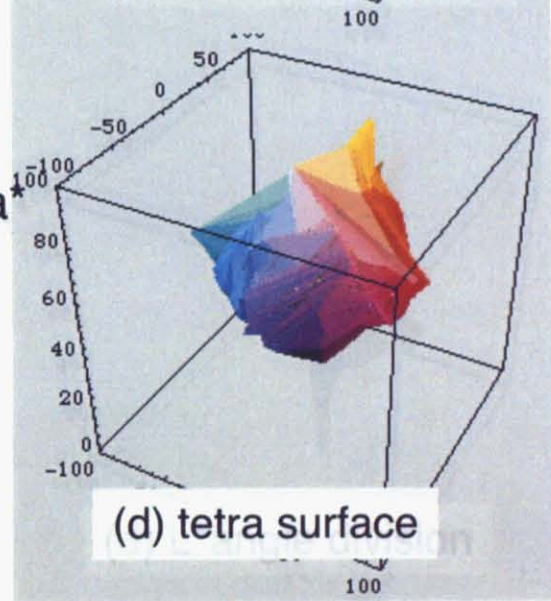
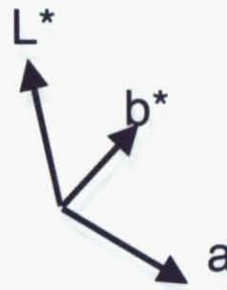
(a) original(wool)
180*150 pixels



(b) color distribution



(c) wire frame

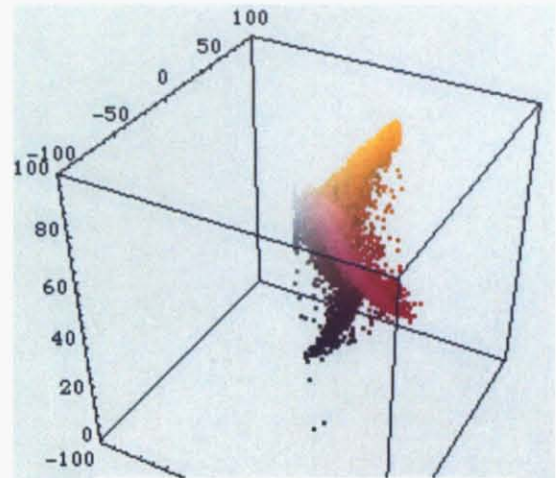


(d) tetra surface

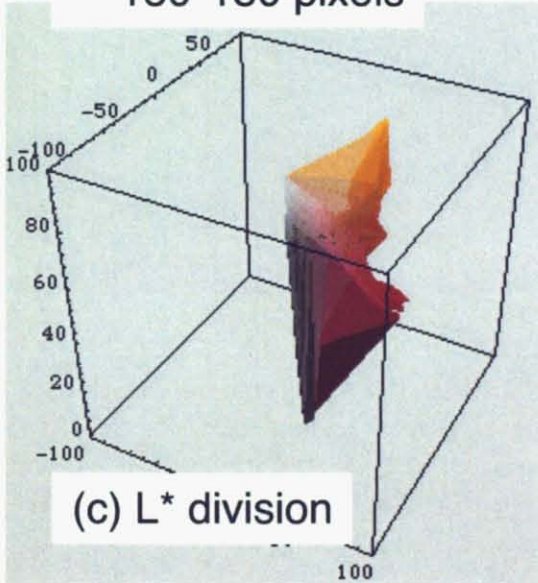
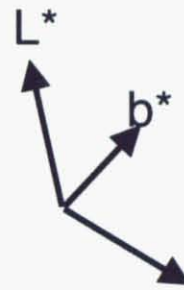
Fig. 3-8 自然画像"wool"の原画、色分布、ワイヤーフレーム、ポリゴン外郭面
体積算出値は 223090



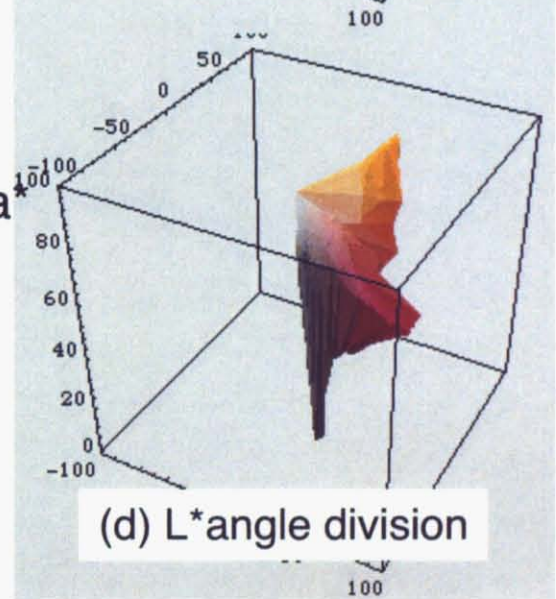
(a) original(bridе)
150*180 pixels



(b) color distribution



(c) L* division

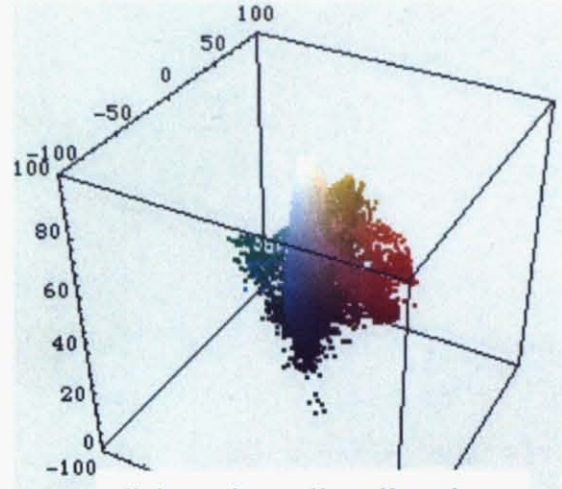


(d) L* angle division

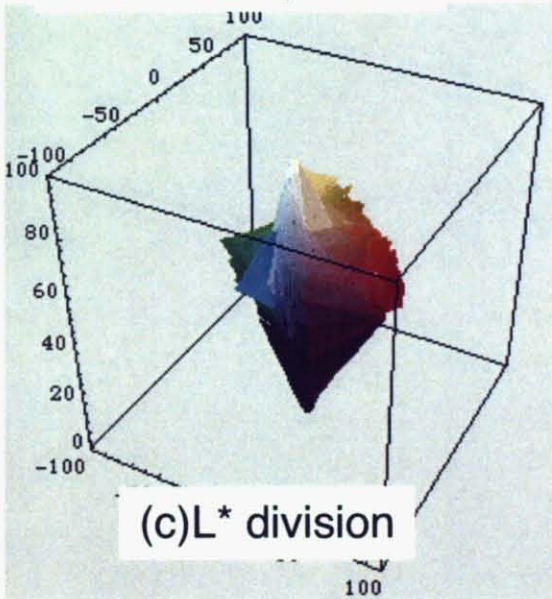
Fig. 3-9 自然画像”bride”の原画、色分布、ワイヤースケッチ、ポリゴン外郭面
体積算出値は(c)=118742、(d)=78050



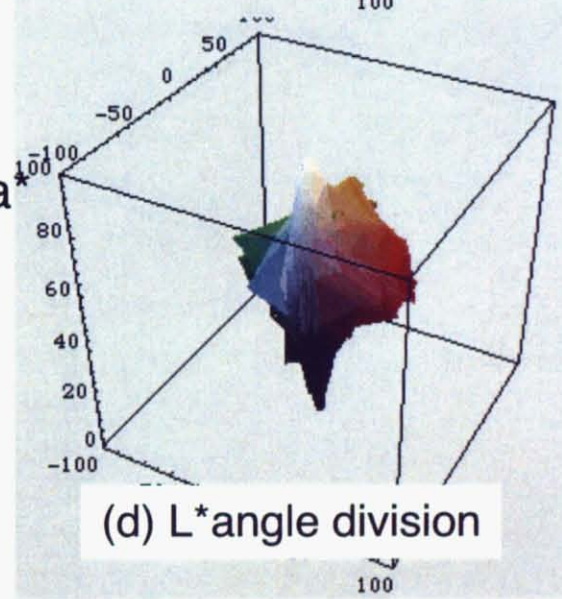
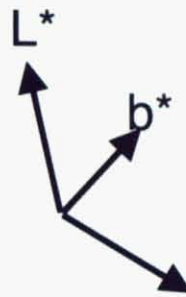
(a) original(bottles)
150*180 pixels



(b) color distribution



(c) L* division



(d) L* angle division

Fig. 3-10 自然画像”bottles”の原画、色分布、ワイヤーフレーム、ポリゴン外郭面

体積算出値は(c)=129404、(d)=121711

理論モデルでの結果からも明らかなように、色度点が凸状分布の画像は勿論、併置混色の一部や一般の自然画像によく見られる凹状分布においても、抽出結果と体積算出値について色度点を等個数分割する最外郭点抽出と外郭面の表裏判定を取り入れた提案法での結果は良い結果を示すことが確認された。この他に、色度点分布が複数の塊に分かれるような画像では、クラスタリング処理などで塊ごとに分けてから外郭を決定することにより、色立体の体積を正確に求められると考える。

3.5 モニタとプリンタの色域比較

異なる画像表示デバイスの色域比較を試すために、モニタとプリンタで表示できる色域を次のようにして求めた。CIELAB 空間上で L^* を 5 間隔、 a^* 、 b^* を 10 間隔で並ぶように等間隔で色度点を発生させ、この点の XYZ 値を求め、sRGB 値³⁷に変換して 1 を超える値と 0 を下回る値を切り捨て、再び CIELAB 空間に再生した 1675 点をモニタで再現し得る色度点とした。また、この 1675 点の sRGB 値をインクジェットプリンタで色補正をかけずに打ち出し、測色した XYZ 値から算出した値をプリンタで表現可能な色度点とした。これらの色度点から最外郭点抽出提案法で求めた結果を Fig.3-11 に示す。モニタの色域外郭をワイヤーフレームで、プリンタの色域を三角面の立体で表示してある。Blue から Magenta にかけての領域と Green から Yellow の領域で色域の顕著な違いが見られるが、Cyan 領域での中明度域では両色域が接しているか少し逆転する部分もあることがわかる。体積値はモニタで 687373、プリンタで 293285 と算出され、両デバイスでは倍以上の体積差を有することが確認された。

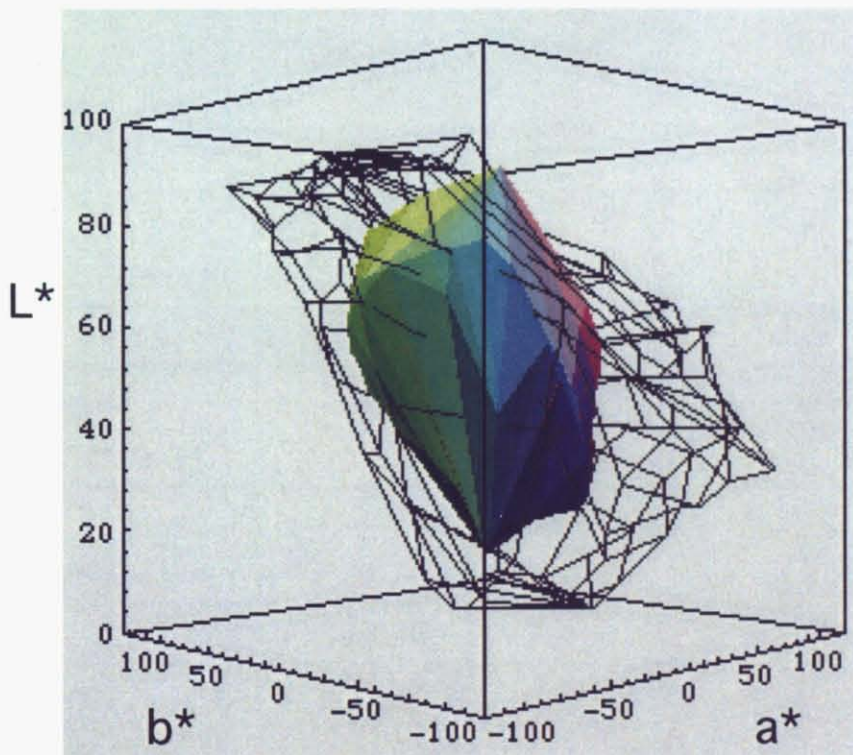


Fig. 3-11 モニタ（ワイヤーフレーム）とプリンタ（ポリゴン立体）の色域比較

3.6 外郭面の表面積と凹包度

抽出外郭点により構成された三角面は3辺を a,b,c とすると各々の長さが座標点からわかるので、ヘロンの公式³⁸を使えば面積 S が算出できる。

$$S = \sqrt{\frac{(a+b+c)(-a+b+c)(a-b+c)(a+b-c)}{4}} \quad (3-12)$$

各三角面を足し合わせると外郭の表面積を表すことになる。この内、三角面の内向きの面積だけをまとめて表面積全体で割れば、外郭面の凹包形状を示す指標とみなせ、この指標を凹包度と定義する。各抽出外郭の表面積と凹包度を算出した結果を Table3-2 に示す。プリンタ混色モデルでは Neugebauer モデルで 4.0%、coaxial モデルで 8.0%、と僅かな違いがあり、併置混色の3モデルは両者の中間の値を示した。SHIPP 画像では bride の 27.34% を筆頭に 20% 前後の値を示し、自然画像が複雑な形状を示す特徴を良く表している。

Table 3-2 外郭面の表面積計算結果

(a) theoretical printer models

	Neugebauer	coaxial	min-max	min-med	min
total area	28976.2	30662.1	30655.9	30322.4	30245.3
concave (%)	4.0	8.0	7.5	6.6	4.6

(b) SHIPP images

	wool	bottles	bride	harbor
total area	58244.2	30662.1	30655.9	30245.3
concave (%)	18.25	18.98	27.34	23.26

(c) devices

	CRT monitor	printer
total area	70443.6	34179.1
concave (%)	9.2	9.2

3.7 まとめ

画像色立体での色域を評価する方法としての体積算出のために、理論モデルにおいては色度点配列を利用した四面体の体積演算で正確な体積が算出できる。これに対して乱雑な色度点群の集合体である自然画像に対して、各画素の色度値による色立体の外郭点およびその体積を自動的に算出する新しい手法を提案した。本手法では色度点分布を色相角と明度角に分割して外郭点を配列で取り出すため、画素構成の特徴に応じた最外郭点を自動的に求めることができ、外郭面の向きを考慮することで体積値も正確に算出できる。また、抽出三角面の表面積と内向き面の割合から凹包形状の度合いを判断できる。対象画像の色空間上での色域を判断するための非常に有効な方法と考えている。

現在、各種デバイスでの色域を考慮したカラーマネージメントの研究が活発に行われているが、本手法は色材の選択評価や色域マッピングへの応用が期待できる。

4.2.1 convexによる凸包色域の算出

4.2.1.1 凸包色域の抽出

画像内の画素をとりこむ凸包を抽出する目的は、色域を抽出することである。この目的に達成するために、凸包を抽出する必要がある。

$$x = (x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n), z = (z_1, \dots, z_n) \quad (4.2.1)$$

凸包を抽出するために、各画素の色度値は、色度空間上の各画素の色度値を、色度空間上の各画素の色度値として扱う。

第4章 画像の色域記述子

4.1 はじめに

抽出された画像色域は極座標によって表現されているので、中心点からの距離と極座標との関数として表せれば扱いが便利である。

様々な **GMA** が開発されて来たが^{6-18,39-45}、それらは **I-D** ではなく、**D-D** をベースにした2次元 LC (明度-彩度) 面でのマッピングがほとんどである。3次元色域を扱った研究も報告されているが、デバイスの形状を示したもので画像自体の形状を扱ったものはほとんど無い。現在 **GMA** は2D から3D へ発展しており、**I-D** は **D-D** よりもより良い効果が期待される。我々はディスプレイ画像からプリント画像へ **3D I-D GMA** を使って継目のないマッピングを行なった。これは CG 画像の広い色域を連続的な階調を保持しながらインクジェットプリンタ色域内へのマッピングを行なうことができた。しかし、このアルゴリズムは各々のマッピングライン上で画像とデバイスの色域境界の関係を算出するために多大な計算時間を要した。**3D I-D GMA** を効果的に実行するためには簡単でコンパクトな色域境界記述法 (**GBD**) が必要である。今までに数々の **GBD** が示されているが、それらはデバイスについてであり、画像についてはあまり言及されていない。この章では **GMA** に付随したコンパクトな画像の **GBD** について示す。使用者側において画像の **GBD** を使用することで柔軟な色域マッピングが可能となる。乱雑な色分布から3次元の色域形状を素早く抽出すること、そして小さいデータ量で色域表面を記述することがキーファクターとなる。前章において一定のサンプル点を含むサブスペースに色空間を分割し色域形状を記述する方法を提案した。しかし、この方法では極座標空間内で不均一な分割サイズとなるため **r-image** 記述には適用できない。ここでは離散的な極座標 (θ, ϕ) を使って画像色域を均等に分割して抽出する方法を用いる。色域形状は単純なベクトル距離による表示、**r-image** として記述され、SVD あるいは他の従来からの符号化変換方法によって簡単に圧縮される^{47,49,53}。

4.2 **r-image** による画像色域の記述

4.2.1 画像色域の抽出

画像色分布における画像中心を $[L_0^*, a_0^*, b_0^*]$ とすれば、この中心から得られるベクトル距離は、

$$r_i = [(L_i^* - L_0^*)^2 + (a_i^* - a_0^*)^2 + (b_i^* - b_0^*)^2]^{1/2}; \quad 1 \leq i \leq n \quad (4-1)$$

CIELAB 空間での各画素の極座標は、式 (2-6)、(2-7) と同様に、

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{b_i^* - b_0^*}{a_i^* - a_0^*} \right); \quad 0 \leq \theta_i \leq 2\pi \quad (4-2)$$

$$\varphi_i = (\pi/2) + \tan^{-1} \left(\frac{L_i - L_0}{[(a_i^* - a_0^*)^2 + (b_i^* - b_0^*)^2]^{1/2}} \right); \quad 0 \leq \varphi_i \leq \pi \quad (4-3)$$

色域表面は Fig.4-1 に示されるように画像中心からの極座標によって色相方向と明度方向に分割される。

画像中心である分割中心 r_0 はマッピングに適用する場合、対象画像とデバイスであるプリンタとで中心の位置がずれる場合がある。このような時は、分割中心はニュートラルグレイに置くべきで、分割中心がニュートラルグレイに無いとマッピングの時に色ずれを起こす危険性がある。

最大ベクトル距離 r_{gamut} は分割された各セグメント内で中心からの最大のベクトル距離によって表わされる。

$$\begin{aligned} r_{gamut} &= [r_{jk}] = [\max\{r_i\}]; \quad 1 \leq i \leq n \\ &\text{for } (j-1)\Delta\theta \leq \theta_j \leq j\Delta\theta \quad \text{and } (k-1)\Delta\varphi \leq \varphi_k \leq k\Delta\varphi \\ \Delta\theta &= 2\pi / M; \quad 1 \leq j \leq M \\ \Delta\varphi &= \pi / N; \quad 1 \leq k \leq N \end{aligned} \quad (4-4)$$

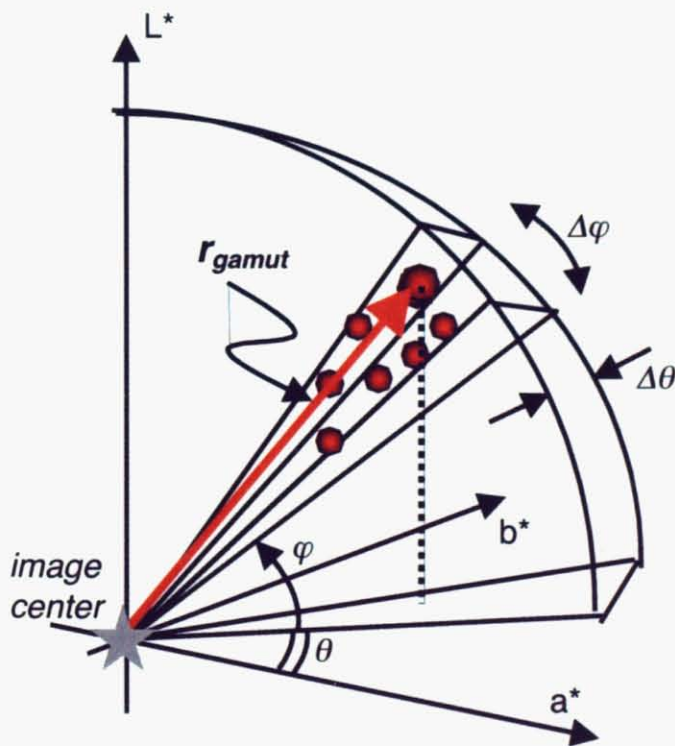
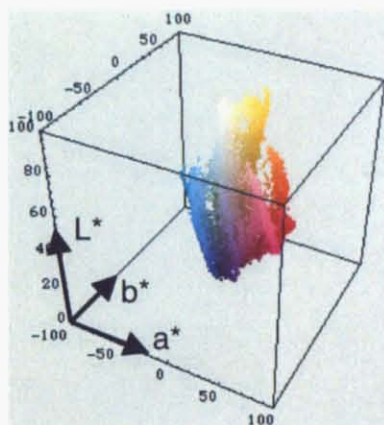


Fig. 4-1 極分割で分割されたセグメント内での最大ベクトル距離 r_{gamut} の抽出

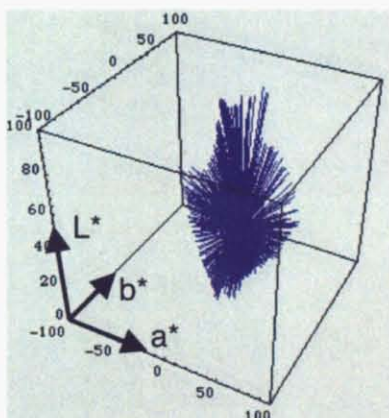
Fig.4-2 には sRGB テスト画像の”wool”について CIELAB 上での色域抽出を示す。(a)にオリジナルを示し、(b)には色分布を示す。(c)は抽出された各ベクトルを示し、(d)は表面部の色のみを表している。(e)はワイヤフレームでの表示を、(f)には表面をポリゴンメッシュで張合わせた形状を示す。



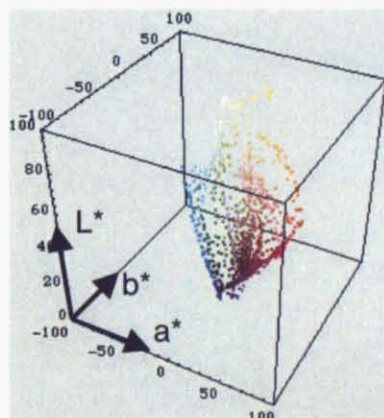
(a) Test image(wool)



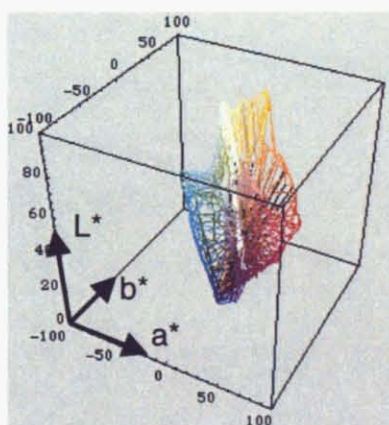
(b) Color distribution



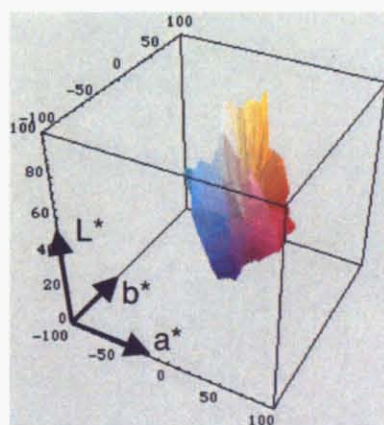
(c) Extracted radial vectors



(d) Surface colors



(e) Wire frame



(f) Polygon gamut shell

Fig. 4-2 sRGB テスト画像”wool”についての CIELAB 上での色域抽出

Epson PM750C インクジェットプリンタで出力デバイスの色域記述(GBD)を示した例を Fig.4-3 に示す。(a)は3原色インク量を10%刻みで変化させた $11^3=1331$ 色の色分布を、(b)は極座標で分割したセグメント毎のベクトル距離を、(c)はワイヤフレームによる色域形状の表現、(d)はポリゴンメッシュによる表面形状を、それぞれ表している。

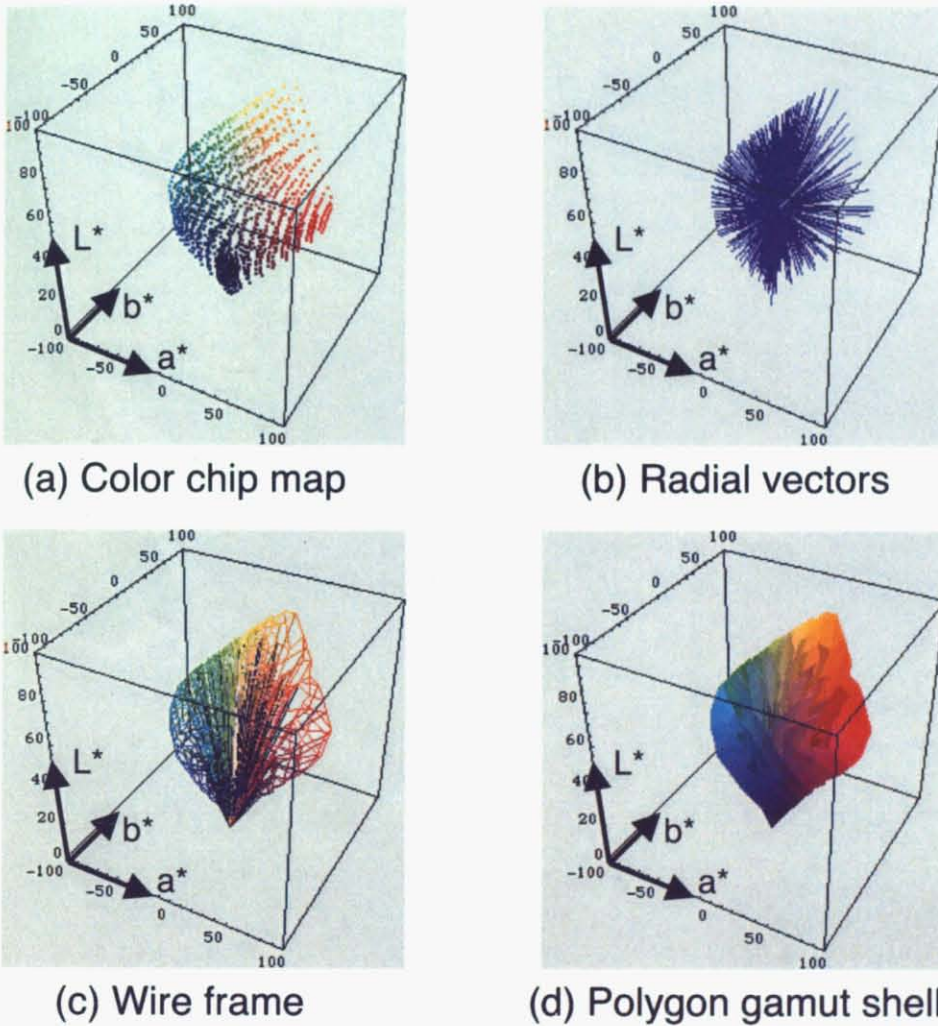


Fig. 4-3 Epson PM750C インクジェットプリンタでの出力デバイスの色域記述例

4.2.2 3次元色域記述としての *r-image*

正方行列 r を $M \times N$ の行列で定義する。

$$r = \left\| \left\| r_{jk} \right\| \right\| ; 1 \leq j \leq M, 1 \leq k \leq N \quad (4-5)$$

我々が *r-image* と名付けた行列 r は、抽出された中心からの最大ベクトル距離 r_{gamut} を2次元の平面的なモノクロ画像表示にすることで、3次元極座標上でのベクトルの大きさを2次

元の画像のように一瞥で見分けられるようにしたものである。画像の色分布は一度 *r-image* に変換され、色域表面の各 $[L^*, a^*, b^*]$ 値は次式によって相当する画素に再構築される。

$$\begin{aligned} \hat{a}_{jk}^* &\equiv \|r_{jk}\| \cos(j-0.5)\Delta\theta \cdot \sin(k-0.5)\Delta\varphi + a_0^* \\ \hat{b}_{jk}^* &\equiv \|r_{jk}\| \sin(j-0.5)\Delta\theta \cdot \sin(k-0.5)\Delta\varphi + b_0^* \\ \hat{L}_{jk}^* &\equiv L_0^* - \|r_{jk}\| \cos(k-0.5)\Delta\varphi \end{aligned} \quad (4-6)$$

Fig.4-4 には "wool" 画像を *r-image* に表示した例として示す。(a)のように極座標で抽出され 外郭ベクトルが、その大きさを白から黒へのグレイ画像 *r-image* として表したものが(b)である。(c)にはこれに色付けして3次元的に、(d)には2次元的に表現した図を示す。

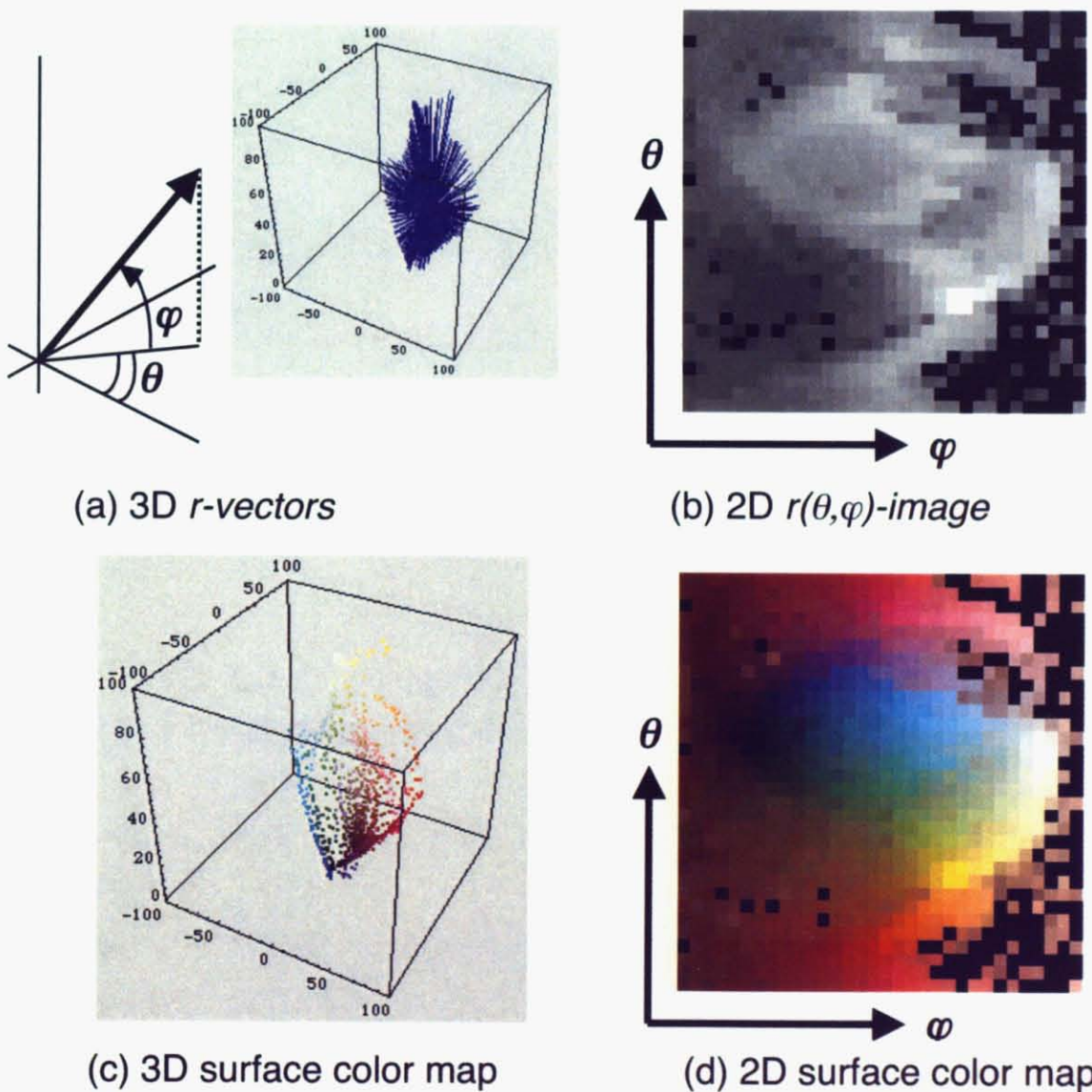


Fig. 4-4 "wool"画像の抽出外郭ベクトルと *r-image* 表示

4.3 *r-image* の圧縮によるコンパクトな *GBD*

r-image は $M \times N$ の行列でベクトル距離 $r = [r_{jk}]$ をグレースケール画像で表したものである。もし、色域形状が滑らかな 3 次元空間ならば *r-image* は空間的に高い相関を持つ。これは直交変換符号化を適用することで圧縮ができる。よりコンパクトな *GBD* を得るために、画像圧縮技術を *r-image* に適用することを試みた。

4.3.1 DCT による *r-image* の圧縮

r-image は以下に示す離散コサイン変換 (DCT) によって空間周波数成分 R に変換される。

$$R = [R_{jk}] = A' r A \quad (4-7)$$

$$A = [a_{jk}], \quad a_{jk} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}}, & \text{for } k=1 \\ \frac{2}{\sqrt{M}} \cos\left(\frac{(2j-1)(k-1)\pi}{2M}\right), & \text{for } k=2, \dots, M, \\ & j=1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (4-8)$$

逆変換 IDCT は同様の式で与えられる。

$$r = A R A' \quad (4-9)$$

空間周波数のエネルギーは R の低い周波数成分に集中するので、*r-image* は高い周波数成分をカットすることにより縮減された $m \times m$ ($m < M$) のマトリックスから簡単な近似で再構築される。

$$\hat{r} \equiv A R^m A', \quad R^m = [R_{jk}^m], \quad R_{jk}^m = \begin{cases} R_{jk}, & \text{for } j, k \leq m \\ 0, & \text{for } j, k > m \end{cases} \quad (4-10)$$

4.3.2 SVD による *r-image* の圧縮

DCT はその基底関数が画像に依存しないので予め固定されているので使い易い。しかし、画像は独自の色域形状を持つので画像に依存した基底関数が色域を記述するためにはより適合する。ここでは SVD による圧縮を試みた。SVD による *r-image* の表現は

$$r = [r_{jk}] = U \Lambda V' \quad (4-11)$$

ここで U と V の行列は $r r'$ と $r' r$ の主成分ベクトルであり、 Λ は r の対角で示される特異値の対角マトリックスである。

$$\Lambda = U' r V = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \lambda_M \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

r-image は縮減された特異値と主成分ベクトルを使うことで近似できる。

$$\hat{r} = [\hat{r}_{jk}] \cong U_m \Lambda_m V_m' \quad (4-13)$$

すなわち、 $M \times M$ のマトリックス r は $m (< M)$ 個の特異値とそれに相当する主成分ベクトル U と V から再現することができる。

$$\Lambda_m = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & & \lambda_m \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

$$U_m = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & \cdots & U_{1m} \\ U_{21} & U_{22} & \cdots & \cdots & U_{2m} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ U_{N1} & \cdots & \cdots & \cdots & U_{Nm} \end{bmatrix}, \quad V_m = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1N} \\ V_{21} & V_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ V_{m1} & \cdots & \cdots & V_{mN} \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

4.4 実験結果

4.4.1 特異値分解と主成分

r-image は特異値 Λ と直交する主成分ベクトル U と V によって分解される。*r-image* のエネルギーは Λ によって重み付けられた低次元の主成分ベクトルにほとんど集中する。Fig.4-5 (a)には2種類の sRGB テスト画像“bride”と“wool”におけるマトリックス U の3次元プロファイルと最初の4つの主成分ベクトルを示す。同様にして、マトリックス V の3次元プロファイルと最初の4つの主成分ベクトルをFig.4-5 (b)に示す。基底関数の低次元部だけで画像依存の色域形状形成を伝えられることが、最初の4つの主成分ベクトルの複雑な形状に反映されている。Fig.4-6 は如何に特異値 $\Lambda = [\lambda_i]$ が4種類の異なった sRGB テスト画像での情報量の大きさを急速に落とすかを示している。特異値はほとんど4または5以下の低次元に集中する。これは *r-image* による色域形状は概ね最初の4行の主成分ベクトル U 、4つの特異値と4列の主成分ベクトル V の掛け合わせから再構築できることを示している。

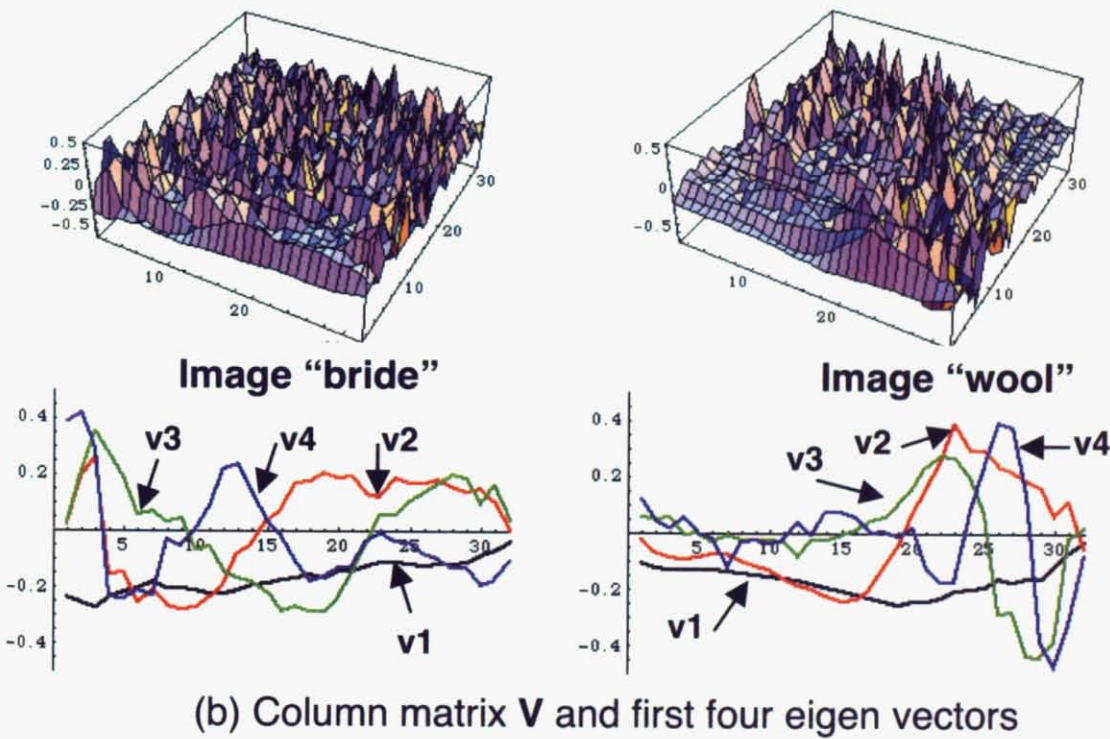
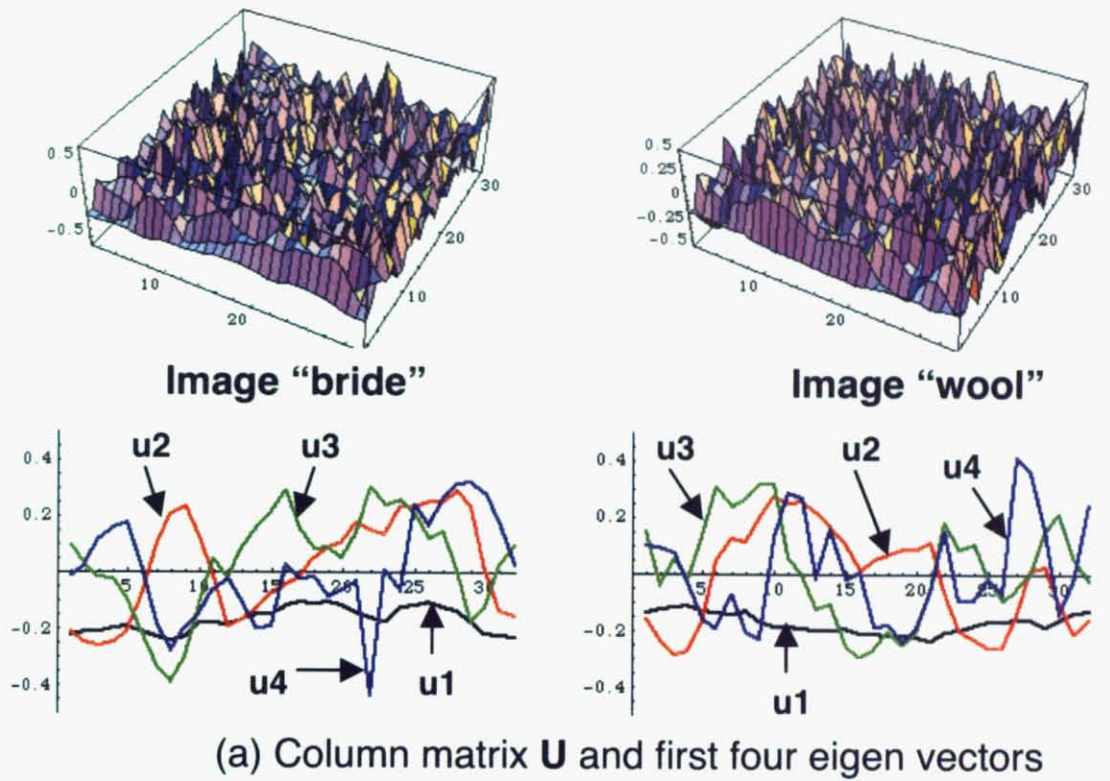


Fig. 4-5 sRGB テスト画像“bride”と“wool”における主成分ベクトル U と V

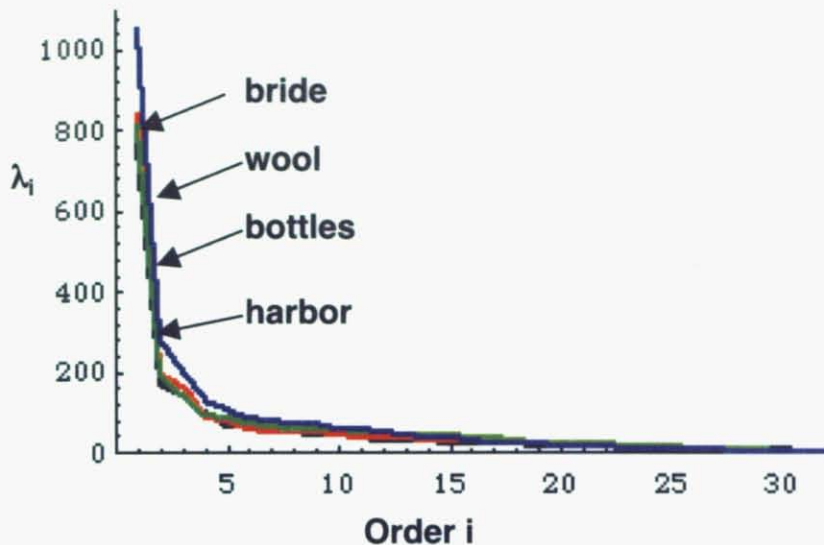


Fig. 4-6 sRGB テスト画像での各特異値における情報量の大きさ

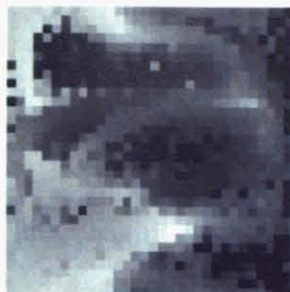
4.4.2 DCT と SVD の縮減パラメータからの色域形状の再構築

r-image に変換されたテスト画像が、DCT と SVD によって圧縮され、縮減された係数により再構築された色域外郭形状について比較をした。Fig.4-7(a)は標準データベース SHIPP の sRGB 画像“bride”のオリジナル画像、離散的極座標 (θ, ϕ) を使って 32×32 分割した *r-image*、そしてその色域外郭形状のワイヤフレーム表示を示す。Fig.4-7(b)はこの画像に対して DCT 係数を 4×4 、 8×8 、 16×16 に縮減して *r-image* を再構築した結果を示す。Fig.4-7(c)は、この *r-image* から復元された色域外郭形状を示す。Fig.4-7(d)と(e)は SVD パラメータから同様に係数を 4×4 、 8×8 、 16×16 に縮減して *r-image* を再構築した結果を示す。DCT においては 4×4 や 8×8 に縮減された係数では高周波の空間周波数成分の欠如により細部の表現が失われており、 16×16 の係数でも不十分と言える。一方、SVD においては 4×4 の係数でもおよその形状を表しており、 16×16 ではほとんど完全に再構築されている。Fig.4-8 には別の sRGB 画像“wool”における 4×4 DCT と 4×4 SVD を比較した結果を示す。DCT では細部の表現に欠けた外郭形状だが、SVD では 4×4 という低い次元でも十分に再生されていることがわかる。

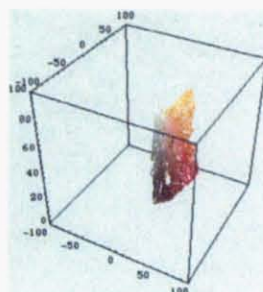
(a) original



“bride”

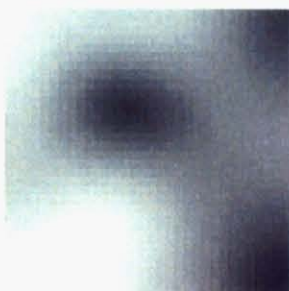


r-image

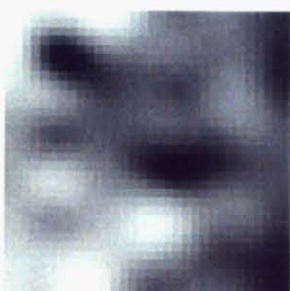


gamut shell

(b) DCT
r-image



dimension 4x4

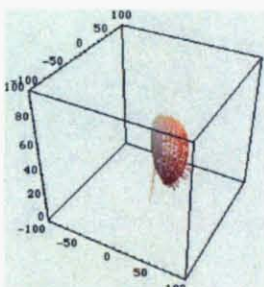


8x8

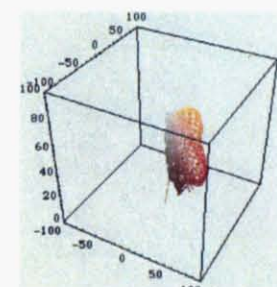


16x16

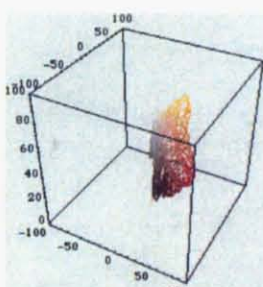
(c) DCT
gamut shell



dimension 4x4

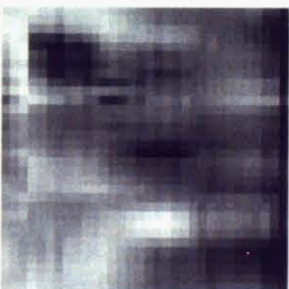


8x8

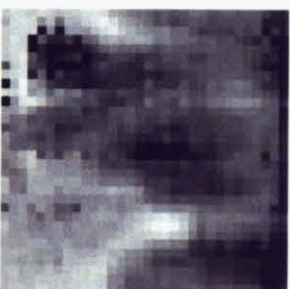


16x16

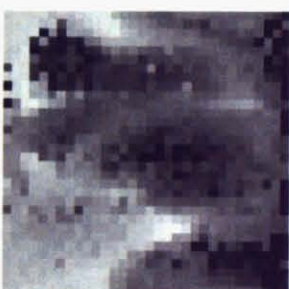
(d) SVD
r-image



dimension 4x4

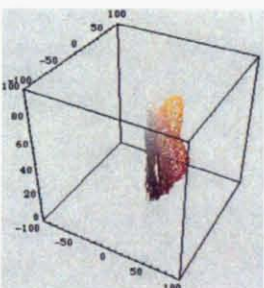


8x8

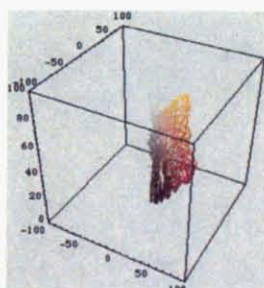


16x16

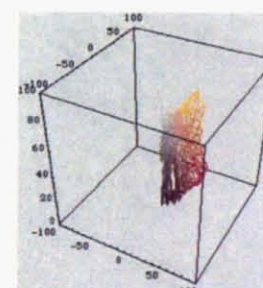
(e) SVD
gamut shell



dimension 4x4



8x8



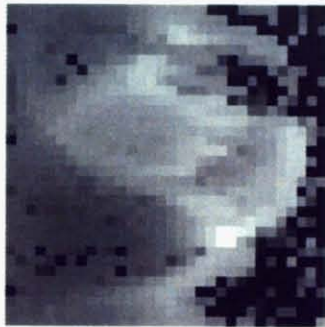
16x16

Fig. 4-7 DCT と SVD によって再構築された色域外郭形状の比較 (“bride”)

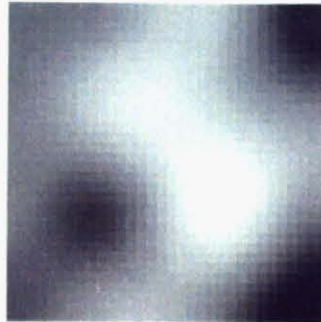


“wool”

(b) r-image



original

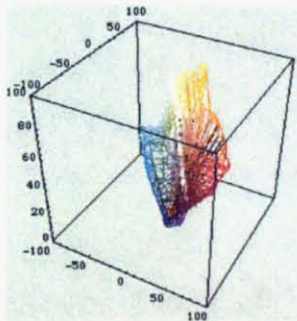


4x4 DCT

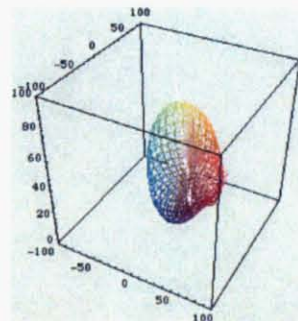


4x4 SVD

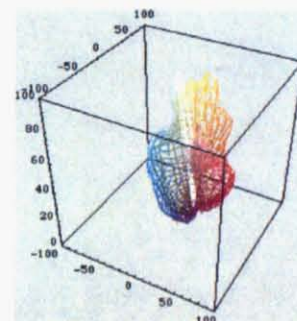
(c) gamut shell



original

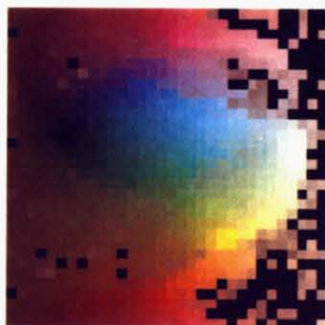


4x4 DCT

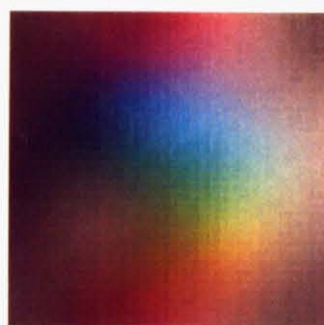


4x4 SVD

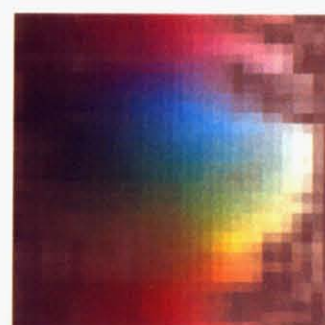
(d) surface color



original



4x4 DCT



4x4 SVD

Fig. 4-8 sRGB 画像“wool”における 4×4 DCT と 4×4 SVD の比較

4.5 まとめ

画像色域の外郭形状は単純なベクトル距離の一揃いで表すことができ、分割された極座標内で *r-image* と定義した。この *r-image* は SVD によって少ない特異値でコンパクトに近似できる。分割数を増やせば、*GBD* の精度が上がり、圧縮比を高くしなければメモリーが増えてしまう。 $M \times M$ の *r-image* から m 個の特異値を使った SVD では、 $M \times m$ の列ベクトル U_m と $m \times M$ の行ベクトル V_m と m 個の特異値が必要で、圧縮比 C は次式で推測できる。

$$C = \frac{(2M + 1)m}{M^2} \quad (4-16)$$

もし、 $M > m$ ならば、 C は $C \approx 2m/M$ で近似できる。例えば、 $m=4$ 、 $M=32$ の時は $C \approx 1/4$ で、 $m=4$ 、 $M=64$ の時は $C \approx 1/8$ となる。もちろん、 M がより大きくなれば、色域外郭形状もより詳しく記述できる。同じ圧縮比 C では M が大きくなると相対的に ΔE は M が小さい時よりも大きくなる。実際に色域外郭形状としてのコンパクトな *GBD* は、もし *r-image* が SVD を使って 4 つ以上の主成分で圧縮されるなら、 $M=32$ の分割が妥当である。SVD の特異値 λ 、主成分ベクトル U と V が各画像毎に計算されて伝達されるべきだが、*GBD* は僅かに 260 バイト ($m=4$)、または 520 バイト ($m=8$) しかメモリーを使わない。しかし、*r-image* が空間的に高い相関のあるグレースケール画像であるため、ウェーブレット符号化法を適用すれば効果的な圧縮が可能であり、JPEG2000 によって十分に圧縮され得る。提案する *r-image GBD* は画像とデバイス間のすべての画素を比較するのではなく、代表された最大の放射ベクトルを比較することで色域の概要を簡単に検知できる。これは、3次元 *I-D GMA* の計算に効果的に利用できる。

5.2 色域外郭の記述

5.2.1 色域片断の記述

画像の色域は、画像サイズ中心から放射ベクトルで表される色域片断 (color fragment) によって記述される。Figure 5.2.1(a) に示すように、色域片断は、色域の中心から放射ベクトルで表される色域片断 (color fragment) によって記述される。Figure 5.2.1(a) に示すように、色域片断は、色域の中心から放射ベクトルで表される色域片断 (color fragment) によって記述される。

第5章 色域記述子を用いた3次元色域マッピング

5.1 はじめに

各種メディア間における色複製処理工程における重要なポイントは、異なった色域を持つディスプレイとプリンタ間に色のマッピング技術を適用させることである。多くの色域マッピングアルゴリズム(*GMA*)が報告されているが、2次元の明度-彩度平面を使用したものがほとんどである。3次元の *GMA* についても幾つかは報告されている。しかし、これらのアルゴリズムはいずれも機器依存法 (Device-to-Device; *D-D*) の色域を元に考えている。この考えの元ではマッピング後に色情報の損失が起り得る。なぜならば、画像の色情報はディスプレイ色域を常に満たしている訳ではないからである。画像色域境界を使う画像依存法 (Image-to-device; *I-D GMA*) ではこのような損失を最小限に抑えられる。3次元 *I-D GMA* は色情報の損失を抑えてプリンタの色域内部にディスプレイ上の画像を割当て理想的な方法であると言える。しかし、*3D I-D GMA* では各々の画素が色域外郭に交差する点を求めるために複雑なアルゴリズムと多大な計算時間を要する。*3D I-D GMA* を効果的に行なうためには簡便な色域記述方法 (Gamut Boundary Descriptor; *GBD*) が必要となる。多くの *GBD* が提案されているが^{34,39-41,59}、主に機器に対してのものであり、画像においては行なわれていない。画像色域とデバイス色域とを比較する新しい簡便な方法を前章で提案した。画像およびデバイスの両色空間は極座標 (θ, ϕ) を使って分割され、最も中心より外側にある点が抽出され、両色域は各々の分割空間毎に比較される。色域外郭は単純なベクトル距離、*r-image* として記述され、各々の *r-image* を参照して *3D I-D GMA* を行なう。この方法の特徴は、分割された空間内では画像およびデバイスのベクトルのみを用いることである^{48,50}。マッピングの結果はマッピング方向を定める集中点の設定方法とデバイス色域外郭の形状に影響される。まず始めに、2つの集中点の設定方法、単一集中点とマルチ集中点について検討した。次に、プリンタ色域外郭は滑らかで正確な形状が望まれるので、ポリゴンメッシュと Overhauser スプライン関数による形成法を比較した。

5.2 色域外郭の記述

5.2.1 色域圧縮の集中点

前章において、画像をその中心からの放射ベクトルによって色域を記述する *r-image* について説明した。*r-image* を簡便に作成するためには単一の画像中心点だけから抽出すれば良い。Fig.5-1(a)は単一集中点法の概観を示す。図では、色相が $\Delta\theta$ で均等に分割された後、明度分割は画像中心点 p から $\Delta\phi$ によって均等に分割されることを示している。この

画像中心点はマッピングの際には画像とプリンタで一致している必要があるため、プリンタの中心点で行なう必要がある。

一方、典型的な2次元マッピングで使われる単一集中点では、明るさの再現が圧縮されるためにイメージ品質を損なうことがある。自然な明度を保つためにはマルチ集中点によるマッピングが望まれる。傾斜を変える2つのポイントである低明度点 p_{lower} と高明度点 p_{upper} とを持つ方法を検討した。画像とプリンタの明度分割は p_{lower} 以下と p_{upper} 以上では極分割され、両点の間は平行に分割される。ここで p_{lower} と p_{upper} はプリンタ出力されたサンプルの明度分布が各々 $1/3$ になる点を選んだ。Fig.5-1 (b)は2つの変換点を持つマルチ集中点法の概観を示す。

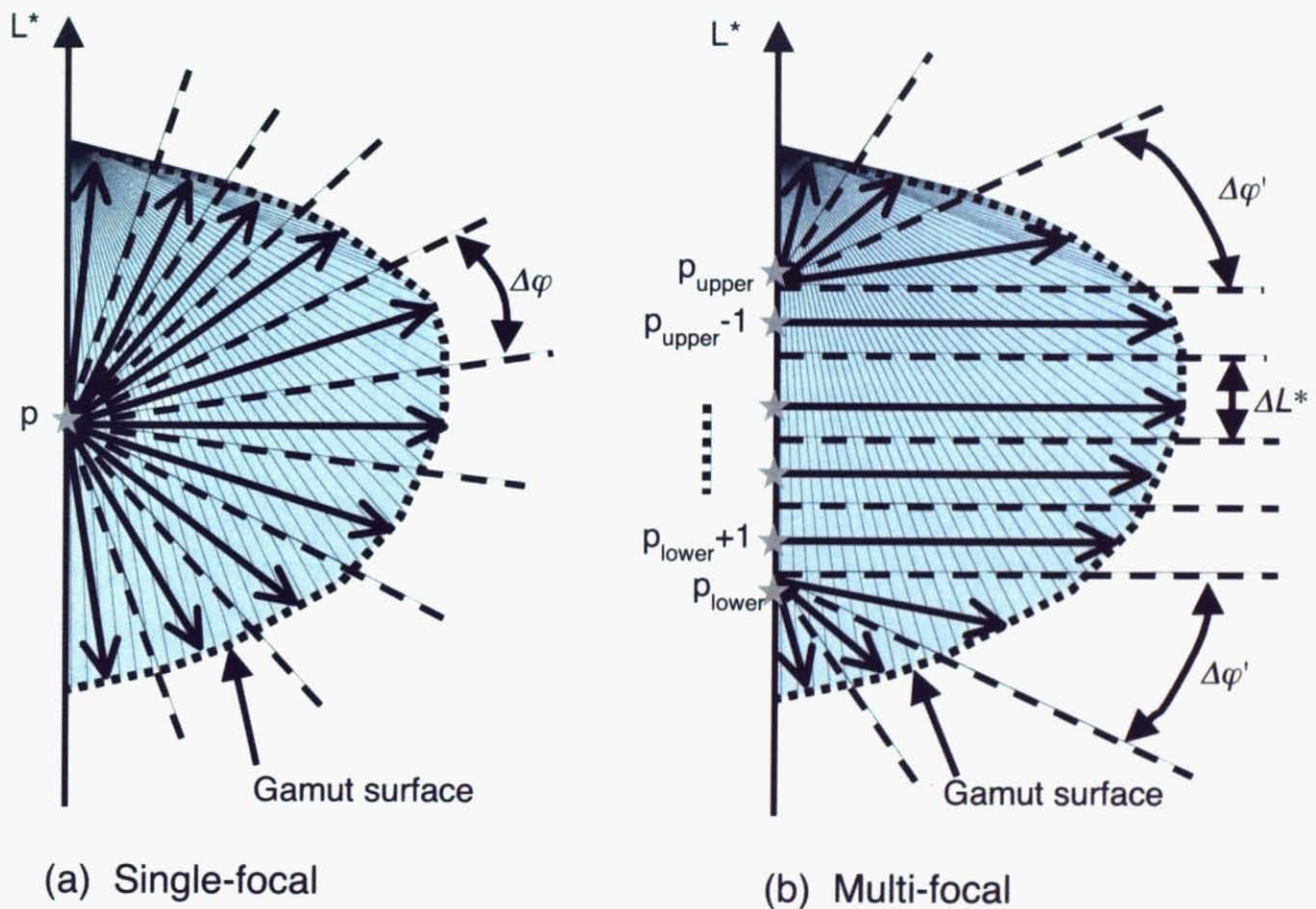


Fig. 5-1 単一集中点法(a)とマルチ集中点法(b)の概観図

5.2.2 デバイス色域外郭⁵⁶⁻⁵⁸

プリンタの色域外郭はプリント出力サンプル点から得る。これらの個数にはある程度の制限があり、このままで極座標抽出を等分割角度で行なうと分割区域によっては欠落が生じる。そこで、プリンタ色域の抽出は、第3章で示したように、まずサンプル色度の個数

が等しくなるような不均等角度で分割してやり、この分割空間内での最外郭点を抽出した後、点を結んで外郭面を構成し、最後に外郭面と交差する点を均等角度で計算して得ることとした。Fig.5-2 は Epson PM750C インクジェットプリンタの色域外郭形状の比較例を示す。これは 9261 色のサンプル点数から得られた結果である。色域表面を形成させる単純な方法はポリゴンメッシュにより三角面パッチを貼り合わせるものである。Fig.5-2(a)は 18×16 の θ と ϕ に分割された表面点を用いて $2 \times 18 \times 16$ 枚の三角面で形成されている。

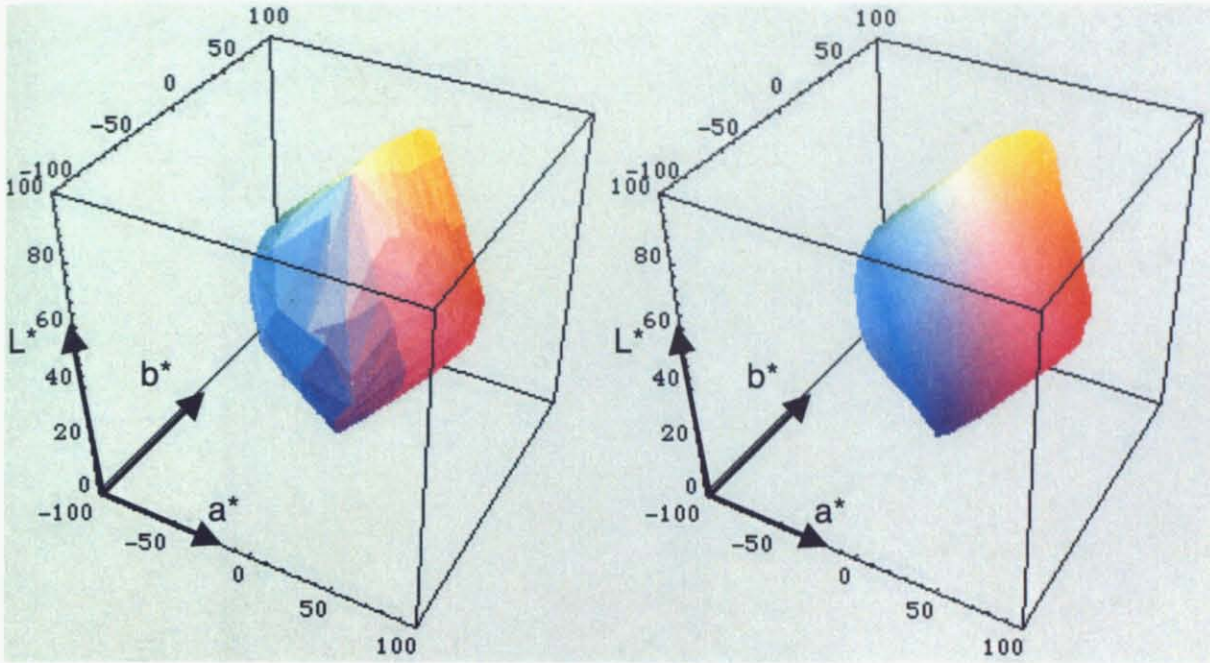
一方、より滑らかな外郭面を得るためには、Overhauser スプライン関数による継目無し外郭形成法が利用される。この関数で示される表面 $P(u,v)$ は 2 つのパラメーター u と v に基づいて式(5-1)～式(5-3)によって算出される。

$$P(u,v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 N_i^3(u) N_j^3(v) V_{ij}, \quad 0 \leq u < 1; \quad 0 \leq v < 1 \quad (5-1)$$

$$N^3(x) = \begin{bmatrix} x^3 & x^2 & x & 1 \end{bmatrix} \cdot M_{CR}, \quad x = u, v \quad (5-2)$$

$$M_{CR} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

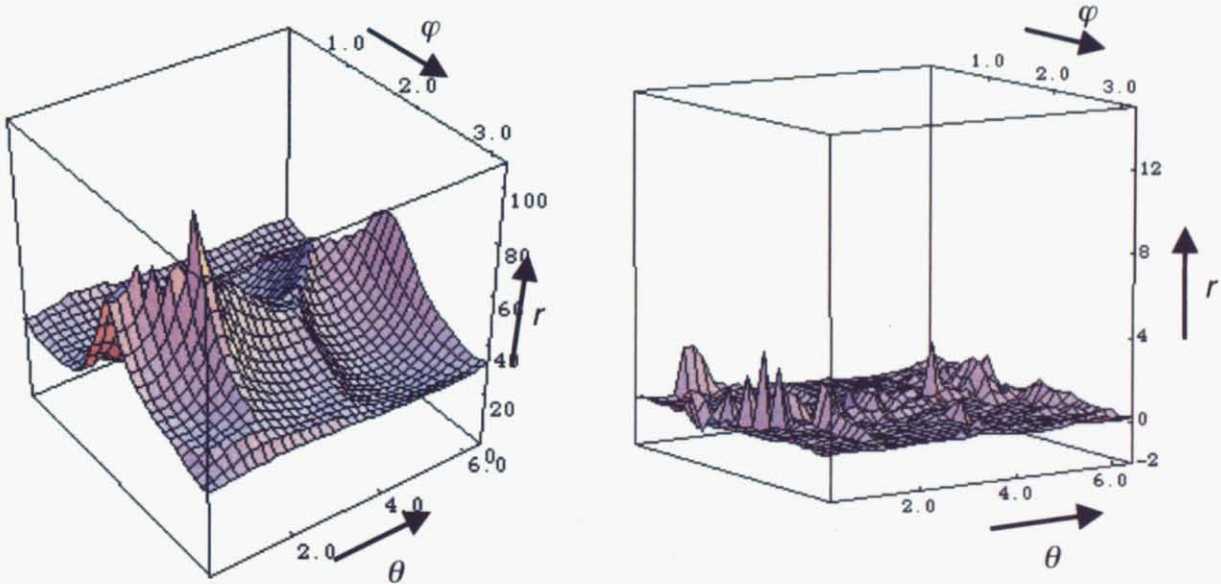
ここで V_{ij} ($i=1,2,3,4; j=1,2,3,4$) は 16 個の制御点行列を示す。 M_{CR} は Catmull-Rom 基本行列と呼ばれ、あるセグメントと隣のセグメントが滑らかに継ぐように境界位置を定めることができる。 Fig.5-2(b) は Overhauser スプライン関数により (a) の色域を示したものである。プリンタの放射ベクトルは外郭表面に対して離散的な均等角度により交点計算によって求めた。 Fig.5-3(a) はポリゴンメッシュ表面から算出されたプリンタの放射ベクトルを 3D *r-image* で示す。ポリゴンメッシュと Overhauser スプライン関数による放射ベクトルの差を Fig.5-3(b) に示す。両者には僅かな差が認められる。



(a) Polygon mesh

(b) Overhauser Spline Functions

Fig. 5-2 インクジェットプリンタの色域外郭形状の比較 (Epson PM750C)



(a) Single focal *r-image* with polygon

(b) Difference between polygon and Spline

Fig. 5-3 プリンタの *r-image* と形成法の違いによるベクトル差

5.2.3 画像依存マッピング (I-D GMA) への適用

Fig.5-4 は *r-image* を用いた I-D GMA の概略を示す。

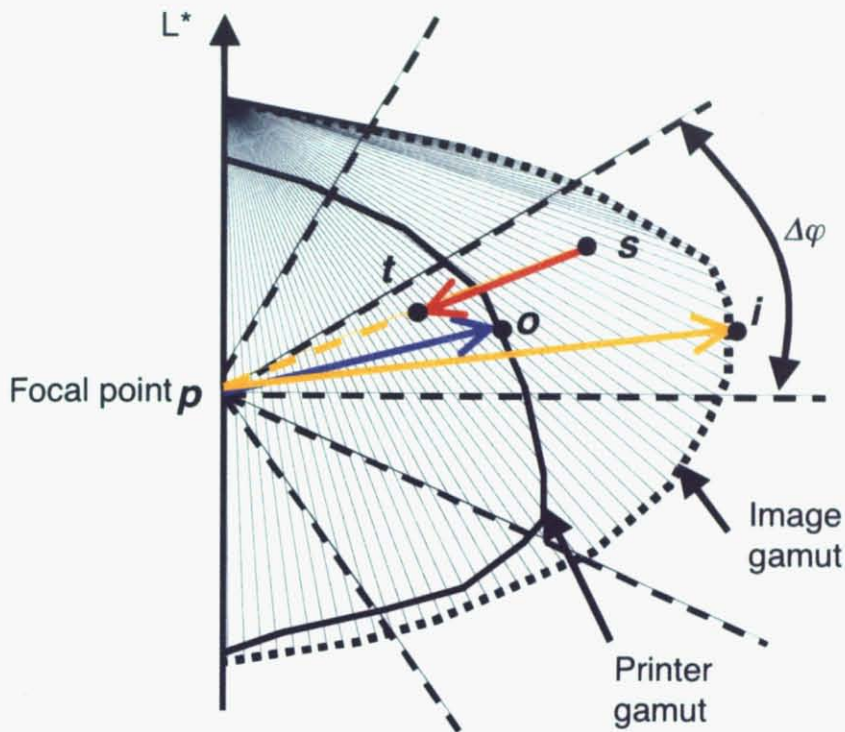


Fig. 5-4 *r-image* を用いた I-D GMA の概略

分割された CIELAB 空間において、画像源の色点 s (source) は画像の放射ベクトル \vec{pi} と出力デバイスの放射ベクトル \vec{po} を参照して集中点 p へ向かう線上に沿って目的機器の色域内の再現色点 t (target) としてマッピングされる。1つの分割セグメント内では、すべての対象色は \vec{pi} と \vec{po} の比率を用い式(5-4)によって算出される。

$$\vec{pt} = \vec{po} \cdot \left(\frac{\vec{ps}}{\vec{pi}} \right)^\gamma \quad (5-4)$$

ここで γ はガンマ圧縮関数であり、色域圧縮した結果を線形のまま扱うと中心部の変化が大きくて明度・彩度が圧縮され過ぎるため、非線形に圧縮度合いを調整する関数であり、 $0.5 \leq \gamma \leq 0.8$ が用いられる。

5.3 実験

5.3.1 心理評価実験

カラーハードコピーの出力において、RGB データから CMYK 信号へ変換するために色修正が非常に重要な問題となる。本研究では、インクジェットプリンタ 9261 色の出力色票から得られた 3 次元多項式近似によりハードコピーを作成した。

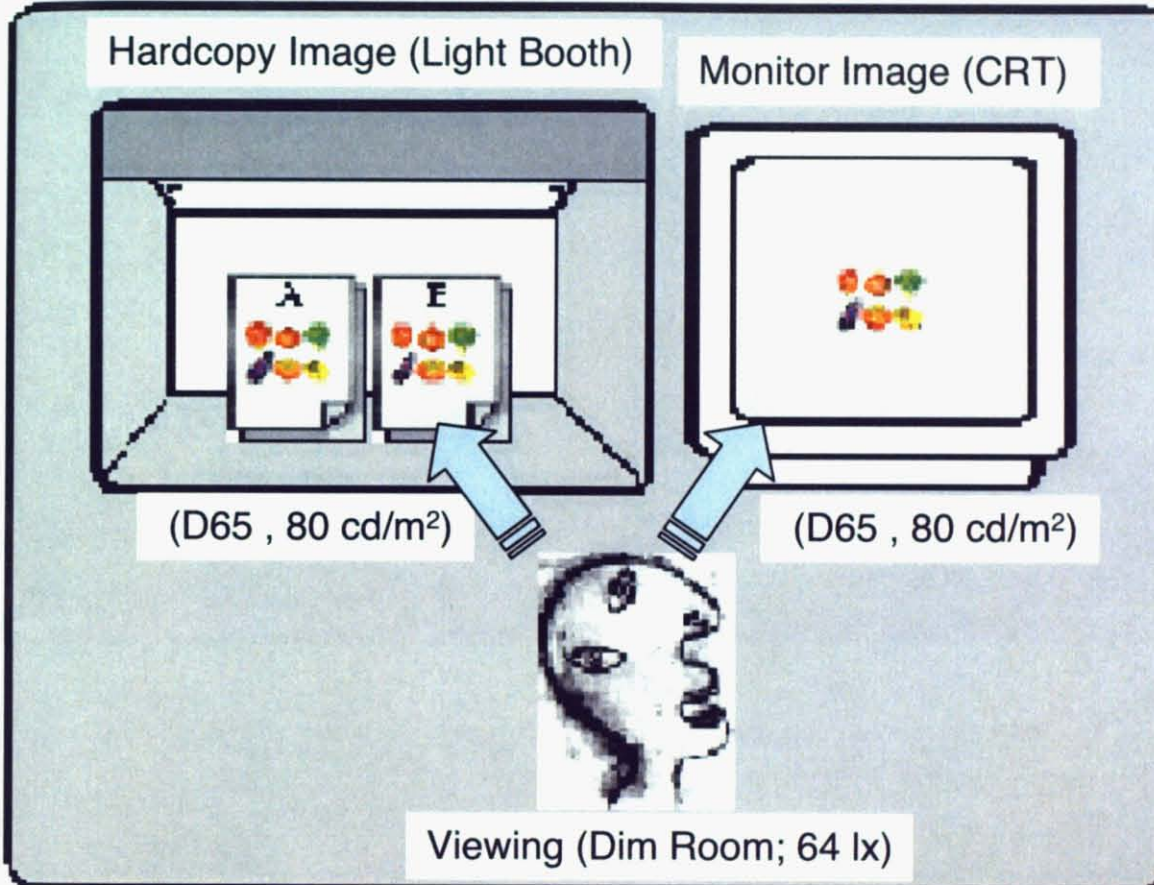


Fig. 5-5 モニタ画像とプリンタ画像を比較する心理評価実験の環境

心理評価実験は CRT ディスプレーに表示したオリジナル原稿と観察ボックス内に置かれたハードコピーとの色の見えを比較する方法をとった (Fig.5-5)。ディスプレイの白色点は輝度 80 cd/m^2 で CIE 白色光源 D65 に設定した。ハードコピーはディスプレイの白色点設定と同様に光源を設定した観察ボックス内に配置した。観察法はディスプレイとハードコピーを自由に観察できる両眼自由視で行った。一対比較法を使用し、被験者は観察ボックス内に提示された 2 種類の画像の内どちらがディスプレイに提示された画像に近いかを返答してもらった。被験者は 21 人、室内は照度 64 lx 近傍の観察環境に設定した。

一対比較法において、「原画像の色の見えに近い」と判断された確率を求め、人間は差の判断を頭の中で正規分布にする、という Thurstone 仮説に基づき確率から正規偏差に変

換する。この正規偏差の平均値が対象となっているモデルの間隔尺度(interval values)である。このデータ分布の大小を相対的に示す間隔尺度はデータ統計の z-score 値を用いた^{60,61}。Thurstone は比較判断の法則を解くために5つの仮説に分類したが、最も簡便で良く使われるケース5では、2つの刺激の分布間の相関係数は0で各々の分布は同じ標準偏差を持つと仮定される⁶²。この仮定によれば、間隔尺度の1単位は $\sqrt{2}\sigma$ に等しい。z-score 値を95%信頼区間で示した場合、正規分布の95%での確率密度関数値は1.96なので、

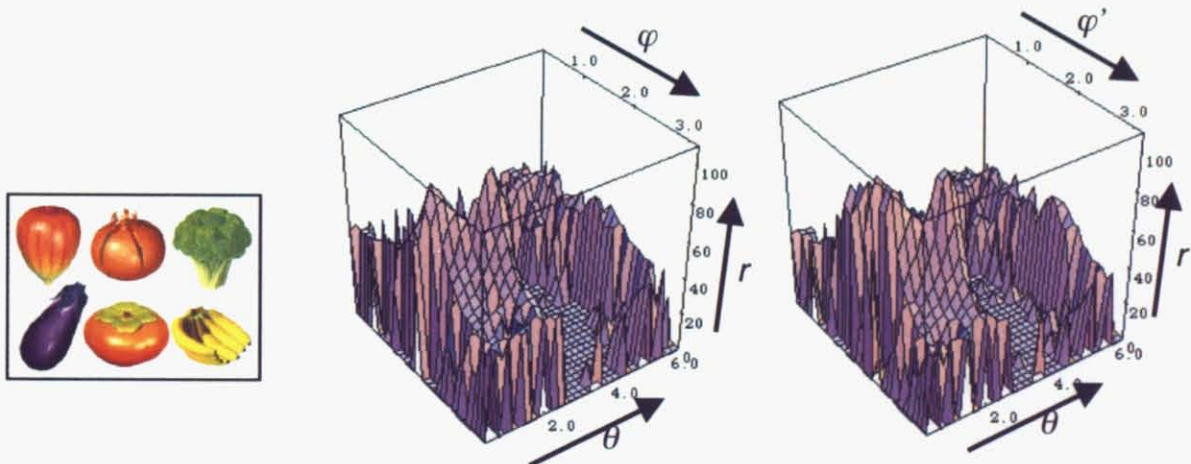
$$\pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \pm 1.96 \frac{1}{\sqrt{2N}} = \pm 0.302 \text{ units}$$

ここで、Nは観察者の人数（本実験ではN=21）である。

これは2つのモデルの z-score 値の差が0.302以下ならば、2つのモデルに有為差が無いことを示す。

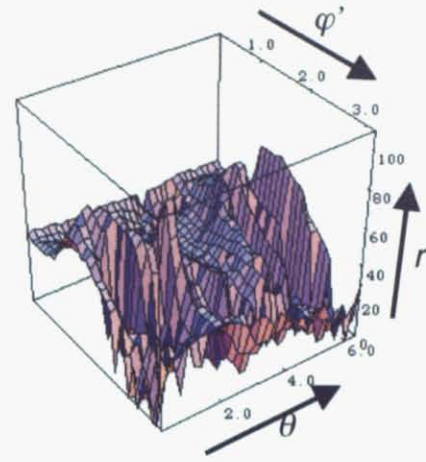
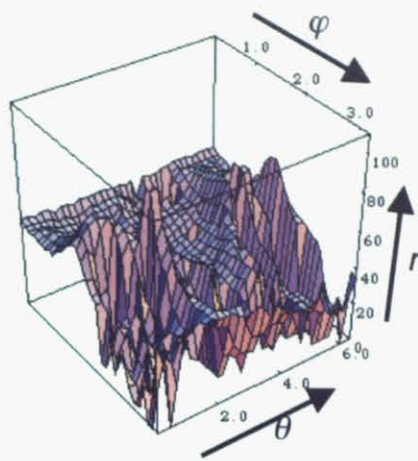
5.3.2 実験1 -集中点の位置-

Fig.5-6, 5-7は *r-image* の例である。Fig.5-6(a)はCG画像「フルーツと野菜」で Fig.5-6(b)は単一集中点の *r-image* を3次元表示、Fig.5-6(c)はマルチ集中点の *r-image* 3次元表示を示す。Fig.5-7(a)はsRGB画像「wool」で、同様に Fig.5-7(b)は単一集中点の *r-image* 3次元表示、Fig.5-7(c)はマルチ集中点の *r-image* 3次元表示を示す。



(a) CG image "fruits and vegetables" (b) *r-image* by single-focal points (c) *r-image* by multi-focal points

Fig. 5-6 CG画像における単一集中点とマルチ集中点の2方法による *r-image* の違い



(a) sRGB image
"wool"

(b) r-image by single-focal
points

(c) r-image by multi-focal
points

Fig. 5-7 sRGB 画像における単一焦点とマルチ焦点の2方法による *r-image* の違い

単一焦点の *r-image* は画像中心点 $[L^*, a^*, b^*=50,0,0]$ で θ と ϕ が 32×32 の分割区域に分けた。マルチ焦点の *r-image* でも同様に色相は 32 分割されるが、明度方向には、 $p_{lower} = [L^*, a^*, b^*=41,0,0]$ 以下と、 $p_{upper} = [L^*, a^*, b^*=56,0,0]$ 以上では放射的に 10 分割、両点の間は平行に 12 分割した。各々の図を見ると単一焦点とマルチ焦点の間には僅かな違いがある。CG 画像では θ の低い側（オレンジからイエロー）において放射ベクトルは著しく大きくなるが θ の中間部（グリーンからシアン）では Fig.5-2(a)に見られるプリンタのそれよりも小さいことがわかる。一方、sRGB 画像では放射ベクトルはプリンタよりも全範囲において大きい。

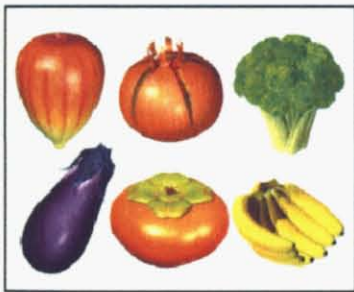
Fig.5-8 に3種類のテスト画像を示す。CG 画像と2種類の sRGB 画像を心理評価実験に用いた。CG 画像は極端に彩度の高い画像を含み、また、6種類の個々の画像は評価すべき特徴的な画質要素を含んでいる。イチジクとザクロは赤系の階調評価に、茄子は青みの色相変化の判定に、柿は偽輪郭の発生判定に、ブロッコリーは緑系の階調評価に、バナナは黄色みの評価にそれぞれ利用した。sRGB 画像の「bride」では肌色の判定に、「wool」では全色相に亘って色みを含む自然画像の代表として利用した。

マッピング条件は 1) 単一焦点: $r=0.8$ 、2) マルチ焦点: $r=0.8$ 、3) マルチ焦点: $r=0.5$ 、とこれらの3条件は画像依存型 (I-D) の GMA である。比較の為に、4) クリッピング、5) 機器依存型 (D-D) の GMA を行なった (Table 5-1)。

実験 1 での処理結果画像を Fig.5-9~Fig.5-11 に示す。

Table 5-1 実験1：マッピング条件

No.	GMA method	γ
(1)	I-D Single-focal	0.8
(2)	I-D Multi-focal	0.8
(3)	I-D Multi-focal	0.5
(4)	Clipping Single-focal	-
(5)	D-D Single-focal	1.0



(a) CG-image
"fruits&vegetables"



(b) sRGB-image
"bride"



(c) sRGB-image
"wool"

Fig. 5-8 テスト画像：CG 画像と 2 種類の sRGB 画像



I-D single 0.8



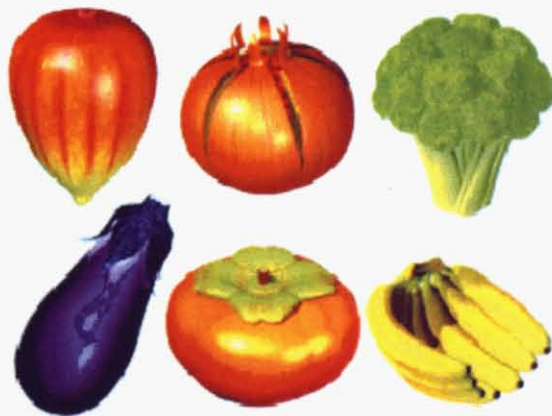
I-D multi 0.5



I-D multi 0.8



clipping



D-D

Fig. 5-9 テスト CG 画像 “fruits&vegetables”における実験 1 のマッピング処理結果



I-D single 0.8



I-D multi 0.5



I-D multi 0.8



clipping



D-D

Fig. 5-10 テスト sRGB 画像 “bride”における実験 1 のマッピング処理結果



I-D single 0.8



I-D multi 0.5



I-D multi 0.8



clipping



D-D

Fig. 5-11 テスト sRGB 画像 “wool”における実験 1 のマッピング処理結果

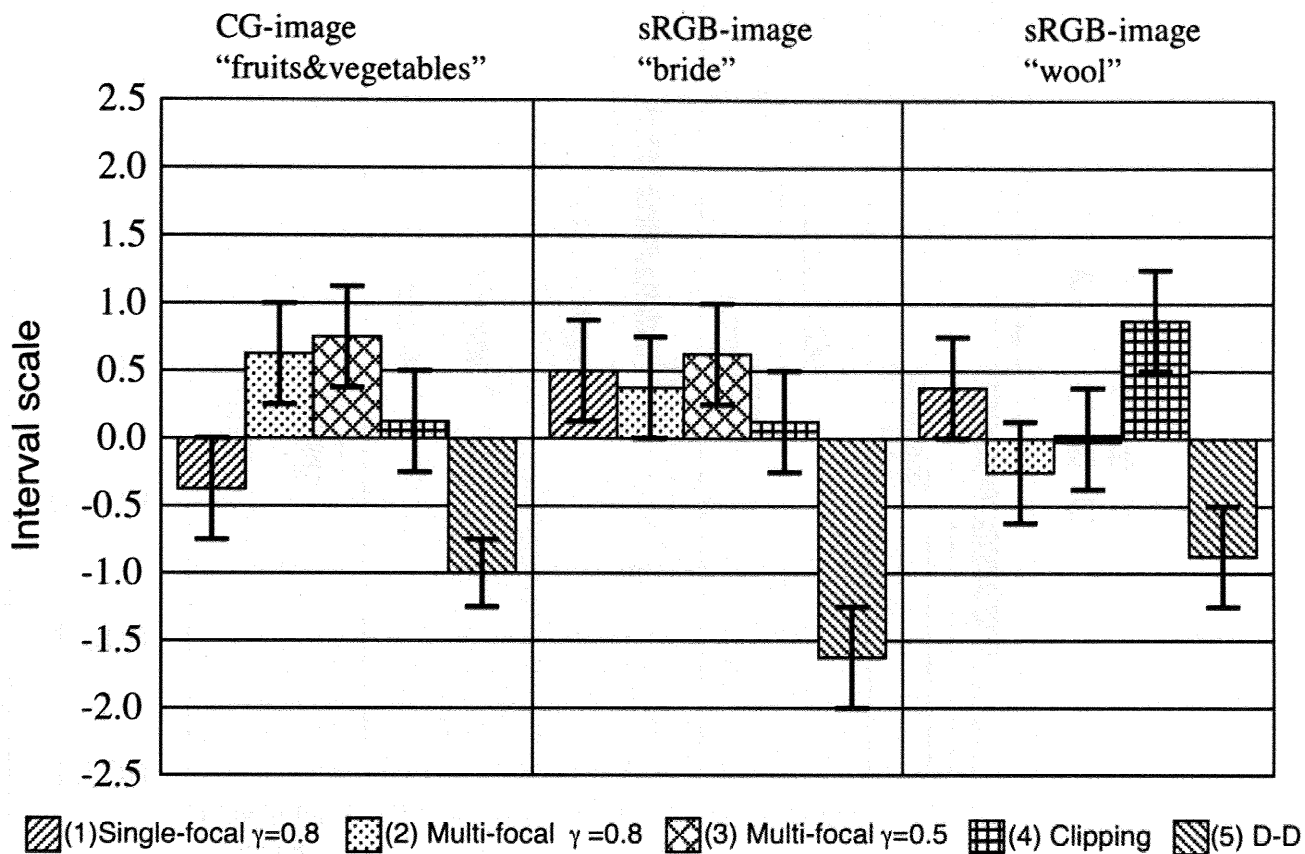


Fig. 5-12 実験 1 における 3 画像の評価結果

Fig.5-12 に個々の画像についての 21 人の被験者による評価結果を示す。どの画像においても *D-D GMA* は明らかに悪い評価を受けた。CG 画像ではマルチ集中点法は良い評価であったが、単一集中点法が悪く評価された。sRGB 画像の「bride」では単一集中点、マルチ集中点ともに良い評価であった。一方、sRGB 画像の「wool」では *I-D GMA* よりもクリッピング法が良い評価となった。

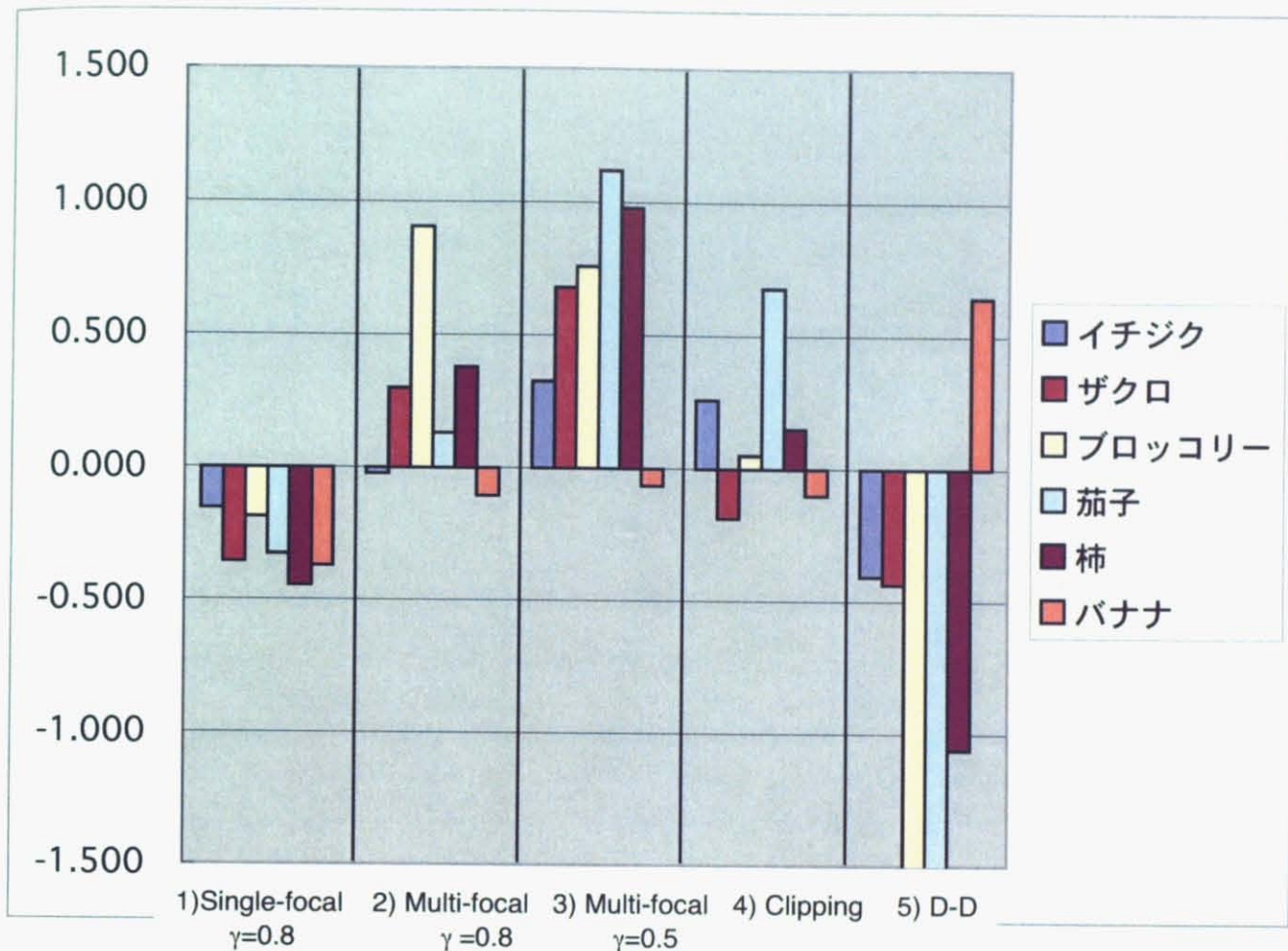


Fig.5-13 実験1におけるCG画像6種類の評価結果

Fig.5-12 では、CG 画像は6種類の画像を1枚の画像として観察をしてもらった評価結果を示した。このCG画像については個々の画像毎にも評価をしてもらい、その結果をFig.5-13に示す。やはりマルチ集中点法は良い評価で単一集中点法が悪く評価された。画像中心点を $[L^*, a^*, b^*=50,0,0]$ に取っているので高明度部の低下が影響していると言える。ほとんどの画像で悪い評価を受けたD-D GMAであるが「バナナ」に関しては高い評価を得た。CRTデバイスの色域と画像色域の差が少なく再現に差が少なかったことも一因である。

5.3.3 実験2 -出力装置の色域外郭-

プリンタの色域外郭をポリゴンメッシュから作成したものと Overhauser スプライン関数により作成したもののマッピング結果の違いを心理評価実験で調べた。テスト画像は実験1と同じ3種類を用いた。マッピング条件は、1) と 4) は単一集中点で $\gamma=0.8$ 、2) と 5) はマルチ集中点で $\gamma=0.8$ 、3) と 6) はクリッピング法で、条件 1) ~3) はポリゴンメッシュ、条件 4) ~6) は Overhauser スプライン関数によるものである (Table 5-2)。

実験2での処理結果画像を Fig.5-14~Fig.5-16 に示す。

Table 5-2 実験2 : ポリゴンメッシュと Overhauser スプライン関数との違い

No.	GMA method	Surface
(1)	I-D Single-focal	Polygon mesh
(2)	I-D Multi-focal	Polygon mesh
(3)	Clipping Single-focal	Polygon mesh
(4)	I-D Single-focal	Overhauser Spline
(5)	I-D Multi-focal	Overhauser Spline
(6)	Clipping Single-focal	Overhauser Spline



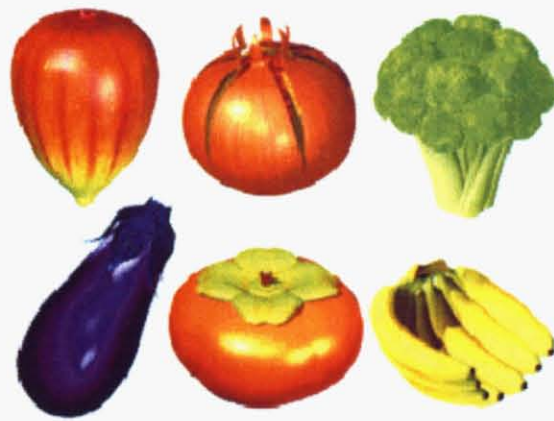
Polygon I-D single 0.8



Spline I-D single 0.8



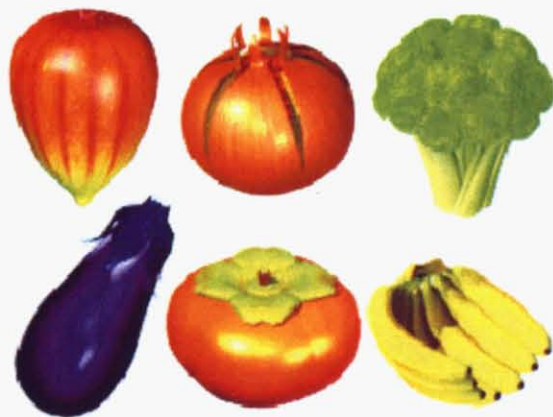
Polygon I-D multi 0.8



Spline I-D multi 0.8



Polygon clipping



Spline clipping

Fig. 5-14 テスト CG 画像 “fruits&vegetables”における実験2のマッピング処理結果



Polygon I-D single 0.8



Spline I-D single 0.8



Polygon I-D multi 0.8



Spline I-D multi 0.8



Polygon clipping



Spline clipping

Fig. 5-15 テスト sRGB 画像 “bride”における実験 2 のマッピング処理結果



Polygon I-D single 0.8



Spline I-D single 0.8



Polygon I-D multi 0.8



Spline I-D multi 0.8



Polygon clipping



Spline clipping

Fig. 5-16 テスト sRGB 画像 “wool”における実験 2 のマッピング処理結果

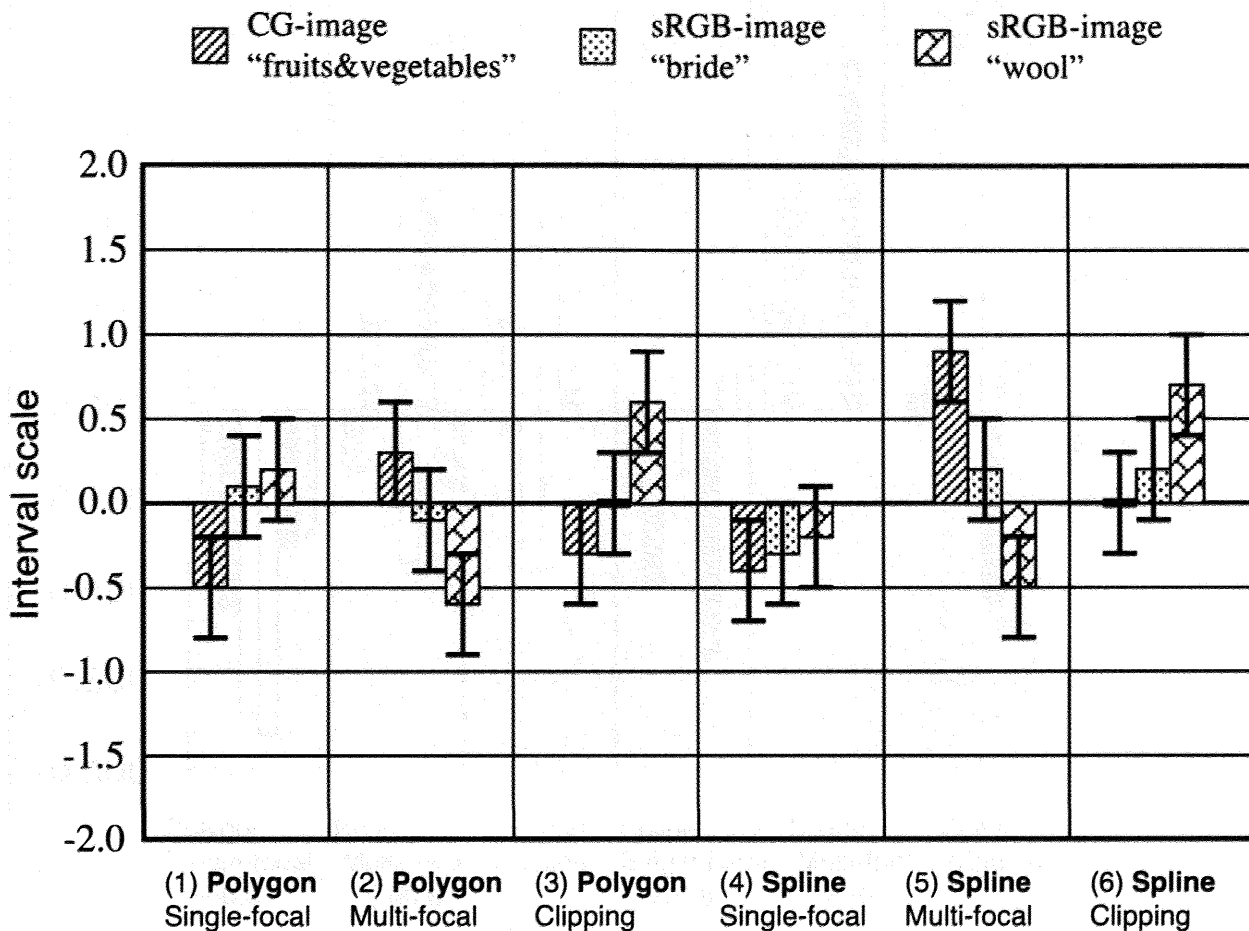


Fig. 5-17 実験 2 における 3 画像の評価結果

Fig.5-17 に個々の画像についての評価結果を示す。CG 画像ではマルチ集中点は良い評価を受けたが単一集中点とクリッピングは悪い評価であった。sRGB 画像の「wool」ではクリッピング法が良い評価となった。これら 2つの画像では Overhauser スプライン関数による外郭面の方が良い結果を示した。これに対し、sRGB 画像の「bride」ではポリゴンメッシュにより形成された方が若干良い結果となるが、完全に言い切れる程の有為差ではなかった。

実験 1 の時と同様に CG 画像の 6 種類を個々に評価した結果を Fig.5-18 に示す。CG 画像 6 種類を 1 枚として見た時と同様に Overhauser スプライン関数による外郭面の方が良い結果を示した。

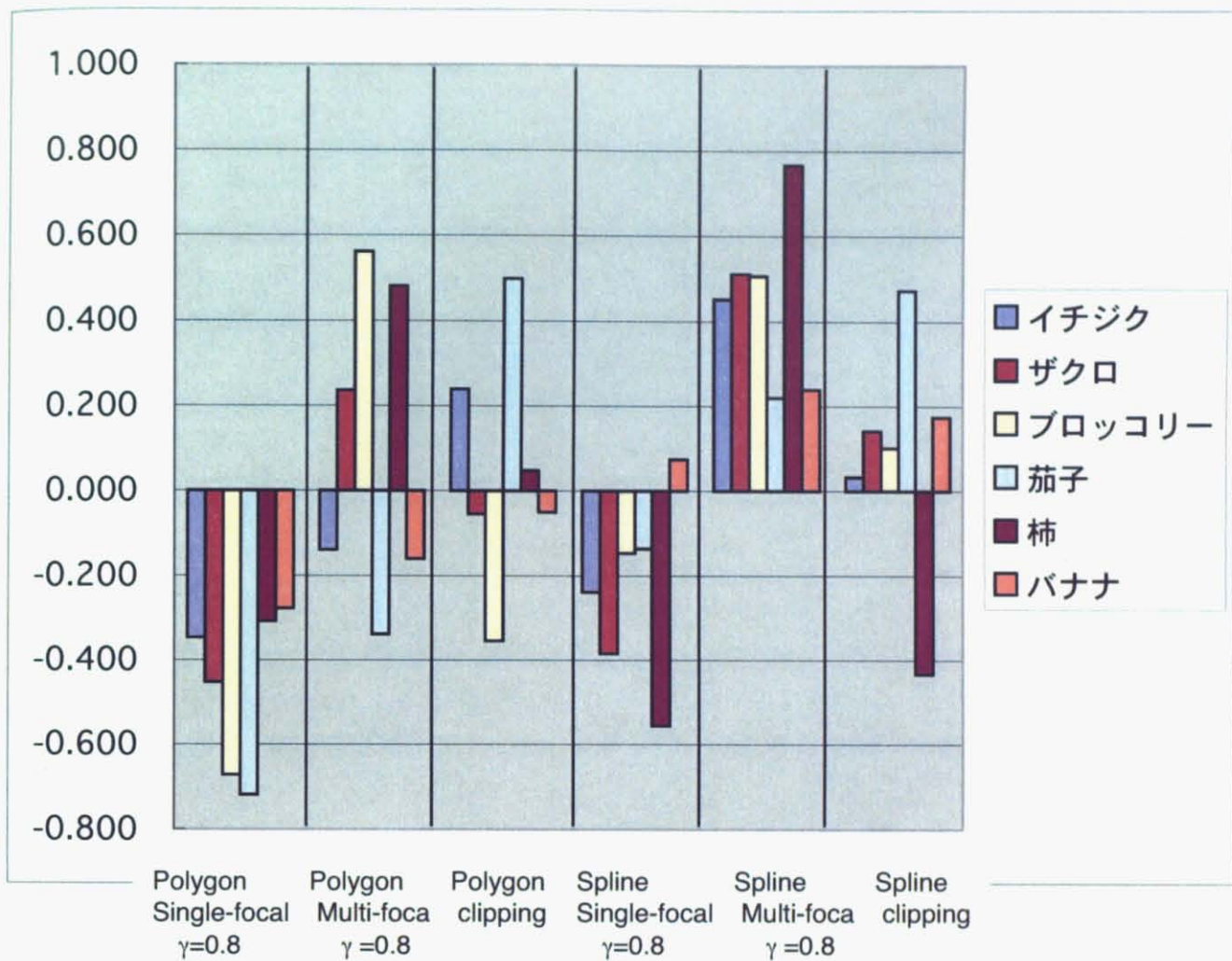


Fig.5-18 実験 2 における CG 画像 6 種類の評価結果

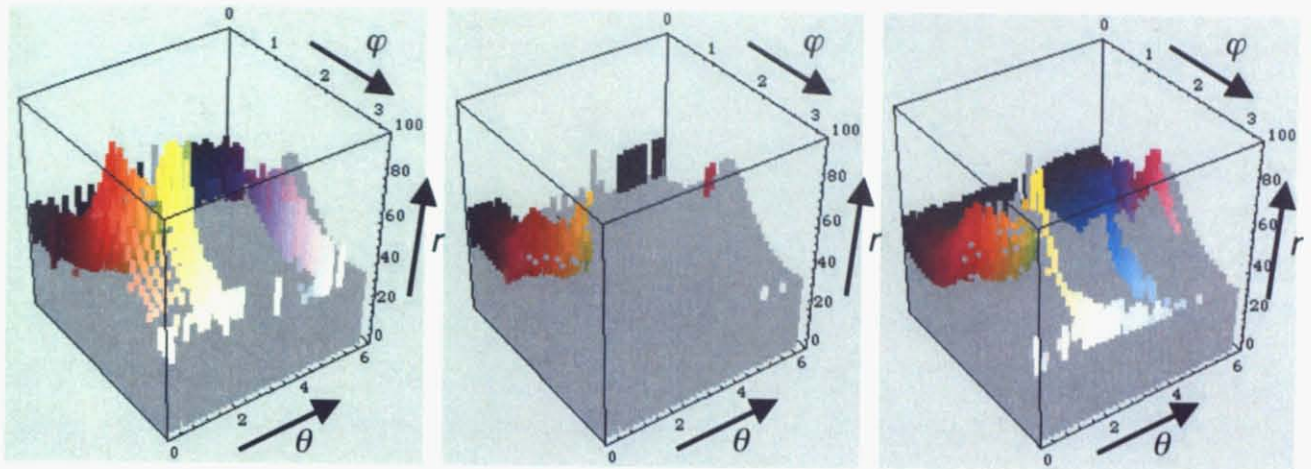
5.4 考察とまとめ

画像とデバイスの両色域を3次元記述モデルで比較する方法を考案した。画像とデバイスの色域境界は極座標分割によって抽出された *r-image* により素早く比較される。デバイスの色域では、ポリゴンメッシュから作成したものと Overhauser スプライン関数により作成したものを考察した。単一集中点とマルチ集中点の両手法により、*r-image* を参照することでデバイス色域の内部へ画像の色点をマッピングする **3D I-D GMA** を行なった。心理評価実験による結果ではマルチ集中点による **3D I-D GMA** が大体において良い結果を得た。しかし、sRGB 画像「wool」のようにプリンタ色域よりも全色域において広いのだが過剰分は左程大きくない場合クリッピング処理の方が良い結果を得た。

Table 5-3 はプリンタの *r-image* に比べて画像のそれが過剰分になっている分割空間の個数、過剰ベクトルの平均値、およびその標準偏差を示す。CG 画像のように、過剰ベクトル平均値も標準偏差も共に大きければ、偽輪郭と著しい階調ロスを防ぐことができる **I-D GMA** が効果的である。これに対して、sRGB 画像「wool」のように、過剰ベクトル平均値も標準偏差も共に小さければ、偽輪郭は小さくてプリンタ色域内部の階調圧縮をしないクリッピング法が適している。

Table 5-3 プリンタより画像の *r-image* が過剰となる分割空間の個数、平均値、標準偏差

	Total number	Mean value	S. D.
CG-image	355	14.81	8.133
sRGB(bridge)	146	14.96	4.871
sRGB(wool)	493	10.56	5.373



(a) CG-image "fruits&vegetables" (b) sRGB-image "bride" (c) sRGB-image "wool"

Fig. 5-19 プリンタと画像の両 *r-image* を組合わせた比較結果

Fig.5-19 はプリンタと画像の両 *r-image* を組合わけて比較した例を示す。グレーで示している部分はプリンタの色域で、色づけされた部分がプリンタに対して過剰な画像のベクトル部である。CG 画像ではレッドからイエロー・グリーンそしてブルー・バイオレットがプリンタ色域よりも著しく大きいことがわかる。一方で sRGB 画像「wool」ではプリンタに対してほぼ全色域で大きくなっているがその程度は CG 画像に比べて明らかに小さい。sRGB 画像の「bride」では過剰部分の平均ベクトル値は大きい、低明度部に多いために目立ち難い。**I-D GMA** は CG 画像のように色域の大きな画像には必要である。一方、クリッピング法は過剰色域が小さいものには効果的である。プリンタデバイスの色域表現法は Overhauser スプライン関数により形成された色域外郭は継目のない滑らかな外郭を創り出す。**3D I-D GMA** では効果が少なく、計算時間の負担を考えると 32×32 のポリゴンメッシュを使えば十分である。最適な色域圧縮方法は画像のコンテンツによって選択されるべきだと考える。

第6章 色域伸張への拡張

6.1 はじめに

現在まで多くの研究がなされている色域写像アルゴリズム(GMA)は、ディスプレイとプリントの間の写像に代表されるように広色域な画像源の色を狭色域なデバイス内へ割付ける圧縮アルゴリズムが中心である。高い飽和度を持ったCG画像等には色域圧縮が必要不可欠である。

一方、各種デバイスの性能は近年飛躍的に向上し、解像度等の品質面から印刷時間や静音性に至るまで全ての面で進歩しており、再現色域についても広色域再現を実現している。特に、これまで再現色域が他のデバイスに比べて狭いと言われて来たハードコピープリンタの分野での進歩は目覚ましい。カラーハードコピープリンタの中で大きなシェアを占めている家庭用カラーインクジェットプリンタでは、ソフトウェア的な誤差拡散法等の擬似階調表現法の改良や、ハードウェア的にはインク滴のダウンサイズ・印刷紙やインクの改良等、技術的な進歩によりデバイスの色域再現に関しては階調性・再現範囲の両面で日々進歩を遂げている。

ところが、それらのデバイスでの表示対象となる実際の画像コンテンツが、デバイスの再現色域全体を利用していることはほとんどない。このため、画像再現における色の見えの不一致に対して施される色域圧縮だけを普遍的に全ての画像に適用する訳には行かない。画像の持つ色域がデバイスの再現色域より狭い場合には、デバイスの再現色域で利用されない無駄な部分が出てしまう。撮像条件や照明環境等により画像源がプリンタ色域より大幅に狭くなる場合では、より良い再現の為には画像源の色域に対して伸張を必要とする場合が生ずる^{45,46}。

前章で色域圧縮については画像源の色分布による色域を考慮した3次元GMAについて提案した。本章では、色域が狭まった画像を対象にして、グレースケール画像に広く用いられて来たヒストグラム変換を色空間に適用し、平坦化、分布関数の特定化、ストレッチにより色域を伸張することによって、デバイスの色域を有効に活用した画像再現を試みた。

6.2 ヒストグラム変換

6.2.1 ヒストグラム平坦化

グレースケール画像に広く用いられて来たヒストグラム変換の手法の1つにヒストグラム平坦化(Histogram Equalization)がある。主に明暗コントラストが低いために画像の細部を捉えにくい場合に対しては、コントラストを強調するための優れた方法として利用されている。この方法は、単純な関数による濃度変換ではなく、Fig. 6-1のように、全ての濃度値においてヒストグラムの高さが等しくなるように濃度変換する方法である。そのため、変換後のヒストグラムの累積積分は線形の増加関数となる。

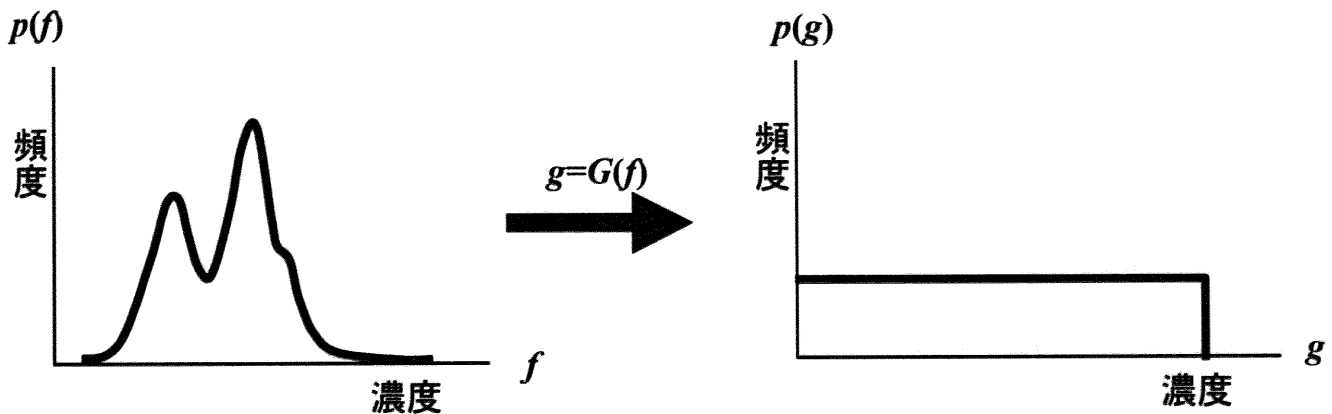


Fig. 6-1 ヒストグラム平坦化

具体的な処理原理は、任意に選んだオリジナル画像の画素値の確率密度関数 $p(f)$ に対し累積積分を取ることで、式 6-1 に示す平坦化変換関数 $g=G(f)$ が得られる。

$$g = G(f) = \int_0^f p(x) dx \quad (6-1)$$

平坦化の結果、画素数の少ない濃度域の画素は、その前後の濃度画素と共に非常に近い出力濃度値に変換される。逆に、画素数の多い濃度域の画素は変換により幅広い濃度域に分配される。分布の完全な平坦化を行うには、入力画像において同じ濃度値を持つ画素が、出力画像では異なった濃度値を持つ必要がある。同一濃度の画素に濃度値を割り当てる方法は、ランダムに選ぶ手法と周囲の画素の濃度を考慮して順序付けをする手法がある。後者に基づいた方が雑音の少ない画像が得られるとされる。本研究では、式 6-1 を用いて平坦化を行うため、同一濃度の画素は平坦化後も同一の濃度値を取る。

ヒストグラムの平坦化によってコントラストが強調される理由は次のように考えられる。一般の画像では Fig. 6-1 のように濃度の分布が密な部分と（ヒストグラムの山）と疎な部分（ヒストグラムの谷）があり、平坦化することによって、前者の部分が引き伸ばされ、後者の部分は圧縮される。一般に、濃度範囲が圧縮される部分に比べ、引き伸ばされる部分に属する画素の数が多いため、全体としてコントラストが強調される傾向となる。

6.2.2 ヒストグラム特定化

ヒストグラム特定化(Histogram Specification) は、ヒストグラム平坦化の応用で、画像のヒストグラム分布を Fig. 6-2 のように特定の形状に変換することである。

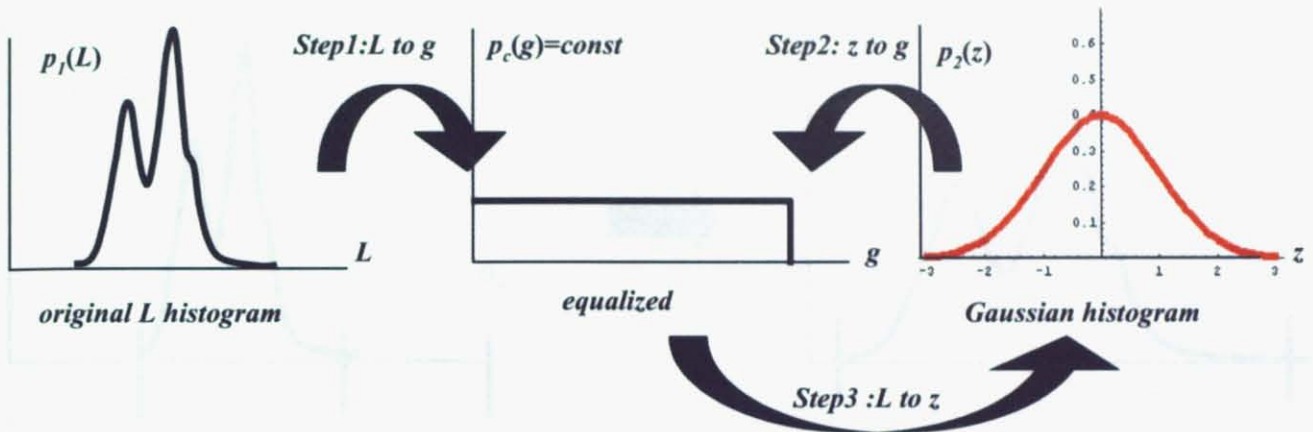


Fig. 6-2 ヒストグラム特定化

処理手順は以下の通りである。

- (1) 処理画像のヒストグラム $p_1(L)$ を平坦化変換関数 $g = F(L) = \int_0^L p_1(x) dx$ により平坦化する。
- (2) 目標とするヒストグラム分布 $p_2(z)$ を平坦化変換関数 $g = G(z) = \int_0^z p_2(x) dx$ で平坦化する。
- (3) 平坦化された分布 $p_c(g)$ に対して式 6-2 に従って目標のヒストグラムに変換する。

$$z = G^{-1}(g) = G^{-1}(F(L)) \quad (6-2)$$

本研究ではヒストグラム特定化の処理において、目標とする分布をガウス分布に設定した。これは、ガウス分布が各種の確率分布モデルの極限形とみなすことが出来、自然現象や誤差の度数分布の多くがこの分布になるということから、統計的なモデル分布として用いた。式 6-3 のように分布自体が平均 μ と分散 σ^2 といったパラメータで制御することが可能で、いくつかのプロファイルを選択することが容易であることによる。

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(g-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6-3)$$

6.2.3 ヒストグラム伸張化 (ストレッチ)

ヒストグラム伸張化(Histogram Stretch)は、輝度や濃度値がある範囲に偏って分布しているような画像に対して、Fig. 6-3 のようにもっと広い範囲にヒストグラム分布を広げるという変換方法である。

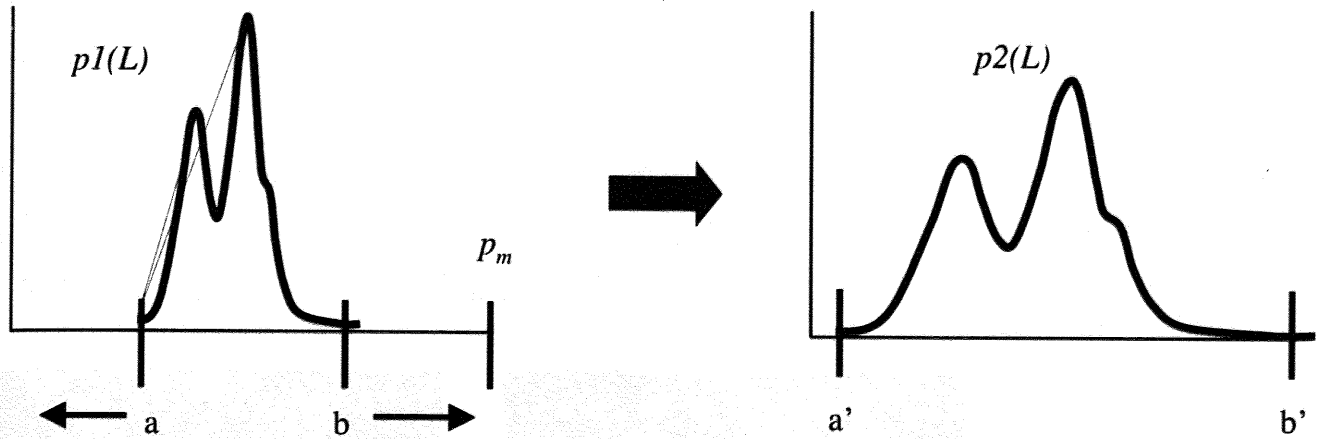


Fig. 6-3 ヒストグラム伸張化

この操作は、引き伸ばしたい範囲(a, b)を決定し、 a を最小値に、 b を最大値 p_m に引き伸ばす。ヒストグラムの範囲 $[a, b]$ から範囲 $[a', b']$ に変換することを考えた場合、上記の規則は次式によって行うことができる。

$$p2(L) = p_m \frac{p1(L) - a}{b - a} \quad (6-4)$$

この式によって、任意の画素の $p1(L)$ が $p2(L)$ に変換されることになり、画像源の持つヒストグラム分布を維持した変換が得られる。

6.3 実験結果

6.3.1 ヒストグラム平坦化による明度伸張

多くのカラー画像処理において、輝度明度情報は最終的な画像品質に関して非常に重要な役割を演じる。人間の視覚特性が、色情報の変化よりも明度情報の変化に敏感であるためである。GMA や画像圧縮でも明度情報の変換は重視されている。

対象画像の RGB 値を CIELAB 値に変換し、明度の L*値にだけ各ヒストグラム変換を用いて、ヒストグラム平坦化を施した結果を Fig. 6-4 に示す。

オリジナルと処理画像のヒストグラムを一緒に図示しているが、オリジナルの明度分布が処理によって平坦化された明度分布になっていることがわかる。平坦化の場合はコントラストが強調され過ぎてしまい、見えを好ましくするための適切な処理方法だとは言えない。

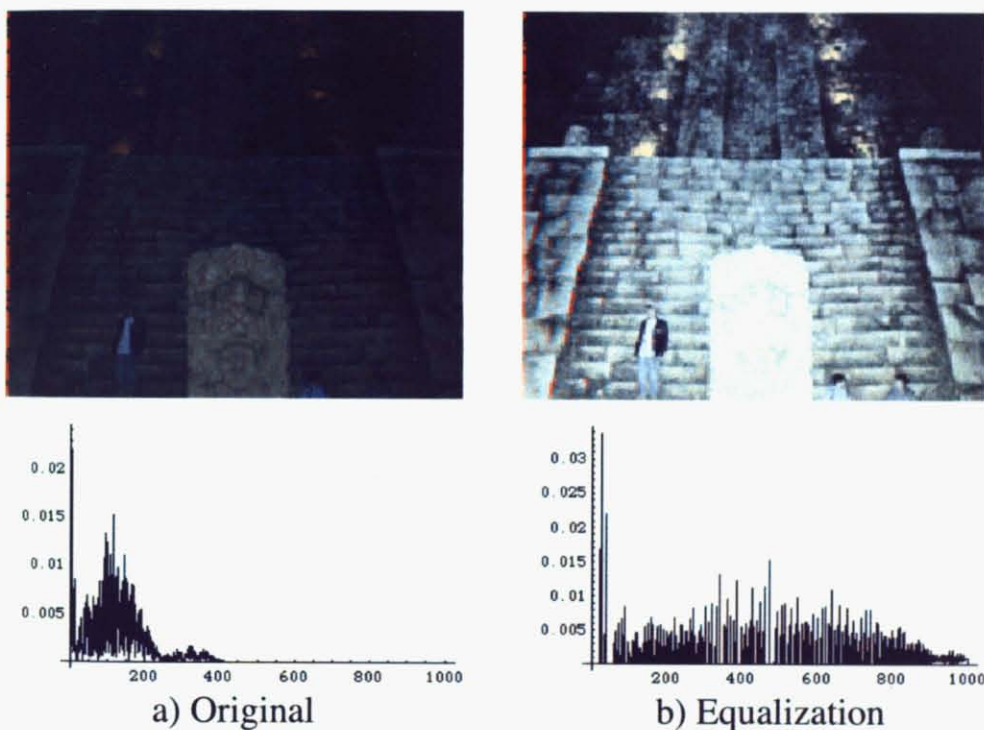


Fig. 6-4 ヒストグラム平坦化による明度伸張の結果画像とヒストグラム例

6.3.2 ヒストグラム特定化（ガウス分布化）による明度伸張

Fig. 6-4(a)の画像においてL*値をヒストグラム特定化で処理した結果を Fig. 6-5 に示す。特定化を行う上では、目標とする分布をガウス分布に設定した。ガウス分布は平均 μ と標準偏差 σ の取り方によって様々な形を取り得る。a) の列では $\mu=0.3$ 、 $\sigma=0.1$ のガウス分布を、b) の列では $\mu=0.5$ 、 $\sigma=0.1$ のガウス分布を用いて特定化した結果を示す。

実際の画像のヒストグラムはガウス分布のような単調なものではなく、ほとんどのものは多峰性である。画像源のヒストグラムの多峰性を考慮して $\sigma=0.1$ 、 $\mu=0.25$ と $\sigma=0.15$ 、 $\mu=0.5$ のガウス分布を組み合わせ作り出した分布に特定化したものが c) 列である。a) や b) に比べて明度が改善されている。

目標分布はガウス分布を組み合わせることで適切な分布を得ることが出来る。しかし、この場合には画像の目標分布を探し出さなければならず自動的な処理には発展しにくい。

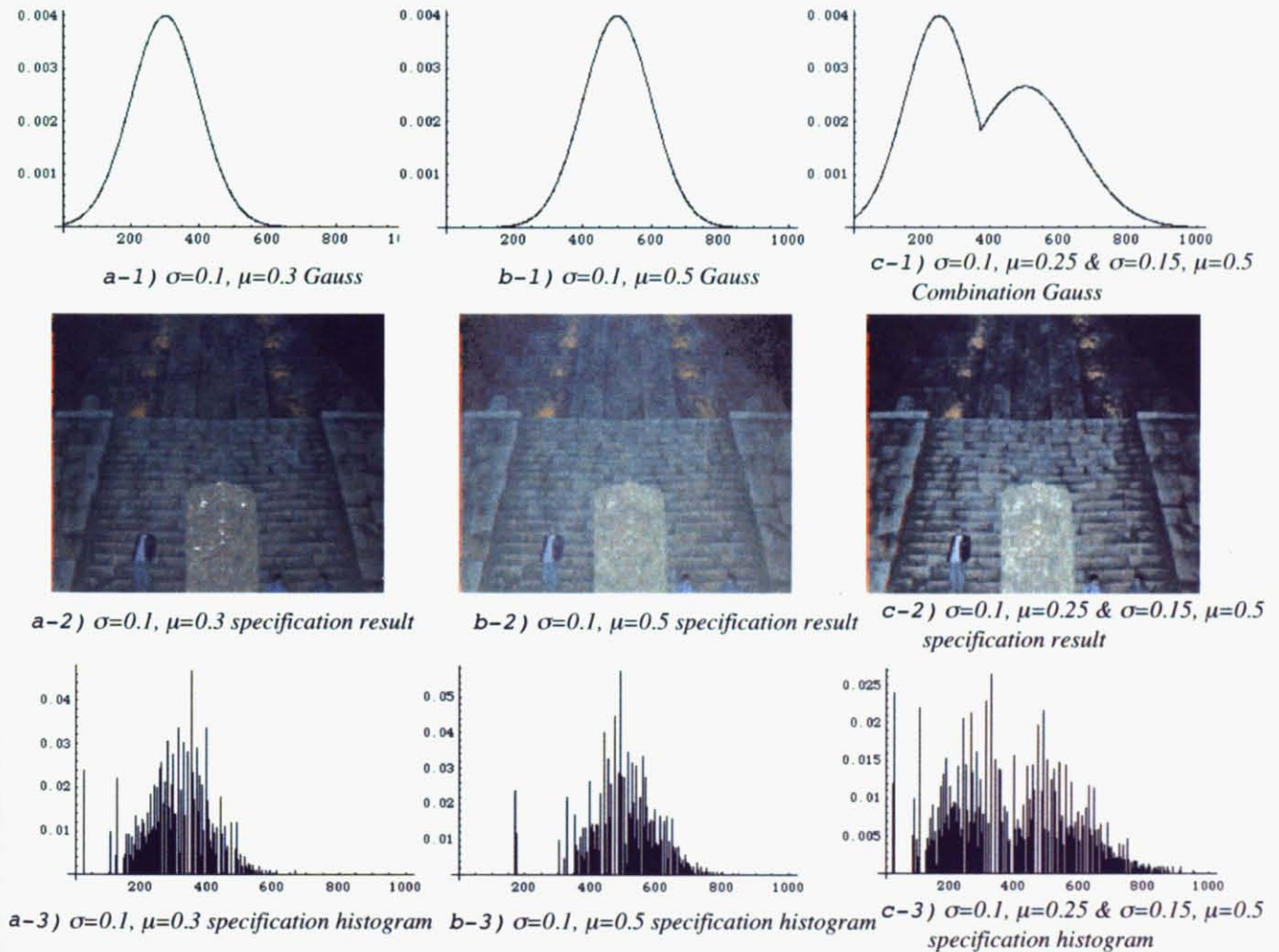


Fig. 6-5 ガウス分布を目標としたヒストグラム特定化による明度伸張の結果

6.3.3 ヒストグラム伸張化（ストレッチ）による明度伸張

Fig. 6-4(a)の画像においてL*値をヒストグラムストレッチで処理した結果を Fig. 6-6 に示す。平坦化、特定化、ストレッチによる3方式の中ではストレッチによる方法が元画像の持つ分布を保った変換となる。この画像においては自動的にオリジナルのヒストグラム分布の最高点と最低点をストレッチした。

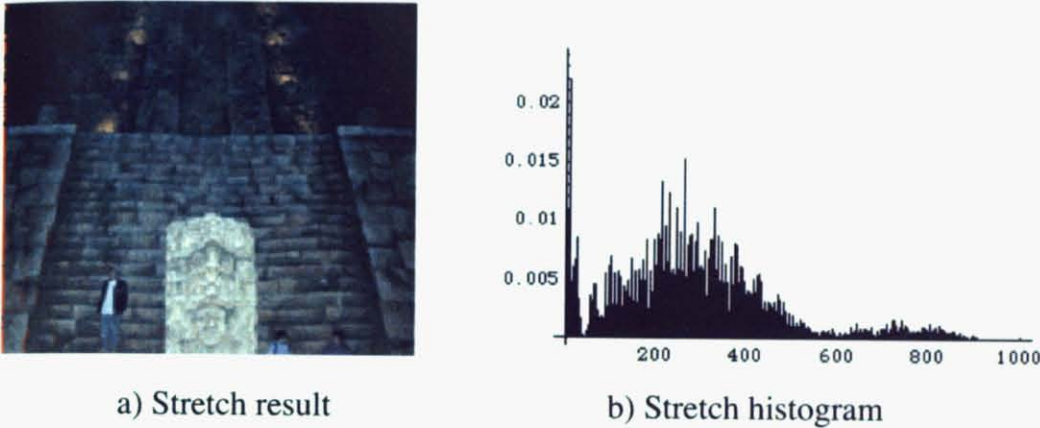


Fig. 6-6 画像"stair"でのヒストグラムストレッチによる明度伸張の結果

しかしながら、Fig. 6-7 の画像例ではオリジナルのヒストグラム分布の最高点と最低点を自動的に処理した場合は b)列のようにほとんど変わらない結果となった。これは画像内の微小なキャッチライトが $L^*=98$ 前後にあったことに起因する。オリジナル分布の最高点を $L^*=63$ に設定してストレッチした場合は c)列のように改善を図れた。

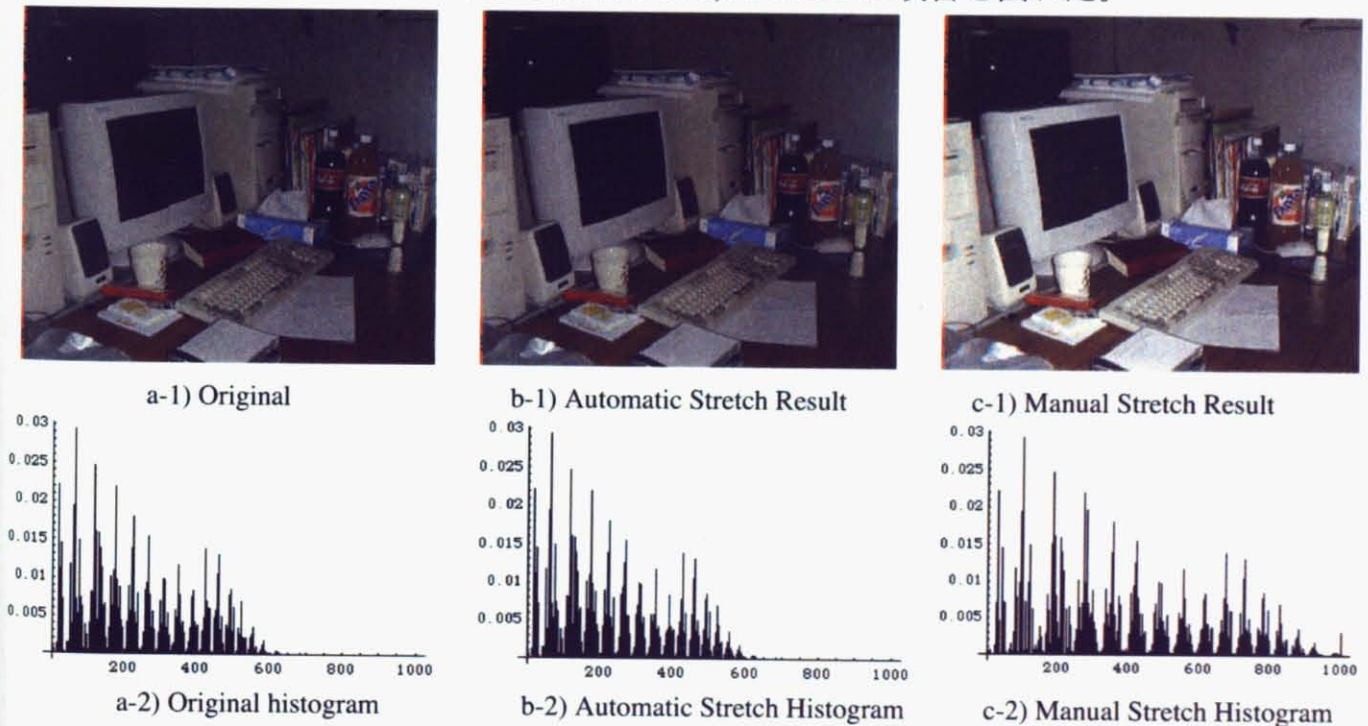


Fig. 6-7 画像"room"でのヒストグラムストレッチによる明度伸張の結果

6.3.4 ヒストグラム伸張化（ストレッチ）による明度と彩度の伸張

ヒストグラムストレッチを L*値に施し、色相を 16 分割して分割内の彩度ヒストグラムをストレッチした結果を Fig. 6-8～Fig. 6-10 に示す。Fig.6-8 の画像”party”では彩度ヒストグラムストレッチをすることで鮮やかな色みを再現することが出来ている。



Fig. 6-8 画像”party”でのヒストグラムストレッチによる明度と彩度の色域伸張の結果



Fig. 6-9 画像 “stair”でのヒストグラムストレッチによる明度と彩度の色域伸張の結果

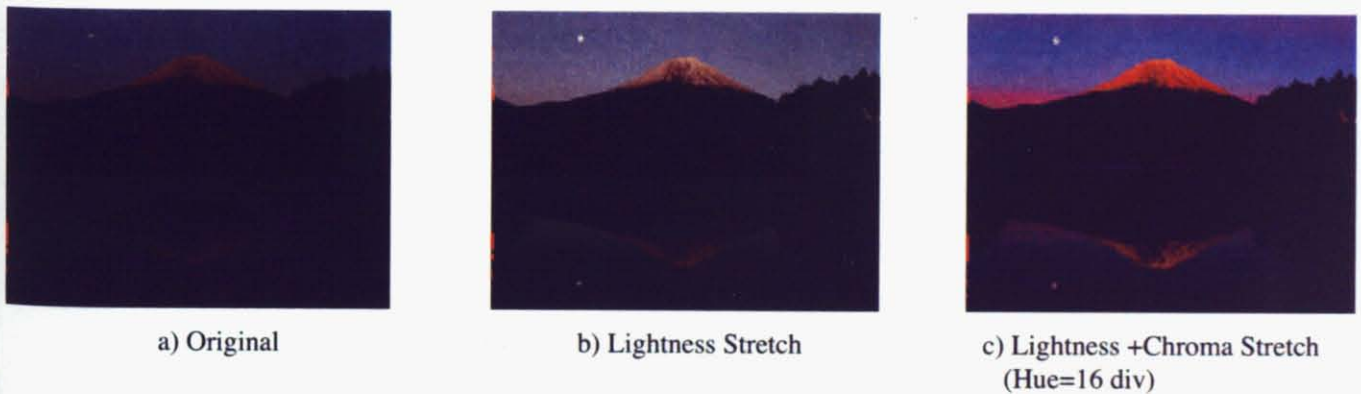
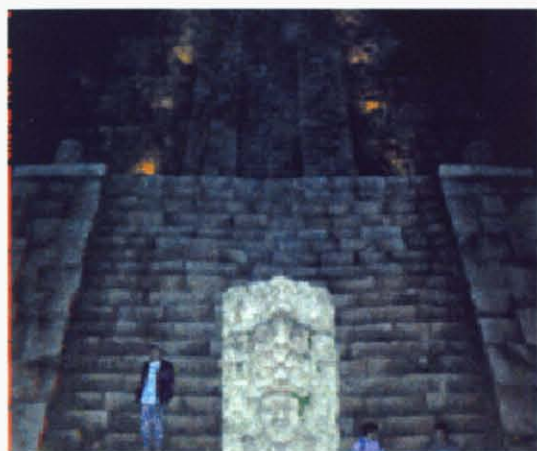


Fig. 6-10 画像 “fuji”でのヒストグラムストレッチによる明度と彩度の色域伸張の結果

一方で、Fig. 6-9 の “stair” 画像と、Fig.6-10 の “fuji”画像では彩度ヒストグラムをストレッチしたことにより余分な色がついて不自然な印象を与えている。無彩色に近い領域が特定の色相方向に偏っている場合、高彩度方向に拡散されてしまい、画像全体の色調に影響が出る。より自然な画像再現には中性色の保持が必要となる。

Fig.6-11(a) には、Fig. 6-9 の “stair” 画像で、彩度 $C^* < 10$ を中性色として保持し、この部分以外に明度と彩度をストレッチ処理した結果を示す。Fig. 6-9(b)の明度だけをストレッチした結果とほぼ同じになった。Fig.6-11(b) には、Fig.6-10 の “fuji”画像で彩度 $C^* < 25$ を保持してから同様に処理した結果を示す。この場合も Fig. 6-10(b)の明度だけをストレッチした結果とほぼ同じ結果を示している。



a) “stair” : Neutral < 10
Lightness + Chroma Stretch
(Hue = 16 div)



b) “fuji” : Neutral < 25
Lightness + Chroma Stretch
(Hue = 16 div)

Fig.6-11 中性色を保持した明度・彩度のヒストグラムスクラッチ結果

6.4 まとめ

最適な色域写像は画像のコンテンツによって選択されるべきである。各種デバイスの性能は近年飛躍的に向上し、プリンタの色域も色材や装置の改良によって目覚ましく改善されている。このため、撮像条件や照明環境等により画像源がプリンタ色域より大幅に狭くなることも発生し、より良い再現の為には画像源の色域に対して伸張を必要とする場合が生ずる。画像源の持つコンテンツを評価し表示デバイスに対して画像に依存した色域写像を決定し、色域の圧縮と伸張を合わせ持つ GMA を検討する必要がある。

第6章では、色域が狭まった画像を対象として、ヒストグラム変換を用いた、ヒストグラム平坦化、ガウス分布関数へのヒストグラム特定化、ヒストグラムストレッチ、の3方式による伸張処理を活用した画像表現を試みた。

ヒストグラム平坦化処理は低コントラスト画像の明暗強調に用いられるものであり、好ましい色域伸張には不向きである。

ヒストグラム特定化処理はガウス分布関数を選べるために好みの変換を得ることが可能である。また、ガウス分布を組み合わせることで変換に対する自由度が大きい。しかし、各画像に合ったガウス分布を特定化することが必要で、自動的に好ましい色域伸張を得ることは困難となる。

ヒストグラムストレッチ処理は、画像源の持つヒストグラム分布を維持した変換が得られるために、自動的に好ましい色域伸張を得やすい。画像源の微小なキャッチライト部やノイズがある場合にも、面積的あるいは空間的に除去できれば自動色域伸張が可能となる。

無彩色に近い領域が特定の色相方向に偏っている場合、余分な色がついて不自然な印象を与える場合があり、より自然な画像再現には中性色の保持が必要となる。

第7章 双方向 Versatile 色域マッピングへの展開

7.1 はじめに

画像に依存した3次元色域写像モデルは、従来のデバイス依存モデルに比べて、異種メディア間のより自然なカラー画像再現に一定の効果を挙げることができた。しかし現状では、次の制約がある。

[1] 写像のモードは「圧縮」か「伸張」の一方に限定されており、その選択は人の判断に拠っている。

[2] 「伸張」については、目標画像が未知のため、**GMA** のパラメータは試行錯誤的に調整している。

これまでの成果をさらに発展させるには、「圧縮」または「伸張」の画像適性を自動判定し、一貫した設計概念の下で、双方向写像を実現する **Versatile な GMA** が求められる^{54,55}。本研究では色域の圧縮と伸張を合わせ持つ GMA を検討している。画像源の色域に対して圧縮が必要なのか伸張するのかを *r-image* として考案した色域境界記述法を用いて判断するシステムについて展開する。全体のシステム概念図は Fig. 7-1 に示す。

7.2 評価用画像源の収集と分類

色域マッピングの研究は盛んであるにも拘わらず、評価用のテストチャートはなく、流通している標準画像を使用することが多いが、写真・印刷によるテスト画像はメディア自体の色域が狭いため、「圧縮」実験には不適當。このため CG 画像以外に広色域の自然画像の収集・分類から着手する。また「伸張」実験用には、同一被写体を正常照明と不完全照明とで撮像し、前者を目標画像、後者を試験画像とすることで、定量的評価が可能な評価用データベースを準備していく。さらに広色域・広階調の **HDR (High Dynamic Range) 画像源** についても収集していく。広色域画像の取得には、分光画像計測による照明光を考慮した彩度域の限界を見極める必要がある。

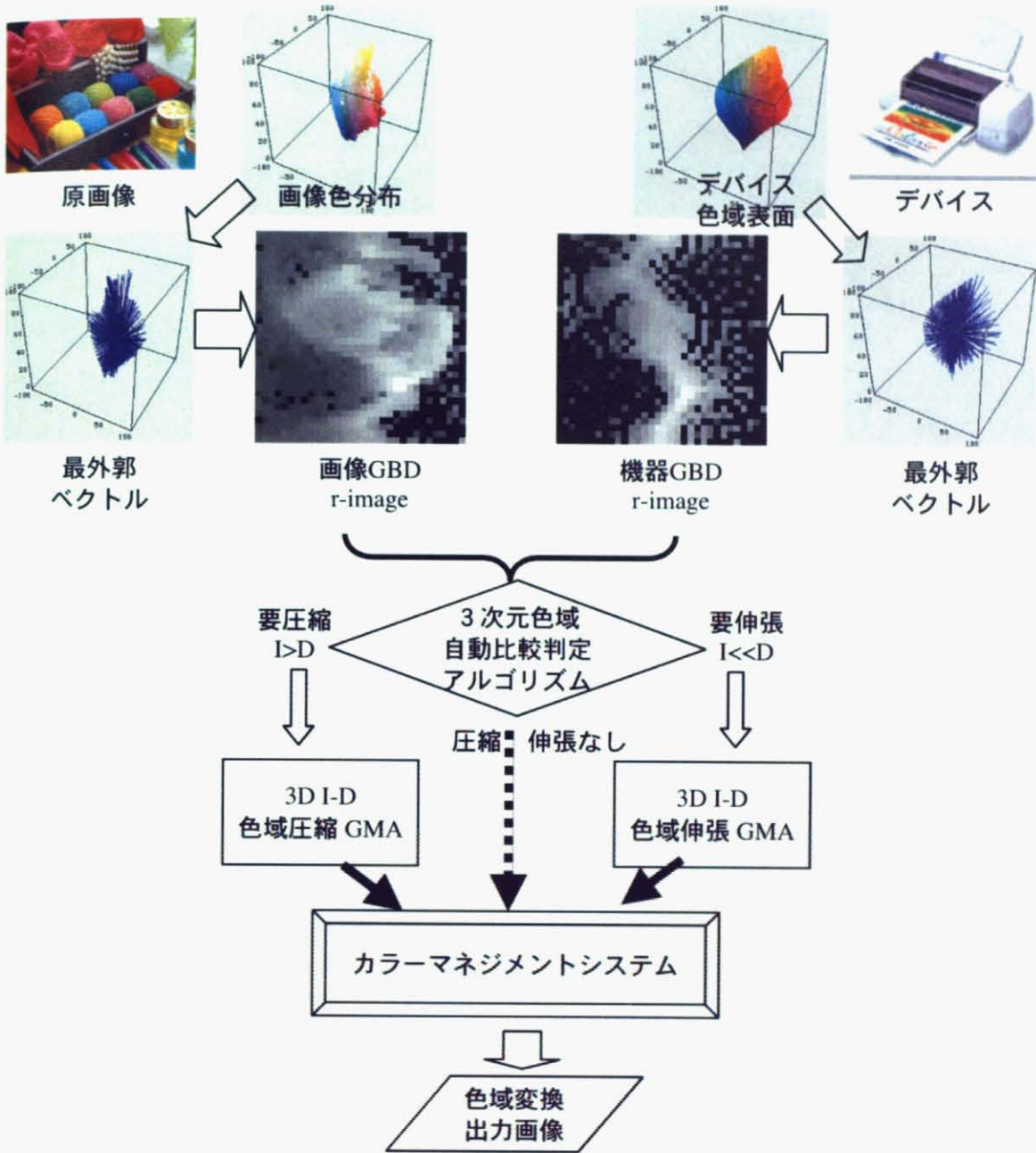


Fig. 7-1 圧縮・伸張双方向色域写像システムの概念図

7.3 画像源とデバイスの3次元色域の定量的比較アルゴリズムの確立

開発した *r-image* による色域記述(*GBD*) は、2次元濃淡画像で3次元色域を表現し、各画素が3次元の最外郭ベクトルに対応するから、画素の輝度値の計数から容易に色立体のサイズへの換算が可能である。定量的色域比較法として下記の案が考えられ、それぞれの得失を代表的画像について検討する。

- ・ (A) *r-image* の体積計量による比較：セグメントの立体角を考慮した体積比較
- ・ (B) *r-image* の輝度値による比較：*r-image* の全画素値の単純積算値による比較
- ・ (C) *r-image* の輝度値の差分による比較：色域外に突出したベクトルの積算値比較

この他に視覚的に分かり易い比較結果を試した例を Fig. 7-2 に示す。これは各種画像の *r-image* について、プリンタの色域より突出している部分にだけ着色し、プリンタより小さい部分は灰色で表示した図である。

圧縮を必要とする画像の a) "wool"、c) "bride"、f) "vegetables" では、赤枠で囲った中明度部において、プリンタ色域よりも画像色域の方が突出している部分がある。これに対して、伸張を必要とする画像の b) "stair"、d) "party"、e) "room" では中明度部での画像色域の突出部がほとんど無い事が分かる。プリンタからの突出や不足の量がどの程度であるか示されていないので、これだけでは判別の決め手にならないが、計量値と共に考慮することで色域比較判定に利用できる。

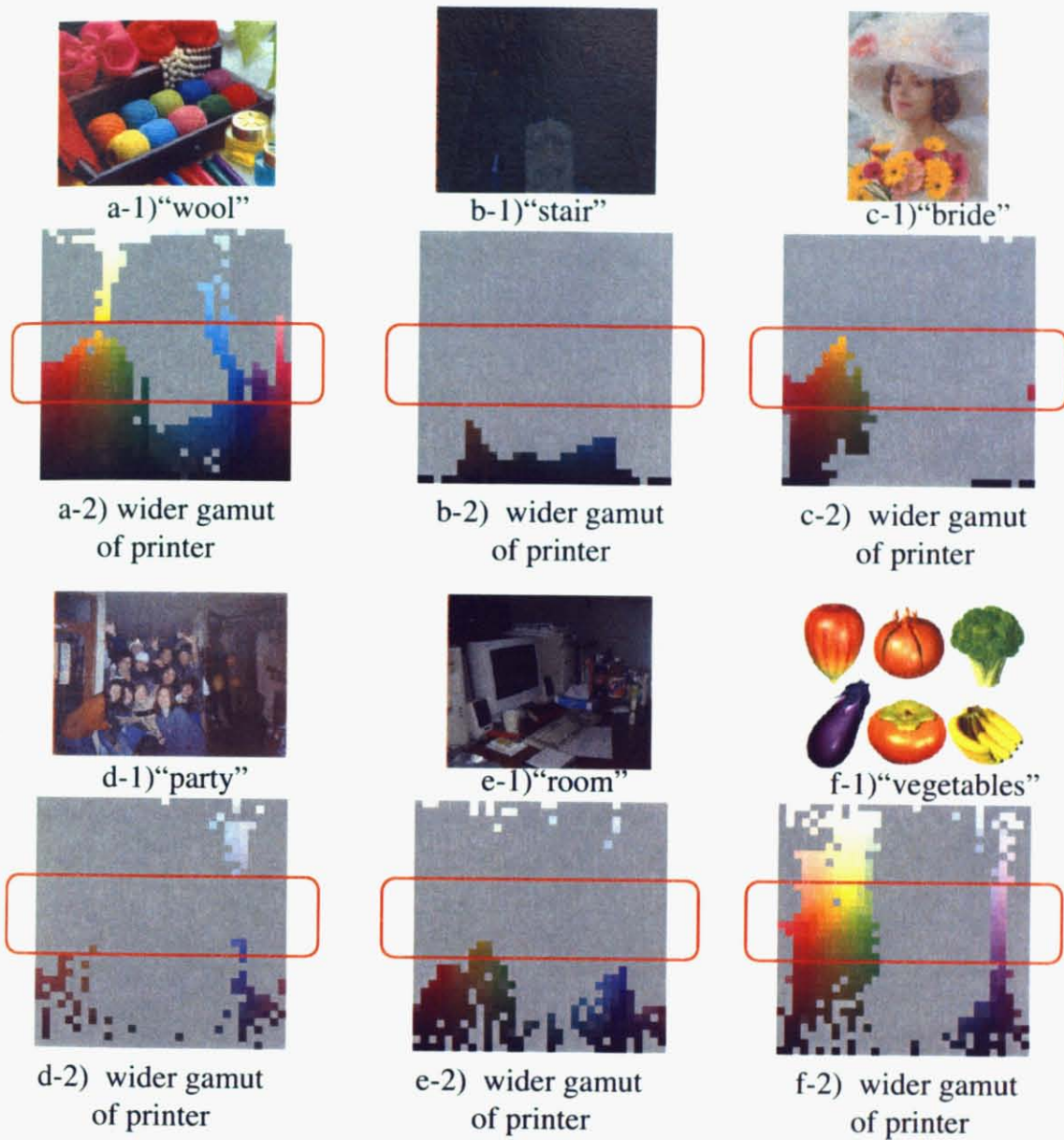
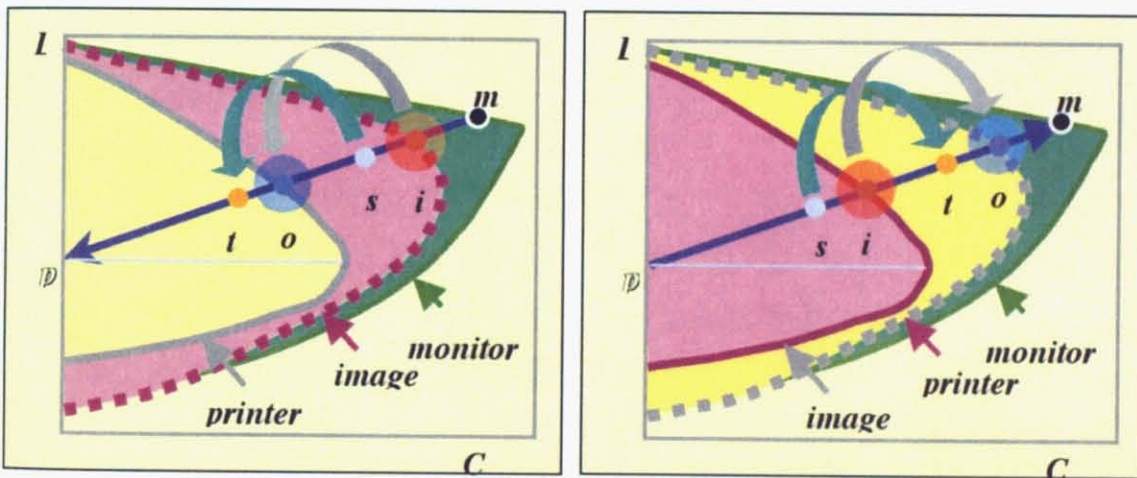


Fig. 7-2 各種画像とプリンタとの *r-image* による色域比較

7.4 色域伸張アルゴリズムプロトタイプの開発

色域伸張について、ガウス分布を想定したヒストグラム特定化処理、および画像源のヒストグラム分布を反映したヒストグラムストレッチ処理について前章で述べた。しかしながら、特定化処理においては、ガウス分布は画像源の色分布を反映していないために画像によっては不自然な復元となる。また適合した分布を見つけるためには人的な操作が必要となる。色分布を反映したストレッチ処理においても、目標画像が不明のため、超狭色域の入力に対しては過剰伸張による画質劣化を生じる。これらを解決するためには実験用目標画像を利用し、様々な条件での適切な伸張度の探索が必要となる。

Fig. 7-3 は画像依存の概念によるマッピングを示し、Fig. 7-3(a) は本研究で提唱して来た色域圧縮である。一方、Fig. 7-3(b) は画像色域がデバイスより狭い場合の色域伸張の概念を示したもので、マッピングの方向を内から外向きに逆転すれば、圧縮の場合と同様に扱える。ヒストグラム処理と同様に検討を要する。



(a) *I-D GMA* による色域圧縮

(b) *I-D GMA* による色域伸張

Fig. 7-3 画像依存の概念による *I-D GMA*

7.5 画像源 GBD のコンパクトな表現

画像源の効果的な活用法として、これをコンパクトに圧縮して画像に添付しユーザに供給すれば、ユーザ側でそれぞれが持つ出力デバイスの色域に合わせて *Image to Device* の *GMA* を即時実行できる。*SVD* を用いた *r-image* の圧縮法については述べたが、さらに汎用的な標準方式の利用を検討する。標準化されている *JPEG2000* と *SVD* 圧縮法を比較した上で、圧縮率と3次元形状への復元精度の検証をし、代表的テスト画像による色再現性の検証が必要である。

第8章 結論

8.1 研究成果

本論文における研究成果を以下に要約してまとめる。

8.1.1 併置加法混色によるプリンタの色域

ハードコピー記録における2値記録方式のプリンタについて色域を増大するための新しい併置加法混色モデル min-med、min-max、min の3方式を提案した。ランダムな Demichel 混色モデルおよび coaxial 同心混色モデルとの CIELAB 色空間での発色比較を論じ、色立体内部に粗密が出来る同心混色モデルに対して、併置混色モデルではバランス良く偏りのない色再現が出来ることを明らかにした。また、低明度側において濁りによって暗い方向へ色域が広がる同心混色モデルに対し、併置混色モデルは中明度部においての高彩度発色を示し、ブルーの濁りが改善される事を示した。さらに Yule-Neilsen パラメータの n 値は各ドット配置モデルの色域の大きさに影響を与えるため各モデルの正確な n 値の測定が必要である事を提示した。

8.1.2 色立体の色域抽出と体積算出

3次元色空間上に示される対象物の色域について、その大きさを比較するための体積計算方法を提案した。画像を構成するランダムな色度点分布に対して、色度点の個数が一定になるような色相角と明度角で極座標分割をして取り出し、画像中心からの最外郭点を自動的に求め、中心と最外郭点とで四面体を構成して体積値を得る。この際に、外郭面の向きを考慮することで画素構成の特徴に応じた体積値を正確に算出した。また、抽出した三角面の表面積と内向き面の割合から凹包形状の度合いを判断した。

8.1.3 画像の色域記述子

画像色域の外郭形状は単純なベクトル距離の一揃いで表すことができる。等角度で分割された極座標内で中心からのベクトル距離の大きさを2次元の明暗で表す色域記述子 *r-image* を定義した。画像とデバイスの色域境界は極座標分割によって抽出された *r-image* により素早く比較される。色域記述子を関数として扱えれば色域をコンパクトに扱え、画像データに付随して送信すればデバイス色域との素早い比較が可能となる。この *r-image* は SVD によって少ない特異値で色域をコンパクトに近似できることを示した。

8.1.4 色域記述子を用いた3次元色域マッピング

異なった色域を持つ各種デバイス間において、色域マッピングアルゴリズム(GMA)が重要であるが、従来の2次元機器依存 GMA に対して、色域記述子を用いた簡便な3次元画像依存 GMA(**3D I-D GMA**)を提案した。単一集中点とマルチ集中点の両手法により、*r-image* を参照することでデバイス色域の内部へ画像の色点をマッピングする **3D I-D GMA** を行なった。**D-D GMA** およびクリッピング処理した結果と心理評価実験を行い、マルチ集中点による **3D I-D GMA** が大体において良い結果を得ることが確かめられた。しかし、sRGB 画像「wool」のようにプリンタ色域よりも全色域において広いのだが過剰分は左程大きくない場合クリッピング処理の方が良い結果を得た。**I-D GMA** はCG画像のように色域の大きな画像には必要である。一方、クリッピング法は過剰色域が小さいものに対しては、内部点の変動が無いために効果的である。画像がデバイスに対して過剰分となっている *r-image* に対して統計指標を求めて考察した。最適な GMA 手法を選択する際の指標と考えられる。

デバイスの色域では、ポリゴンメッシュから作成したものと Overhauser スプライン関数により作成したものを考察した。Overhauser スプライン関数により形成された色域外郭は継目のない滑らかな外郭を創り出す。しかしながら 32×32 のポリゴンメッシュとの **3D I-D GMA** では効果が少なく、計算時間の負担を考えると 32×32 のポリゴンメッシュを使えば十分効果的である。

8.1.5 色域伸張への拡張

撮像条件や照明環境等により画像源がプリンタ色域より大幅に狭くなる場合、より良い再現の為には画像源の色域に対して伸張を必要とする場合が生ずる。色域が狭まった画像を対象として、ヒストグラム変換を用いた、ヒストグラム平坦化、ガウス分布関数へのヒストグラム特定化、ヒストグラムストレッチ、の3方式による伸張処理を活用した画像表現を試みた。ヒストグラム平坦化処理は明暗強調に用いられるもので、好ましい色域伸張には不向きである。ヒストグラム特定化処理はガウス分布関数を選べるために好みの変換を得ることが可能であるが、各画像に合ったガウス分布を特定化することが必要で、自動的に好ましい色域伸張を得ることは困難となる。ヒストグラムストレッチ処理は、画像源の持つヒストグラム分布を維持した変換が得られるために、自動的に好ましい色域伸張を得やすい。画像源の微小なキャッチライト部やノイズがある場合にも、面積的あるいは空間的に除去できれば自動色域伸張が可能となる。

8.2 研究課題と今後の展望

第7章で双方向 Versatile 色域マッピングへの展開を述べた。*r-image* による色域記述子 (GBD) は、画像およびデバイスの3次元色域比較と高速写像に適し、圧縮と伸張の双方向色域変換へ展開できれば革新技術となる。画像源の持つコンテンツを評価し表示デバイスに対して画像に依存した色域写像を決定し、色域の圧縮と伸張を合わせ持つ GMA へ展開する。色域圧縮においては、目的とする写像デバイスに対しての過剰分を *r-image* で判断し、クリッピングで良いのか、*I-D GMA* で行うかを判断する必要がある。

研究を行う上で、「圧縮」実験には CG 画像以外に広色域の自然画像の収集・分類をし、広色域・広階調の **HDR 画像源** についても収集していく。また「伸張」実験用には、同一被写体を正常照明と不完全照明とで撮像し、目標画像と試験画像の定量的評価が可能な評価用データベースを準備していく。

r-image による色域記述 (GBD) は、2次元濃淡画像で3次元色域を表現し、各画素が3次元の最外郭ベクトルに対応するため、画素の輝度値の計数から容易に色立体のサイズへの換算が可能である。定量的色域比較法を「圧縮」と「伸張」の代表的画像について検討していく。

色域伸張では最適なヒストグラム処理法について実験用目標画像を利用した様々な条件での適切な探索が必要となる。また圧縮 **GMA** を逆転させた伸張法を考慮する必要がある。

画像源 *r-image* のコンパクトな表現として **SVD** 圧縮法についてさらに検討を加え、標準化されている JPEG2000 との比較をした上で、圧縮率と3次元形状への復元精度の検証をし、代表的テスト画像による色再現性の検証が必要である。

色空間については一貫して均等色空間 CIELAB で行ってきた。CIELAB は物理的な色の特性を視覚的なモデルとして表している。今後は観察環境を考慮に入れた色の見えモデルも検討する必要がある。最初に色の見えモデルを取り入れた CIECAM97s は不十分な点があったが、改良されて発表された CIECAM02 での色域マッピングの検討をして行きたい。

謝辞

本研究は1997年から2003年に亘り、千葉大学工学部画像工学科、同情報画像工学科像変換工学分野において研究した内容を、大学院自然科学研究科情報科学専攻・画像科学講座への博士論文としてまとめたものです。研究を進めるにあたって非力な筆者をご支援下さった多くの方々に深く御礼申し上げます。

指導教官である千葉大学工学部 小寺宏暉教授には、本研究全般に亘って直接指導して頂き、心から感謝申し上げます。色彩科学と画像処理の知識に始まり、論文作成に至るまでの始終親切なるご指導を賜りました。

本論文の審査においては、同学部 三宅洋一教授、宮崎紀郎教授、北村孝司教授、矢口博久教授、羽石秀昭助教授、皆様より、大変貴重なご意見とご指導を頂きました。ここに、深く御礼申し上げます。

同学部に奉職以来、印刷技術の知識や大学生活全般に亘ってご指導頂いた、故國司龍郎元助教授、古矢泰一元助手、遠山政夫技官、そして、研究に対する激励を頂いた、今村舜仁元教授、小門宏元教授に、深く感謝致します。

また、有益な討議やご助言を頂いた、同学部 堀内隆彦助教授、星野勝義助教授、松下電器産業株式会社の物部祐亮氏、に心より御礼申し上げます。

松下技研（現松下電器産業株式会社）の金森克洋氏には、研究活動に不可欠な実験設備をご提供頂き、またご助言も頂きました。ここに感謝の意を表します。

千葉大学工学部情報画像工学科小寺研究室で博士課程を終了し現在は台湾の世新大学に在籍する陳鴻興助理教授には、本研究の始めから多くの議論を交わし合い、多数の有益な助言を頂きました。心から感謝申し上げます。

さらに、同研究室の代々の卒業生諸君とは、有益なる討論と、実験への協力を頂きました。中でも、石毛淳美氏（現兵庫職業訓練校）、大豆生田実氏（現大日本印刷（株））、三田虎史氏（現凸版印刷（株））、山田文恵氏（現（株）フジカラーサービス）、鈴木三規氏（現富士写真フィルム）、斎藤詳子氏（現東京工業大学大学院）、李昭輝氏（現ローム台湾法人）、森谷武司氏、の諸君とは関連研究での討論に感謝申し上げます。

本研究は多くの方々の支えの元に得たものであり、関係各位に改めて感謝の意を表明致します。最後に、いつも温かく見守ってくれた母に感謝します。

2004年1月

斎藤了一

参考文献

1. H.E.J. Neugebauer : *Z. Wiss. Photo.*, 36,4, pp.73-89(1937)
2. K. Kanamori and H. Kotera : Neugebauer Memorial Seminar, SPIE Japan(1989)
3. W.D. Kappel , Quantifying Color Gamut, *IS&T's NIP13th International Conference on Digital Printing Technologies*(Seattle), p.470-p.474, Nov.2-7 (1997).
4. M. Mahy , Gamut Calculation of Color Reproduction Devices, *The Fourth Color Imaging Conference : Color Science, Systems and Applications* (Scottsdale), p.145 -p.150, Nov.19-22(1996).
5. T. Tanaka, R. Berns and M. Fairchild, Predicting the Image Quality of Color Overhead Transparencies Using a Color-Appearance Model, *Journal of Electronic Imaging*, 6(2), 154 (April 1997)
6. J. Morovic and M. R. Luo, Evaluating Gamut Mapping Algorithms for Universal Applicability, *Col. Res. Appl.* 26, pp.85-102 (2001).
7. L. W. MacDonald and M. R. Luo, *Color Imaging*, John Wiley & Sons (1999).
8. K. E. Spaulding , R.N. Ellson and J. R. Sullivan, Ultra Color; A new gamut mapping strategy, *Proc. SPIE*, 2414, 61-68 (1995).
9. N. Katoh, M. Ito and S. Ohno, Three-dimensional gamut mapping using various color difference formulae and color spaces, *J.E.I.*, 8(4), pp.365-379 (1999).
10. H-S. Chen, M. Oomamiuda and H. Kotera, Gamma-Compression Gamut Mapping Method Based on the Concept of Image-to-Device, *JIST*, 45, pp.141-151 (2001).
11. H-S. Chen and H. Kotera, Three-dimensional Gamut Mapping Method Based on the Concept of Image-dependence, *JIST*, 46, pp.44-631 (2002).
12. G. Marcu and S. Abe, Ink Jet Printer Gamut Visualization, *Proc. IS&T's 11th NIP*, pp.459-462 (1995).
13. P. G. Herzog, Analytical Color Gamut Representations, *JIST*, 40, pp.516-521 (1996).
14. M. Mahy, Calculation of Color Gamut Based on the Neugebauer Model, *Col. Res. Appl.* 22, pp.365-374 (1997).
15. G. J. Braun and M. D. Fairchild, Techniques for Gamut Surface Definition and Visualization, *Proc. 5th IS&T/SID CIC*, pp.147-152 (1997).
16. B-H. Kang, M-S. Cho, J. Morovic and M. R. Luo, Gamut Compression Algorithm Development on the Basis of Observer Experimental Data, *Proc. 8th IS&T/SID CIC*, pp.268-272 (2000).

17. E. D. Montag and M.D. Fairchild, Gamut mapping: Evaluation of chroma clipping techniques for three destination gamuts, *Proc. 6th IS&T/SID CIC*, pp.57-61 (1998).
18. P. G. Herzog and H. Buring, Optimizing gamut mapping: lightness and hue adjustments, *Proc. 7th IS&T/SID CIC*, pp.160-166 (1999).
19. <http://www.adobe.co.jp/support/techguides/color/colormanagement/renderintent.html>
20. 図解 カラーマネージメント実践ルールブック 2002-2003、DTPWORLD 編集部,2003
21. Thomas and Finney , *Calculus and Analytic Geometry 5 ed.*, Addison-Wesley, 1980, p.711.
22. R.Balasubramanian ,Color Hard Copy and Graphic Arts IV, *Proc SPIE*, **2413**, 356(1995)
23. J.A.C.Yule and W.J.Nielsen, The Penetration of Light into Paper and Its Effect on Halftone Reproduction,*1951 TAGA Proceedings*, p.65-p76
24. J.A.S.Viggiano, Modeling the Color of Multi-Colored Halftones, *1990 TAGA Proceedings*, p.44-p.62
25. 小寺宏暉、斎藤了一：併置加法混色によるプリンタの色域拡大に関する検討、カラーフォーラム JAPAN'97 (1997)
26. 斎藤了一、小寺宏暉：併置加法混色によるプリンタの色域拡大に関する検討、日本画像学会誌 **37**(4), 528(1998)
27. R. Saito, H. Kotera : Dot Allocations in Dither Matrix with Wide Color Gamut, *J. Imag. Scie. and Tech.* **43**(4), 345(1999)
28. 斎藤了一、小寺宏暉、画像の色立体外郭点抽出と色域体積の算出、日本画像学会誌、**39**,2, pp.75-83 (2000)
29. 斎藤了一、小寺宏暉、画像の色域外郭抽出と情報量、カラーフォーラム JAPAN'99 論文集、 pp103-106、1999
30. 斎藤了一、小寺宏暉：画像源の3次元色域抽出法、Japan Hardcopy 2000 論文集, B-6, p.189-192 (2000)
31. R. Saito and H. Kotera: Extraction of Image Gamut Surface and Calculation of its Volume, Proc. IS&T's NIP16 Conference, p.566-569 (2000)
32. R. Saito and H. Kotera: Extraction of Image Gamut Surface and Calculation of its Volume, Proc. 8th CIC, p.330-334 (2000)
33. 斎藤了一、小寺宏暉：画像の色立体外郭抽出と色域体積の算出 (II), 日本画像学会誌、**39**,3 , pp.173-183 (2000)

34. N.Moroney ,Using VRML to Communicate Device Gamuts, Part of the IS&T/ SPIE Conference on Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy and Graphic Arts IV (San Jose),p.120-p.128,Jan.25-30 (1999).
35. 黒瀬能幸 著、3次元図形処理工学、共立出版、1999.
36. R.Balasalmanian, A printer model for dot-on-dot halftone screens, *Proc SPIE*, **2413**, 356-364, 1995
37. A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB (<http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>)
38. <http://www.first.tsukuba.ac.jp/%7Egambarim/heron.html> など。
39. J. Morovic and M. R. Luo, The Fundamentals of Gamut Mapping: A survey, *J. Imaging Sci. Tech.*, **45**, 3, pp.283-290 (2001)
40. T. J. Cholewo and S. Love, Gamut boundary determination using alpha-shapes, *Proc. 7th IS&T/SID CIC.*, pp.200-203 (1999)
41. R. L. Reel and M. A. Penrod, Gamut Visualization Tools and Metrics, *Proc. 7th IS&T/SID CIC.*, pp.247-251 (1999)
42. H- S. Chen, M. Oomamiuda and H. Kotera, Adaptive Gamut Mapping Method Based-on Image-to-Device, *Proc. IS&T' s NIP15*, p.346-349(1999)
43. H- S. Chen and H. Kotera, Three-dimensional Gamut Mapping Method Based on the Concept of Image-dependence, *Proc. IS&T' s NIP16 Conf.*, p.783-786 (2000)
44. J. Morovic and Pei-Li Sun, The Influence of Image Gamuts on Cross Media Color Image Reproduction, *Proc. 8th IS&T/SID Color Imaging Conf.*, p.324-329 (2000)
45. H. Kotera, T. Mita, H- S. Chen and R. Saito, Image-dependent Gamut Compression and Extension, *Proc. PICS' 01 Conf.*, p.288-292 (2001)
46. H. Kotera, M. Suzuki, T. Mita, and R. Saito, Image-dependent Color Mapping for Pleasant Image Rendition, *Proc. AIC Color' 01*, p.227-228 (2001)
47. H. Kotera and R. Saito: Compact Description of 3D Image Gamut Surface by SVD, *Proc. IS&T' s NIP 17 Conf.*, p.446-449(2001)
48. R. Saito and H. Kotera, 3D Gamut Comparison between Image and Device for Gamut Mapping, *Proc. IS&T' s NIP 17 Conf*, p.454-457(2001)
49. H. Kotera and R. Saito, Compact Description of 3D Image Gamut by Singular Value Decomposition, *Proc.9th IS&T/SID Color Imaging Conf*, p.56-61 (2001)

50. R. Saito and H. Kotera, 3D Image-to-Device Gamut Mapping Using Gamut Boundary Descriptor, *Proc. IS&T's NIP 18 Conf*, p. 608-611 (2002)
51. W. K. Pratt, *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons (1978)
52. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley (1993)
53. H. Kotera and R. Saito: Compact Description of 3D Image Gamut by *r*-image Method, *Jour. Elect. Imaging, in printing*, 12 (4), (2003)
54. R. Saito and H. Kotera: Adaptive 3D Gamut Mapping Based on Color Distribution of Image, *Proc. IS&T's NIP 19*, 812-815 (2003)
55. 斎藤了一、小寺宏暉：画像コンテンツに適した3次元色域写像，日本印刷学会第110回春期研究発表会，B-10，p.90-93 (2003)
56. R. Saito and H. Kotera: 3D Gamut Mapping by Comparison between Image and Device Gamut, *Proc. ISJ's ICIS'02, TOKYO*, 407-408 (2002)
57. 斎藤了一、小寺宏暉：色域マッピングのための画像源と出力デバイスの3次元色域比較，*Japan Hardcopy 2001 論文集*、B-11，p.197-200 (2001)
58. 斎藤了一、小寺宏暉：画像の3次元色域比較によるマッピング，*カラーフォーラム JAPAN2001 論文集*、p.143-146 (2001)
59. J. Morovic and M. R. Luo, Calculating Medium and Image Gamut Boundaries for Gamut Mapping, *Col. Res. Appl.* 25, pp.394-401 (2000).
60. K.M. Braun, M. D. Fairchild and P. J. Alessi, Viewing Techniques for Cross-Media Image Comparisons, *Col. Res. Appl.* 21, pp.6-17 (1996).
61. T-C. Hseue, Y-C. Shen, P-C. Chen, W-H. Hsu and Y-T. Liu, Cross-Media Performance Evaluation of Color Models for Unequal Luminance Levels and Dim Surround, *Col. Res. Appl.* 23, pp.169-177 (1998).
62. テレビジョン学会 編、画質と音質の評価技術、昭晃堂、1999.
63. R. Saito, H. Kotera : Image-Dependent 3D Gamut Mapping Using Gamut Boundary Descriptor, *J. Elec. Imag.*, in contribution

発表論文

・ 論文

1. 斎藤了一、小寺宏暉：併置加法混色によるプリンタの色域拡大に関する検討、日本画像学会誌 37(4), pp.528-534 (1998)
2. Ryoichi Saito, Hiroaki Kotera : Dot Allocations in Dither Matrix with Wide Color Gamut, *J. Imag. Scie. and Tech.* 43(4), pp.345-352 (1999)
3. 斎藤了一、小寺宏暉：画像の色立体外郭抽出と色域体積の算出、日本画像学会誌 39,2, pp.75-83 (2000)
4. 斎藤了一、小寺宏暉：画像の色立体外郭抽出と色域体積の算出 (II), 日本画像学会誌 39,3 , pp.173-183 (2000)
5. Ryoichi Saito, Hiroaki Kotera : Image-Dependent 3D Gamut Mapping Using Gamut Boundary Descriptor, accepted for publication in *J. Elec. Imag.*

・ 関連論文

1. Hiroaki Kotera, Atsumi Ishige, Hung-Shing Chen and Ryoichi Saito: High precision scanner/printer calibrations in sub-divided color spaces, *J. Imag. Scie. and Tech.*, 43(2), pp.178-186 (1999)
2. 小寺宏暉、石毛淳美、斎藤了一：色空間の分割による入出力デバイスの高精度カラーマッチング、画像電子学会誌 29,2, pp.128-139 (2000)
3. 陳興鴻、山田文恵、斎藤了一、小寺宏暉：画像の明度情報に適応した3次元色域マッピング法、日本画像学会誌、40,1, pp.30-39 (2001)
4. Hiroaki Kotera and Ryoichi Saito: Compact Description of 3D Image Gamut by *r*-image Method, *J. Elec. Imag.*, 12 (4), pp.660-668 (2003)

・ 学術講演発表

1. 小寺宏暉、斎藤了一：併置加法混色によるプリンタの色域拡大に関する検討、カラーフォーラム J A P A N'97 pp.53-56 (1997)
2. 斎藤了一、小寺宏暉：画像の色域外郭抽出と情報量、カラーフォーラム J A P A N'99 論文集 pp.103-106(1999)
3. 斎藤了一、小寺宏暉：画像源の3次元色域抽出法、Japan Hardcopy 2000 論文集, B-6, pp.189-192 (2000)
4. Ryoichi Saito and Hiroaki Kotera : Extraction of Image Gamut Surface and Calculation of its Volume, Proc. IS&T's NIP16 Conference, pp.566-569 (2000)
5. Ryoichi Saito and Hiroaki Kotera: Extraction of Image Gamut Surface and Calculation of its Volume, Proc. 8th CIC, pp.330-334 (2000)
6. 斎藤了一、小寺宏暉：色域マッピングのための画像源と出力デバイスの3次元色域比較, Japan Hardcopy 2001 論文集, B-11, pp.197-200 (2001)
7. Ryoichi Saito and Hiroaki Kotera: 3D Gamut Comparison between Image and Device for Gamut Mapping, Proc. IS&T's NIP 17, pp.454-457 (2001)
8. 斎藤了一、小寺宏暉：画像の3次元色域比較によるマッピング, カラーフォーラム JAPAN2001 論文集 pp.143-146 (2001)
9. Ryoichi Saito and Hiroaki Kotera: 3D Gamut Mapping by Comparison between Image and Device Gamut, Proc. ISJ's ICIS'02, TOKYO, pp.407-408 (2002)
10. Ryoichi Saito and Hiroaki Kotera: 3D Image-to-Device Gamut Mapping Using Gamut Boundary Descriptor, Proc. IS&T's NIP 18, pp.608-611 (2002)
11. 斎藤了一、小寺宏暉：画像コンテンツに適した3次元色域写像, 日本印刷学会第110回春期研究発表会, B-10, pp.90-93 (2003)
12. Ryoichi Saito and Hiroaki Kotera: Adaptive 3D Gamut Mapping Based on Color Distribution of Image, Proc. IS&T's NIP 19, pp.812-815 (2003)

13. 岸本靖彦、斎藤了一、小寺宏暉：AM/FM スクリーン関数を用いた高品位誤差拡散法、Japan Hardcopy '99 論文集, pp.319-321 (1999)
14. 三田虎史、斎藤了一、小寺宏暉：誤差拡散法における再現色の予測モデル、Japan Hardcopy '99 論文集, pp.261-263 (1999)
15. Tetsuya Morimoto, Hiroaki Kotera and Ryoichi Saito: Objects' Color Matchings on Image Clustering, Proc. PPIC/JH'98, pp.371-374 (1998)
16. Hiroaki Kotera, Tetsuya Morimoto and Ryoichi Saito: Object to Object Color Matchings by Image Clustering, Proc. IS&T's NIP 14, pp.310-314 (1998)
17. Hiroaki Kotera, Tetsuya Morimoto and Ryoichi Saito: Object-Oriented Color Matchings by Image Clustering, Proc. Sixth CIC, pp.154-158 (1998)
18. Hiroaki Kotera, Tetsuya Morimoto, Nobuyuki Yasue and Ryoichi Saito: Adaptive Color Correction based on Objects' Color Classification, Proc. SPIE, 3409, pp.277-285 (1998)
19. Hiroaki Kotera, Chen Hung-Shing and Ryoichi Saito: Generation of Virtual Spectral Color Target, Proc. Seventh CIC, pp. 36-41 (1999)
20. Hiroaki Kotera, Chen Hung-Shing and Ryoichi Saito: Virtual Color Target and Its Application for Testing Input Devices, Proc. IS&T's NIP15, pp.338-341 (1999)
21. Yasuhiko Kishimoto, Masaki Nose, Ryoichi Saito and Hiroaki Kotera: Improved Error Diffusion Modified AM/FM Periodic Noise, Proc. IS&T's NIP15, pp.366-369 (1999)
22. Hiroaki Kotera, Takeshi Mita, Chen Hung-Shing and Ryoichi Saito: Image-dependent Gamut Compression and Extension, Proc. PICS Conf.'01, Montreal, pp.288-292 (2001)
23. Hiroaki Kotera, Mitsunori Suzuki, Takeshi Mita, and Ryoichi Saito: Image-dependent Color Mapping for Pleasant Image Rendition, Proc. AIC Color.'01, pp.227-228 (2001)
24. Hiroaki Kotera and Ryoichi Saito: Compact Description of 3D Image Gamut Surface by SVD, Proc. IS&T's NIP 17, pp.446-449 (2001)
25. Hiroaki Kotera and Ryoichi Saito: Compact Description of 3D Image Gamut by Singular Value Decomposition for Gamut Mapping, Proc. Asia Display'01, pp.1533-1536 (2001)
26. Hiroaki Kotera and Ryoichi Saito: Compact Description of 3D Image Gamut by Singular Value Decomposition, Proc. 9th CIC, pp.56-61 (2001)