

多原色ディスプレイ

山口雅浩

東京工業大学 像情報工学研究施設

Multiprimary Color Displays

Masahiro Yamaguchi

Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology

The methods for expanding the color gamut of color displays using more than three primary colors are introduced. In the multiprimary color displays, the color gamut becomes a polygon, and the display of high color saturation turn out to be possible. The concept and the optical systems for multiprimary projection displays are shown, as well as the color conversion method for multiprimary color signal is addressed.

1. はじめに

近年、ネットワークを通じた画像・映像の通信システムの発展とともに、カラー画像の色再現についての要求が高まっている。画像情報をデジタルデータとして取り扱うことで情報を劣化なく伝送・保存できるので、カラー画像の色再現を可能とする基盤が整いつつあり、各種のカラー画像機器間の色に関する特性の違いを補正する色管理の技術が発展し、普及し始めている。

色管理においては、デバイスインディペンデントカラーと呼ばれる XYZ や sRGB 等、基準となる 3 原色に対する色度値を決めればあらゆるカラー画像機器において同一の色が表示可能となる。しかし、表示装置やプリンタ等で再現できる色の範囲（色域）は機器毎に異なることから、カラー画像出力機器間の色域の違いを考慮して色を変換するガンマットマッピングの技術の研究が行われている^[1]。優れたガンマットマッピングの手法を用いると、比較的色域が狭い表示装置でもある程度自然にカラー画像を表示できる。しかし、人間の知覚できる色の全てを再現することは不可能で、鮮やかな色を表示できないことが制約となっている。

一方、電子商取引や遠隔医療、電子美術館・博物館等の応用分野では、実物の色を正確に再現することの必要性が特に高い。忠実かつ正確な色再現を実現するためには、測色の技術を画像入力に適用し、対象物の色の情報を計測することと、色管理技術を用いて表示装置の特性の校正を行うことも必須である。高精度な測色を行うためには、分光的な計測・処理が必要であ

ることから、デジタルアーカイブや医療分野等の目的で、マルチスペクトルカメラ等を用いてカラー画像の入力を分光的に行う試みが報告されている^[2]。しかし、CRT や液晶ディスプレイ等の表示装置の色域が制限されていることによって表示できない色が存在するため、彩度が高い色の忠実な再現が不可能な場合が生じる^{[3][4]}。衣服や絵の具の色等においては、通常の CRT の色域を外れた色も多いことから、表示装置の色域の拡大を図ることが期待されている。

本稿では、3 原色以上の多原色を用いて色域拡大を実現する方法^{[5][6][7]}として、筆者らが開発を行っている多原色投射型ディスプレイの技術を中心に紹介する。

2. 多原色による色域拡大

現在の CRT 等の表示装置では人間が知覚できる色の範囲を全てカバーできていない。実物の色の忠実な再現、彩度の高い色の再現を可能とし、より自然な再現を行うためには、色域の拡大を図ることが望まれる。

ディスプレイにおいて広い色域を得る方法としては、できるだけ彩度の高い 3 原色を用いる方法が一般的である^{[8][9]}【図 1(a)】。しかし、加法混色の場合、色域は 3 つの原色で囲まれる 3 角形内部となるが、3 角形で全ての色をカバーすることは不可能である。また、スペクトル幅が狭く、輝度の高い原色を使用しなければならぬ。CRT の前面にフィルタを取り付けて彩度を高める方法等が試みられているが、原色のスペクトル

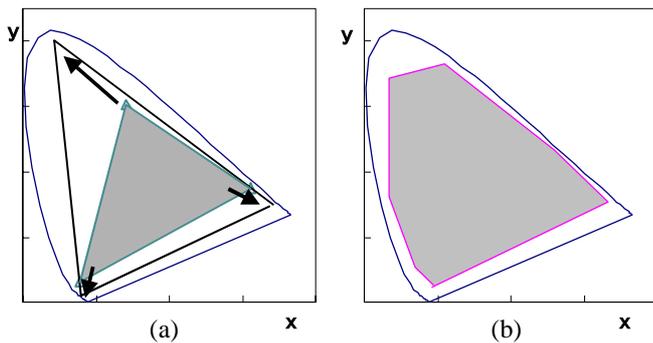


図1 色域拡大の概念図

- (a) 彩度の高い原色を用いる方法、
- (b) 原色の数を増やす方法

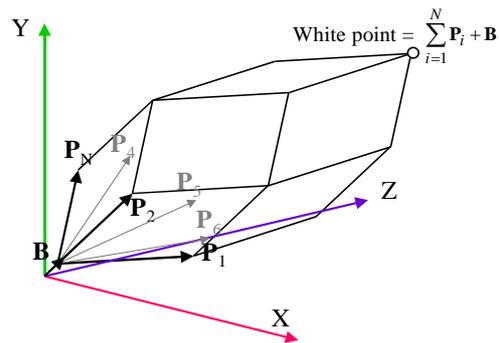


図2 多原色表示における色立体

幅を細くするために光の損失が生じる。投射型ディスプレイであれば、レーザー光源を用いれば高彩度の原色を作ることが可能であるが、通常のように白色光源からの光を用いて表示する場合には光の損失が大きい。

一方、プリンタや印刷等の分野では、印刷インクで十分な色域や微妙な中間調を表現することが困難であるため、古くから多色印刷が用いられている。CRTや投射型ディスプレイなどの表示装置でも、原色数を増やすことで色域を飛躍的に拡大できると考えられる【図1(b)】。N個の原色を用いて加法混色により画像を表示すれば、色域はN角形となる。

実際には色域は色空間内における立体で考える必要がある。3原色表示では6面体であるが、多原色表示を用いることにより多面体になる【図2】。更に詳しく考えるために、加法混色における多原色表示のモデルを以下に示す。N原色表示を行うことを考え、各原色の分光強度を $S_j(\lambda)$ ($j=1\dots N$, λ は波長) とすると、再現される光の分光強度 $S(\lambda)$ は次式で与えられる。

$$S(\lambda) = \sum_{j=1}^N \alpha_j S_j(\lambda) + \beta(\lambda) \quad (1)$$

ここで α_j ($0 \leq \alpha_j \leq 1$) は各原色に対する変調信号によって決まる重み、 $\beta(\lambda)$ は背景光の分光分布である。CIE XYZ等色関数を $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$ とすれば、再現される色度値 $(C_x, C_y, C_z)^t$ は、

$$\begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} = \sum_{j=1}^N \alpha_j \begin{pmatrix} \int \{S_j(\lambda) + \beta(\lambda)\} X(\lambda) d\lambda \\ \int \{S_j(\lambda) + \beta(\lambda)\} Y(\lambda) d\lambda \\ \int \{S_j(\lambda) + \beta(\lambda)\} Z(\lambda) d\lambda \end{pmatrix} = \sum_{j=1}^N \alpha_j \mathbf{P}_j + \mathbf{B} \quad (2)$$

と書くことができる。ここで、 \mathbf{B} は背景光の色度値、 \mathbf{P}_j は背景光の影響を無視した場合の各原色の色度値を

示している。図2には \mathbf{B} と \mathbf{P}_j を模式的に示している。

変調信号により与えられる各原色に対する重みが $0 \leq \alpha_j \leq 1$ の範囲内での $(C_x, C_y, C_z)^t$ の範囲が多原色ディスプレイの色域となる。逆に、XYZ色空間内での色度座標値 $(C_x, C_y, C_z)^t$ が与えられれば、(2)式を満たすように α_j を決めれば色再現が可能である。信号値を計算する具体的な方法は4章で述べる。

(2)式の \mathbf{B} は、図2に示すように色立体を全体に持ち上げる働きがあり、背景光の強度が大きいとこの影響により色域を狭めることになる。従って、表示デバイスのコントラストは色域の広さに大きく影響することに留意する必要がある。

また、投射型ディスプレイのように白色光源からの光を変調して色を表示する場合には、光利用効率も重要なファクタである。光源からの光に対して色フィルタ等を用いて各原色を作る場合、原色以外の光が吸収される。時間的、空間的に各原色の画素を配置することにより、光の損失が発生する場合がある。原色の数を増やすに従って光の損失が大きくなると、より明るい光源を用いなければ図2に示す色立体の白色点が低下する。原色の彩度が高まることにより彩度方向に色域は広がるものの、絶対的な体積で見ると輝度方向に小さくなってしまふ。これに対して、ダイクロミックミラーを用いる等の方法により光源からの光を分光すれば、原色数を増やしても光の損失は少ない。このとき、図2の色立体において白色点の値は原色数に依存せずほぼ一定となるので、多原色表示による色域拡大が有効に機能することになる。以上のことから、光源からの光を分光すること等によりできるだけ有効に用

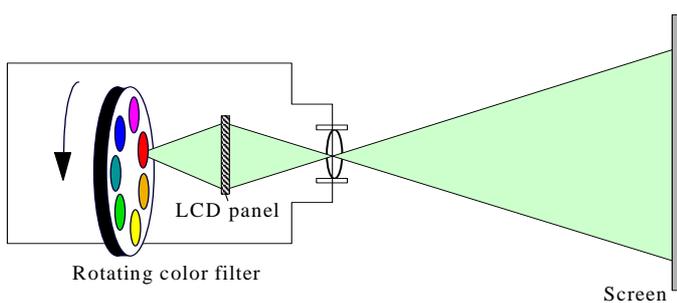


図3 時分割による多原色投射型ディスプレイの概念図

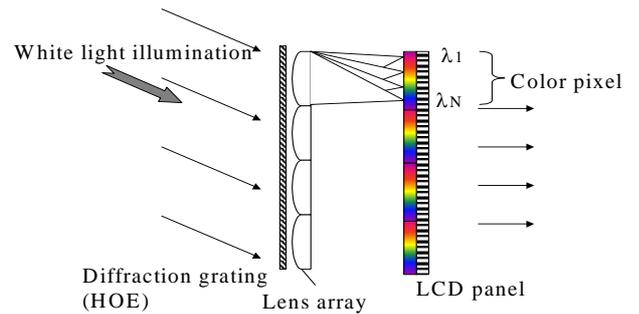


図4 回折格子とレンズアレイを用いた空間画素配列型カラーピクセルの構成

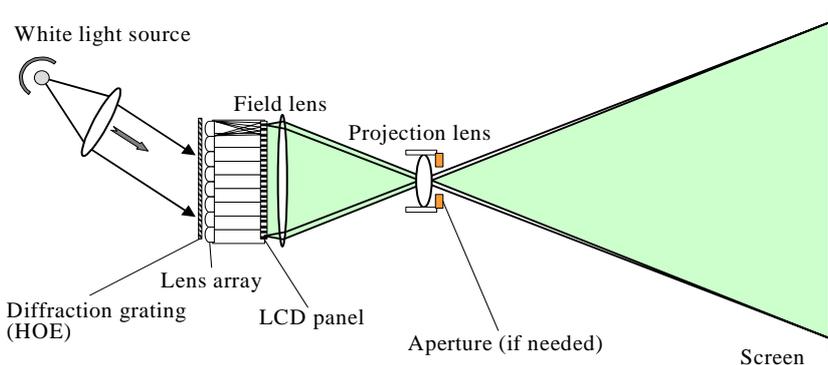


図5 回折格子を用いた空間画素配列による多原色投射型ディスプレイの光学系

いて、多原色表示システムを構成することが重要である。

3. 多原色投射型ディスプレイの光学システム

多原色投射型ディスプレイを実現するには、従来の3原色によるカラー表示方法をN原色に拡張する必要がある。表示されるカラー画像の画素は、N個の原色の画素の合成によって構成される。合成されたカラーの画素のことをカラーピクセルと呼ぶことにする。カラーピクセルの構成方法としては、従来の3原色投射型ディスプレイで使用されている各種の方法を利用可能である。ここでは、筆者らがこれまでに検討を行った方法を以下に示す。

3.1 時分割による方式

図3に示すように回転する円盤に各原色に対する分光透過率を持つ色フィルタを取り付け、時分割で各原色の画像を表示する方法である。各原色のスペクトルの設計を比較的容易に行える反面、時分割で表示される各原色の画像の色が融合して観察できるように、高速な回転とフレームの更新が必要である。また、原色のスペクトル幅が細くなるのに加えて、各原色の画像

が表示されている時間が短くなるので、光源からの光の利用効率が下がり、多原色表示のメリットを生かすにくいという問題がある。

3.2 空間画素配列による方式

単板式液晶プロジェクタ等と同様に一枚の空間光変調素子の各画素に異なる原色を割り当ててカラーピクセルを構成する方法である。各原色に対応する画素に対して狭帯域の色フィルタを付加する方法では、3.1の場合と同様に、光の利用効率が低下してしまう。これを避けるためには、各原色からの光を分光してカラーピクセルを構成することが必要である。

このために、3原色の液晶プロジェクタにおいて、ホログラフィック光学素子 (HOE : Holographic Optical Element) を用いてカラー画像の表示を行う方法が開発されており^{[10],[11],[12]}、これを多原色に拡張することが考えられる。できるだけ広い色域を得るためには、各原色の光量をできるだけ一定にすることと、スペクトル幅の狭い光で各画素を照明することが必要である。レンズ機能を持つ体積型ホログラフィック光学素子を用いる方法の場合、色収差による集光位置のずれの影響で各画素を照明する光のスペクトル幅が広がること、

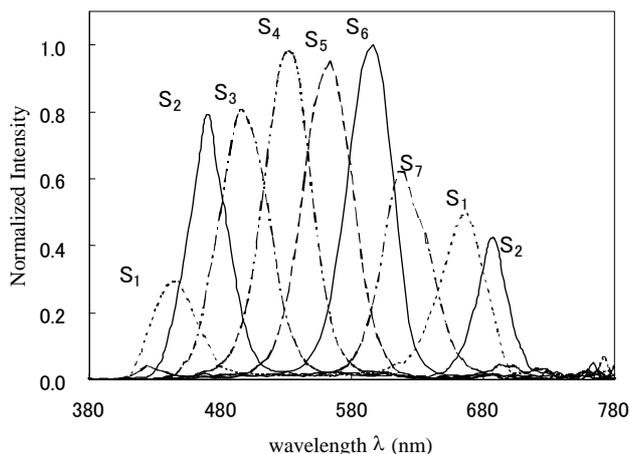


図6 回折格子とスリットアレイを用いて構成した空間画素配列型7原色ディスプレイにおける各原色のスペクトル

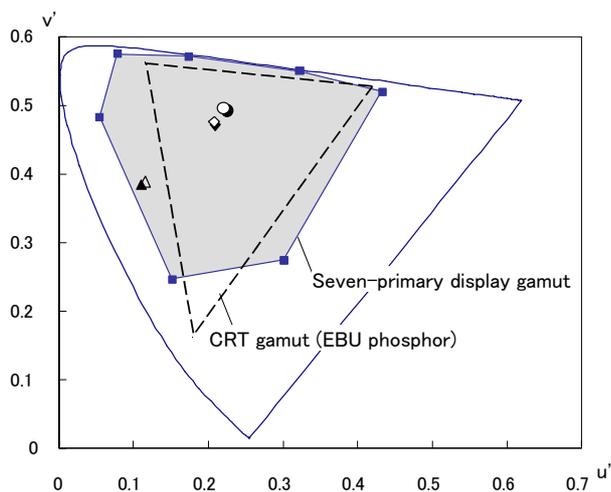


図7 回折格子とスリットアレイを用いた空間画素配列型7原色ディスプレイの色域。△、◇、○は、実験的にカラー画像再現を行った際に、▲、◆、●の色度値を持つ色を再現された結果を計測したもの。

波長選択性によって波長により光量が増減すること等の問題がある。

図4、5は、回折格子とレンズアレイを用いて構成した空間画素配列による多原色ディスプレイの光学系である。回折格子により分散された光を、N画素分の大きさを持つレンズアレイで液晶パネル上に集光すると、液晶パネル上に虹状の光の帯ができるので、液晶パネルの各画素をそれぞれの原色に対応する位置に配置する【図4】。これにより、液晶パネルのN画素で一つのカラーピクセルを構成できる。レンズアレイを用

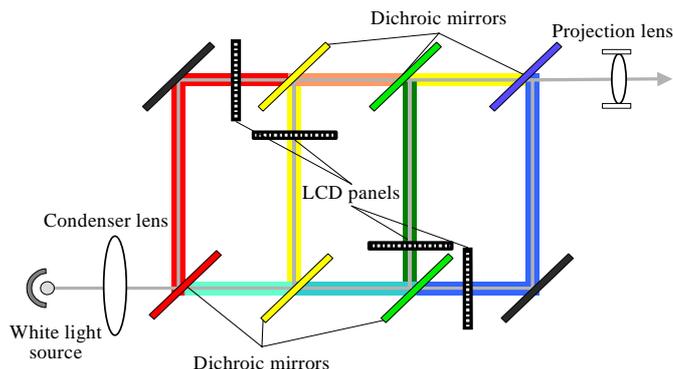


図8 ダイクロミックミラーを用いた面分割型多原色投射型ディスプレイの光学系の概念図(4原色の場合)

いることで色収差の影響をほとんど無視することができ、また回折格子としてブレイズ型の位相格子等を用いることで回折光強度の波長依存性を低減できる。

図6、7は空間画素配列型多原色ディスプレイを実験的に構築した際に得られた結果を示している。実験では、レンズアレイの代わりにスリットアレイを用いたため、回折の影響でスペクトル幅が広がり、十分な色域が得られていないが、緑や紫の領域において、CRT等では表示困難であった色を再現できることが確認されている【図7】。レンズアレイを用いれば更に色域を拡大することが可能である。

なお、空間画素配列型の多原色表示においては原色数が増えるため、3原色の場合よりも画素構造の影響が大きい。できるだけ画素構造が目立たないような画素配列を選択する必要がある。

3. 3 面分割による方式

3板式液晶プロジェクタ等と同様に、N枚の空間光変調素子のそれぞれにおいて各原色を表示する方式である。図8は例として4原色の場合の概念図を示したものであるが、実際には通常の3原色プロジェクタと同様に3次元的な光学系を用いることが有効である。図8のような光学系により、適切なダイクロミックミラーを用いると、光源からの光を有効に用いて色を再現することが可能となる。このとき、ダイクロミックミラーの分光反射特性は、色域を最大化する等の最適化を行うことが必要である。

本方式の特徴は、多数枚の空間光変調素子を必要と

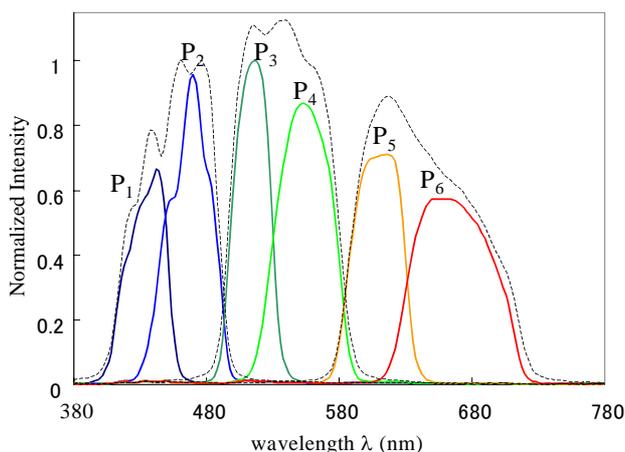


図9 2台の3板式液晶プロジェクタを用いて構成した6原色ディスプレイの各原色のスペクトル (P₁-P₆)。点線は改造前の3原色のスペクトルを示す。

するものの比較的容易に高解像度の多原色表示を実現できる点である。筆者らは、高解像度の多原色表示の効果を確認するため、2台の液晶プロジェクタ (D-ILA, Victor) を用いて、1365×1024 画素の6原色表示が可能な投射型ディスプレイを構築した^[7]。一方の液晶プロジェクタには、RGBの各光路に、各原色の長波長側のみを透過させる色フィルタを挿入し、他方の液晶プロジェクタには各原色の短波長側のみを透過させる色フィルタを挿入した。2台の液晶プロジェクタにより投影された画像は、スクリーン面上で重ね合わせられ、6原色のカラー画像表示を可能とする。

異なる位置から画像が投影されるので、台形ひずみ等が発生するが、テストチャートパターンを表示した画像を撮影して得られたひずみ補正係数を用いて、表示する画像を予め逆にひずませることで補正が可能である。以上の方法で得られた6原色投射型ディスプレイの色域を図10に示す。UCS色度図のuv平面上で見ると、通常CRTや液晶プロジェクタよりも広い色域が得られており、特に彩度の高い、赤、紫等の表示が可能となっている。

表1は、3次元均等色空間における色域の体積を比較したものである。ここでは、6原色、3原色 (改造していない D-ILA プロジェクタ) の投射型ディスプレイと、放送用 CRT の比較を行うために、各々の表示装置における白色点の輝度で規格化している。そのため、色空間内の絶対的な体積の比較にはなっていない

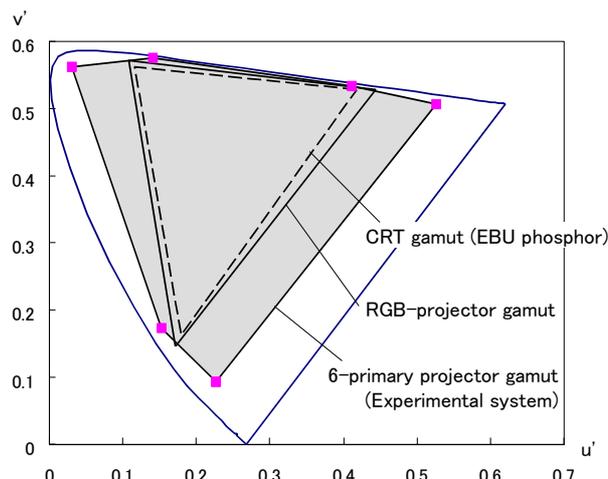


図10 6原色投射型ディスプレイの色域

表1 得られた色域の評価結果

Vは均等色空間内での色域の体積、WはPointer Gamut内に各表示装置の色域が占める割合。

	V (×10 ⁶)	W (%)
Experimental system	1.91	99.6
RGB Projector	1.23	84.3
CRT monitor	1.52	85.8

が、それぞれの色再現範囲を相対的に比較したものとイえる。表中のWは、自然界に存在する様々な物体 (反射物体) の色域 (Pointer Gamut^[13]) のうち、各表示装置で再現できる色の割合を示している。表1より、相対的比較ではあるが、3原色の表示装置に比べて格段に広い色域が得られている。また、照明光の明るさを調整すれば、Pointer Gamut のほとんど (99.6%) を表示できることがわかる。

3. 4 組合せによる方式

3. 3の方式により高精細な多原色投射型ディスプレイを比較的容易に構築可能であるが、表示装置が大型になることや多数枚の空間光変調素子を用いる必要があること等の問題がある。上記の方法はそれぞれ一長一短があることから、これらを組み合わせたシステムも考えられる。3. 2の方法では画素配列が目立つが、液晶パネル等の空間光変調素子の解像度は年々向上しており、3. 3の方法と組み合わせること等によってこの欠点を補い、小型のシステムを実現しやすくなる。原理的には従来の3板式

液晶プロジェクタと同程度の大きさで6原色表示を実現することは十分に可能と思われる。

4. 多原色表示における色変換

N原色の表示を行うには、3次元の色空間上の色度値からN個の各原色の画素を変調する信号値を求める必要がある。このとき、3次元からN次元への変換であるので、変換に自由度がある。すなわち、同じ色を表示するのに、等色する複数の原色の組み合わせが存在する。

色度値からN原色の信号値を求める方法としては様々な方法が考えられる。最も基本的な考え方としては、(2)式の線型方程式を $0 \leq \alpha_i \leq 1$ の制約下で解く方法がある。求めた解を予め変換テーブルに保存しておけばルックアップテーブル等により高速処理が可能と考えられるが、テーブルが巨大になるという問題が生じる。この他に、 $0 \leq \alpha_i \leq 1$ の制約下で(2)式を満たす線形変換をいくつか用意して必要に応じて切り替える方法、非線型変換と線形変換を組み合わせる方法等が考えられる。また、量子化やシステム誤差などの影響が小さくなるような変換方法や、高速処理を実現する手法の開発は今後の課題である。

5. ナチュラルビジョンについて

通信・放送機構では、実物の色を忠実に再現するための研究開発を実施する「ナチュラルビジョン」プロジェクトを、郵政省からの出資により1999年度から開始した。当プロジェクトにおいては、情報通信システムを介して、実物が目の前にあるときに限りなく近い色・光沢・質感等を持つ映像を再現することを目標として、従来の3原色にとらわれない新しい映像入力・伝送・保存・表示システムの研究を行っている。

当プロジェクトを推進している赤坂ナチュラルビジョンリサーチセンターでは、近年高精度な色再現やデジタルアーカイブ等を目的として収集が進んでいるマルチスペクトル画像等の情報を、ネットワーク等を介して流通できるようにすることを一つの大きな目的としている。研究設備としては、画像の入力に1000本系の解像度を持つ16バンドマルチスペクトルカメラ等を用いて、高精度な色情報を画像として取得している。

そして、画像表示系として通常のCRTの他に、8台のD-ILAプロジェクタを用いて、6原色の画像4画面を貼り合わせて、約2000×2000画素、6原色の投射型表示装置を備えている。このシステムは、3.3に示したものと同等の色域を持つカラー画像を対角120inchのスクリーン上に再現することが可能である。

当プロジェクトは、大学及び企業の研究者とフェローによる研究チームにより、産官学の協力のもとに進められており、上述の研究設備等を用いて、ナチュラルビジョンシアター、電子商取引、電子美術館・博物館、遠隔医療等の各種応用分野に必要とされる技術開発と、次世代の映像システムとして具現化するための基盤技術の研究を行っている。

6. まとめ及び今後の展開

スペクトル幅が狭い3色以上の原色を用いて画像を表示することで、ディスプレイの色域を大きく拡大することができ、より高いクオリティの色再現が可能となる。上述の6原色ディスプレイを用いた実験では、絵の具や塗料の色、花の色等において、色域拡大の効果が大きいことを確認している。

投射型ディスプレイにおいて多原色表示を行う際に、色域拡大の効果を十分に得るためには、光源からの光の損失をできるだけ少なくすることが必要である。このために、回折光学素子、ホログラフィック光学素子、ダイクロミックミラー等を用いた分光の技術を活用した表示システムの開発が期待される。また、光沢や質感をリアルに表現するには、拡散反射成分だけでなく鏡面反射成分の再現性が重要な要素であり、この点からも光の利用効率を改善して高輝度のディスプレイを構築することが望まれる。

上述の実験から、更に色域を拡大するにはディスプレイのコントラストを改善することが必須である。背景光や周辺光が存在すると、各原色の彩度が落ちてしまうので、コントラスト向上が重要な課題である。これには、例えばDMD (Digital Micromirror Device) 素子等の高コントラストな表示デバイスを用いることが有効である。その他の課題としては、3原色からN原色またはマルチスペクトル画像からN原色への変換の最適化、大容量のデジタル画像データを高速に転送す

るインタフェース等を含むシステム化を行っていく必要があること等が挙げられる。

これまで、色空間自体は基本的に等色関数に基づく3次元空間のみが扱われているため、多原色ディスプレイの入力信号は、照明光を決めれば3次元空間上の色度地である。しかし、多原色表示の新しい展開として、3次元色空間を超えたカラー画像表示の必要性が生じてくる可能性もある。

投射型以外のディスプレイにおいて多原色を表示するにはまだ多くの課題がある。蛍光体などの材料や発光素子等のデバイス、システム化等の各分野での技術開発が必要である。これまで、ほとんどのディスプレイ用材料、デバイス、システムはRGBの3原色表示に適したものの開発に焦点が置かれてきたが、今後、これらの各分野での研究開発が進めることで、新たなディスプレイの世界を具現化することが期待される。

7. 参考文献

- [1] R. S. Gentle, E. Walowitz, and J. P. Allebach, "A comparison of techniques for color gamut mismatch compensation," *J. of Imag. Tech.*, Vol.16, No.5, (1990) 176-181
- [2] M. Yamaguchi, R. Iwama, T. Obi, N. Ohyama, and Y. Komiya, "Natural color reproduction in the television system for telemedicine," *Medical Imaging 1997*, Proc. SPIE vol.3031, (1997) 482-489
- [3] J. Kumada and T. Nishizawa, "Reproducible color gamut of television screens," *SMPTE Journal*, Vol. 101, No.8, (1992) 559-564
- [4] L. DeMarsh, "Colorimetry for HDTV," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol.37, No.1 (1991) 1-6
- [5] 矢島亮一、金澤勝、境田慎一、「テレビジョンの色再現範囲拡大に関する検討」、1994年テレビジョン学会年次大会予稿集, pp. 355-356
- [6] M. Yamaguchi, T. Ajito, et. al., "Multiprimary color display using holographic optical element," *Proc. SPIE* 3293, 70-77 (1998).
- [7] T. Ajito, T. Obi, M. Yamaguchi, and N. Ohyama, "Six-primary color projection display for expanded color gamut reproduction," *Proc. of International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives* (Chiba, Japan), (1999) 135-138
- [8] J. Kim, "Color filters for CRT based rear projection television," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol.42, No.4 (1996) 1050-1054
- [9] A. J. Hughes, "Controlled illumination for birefringent colour LCDs," *Displays*, Vol.8, No.3 (1987) 139-141
- [10] C. Joulbert, A. Delboulbe, B. Loiseaux, and J. P. Huignard, "Holographic Elements for LCD Projectors," *Practical Holography IX*, Proc. SPIE vol.2406, (1995) 248-259
- [11] C. Joulbert, B. Loiseaux, A. Delboulbe, and J. P. Huignard, "Phase volume holographic optical components for high-brightness single-LCD projectors," *Appl. Opt.* Vol.36, No.20 (1997) 4761-4771
- [12] N. Ichikawa, "Holographic optical element for liquid crystal projector," *Proc. of Asia Display '95* (1995) 727-728
- [13] M. R. Pointer, "The gamut of real surface colours," *Color Res. and Appl.* Vol.5, No.3, (1980) 145-155