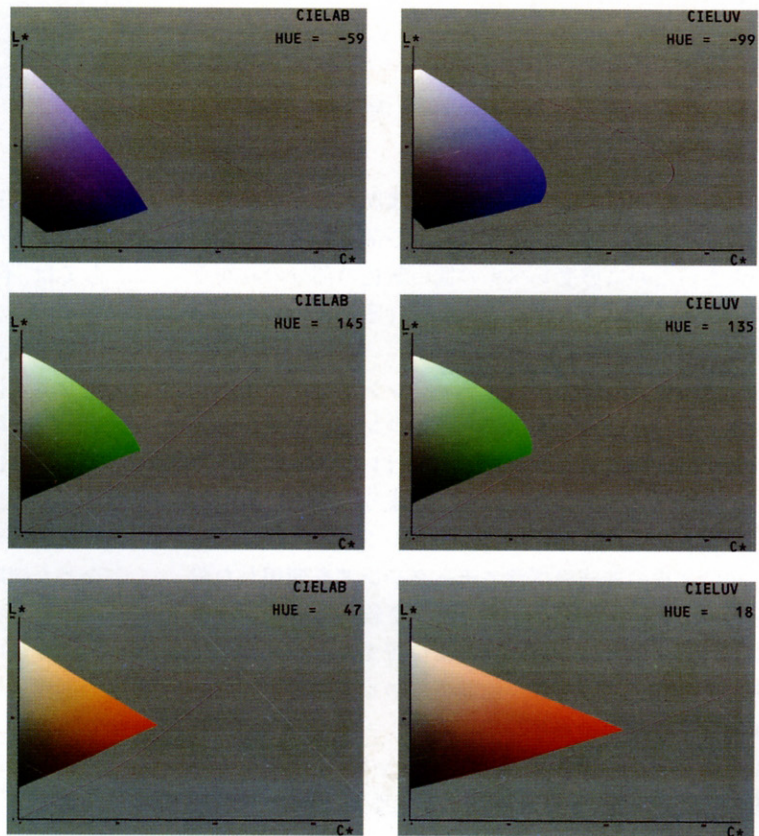


CIE均等色空間の色相線の曲がり

—電子画像の色再現に適した均等色空間を求めて—

Non-Linearity of Hue Loci in CIE Color Spaces

洪 博哲
技術研究所



CIELAB(red)

CIELUV(red)

Constant hue planes denifined in CIE spaces

Abstract:

The linearities of hue loci in CIELUV and CIELAB were investigated to find a color space suitable for a gamut mapping in color reproduction between different media. A CRT display characterized by three-dimensional look-up-table and interpolations was used for the visual experiments with nine subjects. The result showed a significant non-linearity at blue in CIELAB. We concluded that the CIELUV has better characteristics for hue constancy although the CIELAB is widely used. This defect is typically observed at sky blue changed purplish in an image when its chroma on a CRT monitor is compressed according to the definition of the CIE spaces.

Hung, Po-Chieh
R&D center

1

まえがき

異種メディア間の色再現を行うとき、ターゲットとするメディアと色を再現する出力側メディアの色域は異なるのが普通である。例えば、カラーモニターの色を印画紙上に表現しようとしても、カラーモニターの鮮やかな原色は再現できない。これは、カラーモニターの発色機構が加法混色である事や、蛍光体の分光強度がシャープであるため、原理的に避けられない問題である。

一般的にはこのような場合、色域外の彩度の高い色は主として色相を一定にして彩度と明度を変更する事により色の置き換え(色圧縮)を行う。このためには色を明度、彩度、色相の円筒座標で表すことのできる色空間(LCH色空間)が必要であるが、この基準としては国際照明委員会(CIE)で定義されたCIELAB色空間やCIELUV色空間を円筒座標に変換したものが用いられている。しかしながらこの座標に従って彩度・明度を変更してみると明らかに色相が変化してしまう事が観察される。特にCRT上の彩度の高い青をプリントする場合にこの問題が顕著に現れていた。

表題の図は、カラーCRTの三原色の色相角度で印画紙上にその色域内での断面の色をCIEの定義に基づいて計算し再現したものである。もし両方のCIEの空間の等色相特

性が線形であれば、どちらの空間で計算しても明度・彩度に係わらず同じ色相に見えなくてはならない。基準とした3原色が表示できないのでこの図からはどちらが元の色相に近いのか判断できないが、青の角度で明らかにように計算方法により色相が異なって見えていることが分かる。

そもそもこれらの空間はさまざまな要求を満たすように定義されたため、等色相特性が線形であることは保証されていない。過去において色空間の等色相特性について議論した文献には非線形性が現れているが、現在の画像表示機器、とくに現在良く用いられるCRTの色域で調査したものは見あたらず、現実の色再現を考えたときこの非線形性がどの色相に強く影響しているかを解釈するのは困難であった¹⁻⁴。

2

電子画像の色再現の問題点

本題に入る前に、この実験の背景である電子画像の色再現の問題点についてまとめたい。電子画像の色再現における流れをFig.1に示した。

電子画像の色再現では、元となる色彩(ターゲット)とその色が再現される表示装置(ディスプレイ)とは相異なるメディアである事が多い。そのため、色彩を扱う上で、画像入出力機器に独立な色空間を用いる事

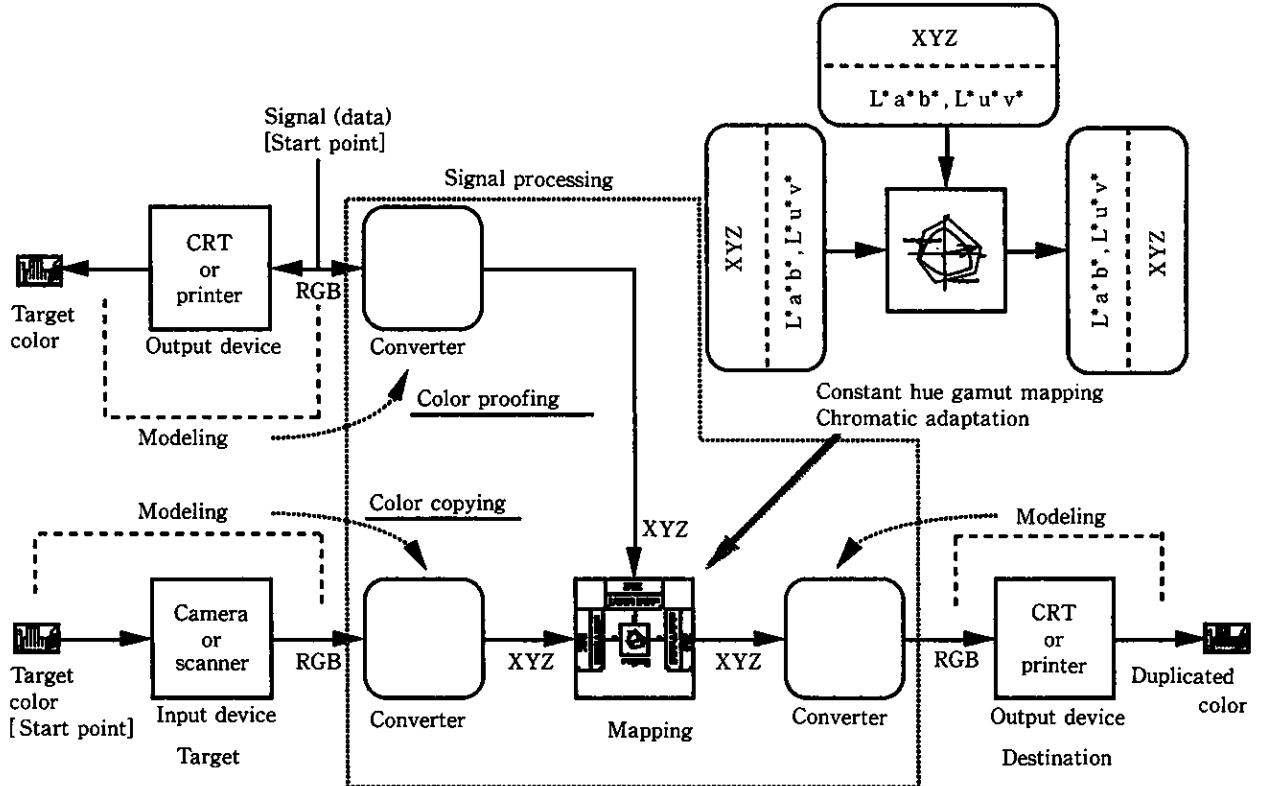


Fig.1 Block diagram for color reproductions

が必須である。

電子画像の色再現はその機能からカラーコピーとカラープルーフに分かれるが、どちらも色空間上でのマッピングを経る。カラーコピーでは、物理的に存在する原稿をスキャナーで読みとり、その色をプリンタで再現する。カラープルーフでは画像は信号の形で保存されており、それを表示したメディアが色再現を行う対象となる。いずれにしてもこれらのカラーマッチングを行なうには、まず、ターゲットとディスティネーションとなる機器のデジタル値を対応する三刺激値に変換し、その機器（またはメディア）の、色域、環境の違い、好みの色調整などを考慮にいたれたマッピングを均等色空間で行うことが望まれる。

これらを問題点別に分けると次の4つになる。

a) 電子画像機器の調整

電子画像機器はデジタル値を出力するだけで、そのデジタル値の表現する色（三刺激値）との関係は、一般には非線形である。この調整（モデリング）は、個々の入力機器および出力機器に対して行われる必要がある。

b) 色圧縮方法

通常、違うメディアは違う色域を持ち、その形状、大きさは異なっている。ディスティネーション側の色域がターゲット側より大きい場合には問題ないが、たいていの場合、少なくとも部分的には小さい事が多い。この場合にはFig.2に示すように色相を変えずに彩度圧縮し、その階調性、彩度、明度などが観察者にとって違和感のないようにする事が望まれる。

c) 明るさ・色順応モデル

あるメディアを違うメディアに表現するとき、同時に環境が変化する事が多い。例えば、あるカラーディスプレイは9300K前後のかなり青い白色点を持っているが、こ

れを印画紙に再現したときには、室内光で観察するため白色点は大きく変わる。このとき人間は、明るさ・色順応により感覚が変化するため、例えばディスプレイ上の画像と単純に三刺激値を合わせても、印画紙上の色はひどく青みがかったように感じられる。この効果を相殺するためには、環境の変化に対する人間の視覚の順応モデルを用いて、平均的な人間が同じ色と感じる新たな三刺激値を推定する必要がある。

d) 色変換方法

上の3つの手法が決定すると、今度はそれぞれが同じように感じられる色を作り出すターゲット側画像装置のデジタル値をディスティネーション側画像装置のデジタル値に変換する事が要求される。このためには、高精度、高スピード、高自由度の変換装置・アルゴリズムが必要である。

われわれはこれらの問題点について、前報では装置側の立場から主としてa)とd)の問題点に対する解法のいくつかを提案してきた⁵。しかしながら、これらはCIEの定義に基づいた手法であったため、技術的問題点が解決するに従い、その定義自身の問題点が浮き彫りとなってきた。この中でも特にビデオプリンタにおける色圧縮の際の色相の変化は無視し得ないものであった。そこでCIEで推奨されている2つの空間が実際の画像機器の色域でどのような等色相特性を持っているかを比較するために次の視覚実験を行った。

3

色相線を求める視覚実験

CIE空間の等色相特性を調べるためには、彩度の高い色（基準色）と彩度・明度の異なる色（試験色）を見比べ、同じ色相に感じられる試験色の三刺激値を求めた。

3.1 実験方法

基準色と試験色を表示する装置として、BARCO社製カラーディスプレイCalibratorとミニコンピュータを組み合わせ用いた。これを色彩工学的に調整し、この画面上にさまざまなカラーパッチを映し出し、9人の被験者を選択させた。その画面のレイアウトをFig.3に示す。

画面の周囲は白色に囲まれ、その中に $L^*=50$ の灰色の面を表示した。この灰色面上に、8つのカラーパッチが3列並べられ、下行に基準色となる高彩度の色、上行には中行と同じ明度を持つ無彩色が配置され、これらはそれぞれ同じデジタル値により表示した。基準色はCRTの三原色とその組み合わせを選んだため明度は L^* で40-100の間で分布し色相により異なる。中行には、明度一定でかつ彩度をできる限り一定にして、色相を円周距離で色差4となるように8つの試験色をCIELUV色空間の定義で計算した等色相色を中心に表示した。

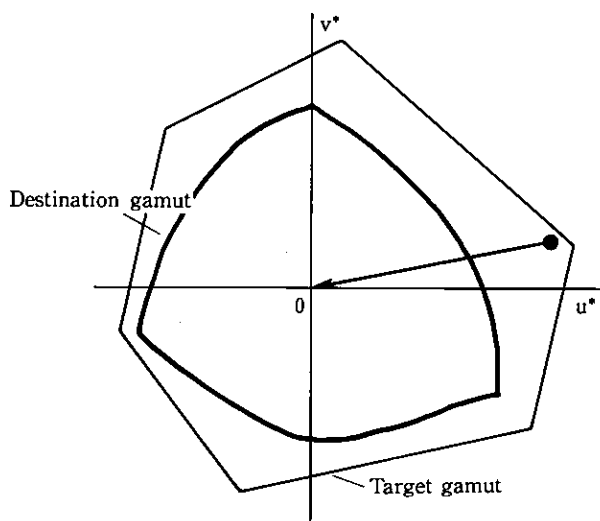


Fig.2 Constant hue compression

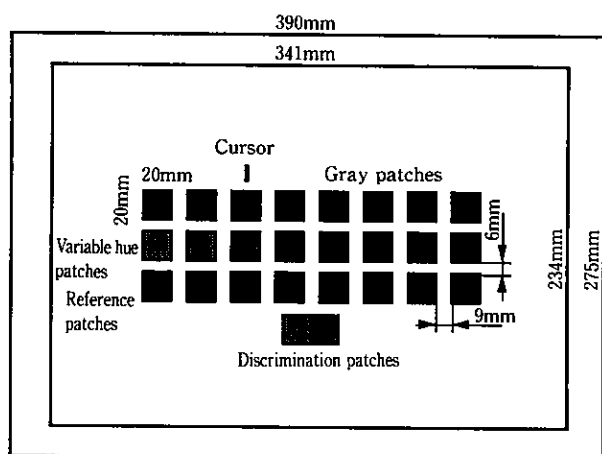


Fig. 3 Screen layout for the visual experiment

被験者はキーボードを操作して画面内のカーソルを左右に動かし、同じ色相に感じられる縦1列の組み合わせを選択する。次の表示画面ではその選択結果が中央に来るように計算され、かつ、色相の変化を小さくして表示される。被験者はこの操作を画面下方にある中列の3番目と5番目と同じデジタル値を表示した識別用のカラーパッチのペアの差が分からなくなるまでこの操作を繰り返す。

この過程を、12色相に対して色域境界上の明度8レベル、基準色と同じ明度で彩度の異なる3レベルに対して、計132点について等色相点を求めた。さらに、被験者の繰り返し誤差を見るために、同じ実験を3回行った。

3.2 ディスプレイの調整とその精度

ディスプレイの調整のため、LMT製C1200色彩計を用い、コンピュータ上のRGBの値を等間隔に9ステップに分け、そのすべての組み合わせをディスプレイ上に表示し、それらの三刺激値を測定した。これらを曲線で補間し、 $33 \times 33 \times 33$ のRGB-XYZの関係を持つLUTをこのディスプレイの色彩特性を示すモデルとして用いた。この格子点以外については、格子点で区切られる立方空間を6つの三角錐に分割し、その小空間内では線形マトリクスを用いて推定した。

このLUTモデルの精度を評価するために、実験で利用する色座標を含む円筒座標上分布した測定点とは異なる色385点を表示し、それを調整時と同様に測定し、予測値と測定値の誤差を見た。これに対し、実測の平均色差 (ΔE_{uv}) は0.48、その標準偏差は0.35であった。Fig.4にそのヒストグラムを示す。これは量子化誤差を含めた値なので、十分な高精度と考えている。

3.3 結果

実験の結果得た等色相点を被験者の色相毎のバラツキを利用して重み付け平均を取り、CIELAB色空間およびCIELUV色空間上にプロットしたのがFig.5である。(a)と(b)は基準色と同じ明度で彩度が異なる場合で、すべて同

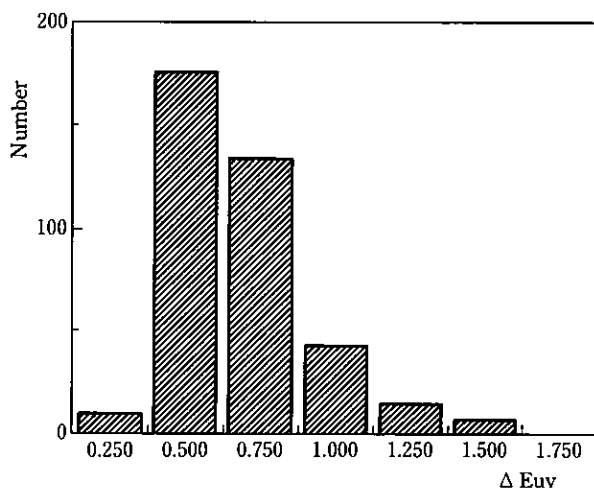


Fig. 4 Calibration error histogram

じ明度ではないことに注意しておく。(c)と(d)は、カラーディスプレイの色域境界の上側(破線)と下側(実線)の等色相特性を示している。本来、直線となることが期待されている色相線が明らかに湾曲している事が分かる。

4

考察

以上の結果は過去の文献に示された結果とはほぼ傾向を示している。しかし過去の研究と同様、このままでは色相線が湾曲していることが分かるものの、人間の感覚としてどのくらい湾曲しているかを直接比較することはできない。というのは、CIELAB色空間とCIELUV色空間の色相角度は同じではなく、また、色相角度と視覚の色相角度の分解能とは厳密に一致していない、換言すれば、粗密があり、その状態は空間毎にまちまちであるからである。そこで、被験者の感覚の鋭さは繰り返し実験の統計上の分散に比例すると仮定し、基準色のCIELUV色空間上の半分の色度 (Const L^*) と明度 (Vari L^* 。ただし彩度もほぼ半分になっている) における実験値とCIEの定義に従った直線に対する偏差を円周方向の色差で表し、正規化のため各色相方向の平均分散で除算した結果をFig.6に示す。

このグラフから人間の感覚上ではCIELAB色空間の等明度上での色相線の曲がり方が青の色相で最も強くなっていることが分かる。CIELUV色空間の場合もまた同じ傾向があるが、その程度はCIELABに比べれば小さい。また、 L^* が半分の場合も色相線が曲がっているが、等明度の場合ほど強くないことが分かる。また、赤の色相ではCIELAB色空間とCIELUV色空間では逆に色相がずれることが示されている。

この結果は高彩度の青をプリント上に表そうとしてCIEAB色空間の計算式に従い彩度を低下させた場合、青が紫方向に大きく変化すると言う、われわれがこれまで経験的に得てきた結果と同じものとなった。しかし、CIELUV

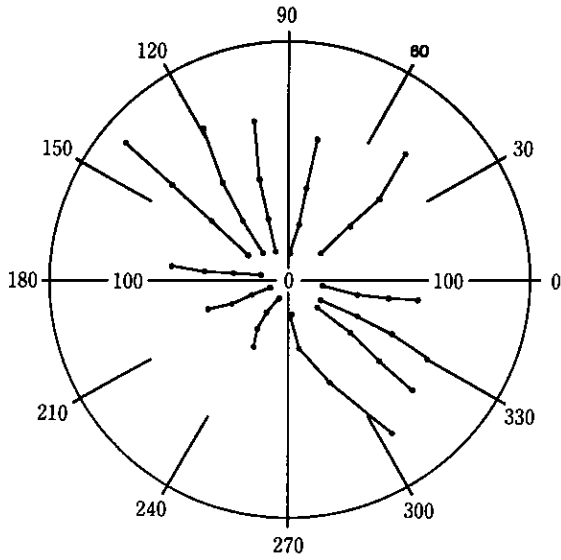


Fig. 5(a) Hue loci of CIELAB on constant L^* planes

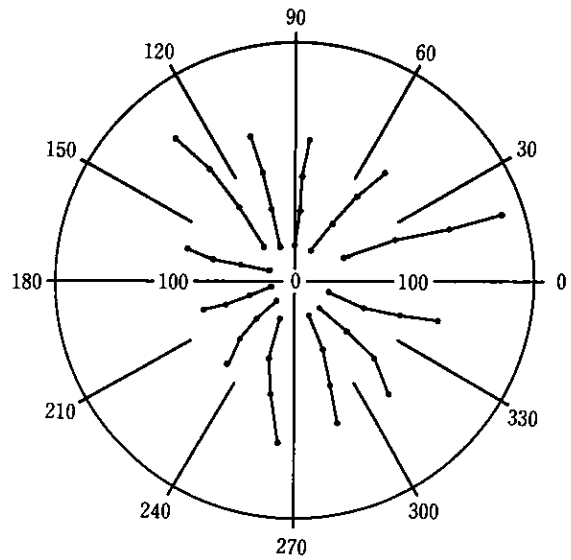


Fig. 5(b) Hue loci of CIELUV on constant L^* planes

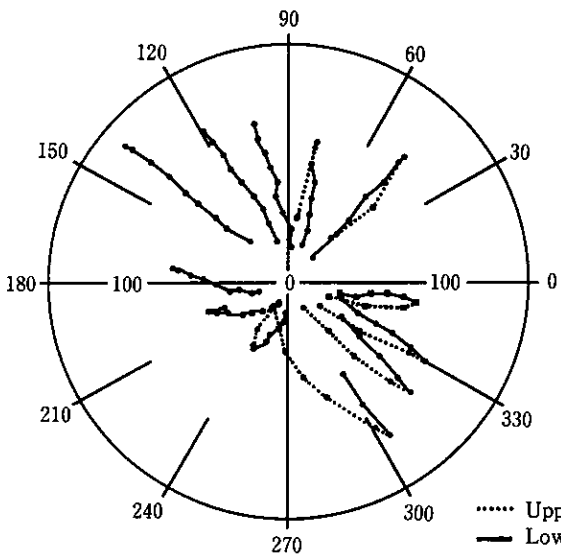


Fig. 5(c) Hue loci of CIELAB on CRT color gamut boundary

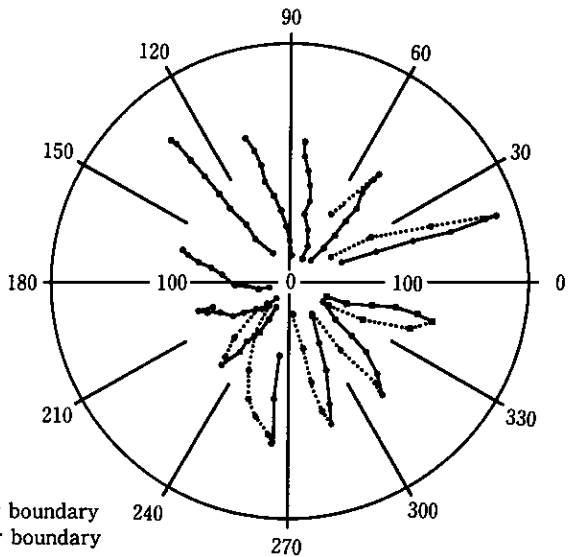


Fig. 5(d) Hue loci of CIELUV on CRT color gamut boundary

色空間が必ずしも完全ではないことはこの実験結果に明らかに示されており、より色相の曲がりの少ないLCH空間が必要となる。

5

むすび

電子画像の色再現で用いられる色圧縮を行う場合に必要となる色相線を求める視覚実験を行い、CIEの2つの空間を比較した。この結果、CIELAB色空間は色相線に関する限りCIELUV色空間に劣る事が明確になった。しかし、

CIELUV色空間の色相線も湾曲しており、ビデオプリンタのように極端な色圧縮を必要とする色再現系にはまだ不十分である。

われわれはこの実験結果を評価基準として色相線の湾曲の少ないLCH空間を見いだしており、CIELUV色空間と置き換えて使用している。しかしこの空間もまだ完全なものではなく、今後は順応モデルとも合わせて電子画像の色再現に適切なLCH空間を見いだすことが課題である。

6

この研究は、Rochester Institute of Technologyにおいて行われた。辛抱強く実験を行ってくれたMunsell Color Science Laboratoryの被験者の方々、ならびに多大な助言を頂いたRoy S. Berns教授に深く感謝の意を表したい。

●参考文献

- 1) Robertson, A.R. : Color Res. Appl., 15, 167 (1989)
- 2) Newhall, S. M., et al. : J. Opt. Soc. Am., 33, 385 (1943)
- 3) MacAdam, D. L., et al. : J. Opt. Soc. Am., 40, 589 (1950)
- 4) Robertson, A. R. : Color Res. Appl., 2, 7 (1977)
- 5) 洪 博哲 : Konica Tech. Rep., 1, 99 (1987)

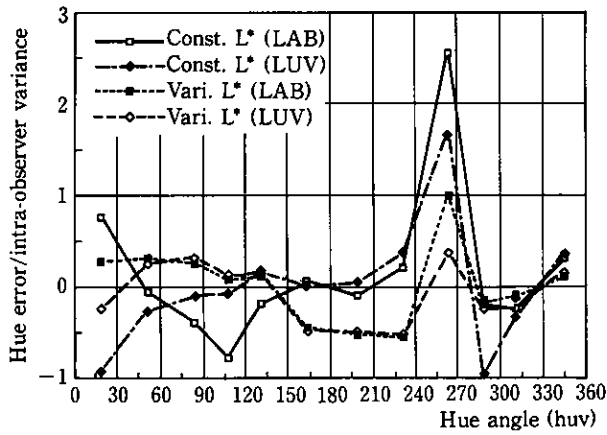


Fig.6 Hue error divided by intra-observer variance