

均等色空間・系統的画像符号化 と伝送系 → Display → 視覚の非直線性

宮原 誠

北陸先端科学技術大学院大学、情報科学研究科

〒923-12 石川県能美郡辰口町旭台15

Tel: 0761-51-1230 (direct)

Fax: 0761-51-1116

Email: miya@jaist-east.ac.jp

あらまし

“系統的”の意味は客観画質評価尺度(PQS)に基づいて符号器の設計や信号処理を行うおとするものであり。PQSは均等色空間の原信号と復元信号とのEuclid距離的な色差の関数として定義される。以下の検討が必要である。(1)RGB信号とHVC信号を量子化する時の誤差が検知限以下の量子化、(2)マンセル色空間の均等性の検討、(3)Lab色空間の不均等性の改善とRGB,HVC色空間の双方向変換アルゴリズム、(4)RGB,YMCK色空間の双方向変換アルゴリズム。上記問題の研究の進捗状況とその応用例を示す。

和文キーワード 均等色空間、系統的画像符号化、客観評価尺度、高度視知覚特性、色差

Uniform Lightness-Chromaticness Scale System and Systematic Image Coding

Makoto Miyahara

Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST),
School of Information Science

Asahidai 15, Tatunokuchi, Ishikawa 923-12 Japan

Tel: 0761-51-1230 (direct)

Fax: 0761-51-1116

Email: miya@jaist-east.ac.jp

Abstract

We propose a systematic color image coding. The “systematic” means systematic design and signal processing based on the Picture Quality Scale (PQS). PQS is defined as a function of the Euclidean distance of color difference between the original and the decoded signal in a Uniform Lightness-chromaticness Color Scale (ULCS).

We need the following discussions. (1) Quantization of RGB and HVC signals under the condition that quantization error is smaller than the just perceptible difference. (2) Discussions on the uniformity of Munsell Renotation System. (3) Improvement of uniformity of Lab color space. (4) Algorithm of two way transformation between RGB and YMCK color space.

Present developments of the above problems and application are described.

英文 key words ULCS, systematic image coding, objective picture quality scale, color difference

1. はじめに

自然画像の符号化は、画像信号の統計的性質の考慮；所謂 Shannon流の情報理論に基づいて始まり、現在では、JPEG, MPEG方式に代表されるように各種メディアの符号化方式について標準化作業がなされ、実用化の段階を迎えようとしている。また、近年の画像符号化技術は、画像の local feature を保存して「受信端となる人間の視知覚特性に整合させる；重要な特徴を抽出して伝送する」方向の特徴抽出符号化やモデルベース符号化等に発展しつつある。更に、HDTVは実用化のため開発期に入った。これらに加え、現在では、HDTVの数倍の情報量を持つ高品質な超高精細画像についての信号処理や符号化の議論がなされ始めた。[12]

近世代の情報化社会は、高品質なカラー画像の時代と言われている。各メディア間の通信は ISDN (B-ISDNや ISDBも考えられるが) を中心とした、図1に示した構成になると考えられる。[6][13]

この様な新しい画像符号化の研究開発においても、その性能評価を行う事は重要であり、人間にとってかわるような画像品質尺度の開発が不可欠となる。

また、画像通信分野の研究を組織的且つ系統的に進め、実り多い成果を得るためには、RGB色空間ではなく均等色空間で信号処理、符号化を行うとよい。

均等色空間の代表である HVC色空間は色知覚の固有空間であるために種々の利点がある[2]。最も大きな理由は次の通りである。即ち、全ての研究者が視知覚特性も含めた多岐にわたる符号化に必要な知識を必ずしも勉強しなくても研究開発できるように

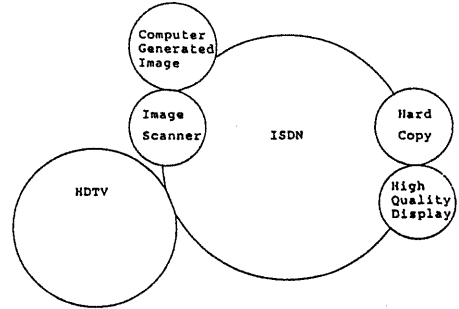


図1 High Quality Image Communication via ISDN

するため、画像に関する知識を数式化し、画質評価尺度(PQS)として反映させ、PQS値で画質の判断が出来るようにすることである。

これにより Computer simulator の助けを借りて急速且つ系統的に画像符号化の研究を進めることが可能になる[1]。そのためには均等色空間をベースとしたカラー画像の PQS を求める必要がある。

本報告では、系統的画像符号化を行うための基礎となるモノクロ画像の画質評価尺度(PQS)について述べ、その符号化への適用例について示す。さらに、カラー画像の画質評価尺度(PQScolor)についての開発方法について説明し、そのカラー画像の符号化例について述べる。最後に、高品質画像の系統的符号化を考えるために考察すべき問題である信号方向の解像度についての研究成果を示す。

2. 系統的画像符号化

画像符号化方式の性能評価を行うためには、受信側での画像品質評価尺度が不可欠である。これは、画像伝送の最終的な受信端は人間の視覚系であるから当然である。よって、高効率な符号化方式を研究開発するためには、万能な画質評価尺度の開発が不可欠である。もし、万能な画質評価尺度が開発できれば、種々の画像符号化方式の符号化器や符号化パラメータを真の意味で最適化することが可能である。我々が目指す系統的画像符号化とは、“画像品質尺度に基づいて信号処理や符号化器の設計を最適化すること”を意味している。従って、高レベルの画像符号化を実現するためには、人間の主観的評価を代用するような画質評価尺度が必要となってくる。

ここでは、我々が開発した主観的画質評価を代用する客観的画質評価尺度(PQS)とPQSの符号化器設計への応用について述べる。

2.1 客観的画質評価尺度(PQS)[3][4]

PQSは、従来のWMSEに代表される画像の global な妨害に対する視覚特性だけでなく local feature に対する人間の高度な視知覚特性を詳細に考慮した基礎ひずみ要因を画像から抽出し、これらのひずみ要因の線形和で構成されている。この構成図を図2に示す。非常に多くの要因を検討した結果、ITE標準画像を中心とした実験により、PQSは次に示す5種類の基礎ひずみ要因から構成されている。

- 1) ランダムノイズ
- 2) 視覚的弁別しきいを考慮した平均2乗誤差
- 3) 符号化サブブロック間の誤差変化量
- 4) 誤差の自己相関係数
- 5) 輪郭近傍の visibility を考慮した誤差

これらのひずみ要因により、画像の global なひずみ、texture状のパターンを作るひずみや画像内容にかかわる local なひずみを評価することができる。

この PQS は、広範囲な種類の符号化再生画像に対して主観評価結果を極めて良好に近似できる汎用性の高いものである。(図3)

2.2 PQSに基づく符号化器の最適化

PQSを用いた適応型の画像符号化方式の例を図4に示す。この符号化方式に於いて、local decoder で再生した画像の PQS を符号化器へ feedback し、これに基づいて符号化パラメータの最適化、セグメンテーションやクラス分け等の適応化処理を行えば、符号化誤差による視知覚的な妨害が少ない符号化器が実現できる。

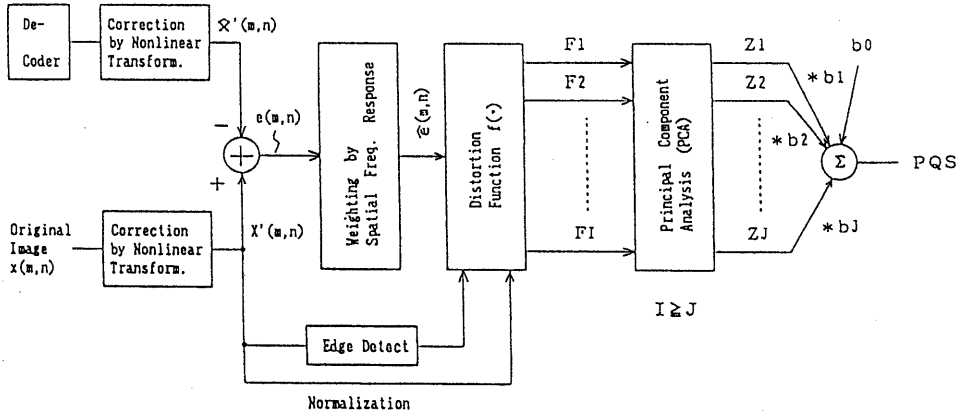


図2 客観的画質評価尺度(PQS)の構成

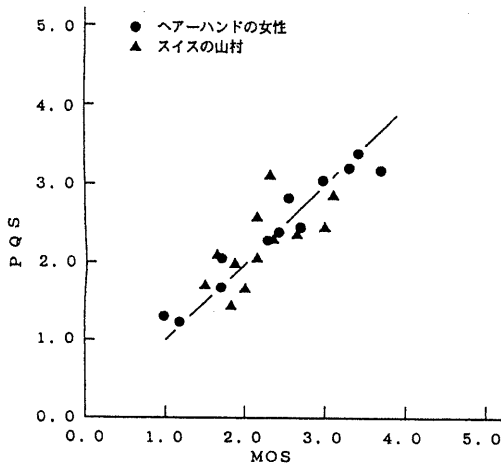


図3 PQSのMOS近似度

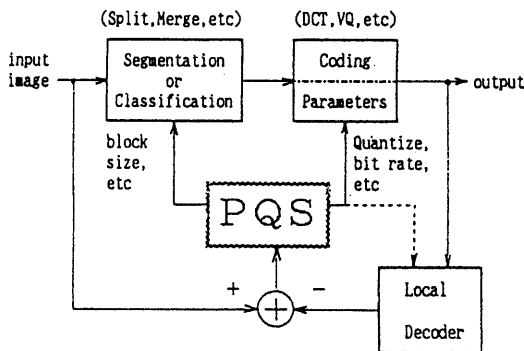


図4 PQSを用いた符号化器の一般的構成例

PQSを画像の符号化に応用した場合についての符号化器の構成例を図4に示す。[5]

3. カラー画像の系統的画像符号化

2. で述べた系統的画像符号化をカラー画像に適用するためには、カラー画像の妨害を評価するような客観的画質評価尺度(我々は、これをPQScolorと称している)を開発する必要がある。

3.1 カラー画像のPQScolor

モノクローム画像のPQSは符号化誤差 $e(m,n)$ の関数として(1)式で定義した。 (m,n) は画素の座標)

$$PQS = f\{e(m,n)\} \quad (1)$$

ここで、 $e(\cdot)$ は視覚的に均等な尺度上で定義されている誤差である。この考え方をカラー画像に適用するならば、

$$PQScolor = f\{Dc(m,n)\} \quad (2)$$

$Dc(\cdot)$: Euclid measure

となる。[6]ここで、 $Dc(m,n)$ は色覚量(明度、彩度、色相)に比例するように定義された色差(color difference)である。(2)式が得られれば、これを基にして図5のようなカラー画像のfeedback coderが可能となる。(図5はVQを用いた例である)

また、符号化器設計時の誤差全てをPQScolorで評価し、最大のPQScolorが得られるように設計しようとする系統的符号化が可能となる。

3.2 色差 $D(\cdot)$ と均等色空間

この研究の基礎となる理論はULCS(Uniform Lightness-Chromaticness Scale System)色空間であり、人間の色知覚固有の均等色空間である。また、修正Munsell色空間がよくこれを近似しているものの代表である(図6)。修正Munsell色空間での色差 $D(\cdot)$ の定義は、Euclid距離に近いものなので扱い易い。GodloveにZerrorらの補正を加えた色差が自然画像に適していると考えられる。[2] Godlove色差値は、色差を求める2色のHVC値を (H_1, V_1, C_1) 、 (H_2, V_2, C_2) とすると、

測誤差 ΔV と色の飽和度 S (C を变换して得る)の子測誤差 ΔS とのVQは、冗長度除去の効果が大きい。

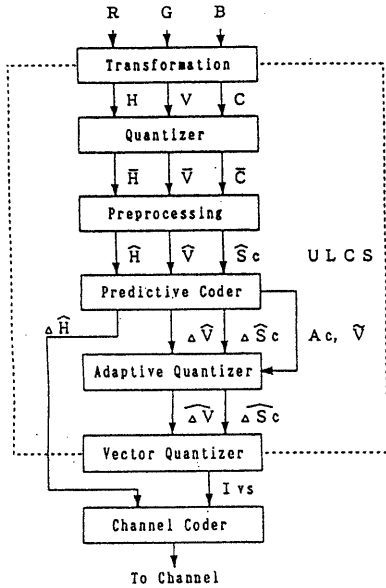


図8 VQ Codingの構成例

3.4.2 Segmentation coding[9]

図9が Segmentation coderの例である。HVC色空間は、画像の特徴ある物体を抽出するための有用な空間であることが注目されている。[10] これは、カラー画像のHVC空間での3次元的な色頻度分布を調べると、複数の分布のかたまりがみられ、3次元的なクラスタを構成していることに起因しており、このクラスタを原画像空間に写像すると、特徴ある領域を形成していることが明らかとなった。この性質を用いて画像を局所的性質が同一な幾つかの特徴ある領域に分割することができる。

Segmentation codingでは、分割された領域の形状情報と3種類の色成分情報を効率よく伝送すればよい。まず、RGBデータをMTM法により、HVCの値に変換する。色の3属性であるHVCが構成する3次元空間を用いて画像の領域分割を行う。領域分割は、



図10(a) 原画像
天気予報



図10(b) 領域分割画像
領域数=133



図10(c) 符号化再生画像
1.79[bit/pixel]

表2 NBS色差と評価語の対応

NBS 色差	評価語
1	直接目で比較すると僅かに差が分かる
2	注意深く行えば色彩計で計測可能
3	緩やかな許容誤差

X-mean法を用い、領域統合には Godloveの色差を大きい値処理により行っている。[11]

領域の形状情報は、差分チェーン符号化により受信側へ符号化伝送される。また、同時に、色相と彩度情報の符号化部へ送られる。領域内の色相情報はほぼ同一色相値であるとみなせるので肌色記憶色を考慮した粗量子化を行っている。明度情報の符号化部では、領域の形状情報を利用せずJPEG方式を用いて符号化を行なう。これは、領域分割が誤っても明度情報の符号化に影響を与えない様にするためである。彩度情報の符号化部では、領域内の明度と彩度の高い相関性を利用して、復号化された明度情報を用いて彩度情報を多項式近似し、その係数を伝送する方式をとっている。

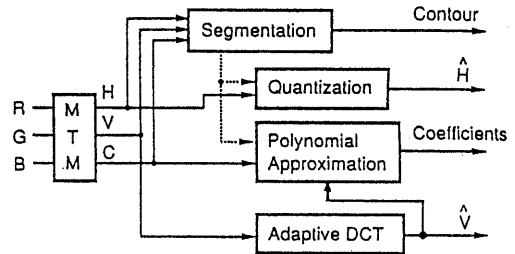


図9 Segmentation Codingの構成例

4. 高品質カラー画像符号化

JPEG, MPEG方式に象徴されるように、テレビ電話やテレビ会議で使用されるレベルでの画像符号化方式は標準化されつつ有り、実用化のきざしがみられる。また、HDTVは、世界の標準FormatとしてCCIR X A/11が得られ、基礎研究の段階はほぼ終了して開発

段階に入っている。このような状況下で、近年、より高精細の画像を取り扱おうとする動きが盛んになりつつある。[12]

我々は、次世代の画像通信として、

- (1) 高精細(高品質)静止画像伝送
- (2) 標準テレビ動画像と(1)を結合したマルチメディア通信
- (3) HDTVの4倍以上の情報量を持つ超高精細(高品質)動画像通信

などが期待されると考えているが、先ず(1)、(2)が次世代の中心となると考えている。[13]

- ところで、高品質静止画像の伝送を考える場合、
- a. 空間解像度
 - b. 信号方向の解像度

の両者を考える必要がある。この様に、将来の高品質カラー画像の処理、符号化のためには更なる検討が必要である。

また、印刷システム系とのマッチングをとるためにも加法混色系(RGB系)と減法混色系(YCMX系)との変換が不可欠である。これからは、次の様な問題を考える必要がある。

- (1) HVC系は補正無しで使って良いか?
- (2) テレビジョン加法混色系(RGB系)と印刷減法混色系(YCMX系)の変換

4. 1 RGB系へのHVC色空間へのマッピング[14]

量子化されたRGB dataを人間の色知覚量と対応させるために、色相H、明度V、彩度Cの3つの色知覚属性を持つ均等色空間に変換する。なおRGB色空間から数式による変換によって、ULCS色空間を近似する方法はMTM(3.3節)を用い、RGB data→HVC dataの変換を行い、HVC空間上で量子化誤差の定量的解析をした。

RGB各8[bit/sample]の精度で量子化されたdataの組み合わせで再現できる全ての色を、MTM法によりHVC色空間へmappingし、その視覚的な分布特徴を計算機simulationで調べたところ、以下のような分布特徴を有している事が分かった。(図11)

- ・HVC色空間の色再現範囲内にmappingされていない色隙間が多く存在している
 - ・明度V方向に於て、暗い側約1/3の空間には色がほとんどmappingされない
 - ・mappingされない部分、即ち量子化精度の制限で再現できない色は暗い部分に集中しているから、暗い色の再現性が悪い[15]ということが確かめられた。
- 従って、RGB空間での線形量子化step数は8[bit/sample]では充分でない。

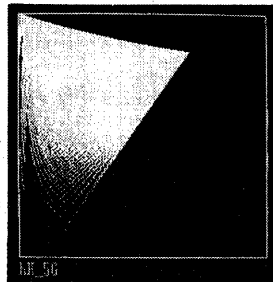


図11 RGB系へのHVC空間への写像結果

4. 2 色差1の均等色空間の量子化

HVC色空間の各軸は、いずれも人間の色知覚の固有軸に相当し、しかも色知覚的にlinearとなるようにscalingされている。各軸をそれぞれ均等に量子化すれば、隣合う全ての量子化代表色間の色差は均一化されることになる。従って、均等色空間で線形量子化を行えば良いと考えられる。

4. 2. 1 V, C軸の量子化

VとC軸を量子化する際、隣接している量子化代表色間色差の(又は)NBS色差 ≤ 1 (僅かに異なると感じる)の条件を満たすのに、必要な量子化step数を求める。

Godlove色差とNBS色差の関係から量子化の条件は次式となる。

$$\Delta E_g \leq 1/1.2 \quad (8)$$

この条件でV軸の量子化step数を考える。今、H,Cが不変($\Delta H=0, \Delta C=0$)とし、(3)式を(8)式に代入して ΔV について解くと、次式が得られる。

$$\Delta V \leq 1/4.8 \quad (9)$$

Vの最大値は10であるため、V軸の量子化step数は48以上を取らなければならないことになる。即ち、Vの各step間の色差は1以下にするためには、6[bit/sample]の量子化精度が必要となる。しかし、Vの視覚的な影響が他より大きいために、実際には更に2bit多く必要であるという報告があり、[16]ここでは8[bit/sample]とする。

また、同様にC軸の量子化step数を求める。 $\Delta H=\Delta V=0$ のとき(8)式を満足する ΔC は次式のように決定される。

$$\Delta C \leq 1/1.2 \quad (10)$$

Cの最大値が30であるから、C軸の量子化step数は36.0となり、約6[bit/sample]の量子化精度が必要である。

4. 2. 2 H軸の量子化

V, C軸と異なり、H軸のdimensionは角度である。H軸を均等に分割した場合の量子化代表色間の色差は彩度の大きさに依存する。このため、空間的な距離が等しくなるように、H軸の量子化数をCの大きさによって変えなければならない。

$\Delta C=\Delta V=0$ 且つ、 $C_1=C_2=1$ の条件で、(8)式を満たす ΔH_1 を求めると、(11)式となる。

$$\Delta H_1 \leq 15.45 \quad (11)$$

Hの最大値を100とすると、C=1の部分では8分割しなければならない。従って、Cを変数として、(8)式を満たす ΔH を求めると、(12)式のような関係が得られる。

$$\Delta H \leq \Delta H_1/C \quad (12)$$

よって、H軸の量子化に必要なstep数は8Cとなる。例として、上記の結果からC軸を6[bit]で量子化すると、1stepのCの大きさは約0.5となり、この部分ではH軸は4分割する必要がある、Cが30の部分ではH軸は256分割する必要がある。従って、H軸の量子化精度は最小2[bit/sample]、最大8[bit/sample]が必要である。結果はまとめて表3に示す。

色差 ≤ 1 を保障する均等色空間の分割方法を図12に示す。

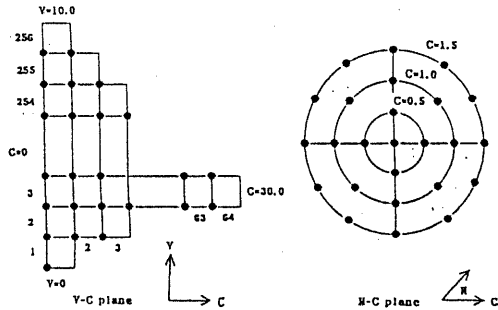


図12 色差 ≤ 1 を保障する均等色空間の分割方法

4.3 高品質色再現に必要なRGB信号の量子化精度

高品質の色を再現するには、線形RGB信号を非線形の均等色空間へanalog的にmappingし、そこで量子化を行うことが望ましいが、RGB信号からHVC信号への変換における非線形処理の精度や安定性を保証して実現することは容易ではない。そこで、RGB信号を直ちに量子化し、digital信号とした後にdigital的に非線形などの処理をする。量子化による再現色の色差を検知限におさえるために、RGB色空間での線形量子化精度がどの程度必要かを検討する。

本研究で行った方法は、量子化誤差(色差)が検知限を下回る精度でHVC空間を均微小間隔(4.2で与えた量子化step数)で分割する。そして、全量子化代表色をMTMの逆変換を用いて8[bit]のRGB色空間にmappingし、『各RGB軸に於て同一の量子化levelに2色以上存在すれば、その量子化stepの幅が粗いだから、更に細かく量子化すべき』と判断し、RGB色空間で隣接するdataの距離の最小値をRGB色空間で量子化するときの量子化stepとする。このような思想で計算した結果、8[bit]のRGB色空間の各軸の1stepにmappingされた量子化代表色間の最小距離d_{min}、それに相当する各軸の量子化step数及び必要な量子化精度(1/step数)を表3に示す。

表より、線形量子化代表色の色差を1以下にするためにRGB信号をそれぞれ14, 16, 12[bit/sample]の精度で量子化しなければならない事が分かる。即ち、RGB合わせて最低42[bit/sample]必要となる。色差 ≤ 1 を満足するのに必要なHVC空間の量子化精度の合計がただか16[bit/sample]~22[bit/sample]でよかったが、均等色空間ではないRGB空間の信号を線形量子化する時は、色差 ≤ 1 をぎりぎり満足す

る最小step幅が全範囲の量子化step幅となってしまうため大幅に量子化step数が増えてしまう。

色差 ≤ 1 を満足させながら、RGB信号の量子化レベル数を減じるには、線形量子化ではなくRGB信号を予め7func的に非線形変換後に線形量子化する、または、RGBの信号レベルの低い領域を細かく量子化し、信号レベルの高い領域を粗く量子化する非線形量子化を行う事により可能となる。(表3)

これを実現する信号処理の流れを図13に示す。

表3 色差 ≤ 1 を保障するためのRGB信号の精度 [14]

	Linear Input	Non-linear Input ($\gamma=3$)
H	8C levels/pixel	
V	8 bits/pixel	
C	6 bits/pixel	
R	14 bits/pixel	10 bits/pixel
G	16 bits/pixel	12 bits/pixel
B	12 bits/pixel	9 bits/pixel

5. まとめ

近世代の情報化社会が高品質なカラー画像の時代であることを予測して、カラー画像の客観的画質評価尺度や高品質系統的画像符号化の研究開発が必要であることを述べた。これらを研究するにあたって基礎となる、これまで得られた研究成果について以下の順で概説した。

- 1) モノクロ画像の客観的画質評価尺度(PQS)と系統的画像符号化の例
- 2) カラー画像の客観的画質評価尺度(PQScolor)の開発方針、均等色空間の有用性と色差式を符号化器設計の基礎とした画像符号化の例
- 3) 高品質カラー画像符号化や処理のための基礎的な問題点とその信号方向解像度の検討

今後、これらの研究成果を基にしてカラー画像の客観的画質評価尺度や高品質系統的画像符号化の開発を行ってゆく予定である。[17]

参考文献

- [1]宮原: "系統的符号化", 74t'-y- (1990-7).
- [2]甘, 小谷, 宮原: "生理的明度関数によるHVC空間の均等性の改善", 信学秋大予稿 (1993-9)
- [3]M. Miyahara: "Quality Assessments for Visual Service", IEEE COM. MAG, 26, 10, pp. 573-578 (Oct. 1988).
- [4]宮原, 小谷, 堀田, 藤本: "客観的画質評価尺度(PQS)-local featureの考慮と汎用性-", 信学論(B-1), J73-B-1, No. 3, pp. 208-218 (1990-3)
- [5]小谷, 甘, 宮原, 堀田: "適応DCT符号化-PQSに基づく最適化-", 画像符号化シンポジウム'90 4.5 (1990-10)
- [6]宮原, 小谷, 堀田: "均等色空間と高品質画像系統的画像符号化", 信学技報, IE91-81 (1991-11)
- [7]吉田, 宮原, 小谷: "マシタ代表色系にもとづくカラー画像の符号化", 信学誌, 44, No. 12, pp. 1732-1739 (1990-12)

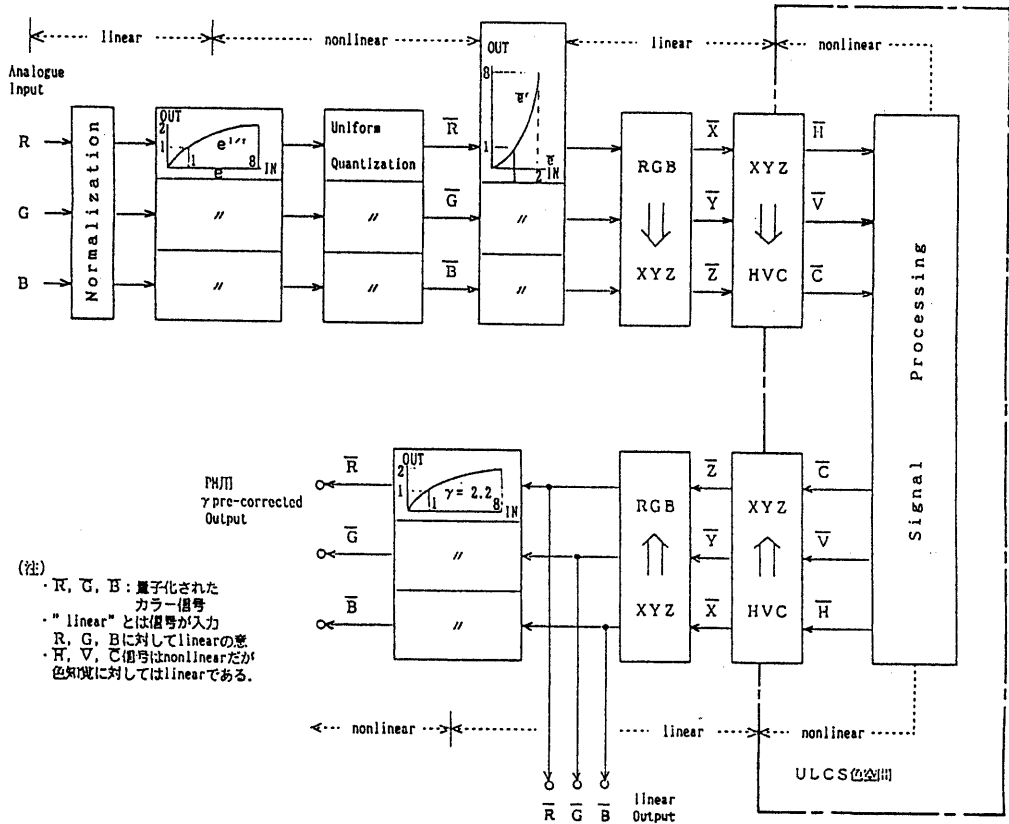


図 13 カラー信号の均等量子化信号処理

[8] M. R. Pointer: "The Gamut of Real Surface Colors", Color research and application, 5, 3, pp. 145-155, (Feb. 1990)

[9] 堀田, 宮原: "カラー画像の領域分割符号化", 信学論(B-1), J75-B1 (1992.6)

[10] 嘉瀬, 宮原: "カラー画像のセグメンテーション符号化 - 領域抽出と符号化シミュレーション", 信学技報, PRU89-52 (1989-09)

[11] 堀田, 宮原, 小谷: "均等色空間に基づくカラー画像の領域分割", 信学論(D-II), J74-D-II, (1991-10)

[12] 小野, 斎藤, 相澤: "超高精細画像通信の実現にむけて", 画像符号化シンポジウム'90 6.1 (1991-10)

[13] 宮原: "均等色空間における系統的画像符号化の研究", 信学技報, E1D90-123 (1991-2)

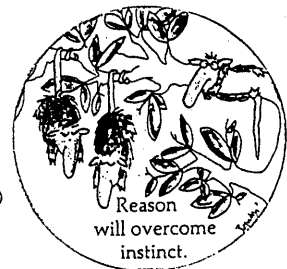
[14] 甘, 小谷, 宮原: "高品質カラー画像の処理に必要な量子化精度", 信学論(D-II) (1993-9)

[15] 応用物理学会 光学懇談会: "色の性質と技術", 朝倉書店, p. 134 (1990)

[16] 佐柳: "色彩空間の量子化", 第4回色彩工学コンファレンス, 1-2, pp. 15-18

[17] V. R. Algazi, 宮原他: "次世代超高品質画像研究ネットワーク-Int'l HQITL NETWORK plan" (1993-6)

宮原 誠 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科



本論文は、電子情報通信学会画像工学研究会(信学技報E83-31(1993-07)PP.9-16)で発表したものを再編集したものです。