

Title	高度感性情報から発見する Extra High Quality Imaging に重要な物理要因と特性に関する研究 - ``奥行き感``再現に重要な物理要因・特性 -
Author(s)	白井, 英樹
Citation	
Issue Date	1999-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1266
Rights	
Description	Supervisor:宮原 誠, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

高度感性情報から発見する Extra High Quality Imaging に重要な物理要因と特性に関する研究 - “奥行き感” 再現に重要な物理要因・特性 -

指導教官 宮原 誠 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

白井 英樹

1999 年 2 月 15 日

要 旨

我々は、高度に芸術的な印象を“高度感性情報”と定義し、画像再生において高度感性情報を歪みなく伝達できる超高品位画像システムの開発を目指している。そのようなシステムの開発のためには、高度感性情報の忠実な再生に関連する物理要因の特性を明らかにする必要がある。従来のディスプレイシステムでは、性能を表す諸特性を同一にしても、全く同じ性能のシステムを得ることができないことがある。これは高度感性情報再現のために重要な未知の物理要因があるからであると考えられる。そこで、従来から良く知られる物理要因、空間解像度、S/N 比などに加え、新たな物理要因を調査・発見していく必要がある。

本研究では、高度感性情報の Key 評価語として“奥行き感”という評価語に注目している。“奥行き感”を使う事の利点は、奥行きの劣化は比較的容易に知覚でき、そのため他の評価語に比べ、評価が容易で安定に行なえるということである、且つ“奥行き感”を忠実に再現することは、高度感性情報を忠実に再現するための必要・充分条件に近い程大きな必要条件ではないかと考えられる。

2 台のディスプレイ上で画像の観察をしていた所、一方のディスプレイにおいて、“奥行き感”の再現が悪いことが観察された。そして、この“奥行き感”の劣化は、CRT 表面付近で生じる光学的散乱-ハレーション-が原因ではないかと考えた。同時に、フェースマスクに施されたコーティングがこのハレーション特性に大きく関連しているのではないかと考えた。

上記仮説を検証するため、異なるコーティングを施した 3 台のディスプレイを用意した。13 層 AR コーティング、4 層 AR + ノングレアコーティング、そしてコーティングなしの 3 種である。ハレーション特性を種々の方法によって測定し、“奥行き感”による主観評価を行なった。その結果、ハレーション特性と“奥行き感”再現の間には強い相関が見い出せた。ハレーションはより直接的には、鮮明さ、輝き感などを劣化させることも観察された。また、ハレーションの要因および、ハレーション低減の方法についても検討した。

最後に、“奥行き感”では発見できない要因、今後高度感性情報再現の歪みない再現のための必要充分条件を求めるためになすべき事について議論した。

目 次

1	はじめに	1
1.1	研究の背景・目的	1
1.2	本論文の構成	2
2	従来研究とその問題点	3
2.1	ディスプレイシステムの物理要因・特性	3
2.1.1	階調再現	3
2.1.2	色再現	4
2.1.3	解像度，鮮鋭度	5
2.1.4	妨害	5
2.2	画像向上に向けた先行研究	6
2.2.1	研究の第1段階	6
2.2.2	高品位に重点を置いた第2段階	6
3	本研究の位置づけと研究の進め方	7
3.1	現在直面している問題	7
3.2	研究方法-逆転的発想-	7
3.3	キー評価語：“奥行き感”	8
3.3.1	“奥行き感”と高度感性情報	9
3.3.2	2次元画像からの奥行き知覚	9
3.3.3	“奥行き感”再現のために必要なこと [20]	10
3.4	先行研究により見いだされた物理要因と要求特性	11
3.4.1	step response , slew rate	11

3.4.2	Cross Modulation 特性	12
3.4.3	γ 特性の非直線性	13
3.4.4	Aliasing	13
3.4.5	コモンモード ノイズ	14
4	新たな物理要因-パネル部での光学的散乱-	15
4.1	観察と発見	15
4.2	原因の追求	18
4.3	コーティングについて	18
4.4	光学的散乱の測定	19
4.4.1	階調再現に及ぼす影響の測定 1	20
4.4.2	階調再現に及ぼす影響の測定 2	22
4.4.3	色再現に及ぼす影響の測定	23
4.4.4	測定結果の考察	23
4.5	光学的散乱特性のモデル化	25
4.6	ハレーションの定義	26
4.7	ハレーション要因の検討	27
4.8	モデルの検討	28
4.9	ハレーション対策の検討	29
4.9.1	コーティング	29
4.9.2	パネルの透過度	29
4.10	高度感性情報の主観評価実験	30
4.10.1	評価画像	30
4.10.2	評価方法	31
4.10.3	奥行き感の主観評価実験	32
4.10.4	“奥行き感” とハレーション特性の関係	32
4.10.5	ハレーションと他の評価語との関係	33
5	ハレーションの規定とまとめ	34
5.1	ハレーション特性に要求される充分特性	34

6	高度感性情報と奥行き感の関係	38
6.1	高度感性情報と“奥行き感”の関係	38
6.2	奥行き感では見い出せない要因	39
6.3	奥行き感以外のキー評価語	40
7	まとめと今後の課題	41
7.1	これまでのまとめ	41
7.2	今後なすべき事	42

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景・目的

高度情報化社会，マルチメディア時代の到来とともに，電子メディアの果たす役割はますます大きくなり，電子映像も，デジタル衛星放送の開始，インターネット，DVD などによる映像の配信など生活に密着した不可欠なものになってきた．さらに，芸術作品のデジタルアーカイブ化も，EU では国家プロジェクト VASARI, MARC として、また日本でも石川県において新情報書府構想のもとで積極的に進められるなど，芸術の分野での利用も今後ますます増えていくと考えられる．そのような芸術分野への応用において，高品位な画像再生に対する要求が高まってくることは必至であり，これらの要求に答えていくことができなければ，電子映像メディアは見放されていく恐れもある．そのような時代に先駆け，我々は，高度に芸術的な印象を“高度感性情報”と定義し，それを電子画像で再現することに取り組んでいる．オリジナルの作品のもつ芸術的印象を忠実に取り込み・伝送・再現できる電子映像システムを構築したい．更に，このような高品位画像システムを完成させ，これを用いて次世代の未来画像文化を創造したい [1]．

上記目標の達成のためには，高度感性情報の再現のために要求されるシステムの物理特性を明らかにしていく必要がある．現在は，その中でも欠かすことのできない再現系（ディスプレイシステム）にとって重要な物理特性の調査・研究を行なっている．その際にも，再現側のみではなく，高品位画像システム全体を視野に入れながら，システム全体として高品位化できるように考えていく必要がある．従来のディスプレイシステムでは，性能を表す現在わかっている諸特性（周波数特性，量子化レベル数，画素数，色再現範囲

など)を改善したとしても、作品表現上、やわらかく表現されているものがたくなったり、風景画のかすんだ遠景がはっきりとして遠近感が失われてしまうことが数多く観察された。これでは、画家が何十年もかけて到達した深い印象が集約された絵画や、カメラマンが100枚の写真から選りすぐった1枚の写真などの芸術的印象を含んだ画像においては、その印象を大きく損ねてしまう。このような事が生じるのは、従来の理論では明らかになっていない、高度な芸術的印象(高度感性情報)の伝達に必要な物理要因・特性が見落とされているためであると考えられる。

このような物理要因・特性を見い出すために、従来のような関連のありそうな物理要因・特性と画質(評価語)との関係を求めていく方法はあまり有効ではなかった。なぜなら、この方法では画質(評価語)と物理要因の関係が求まるだけで、見落とされてきた物理要因は見えてこなかったからである[3][4]。そこで高度感性情報の再現度に注目し、再現度に差が存在した場合にその周辺に注目して原因となる物理要因を発見する、という従来とは全く逆のアプローチが提案された[2]。現在は、高度感性情報を代表すると考え、”奥行き感”をキー評価語として用いている。この”奥行き感”の再現性に注目して高品位ディスプレイシステムの問題を検討した結果、従来見落とされていた物理要因・特性が見い出されてきた[16]。

そこで本研究では、上記アプローチのもとで引続き行なった研究結果について報告する。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。

第2章では、一般的なディスプレイシステムの物理要因・特性について簡潔にまとめたあと、これまでにディスプレイシステムの高品質化のためになされた先行研究とその問題点について記す。第3章では本研究の位置付け、および研究を進めるための方法論、物理要因発見のためのキー評価語”奥行き感”について論じた後、その方法のもとでこれまでに見い出されたディスプレイシステムの物理要因をについてまとめる。第4章では、引続き行なわれた調査によって新たに見い出された物理特性-ハレーション-について詳細に実験・検討する。第5章では、ハレーション特性の規定とまとめを行なう。第6章では、キー評価語”奥行き感”について検討する。第7章では本研究のこれまでのまとめと、今後の課題について述べる。

第 2 章

従来研究とその問題点

ここでは従来から知られるディスプレイシステムの物理要因・特性とについて簡潔にまとめた後，高品位画像再生に向けて行なわれてきた先行研究ならびにその問題点について議論する．

2.1 ディスプレイシステムの物理要因・特性

従来から知られている，画質に関連づけられるディスプレイシステムの物理要因・特性，必要なキーワードについて簡潔にまとめる．ほとんどのディスプレイシステム（液晶ディスプレイ，プラズマディスプレイ，印刷など）に関連する要因・特性であるが，CRT ディスプレイ特有の特性も含まれる．

2.1.1 階調再現

階調再現は，後に述べる色再現とも関連し，画像再生のためにはもっとも重要な要因である．以下に階調再現に大きく関連する物理要因・特性を挙げる．

コントラスト比

画面中の最大輝度と最小輝度の比．最大輝度は入力信号最大時の白の輝度であり，最小輝度は周囲光によるディスプレイ面の反射量で決まる．テレビの場合，最も見やすい画像の表示条件は，まぶしさの検知限から，室内照明による管面反射輝度が画像の最高輝度の

3% , コントラスト比は 30:1 程度がよいとされる [5] . 輝きをだすには , 最高輝度が必要である [4] .

階調数

画像を表示する場合 , 6 ビット (64 階調) では物足りなく , 8 ビット (256 階調) あれば充分だとされている . 64 階調以上では画質が飽和傾向にあるという報告もある [6] . しかし , 256 階調では特に暗い階調の表現は不十分である (2.1.2 信号解像度の項参照) .

ガンマ特性

CRT モニタは , 駆動信号電圧に対しての非線形な電圧変換特性が存在し , これを γ 特性と呼ぶ . 次の理由より , 撮像側 (伝送側) で γ 補正を行なう . (1) 光強度 dynamic range の圧縮 , (2) 信号誤差を信号 level ごとに独立に扱える , (3) 再生側モニタの γ 特性を補正する [7] . 現行テレビ用 CRT は , 2.2 乗程度ガンマ特性を有し , 撮像側で $1/2.2$ のガンマ補正がなされている [8] .

2.1.2 色再現

色再現は , (1) 分光的に正確な色再現 , (2) 測色的に正確な色再現 , (3) 好ましい色再現に分類される . 一般に , ディスプレイシステムにおいて (1) は不可能であり , 正確な色再現では (2) が目標とされる [5] . 色再現に関連する要因を以下に挙げる .

色再現範囲

そのデバイス上で再現可能な色の範囲を決める要因であり , 異デバイス間で画像を扱う場合は特に重要である . ピクチャモニタでは , RGB3 色の発光の加法混色で全ての色を表現するので , RGB 各蛍光体の CIE 色度図上の座標を結んだ 3 角形の内部が色再現範囲となる . 一般に CMY(K) 減法混色で表現される印刷系に比べ , 色再現範囲は広いが , 線スペクトルに近い色 (彩度の高い色) は表現できない . [5][9]

均等色空間と色再現誤差

この 2 つは物理特性ではないが , 色再現の議論の際には欠かせないキーワードである . 色再現の誤差は , 一般に均等色空間における色差で定義される . 色差とは , 2 色がどれだ

け異なって見えるかという観測者の知覚する心理量であり，均等色空間内においては，色差の大きさが空間内のそれらの色を表す 2 点間の距離の大きさに対応している．[10] そのため，人間の心理量への影響を議論するのに有効である．再現誤差が色差 1 内であれば人間はその差をほとんど知ることにはできないので，人の知覚の限界としてよく用いられる．均等色空間としては，CIELUV、CIELAB などが代表的である [5]．よりマンセル空間への近似精度が高い MTM(Mathematical Transform to Munsell)[11] も提案されている．

信号解像度

一般に RGB 各 256 階調 (1670 万色) で充分とされているが，色差 1 以内の再現誤差に抑えるためには，(R,G,B) 色信号を線形量子化時で各々 14, 16, 12bits，非線形量子化時 ($\gamma = 1/3$) で 10, 12, 9bits の精度で量子化しなければならない [12]．

色温度

色温度 [13] は，CIE が定める標準的な照明光 (CIE 標準光) や，白 (基礎刺激) を規定する際に用いられる．撮像時の標準光としては，よく D65(6500K, 昼光に近似) が使われる．モニタ側の白の色温度が事なる場合，補正が必要である．白および 3 原色の色度座標値が分かれば，簡単なマトリクス計算で色 (温度) 変換を行なうことができる [9][13]．色温度の違いは画像の与える印象に大きく影響を与える．

2.1.3 解像度，鮮鋭度

解像度には多くの物理特性が関係する．マスクのドットピッチ，有効走査線数，映像信号伝送系の周波数特性，ビームのスポット径など [8]．鮮鋭度とは，人間が感じる鮮鋭さを表す心理物理学量で，周波数特性と密接な関係にある．テレビでは，周波数特性の中域部分を高め，輪郭強調を行なって鮮鋭度の向上を行なっている [14]．解像度を客観的に評価する手法として，MTF(modulation transfer function) などがよく使われる [15]．

2.1.4 妨害

目的とする画像信号以外に混入している不要な信号を妨害 (信号) という．画像に依存しない妨害として，ランダム雑音 (熱雑音による粒状性ノイズ妨害含む)，ビート，モ

アレ、フレア特性など、画像内容に依存する妨害として、折り返しひずみ、量子化雑音、ゴーストなどがある [8] 。

その他、多くの物理要因（画像サイズなど）、動きに関する特性、符号化によるひずみなどがある。[3][4][7][8]

2.2 画像向上に向けた先行研究

2.2.1 研究の第 1 段階

ディスプレイシステム開発の初期段階においては、一般に良く知られた物理要因 (2.1 で記した特性含む) を向上、改善することによって画質の改善が行なわれてきた。しかし、諸特性が等しいディスプレイシステムでも同じような画質が得られない事などがあった。これは、重要な物理要因が見落とされているためと考えられ、画質のさらなる向上にはこういった物理要因を見い出し、その特性を規定していく必要がでてきた。

2.2.2 高品位に重点を置いた第 2 段階

そこで、見落とされている高品位画像再生に重要な物理要因を捜し出そうという研究が、宮原らによって行なわれてきた。まずは、総合評価 (高品位) と物理要因の双方に関連の深いキー評価語を探しだし、その間の関係を求めることによって高画質化に重要な物理要因を探った。キー評価語としては、実験的、経験的に高品位な画像再現に関連が深いと考えられた“自然さ”、“滑らかさ”、“連続性”、“安定さ”、“つや (輝き感)”などが用いられた。

この研究によって高品位画像再生に重要な物理要因とその特性が明らかになってきた [3][4]。しかし、上記方法は、思考錯誤的に関連のありそうな物理要因にあたりをつけ、キー評価語との関連を求めていく (既に達成された性能の中での要求特性を求めただけ) 方法であり、また、各評価語と総合評価の厳密な検討はなされていなかった。

第 3 章

本研究の位置づけと研究の進め方

3.1 現在直面している問題

ディスプレイシステムの高品質化のために、ワイド化、高精細化、高輝度化、高コントラスト化など、種々の向上化がはかられ確かに期待した結果はでている。しかしながら、それらのシステムの中で上記物理特性は同一であっても、必ずしも同じような画質が得られない。それは高画質化のために注目しなければならない物理要因が欠落しているためと考えられる。そこで高度感性情報を伝達可能な超高品位画像システムの構築のためには、高度感性情報の再現に関連する重要な未知の（あるいは見落とされている）物理要因・特性を発見しその必要特性を規定していく必要があると考える。ここで1番問題となるのが、“どのようにして未知の（見落とされている）物理要因の発見が可能なのか”という事である。

3.2 研究方法-逆転的発想-

どの物理要因や特性が重要であるかを知りたい場合、従来の研究方法は、思考錯誤的に、関連のありそうな物理要因にあたりをつけ、これが目的のテーマにどう影響するかを順次調べていく方法である。しかし、このような方法では、既に得られている物理要因・特性と画質との関係を求めてるだけで、ディスプレイのさらなる高品質化のために必要な未知の（見落とされている）物理要因を発見することは困難であった。そこで未知の（見落とされている）物理要因発見のための手段として、従来の方法とは逆の方向からのアプ

ローチ，つまり高度感性情報を表す評価語に注目し，それを再現するために必要な物理要因・特性へと辿っていく方法が提案された（図 3.1）[2]．これは過去の研究方法の考察から，必然的に導き出された研究方法であり，人間のもつ高度な発見能力を，体系的に利用するものである．

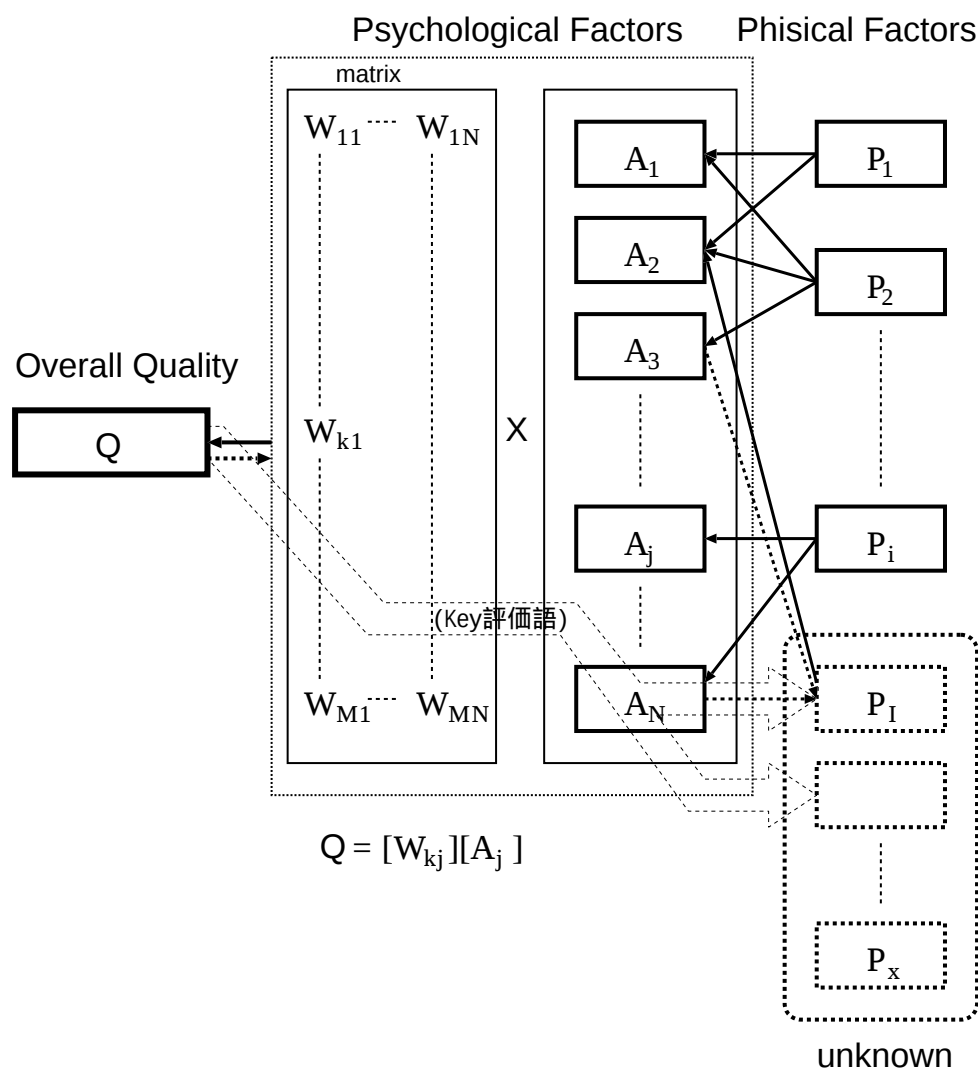


図 3.1: 高度感性情報に重点を置く高品位画像システムに重要な物理要因発見の探索 [2]

3.3 キー評価語：“奥行き感”

本手法では，高度感性情報の再現性に注目し，もしその再現性に差が存在した場合，そこには何かしらの物理要因が関連していると考え，その原因となる物理要因・特性を調査

していくというものである．その際には，高度感性情報の再現度を評価し，物理要因発見の手助けとなるキー評価語が必要となる．

画像を観察した際に，人間が脳中枢で感じたものは，言葉：形容詞で表される．そこで総合画質に関連する形容詞を全て拾いだし，各々の形容詞と総合評価（高度感性情報）の関係を求め，高度感性情報を代表する形容詞を捜し出す．そして，それら形容詞から物理要因を探る．本研究においてこのような物理要因発見のための手助けとなる形容詞をキー評価語と呼んでいる [25]．キー評価語の理論的導出は検討中である [18][25]．現在の所，キー評価語として，経験的に得られた“奥行き感”を用いている．

3.3.1 “奥行き感”と高度感性情報

現在，キー評価語として“奥行き感”という評価語に注目しているが，それは“奥行き感”は，他の高度感性情報を表す評価語（例えば，実在感，品位のようなもの）と比べ，(1) 奥行きという準定量的評価ができ，評価が容易である，(2) 物理要因と近く，そのため新たな物理要因の発見が容易であると考えられること，の利点があり，且つ“奥行き感”に注目して得られる物理要因・特性は単に奥行き感に関連が深いだけでなく，高度感性情報の再現にも重要な物理要因・特性と考えられるからである．例として，奥行き感の再現を目指すと，画像を尖鋭に過ぎたり彩やかに過強調することを抑えられて，高度感性情報再現のための系の忠実度を高める事が期待される．“奥行き感”は実験的・経験的に導入したものであるが，実際，発見した物理要因の改善によって幾つかの高度感性情報（品位，実在感）などが改善されたという結果も出てきているの [23] で，上記の事実は実験的に確認されつつある．

“奥行き感”では発見されない物理要因・特性をどうやって発見するかおよび“奥行き感”と高度感性情報の関係については，本論文末に検討を加えた．

3.3.2 2次元画像からの奥行き知覚

2次元画像から奥行きを得る手がかり（絵画の手がかり）としては次のものが報告されている [10]．

1. きめの勾配 (texture gradient)

きめの密度が一定の方向に沿って序々に変化したとき，その面にはきめの勾配が与えられているといい，傾斜面，すなわち奥行き感のある面として知覚される．線遠近法もこれに入る．

2. 相対的大きさ (relative size)

大きさの異なる二つの類似体像が提示されたとき相対的に小さい対象の方が遠くに見える．

3. 相対的明るさ

同一の色相・大きさをもつが明るさの異なる 2 対象が提示されたとき対象間の見えの奥行きが生じる．

4. 陰影 (light and shade)

対象に付随する陰影は対象に立体感を与える．陰影は奥行きの手がかりというよりは対象物体の三次元的な厚みの知覚に対して情報を与える．

5. 大気遠近法 (areal perspective)

対象の観察距離が増大するのにしたがって大気中に含まれるちりや水蒸気の影響によって，(1) 対象の明るさは徐々に暗くなり，(2) 対象の色相は青みがかった色へと変化し，(3) 色の現れ方は表面色から開口色へと変わり，(4) 対象の輪郭は不鮮明になってくる．これは，奥行きの重要な情報を与える．

6. 色相

色相の異なる 2 対象を提示しそれを両目で観察すると奥行き感が得られる．たとえば，赤色系統の色は進出色，青色系統の色は後退色とよばれ，赤色が最も近く，青色のものが最も遠く知覚される．

その他に，後方の物体が前方の物体に隠れる”重なり”などもある．

3.3.3 “奥行き感”再現のために必要なこと [20]

実際の画像と“奥行き感”の関係について考察する．高精細画像を観察した際には，画像中の遠近に応じた眼球の生理的反応が生じる．また，遠近感のある絵画を観察すると，明瞭なピント調節応答を示すことが報告されている [19]．つまり，画像中の遠い風景が描かれた部位を注目した場合には，実際に遠距離を見た場合と同じ眼球の生理的反応が観察されている．この遠近感，つまり“奥行き感”に大きな影響を与えると考えられるものは，“奥行き感”が出るように描かれた絵画や写真の前面に位置する物体，後ろに位置する物

体の描かれ方等の，像の微妙な変化である．“奥行き感”を正しく再現するためにはこの微妙な変化を忠実に再現する必要がある．この微妙な変化の忠実な再現は「階調・色」と「輪郭」であると考えられる．その理由を以下に述べる．

“奥行き感”は，幾何学的な画像の構図でその骨格が定まるであろう．これに，画像内の色や，コントラスト，輪郭のぼかし具合等が加わって，全体の“奥行き感”が構成されることが考えられる．例えば風景画でいえば，建物や木などの各々の object の構図で“奥行き感”の骨格が定まり，さらにこれらの色や，コントラスト，輪郭のぼかし具合等で画像全体の“奥行き感”が決まる！“奥行き感”が正しく再現される」とは，幾何学的な画像の構図で定まった“奥行き感”と，色や，コントラスト，輪郭のぼかし具合等で定まった“奥行き感”が整合し，over all で自然な“奥行き感”が得られたときと考えられる．即ち，もし色画像伝達システムに伝達歪みがあった場合について考察すると，構図まで狂う事はまずないが，各 object を表す色が“淡い”に変わってしまったりして，画像内の object 相互の構図で決まる“奥行き感”と，それらの object の階調・色によって決まる“奥行き感”が一致しないと，“奥行き感”が正しく再現されないと考えられる．

以上より，この“奥行き感”の再現に重要な要因として「色・階調」と「輪郭」の再現が重要である．

3.4 先行研究により見いだされた物理要因と要求特性

“奥行き感”や高度感性情報の再現に注目した結果，これまでに以下の5つの物理要因が宮原らによって見いだされた．[16]

3.4.1 step response , slew rate

CRT ディスプレイにおいて，一般に，ビデオアンプは大振幅信号に比べ，小振幅信号時のほうが周波数帯域が高い領域まで伸びており，ステップレスポンス大振幅時に最適（オーバーシュート，立ち上がり不足なし）に調整すると，小振幅時のステップ信号においてリングング（輪郭強調）が大きくなる．このような暗い部位における輪郭強調は，“奥行き感”を大きく失わせる．この問題を防ぐためには，スルーレート充分をとり，ステップレスポンスにおいて H/Δ （ Δ は立ち上がり距離， H は立ち上がり振幅）を大きくとる必要がある [4]．このひずみは，信号の 1LSB に対応する変動量より小さくする必要がある．

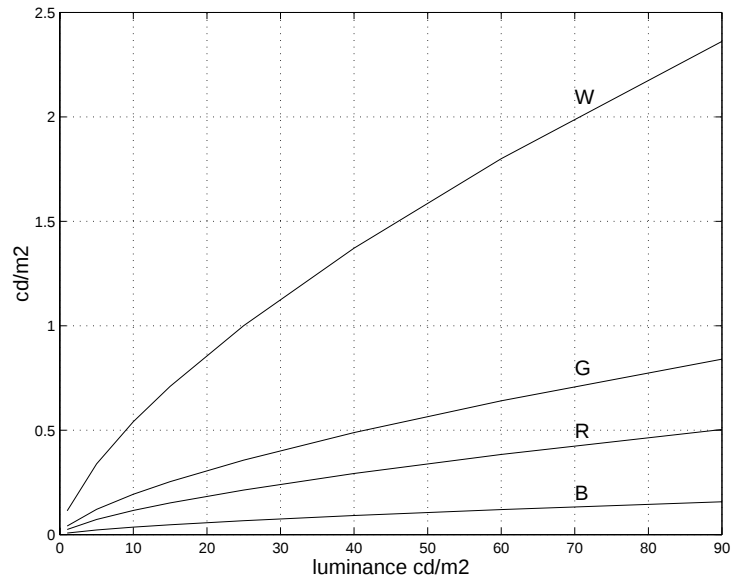


図 3.2: 色差 1 以内を保証するのに許される相互変調特性 [20]

3.4.2 Cross Modulation 特性

R, G, B 色の独立性が保たれず，色の加法混色が成立しないひずみで，色の再現に影響を与える．この特性は主に電源のレギュレーションに依存する．Cross Modulation ひずみ量は式 (3.1) の $\Delta L(s)$ で定義された．

$$L_R(S) + L_G(S) + L_B(S) - L_W(S) = \Delta L(S) \quad (3.1)$$

ここで， $L_W(S), L_R(S), L_G(S), L_B(S)$ は，それぞれ W(白), R, G, B の信号を入力した場合の輝度であり， S は入力レベルである．本来， $\Delta L(S)$ は任意の“白”の入力レベルに対して 0 でなくてはならない．0 でない場合には“Cross Modulation”が発生している．

主観評価により， $\Delta L(s)$ と“奥行き感”の間に相関があることを示したが，この特性が“奥行き感”に与える影響は非常に画像内容依存性が強く，複雑であるため，再現側誤差を色差 ≤ 1 (2.1.2 参照) に抑えるという充分特性を規定した．CIELAB 空間における再現誤差が色差 1 を確保するための条件を計算した結果を図 3.1 に示す．実線 W は $R = G = B$ の条件下で許される Cross Modulation 値，実線 R, G, B はそれぞれ R, G, B のみ変動した場合に許される Cross Modulation 値である．実際この特性を満足するディスプレイを安定化電源の強化により改善し，“奥行き感”の再現が向上したことを確認した [20]．

3.4.3 γ 特性の非直線性

ディスプレイシステムの γ (2.1.1 参照)を撮像時の γ 補正の逆特性に合わせて正確に補正して、システムの総合 γ を正確に1にする必要があるのは良く知られた事実である。従来のテレビでも、再現側 CRT の $\gamma = 2.2$ として撮像側で γ 補正($\gamma = 0.45$)をしている。しかしながら、実際再現側 CRT の γ は全信号範囲にわたって等しくなく信号に依存して変わるため、それらをルックアップテーブルを用いて正確に補正する必要がある。

また、本研究では画像の取り込みの際の γ 補正は、人間の視知覚を考慮し、再現時の量子化誤差の心理的な見えが全信号範囲でより等しくなるようなカーブを選んで行なっている(Weber-Fechner の法則、均等色空間 CIELAB における L^* [13][21])。これはほぼ $\gamma = 1/3$ を近似するので、再現側の γ が全信号範囲で $\gamma = 3.0$ となるように補正する。 $\gamma = 3.0$ 一定に補正を行なった画像は、”奥行き感”、”品位”、”実在感”などが向上した。[22] [23]

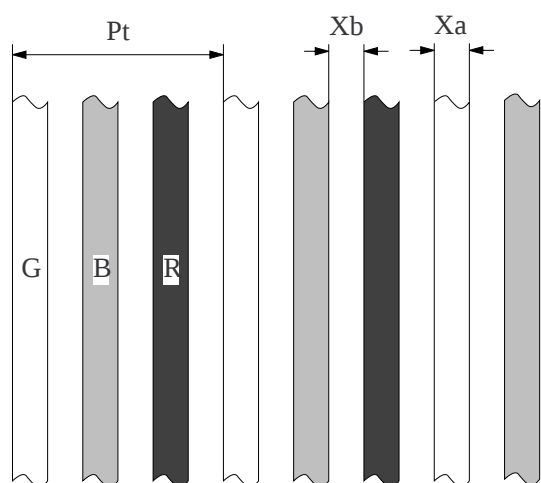


図 3.3: アパチャグリル型の蛍光体構造 [24]

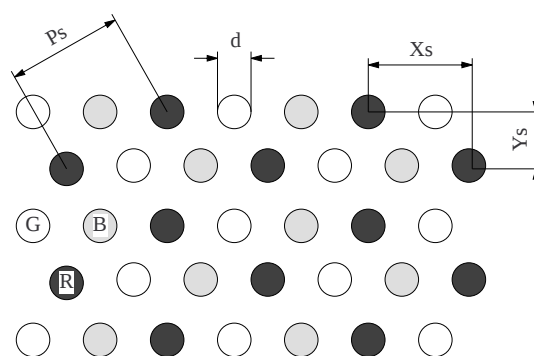


図 3.4: シャドウマスク (dot trio) 型の蛍光体構造 [24]

3.4.4 Aliasing

輪郭の再現に影響を与える物理要因・特性の1つにディスプレイの管面上の発光体構造による輪郭のひずみ(ギザ状)がある。これは、CRT ディスプレイ画面内で本来1点にある pixel の色が空間的に異なる位置に配置された発光体によって表示されているという事実、さらにはその発光体構造の違い(シャドウマスク(図 3.4), アパチャグリル(図 3.3))

など)に起因すると考えられる。このギザ状ひずみは、副尺視力 [10] が関係するので通常の 1 桁上のひずみ量でも大きな妨害になってしまうと考えられる。副尺視力とは、2 本の直線のずれを見分けさせたときに、見分けることのできる最小のずれによって示される視力のことで、最小分離閾よりかなり小さい。先に行なわれたプリンタ (Fuji PictoroGraphy 3000) 出力画像によるシミュレーション実験では、大気遠近法を用いた風景画において、アパーチャグリルでは縦方向の輪郭が強調され、奥行きが失われているという結果がでた。[24] 詳しくは今後検討する予定である。

3.4.5 コモンモード ノイズ

コモンモード ノイズ(アースをめぐる電流)をノイズカットフィルタ、ノイズカットトランスの利用、アースを慎重にとるなどして極力低減することで、画像の黒が浮くことが抑えられ、画質が向上する。

第 4 章

新たな物理要因-パネル部での光学的散乱-

4.1 観察と発見

未知の物理要因の発見は具体的には次のようになされる．まずは，現在得られる最高性能（今は高度感性情報を代表すると考えている”奥行き感”再現の 1 番良い）ディスプレイをアンカー*として設定する．このアンカーの設定は本研究において重要である．繰り返しとなるが，我々は高度感性情報と従来から知られる物理要因の関係を求めることが主目的ではなく，あくまでディスプレイシステムの高品位化のために重要な，いままで見落とされてきた物理要因を発見し，その物理要因を考慮・改善することで一歩でも究極のディスプレイシステムに近付きたいと考えているからである．現在はアンカーとして，NANA O model 88F CRT ディスプレイが使われている [20]．このアンカー用 CRT ディスプレイは，これまでに発見された物理要因はすべて考慮されている．

このアンカーディスプレイと他のディスプレイシステムの画質を，高度感性情報を代表すると考えている“奥行き感”で評価し．その評価に差があった場合にその原因となる物理要因を探求してゆく．その際，画質の差が未知の物理要因によってのみ引き起こされるように，各スペック，種々の物理要因は目的の評価を得られる精度で等しく調整されていることが望ましい．

上記アンカーディスプレイ NANA O model 88F とその新モデルである NANA O model 78F 上で画像を観察していたところ次のように観察された．

*ITU 評価のアンカーと少し意味が異なる．ITU 評価のアンカーは，評価の信頼度を上げるための評価基準として使われる．

- 78F 上の画像は，全体に白っぽくもんやりと浮いた印象になり，輝きや”しまり”がなくなり，奥行き感，立体感の再現が悪い

この理由を検討した．まず MODEL 88F と MODEL 78F の基本スペックを表 4.1 に示す．

表 4.1: MODEL 88F と 78F の基本スペック

	model 88F	model 78F
CRT	同タイプ	
マスクタイプ	シャドウマスク	
サイズ	21 インチ	
ドットピッチ	0.25mm	
解像度	1600 × 1200	

表の通り，一般にカタログに載るスペックについては，全く同じであり，また，本研究において過去に発見された物理要因についても以下のようにして極力等しく改善されている．

・ステップレスポンス

市販されるディスプレイにおいては，周波数特性の中域を若干もちあげ，高域部分の特性を落しているが，本調整においては，広域まで特性をきちんと伸ばしステップの立ち上がりを速くした．回路において等しく調整後，ディスプレイ上に白（信号レベル 255(8bit)）の矩形を表示し，そのエッジ部の波形がオーバーシュート，アンダーシュートを起こさないように等しく調整した．その際，暗部（信号レベル 35(8bit)）において輪郭が強調されないことを確認した．

・Cross Modulation 特性

安定化電源の強化により，共に，充分特性として規定した (3.4.2)，全信号範囲で再現誤差が色差 1 以内に収まるように改善した．

・ γ 補正

信号レベル 35 において， 0.21cd/m^2 ，255 レベルにおいて 81.0cd/m^2 に調整し (4.9.2 参照)，その間の γ が，全信号範囲にわたり， $\gamma = 3.0$ となるようにルックアップテーブルを用いて補正した (3.4.3)．

- Aliasing

共に、シャドウマスクタイプ (3.4.4) を使用。ドットピッチ (図 3.4 における P_s) (0.25mm) も等しく同特性。

- Commom mode noise

Extra High Quality Imaging System のパイロットモデルを利用。これは、二台のディスプレイを 1 つのフレームバッファに接続することができる。電源も共通。

もちろん 2 台のディスプレイを用いるので、上記の物理要因が完全に等しくなることはないという事実は、常に頭に置いて常に観察する必要がある。

さらに調査を進め、2 台のディスプレイの違いについて調べた所、以下のようなこと明らかになった。

1. パネル表面のコーティング

model 88F と model 78F で使用されているパネルの透過度は共に 51%(誤差 1%) であるが、パネル表面に施されているコーティングが異なる。即ち、model 88F のほうは、13 層の AR[Anti-Reflection] コーティング、model 78F のほうは、4 層 AR + ノングレアコーティングを施してある (コーティングについての説明は 4.3)。

2. 蛍光体の色度座標

RGB の矩形を表示し、その (x,y) 色度座標を測定したところ、表 4.1 の通りであった。これはある一回の測定時の値である (使用輝度計 PHOTO RESEARCH PR-705)。

表 4.2: model 88F と model 78F の RGB の色度座標 (x,y)

	model 88F	model 78F
R	(0.6369, 0.3396)	(0.6200, 0.3400)
G	(0.2881, 0.6065)	(0.2887, 0.6013)
B	(0.1490, 0.0652)	(0.1512, 0.0636)

特に R(赤) の x 座標の値が、model 88F の方が 0.15 程大きい。これは、若干の印象の違い (温度感) を与えるが、“全体に白っぽくもんやりと浮いた印象になり、輝きやしまりがなくなり、奥行き感、立体感の再現が悪い” という現象は、この特性の差はあまり関係ないと考えられる。

4.2 原因の追求

“全体に白っぽくもんやりと浮いた印象になり，輝きやしまりがなくなり，奥行き感，立体感の再現が悪い” という現象には，多くの未知の物理要因が関わっていると考えられる．しかし，これまでの調査結果から，この現象には，コーティングの違いが大きく関連すると思った．さらには，コーティングの違いによるパネル部での光学的散乱の差が問題の現象を引き起こしているのではないかと考えた．そこでこれ以後は，コーティングの違いによって起こるパネル部の光学的散乱を，奥行き感を損なう物理要因の1つと仮定し，詳しく検討することにする (図 4.1) ．

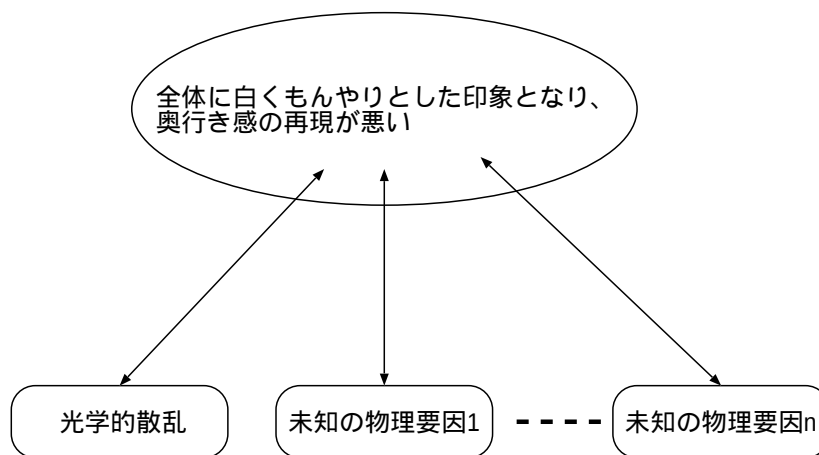


図 4.1: 光学的散乱と奥行き感の劣化の関係

4.3 コーティングについて

ここで，コーティングについて簡単に説明する．

CRT ディスプレイは，内部が真空であり，大気圧による力を受ける．そのため強度の面からパネルは画像表示部とともに，真空容器も兼ねており，ガラスが使われている．このガラスが鏡面の役割を果たし，照明光や窓ガラスを通じての外光を反射して表示を見にくくしてしまう．そこで，コーティングが施される [8] ．AR(Anti-Reflection) コーティングは純粋に外光の反射をなくし，写り込みをなくそうとして使われている．しかし，多層の AR コーティングは工程が面倒で高価であり，又完全に AR を行なうことはできず，室内の照明などがパネルに写り込み視認性を悪くする．そこで，最近はこの望まれざる写

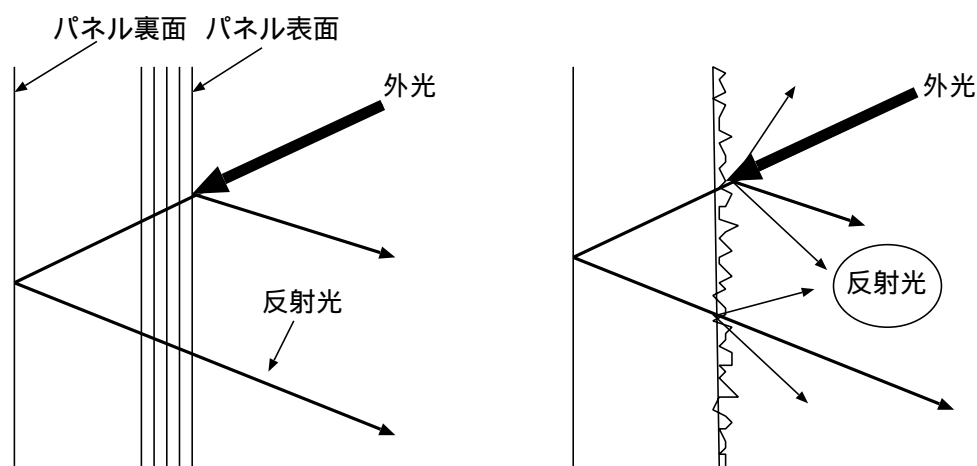


図 4.2: 多層 AR (左) とノングレアコーティング (右)

り込みを減らすためにノングレアコーティングが広く使われている。ノングレアコーティングはパネル表面に、粒子(シリカ)を散布して粗面化し、外光を散乱させるものである(図 4.2)。

本研究では、画像の評価は暗室にて行なわれる。その際には、照明光などの写り込みのみを考慮したノングレアコーティングはあまり意味を持たないであろう。逆に CRT から出るビームに対して何らかの悪さをするとも考えられる。

そこで、光学的散乱とその”奥行き感”の再現への影響をを検討するディスプレイとして、13 層 AR を施した NANA O model 88F、4 層 AR にノングレアコーティングを施した NANA O model 78F、さらには、コーティングなしの実験モデル(ベースは model 78F)の 3 台を用意した。

4.4 光学的散乱の測定

表 4.3: 測定条件

輝度計	PHOTO RESERCH 社製 PR-705
測定口径	約 2mm(2°, 距離=50mm)
輝度計最低感度	0.003cd/m ²
設定黒レベル	約 0.01cd/m ²

4.4.1 階調再現に及ぼす影響の測定 1

まずは、ディスプレイ中央に白の矩形を表示(周囲は黒)し、エッジ部分の輝度変化を測定した(図 4.3)。矩形の大きさは、 100×100 , 200×200 , 400×400 dot の 3 種類で行なった。

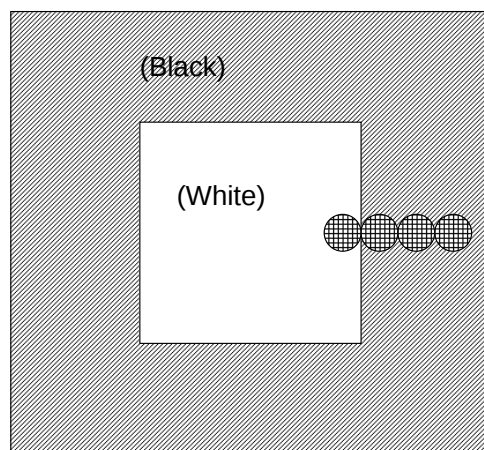


図 4.3: 測定 1

結果を図 4.4 ~ 4.7 に示す。横軸はエッジからの距離(dot)，縦軸は測定輝度値をエッジ部を 100 として正規化した値である。

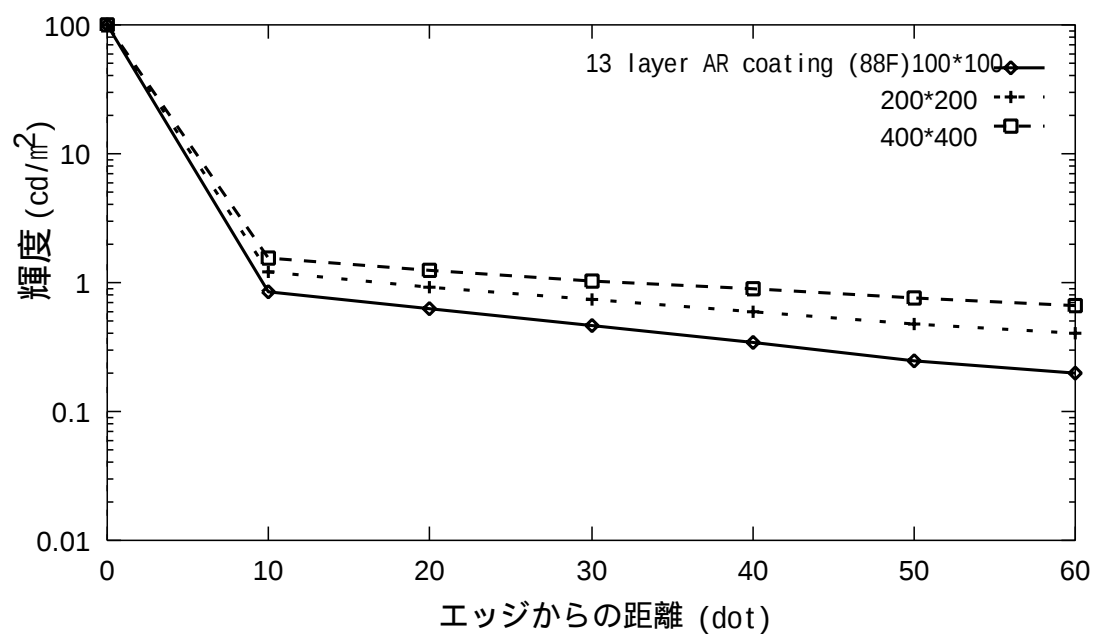


図 4.4: 88F の測定結果

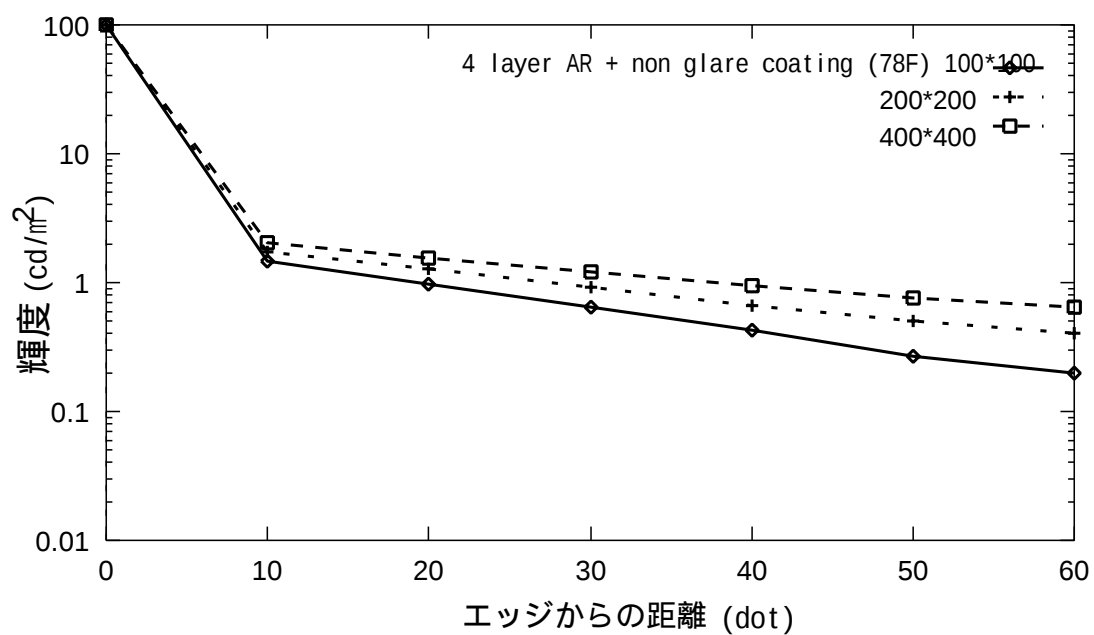


図 4.5: 78F (コーティングあり) の測定結果

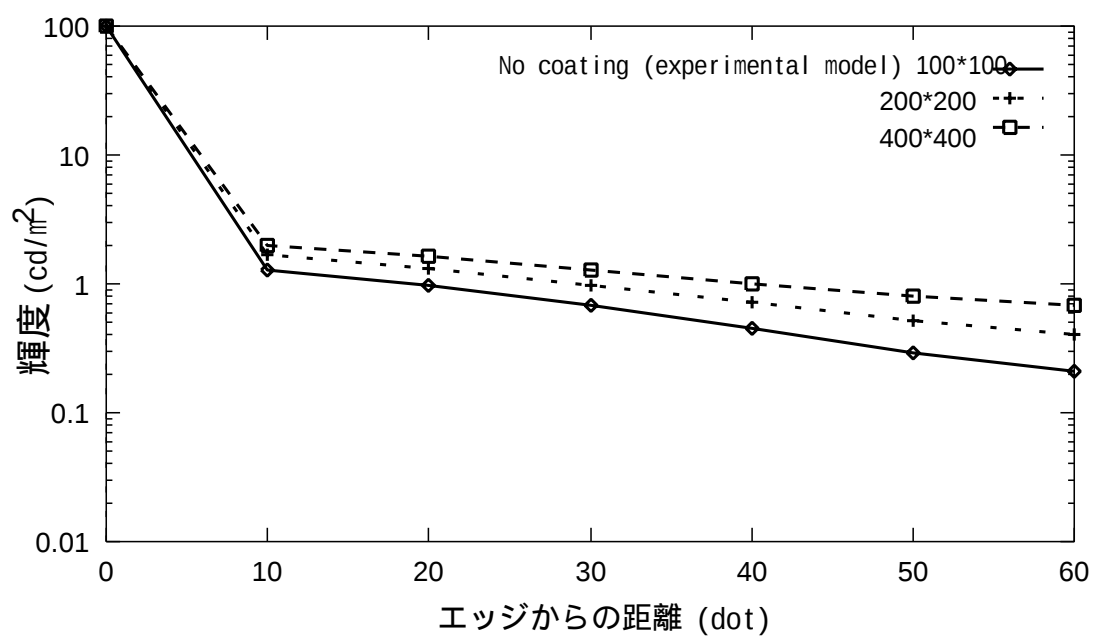


図 4.6: 78F (コーティングなし) の測定結果

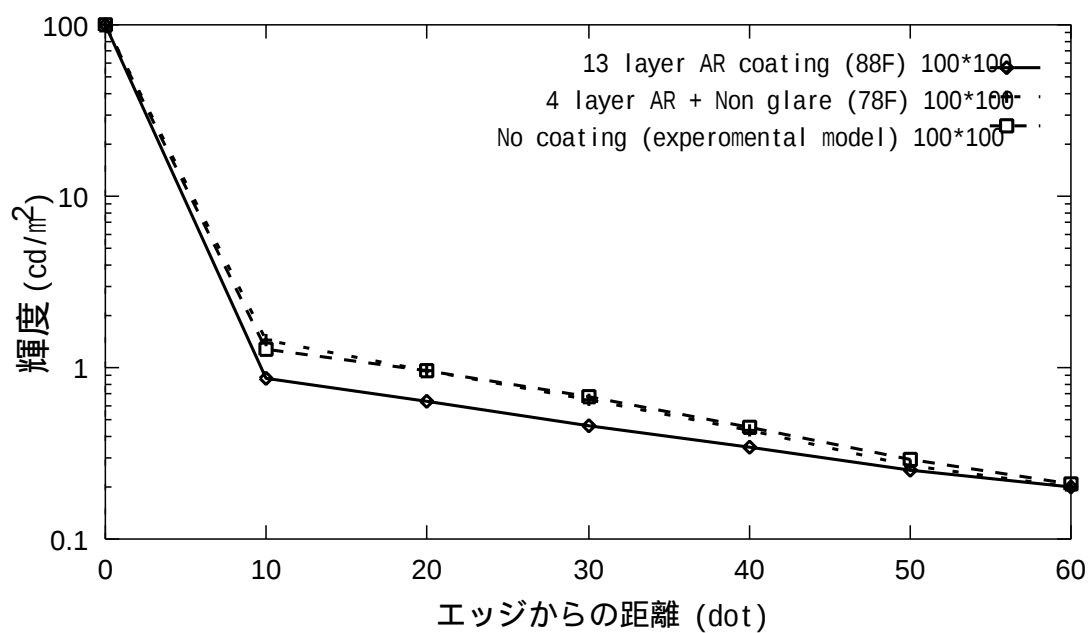


図 4.7: 88F,78F (2 種) 比較データ (window 100×100)

4.4.2 階調再現に及ぼす影響の測定 2

背景を白く光らせた中央に黒の矩形を表示し，その中心部の輝度を測定した．この時，黒の矩形の大きさを 25dot から 400dot まで変化させ，その時の輝度変化の様子を見た (図 4.8) ．

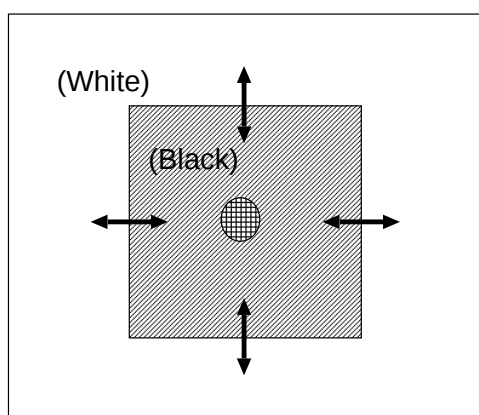


図 4.8: 測定 2

結果を図 4.9 に示す ．

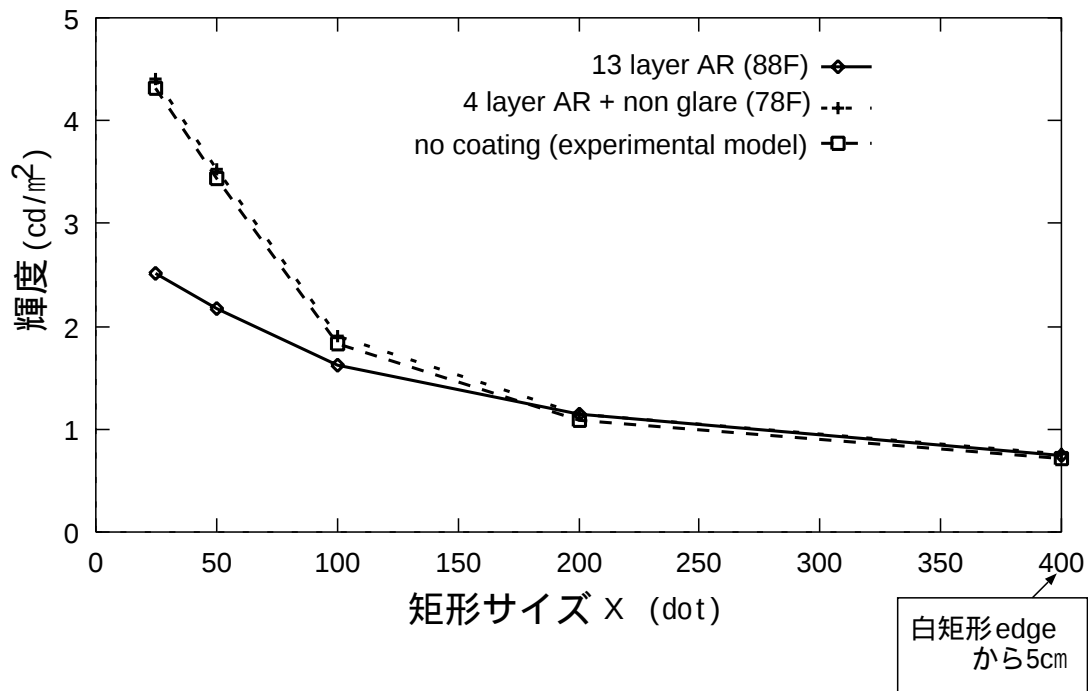


図 4.9: 88F,78F(2 種) 比較データ 2

4.4.3 色再現に及ぼす影響の測定

次にパネル部での光学的散乱が色再現にも影響を与えるのではないかと、つまり散乱光がお互い干渉、混色され色が変化してしまうのではないかと考え、次の測定を試みた。

背景を赤く光らせた中央にシアン(青+緑)の矩形を表示し、その中心部の色度座標を測定した。この時、シアンの矩形の大きさを 25dot から 400dot まで変化させ、その時の色度座標の変化の様子を見た。

結果を示す(図 4.10)。当初の予想としては、矩形が小さくなるに従い、色が混ざり白の方向へ動くと考えたが、そのような結果は得られなかった。より詳しい検討は別途必要であるが、輝度(明度)方向以外の色再現に対しての影響はほぼ無視できるのではないかとと思われる。

4.4.4 測定結果の考察

測定結果からまず分かることは、どのコーティングの場合でも散乱光が黒を明るく照らしてしまっているという事である。即ち、エッジ近傍部では本来の黒(約 0.01cd/m²)と比

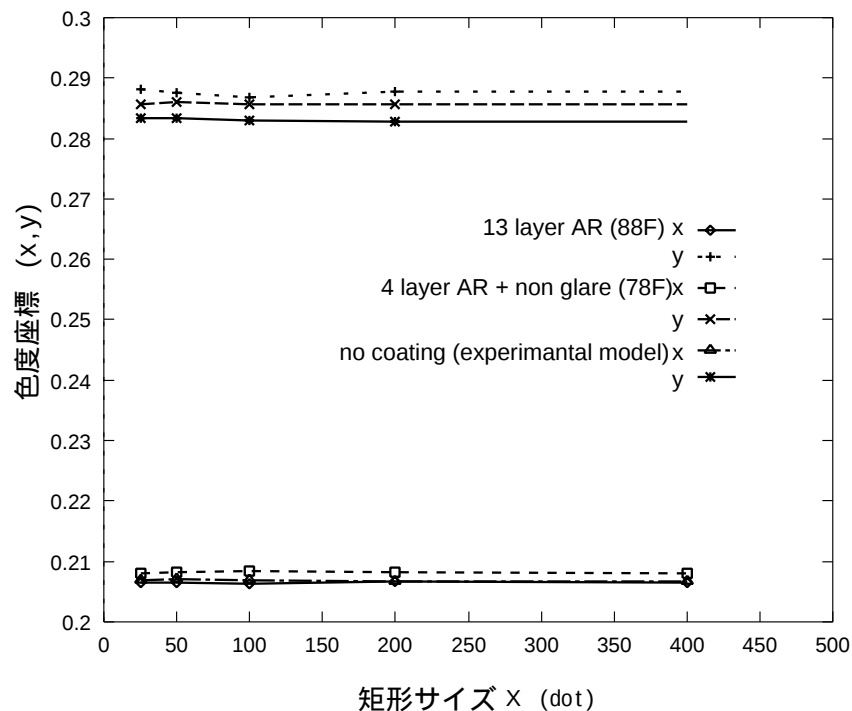


図 4.10: 88F,78F(2 種) 比較データ 3

べ 100 倍ほど光っている．またエッジ部から大きく離れた場合でも，輝度はあまり落ちずに黒を浮かせてしまっていることが分かる．図 4.9 を見ると，矩形サイズが 200 を越えてからほとんど輝度が落ちていない．この図中の矩形サイズ 400 は，エッジ部から約 5 cm 離れた状態である．コーティングの種類による差をみると，エッジ近傍で AR コーティングの方が，他の 2 種類（ノングレア，コーティングなし）と比べ 2 倍弱暗い．これは最初の観察時の印象と一致する．エッジから離れるに従い，どのディスプレイも同じような傾向になる．

この結果から，AR コーティングは外部からの光（環境光）に対してのみでなく，CRT からでる光のパネル部での散乱を減らす非常に有効な要因であることが分かる．コーティングと光の散乱量の関係については 4.8 で詳しく検討する．

一言加えておくが，上記の測定値は，同一機種の中ではほとんどばらつきはない．

4.5 光学的散乱特性のモデル化

光学的散乱特性のモデル化を行なう前に、パネル部での光学的散乱の特徴をより詳しく捉えるために、より空間分解能を上げての測定を試みたが、次の理由によりあきらめた。

1) スポット輝度計 (PR-705, BM-7) において、使用できるアパーチャ (見込み角) と測定精度の間には反比例の関係があり、空間的に細かく測ろうとすると、測定値の分解能が荒くなり、データとして使えない。

2) CRT ピクチャモニタは、RGB の蛍光体を空間的に異なる位置に配置し、その発光の加法色混によって全ての色を表現している。そのため、1 ドット、またはそれ以下の細かさではかると、スポットがどの蛍光体にかかるかによって測定値がおおきくばらついてしまう。

そこで、現在得られているデータを基に、パネル部で生じる光学的散乱の特性のモデル化を試みる。

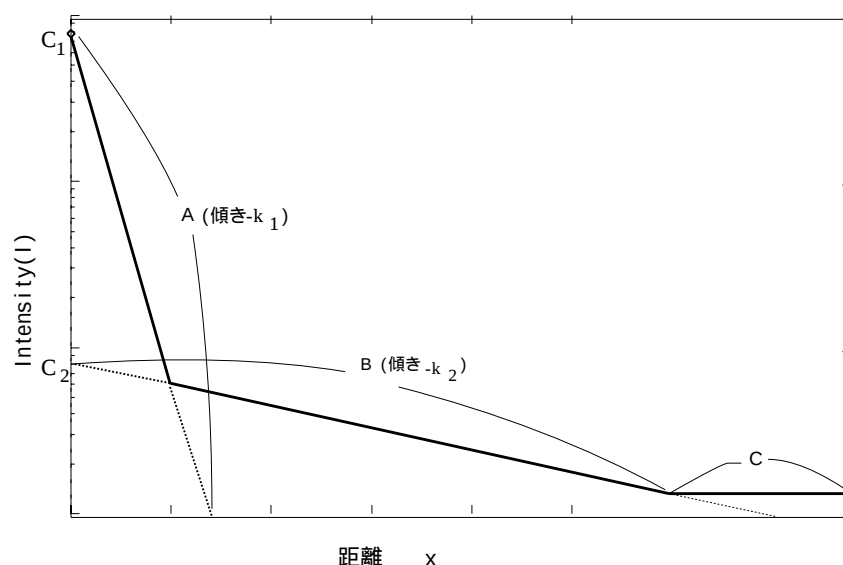


図 4.11: 光学的散乱モデル

これまでの実験・考察より得られた輝度値の変化の特性は次の 2 つの特性の和としてモデル化する事ができるのではないかと考察した (図 4.11)。

特性 A (エッジ付近輝度変化・ビームのぼけ)

特性 B (広範囲に及ぶ光の散乱)

これらは得られている実験結果から片対数軸グラフ内で直線近似できると仮定すると，

$$\text{特性 A : } I = e^{c_1 - k_1 x}$$

$$\text{特性 B : } I = e^{c_2 - k_2 x}$$

と書ける．ただし， $k_2 \ll k_1$ ．

また，上記特性以外に，明るいスポットからの距離に関係なく，画面全体にわたって平均的にふりそそぐ光の存在がみられた（特性 C）．これも光の反射で起こっていると考えられるが，特に明るいスポットの周りで起こる現象ではない．

4.6 ハレーションの定義

これまでは，パネル部の光学的散乱という言い方をしてきたが，この現象に対して“ハレーション (Halation)” という呼び方を与えることにする．

“ハレーション” とは光の反射や散乱が原因で，明るいスポットの周りがぼんやりと光る現象を指す（図 4.12）．測定では，明るいスポットのエッジ近傍の輝度変化の他に，距離に関係なく広がる光も観測された．これは一般にフレアと呼ぶ現象である．フレアとは別に，本論文ではパネル部で起こる光学的散乱を“ハレーション”と呼ぶことにする．ハレーションは画像内容依存性である．

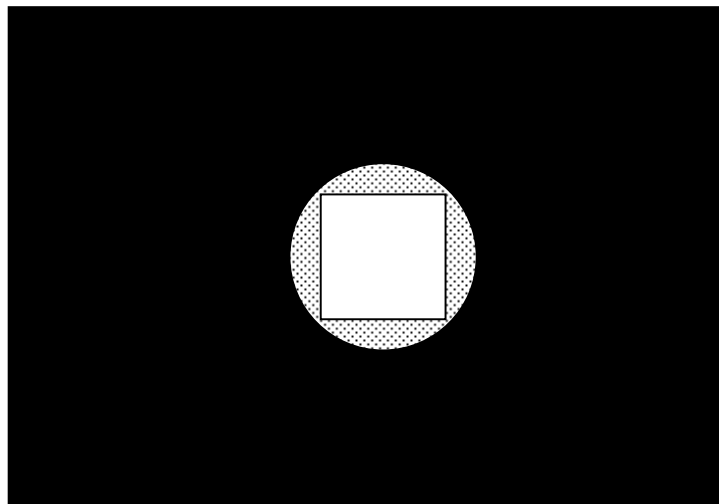


図 4.12: ハレーション

4.7 ハレーション要因の検討

電子銃から電子が発せられ、光が人間の目に届くまでの過程で、光が散乱する可能性のある箇所としては、(1) 電子銃から蛍光体に届くまで、(2) 蛍光体で発光してガラスにはいる時、(3) ガラス内部、(4) ガラスから空気中にでる時、(5) 空気中、の5つが考えられる(図 4.13)。(1) については真空中のため散乱はないと思われる。(2) については、まず蛍光体に入射してくるビームは、直前のシャドウマスクによりビームの裾が切り取られ、ビームがガウス状に分布する影響はなくなる。蛍光体で発光した光は、当然多方向に散乱してガラスに入る。(3) については、ガラス表裏での多重反射による散乱が考えられる。(4) はコーティング他の影響もあり光は散乱する可能性はある。(5) は空気中のほこりなどにより反射・散乱する。

このように見ていくと、光の散乱要因を絞ることは難しい。しかし、測定データで得られたような、ある程度広い範囲にわたるハレーション(図 4.11 特性 B)、さらにはフレアは、主に上記(3) フェースマスク(ガラス)内部での多重反射によって生じると考えられる。

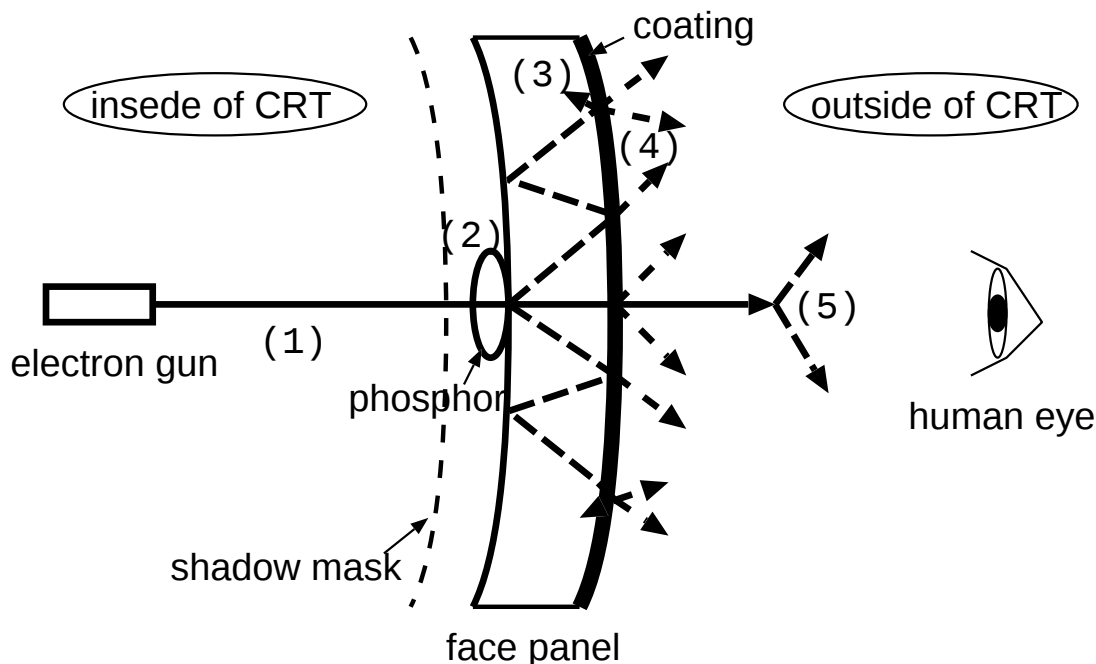


図 4.13: 光の散乱が起こりうる場所

4.8 モデルの検討

4.7 での検討に基づき，4.5 で考えたハレーションモデルの正当性を検証する．ここでは，パネル内部での多重反射 (図 4.13 の (3)) のみを考慮したモデルで行なう (図 4.14) . パネルの透過率を a (距離 b あたり)，パネルの厚さを b ，パネル表面における反射率 c とする．ここでは，点 O から出る，ある方向を持った一本の光 (強度 I) を考え，その光が最初に反射する中心 O' からの距離を d とする．フェース裏面における反射率は 100% とする．光の 2 次元的広がりは考えない．

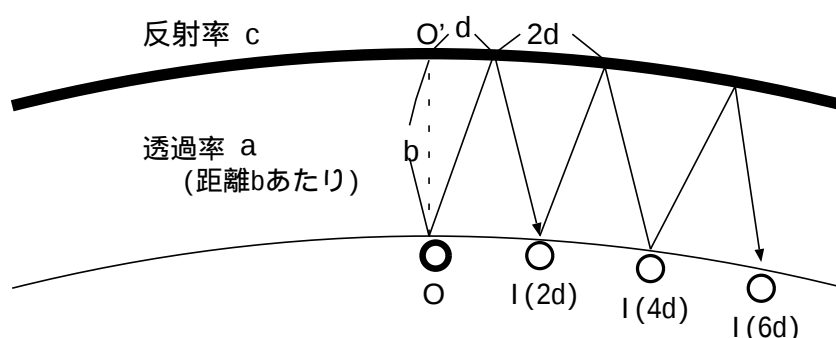


図 4.14: ハレーションモデルの検証に用いた多重反射モデル

このとき，光源から x 離れたところの強度 $I(x)$ は次の式で表されるとした．

$$I(x) = La^{\frac{\frac{x}{d}\sqrt{b^2+d^2}}{b}} c^{\frac{x}{2d}} \quad (4.1)$$

上式で， $I=400$ ， $a=0.5$ ， $b=10(\text{mm})$ ， $c=0.2, 0.1, 0.05$ ， $d=1$ を代入したものが図 4.15 である．これらの数値は実際のディスプレイの特性に近いものを選んだ (L, d は適当) ．

この結果を見ると，片対数グラフにおいて，ほぼ直線的に減少しており，ハレーションモデル (図 4.11) の特性 B の部分と似た特性をしている．より詳しい検証は必要ではあるが，ハレーションがパネル内部での多重反射によって起きているということは，ほぼ間違いないのではないかとと思われる．

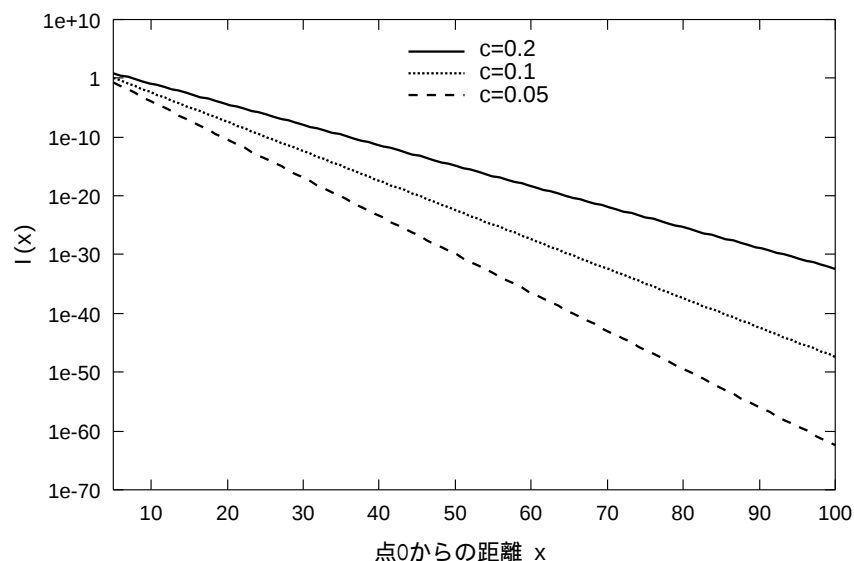


図 4.15: パネル内での多重反射による輝度の減衰

4.9 ハレーション対策の検討

実験・観察より得られた結果から，(CRT から出るビームに対しての)ハレーションを減じる方法について検討する．

4.9.1 コーティング

測定 4.4 で得られたように，AR コーティングは外部からの光に対してのみでなく，CRT 内部から出る光の散乱を抑えるのに非常に有効である．ハレーションはパネル内部での多重反射が大きく関連しているので，AR により毎回の反射光が減少し，ハレーションが減ると考えられる（図 4.16 中の 1 において）．

4.9.2 パネルの透過度

パネルの透過度 (transmittance) を低くすることで，反射光がパネル内部で減衰し，結果ハレーションが減ることを確認している（図 4.16 中の 2 において）．この手法は，一般にも外光の反射を減らし，コントラスト，解像度を向上させるために用いられているが，CRT 内部からの光の散乱に対しても有効である．ただし，透過度を低くし過ぎると，輝度が取れなくなり輝き感などの再現性が失われるので，慎重に選択する必要がある．一般

には、透過度 40% から 75% までが用いられ、白い紙の色 (Paper White) ができるように選ばれる。

またパネル裏面にも多重 AR コーティングを施し、図 4.16 中の 3 における反射を減らそうという提案もある [26]。

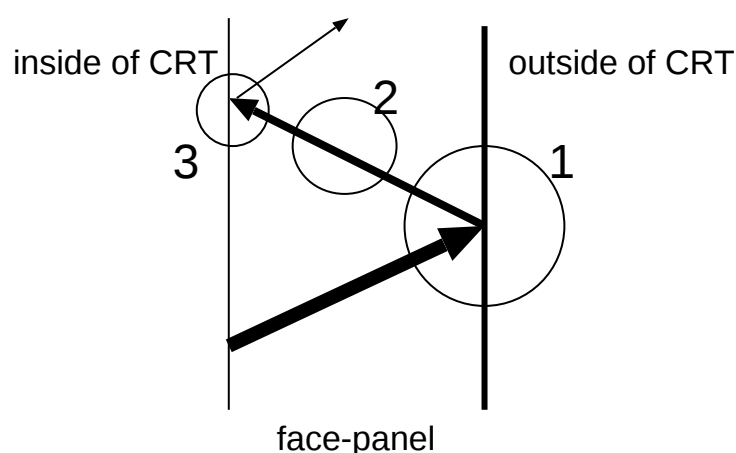


図 4.16: ハレーション対策

4.10 高度感性情報の主観評価実験

全節までは、3 台のディスプレイについてハレーション特性を測定してきた。そこでは最初の予想通り、歴然とした差が存在していた。最初観察からこのハレーション特性が発見されたのであるから、この特性が実際画質を劣化させることはある程度示されていることになると思うが、ここでより詳しくハレーション特性と画質（奥行き感など）との関係を出すために主観評価実験を行なう。

4.10.1 評価画像

評価画像には、絵画と写真の以下の計 11 枚を用いた。これは文献 [23] に用いたものに、新たに数枚を加えたものである。

- 1 “The Surprise”, Claude-Marie DUBUFE
- 2 “Still Life”, Attributed to David Davidsz. de HEEM
- 3 “EvaGonzalès”, Edouard MANET

- 4 “The Water-Lily Pond”, Claude-Oscar MONET
- 5 “View of Oudewater”, Willem KOEKKOEK
- 6 “the cathedrale of Sens seen from indoor”, Corot
- 7 トランペットや食器の写真
- 8 干物，海老などの写真女
- 9 女性の上半身の写真
- 10 テーブルの上におかれたワイングラスの写真
- 11 京都太秦寺・弥勒菩薩の写真

4.10.2 評価方法

暗室条件で、視距離は4 H (画面高の4倍)で行なった。白色としては、 xyY 表色系において、 x, y がそれぞれ 0.283, 0.298 (白色温度 9300K) を示すように調整した。評価画像は、読み込み時の色温度に合うように画像データを調整した。

black	0.0092 cd/m ² (8bit 信号の 16 レベル)(計算による)
(black)	0.21 cd/m ² (8bit 信号の 35 レベル)
white	81.0 cd/m ² (8bit 信号の 255 レベル)
white x	0.283
white y	0.298
視距離	4H(画面高の4倍)
輝度計	MINOLTA CA-100
評価者	成人男子5名

表 4.4: 評価条件

黒レベルおよび白は、 γ 補正の都合から上記の値に決定した [23]。黒レベルは、輝度計 (MINOLTA CA-100) での測定に精度を保証している 0.20 (cd/m²) 以上の入力レベルとして 35 レベルで 0.21 (cd/m²) になるように調整した。

画像はディスプレイの画面全体に表示した。画面全体より小さい画像については画面周囲の影響を除くためディスプレイの中心部に表示し、空白部分は黒とした。

4.10.3 奥行き感の主観評価実験

奥行き感に注目した7段階評価の結果を図4.17に示す。7段階評価は、非常に良い(+3)、良い(+2)、やや良い(+1)、同じ(0)、やや悪い(-1)、悪い(-2)、非常に悪い(-3)である。横軸は、4.9.2にしめす画像番号、縦軸は、model 88F(13層ARコーティング)を基準にした時の、model 78F(4層AR + ノングレア)の“奥行き感”の評価の平均値である。図中の縦の線分は標準偏差の大きさを示している。このように“奥行き感”の評価では、ノングレアコーティングのCRTの方が評価が低いという結果になった。

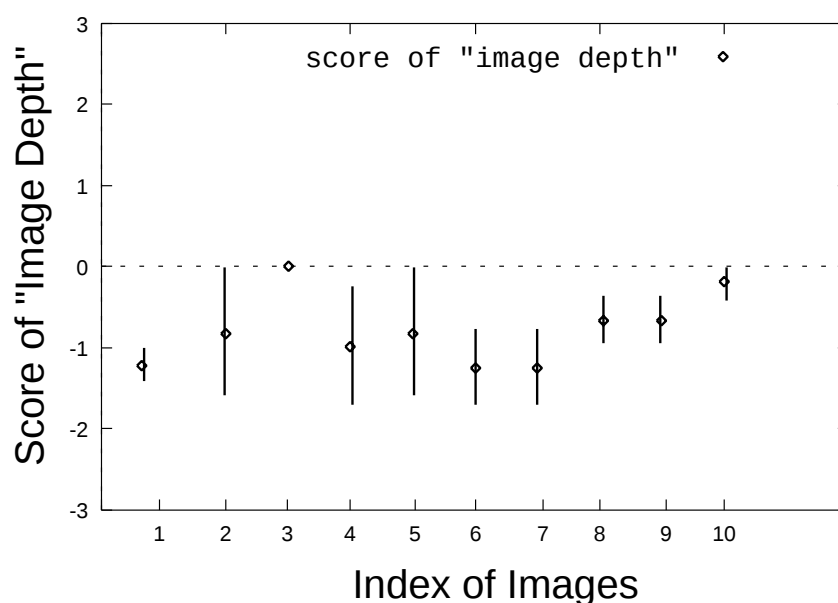


図 4.17: 78F の奥行き感の評価 (基準 88F).

4.10.4 “奥行き感”とハレーション特性の関係

まず、本評価実験における“奥行き感”再現の差が本当にハレーション特性の差によって生じたものが、という問題がある。しかし、ハレーション特性差は測定ごとのばらつきはなく安定して存在し、またハレーションの少ないCRTの方が常に“奥行き感”の評価が良いという事実から、ハレーションの発生量と評価値の間に強い相関が見い出せると考える。なんらかの未知の物理要因が関連しているとしても、今回はハレーション特性の差によってその影響はマスクされるくらい小さいものであると考えられる。

そこで、ハレーション特性と“奥行き感”再現の関係を検討する。図4.7、4.9を見ると、

model 88F (13 層 AR) と model 78F (4 層 AR + ノングレア) のハレーション特性は特にエッジ近傍で異なり , , それが階調の再現に影響を与え , また輪郭部の明瞭な再現を妨げ , “奥行き感” の劣化につながったと考えられる . ただ , ハレーション特性が “奥行き感” の再現に及ぼす劣化は , 間接的であると考えられる . それは , ハレーション特性によって , 色 , 階調 , 輪郭の微妙な再現がマスクされ (見えにくくなって) , 奥行き情報が失われてしまい , “奥行き感” が感じられなくなる , と考えられるからである . つまり , 他の物理要因 (Step response, Cross modulation 歪み , γ 特性 , Aliasing(3.4)) のように , “奥行き感” をひずませる劣化ではなく , ただ感じずらくさせる劣化と言えるだろう .

4.10.5 ハレーションと他の評価語との関係

ハレーションがより直接的に影響を与える評価語としては , どのようなものがあるか . 以下に記す , “奥行き感” の評価時にいただいたコメントから考察する .

画像番号 1: 78F (ノングレア) の方は , 肌の質感 , 立体感 , ノーブルさ , 品位が悪い。

画像番号 3: 78F (ノングレア) の方は , 服の質感 , 色のしまり , 表情 , 実感が悪い。

画像番号 5: 78F (ノングレア) の方は , 実感 , 絵のしまりが悪い。

画像番号 6: 78F (ノングレア) の方は , 絵のしまりが悪い。

画像番号 7: 78F (ノングレア) の方は , 絵のしまり , 輝き , が悪い。

画像番号 9: 78F (ノングレア) の方は , 髪をつや , 肌の質感が悪い。

上記の評価は , もちろん全てがハレーション特性の差によるものではないと思われる . しかし全体的に多かった , 絵のしまり , 質感表現が悪いという評価はハレーション特性による影響が大であろう . これは , 赤松ら [25] によって収集された画像評価語の中では , 鮮明さ , 柔らかさ , 綿密さに関連が深く , いずれも階層の低い評価語である . そして , これらの評価語が影響を受けた結果 , 画像によっては輝き , 品位 (この 2 つは赤松らの収集した評価語の中にはなく , 我々が経験的に得て , よく使用している評価語) , 実感らを劣化させているという構図が考えられる . この結果からも , ハレーションは “奥行き感” だけでなく , より上位の高度感性情報の再現にも影響をあたえてしまうことがわかる . また , 奥行き感の再現が高度感性情報の再現に深く関連があるということが , 実験的に得られた 1 例であると言える .

第 5 章

ハレーションの規定とまとめ

5.1 ハレーション特性に要求される充分特性

評価実験によってハレーション特性と”奥行き感”再現の間には強い相関が見い出せたが、ハレーションは明るいスポットの周りに影響を与えるもので画像依存性が高く、両者の関係をより詳しく定量的に検討を行なうことは難しい。

そこで、ハレーション特性が画質に影響を与えないための充分特性規定を試みる。本研究においては、再現側の色再現誤差が色差 1 以内に収まっていれば、その特性は画質に影響を及ぼすことはないと考え、“再現誤差が色差 1 以内であるための特性”をその特性の充分特性としている。今回は、色差の計算は CIELAB 空間にて行なう。より詳細な検討の際には、マンセル色空間との近似精度の高い空間を使う必要がある [11][12]。

ディスプレイの色温度は 9300K であるので、白の xyY 表色系における座標 (x_w, y_w) は $(0.283, 0.297)$ である。このディスプレイにおいて、白色の輝度が Y であるとき、XYZ 表色系での X, Z 値をそれぞれ $X_w(Y), Z_w(Y)$ とする。 xyY 表色系と XYZ 表色系との間には、

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5.1)$$

だから

$$x_w = \frac{X_w(Y)}{X_w(Y) + Y + Z_w(Y)}, \quad y = \frac{Y}{X_w(Y) + Y + Z_w(Y)} \quad (5.2)$$

よって

$$X_w(Y) = \frac{x_w}{y_w}Y, \quad Z_w(Y) = \frac{1 - x_w - y_w}{y_w}Y \quad (5.3)$$

となる。これらを CIELAB 空間へ変換し色差を定義する。 L^*, a^*, b^* 値は

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (5.4)$$

$$a^* = 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \quad (5.5)$$

$$b^* = 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) \quad (5.6)$$

である。ただし、

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}} & (x > 0.008856) \\ 7.787x + \frac{16}{116} & (x \leq 0.008856) \end{cases} \quad (5.7)$$

$$X_n = 100\frac{x_w}{y_w}, \quad Y_n = 100, \quad Z_n = 100\frac{1 - x_w - y_w}{y_w} \quad (5.8)$$

である。

白色輝度 Y のときに、再現誤差色差 1 以内を満足するために許される輝度変化 ΔY を求めるには、

$$\Delta E_w = \sqrt{\{L_w(Y + \Delta Y) - L_w(Y)\}^2} \leq 1 \quad (5.9)$$

を ΔY について解けば良い。

計算結果を図に示す。図中の実線が色差 1 以内の再現誤差のために許される輝度変化量である。暗い輝度の部分（交点 A より左部分、 $Y \leq 0.8856$ ）では L^* は線形であるので（式 5.7）、色差 1 以内の誤差時に許される輝度変化量は一定（約 0.11）で破線となる。

先に測定した model 88F, model 78F 2 台のハレーション特性とこのグラフを比べ検討する。表 5.1 は図 2.7 を数値で示したものである。

図 5.1 より、黒の再現誤差を色差 1 以内に収めるには、ハレーションによる輝度変化を破線（約 0.11）以下に抑えれば充分であることが分かる。一方、ハレーションの少なかった model 88F の方でも、エッジ近傍で輝度がその 8 倍ほど浮いている。78F はさらに 1.7 倍ほど浮いている。この測定結果は、白の矩形のエッジ部分という 1 番きつい条件のもと

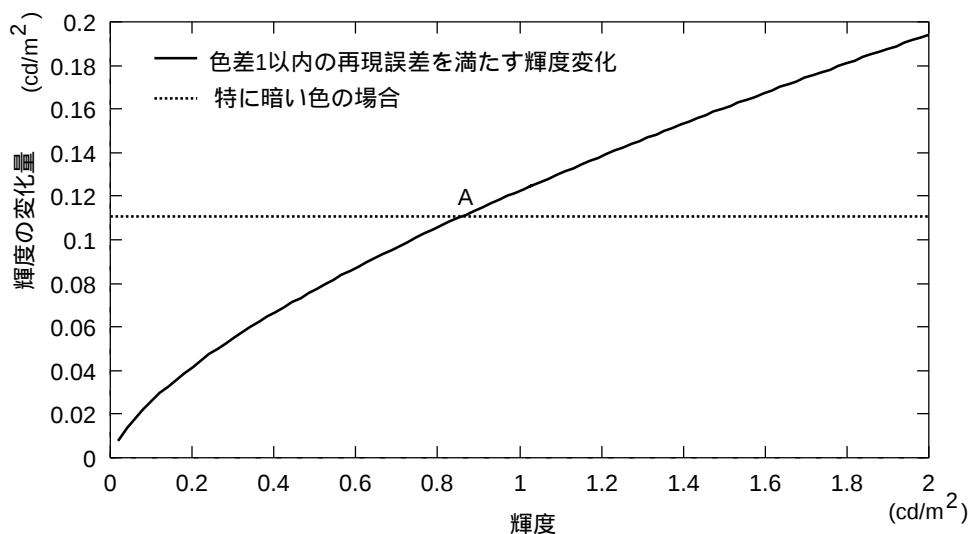


図 5.1: 色差 1 以内を補償するのに許される輝度変化

表 5.1: 88F と 78F のハレーション特性 (図 2.7 を数値化したもの)

距離	0	10	20	30	40	50	60
model 88F	100	0.86	0.63	0.46	0.34	0.25	0.20
model 78F	100	1.45	0.96	0.65	0.43	0.27	0.20

でのものである (充分条件) が、高品位画像システムを構築していく上で、ハレーション特性はもっと改善していく必要があると考える。

具体的にどのような方策をとれば良いかについては、4.9 で考察した通り、まず第 1 にコーティングによる AR 効果の重要性にもっと目を向け、反射率の低減を行なうことが考えられる。又、フェースパネルの透過率もあわせて考慮する必要がある。

しかし、上記の方法だけではとても充分条件を満たすような CRT ディスプレイを得ることは無理であろう。新たな方法として、フェースパネルの裏面にも多層 AR コーティングを施そうという提案もある [26]。

また、ハレーション特性の良いディスプレイシステムを得る、という点に絞れば、CRT よりも液晶やプラズマディスプレイを選択するという方法もある。CRT は、真空管容器であり、フェースパネルとしてガラスを使うことは避けられず、またサイズが大きくなるとパネル構造が複雑化したり、ガラスの厚みが増したりしてさらにハレーションが増大す

る．一方，液晶やプラズマディスプレイはそのような事はない．ただ，画質ではまだ CRT の方が先をいっており，どのデバイスを選択すればベストかは今後の展開したいと考える．

第 6 章

高度感性情報と奥行き感の関係

ここでは、高度感性情報と“奥行き感”の関係について検討し、さらにこの“奥行き感”再現に注目することでは発見できない要因について検討を加える。

6.1 高度感性情報と“奥行き感”の関係

図に、現在までに検討された、高度感性情報再現のモデル、およびに高度感性情報の総合評価と奥行き感の関係を示す [17] (図 6.1)。

“奥行き感”をキー評価語として用いている理由は、3.3.1 で簡潔に述べたが、本研究においてキー評価語と高度感性情報(総合評価)の関係は非常に重要である。なぜなら、本研究の主目的はあくまで、これまで見落とされてきた高品位画像(高度感性情報)再生に重要な物理要因の発見と、それを考慮した画像システムの開発であり、キー評価語はあくまでその手段だからである。つまりは、もし高度感性情報とキー評価語の相関がない場合には、単にキー評価語に重要な物理要因を探っていることになってしまう。

“奥行き感”が高度感性情報を代表するキー評価語である、と考えられた理由を説明する。従来のディスプレイシステム(テレビなど)では、輪郭強調をして鮮鋭度を上げたり、色調を彩やかに再現する傾向があった。しかしこの方法は人目を瞬間引き付けることはできるかもしれないが、映像が平板化したり、やわらかい表現がかたくなったりして、つまらない映像になってしまう。“奥行き感”を再現することは、上記尖鋭度や彩やかを強調しすぎることを抑えることができ、高品位画像には欠かせないキーワードと考えられる。

また、本研究において、“奥行き感”再現に重要だとして見い出された物理要因の改善に

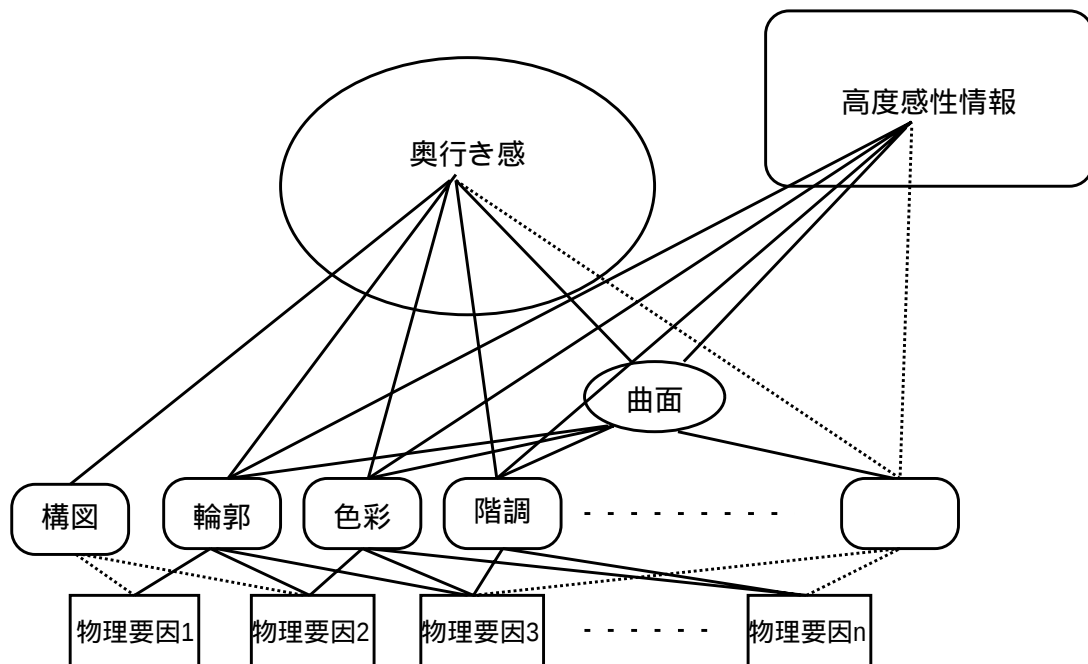


図 6.1: 高度感性情報・奥行き感再現モデル [17]

よって”品位””実在感””輝き”なども改善されたという報告もあり [23]，奥行き感再現に重要な物理要因は，高度感性情報再生の物理要因であると考えられている [17](図 6.1)。

6.2 奥行き感では見い出せない要因

高度感性情報（総合評価）再現にとって重要な要因であるのに”奥行き感”に注目しても見い出せない原因としては，次の 2 つのものと考えられる。

- 1．評価画像中に”奥行き感”があまりない，もしくはほとんどなく”奥行き感”の劣化がほとんど知覚されない。
- 2．評価画像の中に”奥行き感”以外の高度感性情報が含まれていなく，かつその要因は”奥行き感”再現とは相関が小さい，もしくはない。

1 については”奥行き感”を含む評価画像を慎重に選択すれば特に問題はないと思われる。その際，いろんな種類の”奥行き感”を含む画像を集めてきたほうが良いと思われる。（モノクロ画像，色彩による奥行き表現が主の画像，輪郭表現が主のものなど）。

”奥行き感”再現には構図，明暗，色彩，輪郭など多くの要因が関係し，非常に多くの物理要因と結び付く可能性があるが，そのぶん 1 つ 1 つの特性に対する感度は弱くなって

しまっている場合があると考えられる．また，“奥行き感”だけではカバーしきれない部分もある可能性がある．そこで2のような事が起こる可能性があると考えられるので，“奥行き感”だけではなく，幅広い（高度感性情報を代表する）評価語を含んだ評価画像を選択する必要がある．

6.3 奥行き感以外のキー評価語

”奥行き感”以外の評価語としてどのようなものを選択すればよいかという事については現段階では具体的に得られていないが，階層的により高い評価語（経験的には，実在感，品位など）が必要であろう．しかしながら，その場合には評価の難しさ，安定さが問題となる．キー評価語を理論的に研究中である [25] ．

第 7 章

まとめと今後の課題

7.1 これまでのまとめ

高度感性情報の伝達に必要な物理要因・特性を発見するという基礎研究を行ない，その結果に基づいて超高品位画像システムを構築したい，という本研究はまだスタートしたばかりである．これまでの研究の流れをまとめる．

(1) 研究対象の設定

画像伝達システムを最初から統括的にとらえ (画像の取り込み，信号処理 (符号化含む)，伝送，再現を含む)，最適な系を考えいる．そのなかで特にディスプレイに要求されるスペックに焦点をあてて研究をはじめた．

(2) 新たな研究方法の適用，キー評価語“奥行き感”の発見

従来の研究方法 (関連のありそうな物理要因にあたりをつけ，これと画質の関連を求める) は新要因の発見には限界があるので，音響再生の研究において宮原によって提唱された『人間の感性感覚からトップダウン的に高度感性情報伝達のために重要な物理要因・特性を発見する』という，従来とは全く逆方向の方法論に基づいて研究している．総合評価 (高度感性情報) を代表すると考えられ，物理要因を見い出す手助けとなる，帰納的に発見されたキー評価語“奥行き感”を用いた．

(3) “奥行き感”再現に必要な物理要因・特性の発見

“奥行き感”再現に必要な物理特性として，(1) ひずみのない step response、十分な slew rate，(2) Cross modulation ひずみが全信号範囲で色差 1 以内に抑えられていること，(3) ディスプレイの γ を撮像時の γ 補正の逆特性に合わせて正確に補正してあること，(4) 蛍

光体構造によって生じる aliasing を減少すること，(5) コモンモード ノイズを極力低減すること，(6) そして今回見つかったハレーションひずみを減らすこと，が発見された．

以上がこれまでになされたことであるが，これは図 7.1 中の 1 の関係を求めていることになる．

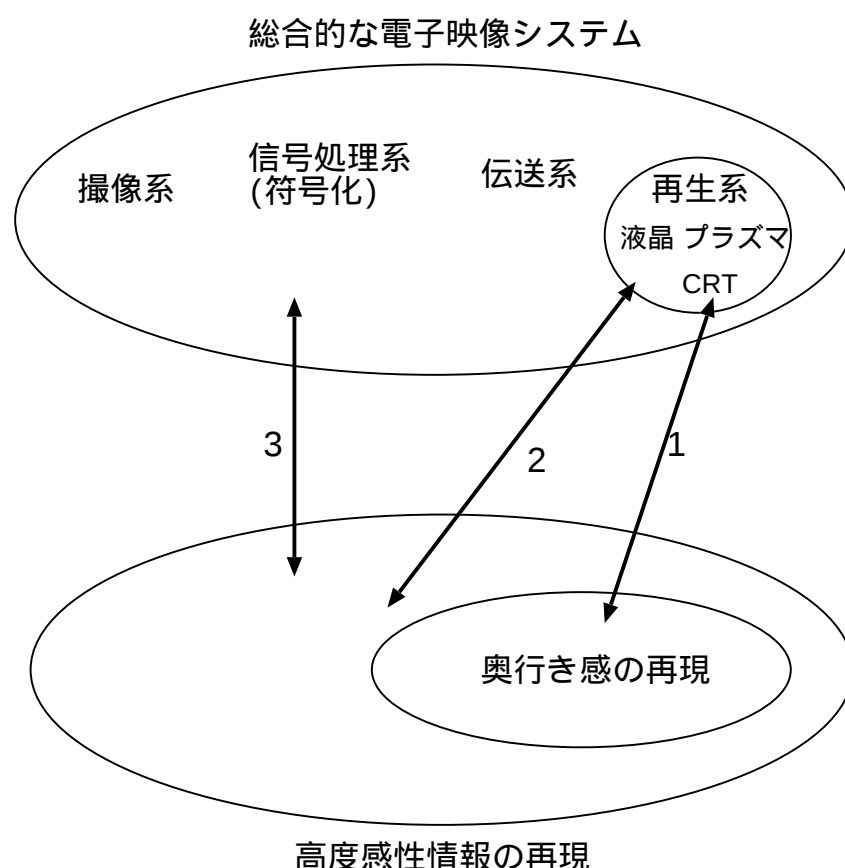


図 7.1: 本研究においてこれまでなされた事，これから成すべき事

7.2 今後なすべき事

今後は“奥行き感”再現に注目して調査を続けると同時に，

- (1) 高度感性情報というものの正体を明らかにする．つまり，高度感性情報を再現するにはどの評価語で表される画質を再現すれば必要且つ充分であるのか，を明らかにする．その上で，“奥行き感”と高度感性情報の関係を求め，“奥行き感”では発見できなかった物理要因・特性を調査していく．その際は，“奥行き感”以外のキー評価語も発見し，高

度感性情報全体をカバーする必要がある（図 7.1 の 2 ）

さらに，次の研究を行なう必要がある．

- (2) 現在は主に CRT ディスプレイを対象に調査・研究を行なっているが，対象を液晶ディスプレイやプラズマディスプレイなどにも広げる．両者は性能がまだ高度感性情報を再現できるかの議論まで届いていないが，CRT のようなレジズれが生じない事や，CRT では避けられない暴爆を兼ねるための厚いガラスの表示面は必要ない事（ハレーション特性が良くなると考えられる），サイズもおおきくすることができるなどの利点がある．サイズは本研究においてこれまでは言及していないが，例えば絵画の印象を伝えたい場合，その絵の大きさを再現することは重要であり，この先考慮していく必要がある．

将来的には，取り込みから再生までの総合的なシステムを検討していく事が必要になる（図 7.1 の 3 ）

謝辞

本研究を遂行するに際して、テーマの設定から論文の作成まで、終始的確な御指導、御助言を頂きました本学宮原誠教授に深く感謝致します。的確な御指導、御助言を頂きました本学小谷一孔助教授に深く感謝致します。終始的確な御指導、御助言を頂いた本学小林幸夫先生、本講座助手の亀田昌志氏, Professor V.R. Algazi (University of California, Davis), Professor H. Maitre , Professor F. Schmitt (ENST in Paris), Dr. Cupit , 本講座助手の剣持雪子氏に深く感謝致します。Extra High Quality Imaging System の表示ディスプレイに関し多くの御協力を頂いた株式会社ナナオ生産本部コンピュータディスプレイシステム開発部技術リーダー寺田正和様に感謝致します。さらに、評価実験に協力して頂き、熱心に議論して頂いた本学像情報処理学講座の学生諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 宮原誠 (project reader), “未来映像音響創作と双方向臨場感通信を目的とした高品位 Audio-Visual System の研究”, 電平成 9 年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究プロジェクト, JSPS-RFTF97P00601, (1997.4 ~).
- [2] 宮原誠, “高品位 Audio-Visual System -先端的技術インフラの研究”, オーディオビジュアル複合情報処理 13-6, pp.39-46 (1996).
- [3] 宮原誠, “時空間相関の視・知覚特性とテレビ画像の高品質化に重要な物理要因-自然さ、滑らかさ、連続性、安定さについて-”, テレビジョン学会, vol.40, no.1, (1986).
- [4] 宮原誠, “テレビ画像の高品質化に重要な物理要-つや(かがやき感)-”, テレビジョン学会誌, vol.40, no.11, (1986).
- [5] 日本色彩学会編, “色彩科学ハンドブック”, 東京大学出版会, (1989).
- [6] 大塚作一, “客観評価技術の動向”, テレビジョン学会誌, vol.45, no.3, pp.293-298, (1991).
- [7] 宮原誠、小谷一孔、堀田裕弘, “系統的画像符号化”, アイピーシ, (1990).
- [8] テレビジョン学会編, “テレビジョン画像情報工学ハンドブック”, オーム社, (1990).
- [9] 宮原誠、甘青, “カラーモニタによる印刷物の色再現性”, 画像電子学会誌, vol.22, no.3, (1993).
- [10] 大山正、今井省吾、和気典二編, “感覚・知覚ハンドブック”, 誠信書房, (1994).
- [11] 宮原誠、吉田育弘, “色データ (R,G,B)-(H,V,C) 数学的変換方法”, テレビジョン学会誌, vol.43, no.10, pp.1129-1136, (1989).
- [12] 甘青、小谷一孔、宮原誠, “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, vol.J76, no.9, pp.1902-1909, (1993).
- [13] 大田登, “色彩工学”, 東京電気大学出版局, (1993).
- [14] 宮川 洋, “テレビジョン画像の評価技術”, 社団法人 テレビジョン学会編, (1989).

- [15] Carlo Infante、(訳) 鈴木弘、“CRT ディスプレイの画質の評価と標準化に関する諸問題”、テレビジョン学会誌, vol.47, no.5, pp.607-609, (1993).
- [16] M.Miyahara, T.Ino, H.Shirai, S.Taniho and V.R.Algazi, “Important factors to convey high order sensation”, IEICE TRANS.COMMUN, vol.E81-B, no.11, pp.1966-1973, (1998)
- [17] 宮原誠, 亀田昌志, “高度感性情報の再現-評価-全く新しいテスト画像の考え方”, 映像符号化シンポジウム (PCSJ'98), P-4.02, (1998).
- [18] 近藤千之, 小林幸夫, 宮原誠, “高品位 Audio-Visual に重要な物理要因の発見”, 信学技報 CQ97-47, pp35-42, (1997).
- [19] 竹田常広, 福井幸夫, 飯田健夫, “奥行き刺激に対する眼の応答特性”, 人間工学, Vol.24, Supplement, pp286-287, (1988).
- [20] 宮原誠, 大塚尚司, 猪野高雄, 白井英樹: “CRT ディスプレイの R,G,B 間 Cross Modulation に起因する奥行き感の劣化”, 映像メディア学会誌, Vol.52, No.8, pp.1225-1231(1998)
- [21] Makoto Miyahara, “Quality Assessment for Visual Service”, IEEE Communication MAGAZINE, Vol.26, No.10, pp51-60, (1988).
- [22] 猪野高雄, 宮原誠, “非直線ガンマ特性の測定と解析-写真における定義とテレビにおける定義の関係の検討”, 映像メディア学会誌, Vol.52, No.12, pp.1860-1864, (1998).
- [23] 猪野高雄, 宮原誠: “CRT Display ガンマの精密な補正と奥行き感の改善”, 信学技報, EID97-127, pp.61-66, (1998).
- [24] 猪野高雄, 宮原誠: “画像の輪郭再現歪みに起因する高度感性情報: “奥行き感” の劣化”, 信学技報, EID-97-129, pp.75-80, (1998).
- [25] 赤松繁, 亀田昌志, 宮原誠, “高度感性情報に着目した画像評価語の階層構造の解析”、信学技報、IE-98-81, pp.51-56, (1998).
- [26] 宮原 誠, 亀田 昌志, “高品位陰極線管用の表示パネル”, (1998.7 出願中) .
- [27] 白井 英樹, 亀田 昌, 宮原 誠, “高品位画像システムの実現に向けて”, PCSJ'98, p-5-14, (1998).
- [28] H.Shirai, M.Miyahara, M.Kameda, S.Taniho and V.R.Algazi, “Degradation of the Reproduction of High Order Sensation Caused by Halation”, IS&T, San Jose, vol.3636-B30, (1999).