

PS 3 . 1 4 - 2 0 0 1 翻訳
医療におけるデジタル画像と通信 (D I C O M)
巻 1 4 : グレースケール標準表示関数

PS 3.14-2001
Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)
Part 14: Grayscale Standard Display Function

Published by

National Electrical Manufacturers Association

1300 N. 17th Street

Rosslyn, Virginia 22209 USA

© Copyright 2000 by the National Electrical Manufacturers Association. All rights including translation into other languages, reserved under the Universal Copyright Convention, the Berne Convention or the Protection of Literacy and Artistic Works, and the International and Pan American Copyright Conventions.

Disclaimer 免責事項

DICOM is the worldwide Standard for medical imaging and related information. It is published and copyright by the National Electrical Manufacturers Association (NEMA). The normative DICOM Standard is published in English, and is available free on the official website at <http://dicom.nema.org/standard.html>.

This document is a translation prepared by the Japan Medical Imaging and Radiological Systems Industries Association (JIRA) under agreement with NEMA, with the intention to help Japanese readers understand the DICOM Standard more readily.

This translation represents a “best effort”; however, differences in meaning may exist between this translation and the normative DICOM Standard. Further, the DICOM Standard is under continuous maintenance and extension, so readers should expect that there are changes that are not reflected in this translation.

In the event of any difference between this translation and the DICOM Standard published in English by NEMA, the English version is normative and takes precedence.

Implementations shall claim conformance to the normative DICOM Standard. Users are advised to obtain the most current documents of the DICOM Standard directly from the official website.

DICOM は医用画像と関連する情報に関する国際標準規格です。DICOM 規格は米国電機工業会 (NEMA) が発行し著作権を有します。DICOM 規格の規范文書は英語で出版され、公式サイト <http://dicom.nema.org/standard.html> から無償でダウンロードが可能です。

この文書は日本語を好む読者が DICOM 規格をより容易に理解するための手助けを意図して、NEMA の許可を得て一般社団法人日本画像医療システム工業会 (JIRA) が提供する翻訳です。

この翻訳は最善の努力を以て提供されていますが、この翻訳と規範 DICOM 規格の間に意味の違いが存在するかもしれません。更に、DICOM 規格は継続的な保守と拡張が施されているので、読者はこの翻訳に反映されていない変更が存在することに留意する必要があります。

この翻訳と NEMA が発行する英語版の DICOM 規格との間に差が生じた場合は、英語版が規範であり優先します。

実装は規範 DICOM 規格への適合性を宣言しなければなりません。使用者は DICOM 規格の最新の文書を公式サイトから直接入手することが要望されます。

解説

この文書は、N E M Aが発行した下記の規格を検討用として翻訳したものである。

PS 3.14-2000

Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)

Part 14: Grayscale Standard Display Function

File name: 01_14pu.pdf

校正 繁村 直

翻訳登録： 2001.5.25, 2002.9.17

ファイル名 P14j0129.doc

D I C O M規格 PS 3.14-2001 はD I C O M規格 PS 3.14-2000 と同一で、変更はない。

D I C O M規格 PS 3.14-2000 はD I C O M規格 PS 3.14-1999 に CP 200 による修正を行ったものである。

D I C O M規格 PS 3.14-1999 はD I C O M規格 PS 3.14-1998 と同一で、変更はない。

PS 3.14-1998

翻訳 加畑 峻 (株)日立メディコ

校正 繁村 直

目次

| | |
|---|-----|
| 目次..... | iii |
| まえがき..... | 1 |
| 1. 適用範囲と適用分野..... | 2 |
| 2. 引用規格..... | 2 |
| 3. 定義..... | 2 |
| 4. 記号と省略形..... | 3 |
| 5. 規約..... | 4 |
| 6. 概要..... | 4 |
| 7. グレースケール標準表示関数..... | 6 |
| 7.1 一般的数式..... | 7 |
| 7.2 透過型ハードコピープリンタ..... | 8 |
| 7.3 反射型ハードコピープリンタ..... | 9 |
| 8. 引用文献..... | 9 |
| 付属書A (情報) グレースケール標準表示関数の導出..... | 11 |
| A.1 グレースケール標準表示関数選択に対する理論的根拠..... | 11 |
| A.2 Barten モデルの詳細..... | 12 |
| A.3 参考文献..... | 14 |
| 付属書B (情報) グレースケール標準表示関数の表..... | 16 |
| 付属書C (情報) 表示システムがグレースケール標準表示関数に一致する精度の測定..... | 23 |
| C.1 適合性と測定基準に関する一般的考察..... | 23 |
| C.2 方法論..... | 24 |
| C.3 引用文献..... | 26 |
| 付属書D (情報) グレースケール標準表示関数への適合性を達成するための説明..... | 27 |
| D.1 放射型表示システム..... | 27 |
| D.1.1 システム特性曲線の測定..... | 27 |
| D.1.2 標準公式の適用..... | 32 |
| D.1.3 規格の実装..... | 32 |
| D.1.4 適合性の基準..... | 34 |
| D.2 透過型ハードコピー装置..... | 35 |
| D.2.1 システム特性曲線の測定..... | 35 |
| D.2.2 グレースケール標準表示関数の適用..... | 36 |
| D.2.3 グレースケール標準表示関数の実装..... | 37 |
| D.2.4 適合性の基準..... | 40 |
| D.3 反射型表示システム..... | 41 |
| D.3.1 システム特性曲線の測定..... | 41 |
| D.3.2 グレースケール標準表示関数の適用..... | 42 |
| D.3.3 グレースケール標準表示関数の実装..... | 42 |
| D.3.4 適合性の基準..... | 45 |
| 付属書E (情報) 周辺光の下での表示の実現できるJND範囲..... | 47 |
| 引用文献..... | 48 |

まえがき

A C R (American College of Radiology) と N E M A (National Electrical Manufacturers Association) は医療におけるデジタル画像と通信のための規格(D I C O M)を開発するために合同委員会を組織した。D I C O M規格の他の巻は、デジタル画像データがシステムからシステムへ移動される方法を定義しているが、画素値が解釈されるべき、あるいは表示されるべき方法は定義していない。P S 3 . 1 4 は、画素値を表示輝度レベルに関係付ける関数を明記する。

画像からのデジタル信号は、計測され、特性化され、転送され、そして客観的にまた正確に再現される。しかしながら、その信号の視覚的解釈は、その画像を表示しているシステムの様々な特性に依存する。現在は、同じ信号によって生成される画像が、異なった表示装置上では完全に異なる視覚的外観、情報、そして特性を持つことがある。

医用画像では、例えばワークステーションの表示モニター上で観察されても、あるいはライトボックス上のフィルムとして観察されても、与えられたデジタル画像がどのように見えるかについての視覚的一貫性が存在することが重要である。これらの画像が任意の装置上で視覚的にどのように提示されるべきかを規定する如何なる規格も存在しないので、ある装置上で観察したときには良い診断的価値を持つデジタル画像が、別の装置上で観察したときには、非常に異なって見え、そして大幅に少ない診断価値をもつことがある。従って、P S 3 . 1 4 は与えられた輝度の範囲にデジタル画像値を写像するための、客観的で定量的な仕掛けを提供するために開発された。デジタル値と表示輝度との間のこの関係を知っている応用は、その画像が種々の表示装置上でどのように見えるかについてのよりよい視覚的一貫性を作り出すことができる。P S 3 . 1 4 がデジタル画像値と表示輝度との間で定義する関係は、ある一つの画像提示装置の、あるいはある一つの画像モダリティの特性に基づかない、輝度の広い範囲にわたる、人間の知覚の測定とモデルに基づいている。それはまたD I C O M提示ルックアップテーブルのような他の機能によってより適切に取り扱うことが可能な利用者の好みには依存していない。

P S 3 . 1 4 は欧州のC E N T C 2 5 1および日本のJ I R Aを含む他の標準化組織によって、そして米国のI E E E , H L 7およびA N S Iを含む他の組織によって論評された。

P S 3 . 1 4 はN E M Aの手続きに従って開発された。

P S 3 . 1 4 は下記の文書の中で確立された指針を使用して構成されている：

ISO/IEC Directives, 1989 Part 3: Drafting and Presentation of International Standards.

1. 適用範囲と適用分野

PS 3.14 はグレースケール画像の表示のための標準表示関数を明記する。これは表示システムをグレースケール標準表示関数に一致するように変更する、あるいは表示システムのグレースケール標準表示関数への適合性を測定する目的のために、特定の表示システムの特性曲線を測定する方法の例を提供する。表示システムは、関係する駆動電子回路をもつモニターやライトボックスあるいはオルタネータ上に置かれるフィルムを作成するプリンタのようなものを含む。

PS 3.14 は性能あるいは画像表示規格の何れでもない。PS 3.14 は画像提示装置が提供しなければならない輝度および・または輝度範囲あるいは光学濃度範囲を定義しない。PS 3.14 は特定の画像モダリティにおける特定の画像構成要素値が提示されるべき方法を定義しない。

明記される関数はグレースケール画像の表示に限定されているので、PS 3.14 はカラー画像の表示に関する関数を明記しない。

2. 引用規格

以下の規格はこのテキストにおける引用を通して、この規格の規定を構成する規定を含んでいる。出版の時には示された版が有効であった。全ての規格は改訂の対象であるので、この規格に基づいて協定した当事者は、次に示す規格の最新の版を適用する可能性を調べることを勧められる。

ISO/IEC Directives, 1989 Part 3: Drafting and Presentation of International Standards.

3. 定義

PS 3.14 の目的のために以下の定義を適用する。

特性曲線 (Characteristic Curve) : 周辺光の効果を含んでいる表示システムの固有表示関数である。特性曲線は、CRT・表示制御装置システムのような放射型表示装置のDDLに対する輝度、あるいは印刷媒体から反射される光の輝度、あるいはハードコピー媒体のDDLに対する測定光学濃度とライトボックスの与えられた輝度とから導出される輝度を記述する。特性曲線は表示システムの動作パラメータに依存する。

注：放射型表示装置によって生成される輝度は光度計で測定されるであろう。ハードコピーの拡散光学濃度は濃度計で測定されるであろう。

コントラスト感度 (Contrast Sensitivity) は、標準ターゲットの輝度変化への平均的人間観察者の感度の特性を記述する。コントラスト感度は、閾値変調に逆比例する。

コントラスト閾値 (Contrast Threshold) : 輝度によって割り算された弁別域を、輝度範囲にわたってプロットした関数。

デジタル駆動レベル (DDL) (Digital Driving Level) : 輝度を生成する表示システムに入力として与えられるデジタル値。表示システムのDDLの集合は、その表示システム上で輝度値を作り出すことができる全ての可能な離散値である。表示システムに関する輝度値へのDDLの写像は、その表示システムの特性曲線を作り出す。与えられたDDLに対する実際の出力は表示システムに特有であり、グレースケール標準表示関数に対して補正されない。

表示関数 (Display Function) : 表示システムの定義されたグレースケール解釈、定義された空間におけるDDLの輝度への写像について記述する関数で、表示システムの与えられた調整状態における周辺光の影響を含んでいる。表示システムの固有表示関数である特性曲線から区別される。

表示システム (Display System) : 対応する輝度値を生成するために DDL を受け入れる装置あるいは複数の装置。これは放射型表示装置, ライトボックス上で観察する透過型ハードコピー, そして反射型プリントハードコピーを含む。

照度 (Illuminance) : 表示媒体を照らす表示システムを取り囲んでいる環境からの光。これは画像表示装置から観察者が受け取る輝度に寄与する。周辺光は画像におけるコントラストを減らす。

弁別域 (Just-Noticeable Difference) (JND) : 与えられた観察条件のもとで, 平均的人間観察者が丁度 (最小) 識別可能である与えられたターゲットの輝度の差。

JND インデックス (JND Index) : JND インデックスにおける 1 ステップが弁別域である輝度差に帰着するような, グレースケール標準表示関数への入力値。

輝度 (Luminance) は, 与えられた方向に投影される単位面積当たりの輝度強度である。(PS 3.14 の中で使用される) システム国際単位は平方メートル当たりのカンデラ (cd/m^2) であり, それは時には nit と呼ばれる。しばしば使用される他の単位はフートランバート (fL) である。 $1 \text{ fL} = 3.426 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。

輝度範囲 (Luminance Range) : 最小輝度から最大輝度までの表示システムの輝度値の範囲。

P 値 (P-Value) : 知覚的線形グレースケール空間において定義される装置から独立した値。DICOM 提示 LUT の出力は P 値である, 即ち、全ての DICOM 定義グレースケール変換が適用された後の画素値。P 値は標準表示システムへの入力である。

グレースケール標準表示関数 (Grayscale Standard Display Function) : 入力 JND インデックスの PS 3.14 において定義された輝度値への数学的に定義された写像。

標準表示システム (Standardized Display System) : グレースケール標準表示関数によって入力 P 値に関係する輝度値を作り出す装置または複数の装置。表示システムによって受け入れられる DDL への P 値の変換によって達成されることがあるが, これが実行される方法は定義されていない。

標準輝度レベル (Standard Luminance Level) : 表 B - 1 における標準輝度レベルの何れか一つ。

標準ターゲット (Standard Target) : 1 度当たり 4 サイクルの正弦波変調をもつ水平または垂直格子で満たされた 2 度 × 2 度の正方形。この正方形はターゲットの平均輝度に等しい輝度の一様な背景の中に置かれる。

注: 標準ターゲットは, 観察者からターゲットまでの距離によってではなく, 境界の視角によって定義される。

閾値変調 (Threshold Modulation) : 与えられた平均輝度レベルにおいて, 平均的人間観察者によって標準ターゲットを検出するために必要とされる最小輝度変調。閾値変調は, 標準ターゲットの輝度における弁別域に対応する。

4 . 記号と省略形

以下の記号と省略形が PS 3.14 の中で使用される。

| | |
|-----------|---|
| ACR | American College of Radiology |
| ANSI | American National Standards Institute |
| CEN TC251 | Comite' Europeen de Normalisation - Technical Committee 251 - Medical Informatics |
| DICOM | Digital Imaging and Communications in Medicine |
| HL7 | Health Level 7 |

| | |
|------|--|
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| ISO | International Standards Organization |
| JIRA | Japan Industries Association of Radiological Systems |
| NEMA | National Electrical Manufacturers Association |

5 . 規約

以下の規約が P S 3 . 1 4 の中で使用される。

上記の節 3 の中で定義された用語は，この規格を通して大文字で書かれる。

6 . 概要

P S 3 . 1 4 は，標準表示システムのグレースケール標準表示関数を，数学的に定義する。これらのシステムは，ライトボックス上で観察されるハードコピーを作成するプリンタあるいはソフトコピーのための電子表示システムのことがある。

ハードコピーは反射型プリントと同様に透過型フィルムで構成されることがある。これらのプリントにおける画像は，透過あるいは散乱反射における光学濃度変化によって表現される。観察者には，画像のすべての構成要素は，照度と画像構成要素の光学濃度に依存したある輝度で見える。

ソフトコピーは，（C R T モニターのような）放射型表示システムあるいは（光源と液晶表示器のような）電子光弁によって作られるであろう。

P S 3 . 1 4 の目的のために，表示システムはデジタル駆動レベルを受け取り，そして画像を表わす輝度あるいは光学濃度変化を生成する。D I C O M 規格の中で明記されるモダリティ，関心値，および提示ルックアップテーブルのような画像変換の結果が予測可能な応用は，表示システムの特長曲線の知識を必要とする。表示システムで予期される応答関数の標準化は，ネットワーク環境の中で出会うような幾つかの異なる表示システムにわたるそのような画像変換の応用を単純化する。

P S 3 . 1 4 は，グレースケール標準表示関数への適合性がいつ達成されるか，あるいは到達した適合性の程度をどのように特徴づけるかについては定義しない。

注： 適合性の定義は，医用画像に対するグレースケール標準表示関数からの表示関数の偏差への人間の視覚システムの感度について徹底した評価を必要とするであろう。

図 6 - 1 および 6 - 2 は，グレースケール標準表示関数に対するコンテキストを示す。グレースケール標準表示関数は画像提示の一部である。グレースケール標準表示関数が適用される前に，画像への多くの他の変更があるであろう。画像収集装置は画像が形成される時にそれを調整するであろう。他の構成要素は，提示されるべき画像のダイナミックレンジの一部分を選択するために「ウィンドウとレベル」を実行することがある。さらに他の構成要素は，表示のための準備の中で選択されたダイナミックレンジを調節することができる。提示 L U T は P 値（提示値）を出力する。これらの P 値は標準表示システムのためのデジタル駆動レベルになる。グレースケール標準表示関数は標準表示システムの対数輝度出力に P 値を写像する。標準表示システムがこの写像を実行する方法は実装に依存する。

画像収集および提示連鎖の D I C O M モデルの間の境界と，P 値で表現される標準表示システムは，両方とも装置から独立していることと，（現実にそうでない場合は）概念的に知覚的線形であることが意図されている。言い換えれば，標準表示システムの能力にかかわらず，P 値の同一範囲は「同様に」提示されるであろう。

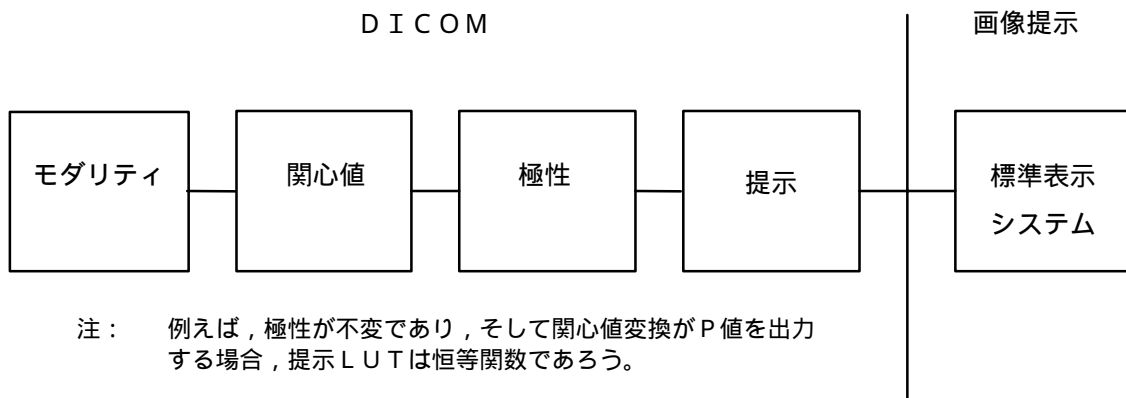


図6 - 1 グレースケール標準表示関数は画像収集および提示連鎖の他の要素が画像への数種類の变换を完了した後の画像提示の構成要素である。

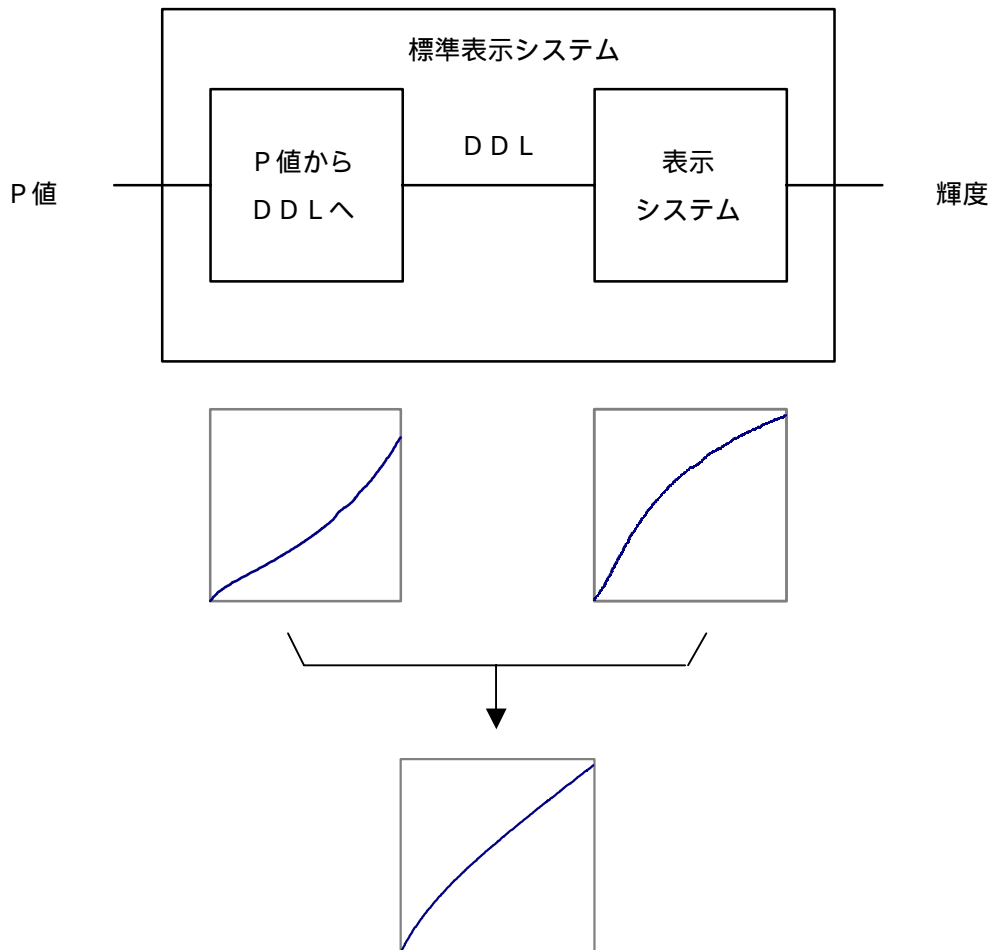


図6 - 2 標準表示システムの概念モデルは、非標準表示システムのデジタル駆動レベル（DDL）への中間変換を経由して、P値を輝度に写像する。

PS 3.14の主な目的は全ての画像提示システムのための適切なグレースケール標準表示関数を数学的に定義することである。このグレースケール標準表示関数を定義する目的は、標準表示システムによって見られる輝度値にP値が変換される演繹の方法を応用が知ることを可能にすることである。本質的に、グレースケール標準表示関数を定義することが、提示LUTから出力される、そして標準表示システムへのデジタル駆動レベルとして使用されるP値のための「単位」を定める。

PS 3.14の二番目の目的は、異なる輝度の表示システム間で、与えられた画像に対するグレースケール知覚あるいは基本的外観における何らかのレベルの類似性を提供する、そして表示システムの利用可能なデジタル駆動レベルの良好な使用を促進する表示関数を選択することである。多くの異なる関数が第一の目的に役立つことができるが、二番目の目的に合致するためにこのグレースケール標準表示関数は選択された。そのような関数では、P値は人間の知覚応答に関してほぼ直線である。類似性は同一情報内容を保証しない。より広い輝度範囲および・またはより高輝度をもつ表示システムは、観察者へより大きい輝度弁別域を提供することができるであろう。知覚が画像内容に、そして見る人に依存するので、類似性はまた厳密な知覚直線性を意味しない。厳密な知覚直線性を達成するために、DICOM規格に定義された他の仕組み（例えば、VOIおよび提示LUT）によって、応用は利用者の期待に合わせるために画像の提示を調節する必要があるだろう。定義された表示関数なしで、ネットワーク上で遭遇する多種類の表示システムへのそのような調整は困難であろう。

関数の選択は、付属書Aの中でさらに議論されるいくつかの概念に基づいている。

付属書Bは表形式のグレースケール標準表示関数を含んでいる。

情動的付属書Cは、実際の表示関数の形状をグレースケール標準表示関数と数学的に比較するための、そして実際の離散的輝度間隔がグレースケール標準表示関数のそれらと良くと一致するかを定量化するための手続きの例を提供する。

表示システムはしばしばグレースケール標準表示関数と異なる特性曲線を持つであろう。これらの装置はグレースケール標準表示関数に適合する装置を作る外部的に定義された変換を取り入れる手段を含むことがある。PS 3.14は、それを用いてこれらの挙動が測定できる、そしてグレースケール標準表示関数への近似が評価される、表示システムのためのテストパターンの例を提供する（情動的付属書D.1, D.2, D.3を参照）。

7. グレースケール標準表示関数

付属書Aの中でより詳細に説明するように、グレースケール標準表示関数は人間のコントラスト感度に基づいている。人間のコントラスト感度は、グレースケール標準表示関数の輝度範囲内で明らかに非線形である。人間の目は、画像の明るい領域におけるよりも、画像の暗い領域において相対的に低い感度である。感度におけるこの変化は、画像の明るい領域の中で輝度における小さい相対的变化を見ることを、画像の暗い領域の中で見るよりもずっと容易にする。P値における等しい変化が全ての駆動レベルで知覚力の同じレベルになるように、輝度を調整する表示関数は、「知覚的に直線化」されている。グレースケール標準表示関数は、知覚の線形化についての概念を、PS 3.14の明示的な目的にせず組み込んでいる。

コントラスト感度のために使用されるデータは人間の視覚系の Barten モデルから導出される（参照文献1, 2と付属書B）。特に、グレースケール標準表示関数は1度当たり4サイクルの正弦波変調をもつ水平あるいは垂直格子で満たされた2度×2度の正方形で構成される標準ターゲットに対するコントラスト感度を参照する。正方形はターゲットの平均輝度Lに等しい輝度の一様な背景の中に置かれる。コントラスト感度は、格子が平均的人間観察者にとって、そこでちょうど観察可能になる、閾

値変調によって定義される。輝度変調は輝度 L におけるターゲットに対する弁別域 (J N D) を表わす。

注：標準ターゲットの学問的な性質は認識されている。単純なターゲットで P S 3 . 1 4 の本質的な目的は実現可能であるように思われる。より現実的なターゲットでの複雑な環境の中のもっともらしい結果だけが P S 3 . 1 4 を執筆する時点で知られており、これらは評価されなかった。

グレースケール標準表示関数は 0.05 から 4000 cd/m² の輝度範囲に対して定義される。最低輝度は陰極線管 (C R T) モニターの最低の実用的に役に立つ輝度に対応している、そして最高輝度は X 線マンモグラフィを解釈するために使用される非常に明るいライトボックスの減衰されない輝度を越える。グレースケール標準表示関数は拡散周囲照度の効果を明示的に含む。

輝度範囲内で、偶然 1023 J N D に分類される (付属書 A 参照)。

7.1 一般的数式

グレースケール標準表示関数は、Barten モデルから導出される 1023 輝度レベルの数学的内挿補間法によって定義される。グレースケール標準表示関数は、弁別域 (J N D) インデックス j の関数として、平方メートル当たりのカンデラで、輝度 L を計算することを可能にする：

$$\log_{10} L(j) = \frac{a + c \cdot \text{Ln}(j) + e \cdot (\text{Ln}(j))^2 + g \cdot (\text{Ln}(j))^3 + m \cdot (\text{Ln}(j))^4}{1 + b \cdot \text{Ln}(j) + d \cdot (\text{Ln}(j))^2 + f \cdot (\text{Ln}(j))^3 + h \cdot (\text{Ln}(j))^4 + k \cdot (\text{Ln}(j))^5}$$

ここで Ln は自然対数を示し、j は J N D の輝度レベル L_j のインデックス (1 から 1023)、そして a = -1.3011877, b = -2.5840191E-2, c = 8.0242636E-2, d = -1.0320229E-1, e = 1.3646699E-1, f = 2.8745620E-2, g = -2.5468404E-2, h = -3.1978977E-3, k = 1.2992634E-4, m = 1.3635334E-3。

輝度 L_j の底 10 への対数は、輝度範囲全体にわたって、この関数によって非常に良く内挿される。関数からの任意の対数 (輝度) 値の相対偏差は多くて 0.3 %、そして平方自乗平均誤差は 0.0003 である。グレースケール標準表示関数の連続表現は利用者が離散的 J N D を任意の開始レベルに対して、そして希望する輝度範囲にわたって計算することを可能にする。

注 1 特定範囲の L 値をもつ装置に上の式を適用するために、この関係の逆を同様に持つことは便利であり、それは次式によって与えられる、：

$$j(L) = A + B \cdot \text{Log}_{10}(L) + C \cdot (\text{Log}_{10}(L))^2 + D \cdot (\text{Log}_{10}(L))^3 + E \cdot (\text{Log}_{10}(L))^4 + F \cdot (\text{Log}_{10}(L))^5 + G \cdot (\text{Log}_{10}(L))^6 + H \cdot (\text{Log}_{10}(L))^7 + I \cdot (\text{Log}_{10}(L))^8$$

ここで Log₁₀ は底 10 への対数を表す、そして A = 71.498068, B = 94.593053, C = 41.912053, D = 9.8247004, E = 0.28175407, F = -1.1878455, G = -0.18014349, H = 0.14710899, I = -0.017046845 である。

2 . コンピュータプログラムに L(j) および j(L) に対する式を組み入れる場合、倍精度の使用が推奨される。

3 . 代わりの方法が J N D インデックス値を計算するために使用されることがある。一つの方法は *Numerical Recipes in C* (Cambridge University press, 1991) の中で記述される Van Vijnngaarden-Dekker-Brent 法のような数値アルゴリズムを使用する。値 j は、L(j) のためのグレースケール標準表示関数の式で反復して与えられる L から計算される。もう一つの方法は、二つの最も近い作表された L_j 対間を直線的に補間することにより、任意の L に対応する j を計算するために、j と L のグレースケール標準表示関数の表の値を使用することである。

4 . これらの式が実装される方法についての仕様は意図されていない。これらは、方程式を直接実行する

ことによって、あるいはLUTのような離散的な値によって、動的に実装することができる。

付属書Bは1023整数JNDインデックスに対して、この式で計算される輝度レベルを表記し、図7-1はグレースケール標準表示関数のプロットを示す。輝度レベルの正確な値は、もちろん0.05 cd/m²の開始レベルに依存する。

表示システムの特性曲線は、DDLおよび周囲照度の効果の関数として、表示システムによって作られる輝度を表わす。特性曲線は標準テストパターン（付属書D参照）で測定される。一般的に、表示関数は、例えば下記を記述する。

- a) CRTモニター/デジタル表示制御システムのような放射型表示装置に対するDDLの関数として測定される（周囲照度を含む）輝度、
- b) プリンタが媒体上にDDLに依存する光学濃度を作成した後、ライトボックスの前に掛けた透過媒体に対して測定される、DDLの関数としての（周囲照度を含む）輝度、
- c) プリンタが媒体上にDDLに依存する反射濃度を作成した後、オフィス光によって照らされた拡散反射媒体に対して測定される、DDLの関数としての（周辺光を含む）輝度。

内部的あるいは外部的手段によって、特性曲線がグレースケール標準表示関数に一致するように、システムが構成（あるいは校正）されることがある。

いくつかの表示システムはそれ自身を周辺光の条件に適応させる。そのようなシステムは、それがグレースケール標準表示関数に適合し続けるために利用者介入なしにその表示関数を調整する能力を持つ場合を除いて、周辺照度の一レベルに対してのみグレースケール標準表示関数に適合することができる。

7.2 透過型ハードコピープリンタ

透過型ハードコピー印刷に対して、輝度Lおよび印刷された光学濃度Dの関係は次式である：

$$L = L_a + L_0 \cdot 10^{-D}$$

ここで：

L_0 は提示されるフィルムが無いライトボックスの輝度である、そして

L_a はフィルムから反射された周囲照度に起因する輝度寄与である。

フィルムが、 D_{\min} から D_{\max} まで分布する濃度で印刷される場合、最終輝度は次の間に分布するであろう：

$$L_{\min} = L_a + L_0 \cdot 10^{-D_{\max}}, \quad L_{\max} = L_a + L_0 \cdot 10^{-D_{\min}}$$

そしてj値は $j_{\min} = j(L_{\min})$ から $j_{\max} = j(L_{\max})$ まで対応して分布するであろう。

このj値の範囲が j_{\min} への0から j_{\max} への $2^N - 1$ に分布するNビットP値によって表わされる場合、j値は以下のようにP値に対応するであろう：

$$j(p) = j_{\min} + \frac{p}{2^N - 1} \cdot (j_{\max} - j_{\min})$$

そして対応するL値は $L(j(p))$ であろう。

最終的に、 $L(j(p))$ 値を濃度に変換することは次の式に帰着する：

$$D(p) = -\text{Log}_{10}\left(\frac{L(j(p)) - L_a}{L_0}\right)$$

注：透過型ハードコピー印刷で使用されるパラメータの典型値は， $L_0 = 2000 \text{ cd/m}^2$ ， $L_a = 10 \text{ cd/m}^2$ である。

7.3 反射型ハードコピープリンタ

反射型ハードコピー印刷に対して輝度 L および印刷された光学濃度 D の関係は次のとおりである：

$$L = L_0 \cdot 10^{-D}$$

ここで：

L_0 は存在する照明の拡散反射から得られる最大輝度である。

フィルムが， D_{\min} から D_{\max} まで分布する濃度で印刷される場合，最終輝度は次の間に分布するであろう：

$$L_{\min} = L_0 \cdot 10^{-D_{\max}} \quad , \quad L_{\max} = L_0 \cdot 10^{-D_{\min}}$$

そして j 値は $j_{\min} = j(L_{\min})$ から $j_{\max} = j(L_{\max})$ まで対応して分布するであろう。

j 値のこの範囲が j_{\min} への 0 から j_{\max} への $2^N - 1$ に分布する N ビット P 値によって表わされる場合， j 値は以下のように P 値に対応するであろう：

$$j(p) = j_{\min} + \frac{P}{2^N - 1} \cdot (j_{\max} - j_{\min})$$

そして対応する L 値は $L(j(p))$ であろう。

最終的に， $L(j(p))$ 値を濃度に変換することは次の式に帰着する：

$$D(p) = -\text{Log}_{10}\left(\frac{L(j(p))}{L_0}\right)$$

注：反射型ハードコピー印刷で使用されるパラメータの典型値は， $L_0 = 150 \text{ cd/m}^2$ である。

8. 引用文献

- 1) Barten, P.G.J., Physical model for the Contrast Sensitivity of the human eye. Proc. SPIE 1666, 57-72 (1992)
- 2) Barten, P.G.J., Spatio-temporal model for the Contrast Sensitivity of the human eye and its temporal aspects. Proc. SPIE 1913-01 (1993)

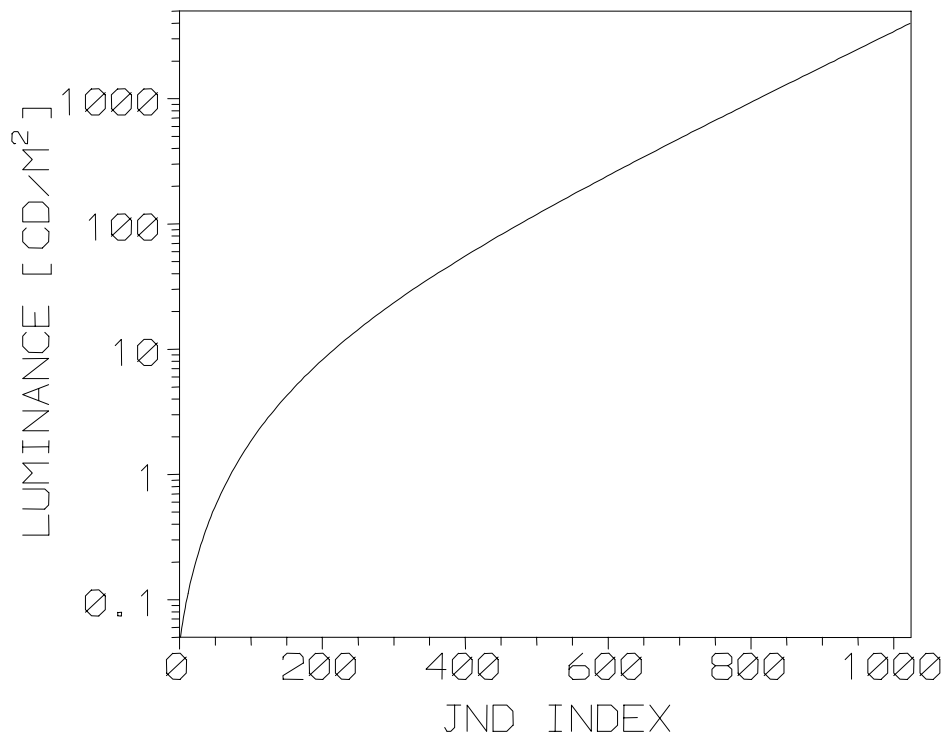


図7 - 1 JNDインデックス対輝度の対数として提示されたグレースケール標準表示関数

付属書 A (情報) グレースケール標準表示関数の導出

A.1 グレースケール標準表示関数選択に対する理論的根拠

グレースケール標準表示関数の選択において、全關心輝度範囲に対して、ただ一つの連続的単調挙動数学的関数を持つことが必須であると考えられた。対応して、グレースケール標準表示関数を実装することを容易にするために、データ対のただ一つの表によってそれを定義することが有益であると思われた。二番目の目的として、グレースケール標準表示関数が異なつた輝度範囲の表示システム上のグレースケール表現に類似性を提供すること、そして表示システムの利用可能な DDL の上手な使用を促進させることが望ましいと考えられた。

知覚的直線化は、上記の二番目の目的を満足するために、グレースケール標準表示関数において到達するために有益な概念であると考えられた；しかしながら、それ自身が目的であるとは考えられなかった。一つの数学的関数によって様々な観察条件下で、医用画像のすべてのタイプを知覚的に直線化することが、おそらく理解しにくい目標である事実は別にして、医用画像は医学的要求に従ってコントラストを不均一に割り当てた応用特有の表示関数によって主に提示されている。

直観的に、異なった表示システム上で知覚的に直線化された画像は類似していると判断されるであろうと、人は仮定するであろう。知覚的直線化を達成するために人間の視覚系応答のモデルが必要とされた、そして Barten モデル [A1] が選ばれた。

初期の実験は、コントラスト均等化の訴える度合いと類似性は、人間の視覚系応答の Barten モデルから導出される表示関数で得られることを示した。使用された画像は正方形パターン、SMPTE パターン、Briggs のパターン [A2] であった。

表示システムの DDL を何らかの知覚的直線スケールに関係付けること、主として利用可能な入力レベルの効果的利用を得ることが望まれた。デジタル化レベルが知覚的に見分けがつかない輝度あるいは光学濃度レベルになる場合は、それらは無駄である。それらがあまりに離れている場合は、観察者は等高線を見ることがある。従って、知覚的直線化の概念は、これをグレースケール標準表示関数の目標としてではなく、いかに良くこれらの目的が満たされたかの尺度のための概念を得るために、保持された。

知覚的直線化は、厳密な意味で、正方形パターンあるいは一様な周囲中の格子のようなむしろ単純な画像に対してのみ実現可能である。それにもかかわらず、単純なテストパターンでの実験から導かれた、知覚的に直線化された表示関数の概念は、文献 [A3-A8] の中で述べられているように複雑な画像にも成功して適用されてきた。知覚的直線化はすべての細部、あるいは空間周波数および対象物の大きさに対して、決して一度には達成されることができないということが明確に認識される一方、人間のコントラスト感度のピークに近い周波数と対象物の大きさに対する知覚的直線化は、複雑な画像の中で同様に「合理的な仕事」をすと思われた。

広い輝度範囲と雑多な周囲をもつ複雑な画像における特定の細部に対する知覚的直線化は、画像の暗い領域において、むしろ強く曲げられる表示関数を必要とした、そして低輝度および高輝度表示システムに対するそのような表示関数は、連続単調関数の一部ではないであろうことを、制限された（出版されていない）実験は示している。この実験は他の標準化グループによって提案された CIELab 曲線 [A9] の考えの根底にあるかもしれない。

コンピューテッドラジオグラフに関する他の実験および観測は、同一の応用特有の関数が表示システムの対数直線特性曲線で結合されている場合には、異なる輝度の表示システムでのグレースケール表

現の間で、類似性が同様に得られることを示唆しているように思われた。このようにコントラスト均一化でない場合は、類似性は表示関数に関して直線的な、輝度独立の形で得ることができる。

一方、標準としてむしろ単純な対数直線表示関数を選ぶことで均一に知覚可能であったが、これはとりわけ以下の理由のために行われなかった。

高い固有ビデオ帯域を持つ高解像度表示システムに関して、デジタル化解像度は、技術的なおよび他の制約から、8あるいは10ビットに制限される。グレースケール標準表示関数が表示システムの実験曲線からより大きく離れるほど、知覚の観点から、DDLの利用は典型的により不十分になる。CRT表示システムの実験曲線は、対数線形直線に関して凸曲率を持つ。それは、人間の視覚モデルと知覚的直線化の概念から導かれる表示関数からは、対数直線表示関数からよりも差が少ない。

結果として生じる表示関数がグレースケール標準表示関数から非常に離れる結果になる応用特有の表示処理を使う場合は、関数は想像では良い類似性を提供しない。この場合、他の関数がより良い類似性を得ることがある。

要約すると表示関数は、対数直線応答および画像内で広い輝度範囲を持つ複雑な背景の中の知覚的直線化を得ることがある表示関数との間に、その曲率が入る単一の連続した数学的関数を得るために、人間の視覚システムの Barten モデルから導出された。人間のコントラスト感度の他のモデルは、潜在的により良い関数を提供することがあるが、しかし評価はされなかった。知覚的直線化の概念は、グレースケール標準表示関数の二番目の目的を満足するために選択されたが、しかしグレースケール標準表示関数それ自身の明示的な目標としてではない。より良い関数がこれらの目的を満足するために存在するであろうことが認識されている。ほとんどどんな単一の数学的に定義された標準関数でも、通信ネットワークにおける表示システム上の画像提示を大きく改良するであろうと信じられる。

A.2 Barten モデルの詳細

Barten モデルは神経雑音、側方抑制、光子雑音、外部雑音、限定積分能力、光変調伝達関数、方位、および時間的フィルタを考慮に入れている。神経雑音は高い空間周波数におけるコントラスト感度の上限を表わす。低い空間周波数は、オリジナルからの空間的低域濾過信号の減算によって引き起こされるように見える、神経節細胞の中の側方抑制によって減衰されることで出現する。光子雑音は光子束 h の変動、瞳孔の直径 d 、そして目の量子検出効率によって定義される。低い光レベルでは、コントラスト感度は de Vries-Rose の法則に従って輝度の平方根に比例する。ここで使われているこのモデルにおける時間積分能力は $T = 0.1$ 秒の時定数で単純に表わされる。時間フィルタ効果は含まれていない。時間的積分能力の次に、目は同様に限定された空間的積分能力をもつ：いろいろな雑音源が存在する中で、目が情報を積算できるサイクルの最大数 N_E と同じく最大角度サイズ $X_E \times Y_E$ がある。

$$M_{\text{opt}}(u) = e^{-\pi^2 \cdot \sigma^2 \cdot u^2} \quad \sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (C_{\text{sph}} \cdot d^3)^2} \quad (\text{A1})$$

この光学変調伝達関数 (u , 空間周波数, 単位 c/deg) は、主瞳孔径依存構成要素である球面収差 C_{sph} からと同様に、目のレンズの光学的性質、光学媒体からの漂遊光、網膜での拡散、そして受容体構成要素の離散的性質を含む Gaussian 点広がり関数から導かれる。 σ_0 は小瞳孔サイズでの σ の値である。外部雑音は表示システム雑音と画像雑音から生じることがある。コントラスト感度は、0度と90度で等しい最大感度、そして45度で最小感度で、テストパターンの方位でほぼ正弦波的に変化する。コントラスト感度における差異は、高い空間周波数でのみ存在する。効果は積分能力における変動によってモデル化される。

これらの効果の組み合わせは、空間周波数の関数としてコントラストに関する次の方程式を与える：

$$S(u) = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{T}{2}} \frac{M_{opt}(u)}{\sqrt{\left(\frac{1}{\eta h I_L} + \frac{\Phi_0}{(1-F(u))^2} + \Phi_{ext}(u)\right) \cdot \left(\frac{1}{X_0^2} + \frac{1}{X_E^2} + \left(\frac{u}{N_E}\right)^2\right)}} \quad (A2)$$

雑音の影響は、光子の変動（第一項）、濾過された神経細胞（第二項）、そして外部雑音に関する雑音定数として、平方根内の最初の括弧の中に現れる。目の照度 $I_L = \pi/4 d^2 L$ は troland [td] で表わされる、 d は mm での瞳孔の直径、そして L は cd/m^2 でのターゲットの輝度である。瞳孔の直径は de Groot and Gebhard の式によって決定される：

$$d = 4.6 - 2.8 \cdot \tanh(0.4 \cdot \text{Log}_{10}(0.625 \cdot L)) \quad (A3)$$

項 $(1 - F(u))^2 = 1 - \exp(-u^2/u_0^2)$ は側方抑制 ($u_0 = 8 \text{ c/deg}$) による神経雑音の低周波数減衰を記述する。式 (A2) は正方形ターゲット $X_0 = Y_0$ [deg] の単純化された場合を表わしている。 Φ_{ext} は外部雑音に対応するコントラスト変動である。 $k = 3.3$, $\eta = 0.025$, $h = 357 \cdot 3600 \text{ photons/td sec deg}^2$, 神経雑音に対応するコントラスト変動 $\Phi_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ sec deg}^2$, $X_E = 12 \text{ deg}$, $N_E = 15 \text{ cycles}$ (0 および 90 deg で、そして 2 c/deg 以上の周波数に対して 45 deg で $N_E = 7.5 \text{ cycles}$), $\sigma_0 = 0.0133 \text{ deg}$, $C_{sph} = 0.0001 \text{ deg/mm}^3$ [A1]。式 (A2) は $10^{-4} \leq L \leq 10^3 \text{ cd/m}^2$, $0.5 \leq X_0 \leq 60 \text{ deg}$, $0.2 \leq u \leq 50 \text{ c/deg}$ に対する実験データによい一致を提供する。

すべての定数を挿入すると、式 (A2) は次式になる

$$S(L) = \frac{q_1 \cdot M_{opt}(L)}{\sqrt{\frac{q_2}{d^2 L} + q_3}} \quad (A4)$$

ここで $q_1 = 0.1183034375$, $q_2 = 3.962774805 \cdot 10^{-5}$, および $q_3 = 1.356243499 \cdot 10^{-7}$ 。

250 mm の距離から見たとき、標準ターゲットは約 $8.7 \text{ mm} \times 8.7 \text{ mm}$ の大きさを持ち、グリッドの空間周波数は 1 mm あたり約 0.92 ライン対に等しい。

グレースケール標準表示関数は平均格子輝度の関数として閾値変調 S_j を計算すること、そしてこれらの値を互いの上に積み上げることによって得られる。次のより高いレベルの平均輝度は、前のレベルの平均輝度 L_j に最高最低変調 peak-to-peak modulation を加えることによって計算される：

$$L_{j+1} = L_j \cdot \frac{1 + S_j}{1 - S_j} \quad (A5)$$

このように、PS 3.14 の中では最高最低閾値変調 peak-to-peak Threshold Modulation は輝度弁別域 just-noticeable Luminance difference と呼ばれる。

表示システムがグレースケール標準表示関数に適合している場合、標準ターゲットを観察するとき、それは知覚的直線化される：表示システムが非常に精細なデジタル化解像度をもつ場合は、P 値における等しい増分は、等しく知覚可能コントラストステップと、そしてある条件下では、標準ターゲット（平均ターゲット輝度に等しい輝度の均一背景の中に埋められた $2 \text{ 度} \times 2 \text{ 度}$ の領域上の 4 サイクル / 度の正弦波変調をもつ格子）に対する、輝度弁別域（同時に一つ表示される）を作るであろう。

異なる輝度レベルでの同時に一つの標準ターゲットの表示は、学問的な表示環境である。異なるターゲットと輝度分布を同時に持つ異なる輝度レベルを含む画像は、一般的には、知覚的に直線化されない。標準ターゲットに対する表示システムの知覚的直線化の概念は連続数学的関数を導出するためと、このグレースケール標準表示関数の二番目の目標を満たすために、論理的手段として役立つことをもう一度強調する。この関数は強く曲げられた表示関数による複雑な画像の知覚的直線化と、対数直線表示関数によって異なる輝度の表示システム上の画像内でグレースケール知覚の類似性を得ることとの間で折衷案を表現している。

表示システムの特曲線は {輝度, D D L } 対 $L_m = F(D_m)$ によって測定され、そして表現される。離散的輝度レベルの利用可能な集団がグレースケール標準表示関数 $L = G(j)$ を近似するために使用されるように、式 (A6) と (A7) に従って、以前に使われた D D L, D_{input} を D_{output} に写像する離散変換が実行されるであろう。変換は図 A - 1 に示される。このような操作によって、グレースケール標準表示関数への適合性が達成されるであろう。

$$D_{output} = s \cdot F^{-1}[G(j)] \quad (A6)$$

s は異なる入力と出力のデジタル化解像度を提供するための換算係数である。

標準輝度レベルのインデックス j (一般的にはこれは非整数であろう) は表示システム (周辺光を含む) の最低輝度における標準輝度レベルの開始インデックス j_0 , 表示システムの輝度範囲にわたる標準 JND の数 N_{JND} , デジタル化解像度 DR, そして表示システムの D D L D_{input} から決定される:

$$I = I_0 + \frac{N_{JND}}{DR} \cdot D_{input} \quad (A7)$$

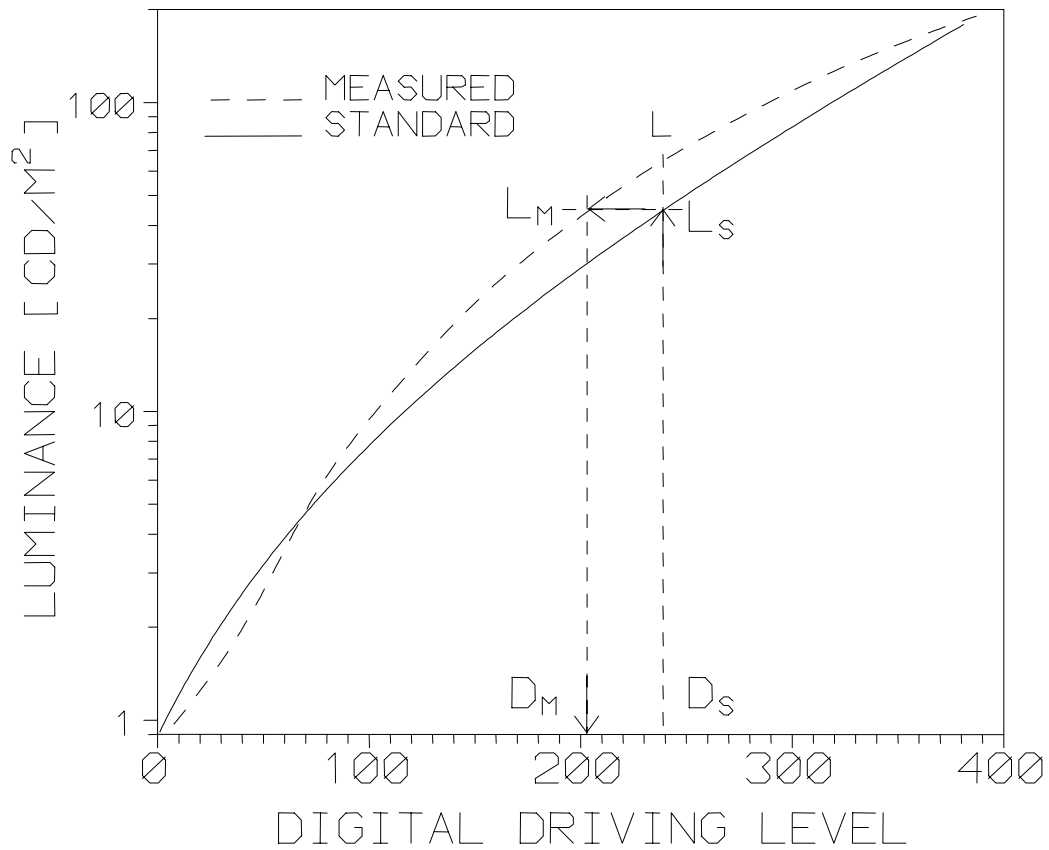
そのような変換を実行するための詳細例は付属書 D の中で与えられる。

A . 3 参考文献

- [A1] P.G.J. Barten: Physical model for the Contrast Sensitivity of the human eye. Proc. SPIE **1666**, 57-72 (1992) and Spatio-temporal model for the Contrast Sensitivity of the human eye and its temporal aspects. Proc. SPIE **1913**-01 (1993)
- [A2] S.J. Briggs: Digital test target for display evaluation. Proc. SPIE **253**, 237-246 (1980)
- [A3] S.J. Briggs: Photometric technique for deriving a "best gamma" for displays. Proc. SPIE **199**, Paper 26 (1979) and Opt. Eng. **20**, 651-657 (1981)
- [A4] S.M. Pizer: Intensity mappings: linearization, image-based, user-controlled. Proc. SPIE **271**, 21-27 (1981)
- [A5] S.M. Pizer: Intensity mappings to linearize display devices. Comp. Graph. Image. Proc. **17**, 262-268 (1981)
- [A6] R.E. Johnston, J.B. Zimmerman, D.C. Rogers, and S.M. Pizer: Perceptual standardization. Proc. SPIE **536**, 44-49 (1985)
- [A7] R.C. Cromartie, R.E. Johnston, S.M. Pizer, D.C. Rogers: Standardization of electronic display devices based on human perception. University of North Carolina at Chapel Hill, Technical Report 88-002, Dec. 1987
- [A8] B. M. Hemminger, R.E. Johnston, J.P. Rolland, K.E. Muller: Perceptual linearization of video display

monitors for medical image presentation. Proc. SPIE **2164**, 222-241 (1994)

[A9] CIE 1976



図A - 1 表示システムの特曲線をグレースケール標準表示関数を近似した表示関数に変更する変換を決定するための説明図

付属書B（情報） グレースケール標準表示関数の表

Barten モデルに基づくグレースケール標準表示関数は節7の中で導入された，そして細部は上記の付属書Aにおいて提示された。この付属書はグレースケール標準表示関数を，弁別域インデックスの整数値に対する，弁別域インデックスの関数としての輝度値の表として提示する。

表B - 1 グレースケール標準表示関数：JNDインデックス対輝度

| JND | L[cd/m ²] | JND | L[cd/m ²] | JND | L[cd/m ²] | JND | L[cd/m ²] |
|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|
| 1 | 0.0500 | 2 | 0.0547 | 3 | 0.0594 | 4 | 0.0643 |
| 5 | 0.0696 | 6 | 0.0750 | 7 | 0.0807 | 8 | 0.0866 |
| 9 | 0.0927 | 10 | 0.0991 | 11 | 0.1056 | 12 | 0.1124 |
| 13 | 0.1194 | 14 | 0.1267 | 15 | 0.1342 | 16 | 0.1419 |
| 17 | 0.1498 | 18 | 0.1580 | 19 | 0.1664 | 20 | 0.1750 |
| 21 | 0.1839 | 22 | 0.1931 | 23 | 0.2025 | 24 | 0.2121 |
| 25 | 0.2220 | 26 | 0.2321 | 27 | 0.2425 | 28 | 0.2532 |
| 29 | 0.2641 | 30 | 0.2752 | 31 | 0.2867 | 32 | 0.2984 |
| 33 | 0.3104 | 34 | 0.3226 | 35 | 0.3351 | 36 | 0.3479 |
| 37 | 0.3610 | 38 | 0.3744 | 39 | 0.3880 | 40 | 0.4019 |
| 41 | 0.4161 | 42 | 0.4306 | 43 | 0.4454 | 44 | 0.4605 |
| 45 | 0.4759 | 46 | 0.4916 | 47 | 0.5076 | 48 | 0.5239 |
| 49 | 0.5405 | 50 | 0.5574 | 51 | 0.5746 | 52 | 0.5921 |
| 53 | 0.6100 | 54 | 0.6281 | 55 | 0.6466 | 56 | 0.6654 |
| 57 | 0.6846 | 58 | 0.7040 | 59 | 0.7238 | 60 | 0.7440 |
| 61 | 0.7644 | 62 | 0.7852 | 63 | 0.8064 | 64 | 0.8278 |
| 65 | 0.8497 | 66 | 0.8718 | 67 | 0.8944 | 68 | 0.9172 |
| 69 | 0.9405 | 70 | 0.9640 | 71 | 0.9880 | 72 | 1.0123 |
| 73 | 1.0370 | 74 | 1.0620 | 75 | 1.0874 | 76 | 1.1132 |
| 77 | 1.1394 | 78 | 1.1659 | 79 | 1.1928 | 80 | 1.2201 |
| 81 | 1.2478 | 82 | 1.2759 | 83 | 1.3044 | 84 | 1.3332 |
| 85 | 1.3625 | 86 | 1.3921 | 87 | 1.4222 | 88 | 1.4527 |
| 89 | 1.4835 | 90 | 1.5148 | 91 | 1.5465 | 92 | 1.5786 |
| 93 | 1.6111 | 94 | 1.6441 | 95 | 1.6775 | 96 | 1.7113 |
| 97 | 1.7455 | 98 | 1.7802 | 99 | 1.8153 | 100 | 1.8508 |
| 101 | 1.8868 | 102 | 1.9233 | 103 | 1.9601 | 104 | 1.9975 |
| 105 | 2.0352 | 106 | 2.0735 | 107 | 2.1122 | 108 | 2.1514 |
| 109 | 2.1910 | 110 | 2.2311 | 111 | 2.2717 | 112 | 2.3127 |
| 113 | 2.3543 | 114 | 2.3963 | 115 | 2.4388 | 116 | 2.4817 |
| 117 | 2.5252 | 118 | 2.5692 | 119 | 2.6137 | 120 | 2.6587 |
| 121 | 2.7041 | 122 | 2.7501 | 123 | 2.7966 | 124 | 2.8436 |
| 125 | 2.8912 | 126 | 2.9392 | 127 | 2.9878 | 128 | 3.0369 |
| 129 | 3.0866 | 130 | 3.1367 | 131 | 3.1875 | 132 | 3.2387 |
| 133 | 3.2905 | 134 | 3.3429 | 135 | 3.3958 | 136 | 3.4493 |

| | | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|
| 137 | 3.5033 | 138 | 3.5579 | 139 | 3.6131 | 140 | 3.6688 |
| 141 | 3.7252 | 142 | 3.7820 | 143 | 3.8395 | 144 | 3.8976 |
| 145 | 3.9563 | 146 | 4.0155 | 147 | 4.0754 | 148 | 4.1358 |
| 149 | 4.1969 | 150 | 4.2586 | 151 | 4.3209 | 152 | 4.3838 |
| 153 | 4.4473 | 154 | 4.5115 | 155 | 4.5763 | 156 | 4.6417 |
| 157 | 4.7078 | 158 | 4.7745 | 159 | 4.8419 | 160 | 4.9099 |
| 161 | 4.9785 | 162 | 5.0479 | 163 | 5.1179 | 164 | 5.1886 |
| 165 | 5.2599 | 166 | 5.3319 | 167 | 5.4046 | 168 | 5.4780 |
| 169 | 5.5521 | 170 | 5.6269 | 171 | 5.7024 | 172 | 5.7786 |
| 173 | 5.8555 | 174 | 5.9331 | 175 | 6.0114 | 176 | 6.0905 |
| 177 | 6.1702 | 178 | 6.2508 | 179 | 6.3320 | 180 | 6.4140 |
| 181 | 6.4968 | 182 | 6.5803 | 183 | 6.6645 | 184 | 6.7496 |
| 185 | 6.8354 | 186 | 6.9219 | 187 | 7.0093 | 188 | 7.0974 |
| 189 | 7.1863 | 190 | 7.2760 | 191 | 7.3665 | 192 | 7.4578 |
| 193 | 7.5500 | 194 | 7.6429 | 195 | 7.7366 | 196 | 7.8312 |
| 197 | 7.9266 | 198 | 8.0229 | 199 | 8.1199 | 200 | 8.2179 |
| 201 | 8.3167 | 202 | 8.4163 | 203 | 8.5168 | 204 | 8.6182 |
| 205 | 8.7204 | 206 | 8.8235 | 207 | 8.9275 | 208 | 9.0324 |
| 209 | 9.1382 | 210 | 9.2449 | 211 | 9.3525 | 212 | 9.4611 |
| 213 | 9.5705 | 214 | 9.6809 | 215 | 9.7922 | 216 | 9.9044 |
| 217 | 10.0176 | 218 | 10.1318 | 219 | 10.2469 | 220 | 10.3629 |
| 221 | 10.4800 | 222 | 10.5980 | 223 | 10.7169 | 224 | 10.8369 |
| 225 | 10.9579 | 226 | 11.0799 | 227 | 11.2028 | 228 | 11.3268 |
| 229 | 11.4518 | 230 | 11.5779 | 231 | 11.7050 | 232 | 11.8331 |
| 233 | 11.9622 | 234 | 12.0925 | 235 | 12.2237 | 236 | 12.3561 |
| 237 | 12.4895 | 238 | 12.6240 | 239 | 12.7596 | 240 | 12.8963 |
| 241 | 13.0341 | 242 | 13.1730 | 243 | 13.3130 | 244 | 13.4542 |
| 245 | 13.5965 | 246 | 13.7399 | 247 | 13.8844 | 248 | 14.0302 |
| 249 | 14.1770 | 250 | 14.3251 | 251 | 14.4743 | 252 | 14.6247 |
| 253 | 14.7763 | 254 | 14.9291 | 255 | 15.0831 | 256 | 15.2384 |
| 257 | 15.3948 | 258 | 15.5525 | 259 | 15.7114 | 260 | 15.8716 |
| 261 | 16.0330 | 262 | 16.1957 | 263 | 16.3596 | 264 | 16.5249 |
| 265 | 16.6914 | 266 | 16.8592 | 267 | 17.0283 | 268 | 17.1987 |
| 269 | 17.3705 | 270 | 17.5436 | 271 | 17.7180 | 272 | 17.8938 |
| 273 | 18.0709 | 274 | 18.2494 | 275 | 18.4293 | 276 | 18.6105 |
| 277 | 18.7931 | 278 | 18.9772 | 279 | 19.1626 | 280 | 19.3495 |
| 281 | 19.5378 | 282 | 19.7275 | 283 | 19.9187 | 284 | 20.1113 |
| 285 | 20.3054 | 286 | 20.5009 | 287 | 20.6980 | 288 | 20.8965 |
| 289 | 21.0966 | 290 | 21.2981 | 291 | 21.5012 | 292 | 21.7058 |
| 293 | 21.9120 | 294 | 22.1197 | 295 | 22.3289 | 296 | 22.5398 |
| 297 | 22.7522 | 298 | 22.9662 | 299 | 23.1818 | 300 | 23.3990 |
| 301 | 23.6179 | 302 | 23.8383 | 303 | 24.0605 | 304 | 24.2842 |

| | | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|
| 305 | 24.5097 | 306 | 24.7368 | 307 | 24.9656 | 308 | 25.1961 |
| 309 | 25.4283 | 310 | 25.6622 | 311 | 25.8979 | 312 | 26.1353 |
| 313 | 26.3744 | 314 | 26.6153 | 315 | 26.8580 | 316 | 27.1025 |
| 317 | 27.3488 | 318 | 27.5969 | 319 | 27.8468 | 320 | 28.0985 |
| 321 | 28.3521 | 322 | 28.6075 | 323 | 28.8648 | 324 | 29.1240 |
| 325 | 29.3851 | 326 | 29.6481 | 327 | 29.9130 | 328 | 30.1798 |
| 329 | 30.4486 | 330 | 30.7193 | 331 | 30.9920 | 332 | 31.2667 |
| 333 | 31.5434 | 334 | 31.8220 | 335 | 32.1027 | 336 | 32.3854 |
| 337 | 32.6702 | 338 | 32.9570 | 339 | 33.2459 | 340 | 33.5369 |
| 341 | 33.8300 | 342 | 34.1251 | 343 | 34.4224 | 344 | 34.7219 |
| 345 | 35.0235 | 346 | 35.3272 | 347 | 35.6332 | 348 | 35.9413 |
| 349 | 36.2516 | 350 | 36.5642 | 351 | 36.8790 | 352 | 37.1960 |
| 353 | 37.5153 | 354 | 37.8369 | 355 | 38.1608 | 356 | 38.4870 |
| 357 | 38.8155 | 358 | 39.1463 | 359 | 39.4795 | 360 | 39.8151 |
| 361 | 40.1530 | 362 | 40.4933 | 363 | 40.8361 | 364 | 41.1813 |
| 365 | 41.5289 | 366 | 41.8790 | 367 | 42.2316 | 368 | 42.5866 |
| 369 | 42.9442 | 370 | 43.3043 | 371 | 43.6669 | 372 | 44.0321 |
| 373 | 44.3998 | 374 | 44.7702 | 375 | 45.1431 | 376 | 45.5187 |
| 377 | 45.8969 | 378 | 46.2778 | 379 | 46.6613 | 380 | 47.0475 |
| 381 | 47.4365 | 382 | 47.8281 | 383 | 48.2225 | 384 | 48.6197 |
| 385 | 49.0196 | 386 | 49.4224 | 387 | 49.8279 | 388 | 50.2363 |
| 389 | 50.6475 | 390 | 51.0616 | 391 | 51.4786 | 392 | 51.8985 |
| 393 | 52.3213 | 394 | 52.7470 | 395 | 53.1757 | 396 | 53.6074 |
| 397 | 54.0421 | 398 | 54.4798 | 399 | 54.9205 | 400 | 55.3643 |
| 401 | 55.8112 | 402 | 56.2611 | 403 | 56.7142 | 404 | 57.1704 |
| 405 | 57.6298 | 406 | 58.0923 | 407 | 58.5581 | 408 | 59.0270 |
| 409 | 59.4992 | 410 | 59.9747 | 411 | 60.4534 | 412 | 60.9354 |
| 413 | 61.4208 | 414 | 61.9094 | 415 | 62.4015 | 416 | 62.8969 |
| 417 | 63.3958 | 418 | 63.8980 | 419 | 64.4037 | 420 | 64.9129 |
| 421 | 65.4256 | 422 | 65.9418 | 423 | 66.4615 | 424 | 66.9848 |
| 425 | 67.5117 | 426 | 68.0422 | 427 | 68.5763 | 428 | 69.1140 |
| 429 | 69.6555 | 430 | 70.2006 | 431 | 70.7495 | 432 | 71.3021 |
| 433 | 71.8585 | 434 | 72.4187 | 435 | 72.9827 | 436 | 73.5505 |
| 437 | 74.1222 | 438 | 74.6978 | 439 | 75.2773 | 440 | 75.8608 |
| 441 | 76.4482 | 442 | 77.0396 | 443 | 77.6351 | 444 | 78.2346 |
| 445 | 78.8381 | 446 | 79.4458 | 447 | 80.0576 | 448 | 80.6735 |
| 449 | 81.2936 | 450 | 81.9179 | 451 | 82.5464 | 452 | 83.1792 |
| 453 | 83.8163 | 454 | 84.4577 | 455 | 85.1034 | 456 | 85.7535 |
| 457 | 86.4079 | 458 | 87.0668 | 459 | 87.7302 | 460 | 88.3980 |
| 461 | 89.0703 | 462 | 89.7472 | 463 | 90.4286 | 464 | 91.1147 |
| 465 | 91.8053 | 466 | 92.5006 | 467 | 93.2006 | 468 | 93.9053 |
| 469 | 94.6147 | 470 | 95.3289 | 471 | 96.0480 | 472 | 96.7718 |

| | | | | | | | |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 473 | 97.5005 | 474 | 98.2341 | 475 | 98.9726 | 476 | 99.7161 |
| 477 | 100.4646 | 478 | 101.2181 | 479 | 101.9767 | 480 | 102.7403 |
| 481 | 103.5091 | 482 | 104.2830 | 483 | 105.0621 | 484 | 105.8464 |
| 485 | 106.6359 | 486 | 107.4308 | 487 | 108.2309 | 488 | 109.0364 |
| 489 | 109.8473 | 490 | 110.6637 | 491 | 111.4854 | 492 | 112.3127 |
| 493 | 113.1455 | 494 | 113.9838 | 495 | 114.8278 | 496 | 115.6773 |
| 497 | 116.5326 | 498 | 117.3935 | 499 | 118.2602 | 500 | 119.1326 |
| 501 | 120.0109 | 502 | 120.8950 | 503 | 121.7850 | 504 | 122.6809 |
| 505 | 123.5828 | 506 | 124.4907 | 507 | 125.4047 | 508 | 126.3247 |
| 509 | 127.2508 | 510 | 128.1831 | 511 | 129.1215 | 512 | 130.0662 |
| 513 | 131.0172 | 514 | 131.9745 | 515 | 132.9381 | 516 | 133.9082 |
| 517 | 134.8847 | 518 | 135.8676 | 519 | 136.8571 | 520 | 137.8531 |
| 521 | 138.8557 | 522 | 139.8650 | 523 | 140.8810 | 524 | 141.9037 |
| 525 | 142.9331 | 526 | 143.9694 | 527 | 145.0125 | 528 | 146.0625 |
| 529 | 147.1195 | 530 | 148.1835 | 531 | 149.2545 | 532 | 150.3326 |
| 533 | 151.4178 | 534 | 152.5101 | 535 | 153.6097 | 536 | 154.7166 |
| 537 | 155.8307 | 538 | 156.9523 | 539 | 158.0812 | 540 | 159.2175 |
| 541 | 160.3614 | 542 | 161.5128 | 543 | 162.6718 | 544 | 163.8384 |
| 545 | 165.0128 | 546 | 166.1948 | 547 | 167.3847 | 548 | 168.5824 |
| 549 | 169.7880 | 550 | 171.0015 | 551 | 172.2230 | 552 | 173.4526 |
| 553 | 174.6902 | 554 | 175.9360 | 555 | 177.1900 | 556 | 178.4522 |
| 557 | 179.7227 | 558 | 181.0016 | 559 | 182.2889 | 560 | 183.5846 |
| 561 | 184.8889 | 562 | 186.2017 | 563 | 187.5232 | 564 | 188.8533 |
| 565 | 190.1921 | 566 | 191.5398 | 567 | 192.8963 | 568 | 194.2617 |
| 569 | 195.6360 | 570 | 197.0194 | 571 | 198.4119 | 572 | 199.8134 |
| 573 | 201.2242 | 574 | 202.6442 | 575 | 204.0735 | 576 | 205.5122 |
| 577 | 206.9603 | 578 | 208.4179 | 579 | 209.8851 | 580 | 211.3618 |
| 581 | 212.8482 | 582 | 214.3444 | 583 | 215.8503 | 584 | 217.3661 |
| 585 | 218.8919 | 586 | 220.4276 | 587 | 221.9733 | 588 | 223.5292 |
| 589 | 225.0952 | 590 | 226.6715 | 591 | 228.2581 | 592 | 229.8550 |
| 593 | 231.4624 | 594 | 233.0803 | 595 | 234.7088 | 596 | 236.3479 |
| 597 | 237.9977 | 598 | 239.6583 | 599 | 241.3297 | 600 | 243.0120 |
| 601 | 244.7054 | 602 | 246.4097 | 603 | 248.1252 | 604 | 249.8519 |
| 605 | 251.5899 | 606 | 253.3392 | 607 | 255.0999 | 608 | 256.8721 |
| 609 | 258.6559 | 610 | 260.4512 | 611 | 262.2583 | 612 | 264.0772 |
| 613 | 265.9079 | 614 | 267.7506 | 615 | 269.6052 | 616 | 271.4720 |
| 617 | 273.3509 | 618 | 275.2420 | 619 | 277.1455 | 620 | 279.0614 |
| 621 | 280.9897 | 622 | 282.9306 | 623 | 284.8841 | 624 | 286.8504 |
| 625 | 288.8294 | 626 | 290.8213 | 627 | 292.8262 | 628 | 294.8442 |
| 629 | 296.8752 | 630 | 298.9195 | 631 | 300.9770 | 632 | 303.0480 |
| 633 | 305.1324 | 634 | 307.2304 | 635 | 309.3420 | 636 | 311.4673 |
| 637 | 313.6065 | 638 | 315.7595 | 639 | 317.9266 | 640 | 320.1077 |

| | | | | | | | |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 641 | 322.3030 | 642 | 324.5126 | 643 | 326.7365 | 644 | 328.9749 |
| 645 | 331.2278 | 646 | 333.4953 | 647 | 335.7776 | 648 | 338.0747 |
| 649 | 340.3867 | 650 | 342.7137 | 651 | 345.0558 | 652 | 347.4131 |
| 653 | 349.7858 | 654 | 352.1738 | 655 | 354.5773 | 656 | 356.9964 |
| 657 | 359.4312 | 658 | 361.8818 | 659 | 364.3483 | 660 | 366.8308 |
| 661 | 369.3294 | 662 | 371.8442 | 663 | 374.3754 | 664 | 376.9229 |
| 665 | 379.4869 | 666 | 382.0676 | 667 | 384.6650 | 668 | 387.2793 |
| 669 | 389.9105 | 670 | 392.5587 | 671 | 395.2241 | 672 | 397.9068 |
| 673 | 400.6069 | 674 | 403.3245 | 675 | 406.0596 | 676 | 408.8125 |
| 677 | 411.5833 | 678 | 414.3719 | 679 | 417.1787 | 680 | 420.0036 |
| 681 | 422.8468 | 682 | 425.7085 | 683 | 428.5886 | 684 | 431.4875 |
| 685 | 434.4051 | 686 | 437.3415 | 687 | 440.2970 | 688 | 443.2717 |
| 689 | 446.2655 | 690 | 449.2788 | 691 | 452.3116 | 692 | 455.3640 |
| 693 | 458.4361 | 694 | 461.5282 | 695 | 464.6402 | 696 | 467.7724 |
| 697 | 470.9249 | 698 | 474.0977 | 699 | 477.2911 | 700 | 480.5052 |
| 701 | 483.7400 | 702 | 486.9958 | 703 | 490.2726 | 704 | 493.5706 |
| 705 | 496.8900 | 706 | 500.2308 | 707 | 503.5932 | 708 | 506.9774 |
| 709 | 510.3835 | 710 | 513.8116 | 711 | 517.2619 | 712 | 520.7344 |
| 713 | 524.2294 | 714 | 527.7471 | 715 | 531.2874 | 716 | 534.8507 |
| 717 | 538.4370 | 718 | 542.0465 | 719 | 545.6793 | 720 | 549.3356 |
| 721 | 553.0155 | 722 | 556.7192 | 723 | 560.4469 | 724 | 564.1986 |
| 725 | 567.9746 | 726 | 571.7750 | 727 | 575.6000 | 728 | 579.4497 |
| 729 | 583.3242 | 730 | 587.2238 | 731 | 591.1486 | 732 | 595.0988 |
| 733 | 599.0744 | 734 | 603.0758 | 735 | 607.1030 | 736 | 611.1563 |
| 737 | 615.2357 | 738 | 619.3415 | 739 | 623.4738 | 740 | 627.6328 |
| 741 | 631.8187 | 742 | 636.0316 | 743 | 640.2717 | 744 | 644.5392 |
| 745 | 648.8343 | 746 | 653.1571 | 747 | 657.5079 | 748 | 661.8867 |
| 749 | 666.2939 | 750 | 670.7295 | 751 | 675.1937 | 752 | 679.6868 |
| 753 | 684.2089 | 754 | 688.7602 | 755 | 693.3409 | 756 | 697.9512 |
| 757 | 702.5913 | 758 | 707.2613 | 759 | 711.9615 | 760 | 716.6921 |
| 761 | 721.4531 | 762 | 726.2450 | 763 | 731.0678 | 764 | 735.9217 |
| 765 | 740.8070 | 766 | 745.7238 | 767 | 750.6723 | 768 | 755.6529 |
| 769 | 760.6655 | 770 | 765.7106 | 771 | 770.7882 | 772 | 775.8986 |
| 773 | 781.0420 | 774 | 786.2187 | 775 | 791.4287 | 776 | 796.6724 |
| 777 | 801.9500 | 778 | 807.2616 | 779 | 812.6075 | 780 | 817.9880 |
| 781 | 823.4031 | 782 | 828.8533 | 783 | 834.3386 | 784 | 839.8594 |
| 785 | 845.4158 | 786 | 851.0081 | 787 | 856.6365 | 788 | 862.3012 |
| 789 | 868.0025 | 790 | 873.7407 | 791 | 879.5158 | 792 | 885.3283 |
| 793 | 891.1783 | 794 | 897.0661 | 795 | 902.9919 | 796 | 908.9559 |
| 797 | 914.9585 | 798 | 920.9998 | 799 | 927.0801 | 800 | 933.1997 |
| 801 | 939.3588 | 802 | 945.5577 | 803 | 951.7966 | 804 | 958.0758 |
| 805 | 964.3956 | 806 | 970.7561 | 807 | 977.1578 | 808 | 983.6008 |

| | | | | | | | |
|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|-----------|
| 809 | 990.0853 | 810 | 996.6118 | 811 | 1003.1800 | 812 | 1009.7910 |
| 813 | 1016.4450 | 814 | 1023.1420 | 815 | 1029.8820 | 816 | 1036.6650 |
| 817 | 1043.4930 | 818 | 1050.3640 | 819 | 1057.2800 | 820 | 1064.2400 |
| 821 | 1071.2460 | 822 | 1078.2960 | 823 | 1085.3920 | 824 | 1092.5340 |
| 825 | 1099.7220 | 826 | 1106.9570 | 827 | 1114.2380 | 828 | 1121.5670 |
| 829 | 1128.9420 | 830 | 1136.3660 | 831 | 1143.8370 | 832 | 1151.3570 |
| 833 | 1158.9250 | 834 | 1166.5420 | 835 | 1174.2080 | 836 | 1181.9240 |
| 837 | 1189.6890 | 838 | 1197.5050 | 839 | 1205.3710 | 840 | 1213.2890 |
| 841 | 1221.2570 | 842 | 1229.2770 | 843 | 1237.3480 | 844 | 1245.4720 |
| 845 | 1253.6480 | 846 | 1261.8770 | 847 | 1270.1600 | 848 | 1278.4950 |
| 849 | 1286.8850 | 850 | 1295.3290 | 851 | 1303.8270 | 852 | 1312.3810 |
| 853 | 1320.9900 | 854 | 1329.6540 | 855 | 1338.3740 | 856 | 1347.1510 |
| 857 | 1355.9840 | 858 | 1364.8750 | 859 | 1373.8230 | 860 | 1382.8290 |
| 861 | 1391.8930 | 862 | 1401.0160 | 863 | 1410.1970 | 864 | 1419.4380 |
| 865 | 1428.7390 | 866 | 1438.1000 | 867 | 1447.5220 | 868 | 1457.0040 |
| 869 | 1466.5480 | 870 | 1476.1530 | 871 | 1485.8210 | 872 | 1495.5510 |
| 873 | 1505.3440 | 874 | 1515.2010 | 875 | 1525.1210 | 876 | 1535.1050 |
| 877 | 1545.1540 | 878 | 1555.2680 | 879 | 1565.4470 | 880 | 1575.6930 |
| 881 | 1586.0040 | 882 | 1596.3820 | 883 | 1606.8280 | 884 | 1617.3410 |
| 885 | 1627.9220 | 886 | 1638.5710 | 887 | 1649.2900 | 888 | 1660.0780 |
| 889 | 1670.9350 | 890 | 1681.8630 | 891 | 1692.8620 | 892 | 1703.9310 |
| 893 | 1715.0730 | 894 | 1726.2860 | 895 | 1737.5730 | 896 | 1748.9320 |
| 897 | 1760.3650 | 898 | 1771.8720 | 899 | 1783.4530 | 900 | 1795.1090 |
| 901 | 1806.8410 | 902 | 1818.6490 | 903 | 1830.5330 | 904 | 1842.4940 |
| 905 | 1854.5330 | 906 | 1866.6500 | 907 | 1878.8450 | 908 | 1891.1190 |
| 909 | 1903.4730 | 910 | 1915.9060 | 911 | 1928.4200 | 912 | 1941.0160 |
| 913 | 1953.6930 | 914 | 1966.4520 | 915 | 1979.2940 | 916 | 1992.2190 |
| 917 | 2005.2270 | 918 | 2018.3200 | 919 | 2031.4980 | 920 | 2044.7620 |
| 921 | 2058.1110 | 922 | 2071.5470 | 923 | 2085.0700 | 924 | 2098.6800 |
| 925 | 2112.3790 | 926 | 2126.1670 | 927 | 2140.0440 | 928 | 2154.0110 |
| 929 | 2168.0690 | 930 | 2182.2170 | 931 | 2196.4580 | 932 | 2210.7910 |
| 933 | 2225.2170 | 934 | 2239.7360 | 935 | 2254.3500 | 936 | 2269.0580 |
| 937 | 2283.8620 | 938 | 2298.7620 | 939 | 2313.7590 | 940 | 2328.8530 |
| 941 | 2344.0450 | 942 | 2359.3350 | 943 | 2374.7250 | 944 | 2390.2140 |
| 945 | 2405.8040 | 946 | 2421.4960 | 947 | 2437.2890 | 948 | 2453.1850 |
| 949 | 2469.1840 | 950 | 2485.2860 | 951 | 2501.4940 | 952 | 2517.8060 |
| 953 | 2534.2250 | 954 | 2550.7500 | 955 | 2567.3820 | 956 | 2584.1230 |
| 957 | 2600.9720 | 958 | 2617.9310 | 959 | 2634.9990 | 960 | 2652.1790 |
| 961 | 2669.4710 | 962 | 2686.8740 | 963 | 2704.3910 | 964 | 2722.0220 |
| 965 | 2739.7670 | 966 | 2757.6270 | 967 | 2775.6040 | 968 | 2793.6970 |
| 969 | 2811.9080 | 970 | 2830.2380 | 971 | 2848.6870 | 972 | 2867.2550 |
| 973 | 2885.9440 | 974 | 2904.7550 | 975 | 2923.6880 | 976 | 2942.7450 |

| | | | | | | | |
|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| 977 | 2961.9250 | 978 | 2981.2300 | 979 | 3000.6600 | 980 | 3020.2170 |
| 981 | 3039.9020 | 982 | 3059.7140 | 983 | 3079.6550 | 984 | 3099.7260 |
| 985 | 3119.9270 | 986 | 3140.2600 | 987 | 3160.7260 | 988 | 3181.3240 |
| 989 | 3202.0570 | 990 | 3222.9240 | 991 | 3243.9280 | 992 | 3265.0680 |
| 993 | 3286.3460 | 994 | 3307.7620 | 995 | 3329.3180 | 996 | 3351.0140 |
| 997 | 3372.8520 | 998 | 3394.8310 | 999 | 3416.9540 | 1000 | 3439.2210 |
| 1001 | 3461.6330 | 1002 | 3484.1910 | 1003 | 3506.8970 | 1004 | 3529.7500 |
| 1005 | 3552.7520 | 1006 | 3575.9030 | 1007 | 3599.2060 | 1008 | 3622.6610 |
| 1009 | 3646.2680 | 1010 | 3670.0300 | 1011 | 3693.9460 | 1012 | 3718.0180 |
| 1013 | 3742.2480 | 1014 | 3766.6350 | 1015 | 3791.1810 | 1016 | 3815.8880 |
| 1017 | 3840.7550 | 1018 | 3865.7850 | 1019 | 3890.9780 | 1020 | 3916.3350 |
| 1021 | 3941.8580 | 1022 | 3967.5470 | 1023 | 3993.4040 | | |

付属書C（情報） 表示システムがグレースケール標準表示関数に一致する精度の測定

C.1 適合性と測定基準に関する一般的考察

グレースケール標準表示関数との適合性を証明することは、例えば、全デジタルシステムのDICOMメッセージへの応答を確認するよりも更に複雑な仕事である。

表示システムは輝度として直接的であれ、光学濃度として間接的であれ、アナログ出力を最後に作る。いくつかの表示システムについては、このアナログ出力は確認されるべき表示システムの表示関数の中に存在する何らかの欠陥に加えて、様々な不完全さによって影響され得る。例えば、最終提示画像の中には（例えば、ハードコピープリンタの場合、フィルム、プリントあるいは現像の不均一性から生じる）測定可能なしかし放射線診断学における画像の質の問題を通常示さない、低空間周波数における空間的不均一性が存在することがある。

CRTとライトボックスがそれら自身の空間的不均一性を同様に導入することに注意する価値がある。これらの不均一性はグレースケール標準表示関数およびここで述べられる測定手続きの範囲外である。しかし、これらのために、グレースケール標準表示関数によって完全に提示されるテスト画像でさえも、現実のCRTあるいは現実のライトボックス上で完全には知覚されないであろう。

さらに、「（グレースケール標準表示関数に）どれだけ近ければ、十分に近いのか？」という質問には、二つのほぼ同一の画像提示（例えば、同等の隣接したライトボックス上に置かれた、二枚のほぼ同一のフィルム）が観察者に提示されるときに、表示関数におけるどのような差異が「丁度認識できる」かを決定するための、まだ実行されていない心理物理学的研究に答えは依存するから、現在は答えられない。

さらに、与えられた表示システムの評価は視覚テスト（例えば、一つ以上のテスト画像中の多くの低コントラストターゲットの知覚されるコントラストの評価）、あるいは計器（例えば、光度計あるいは濃度計）から得られた測定データに基づく定量的な解析に基づくことができる。

定量的なアプローチでさえ、異なった方法で取り扱われることがある。例えば、測定出力の中の予想される不確定さ（繰り返しのない変動）を示す「エラーバー」とおそらく一緒に、P値に対する、測定されたそして理論的なアナログ出力（即ち、輝度あるいは光学濃度）のプロットを単純に重ね合わせることができるであろう。数学的により優雅な別法として、全ての測定データ点は、表示システムが標準表示関数に如何に良く適合するかを決定する一つ以上の定量値（測定基準）を生み出し、そして表示システムの基礎となる表示関数を決定することを試みる、統計的で数学的な解析に対する入力として使用されることが可能である。

この後と次の付属書の中では、測定基準解析の後者のタイプの例が使用されるが、その中で測定データは特性曲線の形を確認することを意図した「FIT」テストと、理想のグレースケール標準表示関数から拡散する度合いを示すことを意図した「LUM」テストを使用して解析される。このアプローチは、例えば、ある表示システムの表示関数に、いかに首尾良く改良がなされたかを、定量的に証明するために適用された。

この特定測定基準アプローチの方法論の記述を続ける前に、これは、必ずしもすべての表示システムを評価するために最も適切なアプローチとしてではなく、ひとつの可能性のあるアプローチとして提供されることに注意すべきである。特に以下の注記は、何れの特定測定基準アプローチからの結果を選択するか解釈する前に、考慮されるべきである。

1) 解析の中で意味を持って使用できるP値の数を制限する実務的な論点がある。例えば、8ビット

ビデオモニターのスクリーン上の決まった位置から256の可能なすべての輝度を測定することは多分实际的であるが、しかし12ビットのフィルムプリンタによって、理論的にはプリントできる4096の濃度のすべてを意味があるように測定することは多分实际的ではない。实际的でない第一の理由は、濃度計の（あるいはフィルムデジタイザでも）限られた精度である。第二の理由は、フィルム濃度測定はCRT光度計測定とは異なり表示領域上の異なる位置から得られるので、フィルムの中に存在する何れかの空間的不均一性もハードコピー測定に影響する。現在のハードコピープリンタと濃度計は両者とも、12ビットのP値のちょうど最下位ビットの中の変動によって引き起こされる変動よりも非常に悪い絶対光学濃度の精度限界を持っている。一般的にP値のより大きな数を選択することは、原理的には、「捕らえられる」べきグレースケール標準表示関数からのより局所的な逸脱は許すが、これらの各々の信号対雑音比（あるいは有意性）は減少させられるであろう。

2) ある特定表示システムに対する測定データが意味のある（測定値の複数集合が測定されたとき、データにおける制限された再現性によって示されるような）「雑音」を持つ場合は、適合手法の雑音への過剰反応を防ぐために、データそれ自身と共に、入力データ集合における既知の標準偏差を明示的に利用することによって、「FIT」と「LUM」測定基準を超えた、統計的解析手法を適用することが多分望ましい。例えば、参考文献C1の節「一般線形最小二乗法」および参考文献C2の章「多項式への最小二乗適合」を参照のこと。測定雑音が解析の中で明示的に考慮されない場合は、適合に關係するデータ点の「測定基準の返す平均二乗誤差」は、表示関数での不正確さによる誤差と測定雑音による誤差の結合した影響を含むので、誤って高くなることがある。

3) 可能ならば、考慮される測定基準の感度と特異性は、視覚テストに対して点検されるべきである。例えば、多くの周囲輝度において、多くの低コントラストステップをもつデジタルテストパターンは、「実験室標準」グレースケール標準表示関数プリンタでプリントされることができる、そして評価中のプリンタでもプリントされることができる。得られたフィルムは、その後人間の観察者によって比較されるためにライトボックス上に並べて置かれる。良い測定基準技術は、グレースケール標準表示関数からの（何れの形の）逸脱の存在を人間の観察者と同じ感度と再現性で、検出すべきである。例えば、表示システムがDDL値の非常に短い間隔に対してさえ、余りにもコントラストが強い、非常に平坦である、あるいは（更に悪いことに）単調でない特性曲線を持つ場合は、測定基準は人間の観察者がするのと同様に、強くその異常を検出すること、そして反応することができるべきである。

4) 最後に、表示システムからのデータの中で実験的に出会う非再現性に加えて、追加の可能性がある変動の原因を考慮する理由があることがある。例えば、（CRTに対しては時間的な、プリンタに対しては空間的な）テストパターンにおけるP値の順序付けの変化が、結果に影響を及ぼすことがある。プリンタに関しては、異なる媒体への切り換えが結果に影響を及ぼすことがある。結果が、何れかのあるいは全てのそのような変化の存在において安定である場合には、より高い信頼を測定基準から得られた結果に置くことができる。

C.2 方法論

ステップ(1)

試験表示システムの特性曲線は、実用的にできるだけ多くの測定値で決定されるべきである（節D.1, D.2とD.3を参照）。グレースケール標準表示関数を使用して、JNDの断片の数は等しい間隔をおいたP値ステップ間の各輝度間隔に対して計算される。「輝度間隔あたりのJND」は直接にあるいは反復して計算されることがある。例えば、あらゆる輝度間隔に僅かのJNDだけが属する場合は、直線補間が用いられることがある。表示システムのグレースケール応答の変換後に、あらゆるP値に対する輝度レベルは L_i であり、そして対応する標準輝度レベルは L_j である； d_j はグレー

スケール標準表示関数上の P 値の与えられた数に対する「輝度間隔あたりの JND」を明記する。その後、変換された表示関数に対する「輝度間隔あたりの JND」は次式である。

$$r = d_j (L_{i+1} - L_i)(L_{j+1} + L_j) / ((L_{i+1} + L_i)(L_{j+1} - L_j)) \quad (C1)$$

さらに、反復法は、輝度値を与える輝度における JND ステップを定義するグレースケール標準表示関数のみを必要として、「輝度間隔あたりの JND」の数を計算するために使用されることができる。これは輝度間隔の中の完全な JND ステップ、そしてそれから残りの断片ステップの数を単に数えることによってなされる。間隔の輝度下端から始め、一 JND ステップに対して必要とされる輝度ステップをグレースケール標準表示関数から計算する。それから輝度範囲の上端の輝度値を越えるまで、一つの JND ステップの中で低い輝度値から高い輝度値へステップを続ける。この最後のステップが表わす一つの JND の断片部分を計算すれば、完全な整数 JND ステップの全数に、最後の完全でないステップの断片部分を加えたものは、輝度間隔の中の JND ステップの断片の数である。

輝度間隔のインデックス (水平軸) に対する輝度間隔あたりの JND の数 (垂直軸) をプロットする。このカーブは輝度間隔対 JND 曲線として参照される。輝度間隔対 JND のプロットの例を図 C - 1 に示す。このプロットは線形回帰を適用するとき、水平線によって非常に良く一致する。

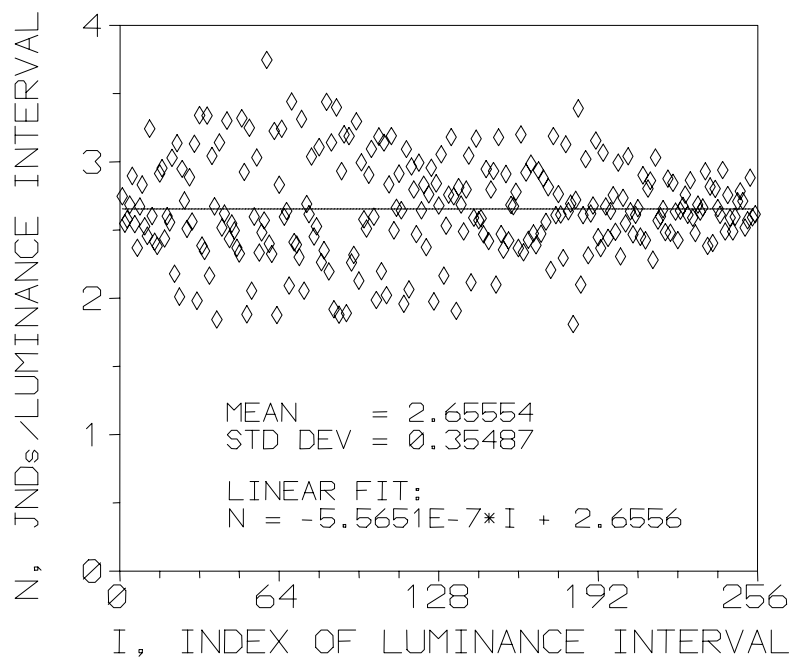


図 C - 1 LUMおよびFIT適合性測定基準についての説明

輝度間隔あたり JND のデータは二つの統計的な基準で評価される [C4]。一番目は試験表示関数のグレースケール標準表示関数との全体的一致を評価する。二番目の基準はグレースケール標準表示関数の試験表示関数への近似を局所的に解析する。

ステップ (2)

回帰解析の二つの関係する測定は、正規複数線形回帰の仮定が、データに対して立証された後に適用される [C3]。FIT テストと名付けられた一番目の基準は、試験輝度分布の「輝度間隔対 JND」カ

ープを、異なる次数の多項式近似で合わせることを試みる。グレースケール標準表示関数は輝度範囲全体にわたって、厳密に一つの「輝度間隔あたりJND」によって特徴付けられる。それゆえ、理想的には「輝度間隔のインデックス」対「輝度間隔あたりJND」のデータは、「輝度間隔あたりJND」の局所的平均と全体平均の両者共、与えられた輝度範囲に渡って一定であることを示している、「輝度間隔あたりJND」の定数の水平線によって最も良く適合する。カーブがより高次のカーブによってより良く一致する場合は、分布はグレースケール標準表示関数を厳密に近似してはいない。回帰解析は3次カーブまでの比較を試験すべきである。

第二の基準、輝度均一性測定基準(LUM)は、輝度ステップの大きさが、輝度範囲にわたって知覚的大きさ(即ち、JND)において均一であるかどうかを解析する。これは「輝度間隔あたりJND」の水平線によるカーブ近似の平均二乗誤差(RMSE)によって測定される。「輝度間隔あたりJND」のより小さいRMSEは、試験表示関数がグレースケール標準表示関数を顕微鏡的な尺度で、より厳密に近似する。

FITとLUM測定基準の双方は、標準統計パッケージで便利に計算されることが可能である。

試験輝度分布がFITテストを通ると仮定すると、その時は分布の質の基準は、それらの平均値からの「輝度間隔あたりJND」の標準偏差の一つの定量的測定(LUM)によって決定される。臨床診療がFITおよびLUM値に対する許容度を決定することが期待される。

試験表示関数のグレースケール標準表示関数への近い近似に到達するための重要な因子は、表示システムの離散出力レベルの数である。例えば、LUM基準は、コントラスト解像度を減少する犠牲を払って全可能出力デジタル化解像度を維持する一方で、可能なDDLの部分集合のみを使用することによって改良される。

LUMはグレースケール標準表示関数の中の離散出力グレーレベルの数の選択によって影響される一方、出力レベルの適切な数は、グレースケール標準表示関数標準化に独立して起こることがある可能なグレースケール画像処理を含んでいる、臨床的应用によって決定される。このように、PS 3.14は出力のグレーレベルの正確な数を規定しない。しかしながら、一般的には、見分けを付けることが可能なグレーレベルの数が大きければ大きい程、コントラスト解像度が増加するので、可能な画像の質はより高くなる。変換された表示関数に対する、必要な出力駆動レベルの数は、表示システムの標準化に先立って(表示システムの臨床的应用に基づいて)決定されることが勧告されるので、その結果、この情報は必要とされるよりも少ない出力レベルで、グレースケール分布を使用することを避けるために、変換を計算するときを使用できる。

C.3 引用文献

- [C1] Press, William H, et al., Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, 1988, Section "General Linear Least Squares"
- [C2] Bevington, Phillip R., Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, McGraw-Hill, 1969, the chapter "Least-Squares Fit to a Polynomial".
- [C3] Kleinbaum DG, Kupper LL, Muller KE, Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods, Duxbury Press, 2nd Edition, pp 45-49, 1987.
- [C4] Hemminger, B., Muller, K., "Performance Metric for evaluating conformance of medical image displays with the ACR/NEMA display function standard", SPIE Medical Imaging 1997, editor Yongmin Kim, vol 3031-25, 1997.

付属書D（情報） グレースケール標準表示関数への適合性を達成するための説明

以下の章は、グレースケール標準表示関数への適合性が、透過型と反射型媒体上に画像提示（ハード・コピー）を作成するシステムと同様に、放射型（ソフトコピー）表示システムに対して、達成されるであろう方法を説明する。各節は、1）システム特性曲線を測定するための手続き、2）表示システムの輝度範囲へのグレースケール標準表示関数の適用、3）グレースケール標準表示関数の実装、そして、4）付属書Cの中で提案される適合性基準の適用、に関する四つの副節を含んでいる。

表示システムがグレースケール標準表示関数に適合するために、表示システムを構成するかあるいはその性能を変更するための異なった方法があることが強調される。事実、多分、表示システムは規格への適合性を維持するために、自分自身を自動的に較正することがある。それゆえ、以下の三つの説明は単なる例にすぎない。

如何なる表示システム、ハードコピーあるいはソフトコピーの輝度も、光度計で測定されることがある。光度計は以下の特性を持つべきである：

- 動作のその全範囲にわたって絶対輝度レベルの3%以内の精度であること。
- 動作のその範囲の中でのどの輝度レベルにおいても、最下位数の少なくとも二倍の相対精度を持つこと。
- 表示システムの最小測定輝度の10分の1の輝度レベルでこの精度を保つこと。
- 周囲のバックグラウンドに重ならず、測定領域のみを取り込むために十分小さな受容角を持つこと。

注：光度計は表示面に（吸引カップで）直接接するタイプのことがあり、あるいは表示面から離して保持するタイプのことがある。後者の場合は、光度計はテストパターンの背景領域からの光を含む、外側の光源を除くように良く防止されるべきである。

フィルム表示システムについては、光度計はバックグラウンドの照度とフィルムがその上で表示されるライトボックスの輝度を測定するために、適切に使用されるであろう。フィルム表示システムの輝度特性は光度計で直接測定されるか、あるいはフィルムの測定された光学濃度と、測定されたバックグラウンド照度とライトボックス輝度に対する値を使用して間接的に測定される。

D.1 放射型表示システム

D.1.1 システム特性曲線の測定

放射型表示システムの特性的輝度応答が測定される前に、製造者によって推奨された通りウォームアップすることが許される、そして製造者の性能仕様に適合するように調整される。特に、表示の黒と白レベルを設定する調整手続きは、表示システムの製造者から得られるべきである。目標は、弁別域（JND）の最も高い可能な数を結果として得るために、アーチファクトをもたらずに表示のダイナミック輝度範囲を最大にすることである。

注：システムが適切に設定されたかどうかの簡単なテストは、SMPTE パターンにおける5%と95%正方形を観察することによって実行できる。5%正方形とその周囲の0%との間の識別されるコントラストは、95%正方形と白の正方形との間で識別されるコントラストに等しい。

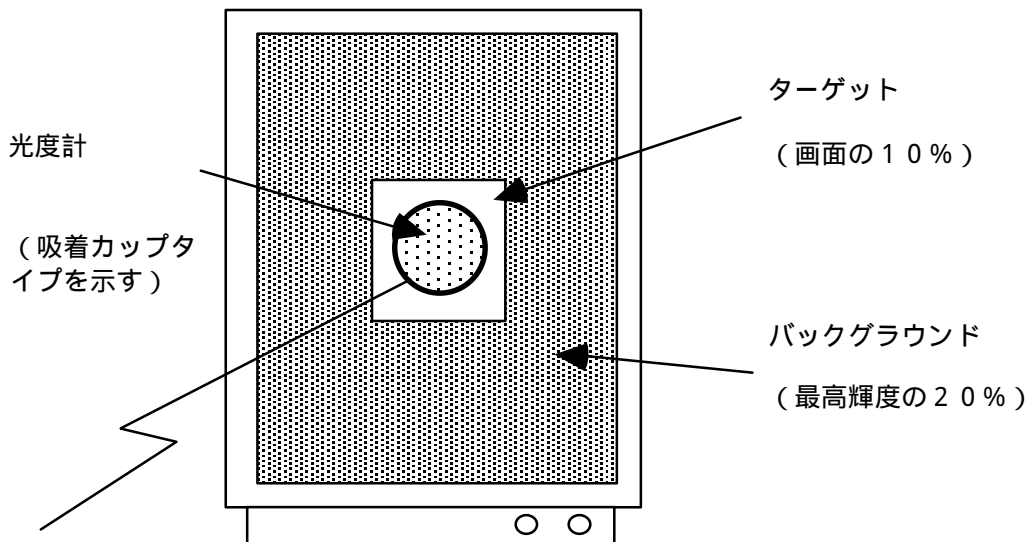
表示システムの特性曲線の測定は、次のもので構成されるテストパターン（図D.1-1）を使用して実施される：

システムによって表示される画素の総数の10%を含むディスプレイの中心に置かれた正方

形の測定領域

ターゲットを囲んでいる最高輝度の20%の全画面均一のバックグラウンド。

注：表示画素の総数の10%の測定領域および最高輝度の20%に設定された周囲で、モニターにおける内部光散乱は、CRTモニター上に表示されるときに、胸部X線写真のようなX線写真において見られる輝度範囲に典型的に匹敵する輝度範囲を生じる。



図D.1-1 テストパターンは低輝度背景領域の中心における可変強度の正方形である。

注：1.例えば、2048×2560画素のマトリックスをもつ5百万画素表示システムではターゲットは各辺724画素をもつ正方形である。

2.理想的には、テストパターンは全画面を満たすべきである。あるウィンドウ操作環境の下では、ディスプレイからあるユーザインタフェースオブジェクト、特に画面上部のメニューバーを取り除くことは難しいことがある。この場合、背景は可能な限り画面の多くを満たすべきである。

表示システムの特性格線は以下によって決定されるであろう：

- すべての周辺光を消す(吸着カップ光度計が使用される場合、あるいは手持ち光度計が表示スクリーン上に影を映す場合のみ必要)；
- 上記テストパターンを表示する；
- 測定領域に対するDDLを、0で始まり、そして最大DDLに到達するまで各ステップで増加する、異なる値のシーケンスに設定する；
- 各コマンド値で測定領域の輝度を測定し、そして記録するために光度計を使用する。

付属書Cの中で議論したように、測定がそこでされたDDLの数と分布は、輝度範囲全体にわたって表示システムの特性格線を正確にモデル化するために十分でなければならない。

注：1.手持ち光度計が使用される場合は、周囲の背景に重ならず、輝度が測定領域の中心で測定されるように、表示画面から少し離れて置かれるべきである。この距離は光度計の製造者によって提供される受容

角仕様を使って計算できる。

2. DDLの正確な数と分布は表示システムの特性と、そしてシステムの特性曲線を補間するために使用される数学的手法の両者に基づくべきである。少なくとも64の異なるコマンド値がこの手続きにおいて使用されることが推奨される。

3. 連続的な輝度測定は表示システムが常に安定状態に到達する時間間隔で実行されるべきである。0のDDLで最初の測定をする前にシステムが安定することを許すことは特に重要であろう。

規格の節で述べたように、見かけの特性曲線への周辺光の影響は、グレースケール標準表示関数に適合する表示システムを構成するときには、常に含めなければならない。

ディスプレイ画面上に影を映さない手持ち光度計が特性曲線を測定するために使用される場合は、表示装置によって生成された輝度と周辺光の影響の和が同時に測定されることがある。

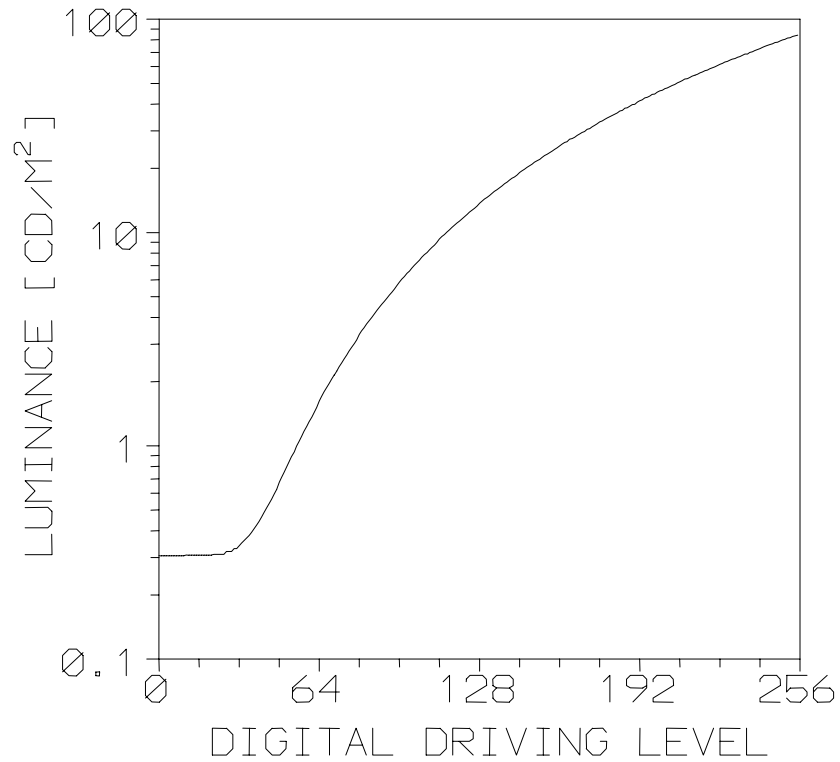
吸引カップ光度計が輝度測定に使用される場合、あるいは手持ちの光度計がディスプレイ画面上に影を映す場合には、特性曲線を測定する間はすべての周辺光は消灯されるべきである。周辺光の影響は分離して決定される：表示システムは消灯され、周辺光が点灯され、そしてディスプレイ画面で周辺光の散乱によって生成された輝度は、その受容角は画面の主な部分を含んでおり、そして測定はディスプレイ画面の外側の領域からの直接照明によって影響されないために、表示画面から少し離れた位置に光度計を置くことによって測定される。周辺光に関する輝度は、システムの有効な特性曲線を決定するために、表示システムによって生成された以前に測定された輝度レベルに加算される。

注： 周囲照明条件の変化は、この規格に対する適合性を維持するために、表示サブシステムの再校正を必要とすることがある。

以下に、表示関数の測定と変換に関する一例を示す。この例の表示システムは表示制御器を持つCRTモニターである。表示制御器は8ビット入力精度と10ビット出力精度でDDLの変換を可能にすると仮定される。

輝度は狭い(1度)受容角をもつ光度計で測定される。周辺光レベルは可能な限り低く調整された。局所的に明るい部分は見えなかった。

- 1) 最大輝度は、測定領域に対するDDLを最高輝度を得る値に、そして周囲のDDLを中間DDL範囲に設定した時に測定された。この測定から、測定領域の周囲に対する輝度(最大輝度の20%)が計算された。
- 2) 周辺光は消灯された。図D.1-1のテストパターンの測定領域の中心に置かれた光度計で、輝度は0から255まで1の増分で入力レベル D_m を変えて測定された。仮定の表示制御器の変換演算子は、入力での8ビットを出力での10ビットに線形に写像した。測定されたデータは与えられた動作条件とこのテストパターンに対して、特性曲線 $L = F(D_m)$ を表わす。
- 3) 次に、CRTが消灯され、そして周辺光は点灯された。CRT面上に影を映さず、そしてその開口はCRT面の主な部分から散乱された光を遮断するために、光度計はCRTの中心軸上で十分遠くに置かれた。CRT面上の周辺光によって生成された 0.3 cd/m^2 の測定された輝度は特性曲線の周辺光なしで測定された輝度値に加えられた。この結果は表D.1-1の中に記載され、図D.1-2の中にプロットされている。



図D.1-2 周辺光をもつ放射型表示システムの測定された特性曲線

表D.1-1 測定された特性曲線と周辺光の加算

| DDL | 輝度 | DDL | 輝度 | DDL | 輝度 | DDL | 輝度 |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 0 | 0.305 | 1 | 0.305 | 2 | 0.305 | 3 | 0.305 |
| 4 | 0.305 | 5 | 0.305 | 6 | 0.305 | 7 | 0.305 |
| 8 | 0.305 | 9 | 0.305 | 10 | 0.305 | 11 | 0.307 |
| 12 | 0.307 | 13 | 0.307 | 14 | 0.307 | 15 | 0.307 |
| 16 | 0.307 | 17 | 0.307 | 18 | 0.307 | 19 | 0.307 |
| 20 | 0.307 | 21 | 0.307 | 22 | 0.310 | 23 | 0.310 |
| 24 | 0.310 | 25 | 0.310 | 26 | 0.310 | 27 | 0.320 |
| 28 | 0.320 | 29 | 0.320 | 30 | 0.330 | 31 | 0.330 |
| 32 | 0.340 | 33 | 0.350 | 34 | 0.360 | 35 | 0.370 |
| 36 | 0.380 | 37 | 0.392 | 38 | 0.410 | 39 | 0.424 |
| 40 | 0.442 | 41 | 0.464 | 42 | 0.486 | 43 | 0.512 |
| 44 | 0.534 | 45 | 0.562 | 46 | 0.594 | 47 | 0.626 |
| 48 | 0.674 | 49 | 0.710 | 50 | 0.750 | 51 | 0.796 |
| 52 | 0.842 | 53 | 0.888 | 54 | 0.938 | 55 | 0.994 |
| 56 | 1.048 | 57 | 1.108 | 58 | 1.168 | 59 | 1.232 |
| 60 | 1.294 | 61 | 1.366 | 62 | 1.438 | 63 | 1.512 |

| | | | | | | | |
|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 64 | 1.620 | 65 | 1.702 | 66 | 1.788 | 67 | 1.876 |
| 68 | 1.960 | 69 | 2.056 | 70 | 2.154 | 71 | 2.248 |
| 72 | 2.350 | 73 | 2.456 | 74 | 2.564 | 75 | 2.670 |
| 76 | 2.790 | 77 | 2.908 | 78 | 3.022 | 79 | 3.146 |
| 80 | 3.328 | 81 | 3.460 | 82 | 3.584 | 83 | 3.732 |
| 84 | 3.870 | 85 | 4.006 | 86 | 4.156 | 87 | 4.310 |
| 88 | 4.456 | 89 | 4.608 | 90 | 4.766 | 91 | 4.944 |
| 92 | 5.104 | 93 | 5.268 | 94 | 5.444 | 95 | 5.630 |
| 96 | 5.864 | 97 | 6.050 | 98 | 6.238 | 99 | 6.438 |
| 100 | 6.610 | 101 | 6.820 | 102 | 7.024 | 103 | 7.224 |
| 104 | 7.428 | 105 | 7.644 | 106 | 7.872 | 107 | 8.066 |
| 108 | 8.298 | 109 | 8.528 | 110 | 8.752 | 111 | 8.982 |
| 112 | 9.330 | 113 | 9.574 | 114 | 9.796 | 115 | 10.060 |
| 116 | 10.314 | 117 | 10.560 | 118 | 10.820 | 119 | 11.080 |
| 120 | 11.340 | 121 | 11.620 | 122 | 11.880 | 123 | 12.180 |
| 124 | 12.460 | 125 | 12.700 | 126 | 13.020 | 127 | 13.300 |
| 128 | 13.720 | 129 | 14.020 | 130 | 14.360 | 131 | 14.640 |
| 132 | 14.940 | 133 | 15.300 | 134 | 15.600 | 135 | 15.900 |
| 136 | 16.240 | 137 | 16.560 | 138 | 16.920 | 139 | 17.220 |
| 140 | 17.600 | 141 | 17.940 | 142 | 18.240 | 143 | 18.640 |
| 144 | 19.120 | 145 | 19.460 | 146 | 19.800 | 147 | 20.260 |
| 148 | 20.560 | 149 | 20.920 | 150 | 21.360 | 151 | 21.760 |
| 152 | 22.060 | 153 | 22.520 | 154 | 22.960 | 155 | 23.300 |
| 156 | 23.700 | 157 | 24.080 | 158 | 24.600 | 159 | 24.980 |
| 160 | 25.520 | 161 | 26.040 | 162 | 26.480 | 163 | 26.700 |
| 164 | 27.380 | 165 | 27.620 | 166 | 28.040 | 167 | 28.580 |
| 168 | 28.980 | 169 | 29.400 | 170 | 29.840 | 171 | 30.540 |
| 172 | 30.800 | 173 | 31.380 | 174 | 31.880 | 175 | 32.400 |
| 176 | 33.060 | 177 | 33.400 | 178 | 34.040 | 179 | 34.400 |
| 180 | 34.840 | 181 | 35.360 | 182 | 35.900 | 183 | 36.400 |
| 184 | 37.060 | 185 | 37.400 | 186 | 38.300 | 187 | 38.420 |
| 188 | 39.160 | 189 | 39.760 | 190 | 39.980 | 191 | 40.840 |
| 192 | 41.540 | 193 | 41.900 | 194 | 42.800 | 195 | 43.060 |
| 196 | 43.620 | 197 | 44.520 | 198 | 44.620 | 199 | 45.500 |
| 200 | 46.100 | 201 | 46.380 | 202 | 47.400 | 203 | 47.600 |
| 204 | 48.320 | 205 | 49.060 | 206 | 49.380 | 207 | 50.320 |
| 208 | 50.920 | 209 | 51.600 | 210 | 52.420 | 211 | 52.680 |
| 212 | 53.520 | 213 | 54.220 | 214 | 54.620 | 215 | 55.420 |
| 216 | 56.100 | 217 | 56.600 | 218 | 57.400 | 219 | 57.820 |
| 220 | 58.660 | 221 | 59.320 | 222 | 59.800 | 223 | 60.720 |
| 224 | 61.520 | 225 | 62.240 | 226 | 63.040 | 227 | 63.480 |
| 228 | 64.460 | 229 | 65.020 | 230 | 65.500 | 231 | 66.500 |

| | | | | | | | |
|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 232 | 66.960 | 233 | 67.840 | 234 | 68.600 | 235 | 68.980 |
| 236 | 70.040 | 237 | 70.520 | 238 | 71.420 | 239 | 72.180 |
| 240 | 72.900 | 241 | 73.980 | 242 | 74.580 | 243 | 75.320 |
| 244 | 76.200 | 245 | 76.540 | 246 | 77.720 | 247 | 78.220 |
| 248 | 79.200 | 249 | 79.880 | 250 | 80.420 | 251 | 81.560 |
| 252 | 81.960 | 253 | 83.140 | 254 | 83.720 | 255 | 84.340 |

D.1.2 標準公式の適用

CRTモニター表示システムの輝度範囲に対するグレースケール標準表示関数の節は、図D.1-3に示されている。最小および最大輝度レベルはそれぞれ $JND_{min} = 32.54$ および $JND_{max} = 453.85$ のJNDインデックスに対応する。このように、標準ターゲットに対して理論的に約420の輝度弁別域がある（節6（規格）参照）。明らかに8ビット入力デジタル化解像度で、最良で256の認識できる輝度増分を実現できる。

D.1.3 規格の実装

測定された特性曲線は、この場合には可能な出力レベル D_{output} に対して補間され、1024の輝度レベル $L_{I,m}$ を得る。標準表示関数は、また、 JND_{min} と JND_{max} の間で、補間され ($JND = [JND_{max} - JND_{min}] / 1023 = [453.85 - 32.54] / 1023$)、1024の標準輝度レベル $L_{I,STD}$ を得る。補間は多様な手法によって実施される。ここでは三次スプライン法が使用された。

全ての $L_{I,STD}$ に対して、最も近い $L_{J,m}$ が決定される。データ対 I, J は、それによって表示システムの輝度応答がグレースケール標準表示関数を近似するために作られる D_{input} と D_{output} の間の変換を定義する（表D.1-2）。

表D.1-2 表示システムを較正するためのルックアップテーブル

| | | | | | | | |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Input | Output | Input | Output | Input | Output | Input | Output |
| 0 | 0 | 1 | 118 | 2 | 131 | 3 | 140 |
| 4 | 148 | 5 | 153 | 6 | 160 | 7 | 164 |
| 8 | 169 | 9 | 173 | 10 | 178 | 11 | 182 |
| 12 | 185 | 13 | 189 | 14 | 191 | 15 | 194 |
| 16 | 198 | 17 | 201 | 18 | 204 | 19 | 207 |
| 20 | 210 | 21 | 214 | 22 | 217 | 23 | 219 |
| 24 | 222 | 25 | 225 | 26 | 228 | 27 | 231 |
| 28 | 234 | 29 | 237 | 30 | 240 | 31 | 243 |
| 32 | 245 | 33 | 248 | 34 | 251 | 35 | 253 |
| 36 | 255 | 37 | 257 | 38 | 260 | 39 | 263 |
| 40 | 265 | 41 | 268 | 42 | 271 | 43 | 274 |
| 44 | 276 | 45 | 279 | 46 | 282 | 47 | 284 |
| 48 | 287 | 49 | 290 | 50 | 292 | 51 | 295 |
| 52 | 298 | 53 | 301 | 54 | 303 | 55 | 306 |
| 56 | 308 | 57 | 311 | 58 | 314 | 59 | 317 |

| | |
|-----|-----|
| 60 | 319 |
| 64 | 329 |
| 68 | 339 |
| 72 | 350 |
| 76 | 361 |
| 80 | 372 |
| 84 | 383 |
| 88 | 393 |
| 92 | 405 |
| 96 | 416 |
| 100 | 428 |
| 104 | 440 |
| 108 | 450 |
| 112 | 462 |
| 116 | 474 |
| 120 | 486 |
| 124 | 499 |
| 128 | 511 |
| 132 | 522 |
| 136 | 535 |
| 140 | 549 |
| 144 | 562 |
| 148 | 575 |
| 152 | 588 |
| 156 | 602 |
| 160 | 616 |
| 164 | 631 |
| 168 | 643 |
| 172 | 657 |
| 176 | 674 |
| 180 | 688 |
| 184 | 703 |
| 188 | 719 |
| 192 | 735 |
| 196 | 752 |
| 200 | 766 |
| 204 | 783 |
| 208 | 799 |
| 212 | 818 |
| 216 | 834 |
| 220 | 851 |
| 224 | 870 |

| | |
|-----|-----|
| 61 | 320 |
| 65 | 331 |
| 69 | 342 |
| 73 | 353 |
| 77 | 364 |
| 81 | 375 |
| 85 | 385 |
| 89 | 396 |
| 93 | 407 |
| 97 | 419 |
| 101 | 431 |
| 105 | 443 |
| 109 | 452 |
| 113 | 465 |
| 117 | 477 |
| 121 | 490 |
| 125 | 502 |
| 129 | 513 |
| 133 | 526 |
| 137 | 539 |
| 141 | 552 |
| 145 | 565 |
| 149 | 578 |
| 153 | 591 |
| 157 | 605 |
| 161 | 619 |
| 165 | 633 |
| 169 | 646 |
| 173 | 663 |
| 177 | 678 |
| 181 | 693 |
| 185 | 706 |
| 189 | 723 |
| 193 | 738 |
| 197 | 754 |
| 201 | 769 |
| 205 | 787 |
| 209 | 805 |
| 213 | 821 |
| 217 | 838 |
| 221 | 856 |
| 225 | 874 |

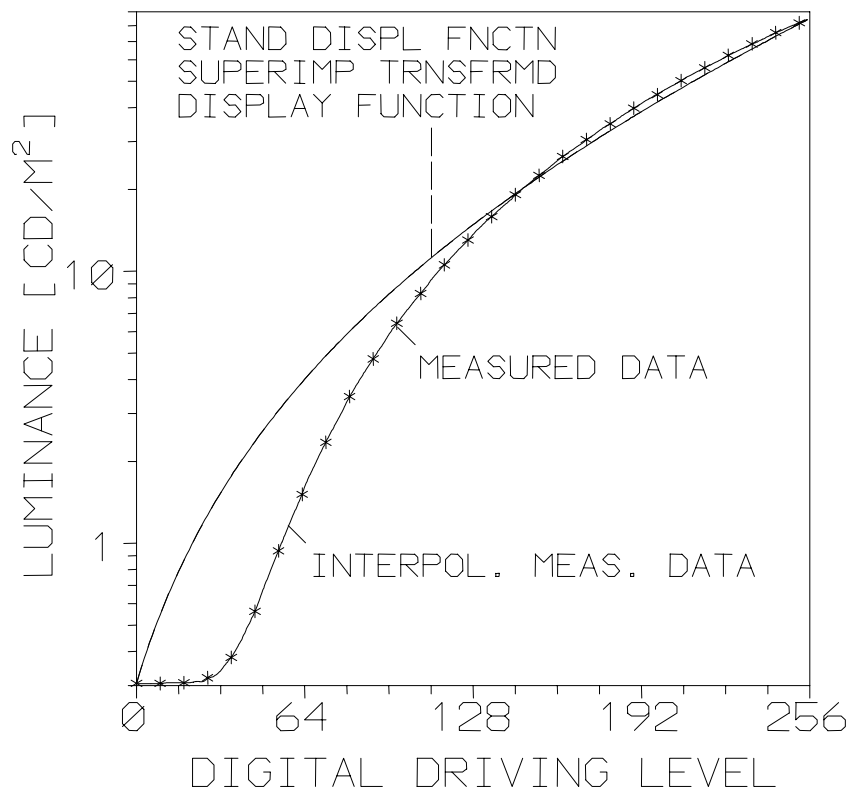
| | |
|-----|-----|
| 62 | 323 |
| 66 | 334 |
| 70 | 345 |
| 74 | 356 |
| 78 | 367 |
| 82 | 378 |
| 86 | 388 |
| 90 | 399 |
| 94 | 410 |
| 98 | 422 |
| 102 | 434 |
| 106 | 445 |
| 110 | 456 |
| 114 | 468 |
| 118 | 480 |
| 122 | 492 |
| 126 | 505 |
| 130 | 516 |
| 134 | 529 |
| 138 | 542 |
| 142 | 555 |
| 146 | 569 |
| 150 | 581 |
| 154 | 595 |
| 158 | 609 |
| 162 | 623 |
| 166 | 637 |
| 170 | 650 |
| 174 | 666 |
| 178 | 682 |
| 182 | 696 |
| 186 | 711 |
| 190 | 727 |
| 194 | 743 |
| 198 | 758 |
| 202 | 775 |
| 206 | 789 |
| 210 | 808 |
| 214 | 827 |
| 218 | 841 |
| 222 | 861 |
| 226 | 880 |

| | |
|-----|-----|
| 63 | 326 |
| 67 | 336 |
| 71 | 347 |
| 75 | 359 |
| 79 | 370 |
| 83 | 381 |
| 87 | 391 |
| 91 | 402 |
| 95 | 413 |
| 99 | 425 |
| 103 | 437 |
| 107 | 448 |
| 111 | 459 |
| 115 | 471 |
| 119 | 483 |
| 123 | 495 |
| 127 | 509 |
| 131 | 519 |
| 135 | 532 |
| 139 | 545 |
| 143 | 559 |
| 147 | 572 |
| 151 | 585 |
| 155 | 599 |
| 159 | 613 |
| 163 | 627 |
| 167 | 640 |
| 171 | 655 |
| 175 | 669 |
| 179 | 684 |
| 183 | 700 |
| 187 | 714 |
| 191 | 731 |
| 195 | 745 |
| 199 | 764 |
| 203 | 777 |
| 207 | 796 |
| 211 | 811 |
| 215 | 830 |
| 219 | 848 |
| 223 | 864 |
| 227 | 883 |

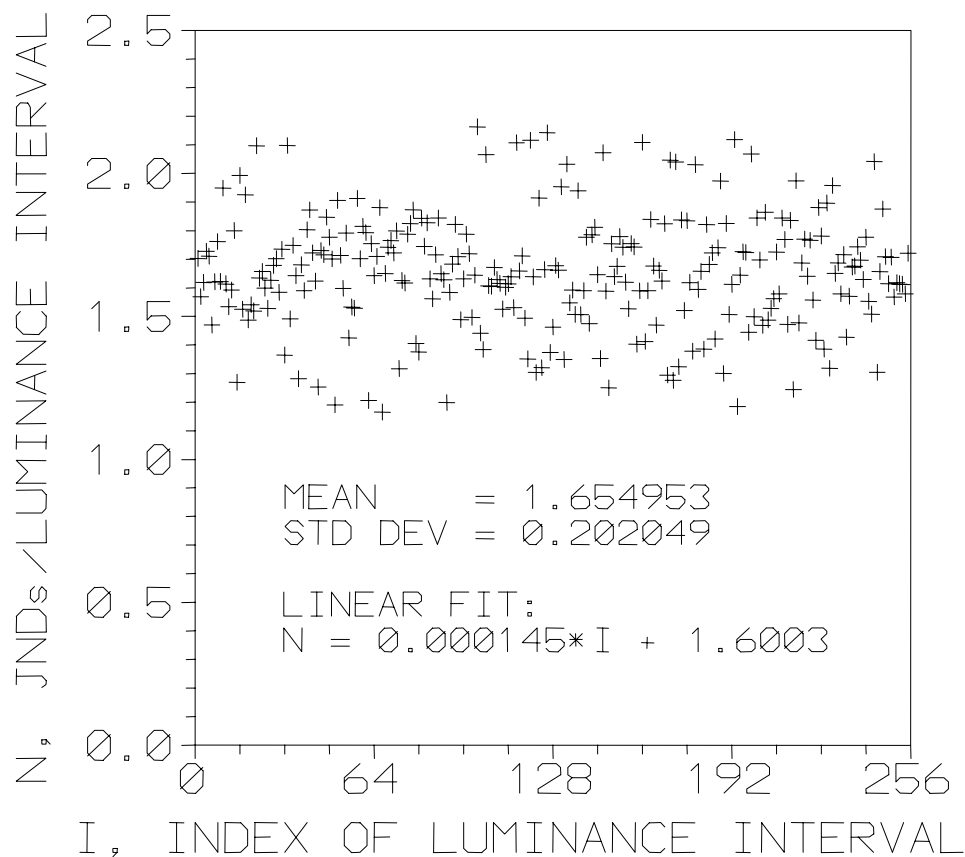
| | | | | | | | |
|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| 228 | 889 | 229 | 893 | 230 | 897 | 231 | 901 |
| 232 | 905 | 233 | 911 | 234 | 915 | 235 | 922 |
| 236 | 925 | 237 | 931 | 238 | 935 | 239 | 941 |
| 240 | 945 | 241 | 951 | 242 | 955 | 243 | 960 |
| 244 | 964 | 245 | 969 | 246 | 975 | 247 | 979 |
| 248 | 985 | 249 | 991 | 250 | 995 | 251 | 1002 |
| 252 | 1006 | 253 | 1012 | 254 | 1016 | 255 | 1023 |

D . 1 . 4 適合性の基準

付属書Cの中で提案されたFITとLUM基準は、 $L_{J,m}$ の $L_{I,STD}$ への巨視的なそして微視的な近似を決定するために適用される。図D . 1 - 3はグレースケール標準表示関数に重ねられた知覚的に直線化された表示関数を示し、そして図D . 1 - 4は二つの基準の結果を要約している。良好な全体的な適合が、FIT基準で得られた最良適合としてほぼ水平線適合によって示されているように、達成された。RMS Eは受け入れられる。全ての255のP値間隔は標準ターゲットに対する変換表示関数上でJNDに導く。



図D . 1 - 3 放射型表示システムの測定および補間特性曲線，グレースケール標準表示関数および変換された表示関数。この表示システムに対する変換された表示関数はグレースケール標準表示関数と一致している，そして二つの曲線は重ねられ，判別不能である。



図D.1-4 放射型表示システムの変換された表示関数に対する適合性のLUMおよびFIT基準

D.2 透過型ハードコピー装置

D.2.1 システム特性曲線の測定

透過型ハードコピー装置は、透明フィルム（代表的には14”×17”フィルム）のシート上に1枚以上の画像をプリントする（露出しそして現像する）（現像装置を含む）レーザープリンタによって表示される。フィルムは暗くした部屋の中で、観察するために高輝度ライトボックス上に最終的に置かれる。

このような透過型ハードコピー装置に関する特性曲線は、それぞれの横棒が特定の数値（DDL）を持っているn本の横棒のパターンで構成される、テスト画像をプリントすることによって得られる。各々のプリントされた横棒の光学濃度は、それから透過型濃度計を使用して、プリントされた横棒のそれぞれに対して測定される。

プリンタの特性曲線を正確に定義するために、（特性曲線上のできるだけ多くの点を得るために）nは可能な限り大きいことが望まれる。しかしながら、プリンタ、現像機、あるいは媒体技術によって負わされる絶対的定量的反復性の制限は、nのより小さい値が使われることを命令することがある（横

棒の数が増えるに従って、隣接した横棒間の濃度差異が“雑音の中に”なるので、差異に敏感である適合性基準が、不安定で無意味になることから妨ぐために)。

テスト画像の一つの例は、以下のような、フィルムの使用可能なプリント可能領域内に広がる、32のほぼ等間隔DDLを持つ、32のほぼ等しい高さの横棒のパターンである。

| |
|-----------------|
| Density Step 0 |
| Density Step 1 |
| Density Step 2 |
| Density Step 3 |
| Density Step 4 |
| Density Step 5 |
| Density Step 6 |
| Density Step 7 |
| Density Step 8 |
| Density Step 9 |
| Density Step 10 |
| Density Step 11 |
| Density Step 12 |
| Density Step 13 |
| Density Step 14 |
| Density Step 15 |
| Density Step 16 |
| Density Step 17 |
| Density Step 18 |
| Density Step 19 |
| Density Step 20 |
| Density Step 21 |
| Density Step 22 |
| Density Step 23 |
| Density Step 24 |
| Density Step 25 |
| Density Step 26 |
| Density Step 27 |
| Density Step 28 |
| Density Step 29 |
| Density Step 30 |
| Density Step 31 |

図D.2-1 透過型ハードコピー媒体に対するテストパターンの配置

Nビット入力を持つプリンタに対して、n DDLをもつテストパターンを定義するために、ステップ番号 i のDDLは、最も近い整数に丸められる次式に設定される。

$$DDL_i = (2N-1) \frac{i}{n-1} \quad (D.2-1)$$

DDL_i の一覧の値および対応する測定光学濃度 OD_i はプリンタの特性曲線を構成する。

D.2.2 グレースケール標準表示関数の適用

透過型ハードコピープリンタによって作られるフィルムは、しばしば様々な場所に運ばれる、そしてそこで異なったライトボックス上で、そして様々な観察環境の下で観察されることがある。従って、PS 3.14の方法は、透過型ハードコピープリンタに関しては、(輝度よりもむしろ)どんな濃度が生成されるべきか定義することであり、そしてライトボックスの輝度と他の観察パラメタの予期される範囲の代表値であるパラメタに基づいて、グレースケール標準表示関数を透過型ハードコピー事

例に適用する方法をここで提供することである。

下記の例で使用される特定パラメタは次の通りである：

$$L_0 \text{ (フィルムが存在しないライトボックスの輝度)} : 2000 \text{ cd/m}^2$$

$$L_a \text{ (フィルムによって反射される周辺室内光)} : 10 \text{ cd/m}^2$$

$$D_{\min} \text{ (フィルム上で得られる最低光学濃度)} : 0.20$$

$$D_{\max} \text{ (フィルム上で望ましい最高光学濃度)} : 3.00.$$

希望OD値の表をグレースケール標準表示関数から作る手続きは、輝度範囲と弁別域インデックス j の対応する範囲とを定義することで始まる。最低と最高輝度値はそれぞれ次によって与えられる。

$$L_{\min} = L_a + L_0 10^{-D_{\max}} = 12.0 \text{ cd/m}^2 \quad (\text{D.2-2})$$

$$L_{\max} = L_a + L_0 10^{-D_{\min}} = 1271.9 \text{ cd/m}^2 \quad (\text{D.2-3})$$

次に、対応する弁別域インデックス値 j_{\min} と j_{\max} を計算する。現在の例に対して我々は次を得る。

$$j_{\min} = 233.32 \quad (\text{D.2-4})$$

$$j_{\max} = 848.75 \quad (\text{D.2-5})$$

これはプリンタがカバーすべき j 値の範囲を我々に与える。プリンタはその最小入力 (P 値 = 0) を j_{\min} および対応する L_{\min} に写像しなければならない。それはその最大入力 (P 値 = $2^N - 1$, ここで N は入力ビットの数) を j_{\max} および対応する L_{\max} に写像しなければならない。何れの間入力においても、それはその入力を次のように比例して写像しなければならない：

$$j(PV) = j_{\min} + (j_{\max} - j_{\min}) \frac{PV}{2^N - 1} \quad (\text{D.2-6})$$

そして、規格の式によって与えられる輝度に対するターゲット値は $L(j(P\text{-Value}))$ である。この「ターゲットする」は、以前に定義した L_0 と L_a の条件下で、希望する輝度 $L(j(P\text{-Value}))$ を与えるであろうこの P 値に対する光学濃度 OD を生成することから構成される。必要な濃度は以下のように計算される：

$$OD(DI) = -\log_{10} \frac{(L(j(DI)) - L_a)}{L_0} \quad (\text{D.2-7})$$

D.2.3 グレースケール標準表示関数の実装

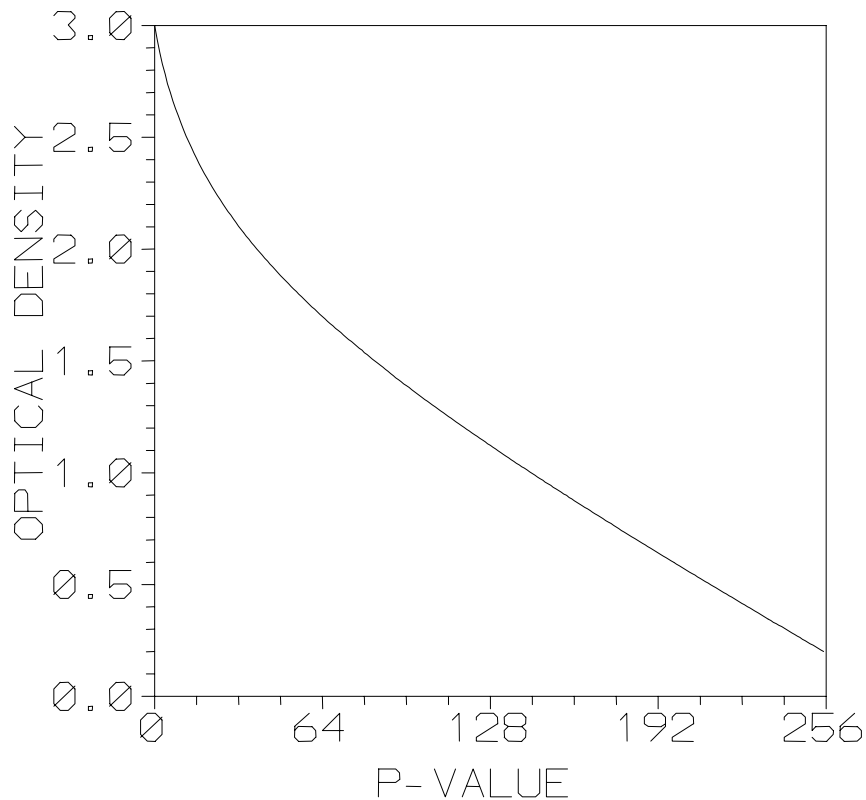
この例を8ビット入力をもつプリンタのさらに特定の場合に持ってくると、256の可能な P 値のそれぞれに対して生成されるべき OD を定義する、次の表が得られる。

表D.2-1 8ビットプリンタの各P値に対する光学濃度

| P-Value | Optical Density (OD) | P-Value | Optical Density (OD) | P-Value | Optical Density (OD) | P-Value | Optical Density (OD) |
|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|
| 0 | 3.000 | 1 | 2.936 | 2 | 2.880 | 3 | 2.828 |
| 4 | 2.782 | 5 | 2.739 | 6 | 2.700 | 7 | 2.662 |
| 8 | 2.628 | 9 | 2.595 | 10 | 2.564 | 11 | 2.534 |
| 12 | 2.506 | 13 | 2.479 | 14 | 2.454 | 15 | 2.429 |
| 16 | 2.405 | 17 | 2.382 | 18 | 2.360 | 19 | 2.338 |
| 20 | 2.317 | 21 | 2.297 | 22 | 2.277 | 23 | 2.258 |
| 24 | 2.239 | 25 | 2.221 | 26 | 2.203 | 27 | 2.185 |
| 28 | 2.168 | 29 | 2.152 | 30 | 2.135 | 31 | 2.119 |
| 32 | 2.103 | 33 | 2.088 | 34 | 2.073 | 35 | 2.058 |
| 36 | 2.043 | 37 | 2.028 | 38 | 2.014 | 39 | 2.000 |
| 40 | 1.986 | 41 | 1.973 | 42 | 1.959 | 43 | 1.946 |
| 44 | 1.933 | 45 | 1.920 | 46 | 1.907 | 47 | 1.894 |
| 48 | 1.882 | 49 | 1.870 | 50 | 1.857 | 51 | 1.845 |
| 52 | 1.833 | 53 | 1.821 | 54 | 1.810 | 55 | 1.798 |
| 56 | 1.787 | 57 | 1.775 | 58 | 1.764 | 59 | 1.753 |
| 60 | 1.742 | 61 | 1.731 | 62 | 1.720 | 63 | 1.709 |
| 64 | 1.698 | 65 | 1.688 | 66 | 1.677 | 67 | 1.667 |
| 68 | 1.656 | 69 | 1.646 | 70 | 1.636 | 71 | 1.626 |
| 72 | 1.616 | 73 | 1.605 | 74 | 1.595 | 75 | 1.586 |
| 76 | 1.576 | 77 | 1.566 | 78 | 1.556 | 79 | 1.547 |
| 80 | 1.537 | 81 | 1.527 | 82 | 1.518 | 83 | 1.508 |
| 84 | 1.499 | 85 | 1.490 | 86 | 1.480 | 87 | 1.471 |
| 88 | 1.462 | 89 | 1.453 | 90 | 1.444 | 91 | 1.434 |
| 92 | 1.425 | 93 | 1.416 | 94 | 1.407 | 95 | 1.398 |
| 96 | 1.390 | 97 | 1.381 | 98 | 1.372 | 99 | 1.363 |
| 100 | 1.354 | 101 | 1.346 | 102 | 1.337 | 103 | 1.328 |
| 104 | 1.320 | 105 | 1.311 | 106 | 1.303 | 107 | 1.294 |
| 108 | 1.286 | 109 | 1.277 | 110 | 1.269 | 111 | 1.260 |
| 112 | 1.252 | 113 | 1.244 | 114 | 1.235 | 115 | 1.227 |
| 116 | 1.219 | 117 | 1.211 | 118 | 1.202 | 119 | 1.194 |
| 120 | 1.186 | 121 | 1.178 | 122 | 1.170 | 123 | 1.162 |
| 124 | 1.154 | 125 | 1.146 | 126 | 1.138 | 127 | 1.130 |
| 128 | 1.122 | 129 | 1.114 | 130 | 1.106 | 131 | 1.098 |
| 132 | 1.090 | 133 | 1.082 | 134 | 1.074 | 135 | 1.066 |
| 136 | 1.058 | 137 | 1.051 | 138 | 1.043 | 139 | 1.035 |
| 140 | 1.027 | 141 | 1.020 | 142 | 1.012 | 143 | 1.004 |
| 144 | 0.996 | 145 | 0.989 | 146 | 0.981 | 147 | 0.973 |

| | | | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 148 | 0.966 | 149 | 0.958 | 150 | 0.951 | 151 | 0.943 |
| 152 | 0.935 | 153 | 0.928 | 154 | 0.920 | 155 | 0.913 |
| 156 | 0.905 | 157 | 0.898 | 158 | 0.890 | 159 | 0.883 |
| 160 | 0.875 | 161 | 0.868 | 162 | 0.860 | 163 | 0.853 |
| 164 | 0.845 | 165 | 0.838 | 166 | 0.831 | 167 | 0.823 |
| 168 | 0.816 | 169 | 0.808 | 170 | 0.801 | 171 | 0.794 |
| 172 | 0.786 | 173 | 0.779 | 174 | 0.772 | 175 | 0.764 |
| 176 | 0.757 | 177 | 0.750 | 178 | 0.742 | 179 | 0.735 |
| 180 | 0.728 | 181 | 0.721 | 182 | 0.713 | 183 | 0.706 |
| 184 | 0.699 | 185 | 0.692 | 186 | 0.684 | 187 | 0.677 |
| 188 | 0.670 | 189 | 0.663 | 190 | 0.656 | 191 | 0.648 |
| 192 | 0.641 | 193 | 0.634 | 194 | 0.627 | 195 | 0.620 |
| 196 | 0.613 | 197 | 0.606 | 198 | 0.598 | 199 | 0.591 |
| 200 | 0.584 | 201 | 0.577 | 202 | 0.570 | 203 | 0.563 |
| 204 | 0.556 | 205 | 0.549 | 206 | 0.542 | 207 | 0.534 |
| 208 | 0.527 | 209 | 0.520 | 210 | 0.513 | 211 | 0.506 |
| 212 | 0.499 | 213 | 0.492 | 214 | 0.485 | 215 | 0.478 |
| 216 | 0.471 | 217 | 0.464 | 218 | 0.457 | 219 | 0.450 |
| 220 | 0.443 | 221 | 0.436 | 222 | 0.429 | 223 | 0.422 |
| 224 | 0.415 | 225 | 0.408 | 226 | 0.401 | 227 | 0.394 |
| 228 | 0.387 | 229 | 0.380 | 230 | 0.373 | 231 | 0.366 |
| 232 | 0.359 | 233 | 0.352 | 234 | 0.345 | 235 | 0.338 |
| 236 | 0.331 | 237 | 0.324 | 238 | 0.317 | 239 | 0.311 |
| 240 | 0.304 | 241 | 0.297 | 242 | 0.290 | 243 | 0.283 |
| 244 | 0.276 | 245 | 0.269 | 246 | 0.262 | 247 | 0.255 |
| 248 | 0.248 | 249 | 0.241 | 250 | 0.234 | 251 | 0.228 |
| 252 | 0.221 | 253 | 0.214 | 254 | 0.207 | 255 | 0.200 |

この値をプロットすると図D . 2 - 3のカーブになる。



図D.2-3 8ビットプリンタに対するP値対ODのプロット

D.2.4 適合性の基準

例として、32の光学濃度を持つ横棒パターンが透過型媒体（フィルム）上にプリントされた。事前に、プリンタは0.2 (D_{\min}) から3.0 (D_{\max}) までの濃度範囲にわたってプリントするように設定されている、そして以前に述べた「P値に対するターゲット濃度値」の表に製造者によって変換されたグレースケール標準表示関数を使用するために製造者によって事前設定されている。

このために使用されたテストパターンは、本質的に32の水平横棒から構成される8ビット画像であった。横棒のために使用される32のP値は、以下の通りである：0, 8, 16, 25, 33, 41, 49, 58, 66, 74, 82, 90, 99, 107, 115, 123, 132, 140, 148, 156, 165, 173, 181, 189, 197, 206, 214, 222, 230, 239, 247, 255。

与えられたフィルムに対して、32の横棒の光学濃度は（フィルムの中央近くで）測定され、（以前に述べたライトボックス輝度と、そして反射周辺光の標準パラメタを使用して）輝度に変換され、そして $L(j)$ から数学的に $j(L)$ を計算することによって弁別域インデックスに変換される、ここで $L(j)$ は弁別域インデックス j の関数としての輝度 L のグレースケール標準表示関数である。連続測定値の間の31の間隔のそれぞれに対して、「P値における増分あたりのJND」の計算値は、その間隔に対するP値における差分によって、弁別域インデックスにおける差分を割ることによって得られる。（これらの計算において、濃度 L および j はすべて浮動小数点変数である。整数値への丸めは行われないので、切り捨て誤差は入らない）。

この例では、フィルムのデータは水平の直線によって、適度に良く一致させることができた。すなわ

ち、計算された「P値における増分あたりのJND」は2.4で本質的に一定であった。数学的適合はわずかな0ではない傾きを生じた（特に、P値が0から255に行くに伴って、2.5から2.3に減少した）、しかし0.2の総差異は「P値における増分あたりのJND」の31の個々の値の中に存在する雑音よりかなり小さいので重要性は疑わしい。（ここで言及されている「雑音」は、測定データの（例えば、同じテストパターンの二番目のプリントからの）新しい集合が測定値の以前の集合と比較される場合に見られる、ランダムで繰り返さない変動から構成される）。

その小さいスロープがフィルムを並べた比較の中で、人間の観察者によって検出されるかどうかを見分けるための視覚テストは行なわれていない。

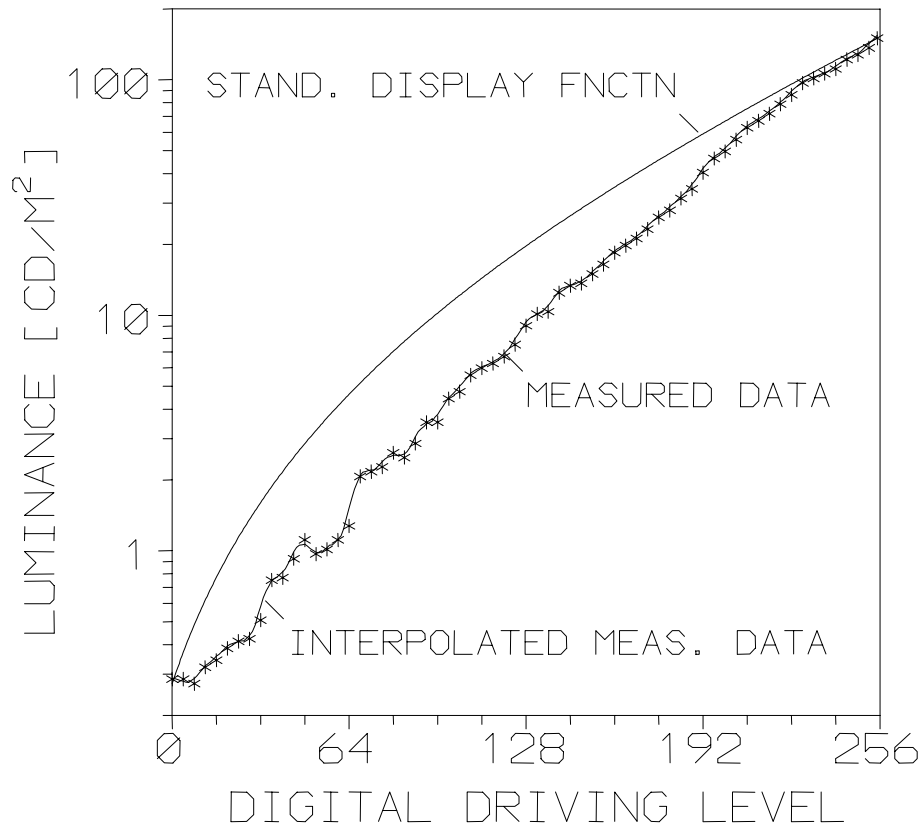
ところで、（小さな差異に基づく差異の値よりもむしろ）ちょうど32のオリジナルの絶対測定濃度を考える場合は、ターゲットと測定光学濃度の間には（与えられた濃度で、濃度精度に対する製造者の規準内で）、この場合、まったく当然な一致を見出す。しかし、小さな間隔での差分情報に基づく基準を使う場合は、装置の「真の」（または多くの場合にわたって平均された）特性の挙動に依存しない様々な欠陥によって強く影響され得る（そしておそらくは支配される）ために、結果はさらに慎重に考慮されなければならない。

D.3 反射型表示システム

この最後の例は、グレースケール標準表示関数への適合性が熱色素転写紙プリンタ・オフィス照明システムに対して、達成される方法を説明する。熱色素転写プリンタは半光沢の8インチ×10インチの厚手紙に黒と白のグレースケールプリントを作る。プリントは、最小反射濃度が 150 cd/m^2 の輝度を生成するために、蛍光灯によって均一に照明される。仮想の変換演算子は等しい入力と出力の8ビットデジタル化解像度を持つと仮定される。

D.3.1 システム特性曲線の測定

64ステップのグレースケールタブレットをもつプリントが、DDL 4, 8, 12, ..., 248, 252, 255 に対して印刷された。反射光学濃度（0.08 から 2.80 までの）が濃度計で測定された。測定光学濃度と照明条件に対応する輝度レベルは、図D.3-1にプロットされている。



図D.3-1 反射型ハードコピーを出力するプリンタに対して測定され、補間された特性曲線およびグレースケール標準表示関数

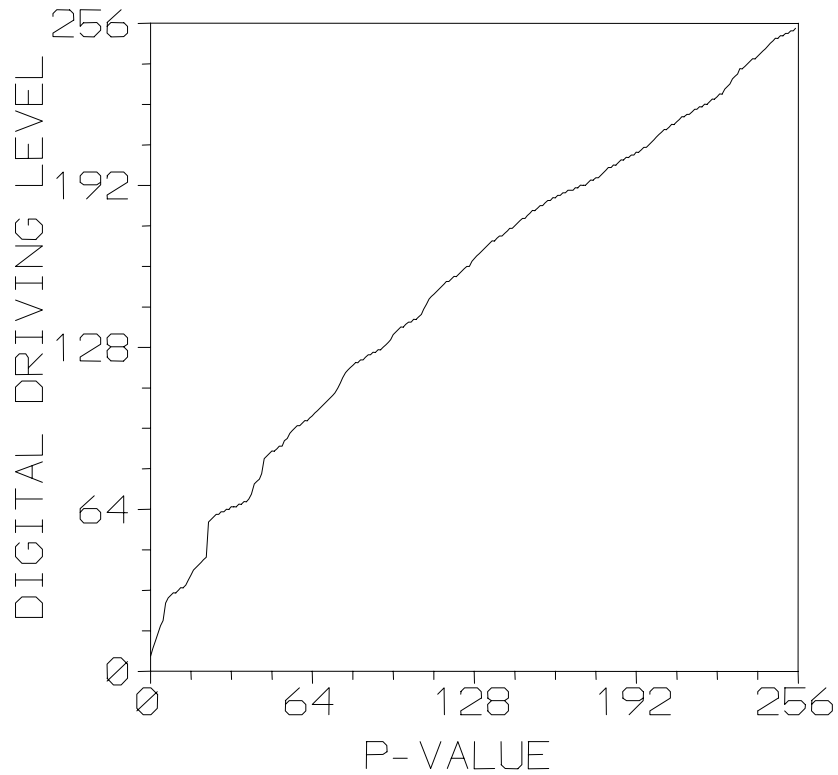
D.3.2 グレースケール標準表示関数の適用

この最後の例は、グレースケール標準表示関数への適合性が熱色素転写紙プリンタ・オフィス照明システムに対して、達成される方法を説明する。熱色素転写プリンタは半光沢の8インチ×10インチの厚手紙に黒と白のグレースケールプリントを作る。このプリントは最小反射濃度が 150 cd/m^2 の輝度を生成するために、蛍光灯によって均一に照明される。仮想の変換演算子は等しい入力と出力の8ビットデジタル化解像度を持つと仮定される。

D.3.3 グレースケール標準表示関数の実装

測定された特性曲線は256の輝度レベル $L_{I,m}$ を生じる利用可能なDDLに対して補間される。グレースケール標準表示関数は、256標準輝度レベル $L_{I,STD}$ を得るために、 JND_{min} と JND_{max} の間で同様に補間される ($DJND = [JND_{max} - JND_{min}] / 255$)。

全ての $L_{I,STD}$ に対して、最も近い $L_{J,m}$ が決定される。データ対 I,J は、表示システムの輝度応答がグレースケール標準表示関数を近似するためにそれによって作られる D_{input} と D_{output} の間の変換を定義する(表D.3-1および図D.3-2)。



図D.3-2 グレースケール標準表示関数を近似する表示関数に、プリンタの特性曲線を修正するための変換

表D.3-1 反射型ハードコピーシステムを較正するためのルックアップテーブル

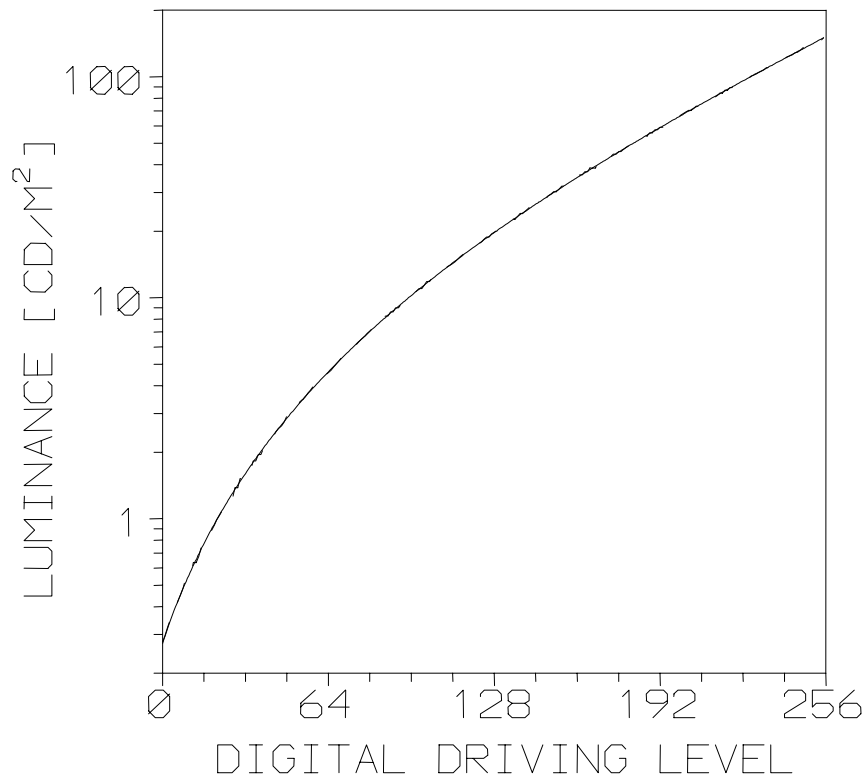
| P-Value | DDL | P-Value | DDL | P-Value | DDL | P-Value | DDL |
|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| 0 | 6 | 1 | 9 | 2 | 12 | 3 | 15 |
| 4 | 18 | 5 | 20 | 6 | 27 | 7 | 29 |
| 8 | 30 | 9 | 31 | 10 | 31 | 11 | 32 |
| 12 | 33 | 13 | 33 | 14 | 34 | 15 | 36 |
| 16 | 38 | 17 | 40 | 18 | 41 | 19 | 42 |
| 20 | 43 | 21 | 44 | 22 | 45 | 23 | 59 |
| 24 | 60 | 25 | 61 | 26 | 62 | 27 | 62 |
| 28 | 63 | 29 | 63 | 30 | 64 | 31 | 64 |
| 32 | 65 | 33 | 65 | 34 | 65 | 35 | 66 |
| 36 | 66 | 37 | 67 | 38 | 67 | 39 | 68 |
| 40 | 70 | 41 | 74 | 42 | 75 | 43 | 76 |
| 44 | 78 | 45 | 84 | 46 | 85 | 47 | 86 |
| 48 | 87 | 49 | 87 | 50 | 88 | 51 | 89 |
| 52 | 89 | 53 | 91 | 54 | 92 | 55 | 94 |
| 56 | 95 | 57 | 96 | 58 | 97 | 59 | 97 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 60 | 98 | 61 | 99 | 62 | 99 | 63 | 100 |
| 64 | 101 | 65 | 102 | 66 | 103 | 67 | 104 |
| 68 | 105 | 69 | 106 | 70 | 107 | 71 | 108 |
| 72 | 109 | 73 | 110 | 74 | 112 | 75 | 114 |
| 76 | 116 | 77 | 118 | 78 | 119 | 79 | 120 |
| 80 | 121 | 81 | 122 | 82 | 122 | 83 | 123 |
| 84 | 123 | 85 | 124 | 86 | 125 | 87 | 125 |
| 88 | 126 | 89 | 126 | 90 | 127 | 91 | 127 |
| 92 | 128 | 93 | 129 | 94 | 130 | 95 | 131 |
| 96 | 133 | 97 | 134 | 98 | 135 | 99 | 136 |
| 100 | 136 | 101 | 137 | 102 | 138 | 103 | 138 |
| 104 | 139 | 105 | 139 | 106 | 140 | 107 | 141 |
| 108 | 143 | 109 | 145 | 110 | 147 | 111 | 148 |
| 112 | 149 | 113 | 150 | 114 | 151 | 115 | 152 |
| 116 | 153 | 117 | 154 | 118 | 154 | 119 | 155 |
| 120 | 156 | 121 | 156 | 122 | 157 | 123 | 158 |
| 124 | 159 | 125 | 160 | 126 | 160 | 127 | 162 |
| 128 | 163 | 129 | 164 | 130 | 165 | 131 | 166 |
| 132 | 167 | 133 | 168 | 134 | 169 | 135 | 170 |
| 136 | 170 | 137 | 171 | 138 | 172 | 139 | 172 |
| 140 | 173 | 141 | 174 | 142 | 175 | 143 | 175 |
| 144 | 176 | 145 | 177 | 146 | 178 | 147 | 179 |
| 148 | 179 | 149 | 180 | 150 | 181 | 151 | 182 |
| 152 | 182 | 153 | 183 | 154 | 184 | 155 | 184 |
| 156 | 185 | 157 | 186 | 158 | 186 | 159 | 187 |
| 160 | 187 | 161 | 188 | 162 | 188 | 163 | 189 |
| 164 | 189 | 165 | 190 | 166 | 190 | 167 | 190 |
| 168 | 191 | 169 | 191 | 170 | 192 | 171 | 192 |
| 172 | 192 | 173 | 193 | 174 | 194 | 175 | 194 |
| 176 | 195 | 177 | 195 | 178 | 196 | 179 | 197 |
| 180 | 198 | 181 | 199 | 182 | 199 | 183 | 200 |
| 184 | 200 | 185 | 201 | 186 | 202 | 187 | 202 |
| 188 | 203 | 189 | 203 | 190 | 204 | 191 | 204 |
| 192 | 205 | 193 | 205 | 194 | 206 | 195 | 207 |
| 196 | 207 | 197 | 208 | 198 | 209 | 199 | 210 |
| 200 | 211 | 201 | 212 | 202 | 213 | 203 | 214 |
| 204 | 214 | 205 | 215 | 206 | 216 | 207 | 216 |
| 208 | 217 | 209 | 218 | 210 | 219 | 211 | 219 |
| 212 | 220 | 213 | 220 | 214 | 221 | 215 | 222 |
| 216 | 222 | 217 | 223 | 218 | 223 | 219 | 224 |
| 220 | 224 | 221 | 225 | 222 | 226 | 223 | 226 |
| 224 | 227 | 225 | 228 | 226 | 228 | 227 | 230 |

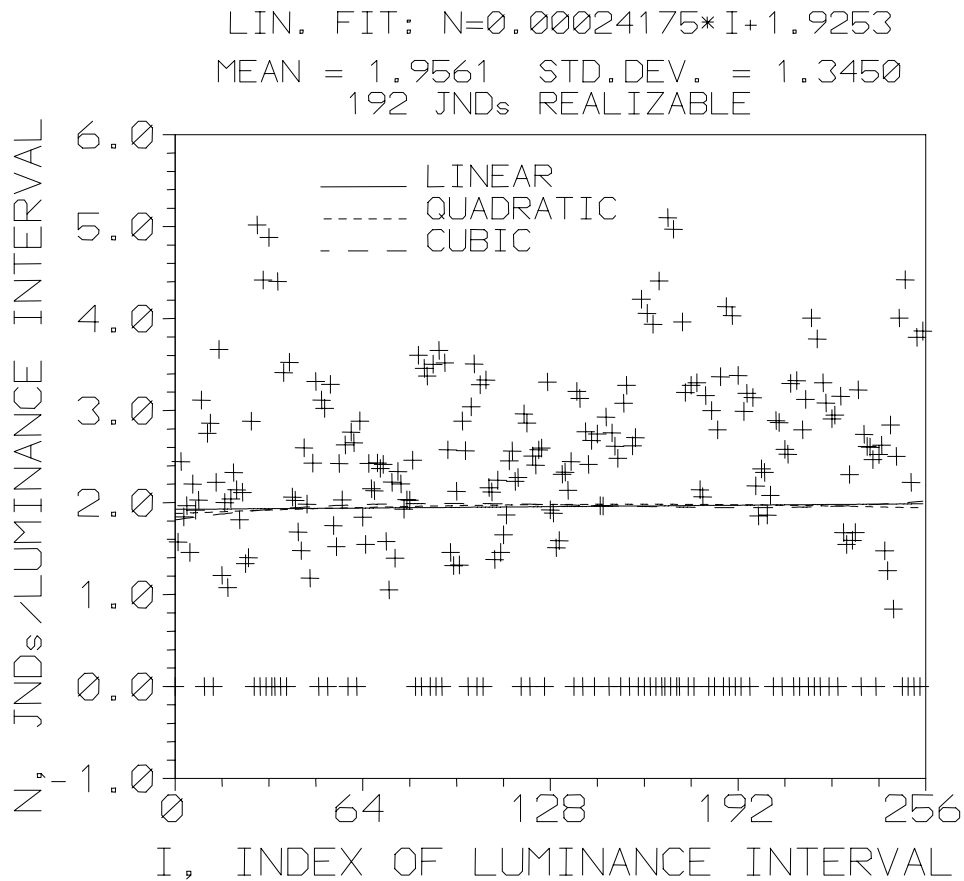
| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 228 | 231 | 229 | 232 | 230 | 234 | 231 | 235 |
| 232 | 236 | 233 | 238 | 234 | 238 | 235 | 239 |
| 236 | 240 | 237 | 241 | 238 | 242 | 239 | 242 |
| 240 | 243 | 241 | 244 | 242 | 245 | 243 | 246 |
| 244 | 247 | 245 | 248 | 246 | 249 | 247 | 250 |
| 248 | 250 | 249 | 251 | 250 | 251 | 251 | 252 |
| 252 | 252 | 253 | 253 | 254 | 253 | 255 | 254 |

D.3.4 適合性の基準

付属書Cの中で提案されたFITとLUM基準は、 $L_{J,m}$ の $L_{I,STD}$ への巨視的なそして微視的な近似を決定するために適用される。図D.3-3はグレースケール標準表示関数に重ねられた知覚的に直線化された表示関数を示し、そして図D.3-4は二つの基準の結果を要約している。FITは、「輝度間隔あたりのJND」の最良適合として、変換された表示関数のグレースケール標準表示関数との良好な全体的適合を示している、水平軸にほとんど完全に平行な直線を提供する。LUMによって計算されたRMS Eは比較的大きい、それは例えば節D.1において説明されたソフトコピー表示システムが持つような、グレースケール標準表示関数からのより明白な局所的偏差を示している。少なくとも部分的には、より大きいRMS Eは変換のための入力と出力デジタル化解像度が等しいという事実に依っている。変換テーブル(表D.3-1)と図D.3-2はいくつかのP値が変換された表示関数上で同じ輝度レベルを導くことを示している。事実、255の輝度間隔の205のみが、標準ターゲットのためのJNDを導く。



図D.3-3 反射型ハードコピー表示システムに対する変換表示関数と重畳されたグレースケール標準表示関数。この表示システムのための変換表示関数はグレースケール標準表示関数と一致する，そして二つの曲線は重畳され，判別不能である。



図D.3-4 8ビットの等しい入力と出力デジタル化解像度をもつ反射型ハードコピー表示システムに対する適合性の測定基準

付属書E（情報） 周辺光の下での表示の実現できるJND範囲

ダイナミックレンジは、表示システムによって提示されることが可能な情報内容のしばしば使われる基準である。しかしながら、ダイナミックレンジには多くの定義があるが、そしてそのような定義のほとんどは、グレースケール画素によって伝達されることができるとされる実際の情報の量に影響する実世界の条件を考慮に入れていない。例えば、Poynton [E1] は問題となっている特定の表示装置の最も明るい白と最も暗い黒の間の表示強度の比として、グレースケール表示装置のコントラスト比に言及している。しかしながらダイナミックレンジのこの定義は理想的な観察条件に適用される。膜状眩輝、雑音、画像の空間周波数内容、電源の飽和や観察状況に基づいた陰極線管（CRT）における周辺光のような実世界の条件は、システムの測定されたダイナミックレンジを有意に低下させる [E2, 3]。これらの変数のすべての理由から、ダイナミックレンジは表示システムに対して曖昧に定義された概念である。

注：膜状眩輝はCRT内部での内部光反射が「背景照明」を生成して、CRT装置のコントラスト範囲を減らす現象である。

表示システムの表示関数がグレースケール標準表示関数を近似する程度を決定するために使用される方法は、また、表示システムの情報内容を伝えるための潜在的な能力を、より良く特徴づけることができる、二つの基準を定義するために使用できる。二つの基準、理論上達成可能なJNDおよび実現されたJNDは、表示システムを比較するために有用である [E4]。

理論的に達成可能なJNDの数は、単に使用される表示システムの輝度範囲を与える視覚モデルによって予想されるJNDの数である。表示システムの理論的に達成可能なJNDの数は、表示システムの測定された最小と最大輝度の間に入る、表におけるJNDの数を数えることによって、付属書Bの表B - 1から見出されるであろう。

JNDのこの数は、表示システムの他の部分の解像度限界によって、特に、表示システムを駆動している画素当たりのピットの有限数によって与えられた量子化解像度によって、実際には達成されないであろう。例えば、付属書Bの表B - 1は、特定の表示システムは352のJNDを導出することが可能であることを示すであろう。しかしながら、画素当たり8ビットのみが表示システムに提供される場合は、達成できるJNDの数は量子化効果の理由で $2^8 = 256$ JNDを越えることはできない。現実には、表示システムの中で実現されるJNDの数は、理論的に達成できるJND、および量子化制限の下限より常に少ないか、または下限に等しいであろう。これはディスプレイへの入力値の量子化値のいくつかは、次のJNDを達成するために必要とされる入力値に加わらないことがあるからである。

より有用な実現JNDの数は、表示システムの詳細（即ち、コントラスト分解能のグレーレベルの数と輝度値の分布）を与えられて、幾つのJNDが実際に達成されるかを記述する。この定義は、システムによって人間の観察者に実際に伝達できる情報の測定単位、本質的に情報のダイナミックレンジを与える。この数は、表示システムの最小輝度で始まり、そしてその後、現在の輝度値から輝度において1 JNDをステップする、そして少なくともその大きさとステップを達成するDDL値における最少増分を選択することで、計算される。全ての可能なDDLを通してこれを繰り返すことで、全て少なくとも1 JND離れた、ステップのシーケンスを生成するであろう、そしてステップのこのシーケンスの長さが、そのとき、表示システムの実現可能JNDの数である。

PS 3.14の方法は、表示システムにおける劣化の実世界での原因のすべてを正確に複製することはできない。しかしながら、JNDの実現可能数を決定するこの画一的な方法が、医療における放射線画像の観察のような、実世界の状況の中で表示システムを使用した時に、人間の観察者によって経験されるであろう特定表示システムの実際性能の基準を与えるべきである。

引用文献

- [E1] Poynton, C. "Frequently Asked Questions about Gamma",
Internet <ftp://ftp.inforamp.net/pub/users/poynton/doc/colour/gammaFAQ.pdf>
- [E2] Roehrig, H., Blume, H., Ji, T. and Browne, M.; "Performance Tests and Quality Control of Cathode Ray Tube Displays"; J. Digital Imaging, Vol. 3, No. 3, August 1990; pp. 134-145.
- [E3] Gray, J.; "Use of the SMPTE Test Pattern in Picture Archiving and Communication Systems"; J. Digital Imaging, Vol. 5, No. 1, February 1992; pp. 54-58.
- [E4] Hemminger, B., Muller, K., "Performance Metric for evaluating conformance of medical image displays with the ACR/NEMA display function standard", SPIE Medical Imaging 1997, editor Yongmin Kim, vol 3031-25, 1997.