非直線ガンマ特性の測定と解析

一写真における定義とテレビにおける定義の関心の検討一

Measurement and Analysis of Nonlinear Gamma

猪野 高雄[†], 正会員 宮原 誠^{††}

Takao Ino[†] and Makoto Miyahara^{††}

Abstract We are investigating the important physical factors needed for the reproduction of the high-order sensation in a display of images. Gamma is closely related to the reproduction of gradient and color. In this paper, we describe gamma in detail. We expand the traditional gamma defined only in the range in which a gamma value is constant to a non-linear gamma which depends on a signal level. We found that a non-linear gamma is not given by a differential coefficient of the characteristic curve but by a complicated function. And we describe the relationship between the definition of gamma in television and photography.

キーワード：ガンマ特性，テレビのガンマ，写真のガンマ，高度感性情報，階調

1. ま え が き

近年，情報化社会の活力が情報・コンテンツ中心になり，それにふさわしい高品位な音像・映像の再生に対する需要が高まっている．映像に関しては，EU の国家プロジェクト VASARI, MARC, また石川県においても新情報書府構想のデジタルアーカイブ計画等，絵画，彫刻，伝統工芸などをデジタル化した高品質なデータベースができつつあり（付録参照），それらの芸術的印象を再現する画像システムを開発する必要がある．さらに，このような高品位画像システムをインフラとして未来画像文化を創造したい¹⁾．

そのためには，現在のいわゆるマルチメディアで表現される“電気紙芝居”レベルを越えた、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，カメラマンが選りすぐった1枚の写真などの芸術的印象を損ねず再現するような電子画像システムが望まれる．しかし，従来の理論では高度な芸術的印象の伝達に必要な物理要因・特性が明らかになっていない．そこでこの高度な芸術的印象；高度

感性情報という新しい切口から重要な物理要因について検討すると，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²⁾³⁾．

この高度感性情報の再現に重要な要因のひとつとして“階調・色の再現”が考えられる．この再現に直接に関わる物理要因・特性のひとつはガンマ特性である．忠実な“階調・色の再現”のためには，CRT ディスプレイのガンマ特性は，撮像時の γ pre-correction の逆特性であることが必要である．例えば Lab 空間におけるデータを表示する場合は，ディスプレイのガンマ特性は $\gamma = 3.0$ 一定が必要であり，NTSC の場合は $\gamma = 2.2$ である．

一般に CRT ディスプレイなどの再生側に求められるガンマ値は入力信号レベルに依存せず一定値としているが，実際の CRT ディスプレイのガンマ値は一定ではない．

本論文では，この入力信号レベル依存のガンマ特性を詳細に議論する．一定値の範囲のみで定義されているガンマ値を入力信号レベル依存のガンマ値として拡張するとともに，従来の特性曲線として示されたガンマ特性をガンマ値の直接表示法にする．また，ガンマ値を入力信号レベル依存の場合に拡張した時の種々の問題点について考察する．

2. ガンマ (γ) の定義

これまで写真とテレビジョンにおいて，ガンマの定義には2通りの方法が使われてきた．写真分野での定義は，特性曲線の直線部の勾配として表したものの，すなわち輝度の対数（濃度）と入力レベル（露光量）の対数との関係における一定の比例定数である⁴⁾⁵⁾．

1998 年 3 月 19 日受付，1998 年 9 月 24 日再受付，1998 年 10 月 6 日採録

†† 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

(〒923-1211 石川県能美郡辰口町旭台1-1, TEL 0761-51-1230)

† ソニー株式会社 インフォメーションテクノロジーカンパニー

(〒141-0001 東京都品川区北品川 6-7-35, TEL 03-5448-8622)

†† School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

(1-1 Asahidai, Tatsunokuchi-chou, Nomi-gun, Ishikawa 923-1211, Japan)

† Sony Corporation

(6-7-35 Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0001, Japan)

ここで、直線部分の2点の入力レベルをそれぞれ x_1, x_2 とし、その時の輝度をそれぞれ $f(x_1), f(x_2)$ とすると、ガンマは

$$\gamma_1 = \frac{\log f(x_2) - \log f(x_1)}{\log x_2 - \log x_1} \quad (1)$$

である(図1)。

テレビジョン分野での定義は、輝度と入力レベルとの関係が、ある一定の範囲において

$$f(x) = ax^{\gamma_2} \quad (2)$$

となるとき、定数 γ_2 をガンマとするものである。ここで a は一定である⁹⁾。

これらの2つの記述はガンマが一定の場合には同じものである。何故なら(2)式において両辺 $\log$ をとると

$$\log f(x_2) = \log a + \gamma_2 \log x_2 \quad (3)$$

$$\log f(x_1) = \log a + \gamma_2 \log x_1 \quad (4)$$

となり、(3)式から(4)式を引くと(1)式が求まることから明らかである。

3. ガンマに非直線性がある場合：入力レベル依存のときへの拡張

3.1 拡張の必要性

(1)式は特性曲線の傾きが一定(ガンマが一定)である時のガンマ値を求める式であり、また(2)式もガンマが一定において成り立つ式である。傾き“一定”の条件は一般的に特性曲線の狭い区間に限定される。3.2節以降に示すが、それぞれの式はガンマが一定であることが保証されている区間以外では用いることができない。しかし現実には、特性は黒から白の広い信号範囲で傾きが一定ではなく、曲線として与えられなければならない範囲がある。この曲線の範囲も含めた全範囲でガンマを求めたい。そのためには、

図1 露光量と輝度との関係
A relationship between exposure and density.

ガンマを入力信号に依存する $\gamma(x)$ として求める必要がある。そのために次節に示すようにガンマ値表現を入力信号依存に拡張する。

また、これまでガンマ特性をグラフを用いて示す場合、両対数軸において縦軸に輝度(濃度)、横軸に入力レベル(露光量)を取り、この2つの量の間係を示していた。このような表示では、どのくらいガンマが規定値(例えば $\gamma = 3.0$) からずれているか一見して判断することは難しい。縦軸にガンマ値をとる表示とすれば、ガンマ値の規定値からのずれを明らかな形で示すことができ、ガンマ特性を詳細に議論することができる。

3.2 $\gamma(x)$ へ拡張

ある入力信号レベル x におけるガンマを $\gamma(x)$ として、これを求める方法を検討する。まず第一の定義の(1)式と第二の定義の(2)式を入力依存のガンマに拡張することを考える。

(1)式において、 $x_1 = x, x_2 = x + \Delta x$ としたものを

$$\gamma_1(x) = \frac{\log f(x + \Delta x) - \log f(x)}{\log(x + \Delta x) - \log x} \quad (5)$$

とする。 $\Delta x \rightarrow 0$ のときこれは特性曲線の接線の傾きであり、階調度(グラディエント)である。 $\gamma_1(x)$ は測定によって求めることができる。

また、(2)式の γ_2 を入力信号 x の関数 $\gamma_2(x)$ とし

$$f(x) = ax^{\gamma_2(x)} \quad (6)$$

とする。このように拡張することで、全入力レベルに渡って特性曲線を $\gamma_1(x), \gamma_2(x)$ として記述できる。

4. $\gamma_1(x)$ と $\gamma_2(x)$ の違い

(5)式の $\gamma_1(x)$ と(6)式の $\gamma_2(x)$ との関係は一般的に $\gamma_1(x) \neq \gamma_2(x)$ である。以下にこのことを示す。

まず、あるシステムのガンマ γ_{2ex} と輝度 $f_{ex}(x)$ を例として次の式で与えてみる。 x は入力信号レベルである。

$$\gamma_{2ex}(x) = m_1(1 - e^{-m_2x}) \quad (7)$$

$$f_{ex}(x) = m_3x^{\gamma_{2ex}(x)} \quad (8)$$

$$m_1 = 2.2, m_2 = 0.03, m_3 = 0.0002 \quad (9)$$

(7)式の関数は実際のディスプレイのガンマ特性を参考に与え、また(9)式の定数値も実際のディスプレイの特性に近いものとして、 $m_1 = 2.2$ はNTSCのガンマ値より、 $m_3 = 0.0002$ は最低輝度 0.0002 cd/m^2 としたときの値として与えた。最低輝度を低く取ったのは、この方がよりガンマの定義の違いによる差が大きくなるためである(6節参照)。この $\gamma_{2ex}(x)$ を描いたものが図2の実線である。ここで、入力レベルは $0 \sim 255$ とした。

一方、この $\gamma_{2ex}(x)$ で表されるシステムの $\gamma_{1ex}(x)$ を計算してみる。(5)式を用い、 $\Delta x = 4$ として計算したグラ

図2 $\gamma_{2ex}(x)$ と(5)式から計算した $\gamma_{1ex}(x)$
 $\gamma_{2ex}(x)$ and $\gamma_{1ex}(x)$ calculated from equ.(5).

フが図2の○点の値である。

図2より $\gamma_{1ex}(x)$ と $\gamma_{2ex}(x)$ は明らかに異なることがわかる。 $\gamma_{1ex}(x)$ と $\gamma_{2ex}(x)$ は異なる関数であり、 $f_{ex}(x)$ を基に(5)式を用いて $\gamma_{1ex}(x)$ を計算しても $\gamma_{2ex}(x)$ を求めたことにはならない、ということがわかる。

5. $\gamma_1(x)$ と $\gamma_2(x)$ の検討

ガンマを入力レベル依存の関数とすると、 $\gamma_1(x)$ と $\gamma_2(x)$ は同一の関数ではなく、別の関数であることがわかった。ここではその理由について考察する。

$\gamma_1(x)$ は Δx が充分小さい時、特性曲線の傾きであるから

$$\gamma_1(x) = \frac{d \log f(x)}{d \log x} \quad (10)$$

である。次に、(6)式の両辺に $\log$ をかけると

$$\log f(x) = \log a + \gamma_2(x) \log x \quad (11)$$

となる。これを $\log x$ で微分すると

$$\frac{d \log f(x)}{d \log x} = \frac{d \log f(x)}{dx} \frac{1}{\frac{d \log x}{dx}} \quad (12)$$

$$= (\gamma_2'(x) \log x + \gamma_2(x) \frac{1}{x})x \quad (13)$$

$$= x\gamma_2'(x) \log x + \gamma_2(x) \quad (14)$$

である。ただし、 $\gamma_2'(x) = \frac{d\gamma_2(x)}{dx}$ である。(10)、(14)式から

$$\gamma_1(x) = x\gamma_2'(x) \log x + \gamma_2(x) \quad (15)$$

が得られる。このように(15)式には余計な項 $x\gamma_2'(x) \log x$ が付いてしまっている。したがって、(5)式、(6)式は入力信号レベル依存のガンマとして自然な拡張と思われるが、ガンマが一定の時とは違い、別々の意味を有していることが明らかになった。この2つの関数の間の関係を示したものが(15)式といえる。また、ガンマ値が一定のときは

図3 (16)式と、(5)式から計算した $\gamma_{1ex}(x)$
 equ.(16) and $\gamma_{1ex}(x)$ calculated from equ.(5).

$\gamma_2'(x) = 0$ だから、 $\gamma_1(x) = \gamma_2(x)$ であることがわかる。

前章の $\gamma_{1ex}(x)$ と $\gamma_{2ex}(x)$ との違いの原因はここにあることが明らかになった。念のため

$$x\gamma_{2ex}'(x) \log x + \gamma_{2ex}(x) \quad (16)$$

を描いたグラフが図3の実線である。○線は図2で計算した $\gamma_{1ex}(x)$ である。このように図3の実線と点線は一致しており、上記考察の正しいことがわかる。

$\gamma_2(x)$ を得る必要がある場合は、測定により $\gamma_1(x)$ を求め、これを関数で近似することにより(15)式から求める。では(15)式から $\gamma_2(x)$ を求めてみる。(15)式の両辺を $x \log x$ で割ると次の1階線形微分方程式を得る。

$$\gamma_2'(x) + \frac{\gamma_2(x)}{x \log x} = \frac{\gamma_1(x)}{x \log x} \quad (17)$$

これを $\gamma_2(x)$ について解く。ただし、この時点で $\gamma_1(x)$ を x の関数の式(近似式)として測定データから求めておく必要がある。

$$\gamma_2(x) = Ce^{-P(x)} + e^{-P(x)} \int e^{P(x)} \frac{\gamma_1(x)}{x \log x} dx \quad (18)$$

となる。ここで、 C は任意定数、 $P(x)$ は

$$P(x) = \int \frac{dx}{x \log x} = \log(\log x) \quad (19)$$

である。よって

$$\gamma_2(x) = \frac{1}{\log x} (C + \int \frac{\gamma_1(x)}{x} dx) \quad (20)$$

が得られる。(15)式、(20)式は $\gamma_1(x)$ と $\gamma_2(x)$ との関係を表す式である。

6. ガンマ特性の実測例

これまで得られた結果をもとに、実際にディスプレイを用いて $\gamma_1(x)$ 、 $\gamma_2(x)$ を求める。ディスプレイは NANO 88F、測定器は MINOLTA BM-7 を用いた。

図4の点線は入力信号レベルと輝度との関係を測定したものである。点線カーブ左側は、最低輝度が 0.02 cd/m^2 (入力信号レベル: 256 (4095 階調)) の場合、点線カーブ右側は最低輝度が 0.00002 cd/m^2 (入力信号レベル: 256 (4095 階調)) の場合である。これらの最低輝度については、今回用いた輝度計での実測が不可能のため、図4の実測値が直線的に低輝度部分まで続くと仮定して、外挿で計算した。最低輝度が異なる場合について示したのは、最低輝度が低い時の方が、 γ が大幅に変動することを示すためである。なお、12 bit 信号を用いたため最大レベルは 4095 である。実線は、 $\gamma = 3.0$ 一定の直線である。

図5の○線は図4に示す入力レベルと輝度の関係から、(5)式を用いて計算した $\gamma_1(x)$ である。このとき $\Delta x = 64$ (4095 階調) である。実線は○線を最小二乗法を用いて4次の多項式で近似した $\gamma_1(x)$ である。グラフ上側は、最低輝度が 0.00002 cd/m^2 (入力レベル: 256 (4095 階調)) のときの $\gamma_1(x)$ 、グラフ下側は最低輝度が 0.02 cd/m^2 (入

図4 入力レベル対輝度特性
Input level - luminance characteristic.

図5 (5)式による測定とその近似式 $\gamma_1(x)$
A measurement by equ.(5) and its approximation $\gamma_1(x)$.

図6 $\gamma_1(x)$ から求めた $\gamma_2(x)$
Obtained $\gamma_2(x)$ using $\gamma_1(x)$.

力レベル: 256 (4095 階調)) のときの $\gamma_1(x)$ である。

図6は図5で求めた実線の $\gamma_1(x)$ から (20) 式を用いて求めた $\gamma_2(x)$ である。上側が最低輝度 0.00002 cd/m^2 (入力レベル: 256 (4095 階調))、下側が 0.02 cd/m^2 (入力レベル: 256 (4095 階調)) の場合である。図5、図6に示すように $\gamma_1(x)$ と $\gamma_2(x)$ は低輝度で大きくずれており、また高輝度ではほぼ一定の値になっていることがわかる。定数 C は、高輝度では $\gamma_1(x)$ 、 $\gamma_2(x)$ が共に等しいという仮定から決定した。

7. む す び

ガンマ特性を入力信号の関数にとらえ、従来、ガンマ値一定の範囲でしか定義されなかったガンマ表示を拡張して、テレビジョン分野と写真分野における定義も包含して、ガンマ値を直接表示する方法を示した。

本研究は高品位ディスプレイの高精度の色・階調再現のために、ディスプレイの入力依存のガンマを補正するという目的の過程で得られた結果である。ガンマの補正と高度感性情報との関係については別の機会に詳細に報告する予定であるが、ガンマの補正を行い、予備実験を行った結果、評価語“奥行き感”や“自然さ”、“実在感”、“品位”が7段階主観評価値で +2 程度の大きな改善を示した⁷⁾。この結果から、高度感性情報の再現のためにはガンマ特性が非常に重要であると考え、研究を進めている。

議論、指導いただ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 寺田正和様に深く感謝致します。

なお、本研究は、日本学術振興会・未来開拓推進事業“未来映像音響制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”プロジェクト JSPS-RFTF97P00601 の援助を受けて行ないました。

< 付 録 >

1. VASARI Project(Visual Art System for Archiving and Retrieval of Images)

絵画を中心とした芸術品を電子的に入手できるようにするための、装置、ソフトの開発を目的としている。長期間、短期間の画像の変化を高精度で測定できる。絵画からの直接 Scanning(via Camera) は、10-40pixel/mm, 32bits/pixel 精度であり、20pixel/mm の時、1.6Gbyte/m のデータとなる。

2. MARC Project(Methodology for Art Reproduction in Color)

絵画からの直接 Scanning(via Camera) は、VASARI Project と同様であるが、できるだけ精度を取ろうとしてカメラの動かし方などが異なる。キャリブレーション、撮影後のソフト処理等が高度になっている。開発中である。

3. 「石川新情報書府」構想

石川県には江戸時代より加賀百万石文化が栄えており、新井白石は「加賀は天下の書府なり」という言葉を残したといわれる。このような歴史的背景から、和島塗、山中漆器、九谷焼、加賀友禅、金沢箔など、数多くの伝統工芸が今でも産業として生きついている。そこで、石川県の文化資産をマルチメディアデータベース化し、世界に向けて発信する。伝統文化関係者間の交流の促進、新たな受注機会の開拓、伝統技術の保存・継承・発案等が期待されている。現在までに、県内外の 671 美術館等に CD ROM を配布した⁸⁾。

〔文 献〕

- 1) 宮原誠 (project leader), “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”: 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 (Apr. ~ 1997)
- 2) M. Miyahara, T. Ino, H. Shirai, S. Taniho and V.R. Algazi: “Important Factors to Convey High Order Sensation”, IEICE Trans. E81-B, 11(Nov.1998)(採録決定)
- 3) 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, pp.35-42(Oct.1997)
- 4) 藤波重次: “写真技術”, 共立全書 62, pp.3-6(1955)
- 5) 丸谷明二, 若林秀一, 川本哲己: “画像処理装置とその使い方”, pp.6-7, 日刊工業新聞社, (1989)
- 6) 倉石源三郎, 荒木恒夫, 近藤昭治: “テレビ放送装置 1”, pp.62-64, 東京電機大学出版局, (1996)
- 7) 猪野高雄, 小林幸夫, 宮原誠: “CRT ディスプレイ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(Feb.1998)
- 8) 「石川新情報書府」, 構想策定協議会報告書 (1996)

いの たかお
猪野 高雄 1996 年, 明治大学精密工学科卒業。1998 年, 北陸先端大・情報科学研究科博士前期課程修了。同年, ソニー(株) 入社。インフォメーションテクノロジーカンパニーに所属。

みやはら まこと
宮原 誠 1964 年, 東京工業大学工学部電子工学科卒業。1966 年, 同大学院修士課程修了。同年, N HK 入社, 1968 年, 同研究所テレビ研究部。1978 年, 長岡技科大助教授, 1987 年, 同大学教授。この間 1983 年, UC, Davis 客員教授 (1 年間)。1992 年, 北陸先端大教授。1997 年, 学振未来開拓事業・未来映像・音響創造研究代表。工学博士。正会員。