

原著論文

スマートデバイス向け簡易ディスプレイキャリブレータの開発

○富永 崇之¹⁾, 木暮 祐一²⁾, 津村 忠助³⁾, 山本 邦雄⁴⁾, 乃万 司⁴⁾¹⁾九州工業大学大学院情報工学府情報創成工学専攻, ²⁾武蔵野学院大学国際コミュニケーション学部,³⁾有限会社 TRIART, ⁴⁾九州工業大学大学院情報工学研究院知能情報工学研究系

A Low-cost Display Calibrator for Smart Devices

○Takayuki Tominaga¹⁾, Yuichi Kogure²⁾, Tadasuke Tsumura³⁾,
Kunio Yamamoto⁴⁾, Tsukasa Noma⁴⁾¹⁾⁴⁾Kyushu Institute of Technology, ²⁾Musashino Gakuin University, ³⁾TRIART, Inc.

Abstract: Smart devices are, in general, inappropriate for medical applications due to the difference of display properties between medical displays and general-purpose displays. We have already developed a software emulator where smart devices work as GSDF display. Considering aging of displays, however, the emulator always needs current display properties. This paper presents a simple and low-cost display calibrator for smart displays. Using ND-filters, users can adjust displays of smart devices instantly, and the devices can output in GSDF.

Keywords: DICOM, Grayscale Standard Display Function, Display Calibration, Smart Device

キーワード: DICOM, グレイスケール標準表示関数, ディスプレイキャリブレーション, スマートデバイス

1. 背景

近年、医師不足が深刻な問題になっている。特に地方の病院では専門医がおらず、急患に対して適切な処置が遅れるという事態をしばしば招いている。しかし、現行の遠隔医療システムは可搬性に欠け、救急医療の分野においてうまく機能していない。そこに、近年スマートデバイスと呼ばれる端末が登場した。スマートデバイスは可搬性に優れるほか、アプリケーションによる高い拡張性と低価格という特徴を備えている。加えて、ネットワークを常時利用できるため、救急医療の分野において非常に高いポテンシャルを有している。そこで、我々はスマートデバイスを利用した救急遠隔医療システムを開発した[1]。その際、スマートデバイスを医療用に利用するにはいくつか課題があり、その課題の一つが表示の階調特性の違いである。医療用ディスプレイと汎用ディスプレイは階調特性が異なっているため、放射線画像を表示した際、その見え方に差異が発生するというものである。この問題に対処するため、スマートデバイスのディスプレイの階調特性を踏まえ、ソフトウェア側で入力を補正する手法を開発した[2]。しかし、この手法は事前に測定した階調特性を利用した補正であり、液晶の経年

劣化や、ディスプレイの保護フィルムの有無といった利用環境による影響に対処することができないという問題を抱えている。

これらの問題に対処するにはディスプレイキャリブレータによる階調特性の校正が必要である。しかし、現状ではスマートデバイス向けのディスプレイキャリブレータは存在しない。そこで、我々はスマートデバイス向けのディスプレイキャリブレータを開発する。

2. 目的

スマートデバイスのディスプレイの階調特性を校正するディスプレイキャリブレータを開発する。キャリブレータを開発するにあたり、スマートデバイスの低価格という特徴を活かすため、輝度計を要さずキャリブレーションできるようにする。また、複雑な操作を要せず誰もが容易にキャリブレーション可能なシステムを開発する。

3. 処理概要

汎用ディスプレイが固有の γ 値による階調特性に従うのに対し、医療用のディスプレイは Grayscale Standard Display Function(以下「GSDF」という)と呼ばれる階調特性に従うように作られている[3]。GSDF は人間の視覚特性に基づいて規定された階調特性であり、人間が見たときに階調のつぶれや、飛びを最小にする自然な階調表現を実現するものである。スマ

2013年1月15日受理。(2013年3月7-8日シンポジウム「モバイル'13」にて発表)

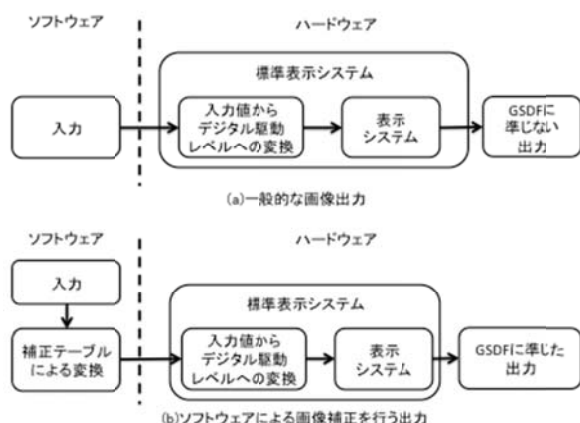


図 1 擬似的に GSDF による出力を得る流れ

スマートデバイスのディスプレイは一般に汎用ディスプレイと同じく固有の γ 値による階調特性を持つため、そのままでは医療用に適した出力ができない【図 1(a)】。そこで、本研究ではスマートデバイスで GSDF に準じた画像出力をするため、ディスプレイの階調特性を踏まえて、入力をソフトウェアで補正する【図 1(b)】。階調特性の計測には一般に輝度計を使用するが、輝度計は高価なため本研究では人間の目視を利用する。また、GSDF に準じた階調特性にするにはそのディスプレイの最高輝度が必要となるが、こちらは照度計で代用する。具体的には、ディスプレイの階調特性を ND フィルタと目視により推定し、加えて照度計で測定した値を用いることで GSDF に準じた階調特性を決定する。そして、入力を補正する補正テーブルを生成する。スマートデバイスで医用画像を出力する際は、入力を補正テーブルによって変換し出力することで、擬似的に GSDF に準じた出力を再現する。

4. 提案手法

4.1 階調特性の推定

4.1.1 推定手法

本研究では、GSDF が人間の視覚特性を利用していることに注目し、階調特性の推定に人間の目視を利用する。人間の視覚特性として輝度の絶対的な評価はできないが、二つ以上の輝度の差異を判定することは可能である。したがって、階調特性をユーザによる輝度の差異の判定によって推定する。その際、比較対象の明るさを保証するものが必要となるため、本研究では ND フィルタを利用する。ND フィルタは可視光を一定の割合で遮断し、光量を調節するものである。また、低価格という特徴を持つ。

本研究で開発したスマートデバイス向けのキャリブレーションアプリケーションの画面構成を【図 2】に示す。ND フィルタはディスプレイの半分を覆うように設置する。もう一方の領域はユーザが自由に輝度値を変更できる輝度値可変領域とする。ユーザは ND フィルタで覆った領域と同じ明るさになるよう輝度値可変領域を操作することで、階調特性を推定する。ここで、



図 2 キャリブレーションの画面構成

ND フィルタを使用した手法として、単一の ND フィルタによるものと、可視光透過率の異なる複数の ND フィルタによるものの2つを提案する。それぞれについて実装し、検討する。

4.1.2 単一 ND フィルタによる階調特性推定

まず、システムはディスプレイの ND フィルタで覆った領域に出力が最大輝度になるような入力を与える。このとき、その領域の出力輝度は ND フィルタによって一定の割合で減衰する。ND フィルタの可視光透過率を t としたとき、最大出力輝度に対する ND フィルタを通した出力輝度の割合も t となる。ここで、ユーザは双方の領域が同じ明るさに見えるように輝度値可変領域を操作する。システムは同じ明るさになったときの輝度値可変領域への入力値を 0 から 1 の範囲で正規化し、ディスプレイの出力輝度の割合と共に、入力対出力グラフにプロットする。次にディスプレイの ND フィルタで覆った領域に先ほどプロットした輝度値可変領域への入力値を与え、同様の作業を繰り返す。このとき、 n 回目の試行の際の最大輝度に対する ND フィルタで覆った領域の輝度の割合は、ND フィルタの可視光透過率を t としたとき t^n となる。最後に、システムはプロットデータに三次スプライン補間を適用して階調特性を推定する。

この手法は後述の複数の ND フィルタによる階調特性の推定手法に比べコストを抑えることができる。しかし、ユーザによる入力に誤差があった場合、その後の入力に影響を及ぼすため精度が悪くなる恐れがある。

4.1.3 複数 ND フィルタによる階調特性の推定

試行回数分だけ可視光透過率の異なる ND フィルタを用意する。単一 ND フィルタによる手法がユーザによる輝度値可変領域への入力を ND フィルタで覆った領域に与えるのに対し、複数 ND フィルタによる手法は、常に ND フィルタで覆った領域に出力が最大輝度になるような入力を与え続ける。ユーザは試行のたびに被せる ND フィルタを変更し、輝度値可変領域を操作して、システムの入力対出力グラフにプロットする。最後に、システムはプロットデータに三次スプライン補間を適用して階調特性を推定する。

この手法では単一 ND フィルタによる手法のように、ユーザによる入力の誤差が以降のプロットに影響を与えることがない。しかし、試行回数分だけ ND フィルタを用意するため、コストが大きくなる。

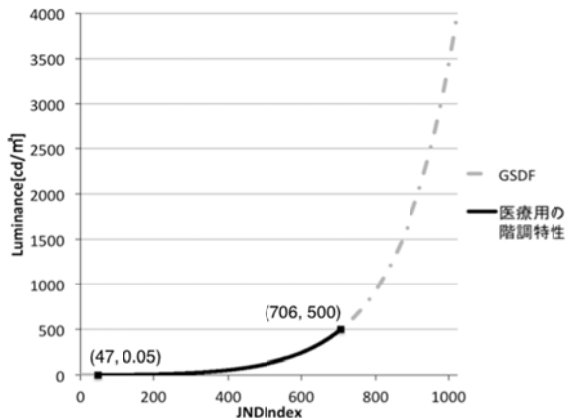


図 3 グレースケール標準表示関数

4.2 GSDF に準じた階調特性の決定

4.2.1 医療用ディスプレイに求められる階調特性

医療用のディスプレイに求められる階調特性は DICOM Part 14 において定義されている[3]。DICOM では測定によって平均的人間観測者が識別可能な最小の輝度差を Just Noticeable Difference(JND、最小分別閾)として定義している。さらに、JND の各整数値(JNDIndex)に対する輝度値を GSDF として【図 3】のように定義している。これは、CRT モニタで表示できる最低輝度である 0.05cd/m²から、X 線マンモグラフィーを見る際に使用するライトボックスの 4,000cd/m²の範囲内で人間は 1,023 の輝度差を感じられることを意味する。ここで、例として輝度の出力範囲が 0.5 cd/m²から 500 cd/m²のディスプレイ A を考える。最低輝度の JNDIndex は 47 であり、最高輝度の JNDIndex は 706 である。したがって、ディスプレイ A を医用利用するには【図 3】の実線部の輝度特性を 659 階調で表現する必要がある。

4.2.2 照度計による輝度の推定

GSDF に準じた階調特性を求めるにはそのディスプレイが出力できる最低輝度と最高輝度が必要である。しかし、人間の視覚特性として輝度の絶対的な評価が出来ないため、輝度を客観的に評価するものが必要となる。一般に輝度の測定には輝度計を用いるが、輝度計は非常に高価であるので、本研究では安価に購入できる照度計で代用する。ここで、輝度は光源の明るさの尺度であり、照度は光源から照射された光の尺度である。照度は光源からの距離によって変化するため、輝度と照度は単純に変換できないが、照度計の受光素子にカバーを設置して、外光による影響を受けないようにし、ディスプレイと受光素子を密接して測定することで、輝度計と同等の機能を持たせることができる。本研究では、輝度計と照度計の双方の計測結果から輝度と照度計を対応させる。システムはディスプレイに出力が最大輝度になるような入力を与え、そのときの出力をユーザが照度計で測定することにより、最大輝度を推定できる。しかし、暗い領域ではディスプレイの出力輝度はほとんど変化しないため、照度計の分解能では最低輝度を推定

することが出来ない。そこで、階調特性の推定においてユーザが作成したプロットデータを利用する。階調関数を式(4.1)とおき、 $i = 1, \dots, n$ について、0 から 1 の範囲で正規化した測定値(x_i, y_i) ($0 < x_i < 1, 0 < y_i < 1$)を与えたとき、最も適した a と γ を推測する。

$$y = (1 - a) + ax^\gamma \quad (4.1)$$

最後に、求めた近似式より y 切片 $1 - a$ を求め、照度計から推定した最大輝度値をもとに、最低輝度値を割合によって求める。これにより、GSDF に準じた階調特性を決定する。

医用ディスプレイには多くの階調を表現できることが求められるが、一般にスマートデバイス搭載されるディスプレイシステムは 8bit であり、256 階調による表現が限界である。そのため、求めた GSDF に準じた階調特性を 256 階調に変換しておく。

4.3 擬似的な GSDF の再現

ND フィルタによって推定したディスプレイの階調特性と照度計によって求めた GSDF に準じた階調特性から補正テーブルを作成する。具体的には、まず、ある入力 A に対する医療用として望ましい出力を GSDF に準じた階調特性より求める。次に、その出力がスマートデバイスのディスプレイにおいて実際になされる入力 A' を推定した階調特性により探索する。そして、入力 A を A' に変換する。このような入力の対応付けを 0 から 255 の全ての入力値に対しておこなう。ここで作成した補正テーブルによって入力を変換し、ディスプレイに入力することで擬似的に GSDF に準じた出力を再現する。

5. 実験

5.1 ND フィルタによる階調特性の推定評価

キャリブレーションをスマートデバイスで動作するアプリケーションとして実装し、階調特性を推定できているか検証する。スマートデバイスは Apple 社の iPhone 4 を使用し、ND フィルタは富士フィルム社の各種 ND フィルタ(シートタイプ)を使用する。また、検証にはトプコン社の輝度計 BM-9 を使用する。なお、検証は蛍光灯環境下のもと実施、被験者は医療従事者でない健康な一般男性である。

単一 ND フィルタによって階調特性を推定した結果を【図 4】に示す。ND フィルタは可視光透過率 1/2 のものを利用し、ユーザによる輝度値可変領域の操作を 4 回おこなった。灰色の実線が ND フィルタで推定した階調特性、黒の破線が輝度計で計測した実際の iPhone 4 の階調特性である。同様に複数 ND フィルタによって階調特性を推定した結果が【図 5】である。また、可視光透過率は 2/3, 1/3, 1/10, 1/32 のものを使用した。

5.2 輝度値推定評価

iPhone 4 のディスプレイを照度計と輝度計で測定し、両者を対応付けする。照度計はビーズ社の GL-08 を使用し、輝度計はトプコン社の BM-9 を使用する。照度計で測定したディスプ

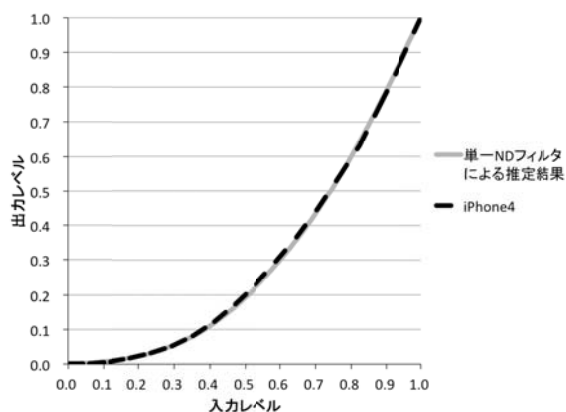


図 4 単一 ND フィルタによる階調特性の推定結果

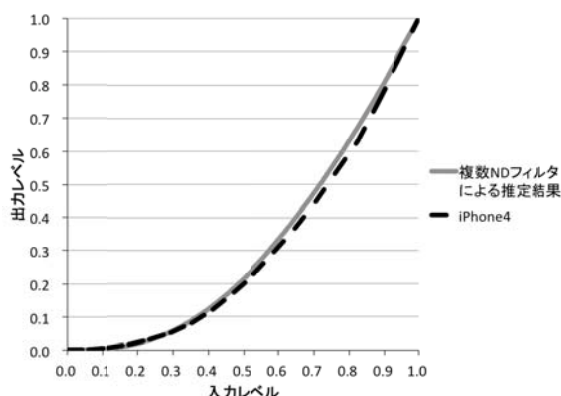


図 5 複数 ND フィルタによる階調特性の推定結果

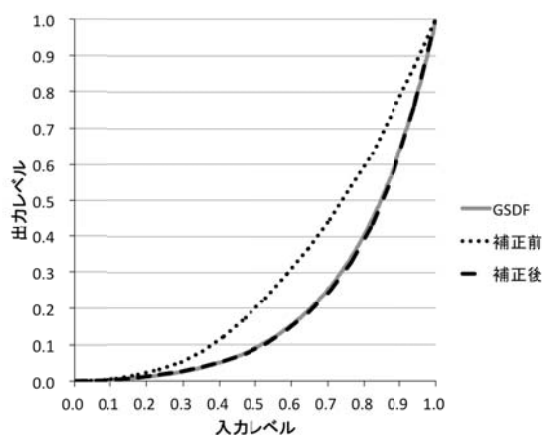


図 6 補正テーブルによる補正結果

レイの照度を $x[\text{LUX}]$ 、輝度計で測定したディスプレイの輝度を $y[\text{cd}/\text{m}^2]$ としたとき、 $y = 0.8458x$ という式に関係を表すことができた。これをもとにディスプレイの最高輝度と最低輝度を推定する。輝度計で測定した iPhone 4 の最低出力輝度と最高出力輝度はそれぞれ $0.41\text{cd}/\text{m}^2$ 、 $467\text{cd}/\text{m}^2$ であったのに対し、照度計による推定結果は $0.01\text{cd}/\text{m}^2$ 、 $470.26\text{cd}/\text{m}^2$ となった。

5.3 GSDF の再現性評価

単一の ND フィルタによって得られた推定結果と、照度計によって得られた GSDF に準じた階調特性から補正テーブルを作成し、補正テーブルによって入力を変換した後の階調特性を【図 6】に示す。灰色の実線が輝度計によって求めた

iPhone 4 に求められる階調特性、黒の点線が補正を行う前の iPhone 4 の階調特性、そして黒の破線が開発したキャリブレーションによって補正した後の iPhone 4 の階調特性である。

6. 考察

ND フィルタにより比較的高精度に階調特性を推定することに成功した。精度の面について、今回の実験データでは単一 ND フィルタによる手法でも精度よく推定できている。しかし、キャリブレーションの環境や被験者によっては大きく誤差が生じる恐れがあるため、今後注意深く検証していく必要がある。また、使用する ND フィルタの種類や、試行回数についても同様に検証する必要がある。

GSDF に準じた階調特性の決定については、GL-08 という照度計を使った場合のみであるが、ある程度の精度で最高出力輝度を推定することが出来た。しかし、もっと汎用的な手法で輝度を推定することができないか検討する必要がある。また、最低出力輝度の推定については、少量の誤差で JNDIndex が大きく変動してしまうため、最高出力輝度の推定以上に精度が要求される。輝度計で測定した iPhone 4 の最低出力輝度に対応する JNDIndex は 44 であるが、推定結果の JNDIndex は 1 と大きな誤差があり、最低輝度値の推定の手法についてはまだ改善の余地が残る。

最後に、GSDF の再現性については補正を行う前は医療用として適さない階調特性であったのに対し、補正を行う事で GSDF に準じた出力を高精度に再現することに成功した。

7. まとめ

本研究では、スマートデバイスを安価かつ容易に医用利用可能にするディスプレイキャリブレーションを開発した。今回、開発したキャリブレーションによって階調特性を校正するのにかかった費用は、照度計が約 3,000 円、ND フィルタが一枚約 2,000 円であり、複数の ND フィルタによる手法でも 11,000 円程度である。輝度計は安価なものでも数十万円するため、本研究で提案した手法は輝度計を使った場合に比べコストの面において大きな優位性がある。また、操作性についてもユーザの操作は「画面を照度計で計測する」、「輝度値可変領域を操作して左右の輝度を合わせる」の 2 点だけで非常に簡易であり、キャリブレーションにかかる時間も 3 分程度と非常に短くすることができた。

今後は、本研究の成果を、以前我々が開発した遠隔医療システム[1]に組み込み、場所を問わず質の高い医療を実施できるよう取り組んでいく。

また、本研究では放射線画像を CT や MRI の画像を正確な階調表現で表示することを目標としたが、がんなどの病巣を見抜くのは非常に高度な知識と経験が要求される。ただ放射線画像を適切に出力するだけでなく、過去の患者の放射線画像と比較によって、病気の疑いがある箇所を医師にわかりやすく

提示するなど、より医師にとって使いやすいシステムの開発に取り組んでいく。

また現在は、セキュリティを考慮した DICOM 画像閲覧システムおよび脳卒中患者の遠隔診断補助システムの開発を行い、TRIART の医療分野への進出を図っている。

参考文献

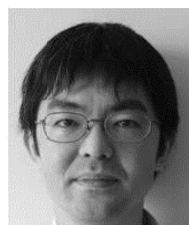
- [1] 富永, 木暮, 津村, 山本, 乃万: スマートデバイスを利用した救急遠隔医療システム, 日本遠隔医療学会雑誌, 第 8 巻, 第 2 号, pp. 112-115 (2012).
- [2] 富永, 木暮, 津村, 山本, 乃万: 遠隔医療システムにおける携帯端末上での DICOM 画像の階調補正, 日本遠隔医療学会雑誌, 第 7 巻, 第 2 号, pp. 224-227 (2011).
- [3] NEMA: Digital Imaging and Communications in Medicine Part 14: Grayscale Standard Display Function, <http://medical.nema.org/Dicom/2011/11_14pu.pdf>, (2012/12/01 アクセス).

著者紹介



富永 崇之(学生会員)

2013 九州工業大学大学院情報工学府情報創成工学専攻博士前期課程修了、修士(情報工学)。スマートデバイスの医用活用の研究に従事。



山本 邦雄(非会員)

2003 九州工業大学大学院情報工学研究科情報科学専攻博士後期課程単位取得退学。2003 九州工業大学へ教務職員として着任、2007 九州工業大学の助教となり現在に至る。主に、コンピュータグラフィックスにおける人体アニメーションやユーザインタフェースの研究に従事。



乃万 司(非会員)

1989 東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻博士課程修了、理学博士。1990 九州工業大学情報工学部知能情報工学科助教授として着任、2002 同学科教授、2008 同大学大学院情報工学研究科知能情報工学研究系教授、現在に至る。主に、コンピュータグラフィックス、ヒューマンインタフェースの研究に従事。ACM、IEEE 等の会員。



木暮 祐一(正会員)

1990 杏林大学保健学部卒。2007 徳島大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)。1992 株式会社法研(雑誌編集者、厚生省厚生日比谷クラブ・労働省労政記者クラブ所属記者)、2000 株式会社アスキー(アスキー『携帯 24』編集長)、2003 戸板女子短期大学国際コミュニケーション学科非常勤講師、2009 武蔵野学院大学国際コミュニケーション学部准教授、2013 青森公立大学経営経済学部准教授。



津村 忠助(正会員)

2002 年九州工業大学大学院情報工学研究科情報科学専攻博士前期過程修了後、株式会社ケイ・ラボラトリー(現 KLab 株式会社)に就職。2005 年に有限会社 TRIART に移り、CIO として新規技術開発と経営に携わる。TRIART では日本初の動的 Flash 携帯サイト構築 CMS「MOSE」やマルチプラットフォームで動作するアプリシステム「XCOA」の開発を行う。