

## 超高精細ディスプレイを活用した知覚画質向上

## Improvement of perceptual image quality by utilizing ultra high definition displays

南雲 祥多\* 田中 亮祐† 上村 健二‡ 高橋 章‡ 竹部 啓輔‡  
 Shota Nagumo Ryosuke Tanaka Kenji Kamimura Akira Takahashi Keisuke Takebe

## 1. 緒言

近年、ディスプレイの高性能化が進み、色域や階調数、リフレッシュレート、解像度などの表示性能を向上させた製品が多く開発・販売されている。とりわけ解像度に関しては、現在デジタルテレビ放送にも使用され、広く普及している規格である Full HD (FHD) の 4 倍の解像度を実現する 4K ディスプレイのような超高精細 (UHD) ディスプレイが普及し始め、さらに高解像度である 8K UHD ディスプレイの開発も進むなど大幅な進歩を遂げている。

一方で、人間が弁別できる大きさには限界があり、一般的な視聴環境においてはディスプレイの高解像度化による画質向上効果を十分に知覚することが出来ないという懸念がある。例えば、23.8 型 FHD ディスプレイにおける一画素の一辺はおよそ 0.274[mm] であるが、これは最適視聴距離とされているディスプレイの高さのおよそ 3 倍である 0.89[m] の距離において、視力 1.0 の人が弁別可能な長さ 0.267[mm] とおおよそ等しく、それ以上の解像度である UHD ディスプレイの一画素は、知覚限界を超えた余剰解像度となっていると考えられる [1] [2]。本研究では、このような余剰解像度を他の性能向上に利用することで、単純に解像度を上げるよりも知覚画質を向上できる可能性について検討している。

印刷分野ではインクの有無という二値出力でありながら、知覚できない微小点を用いたハーフトーン処理により、インクの面積による色の濃淡表現を可能としており、これを面積階調法という [3]。UHD ディスプレイにおける余剰解像度を、この知覚できない微小点とみなすことにより、面積階調法を UHD ディスプレイの画像表示に応用できるのではないかと考えた。

そこで本稿では、UHD ディスプレイで表示する画像に対して面積階調化を行うことで階調数を増加する方法を提案するとともに、ハードウェア的に階調数を増やした場合と比較を行うことにより、知覚画質向上効果についての評価実験の結果を報告する。

## 2. 研究内容

## 2.1. 面積階調化

4K UHD ディスプレイは FHD ディスプレイに比べ縦横 2 倍、すなわち 4 倍の画素数を持つ。そのため、FHD と同じ距離で観測した場合、周囲 4 画素を束ねても FHD と同様な解像感で観測できるはずである。本研究では、4K UHD ディスプレイを用いることとし、周囲 4 画素を束ねたものを疑似一画素と呼ぶ。

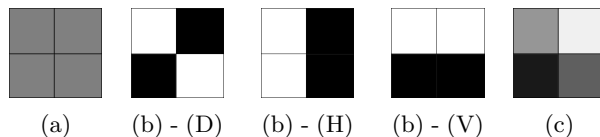


図 1: 階調値が 510 となる面積階調化パターン

グレースケール画像を表示する際、現在一般的な 8bit 表示環境では、階調値 0~255 の 256 階調を表示することが可能であるため、4 画素を束ねることにより単純には 0~1020 の 1021 階調を表示することが可能となる。しかし、実際には各画素の階調値と、実際に出力される輝度には非線形的な特性があるため、階調値が同一でありながら、異なる輝度となるパターンや、逆に階調値が異なりながら、同一の輝度となるパターンが複数存在すると考えられる。これらを活用できれば、1021 階調以上の表現が可能となる。一方で、4 画素の階調表現の組み合わせは膨大となり、全パターンの評価は困難である。そのため、本研究では代表的なパターンについて評価実験を行うこととする。

## 2.2. 面積階調化パターンの作成方法

同じ階調値で異なる画素配置となるパターンの例として、階調値が 510 となる疑似一画素のパターンの例を図 1 に示す。

これは 8bit 表示における階調値 128 に相当する階調値であるが、疑似一画素の配置として、(a) 低コントラスト、(b) 高コントラスト、(c) ランダムを考える。(a) は、4 画素中の階調値の差が 1 以下となるように階調値を定めたものをいう。また、(b) は、(a) の条件に当てはまらないものをいう。具体的な画素値の定め方としては、まず、4 画素中の 1 画素を駆動画素として定め、その階調値を、疑似一画素の階調値になるべく近づけるように駆動させる。次に、残った階調値を別の画素を駆動させることにより表現する。これを疑似一画素の階調値と等しくなるまで繰り返すことにより、パターンを生成する。ここでは、各画像において白く塗りつぶされている画素は階調値 255、黒く塗りつぶされている画素は階調値 0 である。(c) は、全 4 画素値の合計が疑似一画素の階調値と等しくなるような制約を加えたうえで、各階調値を疑似乱数により定めたものである。

本報告では、代表的な高コントラストパターンとして駆動させる画素を左上、右下の順としたものを用いる [4]。また、各画素は視認できないほど微小であるが、印象等に影響を与える可能性もあるため、高コントラストはさらに (D) 水平・垂直高コントラスト、(H) 水平高コントラスト、(V) 垂直高コントラストに分類し、比較を行う。

\*長岡工業高等専門学校 電子機械システム工学専攻

†長岡技術科学大学 工学部電気電子情報工学課程

‡長岡工業高等専門学校 電子制御工学科

表 1: 4K UHD ディスプレイの諸元表

	性能等
サイズ	23.8[型]
画素数	3840 × 2160 [画素]
画素幅	0.139[mm]
階調数	8/10[bit]

表 2: 階調数の輝度領域

輝度領域	階調値の範囲	
	8bit	10bit
低輝度領域	31 - 32	124 - 128
中輝度領域	127 - 128	508 - 512
高輝度領域	239 - 240	956 - 960

### 2.3. 面積階調化の評価

面積階調化の評価は、以下の二段階で行うこととする。

1. 増加階調数の測定
2. 主観評価

増加階調数の測定は実際に出力される輝度を測定することによって行う。具体的には 8bit 表示で階調値が 1 変化した時の輝度値の変化を、面積階調化による疑似一画素の出力輝度によって何分割することが出来るかを定量的に評価する。

主観評価は、実際に様々な画像の構成要素に対して面積階調化を行い、印象に基づいた評価を行う。

### 3. 評価実験

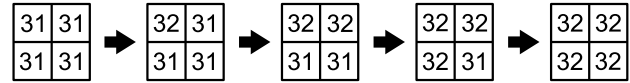
#### 3.1. 実験環境

実験には 8bit と 10bit の 2 つの階調数が利用できる 4K UHD ディスプレイである PHILIPS 241P6 を用いた。この諸元を表 1 に示す。ディスプレイは、予備実験により 8bit 表示時と 10bit 表示時で最大輝度、出力の非線形特性の差が小さいことが確認されたため、以降の実験では同一性能としている。観察および測定は暗室内で、使用するディスプレイの最適視聴距離である 0.89[m] にて行った。輝度計測は色彩輝度計コニカミノルタ CS-100A を用い、ディスプレイ中央部・法線方向にて行った。

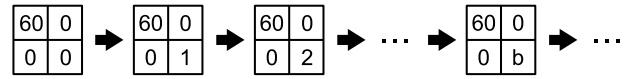
#### 3.2. 階調増加数の評価

最初に、面積階調化による階調数増加効果を定量的に評価し、知覚画質向上が行えることを確認するための実験を行う。すべての階調値に対して調査を行うことは現実的ではないため、輝度領域を表 2 に示すように 3 分割し、すべての代表点に対して以下の手順で測定と評価を行った。

1. 8bit 表示において階調値  $m$  である画素の輝度値  $l_1$  と、階調値  $m + 1$  である画素の輝度値  $l_2$  を計測する。



(a) 低コントラストパターン



(b) 高コントラストパターン

図 2: 使用した面積階調化パターン (低輝度領域)

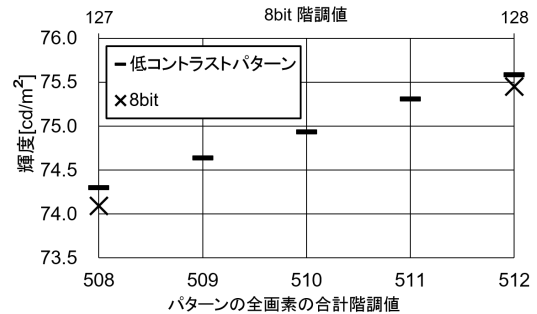


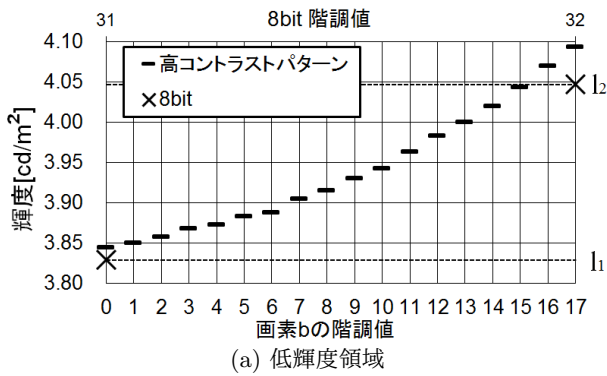
図 3: 低コントラストパターン・中輝度領域における階調値と輝度値の関係

2.  $l_1$  と同等の輝度を出すパターンを図 1(a) 低コントラストパターン、図 1(b)-(D) 高コントラストパターンそれぞれで作成する。
3. 各パターンの階調値を、 $l_2$  に達するまで変化させていく。この操作は、低輝度領域における低コントラストパターンでは図 2(a) のようにしており、高コントラストパターンでは図 2(b) のように、左上 1 画素を使用して基準輝度を作りだした後、画素 b の階調値を変化させている。
4. それぞれのパターンの増加階調数  $N$  [bit] を式 (1) により求める。ここで、 $d$  は分割数、すなわち 3. の操作の回数である。

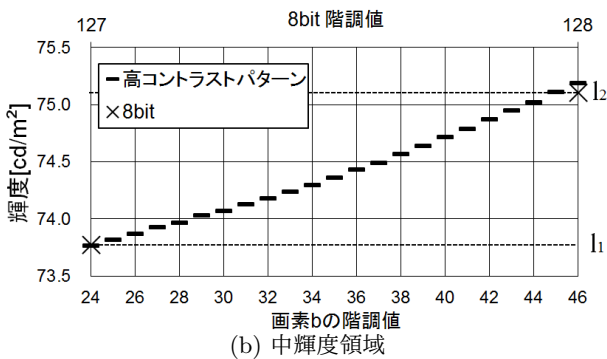
$$N = \log_2 d \quad (1)$$

低コントラストパターンの測定結果のうち、中輝度領域における結果を図 3 に示す。低コントラストパターンによる面積階調表示では、全輝度領域において 8bit 表示の輝度変化を線形に 4 分割するように輝度を出力しており、これは 10bit 表示の出力輝度と一致し、 $\log_2 4 = 2$  [bit] 分の階調増加が行えていることが明らかとなった。また、低輝度、および高輝度領域でも同様の測定を行った結果、中輝度領域と同じく 2 [bit] 分の階調増加が行えていることが明らかとなった。

次に、高コントラストパターンの測定結果のうち、低輝度領域における結果を図 4(a) に、中輝度領域における結果を図 4(b) に示す。図中に引かれている点線は、それぞれ  $l_1$ ,  $l_2$  を表しており、この中に入っているマーカーの数が  $d$  となる。輝度値の変化が一定ではないも



(a) 低輝度領域



(b) 中輝度領域

図 4: 高コントラストパターンにおける階調値と輝度値の関係

表 3: 面積階調法による表示階調数

コントラスト	輝度領域	分割数	増加階調数 [bit]
低	低輝度	4	2.0
	中輝度	4	2.0
	高輝度	4	2.0
高	低輝度	15	3.9
	中輝度	21	4.4
	高輝度	4	2.0

の、8bit 表示時の輝度変化を 4 階調以上に分割することが出来ている。低輝度領域においては 15 分割するように輝度を出力することが出来ているため、この場合の増加階調数は  $\log_2 15 \approx 3.9[\text{bit}]$  となる。また、中輝度領域においては 21 分割するように輝度を出力することが出来ているため、この場合の増加階調数は  $\log_2 21 \approx 4.4[\text{bit}]$  となる。

各パターンの各輝度領域で得られた 8bit 表示からの増加階調数を表 3 に示す。これらの結果から、高コントラストパターンを用いた場合、低・中輝度領域においては 2[bit] を超えた階調数増加が行えることが分かった。一方で、高輝度領域における増加階調数は 2[bit] に留まった。この理由としては、高輝度領域においては全ての画素を発光しなければならないため、画素ごとの光量に差が見られなくなり、結果として低コントラストパターンとほぼ同じ画素配置になってしまったためであると考えられる。しかしながら、全輝度領域において低コントラストパターン以上の階調数増加が見

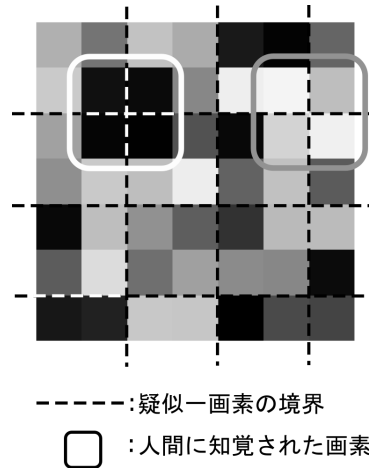


図 5: 図 1(c) を用いた面積階調化結果 (抜粋)

込めることが明らかとなった。これは、画素 b の初期階調値が低輝度領域にあったため、この領域の微小な輝度変化を利用することができたためと考えられる。

以上の結果に加え、人間の視覚が明るい色の変化よりも暗い色の変化に敏感であることから、面積階調化を行う際には高コントラストパターンを利用する方が有用であるといえる。

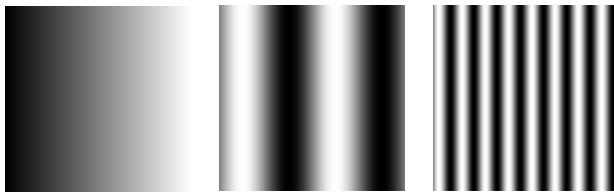
### 3.3. 面積階調化パターンによる知覚への影響調査：一様画像に対する実験

まず、面積階調化パターンの基本特性、および面積階調化パターンが人間の目に知覚されないということを確認するため、一様に塗りつぶされている画像に対する面積階調化実験を行う。原画像は、階調数が 1021 階調で、階調値 510 で一様に塗りつぶされている  $512 \times 512$  画素の画像とする。本実験では図 1 に示した 5 パターンによる面積階調化を行い、3 名の被験者が観察して知覚への影響を評価した。

その結果、図 1(a) と (b) の計 4 パターンを用いた面積階調化では各パターンは視認できず、原画像と同じように一様に塗りつぶされているように見えた。一方、図 1(c) のパターンを用いた面積階調化では、灰色の背景の中に白色や黒色の粒状の画素が混じっているように見えた。この画像の一部を拡大して抜き出したものを図 5 に示す。

図 5 のうち、四角形で囲んだ部分で黒や白の画素が固まって存在していることが確認できる。これらの部分はいずれも疑似一画素の境界に生じている。疑似一画素の大きさは通常のディスプレイにおける一画素と同程度の大きさであるので、この部分が人間の目に知覚されたと考えられる。

以上の結果から、一様に塗りつぶされた画像に対しては、図 1(a) 低コントラストパターンおよび (b) 高コントラストの各パターンによる違いは見られなかった。一方で、図 1(c) は原画像の見え目を損なうため不適当であることが分かった。したがって、以降の実験では図 1(c) を除いた 4 パターンのみを使用することとする。



(a) グラデーション (b) 周期構造 (1) (c) 周期構造 (2)

図 6: 原画像

### 3.4. 面積階調化パターンによる知覚への影響調査：非一様画像に対する実験

次に、一様に塗りつぶされていない画像に対する面積階調化実験を行う。実画像には、前回の実験で扱った塗りつぶされている領域以外にも、グラデーションや周期構造を持つ領域が多く含まれている。このような領域は、上記の一様に塗りつぶされた画像における結果と異なる結果となる可能性があると考えたため、以下に示す手順で実験を行った。

図 6 に示す原画像は、いずれも階調数が 1021 階調であり、(a) は  $1021 \times 1021$  画素の大きさで、左から右に行くにしたがって階調値が 1 ずつ増えている。(b) および (c) は  $512 \times 512$  画素の画像であり、それぞれ階調値が周期 256、64 画素の正弦関数によって変化していく画像である。これらの画像を図 1(a) および (b) の各パターンで面積階調化し、前節の実験と同じ方法で評価する。

まず、図 6(a) 低コントラストパターンを面積階調化した結果、図 1(b)-(D) 水平・垂直高コントラストおよび (b)-(H) 水平コントラストのパターンを用いた際に画像上部や下部に赤色や緑色が着色しているように視認されることが分かった。一方、(a) および (b)-(V) 垂直高コントラストのパターンを用いて面積階調化した際には、着色等は発生せず、原画像と同じように視認されたが、図 6(a) を用いた場合には僅かに鮮鋭感が低下した。

次に、図 6(b) および (c) を面積階調化した結果、図 6(a) の時と同様に図 1(b)-(D) および (b)-(H) のパターンを用いた際に画像上部や下部に赤色や緑色が着色しているように視認されることが分かった。加えて、図 1(b)-(H) を使用した場合は色が変化する付近で鮮鋭感の印象が強くなり、図 1(a) および (b)-(D) を使用した場合は鮮鋭感の印象が弱くなることが明らかとなった。また、これらの現象は図 6(c) で特に顕著に見られた。一方、図 1(b)-(V) を用いて面積階調化した際には、着色等は発生せず、原画像と同じように視認された。

以上の結果から、非一様画像に対して面積階調化を行う場合は、使用する面積階調化パターンによって色や鮮鋭感の知覚に影響が生じることが明らかとなった。前者は、図 1(b)-(D) および (b)-(H) のパターンを用いた際に発生し、後者は図 1(a) および (b)-(D) のパターンを用いた際に発生した。このような現象は、今回実験で使用したディスプレイ以外にも複数の UHD ディスプレイで確認している。したがって、UHD ディスプレイの RGB サブピクセルや駆動回路といったハード

ウェア的な要因によって引き起こされていると考えられる。そのため、現段階では 1(b)-(V) の垂直高コントラストパターンを用いて面積階調化を行うのが最適であると考えられる。

## 4. 結言

面積階調法を利用した階調増加法に関する実験を行い、階調数増加の効果と面積階調化が人の知覚に与える影響について調査を行った。

その結果、面積階調化の際に高コントラストになるように画素値を決定することで、従来の 8bit 表示と比べて最大で約 4.4[bit] の階調数増加が可能であるということが確認された。また、様々な要素を持つ画像に対して面積階調化を行っても、知覚画質の低下は起こらないことが確認された。加えて、特定の条件下において確認された、面積階調表示において着色が生じる、鮮鋭感に変化があるという現象については、使用する面積階調化パターンによって発生しないようにすることが出来ることが明らかになった。

以上の結果から、面積階調化を利用することで UHD ディスプレイにおける知覚画質向上を行えることが明らかとなった。

今後の課題としては、増加階調が知覚画質に与える影響や実画像の面積階調化に対する調査が不十分であるため、これらの事項の調査および評価が挙げられる。また、今回検討を行った非一様画像に対する面積階調化の結果をさらに詳しく調査し、画像の構成要素に対する最適な面積階調化パターンを検討する。この結果に基づき、要素ごとに使用する面積階調化パターンを切り替えるような処理とすれば、より一層の画質向上効果が見込める。そして、最終的には、本研究で得た知見を基にカラー画像への拡張を行い、超高精細ディスプレイにおけるさらなる付加価値創出に寄与していきたいと考えている。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（若手研究 B、課題番号：15K16033）により行ったものである。

## 参考文献

- [1] 三宅洋一，“デジタルカラー画像の評価・解析”，東京大学出版会，2000.
- [2] 坂本清美ほか，“家庭内視聴環境におけるテレビの視距離と視覚疲労の関係について”，FIT2007, LJ-001, 2007.
- [3] 奥富正敏ほか，“デジタル画像処理 [改訂新版]”，CG-ARTS 協会，2015.
- [4] 阿部凌磨ほか，“超高精細ディスプレイを活用した知覚画質向上”，平成 27 年度電子情報通信学会信越支部大会，10A-4, 2015.