色の数や組合せを制限しない
明度差ディザ近似を用いたカラー・ユニバーサルデザイン
(ディザパターン識別性および照明ロバスト性の分析)

大森 有貴^{*1}, 村上 存^{*2}, 池田 卓美^{*3}

Color universal design without restricting colors and their combinations
using lightness contrast dithering
(Analysis of dither patterns distinguishability and lighting robustness)

Yuki OMORI^{*1}, Tamotsu MURAKAMI^{*2} and Takumi IKEDA^{*3}

^{*1,*2} The University of Tokyo, Dept. of Mechanical Engineering

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*3} TOYO INK CO., LTD

1-22-1 Kaga, Itabashi-ku, Tokyo 173-8666, Japan

Received 12 May 2014

Abstract

The authors have been proposing a new method of color universal design without restricting usage of colors and their combinations named “lightness contrast dithering”. A key idea is that a solid color and a dithering of darker and lighter colors which approximate the solid color may look almost similar for people with normal color vision, while they could be distinguishable for people with color vision deficiencies since one is solid and the other is a pattern of dark and light colors. This paper reports the results of investigations on distinguishability of dither patterns (vertical, horizontal and oblique stripes) and lighting (illuminance and color temperature) robustness of lightness contrast dithering.

Key words : Universal design, Color design, Color vision deficiency, Lightness contrast dithering, Distinguishability, Robustness, Illuminance, Color temperature

1. 緒言

色は様々な表現や情報伝達の目的で使用されている。近年、色覚特性の相違によらず必要な情報伝達などが行えるように配色の設計・デザインを行うカラー・ユニバーサルデザインが必要となっている (中内, 2010)。従来のカラー・ユニバーサルデザインの代表的なアプローチである、色覚異常者にとって識別が可能な色の組合せのみを用いる方法 (Rasche, et al., 2005)(Nakauchi and Onouchi, 2008) (図 1 中央) は、使用できる色数や色の組合せが制限される。デザイナーは配色によってイメージを表現し、新しいデザインを発信することもあるが、使用できる色数が制限されると、デザインイメージの表現が制限されるという問題が生じる。それに対して本研究では、画像処理におけるディザリング (dithering) の処理を応用し、デザイナーが使用したい色の数や組合せを制限せず、かつ色覚異常者に対する色の表現や情報伝達の目的も果たす、新たなカラー・ユニバーサルデザインのアプローチとして、明度差ディザ近似を提案している。先行研究 (大森他, 2012) では、明度差ディザ近似手法における、近似色の性質や識別性能について検証したが、同じ明度差とディザサイズをもつパターンでも、より性能のよいパターンがあるのではないかという仮説の検証や、現場で用いられる際の外乱である照明環境の変化に対するロバスト性についての調査がなされていない。よって、単純形状のパターンにおける識別性能に差があるとい

No.14-00253 [DOI:10.1299/transjsme.14-00253], J-STAGE Advance Publication date : 28 July, 2015

^{*1} 東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 正員, フェロー, 東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻

^{*3} 東洋インキ (株) (〒173-8666 東京都板橋区加賀 1-22-1)

E-mail of corresponding author: murakami@mech.t.u-tokyo.ac.jp

う仮説の検証と、本手法の照明環境に対するロバスト性の調査の二つが本研究の目的である。なお、明度差ディザ近似は、印刷物（反射光，減法混色）、ディスプレイ（透過光，加法混色）のいずれにも適用可能だが、本研究ではまず印刷物を対象に研究を行なう。

2. 明度差ディザ近似による色の識別

画像工学におけるディザリング処理は、人間の目の解像度では個々の色を識別出来ないパターンを組み合わせ、併置加法混色を生じさせることにより、限られた色で多数の色を近似表現する手法である。本研究では、ある単一无地色（明度 L^* ）を、明るい色（明度 $L^* + \Delta L^*$ ）と暗い色（明度 $L^* - \Delta L^*$ ）の2色を組み合わせたディザで近似表現する（図1右）。色覚異常者は正常色覚者に比べて明度弁別に優れるという報告もあり（高柳他，1987），色覚異常者にとって識別が困難な無地色2色の組合せにおいて、一方の色を明度差ディザ近似すると（図2），その組合せ C_d は正常色覚者にとっては元の無地色2色の組合せ C とほぼ同様に見え、色覚異常者にとっては無地色と明度差パターン C_d' として見えることで識別が可能になるのではないかと（図3），というのが本研究の基本的な着想である。

3. ディザパターンによる識別性能の差異

3・1 実験の背景

先行研究（Omori, et al., 2013）において、基本的なディザパターンである市松模様と縞模様を比較した場合、同

		Color design		
		Original color	Hue shift (Conventional color UD)	Lightness contrast dithering (This research)
Color vision	Normal
	Color Deficiency simulation

Fig. 1 Color universal design with color modification and lightness contrast dithering

Fig. 2 Color distinction by dithering

Fig. 3 Expected effect of dithering method

じ明度差とディザサイズであっても、後者が識別性に優れるという結果が得られた。これは、市松模様は横と縦の2方向に混色がなされるため、パターンが目立たないことが望ましい通常のディザリングには有利であるが、パターンが知覚される必要がある本研究の目的においては不利であるためと考えられる。さらに、縞模様においては、縞の方向による識別性の差異が存在し、具体的には縦縞の場合に識別性が優れている可能性が示唆されていた。このことは、同じパラメータであっても、パターンの変更によって、色覚異常者に対する識別性を向上できる可能性を示している。

3・2 実験の目的

そこで、本論文では縞模様を対象とし、縞模様の方向による特性の相違の有無を確認する目的と、表現対象の内容によりデザインの観点で適した縞模様の方向が異なる可能性の二つの意味で、縦縞、横縞、斜縞のディザパターンについて調査することとした。

3・3 実験方法

本実験は、縞模様中に見える何かしらの図形に対する被験者の見え方を純粹に抽出する必要があり、その図形の形状の影響を受けてはならないという制約がある。この制約条件を満たすため、我々は等方性のある円を図形として用いることとした。用いたサンプルの例を図4に示す。輪の外側、内側ともに十分な本数の縞が存在する寸法を設定し、プリンタの印刷方向による縞の品質差の影響を排除するため、図5に示す印刷、切取方法により、同一品質の縦・横・斜の三方向のサンプルを作成した。

Fig.4 Circle samples

Fig. 5 Stripe orientation in inkjet printing

実験条件を表 1 に示す. 色は色覚異常者に区別困難な色の代表であるピンクとグレーの色の組を選択しており, ソフトウェア (UDing, 2013) で色覚異常における見え方を模擬したときに同じ色になるように調整してある. そして色覚異常の見え方を模擬したサンプルを正常色覚者に見せることで, 色覚異常者を模擬して実験している. サンプルの明度差とディザサイズは先行研究 (Omori, et al., 2013) によって識別性が確認された 5 通りの組合せ (表 1) を用い, 照明, サンプルと目の距離も先行研究と同一とした. サンプル数は 5 (明度差とディザサイズの組合せ) $\times$ 3 (縦縞, 横縞, 斜縞) = 15 となり, そのすべての組合せを左右も入替えて比較するため, ${}_{15}C_2 \times 2 = 210$ 通りの比較となる.

Table 1 Experimental conditions.

Item		Value
Participants		10 males and 9 females in twenties, normal color vision.
Samples	Size (mm)	50 $\times$ 50, Outer/inner diameters = 25/15
	Color	Pink : (R, G, B) = (211,168,180) Gray : (R, G, B) = (181,181,182)
	Icc profile	Adobe RGB
	Lightness contrast ΔL^* $\times$ Dither size (mm)	4 $\times$ {0.4, 0.5}, 7 $\times$ {0.3, 0.4, 0.5}
	Dither pattern	Vertical, horizontal and oblique stripes.
Printing	Printer	EPSON PX- H10000
	Paper	EPSON photo paper
Lighting		Daylight D50
View distance (cm)		40

実験には, シェッフェの一対比較法 (Scheffe, 1952) を用いている. シェッフェの一対比較法とは, 全てのパラメータの組を一対一で比較し, 片方を基準刺激としてもう一方が基準刺激に対してどの程度の刺激値を有するのかを評価する方法である. 本実験では, 左側を基準刺激, 右側に評価刺激を配置しており, 刺激値の評価ヤードスティックを図 6 に示す. 実験環境の模式図を図 7 に示す. 実験協力者に実験方法を説明し, 3 回練習を行なってから, 本番の実験を行なった.

Fig. 6 Estimation yardstick.

Fig. 7 Schema of experiment.

3・4 実験の結果と考察

まず、縞の方向によって有意差が生じているかどうかを検証するために、分散分析を行った。目的変数は一対比較の結果の合計値であり、右に配置された場合と左に配置された場合で分けている。分散分析において有意差があった項目について表2に示す。

Table 2 Result of analysis of variance.

Analysis of variance		**: 1% significant	
Factor	F value	P value	Judgment
Pattern width	972.3691	0.0000	**
Lightness contrast	2005.9834	0.0000	**
Position	30.5817	0.0000	**
Pattern	97.6564	0.0000	**
Pattern width * Lightness contrast	19.9426	0.0000	**

パターンによる影響が1%有意であることから、縦・横・斜の縞の間に差があることが言える。次に、サンプルの左右の提示位置に対して有意差の判定が出ているが、これは全ての組においてサンプルの配置を左右入れ替えて行っているため、実験方法に問題があったことによらない。原因として考えられるのは、実験協力者の利き目側にあるものの方が可読性は高くなっていることなどが考えられる。これらの傾向についてより具体的に知るために、サンプルのパラメータ値2水準について多重比較分析を行った。その結果を表3に示す。

Table 3 Result of multiple comparison analysis

Multiple comparison analysis		**: 1% significant			
Factor	Response variable	Level 1	Level 2	P value	Judgment
Pattern width	Readability	0.4	0.5	0.0000	**
Lightness contrast	Readability	4	7	0.0000	**
Position	Readability	Right	Left	0.0000	**
Pattern	Readability	Vertical	Horizontal	0.0000	**
		Vertical	Oblique	0.0000	**
		Horizontal	Oblique	0.0001	**

Fig.8 Mean score of each pattern

表3と図8から分かるように、パターン間では、縦、斜、横の間に1%の危険率で有意差がある。先行研究(Lidwell, et al., 2004)によれば、人は斜めよりも縦や横の線を認識する方が早い。これが原因となって斜よりも縦の方が識別性能が高くなっている可能性がある。しかしながら、横の方が斜よりも読みにくくなっているのも、それ以外の影響があると考えられる。その一つの他の要因として、人間の目が左右に並んでいることから、縦線と横線の知覚のされ方が異なっているかもしれないことも要因として考えられる。また、左右の位置によって

読みやすさに1%の有意差が生じているが、このことは、どちらかの利き目の人が多く、その利き目の方がより読みやすいなどといった原因が考えられる。

3・5 まとめ

以上の結果から、明度差ディザ近似において、明度差とディザサイズが同一であっても、表現対象の内容によるデザイン上の問題がなければ、横縞、斜縞より縦縞のディザリングが色覚異常者に対する高い識別性を提供できることが分かった。

4. 明度差ディザ近似手法の照明環境に対するロバスト性

4・1 実験の背景

本研究で提案する明度差ディザ近似手法の、理想的な光源下での識別性能は先行研究 (Omori, et al., 2013) にて実証されており、識別性を有するパラメータ群も調査済みである。しかし、使用されている場所ごとの照明条件の相違や、一日の中の時間帯による光の状態の変化などに対して、一定以上のロバスト性を有していなければ、実用化は限定的となる。そこで、我々は本手法の様々な照明環境下でのカラーUDとしての識別性能の傾向を調査した。

4・2 実験の目的

明度差ディザ近似手法の照明環境に対するロバスト性の有無、およびその傾向の調査を本実験の目的とする。また、その傾向の仮説として以下の2点を考えた。

- ・物体の表面の色と同系色の照明のとき、全体がぼやけるため、可読性・視認性が低下するのではないか。
- ・照度が低くなると、可読性・視認性が低下するのではないか。

4・3 実験方法

色覚異常者には区別ができない2色の片方に、理想的な照明下では識別性能を示したディザパラメータをもつディザを施したサンプルを作成し、パラメータを振ったさまざまな照明下でサンプルを提示する。そして、被験者が識別可能であったかどうかを、回答の正否と回答までにかかった時間の二つの評価項目で評価して分析する。被験者には正常色覚者を用い、色覚異常者の色覚を模擬する眼鏡、バリエントール (Variantor, 2013) を装着してもらい、色覚異常者を模擬する。サンプルや照明環境などの実験パラメータを表4に示す。色はD型の色覚異常者(中波長を感知するM錐体がない)にとって区別が困難な二色である青緑と灰色を用い、前述のバリエントールで区別が完全に不可能な2色になるよう調整し決定した。サンプルの明度差とディザサイズは先行研究 (Omori, et al., 2013) によって識別性が確認された5通りの組合せ(表4)を用いた。照明環境の調整は、LED Color Viewing LightLED(LED, 2013)を付属のソフトウェア(ColorControl Software LED)によって操作することにより実現した。照明による明るさを表す照度は、明るい、やや暗い、暗い、の3水準を用意し、一方で照明の色みを表す色温度は、赤寄り、白、青寄りの3水準を用意した。これまでの実験とは異なり、照明条件(照度、色温度)を変化させるため、有彩色である青緑と無彩色である灰色の相違がある場合にはそれが確認できるように、図9にサンプルの例を示すとおり図と地の入れ替えを含める。以上により、実験するパラメータの組合せは、5(明度差とディザサイズの組合せ)×3(照度水準)×3(色温度水準)×2(図と地の入替え)=90通りとなる。90通りの中で同じ図形が繰り返し出てくると、回数を重ねるごとに予測ができて回答に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、図と地の入替えにおいて2回同じ図が出現しても、順番の間隔が大きければ影響は少ないと考え、表4に示す計45文字のアルファベット、ひらがな、漢数字を用いることとした。予測による影響を減ずるため、文字のフォントを読める範囲で変形させた(図9)。文字による読みやすさが回答に影響を与える可能性も考慮し、文字の形について無次元化した複雑度を次式により定義し(Chipman, 1977)、前述のパラメータと複雑度の組合せに偏りが生じないように考慮した。実験の模式図を図10に示す。

$$Co = P^2/A \quad (Co: \text{complexity}; P: \text{perimeter}; A: \text{area})$$

Table 4 Conditions

Item		Value
Participants		10 males and 10 females in twenties, normal color vision.
Samples	Color	Blue Green : (R, G, B) = (74, 155, 156) Gray : (R, G, B) = (150, 150, 150)
	Icc profile	sRGB
	Lightness contrast $\Delta L^* \times$ Dither size (mm)	$4 \times \{0.4, 0.5\}, 7 \times \{0.3, 0.4, 0.5\}$
	Dither pattern	Vertical stripe
Printing	Printer	EPSON PX-H10000
	Paper	EPSON photo paper
Lighting	Illuminance (lx)	100, 500, 1000
	Color temperature (lx)	2800, 5000, 8000
Symbols to read		3, 4, 6, 8, 9, A, a, C, d, E, G, H, K, m, N, R, T, W, X, y, い, う, え, か, け, す, せ, そ, た, て, と, の, ふ, ま, み, も, ゆ, よ, る, 四, 五, 六, 七, 九, 十
View angle ($^\circ$), view distance (cm)		Approximately 2, 40

Fig. 9 Samples (Left: gray is dithered, Right: green is dithered)

Fig. 10 Schema of Experiment

Fig. 11 Picture of experiment

4・4 実験の結果と考察

まず、実験協力者が回答までにかかった時間 T については、関数 $1/(1+T)$ を分析に用いる。それにより、瞬時 ($T=0$) に読めた場合に最大値 1、読めずにあきらめた場合を $T=\infty$ と解釈すれば最小値 0 をとる評価指標が得られる。この評価方法の導入により、より読みやすさに優れているパラメータほど評価の値が大きくなるという傾向を示すことになり、整合性のとれた評価を行うことができるようになった。関数 $1/(1+T)$ に分散分析を行い、説明変数は、照明の照度と色温度、ディザの明度差とサイズ、背景色が有彩か無彩か、の計 5 つとした。20 名 $\times$ 90 サンプルのうち、読めなかった 13 回答を除く 1787 回答について時間 T の分布を図 12 に、分散分析の結果を表 5 に示す。

Fig.12 Distribution of time to identify characters.

Table 5 Result of analysis of variance.

Analysis of variance		**: 1% significant *: 5% significant		
Factor	Type III sum of squares	F value	P value	Judgment
Color temperature	0.0278	2.8079	0.0607	
Illuminance	2.1873	220.9239	0.0000	**
Dither size	0.1315	26.5703	0.0000	**
Lightness contrast	0.1788	36.1212	0.0000	**
Dither size * Lightness contrast	0.0212	4.2922	0.0385	*

まず、色温度によって統計的に有意差が生じていないことが分かる。つまり、明度差ディザ近似手法は色温度に対するロバスト性があるということが言える。明度差ディザ近似は元の色の明度のみでコントラストをつけるため、照明の色温度が変化しても明度のコントラストは保持されることが原因であると考えられる。これは、明度差は色覚特性によらず知覚可能であるので、それをカラーUD に利用できるはずである、という本研究の着想に合致する結果である。

一方で、照度に関しては1%有意で差があることが示されている。このことをより細かく分析するため、多重比較分析を行った。その結果を表6に示す。

Table 6 Result of multiple comparison method

Multiple comparison analysis		**: 1% significant			
Factor	Response variable	Level 1	Level 2	P value	Judgment
Illuminance	$1/(1+T)$	100	500	0.0000	**
		100	1000	0.0000	**
		500	1000	0.0000	**

照度に関しては、このように全ての水準間で1%の危険率で有意差が生じている。つまり、明度差ディザ近似手法は照度に対してロバストではなく、照度が高い環境で用いることが望ましいと言える。印刷物の場合、明度のコントラストとは入射光をどれだけ反射するか程度の差であり、入射光が低下すればその分だけ反射光のダイナミックレンジが縮小され明度差が縮小するためであると考えられる。

4・5 まとめ

以上の考察により、以下の3点が結論として得られた。

- ・ 明度差ディザ近似手法は照明の色温度に対してロバスト性がある。
- ・ 明度差ディザ近似手法は照明の照度に対してロバスト性がない。
- ・ 明度差ディザ近似手法は照度の高い環境で用いることが望ましい。

5. 結言

本研究において、以下のことが得られた。

- ・ 明度差ディザ近似手法を用いることで、デザイナーが配色を行なう際の色の組合せの制限を緩和することができる。
- ・ 同じ明度差、ディザサイズを用いる場合、横縞、斜縞よりも縦縞のパターンが識別性能の面で優れている。
- ・ 明度差ディザ近似手法は照明の色温度に対してロバスト性があるが、照度に対してロバスト性がない。
- ・ よって、照度の低い環境下で用いられるものに対しては、大きめのパラメータを用いなければならない。

今後、本手法をより優れたものにするため、輪郭形状に対してディザパラメータを最適化することや、デザイナーがパラメータの選択をする負担を軽減するために、同じ識別性能をもつパラメータの組合せを関係式や等識別度曲線などの形で整理することが必要である。

本研究は、科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究、24656109）により実施された。

文 献

- Chipman, S.F., Complexity and structure in visual patterns, *Journal of Experimental Psychology: General*, Vol.106, No.3 (1977), pp.269–301.
- LED colorControl (online), available from <http://www.takeinc.co.jp/take_digital/products/JUST/index.html#led_ccl>, (参照日 2013 年 8 月 8 日).
- Lidwell, W., Holden, K. and Butler, J., *Design Rule Index* (2004), pp.146–147, ビー・エヌ・エヌ新社.
- Nakauchi, S. and Onouchi, T., Detection and modification of confusing color combinations for red-green dichromats to achieve a color universal design, *Color Research & Application*, Vol.33, No.3 (2008), pp.203–211.
- 中内茂樹, 色覚の多様性とカラーユニバーサルデザイン, *照明学会誌*, Vol. 94, No.3 (2010), pp.181–185.
- 大森有貴, 村上存, 三石直人, 池田卓美, ディザ近似を用いた色数を制限しないカラー・ユニバーサルデザイン, *日本機械学会第 22 回設計工学・システム部門講演会講演論文集* (2012), pp.213–222.
- Omori, Y., Murakami, T. and Ikeda, T., Color universal design without restricting colors and their combinations using lightness contrast dithering, *The 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research (IASDR)* (2013), Paper No. 2227-1.
- Rasche, K., Geist, R. and Westall, J., Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.25, No.3 (2005), pp. 22–30.
- Scheffe, H., An analysis of variance for paired comparisons, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.47, No.259 (1952), pp. 381–400.
- 高柳泰世, 安間哲史, 大橋克彦, 長屋幸郎, 神谷貞義, 色覚異常者の明度識別能に関する研究, *日本の眼科*, Vol.58, No.7 (1987), pp.517–524.
- UDing シミュレーター, 東洋インキ (online), available from <http://www.toyo-uding.com/tool/uding_simulator.html>, (参照日 2013 年 7 月 16 日).
- Variantor, 色弱模擬フィルタ (online), available from <<http://www.variantor.com/jp/>>, (参照日 2013 年 8 月 7 日).

References

- Chipman, S.F., Complexity and structure in visual patterns, *Journal of Experimental Psychology: General*, Vol.106, No.3 (1977), pp.269–301.
- LED colorControl (online), available from <http://www.takeinc.co.jp/take_digital/products/JUST/index.html#led_ccl>, (accessed on 8 August, 2013) (in Japanese).
- Lidwell, W., Holden, K. and Butler, J., *Design Rule Index* (2004), pp.146–147, BNN (in Japanese).
- Nakauchi, S. and Onouchi, T., Detection and modification of confusing color combinations for red-green dichromats to achieve a color universal design, *Color Research & Application*, Vol.33, No.3 (2008), pp.203–211.
- Nakauchi, S., Color vision deficiency and color universal design, *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, Vol.94, No.3 (2010), pp.181–185 (in Japanese).
- Omori, Y., Murakami, T., Mitsuishi, N. and Ikeda, T., Color universal design without restricting color combinations by dithering technique, *JSME Design and Systems Conference 2012* (2012), pp.213–222 (in Japanese).
- Omori, Y., Murakami, T. and Ikeda, T., Color universal design without restricting colors and their combinations using lightness contrast dithering, *The 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research (IASDR)*

(2013), Paper No. 2227-1.

Rasche, K., Geist, R. and Westall, J., Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.25, No.3 (2005), pp. 22–30.

Scheffé, H., An analysis of variance for paired comparisons, Journal of the American Statistical Association, Vol.47, No.259 (1952), pp. 381–400.

Takayanagi, Y., Yasuma, T., Ohashi, K., Nagaya, Y. and Kamiya, S., Study on brightness discrimination ability of color-vision deficiency, Ophthalmic Practice, Vol.58, No.7 (1987), pp.517–524 (in Japanese).

UDing Simulator, Toyo Ink (online), available from <http://www.toyo-uding.com/tool/uding_simulator.html>, (accessed on 16 July, 2013) (in Japanese).

Variantor, Dichromatic Spectacles (online), available from <<http://www.variantor.com/jp/>>, (accessed on 7 August, 2013) (in Japanese).