

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280064

研究課題名(和文)クレイク・オブライエン錯視効果を援用した色覚バリアフリー動画表示システムの開発

研究課題名(英文)Development of the C-0 Effect-Based Color Barrier-free Display System for Image and Movie

研究代表者

末竹 規哲 (SUETAKE, Noriaki)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80334051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：2色覚者は特定の色の組合せについて弁別しにくいという色覚特性を持つ。本研究では、クレイク・オブライエン効果(C-0効果)という錯視現象を利用して2色覚での見えを改善し、更に一般色覚者にとっても見やすい画像・映像を提示可能なシステムを開発する。C-0効果は、領域の境界部分における特定の明度分布が大域的に影響を及ぼし、各領域の明度が本来の明度とは異なって見える現象である。提案システムでは、入力画像中の近傍画素の色の違いに基づいて明度成分を変化させることで、2色覚においてC-0効果が生じるようにする。実験により提案システムの有効性を示す。

研究成果の概要(英文)：Dichromats cannot distinguish certain color pairs. In this study, we develop a system which improves visibility for the both of normal vision and dichromats based on the Craik-O'Brien (C-0) effect. The effect is an optical illusion which generates the subjective contrast. The effect is yielded by the lightness distribution of the contour in an image. In the developed system, the lightness component in an input image is modified to yield the C-0 effect based on color distributions in a local area. The lightness modification is carried out by using the modified Color2Gray algorithm which is a color-to-monochrome conversion method and is proposed by us. The effectiveness of the developed system is verified through an experiment.

研究分野：画像処理，知覚情報処理

キーワード：色覚バリアフリー クレイク・オブライエン錯視効果 色変換システム

### 1. 研究開始当初の背景

近年、多くの分野で画像や映像(動画)をフルカラーのデータとして取り扱うことが一般化され、その重要性は日々増している。これはPCやHDTV、スマートフォン等の急速な普及によるところが大きい。しかし、画像・映像(動画)をフルカラー表示すればするほど、全ての人にとって情報が正確に伝わるというわけではない。日本人を含む多くの黄色人種では男性の約5%、黒人男性では2~4%、白人男性に至っては8~10%の人が1又は2色型色覚という視覚特性を有しており、特定の範囲(例えば、多くの2色型色覚者では、赤と緑、青と紫など)の色弁別に困難を感じている。そのため、配色によっては、情報が正確に伝わらないという問題がある。そこで、全ての人にとって見やすく、分かりやすい動画を表示するために、現在、「色覚(カラー)バリアフリー」を実現する映像(動画)処理法の開発が急務となっている。

1,2色型色覚(網膜上の錐体細胞の種類が、1,2種類しかなく、色弁別が困難)の人にとって見分け難い色の組み合わせに関する代表的な研究に、Juddらの混同色線理論がある。これは、図1に示すように、 $xy$ 色度座標上の1点(混同色中心)から引かれる直線(混同色線)上に位置する全ての色が2色型色覚特性を有する人にとって弁別困難になるというものである。実際に、フルカラーの画像データを $xy$ 色度座標上に射影すると、同一の混同色線上に多数のデータが存在する。また、原画像の配色を大きく変えると、一般的な色覚特性を有する人にとって画像の印象は激変し、場合によっては、見苦しく、奇妙な配色となってしまう。

従来、この問題に対する色変換手法がいくつか提案されている。これらは「色の組み合わせに関する最適化問題を設定し、それを解くことで色変換を行う手法」と、「クラスタリング処理により入力画像中の代表色を決定し、代表色の組み合わせを考慮した上で色変換を行う手法」に大別される。いずれの手法においても、ある程度弁別困難色を解消できるが、元の色と比べて著しく異なる色への変換が随所で行われ、原画像のもつ色彩の印象が損なわれる場合が多い。(具体的には、赤色が青色に変換されるといったことが容易に起こる。)また、いずれの手法も繰り返し計算を必要とするために計算コストが大きいという欠点も持つ。従って、色の組み合わせが増大する動画に対しては、これらの手法は役に立たなくなる。

一方、申請者は、科学研究費(挑戦的萌芽研究、平成19~21年度;基盤研究(C)、平成22~24年度)において、「混同色線理論と色距離に基づいた明度修正による色変換アルゴリズム」を開発している。このアルゴリズムは、画像中の明度のみを修正するので、色彩の大幅な変更がなく、元の画像の印象を良く保持した上で画像の色覚バリアフリー

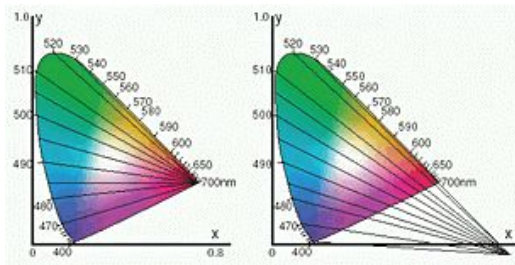


図1: 2色型第1(左)・第2(右)色覚の混同色線

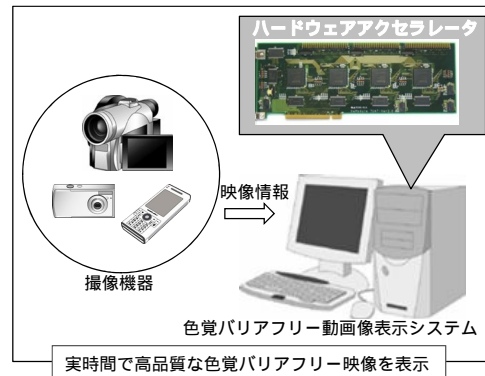


図2: システム構成図

化が出来るという特長を持つ。しかし、動画には未だ対応出来ていなかった。また、財団法人電気通信普及財団の調査研究助成(平成23年度)において、「クレイク・オブライエン(C-0)錯視効果を利用した画像の明度修正による色覚バリアフリー化アルゴリズム」も開発している。このアルゴリズムは、イラストのように画像中の等色領域の面積が広く、領域境界に明確なエッジが存在する画像に対しては、低計算量で良好な結果を得ることが出来る。しかし、自然画像に対しては効果が小さいという欠点がある。

### 2. 研究の目的

研究の目的は、一般色覚者と1・2色型色覚者の双方にとって色弁別が容易で、かつ過剰な色変化がなく違和感の少ない動画を表示する「色覚バリアフリー動画表示システム」を構築することである。本研究では、申請者が以前より開発してきた「混同色線理論と色距離に基づいた色変換アルゴリズム」及び「クレイク・オブライエン錯視効果を利用した色変換アルゴリズム」を相補的に融合し、この問題を低計算量で解くための求解アルゴリズムを新規に開発する。これにより、これまで歯が立たなかったフルカラーの動画の実時間色覚バリアフリー化を実現する。最終的には開発アルゴリズムのシステム実装を行う。図2にシステム構成図を示す。

### 3. 研究の方法

本研究では、C-0効果に基づき、一般色覚及び2色覚での見えを改善するシステムを構築する。提案システムでは、Goochらにより提案されたColor2Grayアルゴリズムを利

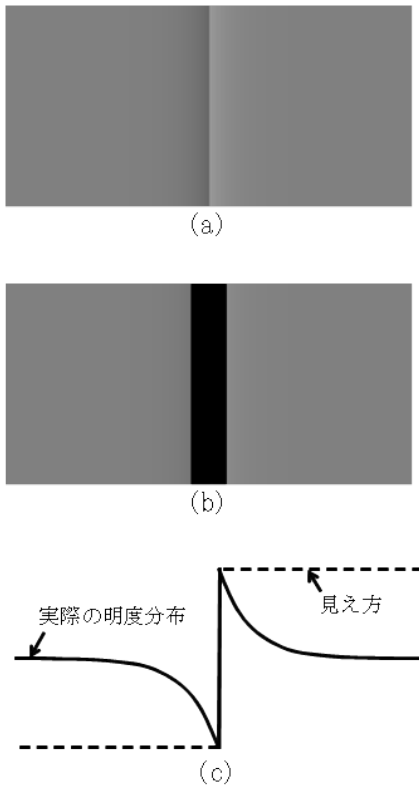


図 3 : C-0 効果の例

用することで C-0 効果を生成する .

(1) C-0 効果

C-0 効果の例を図 3 に示す . 図 3(a) には右側が明るい二つの長方形があるように見えるが , 実際の明度分布は図 3(c) の実線のようにになっている . すなわち , 画像の中央部分だけに明度変化 ( エッジ ) があり , その他の部分の明度は等しい . しかし , ヒトは図 2(c) の点線で示したような明度分布を感じる . この錯視現象を C-0 効果という .

(2) Color2Gray アルゴリズム

通常 , カラー画像のモノクロ変換では , 入力画像の明度成分をグレーレベルとするが , この場合 , 入力画像の色相と彩度の情報は完全に失われてしまう . Color2Gray アルゴリズムは , 入力画像における色相や彩度の情報を反映したモノクロ画像を得るための手法である .

Color2Gray では , 目的関数  $E$  を

$$E(f) = \sum_{(i,j) \in \sigma_\rho} ((f_i - f_j) - \delta_{ij})^2 \quad (1)$$

で定義する . ここで ,  $f_i$  は画素  $i$  のグレーレベルである .  $f$  はモノクロ画像であり , 画素数が  $n$  である場合 ,  $(f_1, f_2, \dots, f_n)$  である .  $\delta_{ij}$  は , 画像  $i$  と画素  $j$  の間における符号付き色距離であり , 画素  $i$  と  $j$  の色の違いを定量的に表現したものである .  $\sigma_\rho$  は , チェス盤距離が  $\rho$  以下である画素対の集合である . 入力カラー画像における全画素対を考慮する

場合を全域 Color2Gray と呼ぶ .  $\rho$  を小さな値とし , 近傍の画素対のみを考慮する場合は近傍 Color2Gray と呼ぶ .

$\delta_{ij}$  の定義は以下の通りである .

$$\delta_{ij} = \begin{cases} \Delta L_{ij}^* , & |\Delta L_{ij}^*| > \Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|) , \\ \text{sign}(\Delta C_{ij} \cdot v_\theta) \Phi_\alpha(\|\Delta C_{ij}\|) , & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで ,  $\Delta L_{ij}^* = L_i^* - L_j^*$  ,  $\Delta C_{ij} = (\Delta a_{ij}^* , \Delta b_{ij}^*) = (a_i^* - a_j^* , b_i^* - b_j^*)$  であり ,

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 , & x > 0 , \\ -1 , & \text{otherwise} , \end{cases} \quad (3)$$

$$\Phi(x) = \alpha \tanh(x/\alpha) \quad (4)$$

$$v(\theta) = (\cos \theta , \sin \theta) \quad (5)$$

である .  $L^*$  ,  $a^*$  ,  $b^*$  は CIE 1976  $L^*a^*b^*$  色空間における値である . 式 (4) における  $\alpha$  は , モノクロ変換において色の違いを考慮する度合いを調整するパラメータであり , 正の実数である . 式 (2) の  $\cdot$  は内積を表す .  $\theta$  はモノクロ変換においてどのような色のグレーレベルを大きく (あるいは小さく) するかを定めるパラメータである . 式 (2) に定義されているように , 画素対  $(i, j)$  において , 明度差  $\Delta L_{ij}^*$  と色の差  $\Delta C_{ij}$  のうち , 優勢な方を色距離  $\delta_{ij}$  にする .

出力モノクロ画像は以下のようにして得る .

$$\tilde{f} = \arg \min_{f \in \mathfrak{R}^n} E(f) . \quad (6)$$

ここで ,  $\mathfrak{R}$  は実数の集合を表す . 式 (6) は共役勾配法により解く . その際 , 初期値は入力画像の明度成分とする .  $E$  を最小化することは , 符号付き色距離  $\delta_{ij}$  をグレーレベルの差  $(f_i - f_j)$  に反映させるということであり , 入力画像の色相や彩度の情報を出力モノクロ画像に反映させるということを意味する .

(3) 提案アルゴリズム

提案手法では , 2 色覚者にとって見えにくい色の組合せが隣接しているときに , 2 色覚における明度成分に対して C-0 効果を生成するようにエッジを生じさせる . エッジの発生には近傍 Color2Gray を用いる .

提案アルゴリズムにおける目的関数は ,

$$E_K(\hat{l}_K) = \sum_{(i,j) \in \sigma_\rho} ((\hat{L}_{K,i}^* - \hat{L}_{K,j}^*) - \delta'_{K,ij})^2 \quad (7)$$

で定義する . ここで ,  $\hat{L}_{K,i}^*$  は  $K$  型色覚 ( $K$  は  $P, D, T$  のいずれか) における画素  $i$  の修正後の明度成分である . また ,  $\hat{l}_K$  は  $K$  型色覚における明度画像を意味する . 式 (7) の形式は , 符号付き色距離  $\delta'_K$  を  $K$  型色覚における明度に反映させる意味を持つ .

提案アルゴリズムにおける符号付き色距



図 4：実験に使用した画像と色覚シミュレーションの結果（P 型色覚）

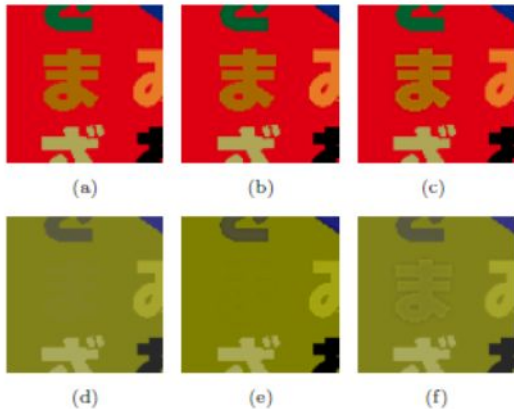


図 5：実験画像に対する D 型色覚用の色変換結果．(a)入力画像，(b)申請者らによる従来アルゴリズム，(c)提案アルゴリズム，(d)D 型色覚による(a)の見え，(e)D 型色覚による(b)の見え，(f)D 型色覚による(c)の見え

離の定義は，

$$\delta_{ij} = \begin{cases} \Delta L_{K,ij}^*, & \Delta E_{K,ij}^* \geq \lambda, \\ \text{sign}(\Delta L_{K,ij}^*) \Phi_\alpha(\Delta E_{ij}^*), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

である．ここで，

$$\Delta E_{ij}^* = \sqrt{(\Delta L_{ij}^*)^2 + (\Delta a_{ij}^*)^2 + (\Delta b_{ij}^*)^2} \quad (9)$$

$$\Delta E_{K,ij}^* = \sqrt{(\Delta L_{K,ij}^*)^2 + (\Delta a_{K,ij}^*)^2 + (\Delta b_{K,ij}^*)^2} \quad (10)$$

である． $L_K^*$ ， $a_K^*$ ， $b_K^*$  は  $K$  型色覚にとっての  $L^*a^*b^*$  値である．式(8)における  $\lambda$  は明度修正を行う画素対を決定するパラメータであり，非負の実数である． $\Delta E_{K,ij}^* \geq \lambda$  が満たされる場合，すなわち 2 色覚において十分な色差がある場合は，明度修正は行われない．逆に 2 色覚において色差が不十分な場合に明度修正（エッジの生成）が行われる．

$K$  型色覚における修正後の明度  $\tilde{l}_K$  は，

$$\tilde{l}_K = \arg \min_{\hat{l}_K \in \mathbb{R}^n} E_K(\hat{l}_K). \quad (11)$$

で得る．この最適化は最急降下法で行う．

$\frac{1}{32}$	$\frac{29}{32}$	$\frac{1}{32}$	$-\frac{1}{16}$	$\frac{19}{16}$	$-\frac{1}{16}$
	$\frac{1}{32}$			$-\frac{1}{16}$	

(a) Sharpening Filter

(b) Clamp Filter

$\frac{1}{512}$	$\frac{10}{512}$	$\frac{548}{512}$	$-\frac{10}{512}$	$-\frac{1}{512}$
$-\frac{2}{512}$	$-\frac{10}{512}$	$-\frac{2}{512}$		

(c) 輪郭情報抽出フィルタ，(a) と (b) の畳みこみで得られる．

図 6：ハードウェア指向の輪郭情報抽出フィルタ

初期値は入力画像における 2 色覚での明度成分とする． $\rho$  を小さな値とした場合，理論的な保証はないものの，大抵は領域の境界部分のみ明度修正が行われ，それにより C-0 効果の発生が期待できる．

2 色覚の見えが  $(L_K^*, a_K^*, b_K^*)$  となる色  $(L^*, a^*, b^*)$  は無数にある．すなわち， $L_K^*$  のみから修正後の色を定めることはできない．ここでは，色変換の前後で  $xy$  色度を不変に保つという制約のもとで  $(L^*, a^*, b^*)$  から  $(X, Y, Z)$ ， $(R, G, B)$  へと変換する．

本研究では，Vienot らのモデルにより 2 色覚者の見えをシミュレーションした．このモデルでは，P 型色覚と D 型色覚の見えをシミュレーションできる．実験に用いた画像を図 4 に示す．図 4(b) は，図 4(a) に対する P 型色覚での見えをシミュレーションした結果である．

提案アルゴリズムと申請者らによる従来アルゴリズムを図 5 に示す．図 5 は，文字画像の「ま」の周辺を拡大したものである．図 5(e)，(f) を比較すると，提案アルゴリズムの方が「ま」が良く見えることが分かる．紙幅の都合上省略するが「え」についても同様である．その他の文字は D 型色覚で見分けやすい色である．

#### (4) 提案ハードウェアシステム

映像の色覚バリアフリー化に関して，ハードウェア指向の簡略型アルゴリズムを開発した．また，Field Programmable Gate Array (FPGA) を用いた実証実験を目指し，イメージセンサと FPGA が直結した FPGA ボード SVI-06 の導入を行った．

C-0 効果を援用したアルゴリズムは，回路化を前提に分析を行うと，色空間変換部と C-0 効果生成部に大別できる．

色空間変換部は，係数が常に一定の線形変換で行われるため，回路実装時においては簡略型乗算器 (Truncated multiplier) による組込み乗算器を用いない構成で実装できる．また，近年では低価格 FPGA でも乗算器が豊富に活用できるため実装は容易である．

C-0 効果生成部では，オブジェクトの輪郭

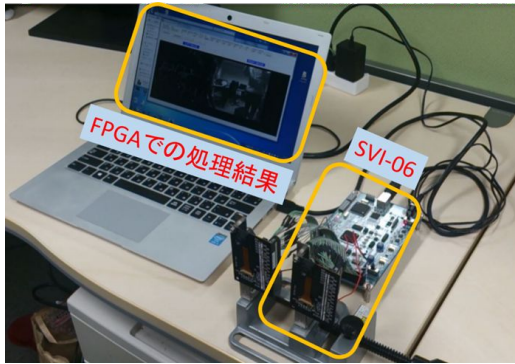


図 7: イメージセンサと FPGA が直結した SVI-06 ボードによる輪郭情報抽出回路に関する実験の様子

を抽出しその周辺にエッジを付加することで C-0 効果を生成する。ここでは、ハードウェア指向のアルゴリズムとして、図 6 に示す輪郭情報を抽出するための T モデルフィルタを用いる。このフィルタは Sharpening Filter (SF) と Clamp Filter (CF) から構成される。SF と CF の係数を上手く選び畳み込んで用いることで、シフト演算器と加減算器のみで輪郭情報抽出フィルタを構成できる。例えば図 6 (c) において、 $512 = 2^9$ ,  $10 = 2^3 + 2^1$ ,  $548 = 2^9 + 2^5 + 2^2$  であり、全て 2 のべき乗で表現可能であるためシフト演算と加減算器で構成できることが分かる。また、1 ライン分のバッファしか必要としないので、メモリアーキテクチャも簡便なものとなる。

以上より、C-0 効果を援用した色覚バリアフリーのハードウェア指向アルゴリズムが実現できた。実験の結果、主観評価において、ハードウェア指向アルゴリズムはオリジナルのアルゴリズムと同等の C-0 効果が生成されることが示された。

さらに、提案アルゴリズムを FPGA へと実装し映像への適用を行うために、FPGA ボード SVI-06 の導入を行った。SVI-06 は FPGA とイメージセンサがボード上で直結しており、イメージセンサから得られたピクセル値を直接 FPGA 上で処理可能である。USB で接続されたパソコン上には色覚バリアフリー処理後の映像が直接表示されるため、バスネックなどのシステム的な遅延による影響を受けない実証実験装置として構築が可能である。

本研究期間内においては、図 7 に示す通り、システムセットアップと輪郭情報抽出回路の実装までを行い、そのリアルタイム処理が可能であることを確認できた。また、色空間変換回路はシミュレータでの正常動作とそのリアルタイム処理が可能であることを確認できている。現在、これらを組み合わせることで、最終的な色覚バリアフリー回路の構築を行っている段階であり、プロトタイプの完成は間近である。以上より、概ね当初の計画通りに研究は進んだといえる。

#### 4. 研究成果

近傍 Color2Gray に基づく C-0 効果を援用

したカラーバリアフリー色変換アルゴリズムを提案した。さらに、リアルタイム処理を目指し、ハードウェア指向の簡略型アルゴリズムの提案、ならびにハードウェア実装を試みた。従来アルゴリズムの多くは、計算時間が実用的でないものや原画像のもつ色彩の印象を著しく損なうものであったが、それに対し、提案アルゴリズムでは、2 色覚における明度に対する主観的な輪郭生成の生起を考え、色の違いに基づいて入力画像の輪郭部の明度修正を行うことで、色覚バリアフリーを実現した。この処理は、輪郭部のみの明度修正であり、入力画像のもつ色彩の印象を保持できるという特長を持つ。

提案アルゴリズムの有効性を示すために、種々の画像を用いた実験を行った。主観評価では、一般的な色覚特性を有する人にメガネ型色弱模擬フィルタ（パリアントール、伊藤光学工業株式会社製）を装着してもらい、官能検査・インタビューを実施し、提案手法が 2 色覚における弁別困難色のコントラスト改善と原画像のもつ色彩の印象の保持を両立した色変換アルゴリズムであることを確認した。また、試験画像と自然画像の色変換結果から、提案手法は平坦部を含む人工画像に適していることが分かった。また、計算時間の結果などから、計算量に関して提案アルゴリズムの有効性を確認した。

期間内に FPGA での実装が完全に終わるまでには至らなかったが、完成後はディスプレイ等の表示装置へと適用することで、映像のリアルタイム変換処理が可能になる。

#### < 引用文献 >

V. O'Brien, "Contour perception, illusion and reality," *Journal of the Optical Society of America*, vol.48, no.2, pp.112-119, Feb. 1958.

A. A. Gooch, S. C. Olsen, J. Tumblin, and B. Gooch, "Color2Gray: Saliency-preserving color removal," *ACM Transactions Graphics*, vol.24, no.3, pp.634-639, July 2005.

H. Brettel, F. Vienot, J.D. Mollon, "Computerized simulation of color appearance for dichromats," *Journal of the Optical Society of America*, vol.14, no.10, pp.2647-2655, Oct. 1997.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

イスラムアリ, 石宝, 田中豪, 田向権,

末竹規哲, ``近傍 Color2Gray アルゴリズムに基づくクレイク・オプライエン効果による2色覚者のための明度修正法,`` 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.115, No.348, SIS2015-32, pp.19-22, まつや千千(福井県あらわ市), 2015年12月3日~4日

Shi Bao, Go Tanaka, Hakaru Tamukoh, and Noriaki Suetake, ``Improvement of Lightness Modification Method Based on Craik-O'Brien Effect for Dichromats,`` Proceedings of 2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2015), pp.75-78, Melia Bali Hotel (インドネシア, バリ島), 2015年11月9日~12日

田向権, 田中豪, 末竹規哲, ``クレイク・オプライエン効果の簡略型生成法による二色覚のためのコントラスト改善,`` 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114, No.114, SIS2014-98, pp.39-44, 明治大学中野キャンパス(東京都中野区), 2015年3月5日~6日

Hakaru Tamukoh, Go Tanaka, and Noriaki Suetake, ``Simplified Lightness Modification Algorithm for Generating Craik O'Brien Effect,`` Proceedings of 2014 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2014), pp.54-57, Hotel Majestic Saigon (ベトナム, ホーチミン市), Oct. 8-10, 2014年10月8日~10日

日高公平, 田向権, 末竹規哲, ``色覚バリアフリーを実現する色変換システムの構築,`` 第18回日本知能情報ファジィ学会中国四国支部学術講演会予稿集, pp.57-58, 海峡メッセ下関国際貿易ビル(山口県下関市), 2013年12月21日

Kohei Hidaka, Hakaru Tamukoh, Noriaki Suetake, "Lightness Modification Method to Increase Visibility of Dichromats," Proceedings of the 13th Kyutech-Postech Joint Workshop on Neuroinformatics, pp. 33-34, 浦項工科大学校(大韓民国慶尚北道浦項市), 2013年8月19日~21日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等  
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者  
末竹 規哲 (SUETAKE, Noriaki)  
山口大学・理工学研究科・教授  
研究者番号: 80334051

(2)研究分担者  
内野 英治 (UCHINO, Eiji)  
山口大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 30168710

田中 豪 (TANAKA, Go)  
名古屋市立大学・大学院システム自然科学  
研究科・准教授  
研究者番号: 30609805

田向 権 (TAMUKOH, Hakaru)  
九州工業大学・大学院生命体工学研究科・  
准教授  
研究者番号: 90432955

(3)連携研究者  
なし