

## 彩色意図にもとづく色覚障害者のための再配色システム

増田 萌 脇田 建

東京工業大学大学院情報理工学研究所

### 概要

本研究は彩色を施された文書が生ずる色覚障害の問題に取り組む。本手法は、筆者が意図した色彩効果を目的関数として定式化し、それを最大化することにより、文書の筆者が意図した色彩効果が色覚障害者にとって最も認知し易い文書になるように再配色を与える。一般に非線形多変量となる目的関数は、マルコフ連鎖モンテカルロ法のレプリカ交換法を用いて最適化した。また、計算時間を高速化するために、探索空間の近似を行った。本手法の評価のために、文書に意図的に色覚障害者が文字を読み取れない彩色を施したものを本手法を用いて再配色し、十分な可読性が得られることを確認した。

### Author's intention-based repainting system for the color-blindness

Moeru Masuda Ken Wakita  
Tokyo Institute of Technology

### Abstract

Color-blindness is caused because color effects intended by the author are sometimes difficult for the color-blind to observe. SmartColor takes author's expectation about color effects found in the document in terms of mathematical formula (energy function). Minimization of the energy function gives the best repainting for the color-blind. Replica exchange method (a variant of MCMC) for minimization nonlinear multivariate target functions energy function. SmartColor incorporates some approximation technique to reduce computational cost. Effectiveness of the system is tested by using specially arranged diagrams and color-blind simulation.

## 1 はじめに

色覚障害のほとんどは遺伝により視覚情報を受け取る受容体に障害または欠損があるために生じる。その頻度は、日本人男性の5%、女性では0.25%である。人種によっても多少ばらつきがあり白人男性の場合8%、黄色人種の5%、黒人男性の4%が相当する。色覚障害を持つ人の割合は少なくないが、日常生活において不便を感じることは少ない。実際のところ、18世紀後半まで色覚障害が発見されることはなかった。

しかし、近年のカラープリンタやカラーディスプレイの使用により、彩色した電子文書の使用が一般化している。彩色文書では、その配色を工夫するこ

とで情報をわかりやすく表現する。その反面、情報伝達を色に頼る比重が高くなった。このため、色覚障害者が不都合を感じる機会が増加している。

色覚障害者の人が彩色文書を読むときに不都合を感じるのは、筆者が意図した色の効果を、色覚障害者の人が認識しないためである。本研究では彩色文書に対する配色の裏にある筆者の意図、彩色意図に注目して、次の2つの仮説をたてる。

1. 彩色文書での色の役割は、個々の色ではなく、その配色による色彩効果によって決まる
2. 色彩効果が似ている配色はほぼ同じ役割を果たす

本研究ではこの仮定にもとづき、色覚障害者のための再配色システム (SmartColor) を提案し、その

プロトタイプを実装し、実験を行った。SmartColorは彩色文書中の色の集合を他の色の集合に塗り替えることで、正常者と色覚障害者との彩色文書でのコミュニケーションの不都合を取り除く。本手法では色覚障害者が正常者の感じる色の効果に最も近い効果を感じる配色を探し、塗り替える。再配色の過程は、まず筆者の意図した色の効果を制約として定式化し、それを色覚異常者の色空間で最適化するという手順で行う。

本論文の構成は、第2節で人はどのようにして色を知覚しているのか、そして色覚異常者の色の見え方について説明する。第3節では、提案するシステムの概要を示し、第4節、第5節では詳しく説明する。第6節では本手法による再配色の効果と応答時間に関する実験について報告する。そして最終節で本論文のまとめる。

## 2 色覚と色覚障害

本節では、色覚のメカニズムと色覚障害について述べる。

色とは光が人の目に入ったとき、視覚-大脳系が生み出す感覚である。目の網膜の中には錐体と桿体と呼ばれる光の受容器が無数にあり、これらが光を感じて脳に情報を送る。桿体は光の強さのみをとらえ、人は錐体の反応によって光を色として判別している。

人間の錐体には3種類あり、それぞれ波長ごとの光の強度に対する感受性が異なる。可視光のうち感受しやすい波長の長い方から、L、M、S-錐体と呼ぶ。3種類の錐体の反応が大脳に送られ、300次元もの可視光を3次元の色として知覚する[10]。人間の知覚する色を数値で表したものを表色系といい、LMS表色系は錐体に着眼した表色系である。LMS表色系の3成分は、それぞれの錐体の反応具合をそのまま数値にしたものである。

CIE1931RGB表色系は、Rを700nm、Gを546.1nm、Bを435.8nmの単色光と定義して、色をR、G、Bの混色で表すことができる。これとは別にディスプレイ表示用の表色系としてstandard RGB表色系がある。また、LMS表色系やCIE1931RGB表色系はこのままでは色の違い(色差)を計算することができない。色差を計算するには均等色差空間の表色系に変換しなければならない。均等色差空間の表色系にはCIEL\*a\*b\*表色系などがある[8]。

色覚障害はこの錐体の一部に欠落または異常がある場合に生じる。3種類の錐体が全てあり、そのどれにも異常がない場合を正常3色覚という。3種類の錐体の全てがない場合、桿体1色覚、2種類がない場合を錐体1色覚、1種類がない場合を2色覚という。そして1種類の錐体に異常がある場合を異常3色覚という[3]。

2色覚者のうち、L錐体がない場合を第一色盲、M錐体のないものを第二色盲といい、2色覚者のほとんどがこれにあたる。それからS錐体がない場合を第三色盲というが、これは稀であり、また正常者でもS錐体の数がもともと少なくここからの情報を補助的にしか利用していないため、生活上の不便は全くと言っていいほど無い。

2色覚者は錐体が2種類であるため色を2次元で知覚する。Brettelらは2色覚者の色覚シミュレーションを初めて行った[1]。それによると第一色盲シミュレーション( $\pi^L$ )は、3刺激値R、G、Bから3刺激値L、M、Sへの線形変換を $T_{RGB \rightarrow LMS}$ として、 $\pi^L(c) = T_{RGB \rightarrow LMS}^{-1}(P^L(T_{RGB \rightarrow LMS}(c)))$ と定式化できる。ここで、 $P^L$ は正常3色覚者の知覚できる3次元色空間から第一色盲者の知覚できる2次元平面への射影を現す。同様にして第二色盲( $\pi^M$ )、第三色盲( $\pi^S$ )色覚のシミュレーションも定式化できる。

色覚障害者は正常3色覚者と色が違って見えてしまう。しかし、ほとんど全ての可視光を知覚できる。一方で、正常3色覚者が見分けられる2つの色を混同してしまうのも事実である。

## 3 SmartColorの概要

文書は筆者が自分の意志や考えを相手に伝えるための手段である。文書中に出てくる、単語、記号、フレーズ、文章、図形などの視覚要素には意味がある。たとえば、語や句に対し、下線を引いたり色を変えたり、フォントを変えるなどの視覚効果を与えて、その箇所の誘目性を高めて読者の注意を喚起することがある。

文書へ彩色することは筆者の意図の現れである。黒色の文書中に一ヶ所だけ朱色のフレーズがあれば、その箇所は読者の目を惹き付ける。筆者は彩色文書の配色に何らかの意図を込め、読み手に伝えようとする。視覚効果のうち、視覚要素を彩色することによりできる配色から得られる効果を色覚効果と呼ぶ。

彩色文書の筆者は、自分が感じる色覚効果を読者が意図したように読み取ることを想定して、文書に彩色する。しかし、同じ配色でも色覚障害者と正常者の感じる色覚効果は異なるため、そのままの配色では色覚障害者に筆者の意図した色覚効果を正確に伝えることができない。

SmartColor は、色覚障害者に筆者の意図する色覚効果が伝わるような配色に色を塗り替える、再配色システムである [13]。

筆者の望む色覚効果を願望と名付ける。再配色のために願望を定式化する。定式化の方法は次節で述べる。オリジナルの彩色文書での筆者の願望を正常3色覚者の色空間で定義し、その願望をできるだけ保つように色覚障害者の色空間に射影することを試みる。

そして色覚障害者の色空間で最も願望通りの色を探す。つまり、定義された願望を目的関数とする最適化問題を色覚障害者の色空間上で解けば良い。

色覚障害には様々なタイプがあり、それぞれ異なる色覚効果を得るため、全てのタイプにとって都合のない配色はほとんどの場合には無い。そのため、それぞれのタイプに対し個別に最適な配色を探さなければならぬ。

現在の SmartColor では2色覚のみをサポートしており、1色覚や異常3色覚はサポートしていない。また、2節に述べたようになりかなり稀でありことや5節の高速化の理由から第三色盲もサポートしなかった。

## 4 彩色意図の定式化

前節で述べたように、筆者の意図する色覚効果である願望を数式でモデル化する。以後には第一色盲に関して定式化するが、第二色盲、第三色盲に関しても同様に定式化できる。

本提案で扱う色覚効果としては、識別性、コントラスト、自然性がある。これらの色覚効果は、与えられた視覚要素を彩色する二色間の色の差、すなわち色差に対する願望関数としてモデルした [13, 12]。

まず、著者が意図する色彩効果が2色覚者において最大限に実現する理想の場合を考える。この場合、2色覚者は、正常3色覚者と同じ色差を認知するため、この理想条件は等式として与えることができる。一般に、2色覚者が認知する狭い色彩空間で正常3色覚者が認知する色彩効果を理想的に実現することは困難である。そこで、理想条件を緩和した最適化

問題として条件を書き直すことを考える。これは、2色覚者が認知する色差と正常3色覚者が認知する色差の違いをばねの位置エネルギーとしてモデルすることができる。このエネルギーを最小化することで、2色覚者にとって理想条件に近い再配色を求めることができる。

表1は、後述の3種の色覚効果について、理想条件とエネルギーをまとめたものである。ここで、視覚要素を  $e_i, e_j$ 、再配色前の色を  $c_i, c_j$ 、再配色後の色を  $c'_i, c'_j$  とし、 $\Delta$  は二つの色の違いである色差を表す。 $\Delta^L$  は2色覚者の感じる色差であり、 $\Delta_{\max}$  は色空間上の最大色差をあらわす。

### 4.1 識別性

2つの隣接する視覚要素の色のコントラストが十分でなく、ほぼ同色で彩色された場合、これらを区別して認識することが困難であり、多くの読者は2つの視覚要素が存在することさえ認識しないだろう。地図上の地区を塗り分ける場合、各地区が隣接した地区と明瞭に判別できることが重要である。このような地図を2色覚者に理解してもらうには、地図を塗り替え、2色覚者にとっても地区間の色の区別が明瞭にすればよい。表1に与えた識別性のエネルギーを最小化するということは、隣接した2視覚要素を再配色した色 ( $c'_i$  と  $c'_j$ ) を第一色盲の人が見た色 ( $\pi^L(c'_i)$  と  $\pi^L(c'_j)$ ) の差を最大化 ( $\Delta_m^L ax$ ) することである。つまり、識別性について最大限明瞭化することに相当する。

識別性のもうひとつの応用としては、文章の背景色と文字色の関係が挙げられる。背景と文字は色差を大きく取ることによって文字を読みやすくする。これを識別性と呼ぶ。

### 4.2 コントラスト

コントラストとは2つの色の間から感じられる色の違いである。色の違いを一定に保ちたい場合もある。似ているものを現したいときに似ている色を彩色する場合がある。色覚障害者が見た場合にもコントラストが大きすぎず、かつ同じ色に見えないようにしたい。

筆者が2つの色のコントラストによる色覚効果を意図している場合、色覚障害者に正常3色覚者が感じるのと同じコントラスト感じてもらいたい。ゆえ

表 1: 三種類の色覚効果を色覚障害者に伝えるための理想条件を与えることができる。エネルギーを最小化させることで、この理想条件を得ることができる。

色覚効果	理想条件	エネルギー
コントラスト	$\Delta(c_i, c_j) = \Delta^L(\pi^L(c'_i), \pi^L(c'_j))$	$(\Delta(c_i, c_j) - \Delta^L(\pi^L(c'_i), \pi^L(c'_j)))^2$
識別性	$\Delta^L(\pi^L(c'_i), \pi^L(c'_j)) = \Delta_{\max}^L$	$(\Delta^L(\pi^L(c'_i), \pi^L(c'_j)) - \Delta_{\max}^L)^2$
自然性	$\pi^L(c_i) \equiv \pi^L(c'_i)$	$(\pi^L(c_i) - \pi^L(c'_i))^2$

に、オリジナルの文書から正常3色覚者が感じるコントラストを再配色後に色覚障害者が感じられることが理想である。

ただし、 $Doc = \{e_1, e_2, \dots\}$  は文書中の全視覚要素の集合である。

### 4.3 自然性

色は色自体に意味を持っている場合がある。例えば、青色からは誰もが海や空のイメージを持ち得る。地図で海の領域に色を付ける場合に、色からも海であることがわかりやすいように、筆者は青色に彩色するであろう。また、「この図の赤い矢印はデータの流れを表します」などと注釈のついた図であれば、その矢印の色を大きく違う色に置き換えてしまうと、読み手は混乱してしまう。これを自然性と呼ぶ。

そのような場合、再配色しても色覚障害者から見て色が変わらないことが望ましい。ゆえに、再配色前後の色覚障害者の見る色が同じであることが理想である。

### 4.4 願望関数

表1の各色覚効果のエネルギーを評価する関数を願望関数と呼ぶ。コントラストの願望関数を  $D_C^L(e_i, e_j)$ 、識別性の願望関数を  $D_D^L(e_i, e_j)$ 、自然性の願望関数を  $D_N^L(e_i)$  とする。

3種類の色覚効果について定式化を説明してきたが、全ての色覚効果の観点から評価する願望関数が必要である。SmartColor では文書中の全ての視覚要素（または視覚要素対）による願望関数を足し合わせ、統合願望関数を得る。重要度に応じて重みを付けて、全視覚要素間のコントラストの願望の和 ( $D_C^L(Doc) = \sum_{i < j} k_C^{(i,j)} D_C^L(e_i, e_j)$ )、識別性の願望の和 ( $D_D^L(Doc) = \sum_{i < j} k_D^{(i,j)} D_D^L(e_i, e_j)$ )、それから全視覚要素の自然性の願望の和 ( $D_N^L(Doc) = \sum_i k_N^i D_N^L(e_i)$ ) を足し合わせた統合願望関数を扱う。

$$D^L(Doc) = D_C^L(Doc) + D_D^L(Doc) + D_N^L(Doc) \quad (1)$$

### 4.5 色の属性の共通性

同じ色同士の視覚要素は共通の属性を持っている。例えば棒グラフでは同じ色部分は同じ属性を示している。ウェブページでも、リンクを張ってあるテキストには、同じ色を用いている。つまり、彩色文書の筆者は同じ色同士の視覚要素には同じ属性を与えている可能性がある。読み手側も何らかの共通の属性があるだろうと推測する。

そのため、同じ色同士の視覚要素は同じ色になるように再配色する。つまり、色の集合  $C = \{\dots, c_i, \dots, c_j, \dots\}$  を  $C' = \{\dots, c'_i, \dots, c'_j, \dots\}$  に塗り替えるとする  $c_i = c_j \Rightarrow c'_i = c'_j$  が必ず成り立つようにする。

この方針を取ることで、計算量を視覚要素の指数オーダーから色の数の指数オーダーに減らすことができた。彩色文書中の色は視覚要素の数に対して非常に少ないため、色の数の指数オーダーに抑えたことによる計算コストの減少は大きい。

### 4.6 色差の調整

色差は色覚障害のタイプにより異なるためここで修正する。2色覚シミュレーション [1] によると色覚障害のタイプにより色差の最大値は異なる。色差の最大値は CIE L\*a\*b\*空間における色空間の最大直径から計算し、正常3色覚者では245、第一、第二色盲の場合は180であった。正常3色覚者がある色のペアから色差245を感じたときに同じコントラストを第一色盲者に伝えたいとする。しかし、第一色盲の色空間では色差180以上の色のペアは作れない。この場合、第一色盲者にも彼らの最大の色差のコントラストを感じてもらおうのが適していると思われる。

そこで、色差の最大値が等しくなるように、色覚障害者の感じる色差を修正することとした。

$$\Delta^L(\pi^L(c_1), \pi^L(c_2)) = \Delta^L(\pi^L(c_1), \pi^L(c_2)) \times \frac{\Delta_{\max}^L}{\Delta_{\max}^L}$$

第二色盲の場合も同様である。正常3色覚者に比べて、色覚障害者は色差を感じやすくなっており、その倍率は、最大色差の倍率であるとする。こうすることで、願望関数自体も色覚障害者にとって無理のない関数になる。

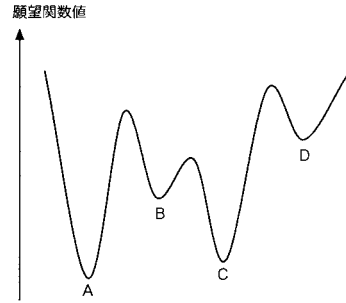


図 1: 局所解の複数ある目的関数の例

## 5 最適配色の探索

### 5.1 最適配色の探索

色覚障害者に色覚効果を伝えるために最適な配色を探索する。これは統合願望関数(式1)を目的関数とする最適化問題となる。

この目的関数は非常に複雑になり得る。 $c_i$  はオリジナルの文書中の色で、 $k_C^{(i,j)}$ ,  $k_D^{(i,j)}$ ,  $k_N^i$  は筆者の設定する色覚効果の重要度の値である。唯一の変数である  $c'_i$  は  $c_i$  を塗り替えた結果である。これをふまえて式1を次のように書き換えられる。

$$D^L(Doc, c') = D^L(Doc)$$

ここで、 $c' = (c'_1, c'_2, \dots)$  という  $c'_i$  を要素とするベクトル値である。

統合願望関数 ( $D^L(Doc, c')$ ) を最小化する  $c'$  を見つけることで、最適な配色を求めることができる。これは非線形で多変量であるため、解析的に解くことは困難である。

非線形多変量関数の最適化には数値的に解く方法はいくつかある。Raphson-Newton法、simulated annealing[7, 5]、レプリカ交換法 [4, 5] がこれにあたる。

目的関数は色空間の変換や色盲シミュレーションが複雑であるため、図1のように局所最適解が無数に存在する場合もありうる。Newton-Raphson法は高速ではあるが局所解の探索しかできないため、Dに収束してしまう可能性もある。

マルコフ連鎖モンテカルロ法は形状不明な関数に強力である。simulated annealing とレプリカ交換法は Raphson-Newton 法ほど高速ではないが、マルコフ連鎖モンテカルロ法の一つであり、大域解の探索も可能である。マルコフ連鎖モンテカルロ法はラン

ダムに候補を選び、候補を受理するかもランダムに決め、これを繰り返すことで探索を行う。

simulated annealing は物理学の分野で発生した焼き鈍しの技術を起源としており、物質の励起状態を探索する手法である。単純なマルコフ連鎖モンテカルロ法は変数域をランダムにアクセスを繰り返すが、simulated annealing は外部から温度パラメータを制御することにより、徐々に探索速度を上げていき、解に収束する。最初はランダムアクセスするように温度パラメータを高く設定し、最後は勾配法と同様なアクセスをするように温度パラメータを低く設定する。この間温度パラメータを十分にゆっくりと変化させることで大域解に収束させることができる。これが十分ゆっくりでないと、局所解に収束してしまう。

レプリカ交換法はパラメータの異なる複数の系で並列にモンテカルロ法を行い、たまにパラメータの値を交換することで、simulated annealing と同じ効用を得ることができ、かつ一度局所解にはまっても交換によりそこから抜け出すことができるという利点がある。

simulated annealing とレプリカ交換法の両者に言えることは、アルゴリズムは単純であるが、パラメータの設定が難しいということである。設定しなければならぬパラメータには、まず1ステップでのモンテカルロステップ数がある。これが少ないと平衡状態にならないため、大域解を得られる保証がない。多いと無駄に探索することになり遅くなる。次にステップ幅である。ステップ幅とは次の候補までの距離であり、これが小さすぎると平衡状態になるのに時間がかかるし、大きすぎると収束が遅くなる。

それからレプリカ交換法では、温度パラメータの異なる系をいくつ作るのか (これをレプリカ数という)、その温度パラメータはどのくらいにするのか、

どの順番で交換するのかによって計算コストは違ってくる [5]。

レプリカ交換法は simulated annealing よりも高速であることが知られている [4]。そこで本研究ではレプリカ交換法を用いることにする。

## 5.2 探索の高速化

レプリカ交換法は最適解を得るためには十分時間をかけなくてはならない。しかし、計算にいくらかでも時間をかけられるわけではなく、また必ずしも最適解を求める必要はない。図 1 において最適解は A であるが C のような解でもよいかもしれない。必ずしも最適解でなくても、色覚障害者に筆者の意図した色覚効果が十分伝われば、その解は実用的には十分によい解とみなすことができるからだ。特に、コントラストと識別性の願望は完全に満たされる必要はない。

高速と言われるレプリカ交換法を適用してもまだ十分な高速性を実現できない。そこで、計算精度はやや犠牲にするものの、計算速度を向上させる方法を適用した。最適化計算の主要な計算部分はモンテカルロシミュレーションの各ステップであり、その中でも候補の願望関数値の計算にほとんどの計算時間が割かれている。そのため探索すべき候補の空間が狭くなれば、計算を高速化できる。

第一色盲者と第二色盲者が認知する色空間は図 2 のように RGB の色空間上では平面を折り曲げた形をしている [1]。そしてその角度は 175 度であり、ほぼ平面である。これを一平面に近似したものを探索空間とする。最小二乗近似を用いて近似するべきであるが、簡単のために、二平面の法線の平均をとったものを法線に持つ原点を通る平面に近似した。このことにより探索空間が 3 次元で毎回二平面に射影していたものが、探索空間がその一部の 2 次元で、射影の必要も無くなったため、かなり高速化できたとと思われる。しかし精度は多少落ちたと考えられる。

## 6 実験と議論

SmartColor のプロトタイプを Java の version1.5.0 で実装した。この節ではその評価実験と議論を行う。実験環境は Mac OS、Intel Core 2 Duo 2.16 GHz、メモリ 2GB である。

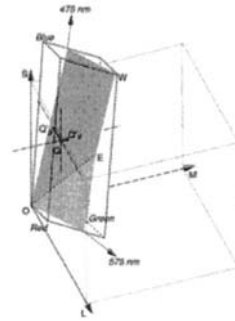


図 2: 正常者の色空間上での第一、第二色盲者の見える色の空間。平面を折り曲げたような形になっており、その角度は 175 度とほぼ平面である。

### 6.1 願望の達成<sup>1</sup>

SmartColor により再配色した画像から意図した視覚効果を得られるかどうか実験する。第一色盲と第二色盲の色覚障害者を判別するために作られたテストである石原色覚検査表 [6] がある。石原色覚検査票に含まれるカードには、数字や文字がモザイク模様色塗られている。正常 3 色覚者は、その模様から数字や文字を読み取ることができるが、2 色覚者は石原博士によって意図的に仕組まれた色の違いを認知できず、模様を読み取ることができなかつたり、正常 3 色覚者とは別の模様を見てしまう。

われわれは石原表を彩色文書と考えて、筆者が文字を読ませたいという願望があったと仮定して SmartColor を適用した。この方法には、色覚障害者が文字を読めるか読めないかによって評価できるため、客観的に再配色の成功を判断できるという利点がある。

図 3(a) は第一色盲者に文字を読み取れないように作られた石原表を擬似的に作成したものである。vischeck[11] を用いて第一色盲者の見え方をシミュレーションしてみると図 3(b) のようになる。vischeck は正常 3 色覚者のために色覚障害者の見え方をシミュレーションするシステムである。

これを本システムで再配色することで、第一色盲者が文字を読めるようにしたい。このとき図 3(a) にどのような願望を与えればよいかを考える。正常 3 色覚者が石原表を眺めた場合、同系色で塗られた点の集合が形作る形状を認識することでそれらが表す文字や数字を理解できる。一方、2 色覚者は正常 3 色

<sup>1</sup>本節で使用したカラー図版は以下の URL でご覧頂けます。  
<http://www.is.titech.ac.jp/~masuda4/research/hci123/>

覚者が異なる2色として認識するものを類似色と認識する場合がある。このため、2色覚者が見る形状は、正常3色覚者のそれを包含するより大きなものとなってしまふ。

似ている色と似ていない色の関係を2色覚者にも同様に感じる色覚効果を与えたいので、全ての点の色のペアに対してコントラストの願望を付加する。また、すべての色の点と背景の色の間にも、一定の色差があることで文字を読み取りやすくなっているため、コントラストの願望を付加する。さらに背景に関しては、元の白色のままであると石原表の形式に近くなるので、背景に関しては自然性の願望を付加する。それぞれの願望が同程度重要であると考えて、重要度は全て1に統一する。

SmartColorで図3(a)を再配色した結果、図3(c)のようになった。これを第一色盲シミュレーションすると図3(d)のようになる。この図を見ると図3(a)同様に文字が読み取れる。これは文字を読み取らせたいという願望の設定に成功したことと、さらにその願望に対して十分不満の少ない解を見つけることができたことを意味する。また点の色のなすコントラスト全てが、オリジナルの文書に近いことも見てとれる。

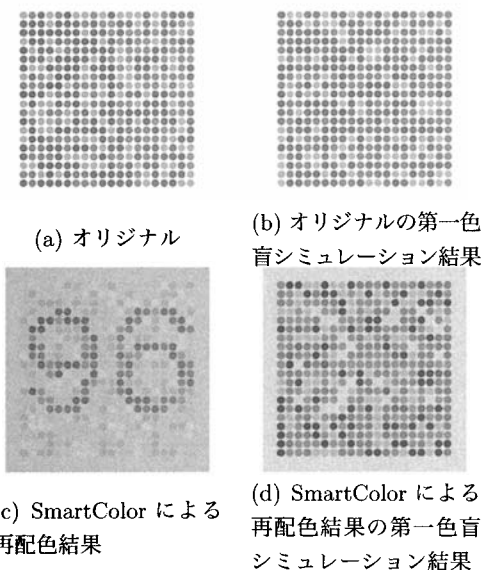


図3: 2色覚者に文字が読み取れない図による実験

## 6.2 応答時間

次にSmartColorの応答時間の実験を行う。実験には図3(a)を用いる。前節同様の9色に合計37願望を付加する。

通常の彩色文書に使われる色は5色程度で、これほど複雑な色覚効果を意図されていることはまずない。つまりこれは最悪パターンでの実験であると言える。そこでもう一つ6色に16願望を付加した場合でも実験を行う。

つぎに最適解であるが、我々は再配色結果が最適解であるかどうかを判断することができない。実験のために最適解の基準が必要である。simulated annealingのアルゴリズムを用い、十分に時間をかけて計算し得られた解を擬似的に最適解とする。

この実験結果は図4のグラフである。横軸は経過時間(ms)、縦軸はその時点での解を疑似最適解で割った値の10回の平均であり、このグラフは最適解へ近づく様子を示している。どこで十分な解であるかは議論と実験が必要であるが、仮に最適解の1.5倍までを許容すれば、6色に16願望付加した場合には0.2秒程度、9色に37願望付加した場合には0.8秒程度かかることがわかる。

この結果から、願望が複雑な場合には応用するアプリケーションによってはそのリアルタイム性を損ねる場合もあるということがわかる。そのため、もう少し高速化が必要であると言える。また今回はパラメータを手動でチューニングできたが、様々な文書に対応する高速な再配色を行うには、動的なチューニングが必要になる。これらは今後の課題とする。

## 7 関連研究

Vischeckを作成したDougherty等は色覚障害者のために再配色するシステムDaltonizeを開発し、web上で公開している[2]。SmartColorのアルゴリズムが筆者の意図にもとづき再配色をするのに対し、Daltonizeは色覚障害者の見分けづらい色相の差を見分けやすい明度や彩度の差に置き換えるという手法をとっている。このため、うまく再配色できない場合もあるが、計算コストはSmartColorよりも小さいと考えられる。

IBMのTakagiらはウェブページのアクセシビリティを総合的にチェックできるaDesignerを開発した[9]。ここでは色覚異常の人のために、ウェブページ

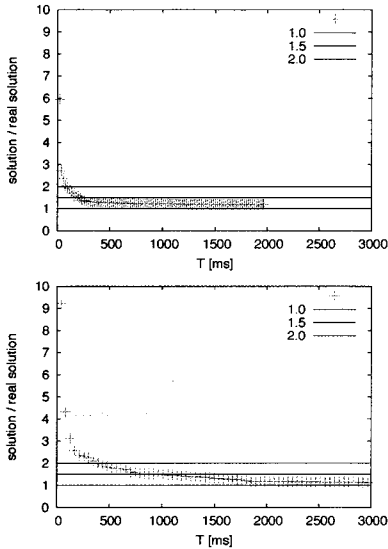


図 4: 計算時間の計測。上図 (a): 6 色、16 願望、下図 (b) 9 色、37 願望。

の 2 色覚シミュレータを提示し、また、読みにくくなる文字についてはそれを指摘してくれる。aDesigner は誰にでも読み取れるようなユニバーサルデザインを提案しているが、個人によって閲覧環境を変更できる彩色文書の場合は、SmartColor のように個人ごとに適応的なデザインを行う方が、使用できる色の自由度が増え、適している。

## 8 おわりに

本論文では、色覚障害者が彩色文書を見る上で生じる不都合を軽減することを目的とした。解決の主なアイデアは、文書の色を再配色することと筆者の彩色意図に着目したことである。彩色文書中の配色により色覚異常者が感じる視覚効果が、筆者の意図通りになるように再配色を行う。筆者が読み手に伝えたい視覚効果としてコントラスト、識別性、自然性の 3 つを定式化した。

今後の課題としては、最適化計算のさらなる高速化、精度の向上、システムの応用などがある。データ構造の改善やレプリカ交換法でのパラメータの動的な決定により、高速になることが予想できる。また探索空間の近似の改善により精度も向上すると考えられる。それから、SmartColor を実際に使っても

らえる世に、ユーザーに使いやすいアプリケーションが必要である。ウェブページの再配色などにも応用したいと考えている。

謝辞 この研究の一部は、文部科学省科学研究費助成金 (18300041 号) の援助を受けています。

## 参考文献

- [1] H. Brettel, F. Vienot, and J. D. Molon. Computerized simulation of color appearance for dichromats. *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 14, No. 10, pp. 2647–2655, October 1997.
- [2] Daltonize. <http://www.vischeck.com/daltonize/>
- [3] 深見嘉一郎. 色覚異常. 金原出版株式会社, 第 4 版, 2003.
- [4] K. Hukushima and K. Nemoto. Exchange monte carlo method and application to spin glass simulations. *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 65, No. 6, pp. 1604–1608, June 1996.
- [5] 伊庭幸人. マルコフ連鎖モンテカルロ法の基礎. 計算統計 II, 第 I 章. 岩波書店, 2005.
- [6] 石原忍. 石原色覚検査表. 半田屋商店, 2002.
- [7] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680, May 1983.
- [8] 日本色彩学会 (編). 新編 色彩科学ハンドブック. 東京大学出版会, 第 2 版, 1998.
- [9] H. Takagi, C. Asakawa, K. Fukuda, and J. Maeda. Accessibility designer: visualizing usability for the blind. In *ACM ASSETS '04*, pp. 177–184. ACM Press, 2004.
- [10] 内川恵二. 色覚のメカニズム. 朝倉書店, 1998.
- [11] Vischeck. <http://www.vischeck.com/>.
- [12] K. Wakita and Y. Ueno. SmartGray: information preserving monochromatic rendering of colored documents. In *Proc. 2nd Intl. Conf. Information Technology for Applications*, pp. 470–475, January 2004.
- [13] Ken Wakita and Kenta Shimamura. Smart-color: disambiguation framework for the colorblind. In *ACM ASSETS '05*, pp. 158–165, 2005.