

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「忠実色再現手法による画像色管理システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 国立大学法人静岡大学

目次

第1章	研究開発の概要	
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	6
第2章	本論	
2-1	色高忠実カメラの開発	7
1)	基礎特性評価結果	7
2)	色取得精度評価結果	8
2-2	撮像装置評価装置の開発	9
2-3	自動色校正装置の開発、改良	10
2-4	色データベースの開発、熟練技能の数値化	12
2-5	評価試験、画像色管理ソフトの開発	15
第3章	全体総括	
3-1	研究開発成果	16
3-2	研究開発後の課題・事業化展開	19
付録	用語集・・・	21

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

業務用プロジェクタ及び業務用インクジェットプリンタ製造企業を含む多くの企業の出荷検査部門では、色は重要な品質管理項目である。品質検査すべき対象は、多くの製品において液晶ディスプレイのように平面的な広がりをもっている。そこでプロジェクタの場合、スクリーン全体を網羅する測定点を決め、その色度を測定している。そして全スクリーンについては、熟練技能者による目視検査に頼っている。業務用プリンターについても同様に、印刷された画像の色合いがOKかNGであるかは熟練技能者の目視判断による。広がりを持ちかつ色という感性に訴える品質特性をなんらかの検査装置で検査するのは困難で、そのため検査データの数値管理及び検査の自動化が遅れている。したがってトレーサビリティの確保にも悪影響を及ぼしている。グローバルな競争が激化しトレーサビリティなどへの要求が高まりつつある現在、上記のような出荷検査部門の現状を変え競争力を高める必要がある。

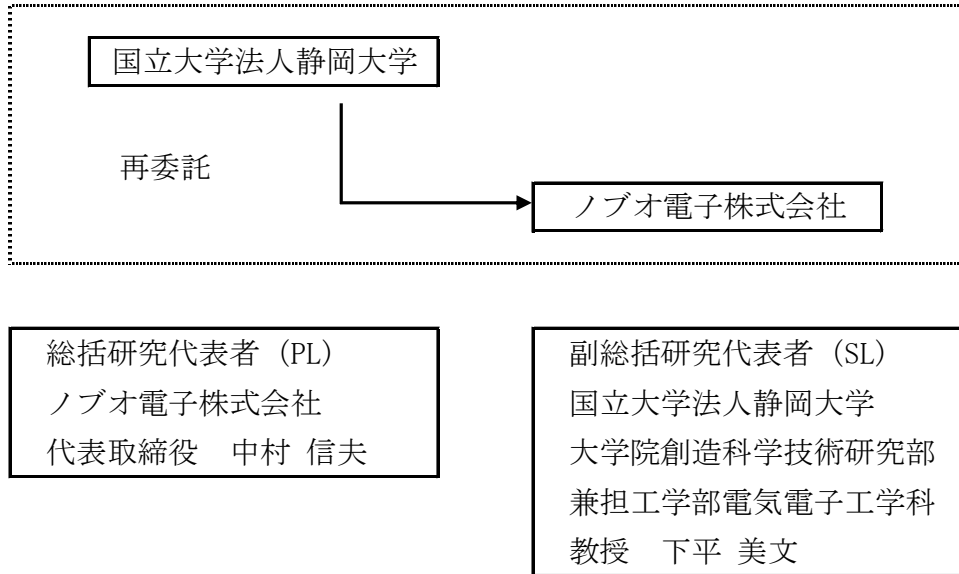
本研究開発事業の目的は、人の眼と同じ色感度を持つカメラと色データベースを組み合わせることで画像による色管理システムを開発することである。

そのための本事業の目標は、人間の眼と同じ色取得能力を持った使い勝手のいい撮像装置を開発し、そのすぐれた色再現性を維持するための自動色校正装置を開発して撮像装置に搭載するとともに、熟練技能者と同等の色判定能力を備えた色データベースと組み合わせることである。これによってこれまでの点から面の画像による検査が可能になり、色データベースによる熟練技能者の代替とトレーサビリティの十分な確保、さらに効率的な検査が可能となる。

2年間の研究開発の結果、当初の目的である熟練技能者の代替となる画像色管理システムの実現は、試作機レベルであるができた。試作機レベルの意味は、本システムで色管理できる対象が現時点では液晶ディスプレイに限られ、さらに色合いも限られていることである。大きな目標であった熟練技能の数値化の実証と、自動色校正機能の実現は達成できた。

1-2 研究体制

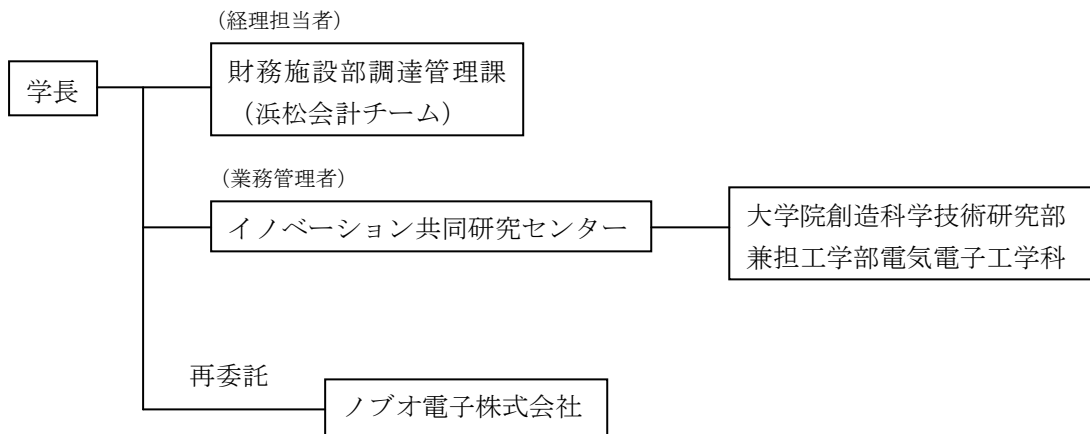
1. 研究組織



2. 管理体制

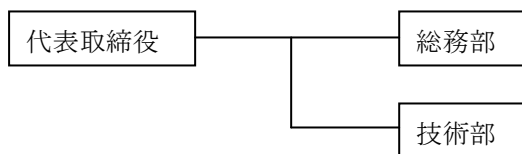
①事業管理機関

国立大学法人静岡大学



②再委託先

ノブオ電子株式会社



3. 管理員及び研究員

事業管理機関 国立大学静岡大学

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
牧澤 久光	ノベーション共同研究センター 企画管理部門	⑤

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
下平 美文	大学院創造科学技術研究部 兼担工学部電気電子工学科	①②

再委託先

ノブオ電子株式会社

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
中村 信夫	代表取締役	①②③④
鈴木 均	技術課 主幹	①②③④
武田 智	技術課 主任研究員	①②③④

4. 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理機関】 国立大学法人静岡大学

(経理担当者) 財務施設部 調達管理課長 西川 正孝

(業務管理者) イノベーション共同研究センター企画管理部門 牧澤 久光

【再委託先】 ノブオ電子株式会社

(経理担当者) 取締役 中村 喜子

(業務管理者) 代表取締役 中村 信夫

5. 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
中村 信夫	ノブオ電子株式会社代表取締役	PL
下平 美文	静岡大学大学院創造科学技術研究部 兼担工学部電気電子工学科	SL
杉浦 俊之	ソニーイーエムシーエス株式会社	アドバイザー
花島 正樹	ローランドディー・ジー・株式会社	アドバイザー
山崎 淳史	ローランドディー・ジー・株式会社	アドバイザー
佐藤 栄三	日本電計株式会社	アドバイザー

1-3 成果概要

研究開発項目はサブテーマにして2年間で8つある。これらに関連の強さ、独立性を指標に5つにわけて、それぞれの成果概要を以下に述べる。なお本報告書では、計測用色忠実撮像装置を簡略化して色高忠実カメラと称する。

① 色高忠実カメラの開発（実施：ノブオ電子株式会社）

当初目標を達成できた。色再現性については、確認できる範囲の視覚色域で平均色差1.0以下を達成できた。撮像装置としてのダイナミックレンジも68dBを、さらに画像合成により94.5dBと目標の60dB以上、90dB（画像合成時）を達成できた。

② 撮像装置評価装置の開発（実施：ノブオ電子株式会社、国立大学法人静岡大学）

撮像装置評価装置を構成する電子色票である12色LEDカラージェネレータは、表示可能色域が目標である視覚色域の70%以上を達成できた。またXYステージを用いた感度むらの評価結果によると、シェーディング測定精度が±0.7%となり目標値の±1%以内を達成できた。

③ 自動色校正装置の開発、改良（実施：ノブオ電子株式会社、国立大学法人静岡大学）

出力安定性、測色精度については当初目標を達成できた。しかし色高忠実カメラに装着することについては、光量の観点から断念せざるをえなかった。

④ 色データベースの開発、熟練技能の数値化（実施：ノブオ電子株式会社、国立大学法人静岡大学）

液晶ディスプレイの表示色について、熟練技能の数値化を達成できた。色情報（a*b*頻度分布）で検索可能な色データベースをつくった。

⑤ 評価試験、画像色管理ソフトの開発（実施：ノブオ電子株式会社）

多くの企業、社内にて評価試験を行い、指摘された不具合を解消した。そのうち暗い色の色差が大きくなることについては、持ち越しである。そして評価結果を反映した画像色管理ソフトを作成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】 国立大学法人静岡大学

イノベーション共同研究センター企画管理部門 牧澤 久光

電話番号 053-478-1757 FAX 053-478-1005

E-mail ttoyaiz@ipc.shizuoka.ac.jp

【再委託先】 ノブオ電子株式会社 技術部 主幹 鈴木 均

電話番号 053-592-9292 FAX 053-592-9167

E-mail hsuzuki@nobuo.co.jp

第2章 本論

2-1 色高忠実カメラの開発

科学計測用モノクロ CCD とターレットに装着された3枚のフィルターを組み合わせ、色を忠実に高解像度で撮像できる色高忠実カメラを開発した。カメラレンズ、フィルター、CCD それぞれの分光透過率、分光感度の積である総合分光感度が、人間の目の色に対する標準的な感度である CIEXYZ 等色関数と等価となるようにフィルターの分光透過率を設計した。色を忠実かつ高精度に測定することを可能とさせる。本カメラの性能などの諸元は以下である。

・色取得精度	物体色の色域で 1.0 以下
・画素数	1 1 0 0 万画素
・ダイナミックレンジ	68dB 以上
・CCD 冷却温度	10°C
・重量 (カメラレンズ含む)	約 5.2Kg

1) 基礎特性評価結果

本カメラのカメラとしての基礎的な特性は、次表のとおり良好であり研究目標をクリアできた。

表1 基礎特性評価結果

特性の種類	評価結果	判定
入出力特性	±0.5%以内 (但し低輝度部で 1.8%)	良好
出力安定性	±0.3%以内	良好
信号対雑音比特性	良好 (理論どおりの振る舞い)	良好
ダイナミックレンジ	68dB	良好
感度むら特性	補正可能	良好

2) 色取得精度評価結果

図1から図4は、4つの異なる照明下におけるマクベスカラーチェッカーを撮像した時の色取得精度を示している。D65光源で0.59、A光源で0.9、CW光源で0.73、太陽光を含む室内照明で0.73となり、いずれの照明でも平均色差は1.0以下である。

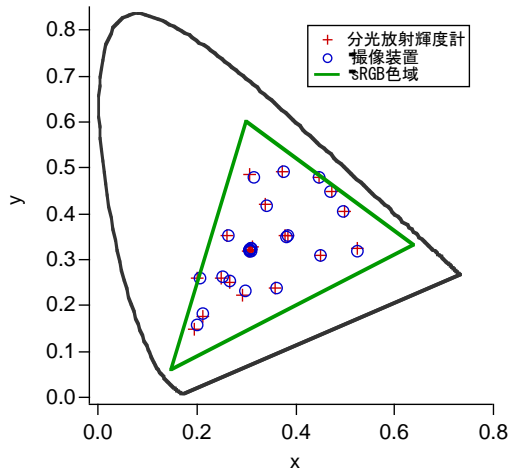


図1 D65 照明 (マクベスチャート)

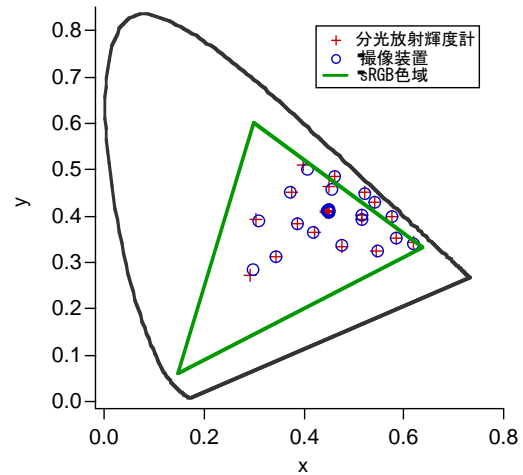


図2 A 照明 (マクベスチャート)

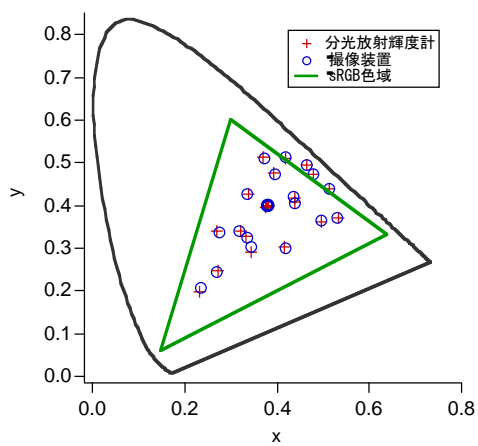


図3 CW 照明 (マクベスチャート)

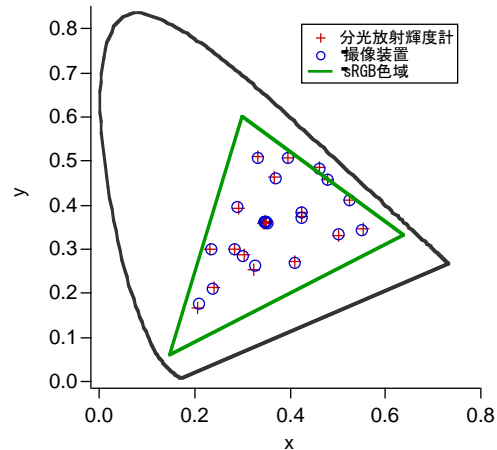


図4 室内照明 (マクベスチャート)

広い色域の場合の色再現性の評価結果を図5に示す。色票数53個の平均色差は0.86であった。良好な色再現性を確認できた。

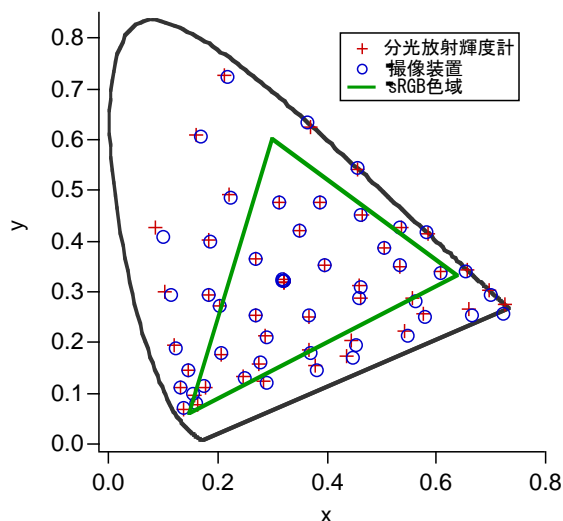


図5 広い色域における色再現性

2-2 撮像装置評価装置の開発

このサブテーマでは、開発された色高忠実カメラの種々の特性を評価する手段を開発し、必要に応じて特性を改善する補正方法を研究する。開発する手段、装置は12色LEDカラージェネレータとXYステージから構成される。評価する特性は、2-1 色高忠実カメラの開発にある表1の5つの基礎特性と、色再現性である。12色LEDカラージェネレータの表示色域と外観を図6、7に示す。

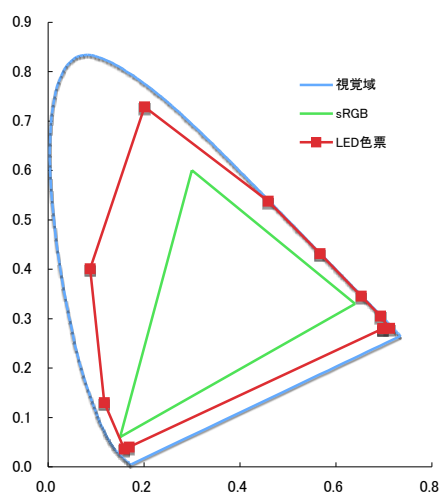


図6 12色LEDカラージェネレータの表示色域

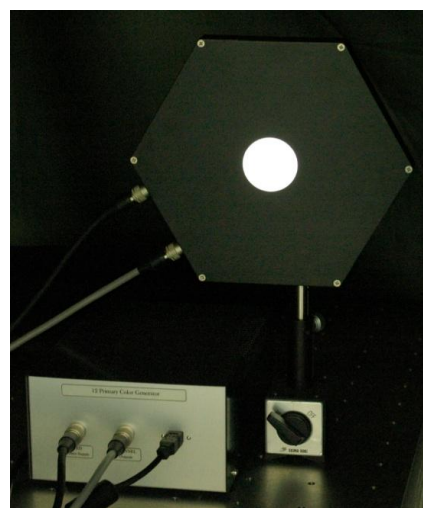


図7 12色LEDカラージェネレータの外観写真

XY ステージは、感度むらの測定とマクベスチャートによる色高忠実カメラの色再現性の評価に用いられる。

XY ステージにマクベスチャートを載せて色票に応じて XY 方向に移動させれば、色高忠実カメラから見て測定されるべき色票は常に画像上の同じ場所にくることになる。これにより画像の値を精度よく測定できる。分光放射輝度計の場合でも同じである。分光放射輝度計は常に同じ角度で測定すればいい。角度を振ることによる誤差はなくなる。XY ステージは、測定系がつねに同じ条件(画像上の解析箇所、角度、対象までの距離)で測定することを可能にすることにより、誤差を大幅に減少させることができる。

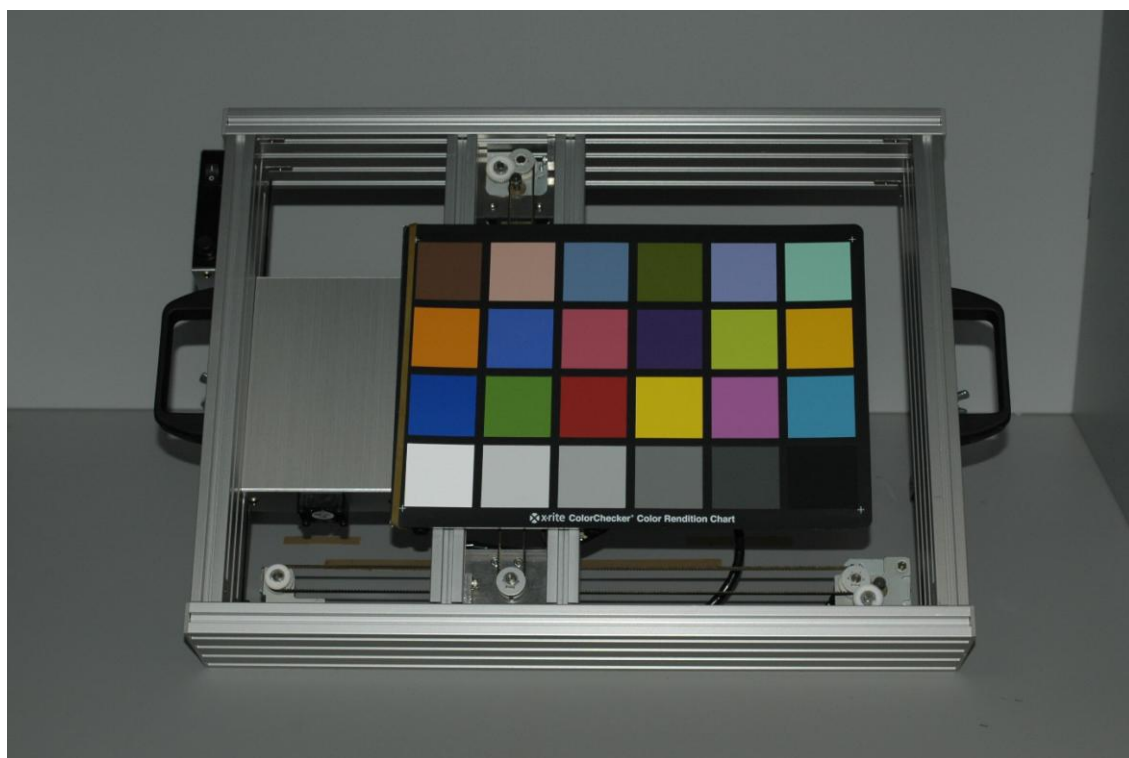


図8 マクベスチャートによる色再現性実験のときの状態

2-3 自動色校正装置の開発、改良

自動色校正装置とは、ユーザー側で色高忠実カメラの色取得精度を常に最適な状態に維持するための装置である。本装置は、測色手段としての小型高精度測色計と小型測色計制御ソフトウェアが主たる構成要素となる。

自動色校正の方法は、はじめに小型高精度測色計と色高忠実カメラで同じ色票を測色、撮像する。次に小型高精度測色計の測色値を基準として撮像出力値

を測色値に変換するマトリクスを生成する。したがって基準を与える小型高精度測色計には、可能なかぎり正確な測色精度が要求される。

初年度開発した小型高精度測色計では入射光量が設計値より少なくまたフィルターの分光透過率の設計値からのずれが大きく、測色精度が当初目標に達しなかったため、2年目に改良を施した。その結果、当初研究目標である以下の数値が実現されていることを確認できた。

出力安定性	±0.5%以内
出力再現性	±0.3%以内
使用温度範囲	10℃から35℃
測色精度	色度 x, y: ±0.005 以内
測定再現性	色度 x, y: ±0.0015 以内

またダイナミックレンジとして、82dBを確認できた。図9は色取得精度確認実験の結果である。25個の色票に対する平均色差が xy 色度で x が±0.0013 ($\sigma=0.001$)、y が±0.0008 ($\sigma=0.0006$)となり、研究目標の±0.005の達成を確認できた。図10は改良後の小型高精度測色計の外観写真である。

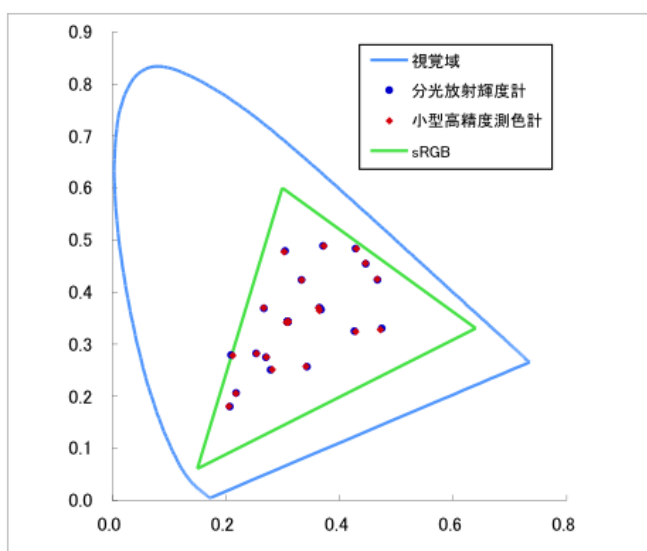


図9 小型高精度測色計の色取得精度



図10 小型高精度測色計

12色LEDカラージェネレータにより25個の色票を表示させ、その色票を小型高精度測色計で測色し、同時に色高忠実カメラで撮像して自動色校正機能を確認した。小型高精度測色計の測色値を基準にして、色高忠実カメラの出力を最小二乗法により測色値に変換した。その値と、12色LEDカラージェネレータの色票を分光放射輝度計で測色した値との、25個の色票についての平均色差を求めた。平均色差はCIEDE2000色差式で0.72と1.0以下であった。図1-1にxy色度図上での確認結果を示す。なお画像色管理ソフトによる自動色校正に要した時間は10分弱であった。

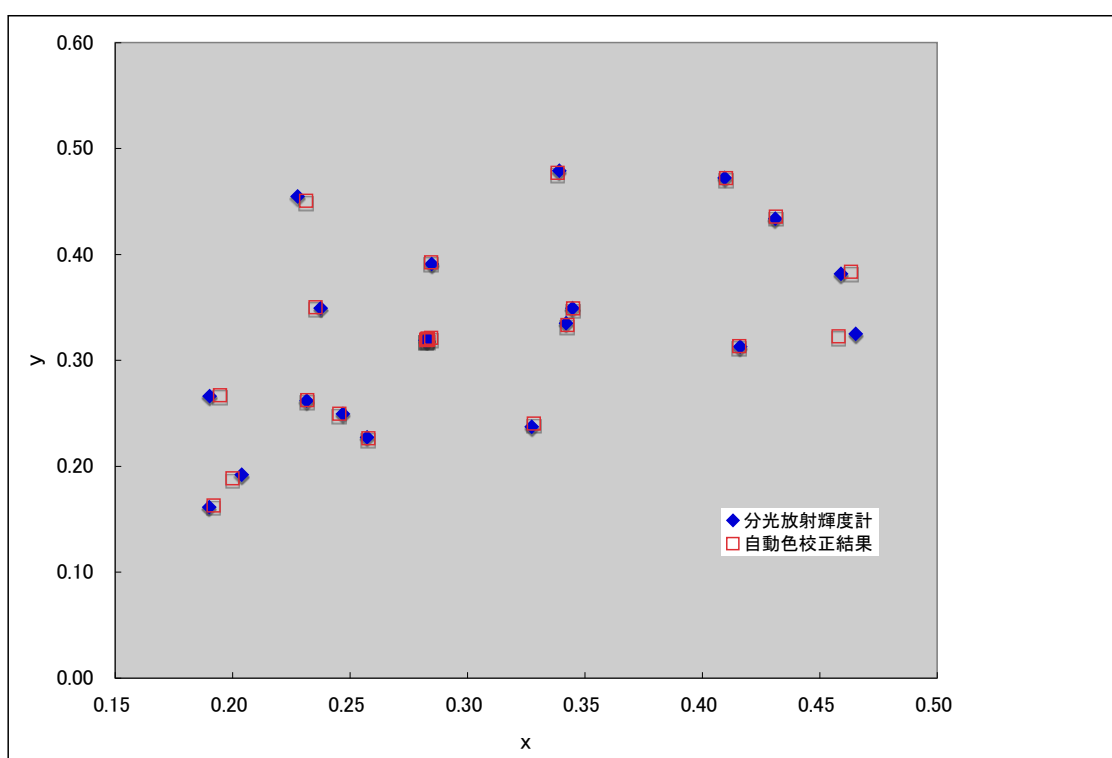


図1-1 自動色校正による色高忠実カメラの校正結果

2-4 色データベースの開発、熟練技能の数値化

本研究で開発する色データベースは、色に対する熟練技能者の判断・経験を数値化したものを検査判定用データとして備え、かつ出荷製品の検査データ、製品の属性もデータベースとして備えることを目指す。ここで最も重要なことは、如何に熟練技能を数値化するかということである。数値化対象となる熟練技能は、液晶ディスプレイの表示色を品質評価する技能とした。

熟練者技能つまり主観的判断の数值化の方法の概要を図12に示す。熟練技能者が液晶ディスプレイに表示された色を見て、OKかNGかを判断する。熟練技能者の心の内ではたとえば、この緑は鮮やかすぎるとか少し黄色味がかかっているなどと評価を行い、経験にもとづきその熟練技能者が持っている基準を参照してOK、NGを判断する。色高忠実カメラは、色に対して人間の目と同じ感度を持っている。人間が少し黄色っぽいと感じれば、色高忠実カメラの出力もそれに応じて変化する。この熟練技能者の判断と、色高忠実カメラの画像出力の間には必ずなんらかの関係があるはずである。

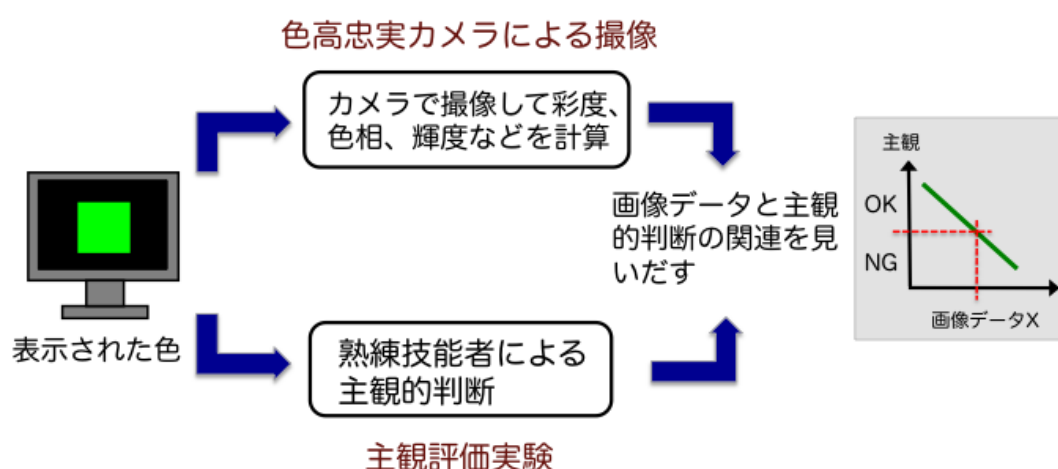


図12 熟練技能の数值化のイメージ

被験者15名を集めて主観評価実験を行った。液晶ディスプレイに基準画像をまず表示させ、次に評価画像を表示させる。被験者は、評価画像の基準画像に対する違いを、5段階妨害尺度で判断する。基準画像に対して、輝度、彩度、色相を少しずつ変えた評価画像を多数用意して行った。

次に主観評価実験に用いた画像すべてを、色高忠実カメラと比較のために通常のデジタルカメラで撮像する。被験者の評価の平均値と、カメラ出力を演算して得られた輝度、彩度、色相の相関を調べた。結果を図13、14に示す。

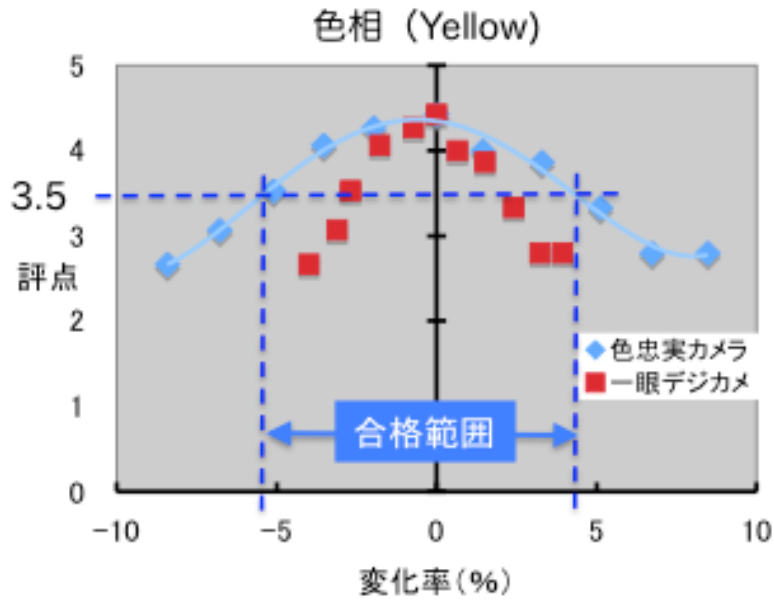


図 1.3 Yellow の色相変化に対する被験者の評価と画像の関係

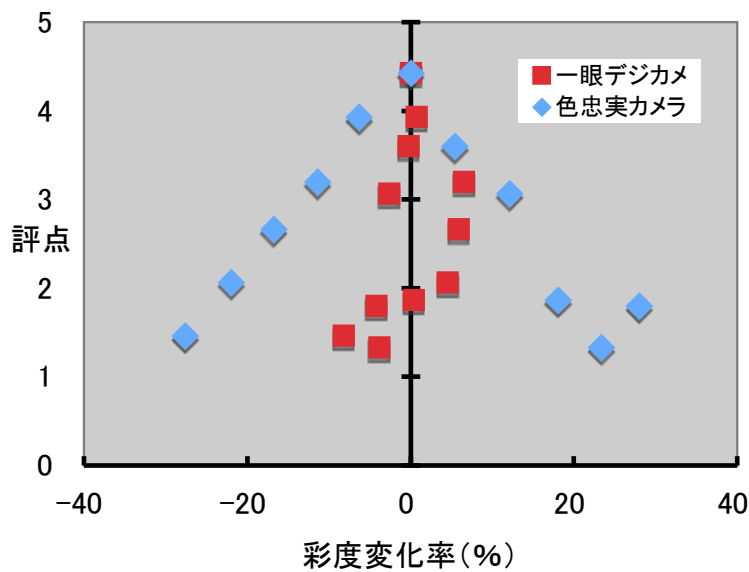


図 1.4 Blue の彩度変化に対する被験者の評価と画像の関係

たとえば Yellow の色相について品質評価する場合、仮に評点 3.5 以上を合格範囲と設定すれば、図 1.3 に示されているように、色相の変化率が-6%から+4%の範囲に入る表示色を OK とすればいいことがわかる。色高忠実カメラを使えば、主観評価実験と組み合わせることにより、基本的には熟練技能の数値化が可能になることを確認できた。一方、既存のデジタルカメラでは、図 1.3 の場合に

については相関が認められるが、図14の場合には示されているように相関は認められない。

2-5 評価試験、画像色管理ソフトの開発

多くの企業に協力してもらい、開発中の画像色管理システムを評価していただいた。また本システムに対する広範な業界からの反応を知りたく、多くの展示会に出品した。そして評価試験から得た知見、要望を画像色管理ソフトに反映させた。

下図はそのような要望のなかでも多かったメタリックな印刷、メタリック塗装の色合いがわからないかということに対応した結果である。図中右側半分は、角度を変えたときの輝度ヒストグラムと a^*b^* 分布である。角度が変わることにより、輝度と色合いが変わることがわかる。図の左半分は、もっとも角度が浅いときの a^*b^* 分布を、輝度の範囲ごとに示したものである。鮮やかな色つまり彩度の高い色ほど同時に輝度も高いことがわかる。

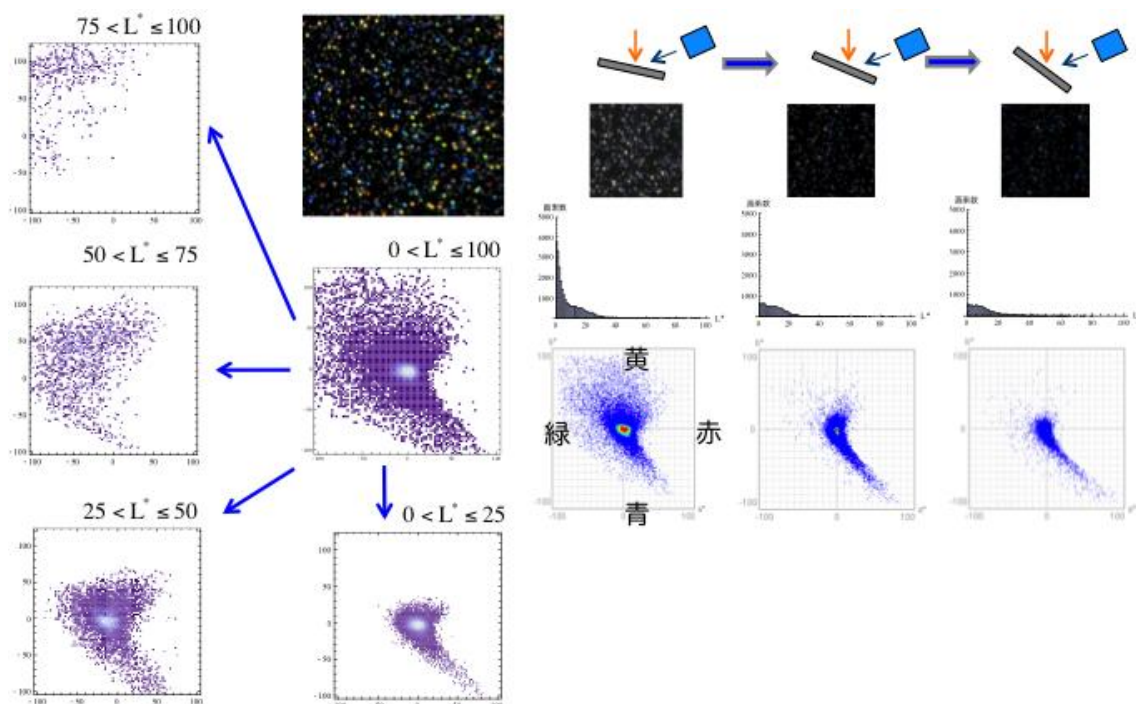


図14 メタリック表面色の角度による輝度、 a^*b^* 頻度分布の違い

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

2年間に行った研究開発は、サブテーマという括りでは8つになるが、研究テーマとしての独立した内容としては以下の5つに分類できる。

- ① 色高忠実カメラの開発
- ② 撮像装置の評価方法、装置の開発
- ③ 自動色校正装置の開発、改良
- ④ 色データベース、熟練技能の数値化
- ⑤ 評価試験、画像色管理ソフトの開発

それぞれの研究開発の成果を以下順に述べる。

① 計測用色忠実撮像装置（色高忠実カメラ）の開発

今回開発した色高忠実カメラは、これまで静岡大学が中心となって開発してきたどの色高忠実カメラよりも性能は同等かすぐれかつ実用的である。採用している CCD センサーはこれまでどおりであるが、CCD 読み出し回路のノイズは小さい。またカメラレンズ、フィルターターレット、CCD センサーからなる機構光学系の設計も、静岡大学での経験が反映された結果、迷光の低下、カメラ重量の半減化、フィルター回転音の大幅な減少がなされている。以下数字で性能を列挙する。

・色取得精度	物体色の色域で 1.0 以下
・画素数	1 1 0 0 万画素
・ダイナミックレンジ	68dB 以上
・CCD 冷却温度	10°C
・重量（カメラレンズ含む）	約 5.2Kg

本カメラで撮像した画像を広色域液晶ディスプレイに表示すると、被写体の質感までもが再現される。たとえば布を撮像・表示すれば、布の肌触りが想起される。色合いが忠実に取得・再現されかつ微細な表面構造まで撮像できているからと考える。

② 撮像装置の評価方法・装置の開発

色高忠実カメラを評価するための装置類をつくった。それらを組み合わせ動かし、種々のカメラに関する特性を測定・評価できる方法を確立できた。

色取得精度を評価するために、まず色票を開発した。広く使われている印刷された色票では、色域が狭く色高忠実カメラの持つ視覚色域のすべてを撮像できるという機能を評価できない。そこで12色のLEDを組み合わせて、物体色内の任意の色を表示できる12色LEDカラージェネレータを開発し、色取得精度を評価した。12色LEDカラージェネレータの正確な色度は、分光放射輝度計で測定してその値を基準とした。

色取得精度の評価測定系を考案した。色票を分光放射輝度計で測色し、次に評価対象であるカメラで同じ色票を撮像するという方法が一般的に行われている。この方法の場合、色票の色度は常に変わらないことを前提としているが、12色LEDカラージェネレータの色度は、色票を変えるたびにあるいは時間の経過とともにわずかであるが変動している。この変動をキャンセルしかつ測定時間の短縮をもたらす色度・画像同時測定法を開発した。

感度むら特性の評価のためにXYステージを導入し、白色LED光源と組み合わせて評価測定系を構築した。発光面積の小さな光源であるため、フレアが発生せず感度むらを正確に測定できた。測定精度は±0.7%を確認でき、当初目標の±1%以内を達成できた。

③ 自動色校正装置の開発

測色精度維持のためのユーザーの負担軽減を目的に自動色校正装置を開発した。キーデバイスは小型高精度測色計である。刺激値直読型の3センサー方式である。分光感度に工夫をこらし、色取得精度は既存の刺激値直読型測色計よりもすぐれている。以下に確認された性能を示す。

・信号出力安定性	±0.5%以内
・信号出力再現性	±0.3%以内
・測色精度	色度 x, y: ±0.005 以内
・測色再現性	色度 x, y: ±0.0015 以内
・動作温度範囲	10℃から35℃

この小型高精度測色計を使って色高忠実カメラを自動色校正したところ、平均色差 0.72 の色取得精度を確認できた。充分実用的な数字である。

④ 熟練技能の数値化

ディスプレイやプリンターの製造時の色に関する品質評価を行っている熟練技能者の暗黙知を数値化して、形式知に置き換える試みである。品質評価対象として、液晶ディスプレイの表示色についての熟練技能の数値化を行い、達成を確認できた。

液晶ディスプレイ表示色の実験では、被験者 15 名の表示色についての主観的判断の平均値と、その表示色を色高忠実カメラで撮像したときの演算結果との相関を調べた。その結果、主観的判断とカメラ出力の間の明確な相関を得ることができ、熟練技能の数値化が可能であることを実証できた。

⑤ 評価試験、画像色管理ソフトの開発

多くの企業、社内にて評価試験を行い、要望事項の実現、指摘事項の改善を行った。そして評価結果を反映した画像色管理ソフトを作成した。また画像センシング展、オプトロニクスフェア2011、画像機器展に出展した。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

「品質評価対象を撮像して熟練技能者の判断を数値化した合否基準と照らし合わせて合否を判断する装置」という画像色管理システムの設計理念は、時代の要請にあっていると確信している。この確信は、サポインの2年間を通じて、正確には展示会への出品や各企業での評価試験を通じて、強まりこそすれ弱まることはない。

しかしながら、それではすぐ注文が来るかと言えば、それは別問題である。継続して販売できるためつまり事業化のためには、以下の課題がある。

① 製造原価の低減化

本システムのユーザーは、メーカーの生産技術や製造部門である。コストパフォーマンスに対してもっとも厳しい部門である。現時点の製造原価では売れても利益は少ない。

② 熟練技能の数値化ノウハウの確立

ユーザーつまり業種が異なれば品質評価の対象も方法も異なる。まったく新しい品質評価対象・方法について、短期間に確実に数値化できる能力、ノウハウが求められる。

③ 画像色管理システムの品数を増やす

今回開発したシステムは、いわばフラッグシップである。高いパフォーマンスではあるがユーザーが限定される。廉価バージョンが必要である。

④ 動画カメラ対応

現システムは静止画カメラを使っている。タクトタイム、取り回し易さの観点から動画カメラを使った画像色管理システムが求められる。

⑤ ネット対応

既に遠隔地にある工場の製品検査に使えないかという問い合わせを受けている。製造業の海外移転の進行を考えると、いずれ対応すべきである。

上述の課題に対処しながら以下に述べる事業化展開を進めていきたい。

① 市場

業界：業務用プリンターメーカー、自動車、自動車部品の塗装メーカー、化粧板・建築材メーカー、アパレル業界（捺染後の色管理）、ディスプレイ検査、化粧品メーカー

地域：平成25年度までは国内市場を対象に製造・出荷・アフターサービス体制をつくる。平成26年度より欧米に進出する。

② 製品展開

平成24年8月 画像色管理システム（フラッグシップ）販売開始

平成24年10月 低価格画像色管理システム販売

平成25年3月 動画カメラ版画像色管理システム販売

この製品展開とは別に、OEMによる販売を予定している。

③ 売上げ

平成24年度 5,000 万円

平成25年度 8,000 万円

平成26年度 12,000 万円

付録 用語集

用語	説明
色差	色は、色空間と呼ばれる3次元空間内の点の位置（座標）で表現される。色がふたつあったときそれらの色の違いを、これらの色に対応する3次元空間における2点の間の距離で表す。これが色差である。つまり、知覚的な色の相違を定量的に表したものの。記号は ΔE である。
平均色差	平均色差は、カメラやディスプレイの色再現性の指標として使われる。カメラやディスプレイの色再現性を評価するとき、テストする色（色票）の数は数10色以上必要である。カメラの場合、被写体としての色票の色と撮像された画像の色の色差を、評価につかった色票すべてについて平均を取った量が平均色差である。小さければ小さいほど色再現性が良好であり、平均色差が2以下であれば、離れて見た場合判別ができないといわれている。
測色的色再現	照明光と観察光が等しいとき、オリジナルと再現色の見えが一致すること。
CIE 等色関数	1931年に国際照明学会(CIE)により制定された人間の目の標準的な色に対する分光感度をあらわす関数のこと。
色度	色は3次元空間内の点の位置として表されるが、これを2次元に投影したものが色度座標である。この色度座標によって定められる色の心理物理的性質（色の見え、明るさではない）を色度という。
色度図	3次元空間内を、2次元に投影したものが色度図である。色は色度図内の位置で表される。xy色度図が比較的知られている。
L*a*b*空間	色を表す3次元空間のひとつ。L*が輝度に、a*、b*軸が色度つまり色合いに対応している。人間の色覚との相関が高い。
ダイナミックレンジ	計測器の特性を表す用語のひとつで、入力のおおきさと出力のおおきさの比例関係（線形関係）を維持した状態で測定できる入力強度の範囲（出力強度の範囲でも同じ）。