

照明モデルを用いた堅牢な色認識による 誤配線認識 AR システムの開発

Development of an Error Wiring Recognition AR System
using Robust Color Recognition with an Illumination Model

大澤 想り

So OSAWA

1) 三菱電機(株) 情報技術総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1, Osawa.So@ay.MitsubishiElectric.co.jp)

概要 : 配電設備の誤配線を AR 表示する点検支援システムを開発した。開発したシステムは配線の色を元に配線認識を行うが、照明モデルを用いて照明光を推定して色補正を行うことで工場の様々な照明条件に対応可能とした。評価の結果、提案した色補正手法でのみ配線の 6 色を識別可能であることが分かった。また、開発した AR システムを用いて点検作業速度を評価した結果、画像での点検に比べて有意に作業時間が短縮し、約 33%の作業時間の削減が実現できることが分かった。

キーワード : 拡張現実感, 誤配線認識, 点検支援, 照明推定

1. はじめに

配電設備の配線作業は、多数の配線を正確に結線していく必要があり、高度な集中力を要する。配線作業をシステムで支援することでヒューマンエラーの防止や作業時間の短縮が実現できる。そのため本研究では、点検時の誤配線を AR で分かり易く表示するスマホ向けシステム(以下、誤配線認識 AR)を開発した。誤配線認識 AR では、誤配線を認識するために、配線の色を利用した。即ち、各色のケーブルの正しい結線情報を持ち、現状の配線と比較することで誤配線認識を実現できる。ただし、工場等ではナトリウム照明等の様々な特殊照明も使われており、配電計器の設置環境も多様なため、照明環境が安定せずに色のセンシング値が変動する課題がある。そこで本研究では、照明モデルによる堅牢な色認識システムを考案した。

2. 誤配線認識 AR の実装

2.1 誤配線認識 AR の概要

誤配線認識 AR は、Android OS (Google Pixel4 を利用) 向けアプリとして Unity で開発した。対象計器は三菱電機製の EcoMonitor とし、型番や位置姿勢の検出には AR マーカ (OpenCV, ArUco, サイズ 1.1cm) を利用した。配線は標準的規格である赤・青・緑・黄・白・黒の 6 色のビニル絶縁ケーブル (サイズ 1.25mm²~38mm²) とした。配線コネクタ数は型番で異なり、実用上 1 つのコネクタに最大 2 本の結線の可能性がある。全体的な処理フローは図 1 の通りであり、端末で獲得した映像から配線位置を抜き出し、色補正後に結線状態を認識し、AR 表示を行う。

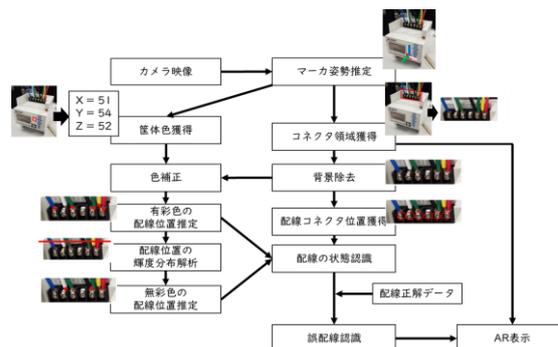


図 1: 誤配線認識 AR のフロー図

2.2 色補正に関する先行研究

照明光を推定して色を補正する研究として、マルチバンドカメラの利用[1]、撮影画面の平均色がグレーになる仮説の利用[2]等がある。特に機械学習を用いた先行研究[3]は Google Pixel のオートホワイトバランス機能として実装され、リアルタイムに高精度な色補正を実現している。以上の手法は、本研究のような配電盤を対象とするスマホ向けアプリでは、カメラの性能や利用環境の仮説等で適応が難しい。特に工場では特殊な照明を用いる可能性があるため、通常の照明環境とは異なる仮説やデータが必要となる。一方、本研究では対象計器の規格が決まっており、計器の筐体色 (分光反射率) を事前に測色できる。対象の分光反射率が既知の場合に照明を推定する方法として、照明モデルを用いる手法がある。照明モデルとは、代表的な照明の分光分布を主成分分析することで、その基底ベクトルで次元削減し、少数のパラメータで照明の分光

分布を近似するものであり、CIE 標準昼光のモデル[4]や代表的 CIE 標準照明のモデル[5]が検討されている。塚田らの研究[6]では、顔領域の XYZ 値をカメラで獲得し、顔の分光反射率を既知として、昼光照明モデルを用いた照明推定を実現している。本研究では利用シーンである工場の照明モデルを構築し、照明光の推定と色識別を実現する。

2.3 照明モデルの構築

照明 $P(\lambda)$ はその種類をある程度仮定することで、以下の式(1)のような有限要素での近似が可能である[4,5]。

(P_n : ベクトル, a_k : パラメータ)

$$P(\lambda) = \sum a_1 * P_1 + a_2 * P_2 + a_3 * P_3 + \dots + a_n * P_n \quad (1)$$

本研究においては、工場の照明モデルとして特殊照明を含む計 33 種の照明を利用した(表 1)。スペクトルデータは LRC[7]のデータを用いた。全ての照明の分光分布の相対エネルギーを、自身の相対エネルギー平均値で割った後に主成分分析にかけ、主成分の数と累積寄与率との関係性を評価した(図 2)。累積寄与率はおよそ 80%程度以上で、元のデータを十分再現できると見なすことが多いが、本モデルでは、第 3 主成分までで 90%近い累積寄与率があり、3つのパラメータで与えた照明をモデル化できていると言える。よって本研究では主成分の上位 3 成分を用いた式(2)を照明モデルとする。(P₁₋₃: 主成分, a₁₋₃: パラメータ)

$$P(\lambda) = \sum a_1 * P_1 + a_2 * P_2 + a_3 * P_3 \quad (2)$$

表 1: 照明モデルに利用した照明のリスト

名称	詳細	補足
A	CIE 標準	白熱電球相当
C	CIE 標準	昼光 (間接光) 相当
D50	CIE 標準昼光光源	補助標準光 (5000K)
D55	CIE 標準昼光光源	補助標準光 (5500K)
D65	CIE 標準昼光光源	欧州の平均的な正午の光
D75	CIE 標準昼光光源	補助標準光 (7500K)
I1	ネオジム電球	食品演出など
I2	つや消し電球	明るさを抑えた電球
I3	ハロゲンランプ	スポットライトなど
D1	キセノンランプ	ヘッドランプなど
D2	水銀灯	街灯など
D3	セラミックメタルハライド	ナイター照明など
D4	パルススタートメタルハライド	植物照明など
D5	高圧ナトリウムランプ	大規模工場照明など
D6	低圧ナトリウムランプ	トンネル照明など
F1	高 CRI 蛍光灯	型番 F40T12 high CRI daylight
F2	小型蛍光灯	
F3	蛍光灯 1	型番 F34T12 cool white
F4	蛍光灯 2	型番 F32T8 RE835
F5	蛍光灯 3	型番 F32T8 RE50
F6	蛍光灯 4	型番 F32T8 RE30
F7	蛍光灯 5	型番 F32T8 RE41
P1	蛍光体型白色 LED	色温度 5100K
P2	蛍光体型白色 LED	色温度 2700K
P3	蛍光体型白色 LED	色温度 3500K
P4	蛍光体型白色 LED	色温度 4100K
P5	蛍光体型白色 LED	色温度 6500K
P6	蛍光体型白色 LED	色温度 5000K
S1	食品ディスプレイ蛍光灯	
S2	高色温度蛍光灯	
S3	水槽用蛍光灯	
U1	ハイパワーLED	色温度 2700K
U2	ハイパワーLED	色温度 6500K

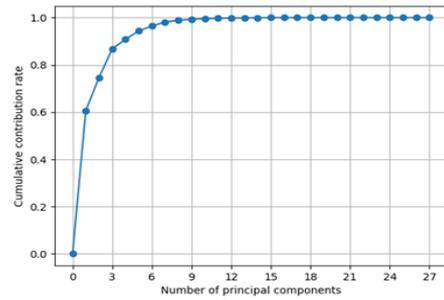


図 2: 工場用照明モデルの主成分数と累積寄与率の関係

2.4 照明光推定アルゴリズム

人が肉眼で色を見る際の物理的なモデルは、照明光の分光分布 $P(\lambda)$ 、物体の分光反射率 $\rho(\lambda)$ 、肉眼の特性である等色関数 \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} 、定数 K を用いて式(3)で表される。

$$\begin{cases} X = K \int_{380}^{780} P(\lambda) * \rho(\lambda) * \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = K \int_{380}^{780} P(\lambda) * \rho(\lambda) * \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = K \int_{380}^{780} P(\lambda) * \rho(\lambda) * \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (3)$$

$\rho(\lambda)$ は物体の分光反射率であり、本研究では計器の筐体の分光反射率で既知の値である。XYZ 値は、カメラによって筐体の現在の照明下の色をセンシングした値 RGB から求められる。本研究では、利用するカメラが sRGB ITU-T BT.709 規定に従っているとし、以下の式(4)によって RGB 値から XYZ 値への変換をおこなった。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} / 255 * 80 \quad (4)$$

筐体色には、AR マーカに基づく相対位置で獲得した筐体色のみの領域の平均値を用いた。以上の式(2)(3)(4)を用いて、未知数である a_1, a_2, a_3 を算出し、照明の推定値 P_E を求める。次に求めた P_E と式(3)を用いて、分光反射率 $\rho(\lambda)$ を完全拡散反射面と見なした際のホワイトポイント X_n, Y_n, Z_n を求める。この値を用いて、以下の式(5)と式(4)を用いて配線領域(後述)の RGB 値より、CIE L*C*h 変換する。

$$\begin{cases} L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* = 500 \left\{ \left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \\ b^* = 200 \left\{ \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \\ C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\ h = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \end{cases} \quad (5)$$

L^* は明度で 0-100 の値をとる。 C^* は彩度で、鮮やかさを表す。 h は色相で 0-360 の色味を表す。 L^*C^*h 値は照明を考慮した色空間で、照明の影響のない色認識が可能になる。

2.5 誤配線認識アルゴリズム

配線領域を AR マーカに基づく相対位置で大雑把に抽出し、図 3 のように境界から背景を推定して除去する。獲得した配線領域に対して、図 4 左のようにネジを含む 1 ライ

ンを抽出し、明度値変化からコネクタ位置を推定する。同時に、獲得した配線領域を第 2.2, 2.3 節の方法で L^*C^*h 色空間に変換する。本システムでは 6 色の配線を識別できれば良いため、 L^*C^*h 各値に適切な閾値を設けて 6 色の識別を実施する。識別する各 6 色の閾値で配線領域をマスクングとノイズ除去し、指定の色の配線のみ抽出する。このマスクング画像から配線を下にたどっていくことで配線の最下点を推定する。無彩色 2 色に関しては、明度 L^* で識別を行う必要があるが、図 4 右のように配線を含む 1 ラインを抽出して明度値を計算し、最大値と最小値を各々白と黒の明度値の基準として利用することで堅牢な認識を実現する。最後に、推定したコネクタ位置と各色の配線位置の最下点を比較し、最も近いコネクタ位置に各配線が結線していると認識する。認識した配線状態と正解データを比較することで、誤配線箇所を特定する。

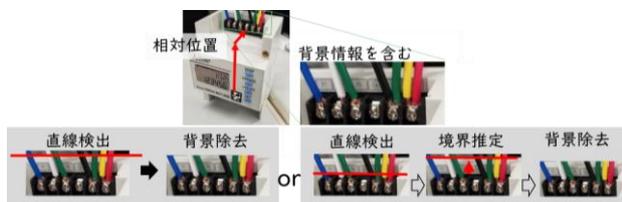


図 3: 配線領域の背景除去

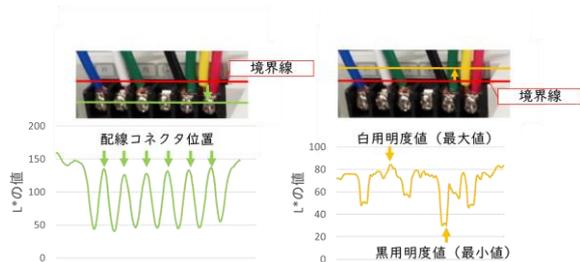


図 4: 配線コネクタ位置推定(左)と明度基準値獲得(右)

2.6 AR 表示と UI デザイン

AR マーカに基づく相対位置で配線の位置に AR 表示を行う。認識結果の表示として、図 5 の UI を設計し、一目で正しい配線と実物の配線、誤配線のチェック結果を比較できるようにした。現物の配線位置に AR 表示することで、どう誤配線しているのか直感的に理解可能である。

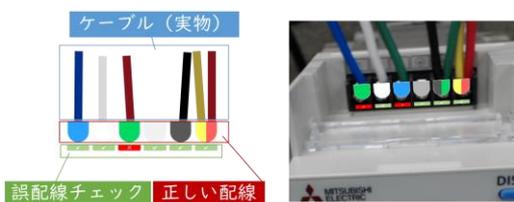


図 5: UI デザインと実際の AR 表示例

3. 照明モデルによる色補正の評価

3.1 実験方法

誤配線認識 AR では 6 色の配線に筐体色を加えた 7 色を分類できる必要がある。本実験では、D65 照明で L^*C^*h 色空間変換した補正を行わない条件 (以下、なし条件)、

先行手法[3]によるホワイトバランス調整後、 L^*C^*h 色空間変換した条件 (以下、AWB 条件)、第 2.3, 2.4 節の提案条件で、11 種類の照明環境 (図 6) に置いたときの 6 色の配線と筐体色の L^*C^*h 値のばらつきを評価した。 L^*C^*h 値は計器を各照明条件下に配置して撮影した 5 枚の写真から各配線領域と筐体領域を手作業で抽出し、平均値として算出した。配線は想定最小サイズの 1.25mm^2 を用いた。



図 6: 11 種類の照明条件での配線の見え方

3.2 実験結果・考察

図 7, 8 は各照明条件での 7 色の h と C^* のばらつきを箱ひげ図で表現したものである。縦軸が h または C^* に対応し、各箱の色が 7 色に対応する。箱ひげの分布が狭いほど、照明環境に依らず恒常的に色をセンシングできている。図 7 から、有彩色 4 色は提案条件と AWB 条件では色の被る領域は無いが、なし条件では場合によっては緑と黄を識別できないことが分かる。また図 8 から、提案条件でのみ $C^*=18$ 付近に閾値を設けることで、有彩色と無彩色+筐体色を分離可能であることが分かる。図 7 の結果も踏まえると、提案条件でのみ C^* で有彩色と無彩色+筐体色を分離した後に、 h で有彩色 4 色を分離することで、照明環境に依らずに有彩色の識別が可能になる。なお AWB 条件では、フィルタを用いた条件で C^* が分離できないほど大きくなっており、特殊な照明には対応できなかったと考えられる。無彩色と筐体色の分離に関しては L^* を参照すればよい。図 9 は提案条件での、各照明環境下の 7 色の L^* を表す。縦軸が L^* に、横軸が各色に対応する。図 9 から、全ての照明環境で L^* が最大のものが白、最小のものが黒であることが分かり、 L^* で無彩色を識別可能である。以上より、今回比較した 3 つの手法では、提案条件でのみ様々な照明環境下での 7 色の分類が可能であることが示された。

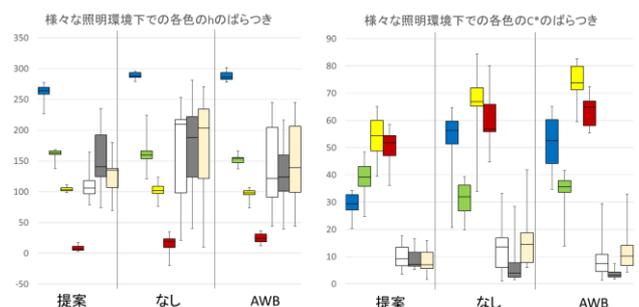


図 7: 様々な照明環境下での各色の h , C^* 値のばらつき

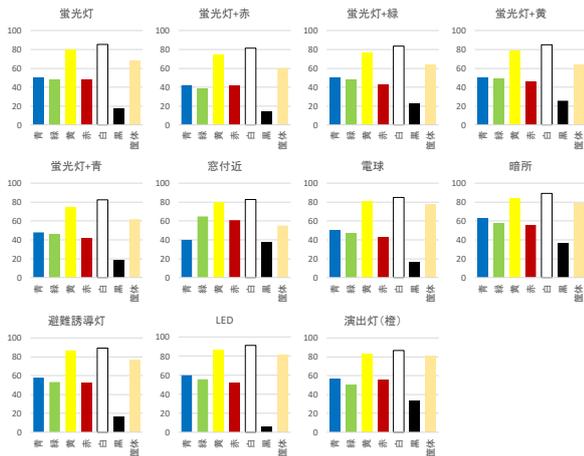


図 8: 提案条件の各照明環境下での各色のL*値

4. 誤配線認識 AR の作業時間短縮効果検証

4.1 実験方法

誤配線認識 AR を用いて、実際に点検作業にかかる時間を評価した。L*C*h の閾値は第 3 章の結果を元に表 2 を用いた。実験参加者は、各々別の配線がされた 3 つの型番の同じ計器に配線が正しく行われているかを正確に点検するよう要求された。3 つの計器の配線状態を順次、正しい配線と比較し、誤りがある場合にはそれを紙に記載した（以下、配線点検）。具体的には、配線コネクタの 6 か所に対応する 1~6 が書かれた枠に、誤った配線がある場合にはその色を記載した。この際、誤配線認識 AR で配線を確認する条件（AR 条件）と、正しい配線がされた計器の画像が印刷されたカラー紙を見て配線を確認する条件（IMG 条件）の 2 条件を設けた。どちらの条件でも、実験参加者は UI や点検方法の説明を十分に受けた。全ての実験参加者は、休憩時間を挟んで 2 条件の両方で配線点検を 1 回ずつ実施し、その作業時間を記録された。配線の誤り数は、3 つの計器の 1 つは誤配線なし、1 つは 3 か所誤配線、残りの 1 つは 4 か所誤配線とし、条件間で誤配線の数を同じにして難易度を調整した。3 つの計器の提示順序はランダムである。計器には全 6 色+任意の 1 色の計 7 本の配線を、1 コネクタは空き状態にして配線した。

実験参加者は 20 代の男女 4 名であり、条件割り当ての順序を 2 名は AR→IMG 条件とし、もう 2 名は逆とした。そして対応ありの 2 条件間で作業時間に差があるかを検討した。全ての実験参加者が利用した 6 色の識別ができることを確認した。

表 2: 実験に利用した誤配線認識 AR の閾値

抽出する色	L*	C*	h
赤	30-70	>30	-5-30
黄	30-85	>30	90-115
緑	30-70	>18	145-180
青	30-70	>18	220-290
白	最大値-2~最大値+10	<18	0-360
黒	最小値-10~最小値+7	<20	0-360

4.2 実験結果・考察

本実験における配線点検では、全ての実験参加者で誤解答は 0 であったため、下記では作業時間のみ注目して検討する。図 9 は、各実験参加者の作業時間と、全ての実験参加者での作業時間の平均値について、AR 条件と IMG 条件で比較したものである。この図から、全ての実験参加者で AR 条件での作業時間が減少していることが分かる。対応あり両側 t 検定の結果、作業時間の平均値が AR 条件で有意に短いことが分かった ($t(3)=4.11, p=.026$)。結果として、作業時間を平均値で約 33% (約 23 秒) 削減できた。

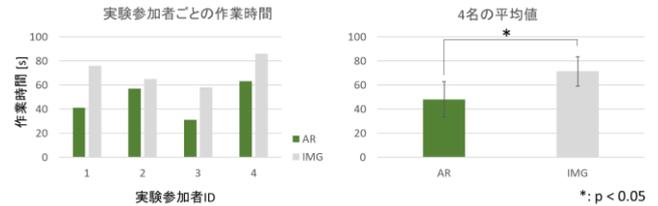


図 9: 各条件での配線点検にかかった作業時間

5. むすび

本研究では、配電盤の計器筐体に対する誤配線を AR 表示する点検支援システムを開発した。開発したシステムは配線の色を元に配線認識を行うが、照明モデルを用いて照明光を推定して色補正を行うことで工場の様々な照明条件に対応可能である。評価の結果、提案した色補正手法でのみ配線の 6 色を識別可能であること、誤配線認識 AR を用いることで画像を用いた点検に比べて有意に点検作業時間が短縮し、約 33% の時間削減が可能なが分かった。今後は、配線データのデータベース化や点検作業の半自動化に向けたトータルソリューションの充実を目指す。

参考文献

- [1] 富永昌治: マルチバンドイメージング技術とビジョン応用, CVIM, vol. 47.SIG5 (CVIM13), pp. 20-34, 2006.
- [2] Gershon, Ron, Allan D. Jepson: The computation of color constant descriptors in chromatic images, Color Research & Application 14.6, pp. 325-334, 1989.
- [3] Barron, Jonathan T., Yun-Ta Tsai: Fast fourier color constancy, IEEE Conference on CVPR, 2017.
- [4] Judd, Deane B., et al: Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature, Josa, vol. 54.8, pp. 1031-1040, 1964.
- [5] 富永昌治: 光と色の計測と表現-コンピュータビジョンの観点から, CVIM, vol. 39, pp. 1-15, 2010.
- [6] 塚田正人, 大田友一: 記憶色に基づく色再現とその高画質化応用, 映像情報メディア学会誌, vol. 60.3, pp. 348-357, 2006.
- [7] Lighting Research Center: LRC Efficacy Calculator, https://www.lrc.rpi.edu/resources/UniversalLumenEfficacyCalc_June2016.xlsx, (Accessed on 28/04/2023)