

NAIST-IS-MT0251120

修士論文

ウェアラブルコンピューティングのための
光源環境推定手法

村岡 俊幸

2004年2月6日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

村岡 俊幸

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
眞鍋 佳嗣 助教授

ウェアラブルコンピューティングのための 光源環境推定手法*

村岡 俊幸

内容梗概

近年、ハードウェアの小型化、軽量化により、コンピュータが気軽に持ち運びできるようになった。この軽量化を推し進めた、常時着用して使用できるウェアラブルコンピュータは、ユーザの状態を常に把握できるため、ユーザの必要とするサービスを状況に応じて提供することで、より高度なサービスを提供することが可能となる。

ウェアラブルコンピュータの特徴を活かしたサービスを実現するためには、ユーザが目にしていない物体がどのようなものであるかを認識する画像認識技術が必要である。画像認識で物体を把握する際に、色情報を用いることは有用であるが、照明状況の変化に敏感なため、扱いが難しい。これまでに取得画像から照明環境を推定する手法も提案されているが、固定環境を仮定しているため、移動環境で用いるウェアラブルコンピューティングには適していない。

本研究では、ユーザの周囲の光源環境を直接カメラで撮影し、光源環境を構築することで、任意地点での照明状況を推定する手法を提案する。本手法により、複数異種を含む光源環境から照明状況を推定することができ、ウェアラブルコンピューティングにおいて、色情報を用いた画像認識の安定性を向上させることが可能であると考えられる。

キーワード

ウェアラブルコンピュータ, 光源環境, 光源色, 色補正

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0251120, 2004年2月6日.

Estimation Method of Light Source Environment for Wearable Computing*

Toshiyuki Muraoka

Abstract

Wearable computer can give the user a new service suited for user's condition. The object recognition is one of the indispensable technology in order to realize new service for wearable computer.

In the object recognition, the color information is one of the important information. However, it is difficult to use color information since color information tends to change with surrounding light source environment. If the light source environment is known, it will become easy to use color information for object recognition. There are some studies for estimating the light source environment. However, since these researches assume fixed environment, they are not suitable for a wearable computer.

This paper proposes the newly light source environment estimation method. This method uses fish-eye camera and takes directly light source environment. Since this method can estimate the lighting condition which consists of different light source types, the method makes it easier to analyze images on wearable computing.

Keywords:

Wearable Computer, Light Source Environment, Light Source Color, Color Correction

*Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0251120, February 6, 2004.

目次

第1章	序論	1
第2章	関連研究	3
2.1	本論文における関連知識の説明	3
2.1.1	光源環境と照明状況	3
2.1.2	光源による演色	5
2.1.3	表色系と色度図	6
2.1.4	色温度	7
2.2	カメラ特性補正と光源環境推定の先行研究	8
2.2.1	カメラ特性の補正	8
2.2.2	光源環境推定	10
2.2.3	まとめ	13
第3章	光源環境推定手法	15
3.1	概要	15
3.2	魚眼カメラで撮影された画像の展開	16
3.3	光源情報の取得	20
3.3.1	光源情報の定義	20
3.3.2	幾何情報の取得	21
3.3.3	光源色情報の取得	23
3.4	光源環境の構築と照明状況推定	27
3.4.1	楕円光源における照明状況計算	27
3.4.2	複数光源による照明状況計算	28
3.4.3	照明状況下での演色計算	29
第4章	評価実験	30
4.1	システム構成と使用機材	30
4.2	光源環境の構築	30
4.2.1	光源画像の展開	32

4.2.2	光源の幾何情報	36
4.2.3	光源の重心	40
4.2.4	光源の形状	41
4.2.5	光源の色情報	44
4.3	照明状況の推定	48
4.4	まとめ	49
第5章	結論	51
	謝辞	52
	参考文献	53

目 次

2.1	光源環境	4
2.2	照明状況	4
2.3	点光源の照度	4
2.4	光源による演色モデル	5
2.5	RGB 等色関数	7
2.6	XYZ 等色関数	7
2.7	xy 色度図における黒体放射軌跡 (赤色)	8
2.8	等色温度線	9
2.9	鏡面球の配列	12
2.10	鏡面球による光源の位置導出	12
3.1	提案手法概要	16
3.2	魚眼レンズの撮像範囲	17
3.3	全周魚眼レンズモデル	17
3.4	魚眼画像の平面展開モデル	18
3.5	平面展開モデル (距離方向)	18
3.6	平面展開モデル (回転方向)	19
3.7	光源画像のヒストグラム	21
3.8	閾値の決定法	22
3.9	慣性主軸	23
3.10	長軸長, 短軸長取得モデル	24
3.11	カメラ分光感度特性	25
3.12	RB 平面におけるサンプル点の凸包	26
3.13	光源色域	26
3.14	画像色域	27
3.15	小片 dL による照明状況	28
4.1	システム構成	30
4.2	魚眼レンズ TS2V114E	31

4.3	光源撮影用カメラ WAT-202D	31
4.4	画像キャプチャデバイス EZMaker	31
4.5	USB2.0 カード WN-B11/CBU2	31
4.6	格子画像	33
4.7	魚眼カメラによる格子画像の撮影画像	34
4.8	魚眼カメラ画像の展開結果	34
4.9	理論値との比較画像	35
4.10	仮想平面の位置	36
4.11	評価用光源環境配置図	37
4.12	光源画像展開結果	39
4.13	カメラ感度特性	44
4.14	光源色域	45
4.15	画像色域とサンプル点	46
4.16	カメラ特性依存の光源色の傾き	47
4.17	TOPCON 社 SR-3	49

表 目 次

4.1	使用機材	31
4.2	魚眼レンズの特性	32
4.3	$g(\theta)$ の近似多項式における次数と係数	33
4.4	画像中心までの距離による理論値と結果の誤差	35
4.5	評価用光源環境理論値	38
4.6	重心座標の推定結果と理論値との誤差	40
4.7	重心の画像中心までの距離と推定値と理論値の誤差	41
4.8	面積, 主軸角, 長軸長, 短軸長の推定結果	42
4.9	結果と理論値の誤差	43
4.10	光源色の推定値および理論値との誤差	45
4.11	手法変更後の光源色の推定値および理論値との誤差	48
4.12	光源環境 3 における照明状況の実測値と推定値	49

第1章 序論

近年、ハードウェアの小型化、軽量化により、コンピュータの持ち運びが気軽に出来るようになってきた。PDA(Personal Digital Assistant) や携帯電話はその代表例であり、従来の設置型のコンピュータでは不可能であったサービスが利用できるようになった。このような小型化、軽量化をさらに推し進めたのがウェアラブルコンピュータである。ウェアラブルコンピュータとは文字通り“着る”コンピュータであり、常時起動している状態で、ユーザの要求に応じ、時と場所を選ばずに処理できるコンピュータである [1]。ユーザの状態を常に把握することが可能となるウェアラブルコンピュータを用いることで、ユーザが意識しなくても、ユーザの必要とするサービスを状況に応じて提供することも可能となる。例えば、Microvision, Inc. の Nomad Augmented Vision System[2] では、HMD(Head Mounted Display) を通して見える対象に作業手順や注意事項などの情報を重畳して提示することで、整備の補助を行っている。また、我々の生活に密着したサービス、例えば、現在注目を集めている歩行者 ITS(Intelligent Transport Systems) の分野などにおいても、ウェアラブルコンピュータを用いることにより、ユーザの位置や向いている方向に応じた道案内やランドマークの情報を重畳表示するなどの、より高度なサービスが実現できると考えられる。このような、ウェアラブルコンピュータの特徴を生かしたサービスを実現するためには、ユーザが目にしていてる物体が何であることをコンピュータが把握するための、物体認識技術が必要である。例えば、道案内サービスであれば、ユーザの見ている物体がランドマークかどうかを認識できることが重要となる。

画像認識技術により物体を把握する場合、色情報を用いることは有用である。しかし、色情報は照明状況に敏感で、周囲の環境を固定するなどの工夫が必要となる

ため、扱いが難しい。また、現実の光源環境は、色の異なる光源の混在や、数、位置なども場所により異なる複雑なもので、照明状況は変化しやすい。これまでも画像から周囲の環境を求めるために、光源色推定や色の恒常性に関する研究 [3-5] が数多くなされている。しかし、多くの手法が固定環境であったり単一の光源で照明されていると仮定しているため、現実の光源環境の下で用いられるウェアラブルコンピューティング分野へ適応することは難しい。

そこで本研究では、光源を直接撮影することにより、システム周辺の複数異種光源の色、形状、位置などの光源環境を推定する手法を提案する。併せて、ユーザ周辺の照明状況を推定する手法についても提案する。本研究により、ウェアラブルコンピューティング分野のみならず、物体認識処理全般においても、色情報を用いた安定的な物体認識が可能となり、認識率向上の一助となることが期待される。

本論文では、第2章において本論文で使用する用語の説明と、光源撮影用のカメラ特性の補正および光源環境の構築に関する先行研究を紹介する。第3章ではウェアラブルコンピューティングのための光源環境推定手法の提案と、その実装手法を述べる。第4章で本手法についての評価実験とその考察を述べる。最後に第5章で結論を述べ、本論文をまとめる。

第2章 関連研究

本章では、本論文における関連知識の説明と、カメラ特性の補正及び光源環境の推定における先行研究について述べる。

2.1 本論文における関連知識の説明

2.1.1 光源環境と照明状況

本論文では、光源環境と照明状況を別の意味を持つ用語として定義する。光源環境とは、ある地点を基準とした各光源の位置、光量、色などの情報を総合したもののことであり (図 2.1)、照明状況とは、任意の位置を現在の光源環境が、どのように照明するかを示す色情報のことである (図 2.2)。光源環境は、照明する側の情報もしくは照明状況を計算するための材料を表し、照明状況は、照明される側の情報もしくは光源環境から計算した演色効果を表すものとして定義する。

光源環境からの照明状況導出

光源環境から照明状況を導出する手法 [6] について以下に示す。

まず、点光源 L による点 P の水平面照度 E_k の導出を考える (図 2.3)。

照度は距離の自乗に反比例するので、点 P における法線照度 E_n は

$$E_n = \frac{I(\theta)}{l^2} \quad (2.1)$$

と表せる。よって、水平照度 E_k は入射角の余弦の法則より

$$E_k = E_n \cos \theta \quad (2.2)$$

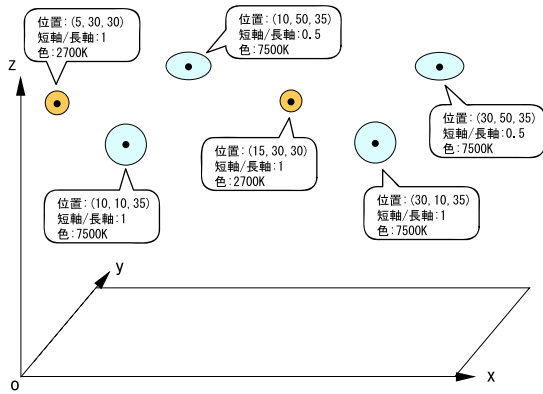


图 2.1 光源環境

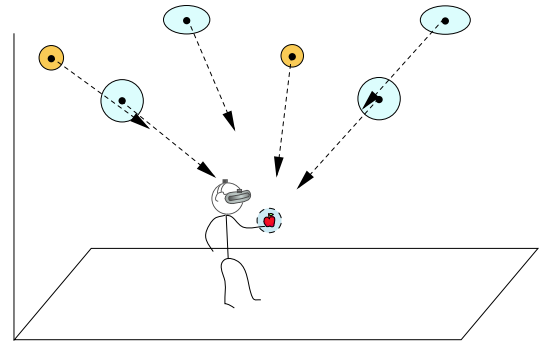


图 2.2 照明狀況

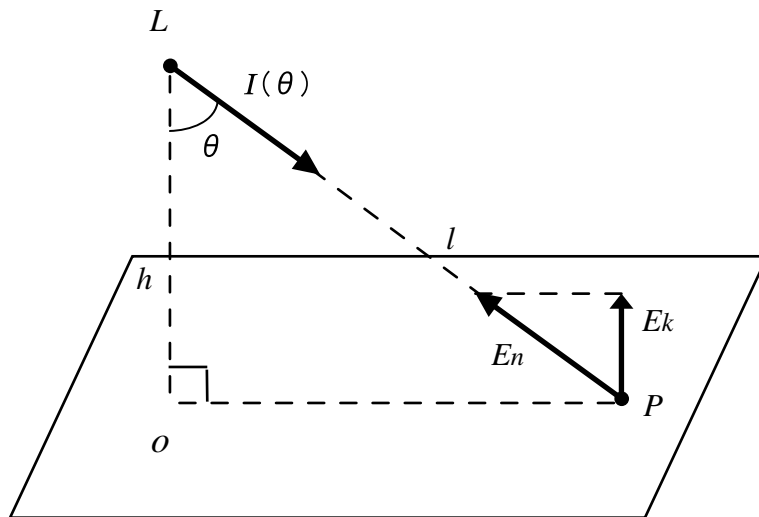


图 2.3 点光源の照度

と表せる。また,

$$\cos \theta = \frac{h}{l}, \quad l^2 = \frac{h^2}{\cos^2 \theta}$$

であるので (2.2) 式は,

$$E_k = \frac{I(\theta) \sin \theta \cos^2 \theta}{h^2} \quad (2.3)$$

となる。これを光源環境内にある全ての光源について解けば、任意の点 P の照明状況を導出することができる。

2.1.2 光源による演色

演色とは、光源が物体の色の見え方に及ぼす効果のことである。この演色効果を除去し物体色、もしくは基準となる光源により演色された状態へ変換することが色再現の目的である。以下に、演色の起こる原理をモデル図 (図 2.4) を用いて説明する。

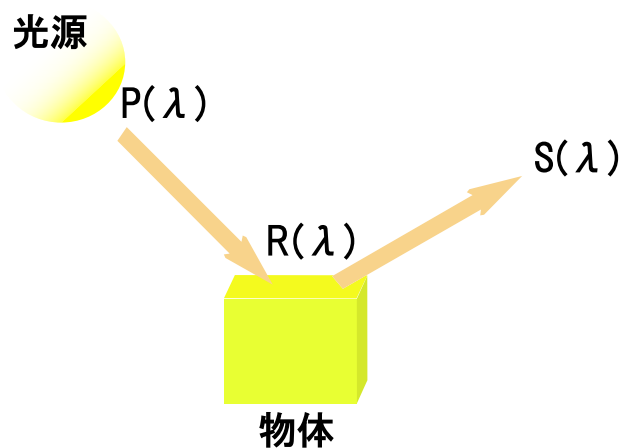


図 2.4 光源による演色モデル

一般に可視光の特性は、波長ごとの光の強さで表現される。光源からの放射の分光分布を $P(\lambda)$ 、光源光が反射する物体の分光反射率を $R(\lambda)$ とすると、物体からの反射光の分光分布 $S(\lambda)$ は、

$$S(\lambda) = \int_{\lambda} P(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

と表せる。(2.4)式から物体の分光反射率が一定であっても、光源からの分光分布 $P(\lambda)$ が変化すると、反射光 $S(\lambda)$ は変化することが分かる。これが光源による演色である。

2.1.3 表色系と色度図

表色系とは、適切に選ばれた三つの原色の加法混色で表す体系である [7]。代表的なものとして RGB 表色系, XYZ 表色系などがある。また、各色の輝度値の和と、それぞれの値との比で表したものを色度座標といい、値の比の和が 1 になることから、三色の比のうちの任意の二色で色度を表すことができる。この二色の比を軸として平面に投影したものを色度図という。

分光分布から輝度値への変換

物体からの反射光の分光分布 $S(\lambda)$ をある表色系の輝度値 M_i ($i = 1, 2, 3$) へ変換する式は

$$M_i = k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{m}_i(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

と表すことができる。ここで、 k は正規化のための定数である。また、 \bar{m}_i は等色関数と呼ばれる表色系に固有の変換関数である。

XYZ 表色系

一般に用いられている RGB 表色系は等色関数に負の部分があるため、変換される分光分布によっては輝度値が負になることがある (図 2.5)。そこで、等色関数がすべて正になるように変換を施したものが XYZ 表色系である [8,9]。XYZ 表色系における等色関数は $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ と記述する (図 2.6)。

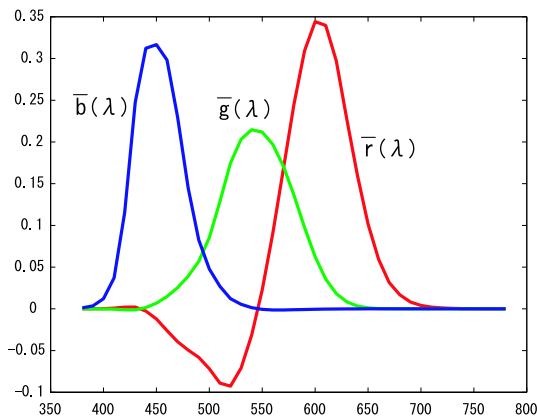


図 2.5 RGB 等色関数

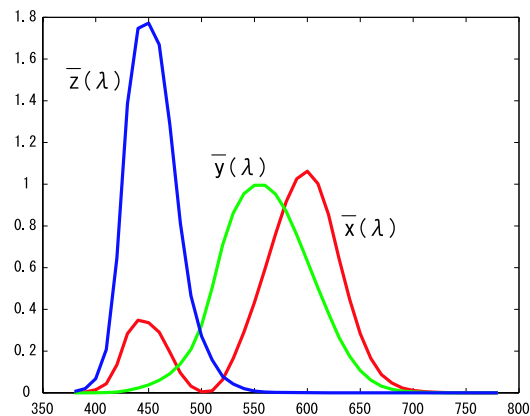


図 2.6 XYZ 等色関数

2.1.4 色温度

色温度とは、対象となる光の色と、色度が等しい光を放射するときの黒体の温度と定義され [7], 主に光源の色みを表す指標として用いられている. 黒体はプランクの放射体とも呼ばれ, 入射する光を完全に吸収する理想的な熱放射体として定義される [7]. 黒体放射の分光分布 $L_{e\lambda}(\lambda, T)$ と色温度 T の関係は, h をプランク定数, c_0 を真空中の光速, k をボルツマン定数とすると,

$$\begin{aligned}
 L_{e\lambda}(\lambda, T) &= \frac{\partial L_{e\lambda}(\lambda, T)}{\partial \lambda} \\
 &= \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

ただし $c_1 = 2\pi h c_0^2$ $c_2 = \frac{h c_0}{k}$

と表される. ある表色系における色温度 T と輝度値 M_{Ti} ($i = 1, 2, 3$) の関係式は, k を正規化のための定数, \bar{m}_i を等色関数とすると,

$$M_{Ti} = k \int_{\lambda} L_{e\lambda}(\lambda, T) \bar{m}_i(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

と表すことができる. また, 色温度を色度図にマッピングした点の集合を黒体放射軌跡と呼ぶ. 例として, xy 色度図における黒体放射軌跡を図 2.7 に赤線として図示する.

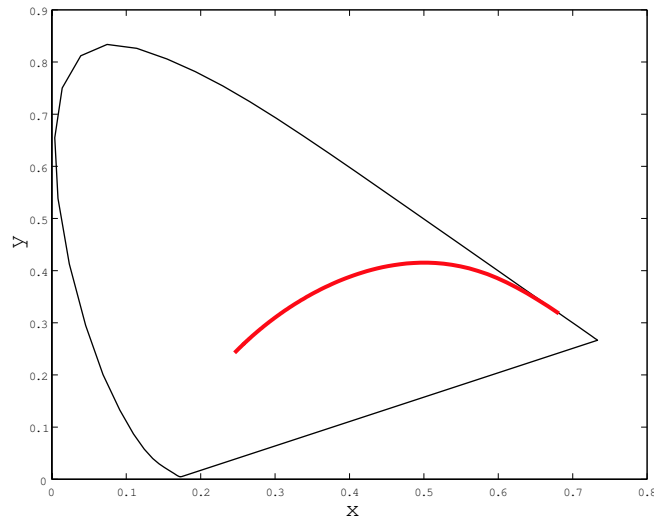


図 2.7 xy 色度図における黒体放射軌跡 (赤色)

相関色温度

色温度は光源の色味を表す指標として用いられているが、一般の光源は黒体放射軌跡上に必ずしもマッピングされるとは限らない。そこで、黒体放射軌跡から一定の距離にある色度を等色温度線で近似する相関色温度を用いる (図 2.8)。相関色温度の導出手法は JIS Z8725 に記載されている [10]。

2.2 カメラ特性補正と光源環境推定の先行研究

本節では、カメラ特性の補正と光源環境推定における先行研究を紹介し、ウェアラブルコンピューティングにおける光源環境推定手法に必要な条件についてまとめる。

2.2.1 カメラ特性の補正

現在、一般に販売されているカメラは、撮影された画像に内部処理を施してから出力する。また、カメラにより受光部の特性が異なるため、カメラの種類によっ

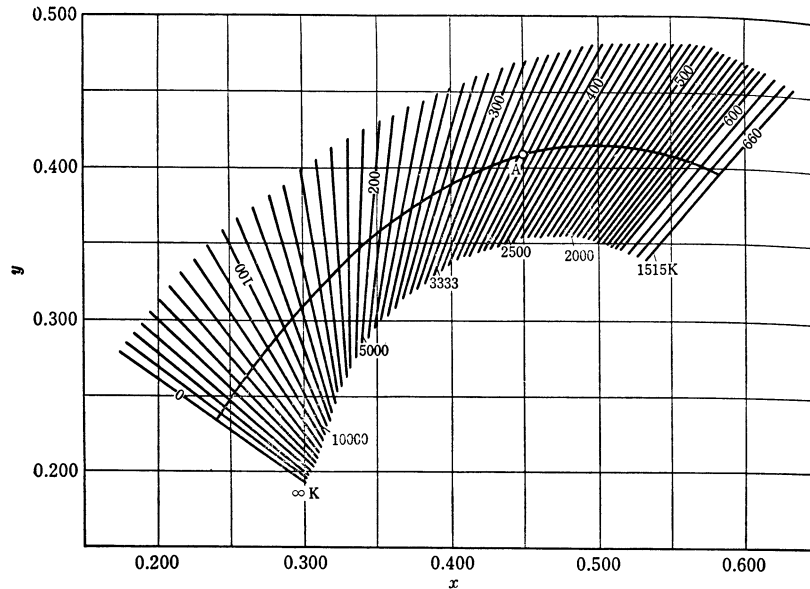


図 2.8 等色温度線 [8]

て表現できる色域が異なる。これらのカメラ依存の性質をカメラ特性といい、カメラ特性を補正し正確な色を再現する研究が行われている。

カメラの感度特性は、波長ごとの受光部の感度として表され、(2.5)式における等色関数 $\bar{m}_i(\lambda)$ と同様に扱うことができる。従って、カメラ感度特性と等色関数の比によって取得画像の色情報を補正することが可能である。また、コンピュータ上で扱う場合、可視波長域を離散化しそれぞれの波長に対する感度として扱う。

ある表色系の輝度値 $M_i(\lambda)$ は、物体の反射光を $S(\lambda)$ 、カメラ感度関数を \bar{m}_{ci} とすると、(2.5)式より

$$M_i(\lambda) = \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{m}_{ci} \quad (2.8)$$

と変換でる。また、 \bar{m}_{ci} を i についてまとめることで

$$\mathbf{M} = \mathbf{S}\mathbf{m}_c \quad (2.9)$$

と行列で表現できる。従って、カメラ感度特性を求めることは、変換行列 \mathbf{m}_c を導出することに等しい。しかし、変換は非線形変換であるため、変換行列を求めることは困難である。このカメラ感度特性の非線形変換行列を求める研究としては、

Barnard らのように多項式を用いて導出する手法がある [11]. この手法は, カメラ感度特性を, 非線形項を含む多項式で近似する手法である. まず, 教師データとしてカラーチャートなどの基準となる色を幾つか用意し, その色をカメラで撮影した輝度値 M_i とその分光分布 S_i を計測する. これらの教師データを (2.9) 式に代入し, 最小自乗法で m_c を求める. その際, M_i の代わりに成分同士を非線形項の形に合わせて, 掛け合わせた要素を追加した M_{ei} を用いて導出する. また, Cardei らは非線形変換としてニューラルネットを用いて変換する手法を提案した [12]. これらの手法に共通する問題点として, 教師データの選択と, カメラ感度特性の形状の制限がある. 教師データの選択法としては, Hong らの研究が挙げられる [13]. これは, 非線形変換として多項式近似を用いる際の, 多項式の項数による誤差変化や, 教師データとして適している条件を調査している. 調査対象は多項式変換ではあるが, ニューラルネットを用いる変換においても, 適切な教師データの選択手法として役立つと考えられる. また, Barnard らは, カメラ感度は負の値をとらない, 多くのピークを持たない, などの制限を用いて感度関数の誤差を収束する手法を提案した [11].

いずれの研究においても, カメラ特性の補正には多くの計算量が必要であり, リアルタイムで処理を行う際に大きな障害となる. 画像全体でなく必要な部分のみ変換をするなどの対策が必要である.

2.2.2 光源環境推定

光源環境の推定に関する研究は, 光源情報の全て (光源環境推定) か一部 (光源色推定) かの差はあるが, 様々な分野で研究がなされている. 本節では, MR (Mixed Reality) 分野における光源環境推定と画像認識分野における光源色推定について紹介する.

MR 分野における光源環境推定

MR 分野での研究の一つとして, Image-based rendering 技術を応用した, 仮想物体を現実空間の光源環境で照明する研究が行われている. この分野の研究で一

番多く用いられている手法は、仮想物体を重畳する周囲の光源環境をあらかじめ取得しておく手法である。

Yuらは、室内の光源を含めた全ての現実空間の位置情報をあらかじめ与えておき、カメラで撮影した画像から取得した光源情報を用いて、仮想物体を現実空間に重畳する手法を提案した [14]。この手法は、あらかじめ現実空間の情報が与えられているため、光源色の推定も容易で、幾つかの光源を変化させても追従可能である利点がある。しかし、この手法では、事前に正確な空間情報を取得していなければならぬため、未知の空間での利用は困難である。

また、Debevecらは、仮想物体を重畳する位置を固定し、その地点で取得した全周囲のハイダイナミックレンジ画像をテクスチャとして仮想物体に貼り付けることにより、仮想物体を照明する手法を提案した [15]。これは、厳密には光源環境の構築とはいえないが、間接光源やハイダイナミックレンジ画像を用いたことでハイライト表現が可能になるなど、光源情報の取得法として注目すべき点が多い。しかし、仮想物体を重畳する位置をあらかじめ固定しなければならず、光源が変化した場合に周辺環境を再び取得しなければならないという問題がある。

仮想物体の移動をある程度の範囲内で許容した手法としては、Ungerらが提案した手法がある [16]。この手法では、仮想物体を重畳する場所に、図 2.9 のような鏡面球の配列を設置し、個々の鏡面球に写りこんだ光源の画像から光源環境を構築している。光源が変化した場合は、周辺環境の再取得が必要であるが、鏡面球の配列によってキャリブレーションを行った範囲内であれば仮想物体を自由に移動することが可能である。また、図 2.10 のように任意の鏡面球を二つ選ぶことで、それぞれに写り込む光源の位置の変化から実際の光源の位置を計算できるという利点もある。

光源の位置を計算する研究としては、鏡面球の代わりに魚眼カメラを用いる手法もある。佐藤らは、鏡面球の列の代わりに、仮想物体を重畳する位置にキャリブレーションボードと魚眼カメラを二つ設置して光源位置を取得する手法を提案した [17]。これは、魚眼カメラを用いてステレオ画像を取得し、光源位置を計算する手法であり、鏡面球より広範囲の光源環境が構築できるという利点がある。

あらかじめ光源環境を取得しない手法としては、石川らが提案した鏡面球付き

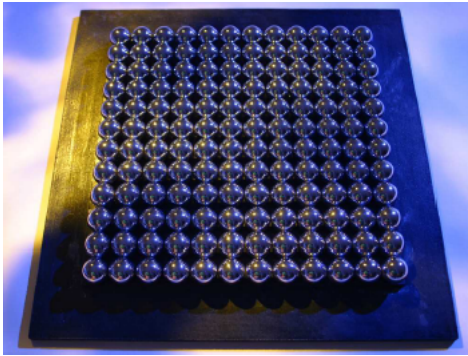


図 2.9 鏡面球の配列 [16]

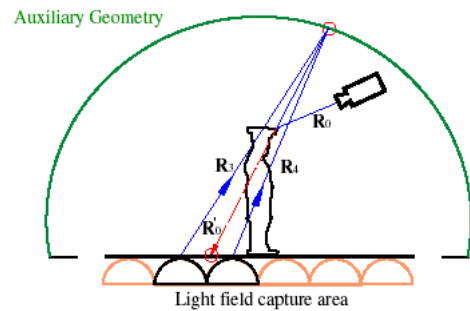


図 2.10 鏡面球による光源の位置導出 [16]

のマーカを用いた仮想物体の重畳手法がある [18]. この手法では, 仮想物体を重畳する場所にマーカと共に鏡面球を設置し, その鏡面球の写りこみを光源環境として照明状況を推定する. 仮想物体の位置を示すマーカと, 仮想物体の位置を基準とした光源環境を取得する鏡面球がセットになっているため, 仮想物体の自由な移動が可能となっている.

ウェアラブルコンピューティングにおいて光源環境を推定するためには, 以下の条件が必要である.

- 事前に何らかの予備知識 (使用する空間の形状など) を必要としない
- 光源環境推定に関してユーザの介在を必要としない

しかし, 本節で挙げた従来手法の多くが事前に光源環境を推定し, それをもとに照明状況を計算している. また, 光源環境を推定したい場所にキャリブレーション用の装置を設置しなければならず, ユーザの介在が必要である. 従って, MR 分野における従来手法をウェアラブルコンピューティングへ用いるのは困難である.

画像処理分野における光源色推定

画像認識分野における光源色推定手法の多くは, 物体からの反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分から構成される二色性反射モデルを基本に, 拡散反射成分が

ら光源色を推定している。

Finlayson らは、鏡面成分が強く出ているハイライト部分を除いた部分の輝度値を色度図にマッピングし、その点群の慣性主軸と黒体放射軌跡から色温度を推定する手法を提案した [4]。この手法の利点は、画像内の物体から幾つかの点をマッピングするだけで良く、処理が簡便という点である。しかし、サンプリングする部分の物体表面ができるだけ平面で一様であることが条件となっている。

撮影されている物体の反射特性も求める手法としては、原らの手法がある [19]。この手法では、まず、鏡面反射のハイライトから光源の方向を、拡散反射成分の明るさとハイライトのピーク位置から光源までの距離を求める。次に、推定結果を用いて光源色を求める処理を反復し、値が収束するまで繰り返すことで光源の色と方向を求める。この手法の利点は、光源色だけでなく、光源の位置と撮影されている物体の反射特性も推定できる点である。しかし、光源は単一であることを仮定している上、値の収束まで時間がかかるという問題点がある。

撮影するカメラの特性を利用して光源色を求める手法として、Finlayson らはカメラの分光特性から、一定の色温度ごとにカメラで表現できる色域をあらかじめ計算しておき、画像からサンプリングした点との相関で光源色を推定する相関法を提案した [20]。また、富永らは、Finlayson らの相関法の相関計算手法を変更することにより、精度向上と光量の推定を可能としたセンサ相関法を提案した [3, 21]。

これらの手法に共通しているのは、大きな前処理を必要とせず、推定対象の画像のみで処理を行う点で、ウェアラブルコンピューティングに用いるのには都合が良い。しかし、これらの手法は基本的に照明状況の推定手法であり、光源を単一であると仮定することにより光源色と近似できる。複数異種の光源では画像全体での照明状況を取得しているに過ぎず、個々の光源色を推定することは出来ない。

2.2.3 まとめ

ウェアラブルコンピューティングのように、ユーザの移動を前提として光源環境を推定する場合、先行研究では以下の点が問題となる。

- 固定環境での光源環境推定

- 光源環境推定に前処理が必要
- ユーザの介在が必要
- 画像全体の照明状況のみ推定可能
- 単一光源環境のみ推定可能

しかし、従来の研究では以上の5つの問題点を同時に解決できる光源環境推定手法は存在しない。次章において、これらの問題点を解決する、ウェアラブルコンピューティングに適した手法を提案する。

第3章 光源環境推定手法

本章では, ウェアラブルコンピューティングに適した光源環境推定手法を提案し, 実装手法について述べる.

3.1 概要

ウェアラブルコンピューティングのように, ユーザの移動を前提とした光源環境の推定のためには, 以下に挙げる五つ条件を満たす必要がある.

- 光源環境推定を行う空間に関する予備知識を必要としない
- 光源環境構築時にユーザの介在を必要としない
- 複数, 異種の光源の混在する光源環境が推定可能
- ユーザの移動による光源環境の変化への即応性
- ユーザに負担のかからない装備

本研究では, 光源情報を推定対象画像から間接的に求めるのではなく [3-5, 19, 22], カメラなどで直接光源を撮影することで, ウェアラブルコンピューティングで用いるための条件を満たす光源環境推定手法を提案する.

提案手法の概要を図 3.1 に示す. 本手法は図 3.1 に示すように, 光源環境を利用したサービスを行うシステムに付属する形で用いることを想定している.

本手法では, まず, 魚眼カメラを用いて光源を撮影する. ここで, 光源はカメラの高さより高い位置にのみ存在すると仮定すると, 魚眼カメラを用いて天井方向

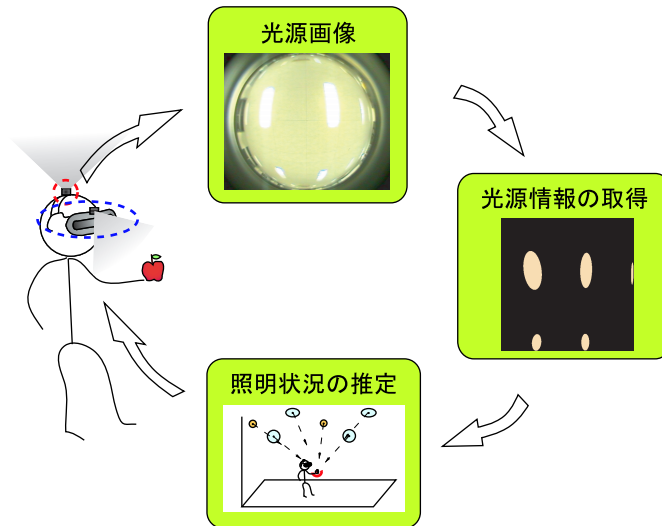


図 3.1 提案手法概要

を撮影することにより、一度の撮影で全ての光源を取得できる。次に、取得画像を平面に展開し、個々の光源のカメラからの角度、形状、色を取得する。また、カメラの位置、角度情報を取得することで、半球の光源環境が構築できる。最後に取得した光源情報から任意地点の照明状況を推定する。

3.2 魚眼カメラで撮影された画像の展開

魚眼レンズは 180° 前後の画角を持つレンズであり、対角魚眼レンズと全周魚眼レンズの二種類に分けられる。画角を 180° とすると、図 3.2 に示すように、対角魚眼レンズは出力画像の対角が 180° となり、全周魚眼レンズは出力画像に直径が 180° の円形の画像を出力する。本手法では広範囲を撮影できる全周魚眼レンズを用いる。

全周魚眼レンズの撮像モデルは図 3.3 のように、半球面に写りこんだ景色を撮像面に投影したものである。従って、出力画像は半球面の中心からの角度情報を持った画像となる。本手法では撮影した光源画像の形状特徴を抽出するために、仮想平面に展開した画像を用いて処理を行う。

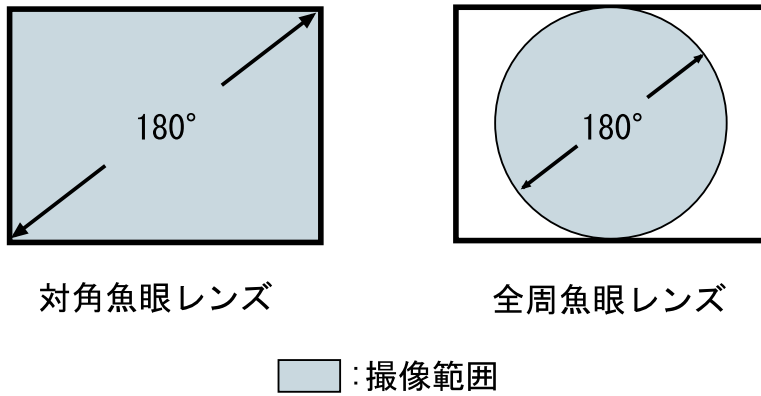


図 3.2 魚眼レンズの撮影範囲

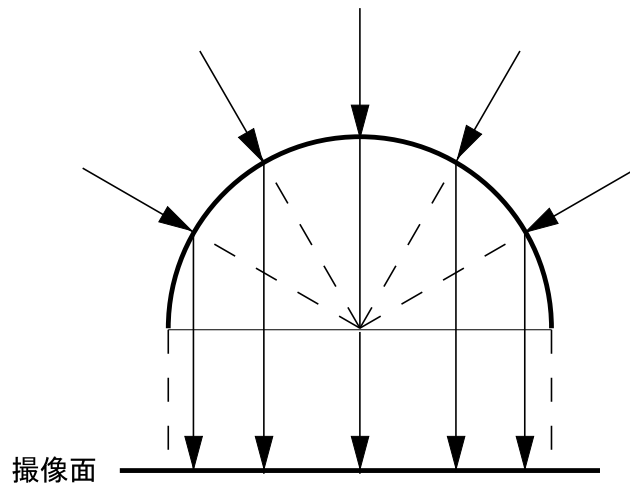


図 3.3 全周魚眼レンズモデル

仮想平面は、図 3.4 のように半球面の中心を原点として、高さ l に置くものとする。

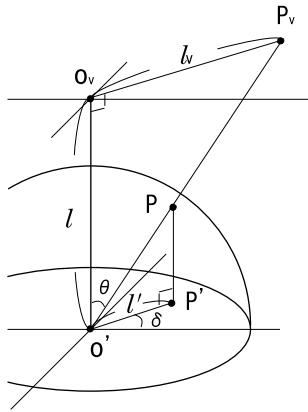


図 3.4 魚眼画像の平面展開モデル

以下では, 展開画像上の座標 $P_v(x_v, y_v)$ に対応する光源画像上の座標 $P'(x', y')$ を求める手法について説明する.

図 3.4 のように半球面の中心から見込む角度を θ , x 軸からの回転角度を δ , 半球面の半径を R , 展開画像の原点 O_v から P_v までの距離を l_v , 光源画像の原点 O' から P' までの距離を l' とおく. まず, 展開画像上の距離 l_v から光源画像上の距離 l' を求める (図 3.5).

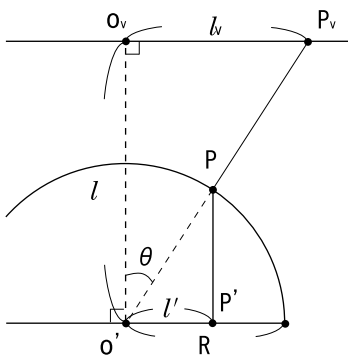


図 3.5 平面展開モデル (距離方向)

x_v は,

$$l_v = l \cdot \tan \theta \quad (3.1)$$

と表せる. また, l' は

$$l' = \sin \theta \quad (3.2)$$

と表せる. よって, (3.1), (3.2) 式より, l_v と l' の関係式は

$$l' = \frac{R \cos \theta}{l} l_v \quad (3.3)$$

と表せる. しかし, 実際の魚眼レンズでは, 個々のレンズ特性により, 撮影画像が理想的な投影図より歪むため, (3.3) 式をそのまま用いることは出来ない. そこで, l' と θ の関係式 $g(\theta)$ を用意して θ から l' を求める. 従って, 実際の l_v と l' の関係式は

$$l' = g(\tan^{-1}(\frac{l_v}{l})) \quad (3.4)$$

と表せる.

次に, 光源画像上の距離 l' から $P'(x', y')$ を求める (図 3.6).

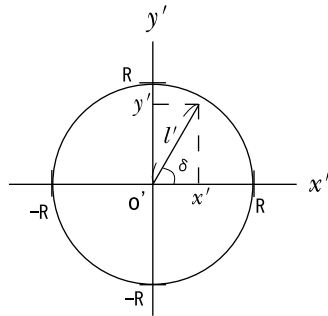


図 3.6 平面展開モデル (回転方向)

$P'(x', y')$ と l' の関係式は

$$\begin{cases} x' = l' \cdot \cos \delta \\ y' = l' \cdot \sin \delta \end{cases} \quad (3.5)$$

と表せる。ここで,

$$l_v = \sqrt{x_v^2 + y_v^2} \quad (3.6)$$

と表せるので, 仮想平面上の点 $P_v(x_v, y_v)$ から光源画像上の点 $P'(x', y')$ を求める式は,

$$\begin{cases} x' = g(\tan^{-1}(\frac{\sqrt{x_v^2 + y_v^2}}{l})) \cdot \cos \delta \\ y' = g(\tan^{-1}(\frac{\sqrt{x_v^2 + y_v^2}}{l})) \cdot \sin \delta \end{cases} \quad (3.7)$$

と表せる。

3.3 光源情報の取得

本節では光源環境を構築するために必要な光源情報を挙げ, その具体的な取得法について説明する。

3.3.1 光源情報の定義

実際の光源を推定するためには, 光源の形状と光の特性を取得する必要がある。本手法では光源情報の簡略化を計るため, 光源形状を全て楕円平面に近似し, 配光性が一様で光量が一定である光源とする。よって, 光源に関して必要な情報は以下の四つである。

1. 重心位置
2. 慣性主軸
3. 長軸長, 短軸長
4. 光源色

以上の情報の1~3を幾何情報として先に求め, それを元に4を求める。なお, 情報取得には3.2節において, 仮想平面に展開した光源画像を用いる。

3.3.2 幾何情報の取得

本節では、まず前処理である、光源画像の二値化手法を説明し、その後、個々の光源の幾何情報の取得法について説明する。

光源画像の二値化

一般に、光源を撮影した場合、輝度値のヒストグラムは図 3.7 に示されるように、最大輝度から輝度値が小さくなるにつれ急激にヒストグラム値が減少する形となる。

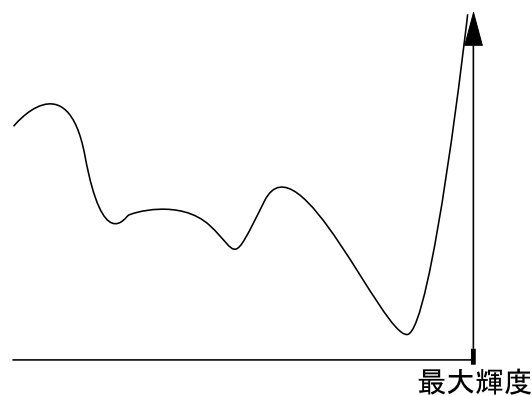


図 3.7 光源画像のヒストグラム

また、光源部分とその他の部分には輝度値に差があるので、そのヒストグラム値は2つの部分の間で一度極小となると考えられる。そこで、最大輝度からヒストグラム値を見ていき、初めて極小となる輝度値を閾値として二値化を行う(図 3.8)。

この二値化処理の後、光源部分に対してラベリング処理を行う。この同一ラベル部分を一つの光源とみなし、その幾何形状を光源の形状とする。

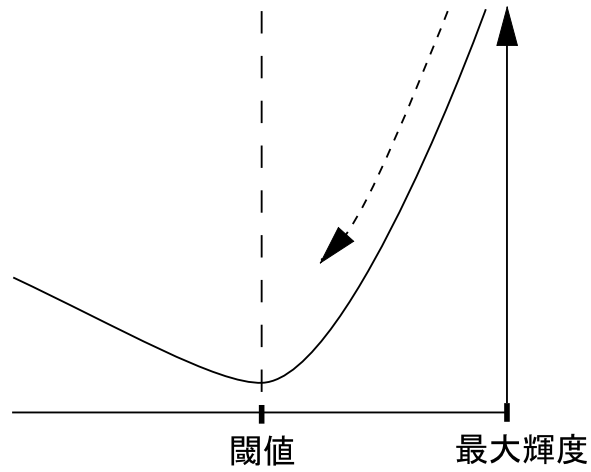
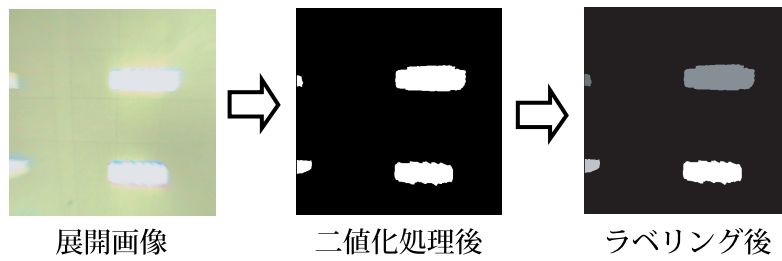


図 3.8 閾値の決定法



重心位置の取得

個々の光源について重心位置を計算する. 画像 $f(m, n)$ における座標 (m, n) 周りの $(p + q)$ 次のモーメント \mathcal{M}_{pq} は

$$\mathcal{M}_{pq} = \sum_m \sum_n m^p n^q f(m, n) \quad (3.8)$$

と表せる. 従って, 重心座標 $G(m_G, n_G)$ は

$$m_G = \frac{\mathcal{M}_{10}}{\mathcal{M}_{00}}, n_G = \frac{\mathcal{M}_{01}}{\mathcal{M}_{00}} \quad (3.9)$$

と表せる.

慣性主軸の取得

個々の光源における慣性主軸を取得する。画像 $f(m, n)$ における重心周りのモーメント M_{pq} は

$$M_{pq} = \sum_m \sum_n (m - m_G)^p (n - n_G)^q f(m, n) \quad (3.10)$$

と表せる。従って、重心における慣性主軸の傾き θ は

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (3.11)$$

と表せる (図 3.9).

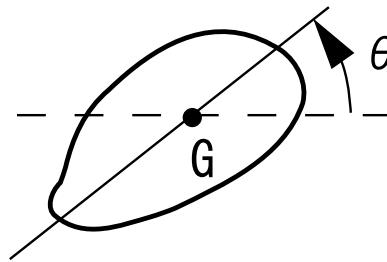


図 3.9 慣性主軸

長軸長, 短軸長の取得

慣性主軸から長軸長 (主軸方向の長さ) と短軸長 (主軸と直交する方向の長さ) を求める。図 3.10 のように、重心を原点として光源部分を $-\theta$ 回転させる。主軸方向成分の長さを長軸長, 主軸と直交する軸における成分の長さを短軸長とする。

3.3.3 光源色情報の取得

本節では、まず光源色推定手法の概略を示し、次に実装に必要な色温度ごとのカメラの表色範囲を求める手法と、それをを用いた光源色推定手順について説明する。

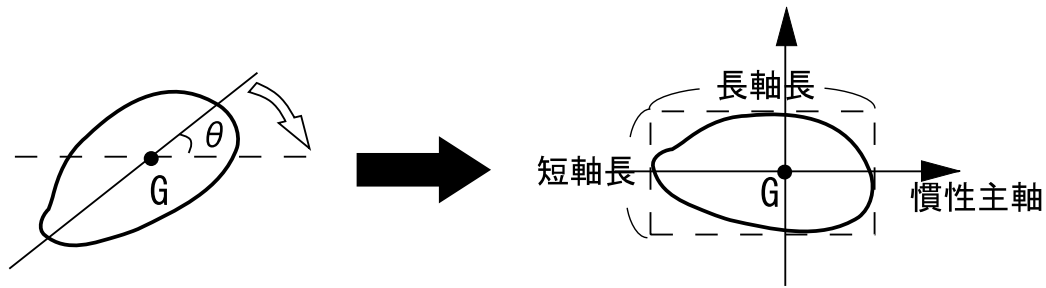


図 3.10 長軸長, 短軸長取得モデル

光源色推定手法

光源色推定には富永らのセンサ相関法を用いる [3, 21]. この手法は, Finlayson らの相関法 [20, 22] を応用したもので, 照明状況推定対象となる画像を撮影したカメラの特性を利用して, 照明状況を求める手法である.

センサ相関法における照明状況の推定では, まず始めに, 色温度ごとにカメラが出力できる表色領域 (光源色域) を計算する. 光源色域を求めるには, 幾つかの物体の表面分光反射率の集合とカメラ感度特性が必要となる. 次に, 取得した画像の色域 (画像色域) を求める. 最後に光源色域と画像色域の相関を画像色域のスケールリングを幾つか変更して取得する. この相関のうち最も高い相関を示した色温度が画像を照明している光源色となる.

この手法は推定対象画像全体の照明状況を推定するものであり, 光源画像にそのまま用いることは出来ない. しかし, ある光源の周辺はその光源のみに照明されていると仮定することで, 個々の光源周辺のみを対象とした光源色が推定可能である. 以下では, 具体的な実装手法について詳述する.

光源色域の取得

光源色域は, 色温度ごとにカメラが出力できる表色範囲と定義され [21], 幾つかの物体の表面分光反射率の集合とカメラの分光感度特性から求められる.

本手法では, 物体の表面分光反射率は V_{rhel} らの分光反射率を用いる [23]. カメラ特性の導出には Finlayson らの手法を用いる [24, 25]. この手法は, カメラの感度

関数を制限を加えた多項式とし、最小自乗法を用いて近似する。例として、Nikon D1X のカメラ感度特性を図 3.11 に示す。

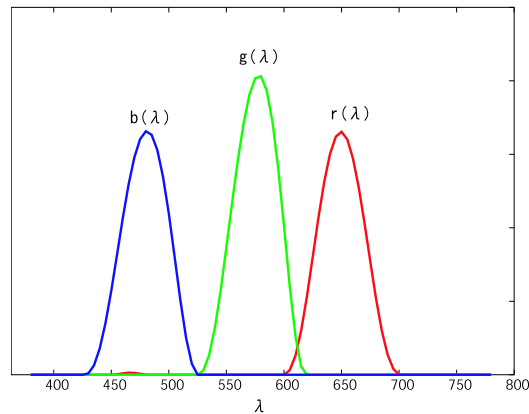


図 3.11 カメラ分光感度特性

表面分光反射率 $S(\lambda)$ とカメラ感度特性 $M_c(\lambda)$ を用いて、色温度 T における光源色域を求める。本手法では、Finlayson らの手法 [26] を用いて、RGB 表色系における光源色域を求める。まず、 $S(\lambda)$ と $M_c(\lambda)$ からカメラ出力を計算する。カメラ出力値は (2.4), (2.5), (2.6) 式より

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \int_{\lambda} S(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda, T) M_c(\lambda) d\lambda \quad (3.12)$$

と表せる。次に、カメラ出力を RB 平面へ投影する。全サンプルのカメラ出力を包含する凸包が、色温度 T における光源色域となる (図 3.12)。これを幾つかの色温度に対して適応し、全体の光源色域とする (図 3.13)。

光源画像からの光源色推定

本手法では、光源画像内の光源部分が複数の場合は、個々の光源部分に対して処理を行う。

まず、光源部分内で輝度値が飽和していない部分をサンプル点とし、画像色域

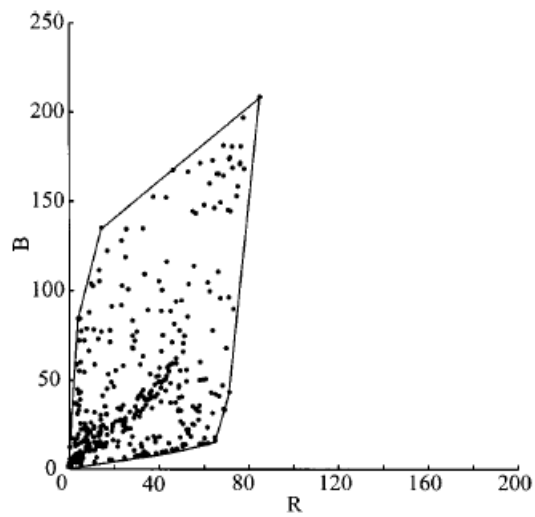


図 3.12 RB 平面におけるサンプル点の凸包

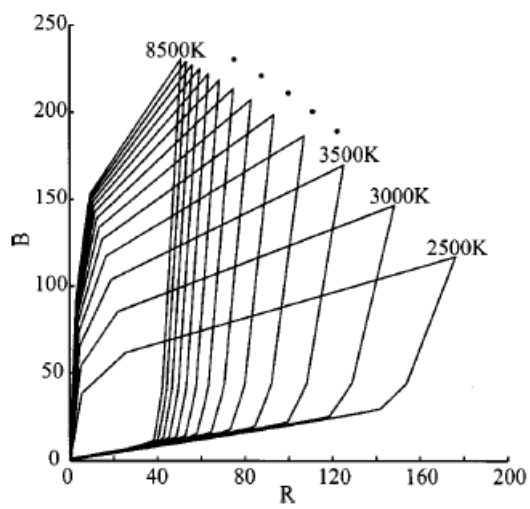


図 3.13 光源色域

を求める。次に、サンプル点を RB 平面へマッピングする。全サンプル点の凸包が画像色域となる (図 3.14 の赤線)。次に、光源色域と画像色域から相関値を求める。

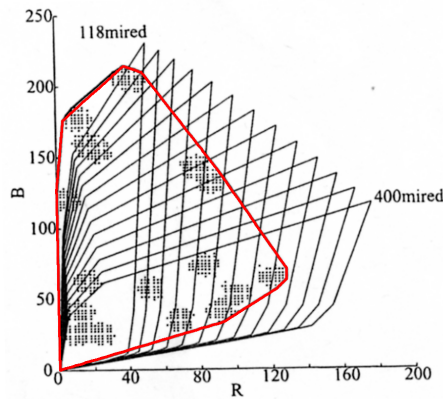


図 3.14 画像色域

色温度 T_i における光源色域と画像色域の相関値 r_i は、画像色域の面積を A_I 、色温度 T_i における光源色域の面積を A_i 、画像色域と光源色域が重なる面積を A_{Ii} とおくと、

$$r_i = \frac{A_{Ii}}{\sqrt{A_I A_i}} \quad (3.13)$$

となる。 r_i を対象となる全ての色温度について求め、最も相関が高い色温度が光源色となる。

3.4 光源環境の構築と照明状況推定

本節では、前節で推定した光源情報からユーザ周辺の照明状況を計算する手法について説明する。

3.4.1 楕円光源における照明状況計算

半球面の中心を原点とする座標系上のある地点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ における照明状況を求める。光源 L_j による照明状況は、光源 L_j を小片 dL の集合とみなし、小片 dL

による照度の合計として計算される。仮想平面の高さを v , 小片 dL の中心座標を $P_v(x_v, y_v, v)$, dL の法線ベクトルを \mathbf{N}_v , 光源 L_j の輝度を L , P_v から P_i へのベクトルを \mathbf{P} , P_i における平面の法線ベクトルを \mathbf{N} とおく (図 3.15).

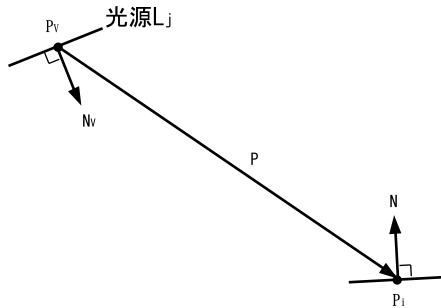


図 3.15 小片 dL による照明状況

小片 dL における照度 dE は,

$$dE = L \frac{\mathbf{N}_v \cdot \mathbf{P} - \mathbf{N} \cdot \mathbf{P}}{|\mathbf{N}| |\mathbf{N}_v| |\mathbf{P}|^4} \quad (3.14)$$

と表せる。本手法では、仮想平面上における画素を小片 dL として照度を計算する。従って、光源 L_j における照度 E_j は,

$$E_j = L \sum_{P_v \in L_j} \frac{\mathbf{N}_v \cdot \mathbf{P} - \mathbf{N} \cdot \mathbf{P}}{|\mathbf{N}| |\mathbf{N}_v| |\mathbf{P}|^4} dL \quad (3.15)$$

となる。

3.4.2 複数光源による照明状況計算

複数の光源の照度から P_i における照明状況 S_i を計算する。

まず、照度の合計を E_s とし、全ての照度を E_s で正規化した値 e_j に変換する。

$$E_s = \sum_j E_j$$

$$e_j = \frac{E_j}{E_s}$$

これを光源色 C_j に乗じて合計したものが P_i の照明状況 S_i となる。

$$S_i = \sum_j e_j C_j \quad (3.16)$$

ここで、光源色 C_j は色温度から節 2.1.4 の (2.7) 式を用いて計算した値を用いる。

3.4.3 照明状況下での演色計算

前節で計算した照明状況 S_i を用いて演色された物体色 $C_r = [C_{rR}, C_{rG}, C_{rB}]^t$ から物体色 $C_o = [C_{oR}, C_{oG}, C_{oB}]^t$, または基準となる光源で演色された色 $C_b = [C_{bR}, C_{bG}, C_{bB}]^t$ を計算する。照明状況 S_i の RGB 成分をそれぞれ S_{iR}, S_{iG}, S_{iB} とし、 S_i の全ての成分の合計を S_{is} とすると、 C_r から C_o への変換式は

$$C_o = k \cdot \begin{bmatrix} \frac{S_{is}}{S_{iR}} C_{rR} \\ \frac{S_{is}}{S_{iG}} C_{rG} \\ \frac{S_{is}}{S_{iB}} C_{rB} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

となる。また、基準となる光源色を S_o , その成分の合計を S_{os} とすると C_r から C_b への変換式は

$$C_b = k \cdot \begin{bmatrix} \frac{S_{is} \cdot S_{oR}}{S_{iR} \cdot S_{os}} C_{rR} \\ \frac{S_{is} \cdot S_{oG}}{S_{iG} \cdot S_{os}} C_{rG} \\ \frac{S_{is} \cdot S_{oB}}{S_{iB} \cdot S_{os}} C_{rB} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

となる。

第4章 評価実験

本章では、光源情報の幾何情報と色情報についての精度評価実験と、照明状況を計算する手法の推定精度の評価実験について述べる。

4.1 システム構成と使用機材

3章で述べた提案手法を評価するために図 4.1 に示す光源環境推定システムを試作した。本システムで使用した機材を表 4.1 に示す。



図 4.1 システム構成

4.2 光源環境の構築

本節では、魚眼カメラで撮影した画像の展開と、展開した光源画像を用いた光源の形状に関する評価実験について述べる。また、光源色推定における精度につ

表 4.1 使用機材

用途	製品名
魚眼レンズ	旭精密株式会社 TS2V114E
カメラ	Waterc 社 WAT-202D
キャプチャデバイス	AVer Media 社 EZMaker USB 2.0
USB2.0 カード	I・O DATA WN-B11/CBU2



図 4.2 魚眼レンズ TS2V114E



図 4.3 光源撮影用カメラ WAT-202D



図 4.4 画像キャプチャデバイス EZMaker



図 4.5 USB2.0 カード WN-B11/CBU2

いても併せて述べる.

4.2.1 光源画像の展開

表 4.2 は, 魚眼カメラの中心からの距離 l と角度 θ の関係を表したものである.

表 4.2 魚眼レンズの特性

中心からの距離 [mm]	角度 [°]	中心からの距離 [mm]	角度 [°]
0.0	0.000	1.0	37.359
0.1	3.533	1.1	41.642
0.2	7.089	1.2	46.134
0.3	10.660	1.3	50.892
0.4	14.263	1.4	56.016
0.5	17.907	1.5	61.667
0.6	21.603	1.6	67.890
0.7	25.361	1.7	75.520
0.8	29.265	1.8	87.000
0.9	33.244	1.816	90.000

表 4.2 から, l の θ に関する近似関数 $g(\theta)$ を求める. 本実装では, $g(\theta)$ を 4 次の多項式として近似した. その結果, $g(\theta)$ の各係数は表 4.3 のようになった.

表 4.3 $g(\theta)$ の近似多項式における次数と係数

次数	係数
0	-5.339123e-004
1	1.632634e+000
2	-4.810080e-002
3	-1.549793e-001
4	-4.672577e-003

次に, 表 4.3 を用いた光源画像の展開精度について調べる.

魚眼カメラを用い, 図 4.6 に示す, 太線の間隔 2cm, 細線の間隔 1cm である格子状の画像を, 魚眼カメラの焦点から 4.6cm の位置に設置して撮影した (図 4.7). 格子画像と展開した撮影画像を用いて, 格子の交点のずれから展開精度を評価する.

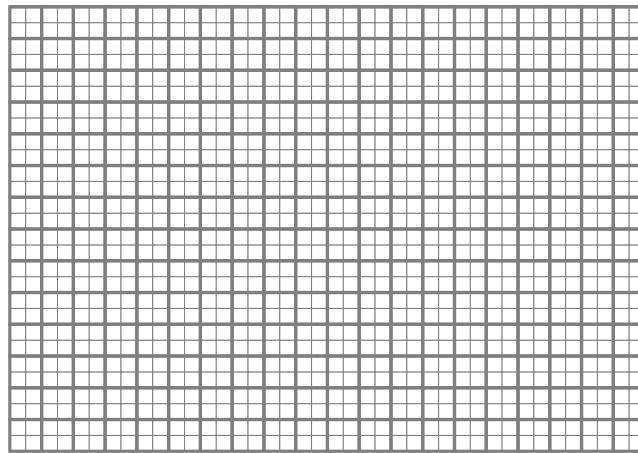


図 4.6 格子画像

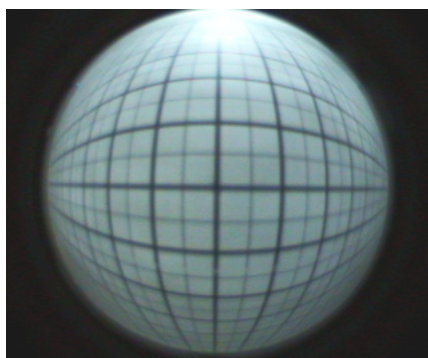


図 4.7 魚眼カメラによる格子画像の撮影画像

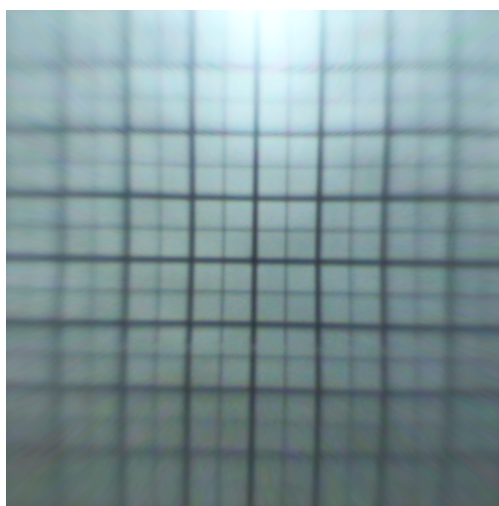


図 4.8 魚眼カメラ画像の展開結果

図 4.7 を表 4.3 を用いて展開した画像を図 4.8 に示す. 展開図における, 太線格子の交点の理論値 (赤) と展開結果 (緑) を, 図 4.9 に示す.

交点から中心まで距離 [pixel] と中心から見込んだ角度の理論値と結果の誤差 [rad] の関係は表 4.4 のようになった. 結果より中心までの距離が大きくなるほど, 誤差は大きくなるのが分かる. 誤差の最大値は $1.33\text{E-}3[\text{rad}]$ となった. これは,

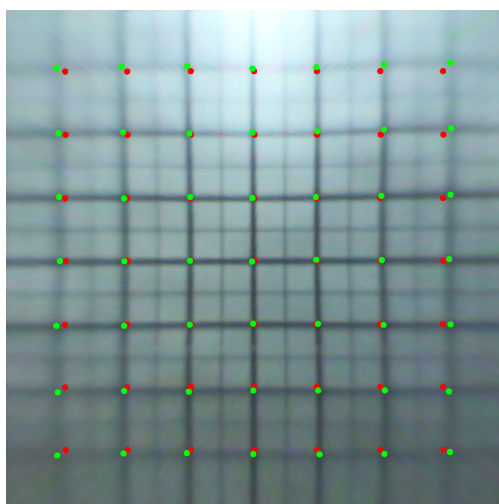


図 4.9 理論値との比較画像

表 4.4 画像中心までの距離による理論値と結果の誤差

中心までの距離 [pixel]	誤差 [rad]
123.0	1.33E-3
104.6	9.07E-4
91.7	1.02E-4
87.0	1.24E-4
82.0	2.86E-4
64.8	6.83E-4
58.0	3.82E-4
41.0	3.49E-4
29.0	1.90E-4
0	9.10E-4

カメラからの距離が1[m]にある平面上において最大5[cm]程度の誤差であるので、十分な精度といえる。

4.2.2 光源の幾何情報

展開した光源画像からの幾何情報の推定精度を調査する。

図 4.11, 表 4.5 に示すような光源環境で光源画像を取得する。なお、光源環境の理論値は図 4.10 のように置いた仮想平面上における値で単位は [pixel] である。実際に取得した光源画像は図 4.12 となる。次節から光源情報の各要素についての推定精度について評価する。

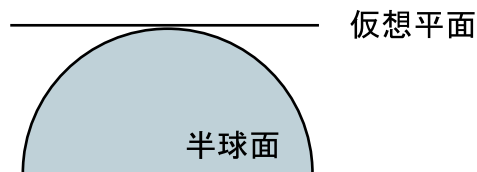
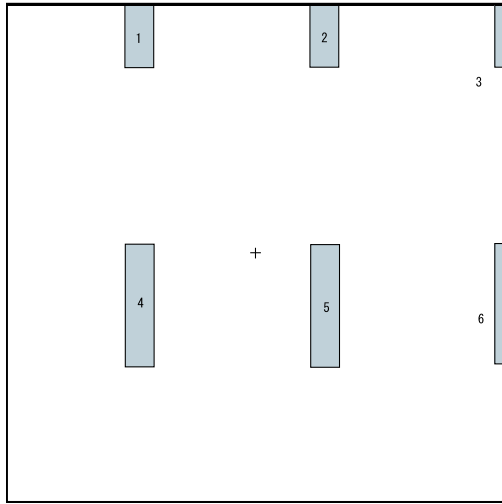
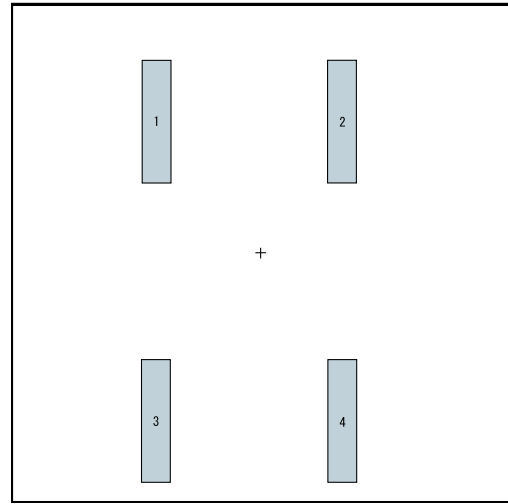


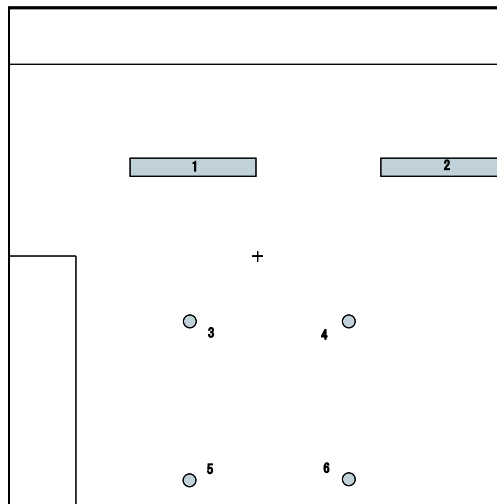
図 4.10 仮想平面の位置



(a) 評価用光源環境 1



(b) 評価用光源環境 2



(c) 評価用光源環境 3

図 4.11 評価用光源環境配置図

光源 ID	重心座標	面積	主軸角 [rad]	長軸長	短軸長	色溫度
1	(-110,203)	1566	1.57	58	27	4550
2	(64,203)	1566	1.57	58	27	4550
3	(228,203)	464	1.57	58	8	4550
4	(-110,-49)	3105	1.57	115	27	4550
5	(64,-49)	3105	1.57	115	27	4550
6	(228,-49)	920	1.57	115	8	4550

(a) 評估用光源環境 1

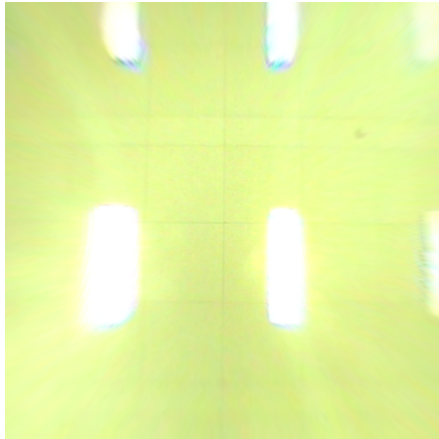
光源 ID	重心座標	面積	主軸角 [rad]	長軸長	短軸長	色溫度
1	(-99,124)	3105	1.57	115	27	4350
2	(75,124)	3105	1.57	115	27	4350
3	(-99,-157)	3105	1.57	115	27	4350
4	(75,-157)	3105	1.57	115	27	4350

(b) 評估用光源環境 2

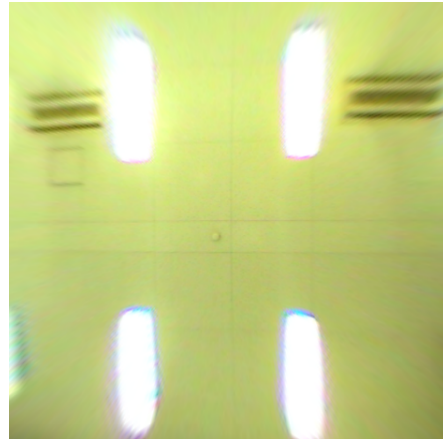
光源 ID	重心座標	面積	主軸角 [rad]	長軸長	短軸長	色溫度
1	(-59,83)	2006	0	118	17	5000
2	(176,83)	2006	0	118	17	5000
3	(-65,-60)	113	0	6	6	2950
4	(76,-60)	113	0	6	6	2950
5	(-65,-206)	113	0	6	6	2950
6	(76,-206)	113	0	6	6	2950

(c) 評估用光源環境 3

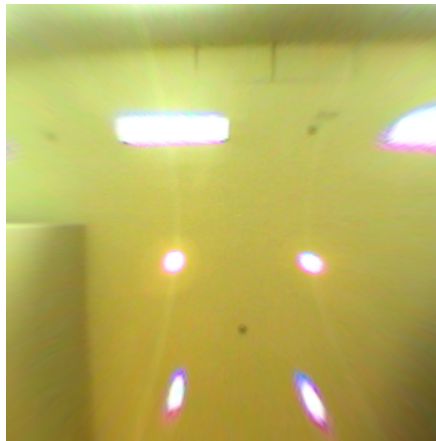
表 4.5 評估用光源環境理論值



(a) 光源環境 1 の展開画像



(b) 光源環境 2 の展開画像



(c) 光源環境 3 の展開画像

図 4.12 光源画像展開結果

4.2.3 光源の重心

3.3.2 節の手法を用いて、重心を求め、理論値との誤差を評価する。

図 4.12 から推定した重心座標、および、半球面の理論値との誤差 [pixel] は表 4.6 のようになった。

表 4.6 重心座標の推定結果と理論値との誤差

	光源 ID	重心座標	理論値との誤差
光源環境 1	1	(-108,203)	2.000
	2	(63,203)	1.000
	3	なし	
	4	(-122,-49)	12.000
	5	(66,-49)	2.000
	6	(228,-39)	10.000
光源環境 2	1	(80,-167)	5.831
	2	(-98,-159)	13.416
	3	(-102,129)	2.236
	4	(81,136)	11.180
光源環境 3	1	(93,-189)	2.236
	2	(-53,-182)	8.944
	3	(-54,-41)	3.162
	4	(92,-42)	1.000
	5	(-56,100)	4.123
	6	(209,101)	6.000

また、重心から展開画像の中心までの距離 [pixel] と、重心の推定値と理論値に対する半球面の中心から見込んだ角度誤差 [rad] の関係は表 4.7 のようになった。

表 4.7 重心の画像中心までの距離と推定値と理論値の誤差

	光源 ID	画像中心までの距離	誤差
光源環境 1	1	229.9413	0.0018
	2	212.5512	0.0006
	3	なし	
	4	131.4724	0.0438
	5	82.2010	0.0087
	6	231.3115	0.0035
光源環境 2	1	185.1729	0.0299
	2	186.7753	0.0030
	3	164.4536	0.0176
	4	158.2940	0.0438
光源環境 3	1	210.6419	0.0001
	2	189.5600	0.0213
	3	67.8012	0.0176
	4	101.1336	0.0043
	5	114.6124	0.0112
	6	232.1250	0.0103

4.2.1 節の表 4.4 より、画像中心からの距離に関する展開誤差とオーダが同程度であるので、重心は精度良く推定できたといえる。

4.2.4 光源の形状

3.3.2 節の手法を用いて、主軸角及び長軸長、短軸長を求め、理論値との誤差から形状情報の精度を調査する。

図 4.12 から推定した面積、主軸角、長軸長、短軸長、および、それぞれの理論値との誤差 (主軸角は [rad], その他は [pixel]) は表 4.8, 4.9 のようになった。

表 4.8 面積, 主軸角, 長軸長, 短軸長の推定結果

	光源 ID	主軸角	長軸長	短軸長	面積
光源環境 1	1	-1.4812	58.4716	32.8676	1690
	2	-1.5662	59.0226	28.0554	1581
	3	なし			
	4	1.4399	136.7693	63.2190	7215
	5	-1.5454	123.5451	41.7575	4724
	6	-1.5537	78.0400	9.6157	597
光源環境 2	1	-1.5371	129.1290	36.2156	4241
	2	-1.5315	122.1809	34.3440	3640
	3	-1.5470	127.1304	45.5833	5170
	4	-1.5243	131.8341	39.5849	4834
光源環境 3	1	-1.0488	24.6853	10.8158	218
	2	1.4002	23.2087	9.8881	159
	3	1.0085	17.8016	14.4174	223
	4	-0.4716	17.0327	12.9972	119
	5	0.0078	114.0820	26.0691	2741
	6	0.2169	54.2080	32.4256	1306

表 4.9 結果と理論値の誤差

	光源 ID	主軸角	長軸長	短軸長	面積
光源環境 1	1	0.0888	0.4716	5.8676	56
	2	0.0038	1.0226	1.0554	265
	3	なし			
	4	0.1301	21.7693	36.2190	3685
	5	0.0246	8.5451	14.7575	946
	6	0.0163	36.9600	1.6157	330
光源環境 2	1	0.0329	14.1290	9.2156	567
	2	0.0385	7.1809	7.3440	190
	3	0.0230	12.1304	18.5833	1446
	4	0.0457	16.8341	12.5849	993
光源環境 3	1	1.0488	18.6853	4.8158	96
	2	1.4002	17.2087	3.8881	67
	3	1.0085	11.8016	8.4174	88
	4	0.4716	11.0327	6.9972	60
	5	0.0078	3.9180	9.0691	329
	6	0.2169	3.7920	15.4256	625

光源環境 3 の光源 ID1~4 の光源の慣性主軸誤差が大きいのは、像の中心からの距離が大きいほど展開時の誤差が大きくなるため、放射状形状が歪み、主軸が変化したと考えられる。しかし、照度は距離の自乗に反比例することから、誤差としては無視できると考えられる。また、全体として面積の誤差が大きいのは光源の光量によるスミアの影響であると考えられる。本手法では光源の光量は一定であると仮定しているが、この影響により間接的に光量の差を表現できると考えられ、結果として面積の誤差は無視できると考えられる。

4.2.5 光源の色情報

3.3.3 節の手法を用いて、光源色の推定精度を調査する。

カメラの光源色域

まず始めに、カメラの光源色域を 3.3.3 節の手法を用いて求める。

本実装では光源色域を求める色温度として、2500[K](=500[MK^{-1}]) から 10000[K](=100[MK^{-1}]) の間を、10[MK^{-1}] 毎に区切った値を使用する。本実装で使用したカメラ (図 4.3) の感度特性は図 4.13 のようになった。3.3.3 節の (3.12) 式における $R(\lambda)$ は、Vrhel らが計測した分光反射率 [23] を使用した。この分光反射率から求めた、色温度ごとの光源色域は図 4.14 のようになった。

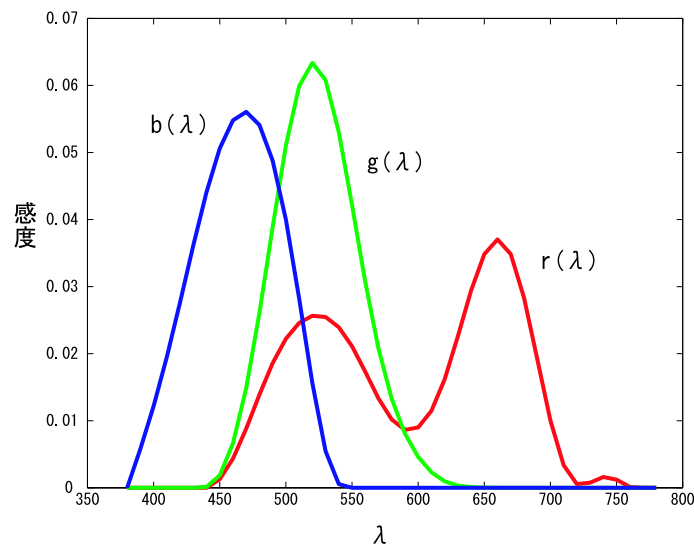


図 4.13 カメラ感度特性

光源色推定精度

3.3.3 節の手法を用いて、各光源色の推定精度を評価する。

図 4.12 から推定した光源色および理論値との誤差 [K] は表 4.6 のようになった。

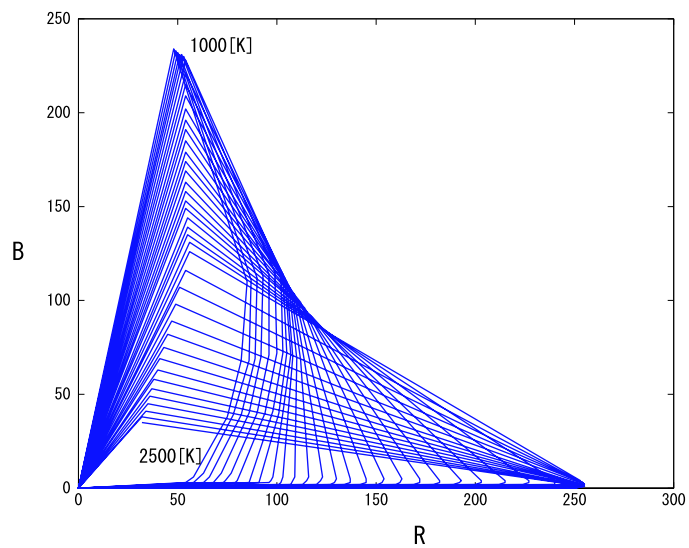


図 4.14 光源色域

表 4.10 光源色の推定値および理論値との誤差

	光源 ID	光源色	理論値との誤差
光源環境 1	1	2857	1693
	2	2857	1693
	3	なし	
	4	2857	1693
	5	2857	1693
	6	2857	1693
光源環境 2	1	2857	1493
	2	2857	1493
	3	2857	1493
	4	2857	1493
光源環境 3	1	2857	93
	2	2857	93
	3	2857	93
	4	2857	93
	5	2857	2143
	6	2857	2143

表 4.10 から、光源環境に関わらず、全て一定の値となった。これは、光源周囲の特性によるものと考えられる。図 4.15 は光源環境 3 の光源 ID4 と 6 についての光源色域と、光源色域作成時に使用した光源周囲のサンプル点である。

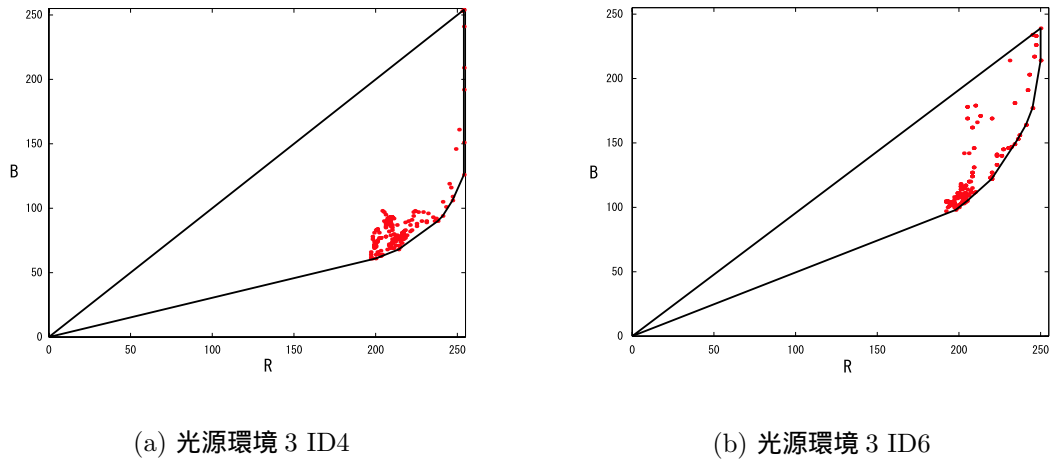


図 4.15 画像色域とサンプル点

図 4.15 より、色温度に差があっても画像色域の形状はあまり変化しないことが分かる。形状が変化しない原因として、高輝度のなかでも特に光源に近い部分をサンプルとして選択することが挙げられる。光源付近はスミア等の影響により、正確な値とならないためである。解決策としては、この部分を除いてサンプルを取得すればよいが、光源の光量、形状などにより排除する範囲は変化するため、現実的では無い。

そこで、光源色推定における推定対象として色域の代わりに、重心の傾きを用いる手法に変更する。

まず、光源色域の代わりとして光源自身の色度を求め、原点と光源の色度を結ぶ直線の傾きを用意する(図 4.16)。次に、画像色域の代わりにサンプル点の重心と原点を結ぶ直線の傾きを求め、個々の光源色の傾きと比較する。光源色の傾きと重心の傾きが最も近い色温度を推定結果とする。

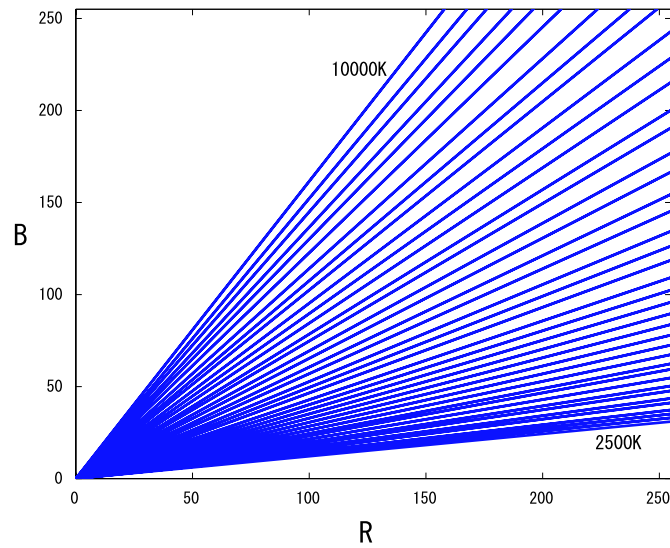


図 4.16 カメラ特性依存の光源色の傾き

この手法の利点として、光源付近のサンプル点の影響を軽減できること、光源色の傾きを求める際にカメラ特性の影響を考慮することにより、カメラ特性の補正も同時に行えることが挙げられる。問題点としては、光源部分に含まれる背景色に大きく影響されることが挙げられる。よって、光源部分の背景色が白色、またはそれに類する色の環境でのみ、変更後の手法は有効である。

変更後の手法による各光源環境の光源色推定結果は表 4.11 のようになった。

表 4.11 手法変更後の光源色の推定値および理論値との誤差

	光源 ID	光源色	理論値との誤差
光源環境 1	1	4348	202
	2	4545	5
	3	なし	
	4	4348	202
	5	4545	5
	6	4762	212
光源環境 2	1	4348	2
	2	4762	412
	3	4348	2
	4	4762	412
光源環境 3	1	3571	621
	2	3571	621
	3	3125	175
	4	3333	383
	5	4000	1000
	6	4167	833

光源環境 1,2 については, 変更後の誤差は縮小し, 最大でも 400K 程度の誤差となった。光源環境 3 の誤差が大きいのは, 相互反射の影響により, 個々の色温度が画像全体の平均色温度に影響されてしまったためであると考えられる。この誤差の評価については次節において述べる。

4.3 照明状況の推定

3.4 節の手法を用いて, 照明状況の推定精度を評価する。

光源環境 3 において白色板の法線が (0,1,1) となるように設置し, x 軸の正方向

から見た白色板の演色の度合いについて、実際の値と本手法の推定値を比較する。実際の値として、輝度計 (TOPCON 社 SR-3(図 4.17)) で計測した値を用いた (実測値)。本手法を用いた推定値と実測値の誤差は表 4.12 のようになる。なお、誤差は CIE 1960 UCS における色差とする。



図 4.17 TOPCON 社 SR-3

表 4.12 光源環境 3 における照明状況の実測値と推定値

	r	b	誤差
実測値	0.4505	0.2138	
推定値	0.4521	0.2074	0.0018

相関色温度を求める際、色差が 0.02 以内であると規定されている [10]。そこで、これを誤差評価基準とすると、実測値と推定値の色差は基準以下であるので等色であるといえる。また、前節の光源環境 3 における光源色推定の誤差は無視できることが分かる。従って、本手法は実際の照明状況を再現できる精度であることが分かった。

4.4 まとめ

本章では、提案手法の推定精度について、調査、および、評価を行った。その結果、形状推定に関しては推定に必要な精度を満たしていると考えられる。

光源色推定手法に関しては、光源周囲の輝度とスミア等のノイズにより、正しく推定することは出来なかったが、色域ではなく光源色の傾き (RB 比) で推定する手法に変更することで、光源周囲の背景色が白色、またはそれに類する色である場合のみではあるが、必要な精度を満たしていると考えられる。

また、本手法で求めた光源環境を用いて、照明状況を推定する手法の精度について、複数異種の光源環境下で調査した。分光輝度計による実測値と推定値の誤差は、無視できる程度であるので、精度は十分であると考えられる。従って、複数異種の光源環境の下での本手法の有用性が示せた。

以上より、本手法は動的に光源環境が変化するウェアラブルコンピューティング分野においても対応できると考えられる。

第5章 結論

本論文では、ウェアラブルコンピューティングにおいて色による物体認識を安定して行うために、魚眼カメラを用いて光源を撮影し、その画像から光源環境を推定する手法について述べ、その精度を評価した。その結果、重心、主軸角など、光源の形状に関する情報は精度良く取得できた。光源色の推定手法に関しては光源周囲の環境を限定することで、精度良く取得できた。

また、推定した光源環境を用いて照明状況の推定を行う手法についても述べ、物体の見る方向によって変化する演色を表現できることが分かった。

以上より、光源周囲が白色またはそれに類する色であるという環境の限定はあるが、複数異種の光源環境下においても光源環境が推定できることがわかった。

本手法の実現により、ウェアラブルコンピューティングにおける物体認識の精度向上が見込まれ、この分野の一般への普及に弾みがつくと考えられる。また、移動環境を扱うシステムにおける物体認識の安定化にも役立つと考えられる。

謝辞

本研究を行う機会を頂き、数々の有益なご指導を与えてくださいました 情報科学研究科 像情報処理学講座 千原 國宏 教授に心から感謝いたします。副指導教官としてご助言頂きました 情報処理学研究科 ソフトウェア基礎講座 横矢 直和 教授に厚く御礼申し上げます。また、日頃から本研究に関する様々なご指導、ご助言を頂きました 情報科学研究科 像情報処理学講座 眞鍋 佳嗣 助教授に深く感謝いたします。研究指針に対し、ご助言を頂きました 像情報処理学講座 安室 喜弘 助手、井村 誠孝 助手、村上 満佳子 教務員に心から御礼申し上げます。本論文の作成に際し、多くのご指導を頂きました 像情報処理学講座 佐々木 博史 研究員、末永 貴俊 研究員、増田 泰 研究員に深く感謝いたします。最後に、学生生活を共にした、像情報処理学講座の学生の博士後期および前期過程の皆様と、暖かい心配りを頂きました 川本 桂子 秘書に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Steve Mann. Definition of “Wearable Computer”. <http://wearcomp.org/wearcompdef.html>, May 1998.
- [2] Microvision Inc. Nomad Augmented Vision System. <http://www.mvis.com/nomad/index.html>, 2002.
- [3] 富永昌治, 石田敦史, ブライアン A. ワンデル. センサ相関法によるシーン照明の色温度推定. 電子情報通信学会誌 D-II, Vol. J85-D-II, No. 5, pp. 886–987, May 2002.
- [4] Graham D. Finlayson and Gerald Schaefer. Solving for Colour Constancy using a Constrained Dichromatic Reflection Model. *International of Computer Vision*, Vol. 42, No. 3, pp. 127–144, 2001.
- [5] Du Fei, Takahiro kabe, Yoichi Sato, and Akihiro Sugimoto. Reflectance Estimation under Complex Illumination. *IPSJ SIG Technical Report 2003-CVIM-140*, pp. 49–56, September 2003.
- [6] 照明学会 (編). 大学課程 照明工学 (新版). オーム社, 初版, January 1997. ISBN: 4-274-13080-0.
- [7] 日本工業規格. JISZ8113 照明用語, 1998.
- [8] 池田光男. 色彩工学の基礎. 朝倉書店, 初版, January 2003. ISBN: 4-254-21012-4.
- [9] 日本工業規格. JISZ8701 色の表示方法 - XYZ 表色系及び X10Y10Z10 表色系, 1999.

- [10] 日本工業規格. JISZ8725 光源の分布温度及び色温度・相関色温度の測定方法, 1999.
- [11] Kobus Barnard and Brian Funt. Camera Characterization for Color Research. *COLOR research and application*, Vol. 27, No. 3, pp. 152–163, June 2002.
- [12] Vlad C. Cardei, Brian Funt, and Kobus Barnard. Estimating the scene illumination chromaticity by using a neural network. *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 19, No. 12, pp. 2374–2386, December 2002.
- [13] Cuowei Hong, M. Ronnier Luo, and Peter A. Rhodes. A Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling. *COLOR research and application*, Vol. 26, No. 1, pp. 76–84, February 2001.
- [14] Yizhou Yu, Paul Debevec, Jitendra Malik, and Tim Hawkins. Inverse Global Illumination: Recovering Reflectance Models of Real Scenes from Photographs. *SIGGRAPH 99*, 1999.
- [15] Paul Debevec. Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography. *SIGGRAPH 98*, 1998.
- [16] Jonas Unger, Andreas Wenger, Tim Hawkins, Andrew Gardner, and Paul Debevec. Capturing and Rendering With Incident Light Fields. *Eurographics Symposium on Rendering*, pp. 1–10, 2003.
- [17] Imari Sato, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi. Acquiring a Radiance Distribution to Superimpose Virtual Objects onto a Real Scene. *IEEE Transactions Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–12, March 1999.
- [18] 石川悠. インタラクティブMR インテリアデザイン. Master’s thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, March 2003. NAIST-IS-MT0151006.

- [19] 原健二, Robby T. Tan, 中澤 篤志西野 恒, 池内克史. 単一カラー画像からの光源位置と光源色の推定. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2002), Vol. 1, pp. 447–482, 2002.
- [20] Graham D. Finlayson, Steven D. Hordley, and Paul M. Hubel. Color by Correlation: A Simple, Unifying Framework for Color Constancy. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23, No. 11, pp. 1209–1221, November 2001.
- [21] Shoji Tominaga and Brian A. Wandell. Natural Scene-Illuminant Estimation Using the Sensor Correlation. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, No. 1, pp. 42–56, January 2002.
- [22] Graham D. Finlayson, Steven D. Hordley, and Paul M. Hubel. Illuminant Estimation for Object Recognition. *COLOR research and application*, Vol. 27, No. 4, pp. 260–271, August 2002.
- [23] Michael J. Vrhel, Ron Gershon, and Lawrence S. Iman. Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra. *COLOR research and application*, Vol. 19, No. 1, pp. 4–9, February 1994.
- [24] Graham D. Finlayson, Steven D. Hordley, and Paul M. Hubel. Recovering Device Sensitivities with Quadratic Programming. *Proceedings of the Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, pp. 90–95, 1998.
- [25] Graham D. Finlayson and Mark S. Drew. Constrained least-squares regression in color spaces. *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 6, No. 4, pp. 484–493, October 1997.
- [26] Graham D. Finlayson. Color in Perspective. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 10, pp. 1034–1038, October 1996.