

修士論文

カラー画像を用いた分光反射率 および蛍光特性の推定



東京大学大学院
情報理工学系研究科
電子情報学専攻

学籍番号 48-116451

小橋泰之

指導教員 佐藤 洋一 教授

2013 年 2 月

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	論文構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	反射	3
2.1.1	反射特性	3
2.1.2	分光反射率推定	4
2.2	蛍光	6
2.2.1	蛍光特性	6
2.2.2	Donaldson 行列とマルチバンドカメラによる蛍光特性推定	8
2.2.3	BRRDF	9
2.3	本研究の位置づけ	10
第3章	提案手法	11
3.1	反射・蛍光成分の双線形表現	11
3.2	光源条件	13
3.2.1	必要光源数	14
3.2.2	最適光源	15
3.3	最小二乗法によるパラメータ推定	17
第4章	実験	20
4.1	実験環境	20
4.1.1	実験機器	20
4.1.2	真値測定	21
4.1.3	理想光源と使用光源	21
4.2	特性推定	22
4.2.1	UV ライトを用いた推定	23
4.2.2	可視光源と RGB カメラを用いた推定	25
4.2.3	各手法の推定精度の比較	26
4.3	リライティング	26

第5章 結論	40
5.1 結論	40
5.2 課題と展望	40
謝辞	42
参考文献	43
発表文献	46

図表目次

図目次

2.1	反射の経路.	4
2.2	位置関係と BRDF	5
2.3	蛍光発光の原理.	6
2.4	蛍光吸収と蛍光発光.	7
2.5	蛍光物体に対する波長ごとの入射光と観測光の割合.	8
3.1	PCA で得られた蛍光吸収の基底	12
3.2	蛍光吸収特性例と二階微分二乗和のヒストグラム	17
4.1	実験環境.	20
4.2	カメラ分光感度とナローバンド光源	21
4.3	Donaldson 行列による真値測定.	22
4.4	理想光源とそれにより得られた行列	23
4.5	理想光源を実際に生成した結果	24
4.6	使用光源とそれにより得られた行列	25
4.7	サンプル.	29
4.8	拘束係数と推定反射率 RMS エラー	30
4.9	UV ライトを使用した分光反射率・蛍光吸収特性の推定結果	32
4.10	分光反射率・蛍光吸収特性の推定結果	34
4.11	蛍光割合に対する分光反射率推定の RMS エラー	35
4.12	クラスタリングの各マップ.	35
4.13	緑色光源によるリライティング結果と輝度値の絶対誤差	36
4.14	白色光源によるリライティング結果と輝度値の絶対誤差	37
4.15	蛍光灯によるリライティング結果	38
4.16	蛍光成分の比較	38
4.17	各手法のシーン復元精度比較	39

表目次

4.1	蛍光色相推定結果	26
-----	--------------------	----

第1章

序論

1.1 研究背景

人間は様々な感覚器官を通して外界を知覚している。視覚情報はその中でも豊富な情報量を持っており、視覚情報の理解とその応用は、より便利で快適な社会作りに繋がると期待されている。計算機や各種デバイスの発達した現代においては、その豊富な計算能力と高性能なカメラセンサを用いて、視覚情報を利用することが試みられている。

さて視覚により得られる情報は、物体色、物体形状、そして物体動作の3つに大別できる。その中でも色情報は重要な要素であり、コンピュータビジョンにおいても、物体認識、セグメンテーション、フォトメトリックステレオなど様々なアルゴリズムに用いられている。

この色情報に関する初期の研究では、人間の色覚の機能の一部をコンピュータで再現することが試みられた。その代表例がカラーコンスタンシーである。照明環境が変化すれば、物体色も大きく変化する。そのため、計算機による色情報の利用には、照明変動を考慮する必要がある。しかしながら、異なる光源下において物体色が変化しても人間の心理的な色の見え方は大きく変化しない。これはについては、人間は3原色の比によって色を知覚しているからであるという理論がある [1]。こういった性質は物体認識に重要な役割を果たすと考えられている。

一方、色覚とは別に、色を決定づける光の物理現象を調べ、それを利用する研究も盛んになってきた。一般には、光源から放射される電磁波が物体表面で反射、もしくは物体内部で拡散することで色が見えると考えられている。反射光は光源の分光分布や物体の形状材質、そして光源と物体の幾何学的関係によって決定されており、色情報の理解によって、光源や物体の性質の推定が可能となる。

このように色情報の利用は非常に重要であるが、近年、蛍光現象と呼ばれる反射以外による物体色の表現が注目されてきている。従来は蛍光についてほとんど考慮していなかったが [2, 3, 4, 5]、ランダムに集められたシーン画像の20%に蛍光物体が含まれていたという報告があるように、蛍光成分を含む物体は実世界に多く存在している [6]。一般的な物体の色は光源によって変化するのに対し、蛍光色は光源によって変化しないという特徴を持つ。そのため、反射のみを考慮した手法は蛍光物体にはそのまま適用できないと考えられている。

時に蛍光は従来のアルゴリズムの性能を阻害するものの、蛍光が持つ色恒常性はさまざまな応用が可能である。例えば、蛍光色相の不変性を利用しカメラ分光感度を推定する手法が登場してきており [7]，また医療分野においては、患部のマーカーとして利用されてきた [8]。さらに、特定の色を強調できることから、物体に鮮やかな質感を与えることができ、文房具・衣類などの日用品にも広く利用されている。このように、蛍光色は生活から切り離せない存在であるが、その特性を推定することは非常に困難である。従来その特性を調べるためには、膨大な測定数やバンド数の多い特殊なカメラを必要としてきた。こういった扱いにくさは、使いこなせれば応用面で高い潜在性を持つ蛍光色の利用を阻む要因になっており、より簡便な蛍光特性の推定手法が望まれている。

1.2 研究目的

本研究の目的は、従来行われてきた膨大な測定や特殊なカメラによる蛍光特性の推定をより容易にすることである。一般的にカメラや計算機で用いられている色情報は RGB 情報であるため、RGB カメラを用いた推定を試みる。

従来膨大な計測数を必要としてきたのは、蛍光発光のモデルが複雑であり、推定すべきパラメータ数が多いことにあった。観測数を減らすためには、蛍光特性に何らかの近似を用いることで推定すべきパラメータを減らす必要がある。しかしながら従来手法の近似は妥当性に乏しく、精度よく特性が求められていなかった。また蛍光物体の色には、蛍光成分だけでなく反射成分も含まれている。この2成分が混在していることこそが蛍光特性の推定を最も困難にする原因であり、両者の分離に従来はバンド数の多いカメラを必要とした。代わりに RGB カメラを用いた場合、反射・蛍光成分の分離精度が低下することで、結果的に特性の推定精度が悪化することが予想される。

本研究は、観測数を減らすための妥当性の高い近似、また蛍光・反射成分の分離精度を上げるためのアイデアを考え、RGB カメラで撮影した少数枚の画像から、分光反射率・蛍光特性全てを推定することを目的とする。

1.3 論文構成

以下、本稿の構成は次の様になっている。2章では、本稿に関係する分光反射率や蛍光特性推定の先行研究について述べる。3章では、RGB カメラを用いた分光反射率・蛍光特性の推定手法を提案し、さらにその妥当性や最適な条件について議論を行う。4章では、提案手法の推定精度の評価や、推定結果を用いた任意光源下でのシーン復元結果を掲載し、それについて議論する。最後に、5章でまとめを行う。

第2章

関連研究

本章では、物体色を決定する成分である反射・蛍光の物理モデルを説明し、そしてその特性を推定する研究について紹介する。

2.1 反射

2.1.1 反射特性

カラー画像の性質を決定する要素は、光源、物体、イメージセンサである。反射による物体色は、光源の分光分布と物体の材質、そしてイメージセンサの分光感度によって変化し、さらに各々の幾何学的位置関係が影響してくる。

これらの要素から反射光を数学的に記述する反射モデルとして、二色性反射モデル [9] が有名である。これは、反射光が2種類の反射成分によって表現されるという考えに基づいている。すなわち、実世界に存在する物質は表面が不均一であり、次のような2経路によって光が反射される(図 2.1)。第一の経路は、表面と空気層の境界で反射する経路であり、鏡面反射と呼ばれる。第二の経路は、物体表面を通過した光が物体内部の分子間で散乱した後に物体外へ戻る経路であり、拡散反射と呼ばれる。反射光輝度はこの鏡面反射と拡散反射の和によって、次のように数式化される。

$$Y(\lambda) = d_S(\lambda)s_S(\lambda)I(\lambda) + d_D(\lambda)s_D(\lambda)I(\lambda) \quad (2.1)$$

ここで、 λ は波長、 Y は反射光輝度、 $I(\lambda)$ は光源分光分布である。添字の S と D はそれぞれ鏡面反射と拡散反射のパラメータであることを意味する。 $s(\lambda)$ は反射しやすさを表現するパラメータで、分光反射率と呼ばれる。 $d(\lambda)$ は幾何学的位置関係によって決定されるスケールファクタである。

物体の見えは位置関係によっても大きく変化する。この位置関係に注目し、双方向反射率分布関数 (BRDF) と呼ばれる入射・反射ベクトルを含めた関数による表現も存在する [10]。BRDF を用いると反射光輝度は次式で表される。

$$Y(\omega_i, \omega_o, \lambda) = r(\omega_i, \omega_o, \lambda)I(\omega_i, \lambda)\cos\theta_i \quad (2.2)$$

ここで、 ω_i 、 ω_o はそれぞれ入射・反射方向ベクトルであり、 $r(\omega_i, \omega_o, \lambda)$ は BRDF である。 θ_i は反射面の法線と ω_i のなす角であり、光源の対象への放射照度は θ_i によって

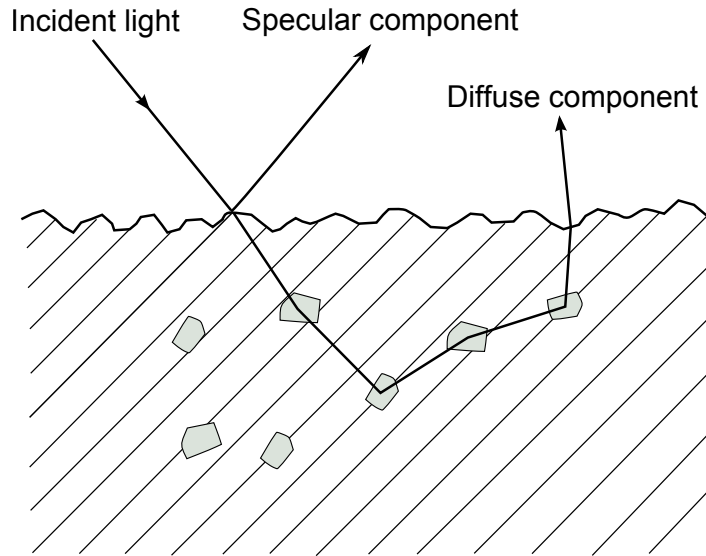


図 2.1: 反射の経路.
鏡面反射と拡散反射の2経路が存在する.

$\cos\theta_i$ 倍される．図 2.2 は，BRDF の測定環境と得られる BRDF の例である．BRDF は波長にも依存するが，一般にこの BRDF は各チャンネルごとに測定される．

厳密に反射光輝度を記述する場合，分光分布や位置関係が関係するためモデルが複雑になる．以下では，光源入射ベクトル，反射ベクトルを固定した上で，分光反射率の推定手法について紹介する．

2.1.2 分光反射率推定

カラー画像から光源や物体の情報を復元するという課題に対し，光源分光分布と分光反射率どちらも推定する手法 [2] や，片方を既知として残りを推定する手法 [5] が存在する．反射光輝度は式 2.1 からわかるように光源と分光反射率の積で表現されるため，どちらも未知である場合には不良設定問題となる．ゆえに，物体の色の平均が灰色であると仮定する手法 [2, 11]，鏡面反射の分光反射率が可視領域で一定値をとると仮定する手法 [4]，光源分布のエントロピーが最小になることを仮定した手法 [12] など，様々な仮定が必要となる．このような大幅な仮定なしに物理モデルに則って特性推定を行うという立場から，光源を既知として分光反射率を推定することが試みられてきた．

反射光輝度をカメラで撮影した場合のピクセル強度は，次のように決定される．

$$\begin{aligned} r_n &= \int Y(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda \\ &= \int d_S(\lambda)s_S(\lambda)I(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda + \int d_D(\lambda)s_D(\lambda)I(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで，添字の n はカメラのチャンネル番号を意味し， r_n はピクセル強度， c_n はカメラ分光感度である．さらに簡単のため，鏡面反射成分を無視し幾何学的位置関係を固定

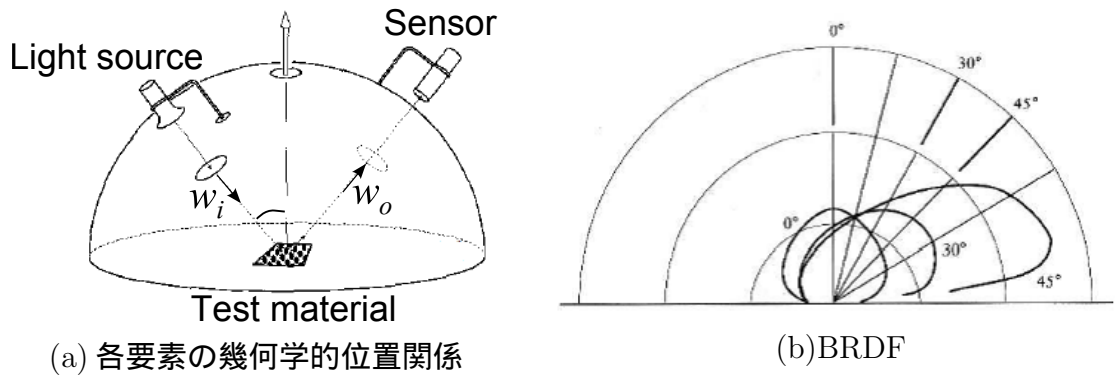


図 2.2: 位置関係と BRDF .

幾何学的位置関係によって物体の見えは変化する．入射光と観測光の割合を角度ごとに表現するパラメータが BRDF である．

した場合には，式 2.3 は次のように簡略化される．

$$r_n = \int s(\lambda)I(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda \quad (2.4)$$

反射率は波長ごとに値が異なるため，波長分解能を高くすると推定すべき未知パラメータも多くなる．そこで，統計的見地から分光反射率を推定する試みがなされてきた [13]．実世界に存在する物体の反射率は複数基底で近似できると考えられており，線形モデル [2, 3] や非線形モデル [14] が提案されてきた．線形基底を用いた場合，分光反射率は次のように書き換えられる．

$$s(\lambda) = \sum_{j=1}^J \beta_j b_j(\lambda). \quad (2.5)$$

ここで， J は基底数， $b_j(\lambda)$ は j 番目反射率基底， β_j は j 番目基底係数である．すると，反射強度は基底表現を用いて次のように書き換えられる．

$$\begin{aligned} r_n &= \int \sum_{j=1}^J \beta_j b_j(\lambda) I(\lambda) c_n(\lambda) d\lambda \\ &= \sum_{j=1}^J \beta_j \int b_j(\lambda) I(\lambda) c_n(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.6)$$

積分部は既知であるため，この等式を複数用意することで基底係数の推定を行うことができる．その手法は大きく 2 パターンに分けることができる．一つは光源を変化させる手法であり [5, 15, 16]，もう一つはカメラのチャンネル数を増やす手法である [4, 17]．前者は一般的なカメラによる推定が可能であるが様々な光源を準備する必要があり，屋外のような実験室環境以外には適していない．後者は通過波長領域の異なる様々なフィルタを準備する必要がある．対象が静止している場合には両者の推定精度に大きな違

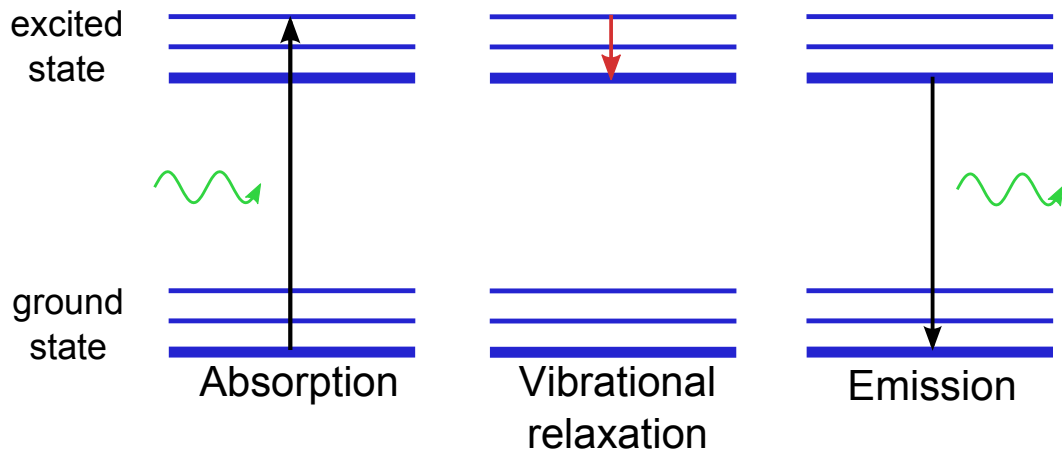


図 2.3: 蛍光発光の原理.

吸収，緩和過程，発光の3ステップを経て蛍光物体は発光する．

いはないが，カメラ前に取り付けられたフィルタの交換は高速にはできないことから，移動物体の分光反射率を推定する場合には前者が有利であると考えられている．こうした時間分解能を上げるために，LED光源や自由光源をコンピュータ制御することで瞬時に変化させる手法 [5, 16] やプロジェクターを利用することで光源を変化させる手法 [15] がある．一方，一般的なカメラはRGBの3チャンネルであるが，これを5チャンネルに増やすことでフィルタ交換の問題に対応している手法もある [17] ．

2.2 蛍光

これらの分光反射率推定手法は蛍光成分が存在する場合には機能しないことが多く [6] ，蛍光成分を考慮した物体色の推定も行われてきている．以下，蛍光の特性やその推定手法について紹介する．

2.2.1 蛍光特性

本節では，蛍光の特性について説明する．蛍光現象とは，蛍光物体の分子が光エネルギーを吸収することで励起し，振動準位内で安定した後，再び基底状態に戻る際に光を放出するという一連の現象である [18] ．その模式図が図 2.3 である．蛍光物体ごとに吸収しやすい光や放出する光の分光分布は異なっており，それぞれ吸収・発光特性と呼ばれる．その一例が図 2.4 である．典型的な蛍光物体の吸収特性は紫外～可視領域に分布し，また発光特性は可視～赤外領域に分布する．太陽光のような自然界の光源は強い紫外線も含んでいるため，蛍光は日常生活で観察することができる．蛍光は光源照射を止めると直ちに発光が止まる．発光時間が長いものは燐光と呼ばれる．

蛍光の持つ特性のうち，重要なのは次の2点であると考えられる． [19]

1. 蛍光発光により放出される光は，吸収された光よりも長波長である．これは，励

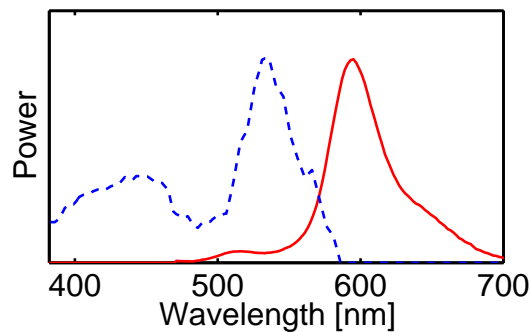


図 2.4: 蛍光吸収と蛍光発光.
青点線：蛍光吸収．赤実線：蛍光放出．

起状態から基底状態に戻る間に，熱エネルギーを放出しながら様々な緩和過程を経ることで，吸収されたエネルギーよりも放出されるエネルギーの方が小さくなるためである．例えば，電子励起状態には分子の振動運動に伴う振動準位が存在し，振動による熱エネルギーを放出しつつ振動準位内で安定化する（図 2.3 中央）．光の持つエネルギーは，波長が長いほど小さく，短いほど大きいため，放出される光は長波長側にシフトする．この性質は Stokes shift と呼ばれる．

2. 放出光の分光分布は光源に依存しない．電子が励起準位から基底準位に戻る際放出される光の波長は，準位間のエネルギー差に対応するものであるため，光源に依存しない物体固有の分光分布を持つ．

こういった特徴から，蛍光の物体の見えに与える影響は反射光とは異なり，特性の推定手法にも違いが生じる．反射光は，光源の分光分布や光源と観測対象の幾何学的位置関係以外では，分光反射率という一つのパラメータによって表現できた．しかしながら，蛍光発光を表現するには蛍光吸収・蛍光放出という2つのパラメータを必要とする．反射光のみを考慮していた手法では，光源の分光分布の変化と観測側の分解能どちらも，分光反射率の推定に有意に利用することができ，カメラチャンネル数の増加 [4] や光源変化 [5] によって，得られる反射率特性の情報量を増やすことが試みられた．しかし蛍光の場合は，上記の特性により，光源変化は蛍光吸収の推定に，観測分解能は蛍光発光の推定にのみ利用できると考えられる．

蛍光吸収・発光特性を用いることで，カメラによる蛍光の観測値は次のように表現できる [20] ．

$$f_n = \int A(\lambda_i) I(\lambda_i) d\lambda_i \int E(\lambda_o) c_n(\lambda_o) d\lambda_o. \quad (2.7)$$

ここで， n はチャンネル番号， f_n は n 番目チャンネルにおける蛍光観測強度である．また， λ_i, λ_o は入射光・観測光波長であり， $c_n(\lambda_o)$ は n 番目チャンネルのカメラ分光感度， $I(\lambda_i)$ ， $A(\lambda_i)$ ， $E(\lambda_o)$ はそれぞれ光源分光分布，蛍光吸収・発光特性である．ただし，観測値は蛍光吸収・発光の積で表現されるため，蛍光吸収・発光特性を一意に定めるには何らかの拘束条件が必要となる．

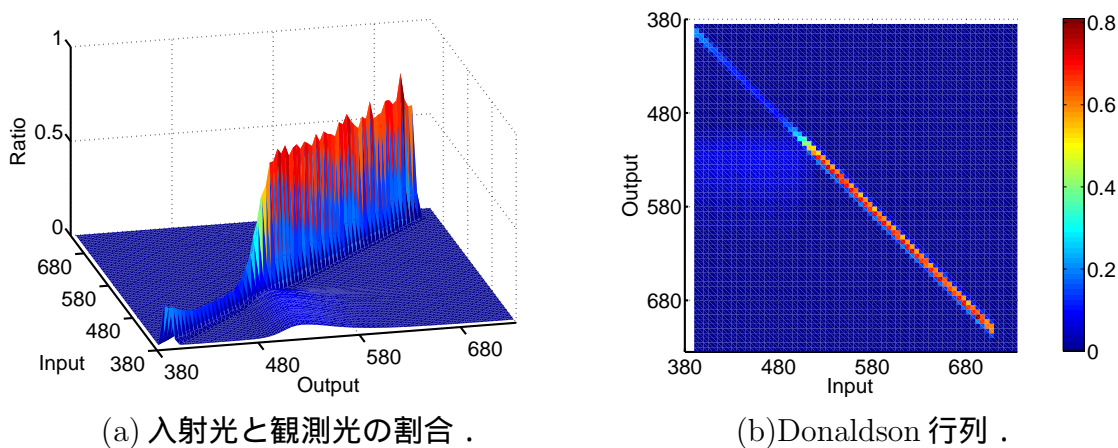


図 2.5: 蛍光物体に対する波長ごとの入射光と観測光の割合.

発光項 $\int E(\lambda_o)c_n(\lambda_o)d\lambda_o$ は光源分光分布に依存せず，チャンネルごとの観測値割合は一定となる．この割合は次のような蛍光色相と呼ばれる．

$$E_n = \frac{\int E(\lambda_o)c_n(\lambda_o)d\lambda_o}{\sum_{k=1}^N \int E(\lambda_o)c_k(\lambda_o)d\lambda_o}. \quad (2.8)$$

ここで， E_n は n 番目蛍光色相， N チャンネル数である．

蛍光物体は一般に反射成分も含む．すなわち，蛍光物体表面では鏡面反射が生じ，内部においても拡散反射が生じる [21]．ここで鏡面反射成分を前節と同様考慮しないとすれば，式 2.3 と合わせて蛍光物体の観測値は次式で表現される．

$$\begin{aligned} p_n &= r_n + f_n \\ &= \int I(\lambda)s(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda + \int A(\lambda_i)I(\lambda_i)d\lambda_i \int E(\lambda_o)c_n(\lambda_o)d\lambda_o. \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.2.2 Donaldson 行列とマルチバンドカメラによる蛍光特性推定

ナローバンド光を光源に用いた場合について考えるとする．反射成分は，観測光は光源と同じ波長についてのみ分光反射率に従い分布する．一方蛍光成分は，光源の波長以外でも分布しうる．そこで，波長ごとの入射光と観測光の割合を全て計測することで，蛍光物体の特性を表現することが試みられた [22]．図 2.5(a) は蛍光物体に対する波長ごとの入射光と観測光の割合をプロットしたものである． x ， y 軸はそれぞれ入射光と観測光の波長 [nm] を示し， z 軸が強度割合を示す．図 2.5(a) のように，拡散反射成分が対角要素に，対角から観測高波長側の三角領域に蛍光成分が表現される．この入射光と観測光強度の関係は Donaldson radiance factor と言われ，蛍光物体の反射・蛍光特性を表現する 2 変数関数となる．マルチバンドカメラで蛍光物体を撮影した場合の観測強度は，この Donaldson radiance factor を用いることで次の様に求められる．

$$p_n = \int \int I(\lambda_i)S(\lambda_i, \lambda_o)d\lambda_i c_n(\lambda_o)d\lambda_o \quad (2.10)$$

ここで $S(\lambda_i, \lambda_o)$ は Donaldson radiance factor である。

$S(\lambda_i, \lambda_o)$ を図 2.5(b) のように三角行列に記録したものを, Donaldson 行列と呼ぶ。Donaldson radiance factor や Donaldson 行列は, 光源に対する観測光の分光分布を厳密に表現するパラメータであるが, 行列を求めるためにはその分解能に応じた多くの計測を要する。光源数及び観測バンド数を N とすると, 観測回数は約 $\frac{N^2}{2}$ となる。

この Donaldson 行列により蛍光物体の観測値を表現しつつ, 必要観測数を削減するための研究は幾つか存在する [23, 24, 25, 26]。基底表現による未知パラメータ削減はコンピュータビジョンの分野でしばしば取り入れられるアイデアであり, 前節の $S(\lambda_i, \lambda_o)$ に対しても, 2次元フーリエ級数を基底に用いて表現することが試みられた [23]。

$$S(\lambda_i, \lambda_o) = \sum_{l=1}^{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \theta_{ml} \sin\left(\frac{l(\lambda_i - \lambda'_i)\pi}{K}\right) \sin\left(\frac{m(\lambda_o - \lambda'_o)\pi}{K}\right) \quad (2.11)$$

ここで, K は観測波長領域, λ'_i と λ'_o は入射光と観測光の始点波長, θ_{ml} はフーリエ級数係数, M は正弦関数の数である。3種光源とスペクトルメータを用いて, この手法により $S(\lambda_i, \lambda_o)$ の推定と任意光源下での観測分光分布の復元が行われた。この手法の観測回数は約 $\frac{M^2}{2}$ となる。

一方, Donaldson 行列に制約を加えることで未知パラメータを削減する試みも行われた [26]。図 2.5(b) の蛍光特性に注目し, ピーク値の係数が入射光の波長によらず一定であるとした。すなわち,

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & & & & 0 \\ s_{21} & s_{22} & & & \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nn-1} & s_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & & & & 0 \\ s_2 & s_{22} & & & \\ s_3 & s_3 & s_{33} & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \\ s_n & s_n & \dots & s_n & s_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

ここで, S は Donaldson 行列, $s_{11} \sim s_{nn}$ は係数である。よって, 未知パラメータの数は観測バンド数 N に対し2倍の $2N$ となった。その結果, 2種類の光源と61バンドカメラのみを用いて, 反射・蛍光発光特性が推定された。

上記の2手法に共通している点は, 分解能の高い観測機器を用いていること, 光源が2, 3種であること, そして Donaldson 行列を用いていることである。Donaldson 行列を用いる場合には, 観測機器の分解能がそのまま Donaldson 行列の分解能となるため, RGB カメラのようなチャンネル数が少ない観測機器は使用できない。また, 光源数を減らしすぎると蛍光吸収特性の推定精度が下がることとなる。

2.2.3 BRDF

以上の蛍光についての議論は, 光源と物体, カメラの幾何学的位置関係を固定した場合のものであった。蛍光も位置関係を含めた議論が可能であり, 反射モデルの節で紹介した BRDF を蛍光に拡張した BRDF を用いると, 観測輝度は次のように表現さ

れる [27] .

$$Y(\omega_i, \omega_o, \lambda_i, \lambda_o) = f(\omega_i, \omega_o, \lambda_i, \lambda_o) I(\omega_i, \lambda_i) \cos\theta_i \quad (2.13)$$

ここで, λ_i, λ_o は光源・観測波長であり, $f(\omega_i, \omega_o, \lambda_i, \lambda_o)$ は BRRDF である. 式 2.2 との違いは, 蛍光による見えが光源・観測波長の 2 パラメータに依存していることから, それぞれを考慮している点にある.

さらに, Donaldson radiance factor $S(\lambda_i, \lambda_o)$ を用いることで, BRRDF は次のように書き換えられる [28] .

$$Y(\omega_i, \omega_o, \lambda_i, \lambda_o) = (r(\omega_i, \omega_o, \lambda_i) \delta(\lambda_i - \lambda_o) + S(\lambda_i, \lambda_o)) I(\omega_i, \lambda_i) \cos\theta_i \quad (2.14)$$

ここで, $r(\omega_i, \omega_o, \lambda_i)$ は入射光波長を含めた BRDF である. 近似的に, 蛍光成分は拡散反射成分と同様に観測方向に依存しないとみなすことができ, 全方向に均一に発光すると考えられている [29] . この蛍光発光の特性が, ある種の自発光光源のような見えを生み出している.

2.3 本研究の位置づけ

本章では, 反射と蛍光の物理モデルについて紹介し, その推定手法について述べた.

分光反射率は入射波長にのみ依存するパラメータであるのに対し, 蛍光特性は入射・放出波長の 2 つをパラメータに持つ. そのため分光反射率・蛍光特性全てを求めるために, 従来は入射・観測波長をそれぞれ変化させ, 特性の変化を総当り式に調べることが行われてきた. その特性推定の分解能を上げるには非常に多くの測定数が必要となることから, 少ない測定数での推定も試みられた. しかしそれらの研究では, 求められない特性の存在や十分な妥当性がない仮定がおかれるなどの問題があった. また一般にはマルチバンドカメラが必要であり, ピクセルワイズな処理ができないことも多かった.

本研究は, 十分妥当な仮定のもとに, RGB カメラと少ない観測数で分光反射率・蛍光特性全てを推定することを目的とする. RGB カメラによる特性推定により, 推定が容易になる上にピクセルワイズな処理が可能となり, その結果任意の光源条件下でのシーンの復元も行えることとなる.

第3章

提案手法

従来の分光反射率・蛍光特性推定的手法には，観測数の多さや，推定できないパラメータの存在という課題があった．また，反射・蛍光成分の分離の困難さから，観測機器にバンド数の多いカメラを用いる必要があった．全ての特性を推定しつつ観測数を減らすためには，大幅な近似を行わずに推定すべき未知パラメータを減らす必要がある．本章では，分光反射率・蛍光吸収が統計的に幾つかの基底で表現できるという考えに基づき，蛍光物体の観測式を少数の未知パラメータによる双線型方程式で記述し，十分に全てのパラメータを推定するのに必要な条件を証明する．また，3チャンネルしかないRGBカメラを用いることによる推定精度の低下を防ぐために，最適な光源条件や，実世界の反射蛍光特性を考慮した拘束条件を考案する．

3.1 反射・蛍光成分の双線形表現

光源分光分布を変化させる場合の撮影画像のあるピクセルにおける強度について考える．式 2.9 より，観測強度は次のように表現される．

$$p_{n,m} = r_{n,m} + f_{n,m}, \quad (3.1)$$

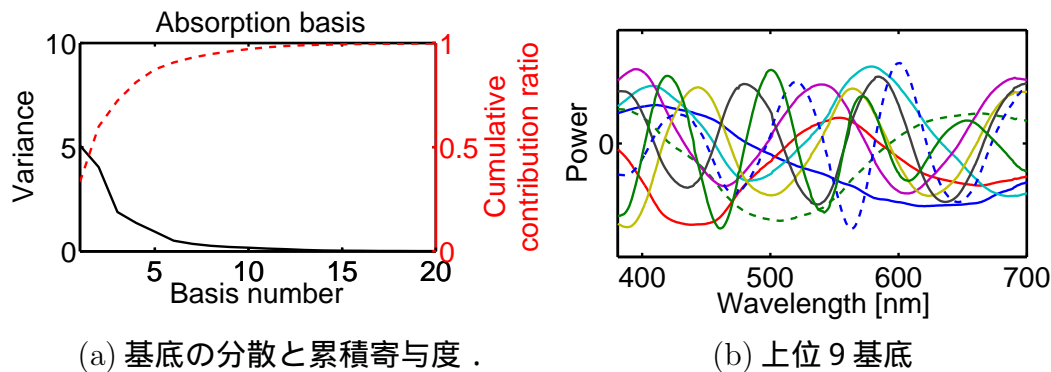
$$r_{n,m} = \int I_m(\lambda) s(\lambda) c_n(\lambda) d\lambda, \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} f_{n,m} &= \int A(\lambda) I_m(\lambda) d\lambda \int E(\lambda') c_n(\lambda') d\lambda', \\ &= \int A(\lambda) I_m(\lambda) d\lambda E_n. \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで，添字の m は m 番目光源の値であることを意味し， E_n は蛍光色相である．蛍光発光項に次のような蛍光色相としての正規化拘束を導入することで， $A(\lambda)$ と E_n の解が一つに定まらないスケールングの問題は回避される．

$$\sum_{n=1}^3 E_n = 1. \quad (3.4)$$

ただし，RGBチャンネル番号 $n = \{1: R, 2: G, 3: B\}$ とし，以下も同様とする．



(a) 基底の分散と累積寄与度 .

(b) 上位 9 基底

図 3.1: PCA で得られた蛍光吸収の基底 .

累積寄与度は 8 基底で 94.6 % , 9 基底で 96.0 % . 95 % を上回った上位 9 基底を採用した .

ここで , 未知パラメータを減らすため分光反射率と蛍光吸収特性を基底表現する . 今回は , 反射率の再現性の高さ と計算に有利であることから , [3] の 8 次元の基底を用いた線形モデルを採用する .

$$s(\lambda) = \sum_{j=1}^8 \beta_j b_j(\lambda). \quad (3.5)$$

ここで , $b_j(\lambda)$ は j 番目反射率基底 , β_j は j 番目基底係数である .

蛍光吸収特性の基底表現については我々の知る限りでは先行研究が存在しない . そのため , 蛍光吸収特性のデータベース [30] に対し PCA をかけることで基底を決定した (波長領域 : 380-700 nm , サンプル数 : 約 400 個) . PCA の結果は図 3.1 であり , 累積寄与度が 95 % を越えた上位 9 基底を採用した .

$$A(\lambda) = \sum_{j=1}^9 \alpha_j a_j(\lambda). \quad (3.6)$$

ここで , $a_j(\lambda)$ は j 番目蛍光吸収基底 , α_j は j 番目蛍光吸収基底係数である .

式 3.5 , 3.6 より , 反射・蛍光成分はそれぞれ次のように書き下される .

$$r_{n,m} = \sum_{j=1}^8 \beta_j \int I_m(\lambda) b_j(\lambda) c_n(\lambda) d\lambda, \quad (3.7)$$

$$f_{n,m} = \sum_{j=1}^9 \alpha_j \int I_m(\lambda) a_j(\lambda) d\lambda E_n. \quad (3.8)$$

本研究では , 光源分光分布とカメラ分光感度は既知とする . したがって , $r_{n,m}$ と $f_{n,m}$ は β_j , α_j , E_n のみに依存する .

複数光源を用いた一連の測定結果は , 次のような行列表現にすることができる .

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{H}_n \boldsymbol{\beta}, \quad (3.9)$$

$$\mathbf{f}_n = \mathbf{F} \boldsymbol{\alpha} E_n. \quad (3.10)$$

ここで, \mathbf{r}_n は $M \times 1$ ベクトル, \mathbf{H}_n は $M \times 8$ 行列 (M 光源 \times 8 反射率基底), β は 8×1 ベクトル, \mathbf{f}_n は $M \times 1$ ベクトル, \mathbf{F} は $M \times 9$ 行列 (M 光源 \times 9 蛍光吸収基底), そして α は 9×1 ベクトルである. また, \mathbf{H}_n, \mathbf{F} の要素は次の様に並んでいる.

$$\mathbf{H}_n = \begin{bmatrix} \int I_1(\lambda)b_1(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda & \int I_1(\lambda)b_2(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda & \cdots & \int I_1(\lambda)b_8(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda \\ \int I_2(\lambda)b_1(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda & \int I_2(\lambda)b_2(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda & \cdots & \int I_2(\lambda)b_8(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \int I_M(\lambda)b_1(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda & \int I_M(\lambda)b_2(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda & \cdots & \int I_M(\lambda)b_8(\lambda)c_n(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \int I_1(\lambda)a_1(\lambda)d\lambda & \int I_1(\lambda)a_2(\lambda)d\lambda & \cdots & \int I_1(\lambda)a_9(\lambda)d\lambda \\ \int I_2(\lambda)a_1(\lambda)d\lambda & \int I_2(\lambda)a_2(\lambda)d\lambda & \cdots & \int I_2(\lambda)a_9(\lambda)d\lambda \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \int I_M(\lambda)a_1(\lambda)d\lambda & \int I_M(\lambda)a_2(\lambda)d\lambda & \cdots & \int I_M(\lambda)a_9(\lambda)d\lambda \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

\mathbf{H}_n はチャンネル番号依存なのに対し, カメラ分光感度が E_n に含まれているため \mathbf{F} は依存していないという違いは, パラメータを推定する上で重要である.

上式より, 反射成分と蛍光成分を合わせた観測値は次のようになる.

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{H}_n\beta + \mathbf{F}\alpha E_n. \quad (3.13)$$

ここでもし蛍光色相 E_n が UV ライト等で既知であるならば, 次式のように線形式に書き換えられる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{p}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & E_1\mathbf{F} \\ \mathbf{H}_2 & E_2\mathbf{F} \\ \mathbf{H}_3 & E_3\mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

蛍光吸収特性のデータベース [30] の全サンプル 509 個のうち, 波長領域 [300-400 nm] における蛍光吸収が 10% 以上を占めるサンプルは約 60% であった. これは UV ライトによって蛍光色相を十分に推定できるとは言えない割合であるが, 少なくとも UV ライトの波長領域で吸収する特性を持つ蛍光物体の存在確認は行える.

連立方程式 3.13 や 3.14 が満たされるような解を探索することで, 分光反射率・蛍光特性を推定することができる. 探索方法としては, 観測値である左辺と推定パラメータから決定される右辺の二乗差を最小化する方法が考えられる.

3.2 光源条件

本節では, 前節で導いた双線形方程式を解くために必要・最適な条件について議論するとともに, それを満たす光源分光分布の選択方法を提案する.

3.2.1 必要光源数

式 3.13 を各チャンネルで足し合わせることで，次のように蛍光発光 E_n を消去することができる．

$$\mathbf{p}_\Sigma = \mathbf{H}_\Sigma \boldsymbol{\beta} + \mathbf{F} \boldsymbol{\alpha}, \quad (3.15)$$

$$\mathbf{F} \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{p}_\Sigma - \mathbf{H}_\Sigma \boldsymbol{\beta}. \quad (3.16)$$

ただし， $\mathbf{p}_\Sigma = \sum_{n=1}^3 \mathbf{p}_n$ ， $\mathbf{H}_\Sigma = \sum_{n=1}^3 \mathbf{H}_n$ である．式 3.16 を式 3.13 に代入すると

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_n &= \mathbf{H}_n \boldsymbol{\beta} + (\mathbf{p}_\Sigma - \mathbf{H}_\Sigma \boldsymbol{\beta}) E_n \\ &= \mathbf{H}_n \boldsymbol{\beta} + \mathbf{p}_\Sigma E_n - \mathbf{H}_\Sigma \boldsymbol{\beta} E_n. \end{aligned} \quad (3.17)$$

チャンネル数は3であるが，式 3.17 を足し合わせると式 3.16 になるため， $n = 1, 2$ とした場合に次の2つの方程式が成り立つ．

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{H}_1 \boldsymbol{\beta} + \mathbf{p}_\Sigma E_1 - \mathbf{H}_\Sigma \boldsymbol{\beta} E_1, \quad (3.18)$$

$$\mathbf{p}_2 = \mathbf{H}_2 \boldsymbol{\beta} + \mathbf{p}_\Sigma E_2 - \mathbf{H}_\Sigma \boldsymbol{\beta} E_2. \quad (3.19)$$

ここで，右辺の初項，第2項は未知パラメータに対して線形な項であり，第3項は分光反射率係数と蛍光色相の積という非線形な項となっている．未知な蛍光色相数は{チャンネル数 - 1}であり，方程式の個数は{光源数 × 未知蛍光色相数}となることから，この連立方程式を解くために必要な光源数は次のようになると考えられる．

$$\text{必要光源数} \geq \frac{\text{分光反射率基底数} + \text{チャンネル数} - 1}{\text{チャンネル数} - 1}. \quad (3.20)$$

ただし実際には，必要光源数は \mathbf{H}_n ， \mathbf{H}_Σ のランクに依存する．

連立方程式 3.18，3.19 により $\boldsymbol{\beta}$ ， E_n の値が求まると，式 3.16 の右辺は定数となる．この線形連立方程式を解くためには \mathbf{F} のランクが未知パラメータの数だけあれば良く，必要光源数は次のようになると考えられる．

$$\text{必要光源数} = \text{蛍光吸収基底数}. \quad (3.21)$$

ゆえに全パラメータを推定するためには，上記2つの条件を同時に満たすだけの光源数が必要になる．本研究の条件設定では，必要光源数は9個となる．また，チャンネル数がある程度確保される場合には，ほとんどの場合において蛍光吸収基底数だけ光源が必要になることがわかる．

3.2.2 最適光源

実際の観測値には誤差が含まれるため、 H_n, H_Σ といった定数行列の条件次第では未知パラメータを精度よく推定できないことが予想される。光源を最適化することで物体認識精度を向上させることが試みられるなど [31]，どのような光源を選択するかは重要な課題である。そこで、推定に最適なこれら定数行列の条件、またそれを決定付ける光源の最適条件について議論する。

式 3.18, 3.19 のうち、非線形項は誤差を増幅させる原因となりうる。そのため、非線形項が消去されるような H_Σ ，すなわち

$$H_\Sigma = 0. \quad (3.22)$$

となることは、未知パラメータの推定精度向上に寄与すると考えられる。条件 3.22 を仮定すると、式 3.16 は次のように書き換えられる。

$$F\alpha = p_\Sigma \quad (3.23)$$

上式を解くために最適な条件を求めるにあたって、条件数について考える。例えば $Ax = b$ という方程式の x を実際の数値計算によって求める場合、 A が各列間で線形従属になっていたり、また線形従属に近いほど、解は不正確となる。その数値解析のしやすさの尺度が条件数であり、その値は次式によって定義される。

$$\begin{aligned} \text{cond}(A) &= \|A^{-1}\| \cdot \|A\| \\ &= \sqrt{\text{cond}(A^T A)}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

ここで、 $\text{cond}(A)$ は A の条件数であり、ノルムは以下ユークリッドノルムであるとする。条件数は単位行列のような場合に最小値 1 をとり、小さいほど入力誤差に対する計算精度は向上する。ゆえに、 F を要素が同じ対角行列にすることが、パラメータ α を最も精度よく求めることのできる条件となる。

次に、 β と E_n について考える。連立方程式 3.18, 3.19 は次のような行列表現に書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} H_1 & -p_\Sigma & 0 \\ H_2 & 0 & -p_\Sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

ここでも条件数に注目することとなるが、式 3.25 の場合には、 H_n や p_Σ によって構成される行列 A について考えればよい。ここで、 A が正方行列でない可能性を考慮して次の $A^T A$ の条件数を求める。

$$A^T A = \begin{bmatrix} H_1^T H_1 + H_2^T H_2 & -H_1^T p_\Sigma & -H_2^T p_\Sigma \\ -p_\Sigma^T H_1 & p_\Sigma^T p_\Sigma & 0 \\ -p_\Sigma^T H_2 & 0 & p_\Sigma^T p_\Sigma \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

p_Σ は対象物体によって値が変化するため、 $A^\top A$ を常に対角行列にすることはできない．以下大きな論理の飛躍があるが、 $H_1^\top H_1 + H_2^\top H_2$ が $p_\Sigma^\top p_\Sigma$ を各要素に持つ対角行列に近づくほど、条件数は良くなっていくと考えられる．対角行列となる最も簡単な条件としては、

$$H_1 = H_2 = \text{Identity matrix.} \quad (3.27)$$

が挙げられる．上記の結論は未だ β と E_n に対する最適光源条件とは言いがたく、厳密な結論には至っていない．行列に観測成分 p_Σ が混入していることが問題を困難にしている．学習ベースなどの異なるアプローチを試みる必要があるだろう．

さてここで、上で議論した条件を各行列が満たすための光源を求める方法について考える． H_n, F の各要素の積分計算は、分光分布が離散値であり各波長での積の合計である場合には、次のような内積によって表現できる．

$$\int I_m(\lambda) b_j(\lambda) c_n(\lambda) d\lambda = \mathbf{I}_m \cdot \mathbf{b}_{jn}^\top \quad (3.28)$$

$$\int I_m(\lambda) a_j(\lambda) d\lambda = \mathbf{I}_m \cdot \mathbf{a}_j^\top \quad (3.29)$$

ここで、 \mathbf{b}_{jn} は分光反射率とカメラ分光感度からなる分光分布 $b_j(\lambda)c_n(\lambda)$ を波長ごとに縦に並べた列ベクトルであり、 $\mathbf{a}_j, \mathbf{I}_m$ は蛍光吸収基底、光源分光分布を縦に並べた列ベクトルである．これらを用いて定義 3.11, 3.12 より、 H_n, F は次のように書き換えられる．

$$\mathbf{H}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{I}_2 & \cdots & \mathbf{I}_M \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{1n} & \mathbf{b}_{2n} & \cdots & \mathbf{b}_{8n} \end{bmatrix} = \mathbf{I}^\top \mathbf{b}_n \quad (3.30)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{I}_2 & \cdots & \mathbf{I}_M \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \cdots & \mathbf{a}_9 \end{bmatrix} = \mathbf{I}^\top \mathbf{a} \quad (3.31)$$

ゆえに、次の最小二乗式を解くことで、条件を満たす光源の組み合わせを選択できると考えられる．

$$\mathbf{I} = \arg \min_{\mathbf{I}} \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_\Sigma & \mathbf{F} \end{bmatrix}^\top - \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & \mathbf{b}_2 & \sum \mathbf{b}_n & \mathbf{a} \end{bmatrix}^\top \mathbf{I} \right\|^2 \quad (3.32)$$

ただし、この最小二乗式からは実世界に存在しない光源も選択されうる．それを回避する手段として、上式に光源の滑らか拘束を追加することや、光源を基底表現することで、光源基底係数を探索するといった手法が考えられる．

光源を幾つかの基底で表現する場合には、式 3.32 は次のように書き換えられる．

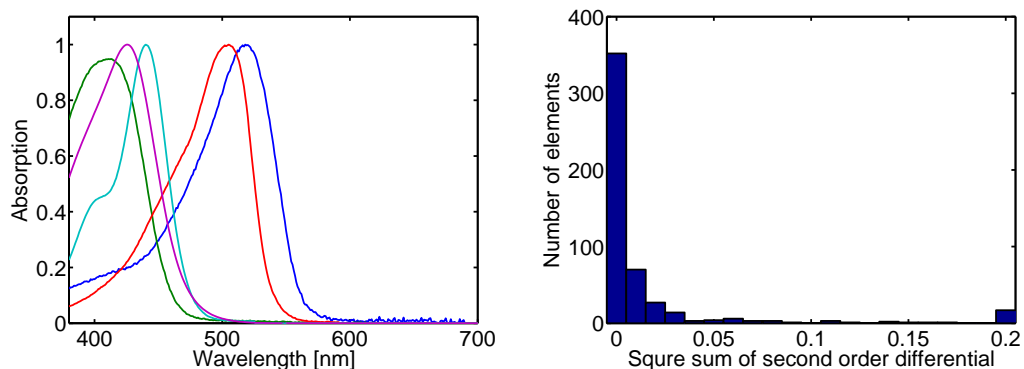
$$\mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_\Sigma & \mathbf{F} \end{bmatrix}^\top - \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & \mathbf{b}_2 & \sum \mathbf{b}_n & \mathbf{a} \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \cdots & \mathbf{e}_j \end{bmatrix} \mathbf{x} \right\|^2 \quad (3.33)$$

ここで、 j は光源基底数、 \mathbf{e} は光源基底、 \mathbf{x} は基底係数を縦に並べたベクトルである．

また、式 3.32 における二乗誤差が 0 にならない場合も生じうる．そこで、式 3.16, 3.31 から簡単のため次の方程式を解くことを考える．

$$(\mathbf{F} + \tilde{\mathbf{F}})(\boldsymbol{\alpha} + \tilde{\boldsymbol{\alpha}}) = \mathbf{p}_\Sigma + \tilde{\mathbf{p}}_\Sigma, \quad (3.34)$$

$$(\mathbf{F} + \tilde{\mathbf{F}}) = \mathbf{I}^\top \mathbf{a} \quad (3.35)$$



(a) 蛍光吸収特性例 .

(b) 二階微分二乗和ヒストグラム .

図 3.2: 蛍光吸収特性例と二階微分二乗和のヒストグラム .

蛍光吸収特性は滑らかに変化する．実際にデータベースに含まれるサンプルの二階微分二乗和は小さい．

ここで, $\tilde{\mathbf{F}}$, $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\mathbf{p}}_{\Sigma}$ はそれぞれ \mathbf{F} , α , \mathbf{p}_{Σ} の誤差項である．このように係数行列, 定数項共に誤差を含んでいる場合, $\|\mathbf{F}^{-1}\tilde{\mathbf{F}}\| < 1$ であるならば, 次の定理が成り立つことが知られている [32] .

$$\frac{\|\tilde{\alpha}\|}{\|\alpha\|} \leq \frac{\text{cond}(\mathbf{F})}{1 - \frac{\|\tilde{\mathbf{F}}\|}{\|\mathbf{F}\|}} \left(\frac{\|\tilde{\mathbf{F}}\|}{\|\mathbf{F}\|} + \frac{\|\tilde{\mathbf{p}}_{\Sigma}\|}{\|\mathbf{p}_{\Sigma}\|} \right) \quad (3.36)$$

すなわち, 誤差行列のノルムが小さいほど, 求めるベクトル α の誤差ノルムも小さくなる．行列ノルムは最大固有値から決定されるため要素二乗和とは異なる尺度であるが, 簡単に行列ノルムを最小化する手法として要素二乗和最小化は妥当であると考えられる．ゆえに, 式 3.32 によって最適光源を選択できる．

3.3 最小二乗法によるパラメータ推定

前節のような理想的な光源を利用できるとは限らず, 3.13 に最小二乗法を用いてパラメータ推定を行ったとしても, 推定結果が不安定になったり負になったりすることが予想される．従来, 解の安定性を向上するためにスペクトルに対する滑らか拘束や非負拘束が分光反射率復元の最小二乗式に取り入れられてきた [33] . 分光反射率だけでなく, 蛍光吸収特性も滑らかであることが図 3.2 から確認できる．本稿では, これら拘束条件を分光反射率と蛍光吸収関数の両方に適用することで, 3.13 の最小二乗式を

次のように書き変える．

$$\begin{aligned}
 (\hat{\beta}, \hat{\alpha}, \hat{\mathbf{E}}) &= \arg \min_{\beta, \alpha, \mathbf{E}} \left[\sum_n (\mathbf{p}_n - \mathbf{H}_n \beta - \mathbf{F} \alpha E_n)^2 \right. \\
 &\quad \left. + C_r \int \left| \sum_{j=1}^8 \beta_j \frac{\partial^2 b_j(\lambda)}{\partial \lambda^2} \right|^2 d\lambda + C_f \int \left| \sum_{j=1}^9 \alpha_j \frac{\partial^2 a_j(\lambda)}{\partial \lambda^2} \right|^2 d\lambda \right], \\
 \text{s.t. } &s(\lambda) \geq 0, A(\lambda) \geq 0, \mathbf{E} \geq \mathbf{0}, \sum_{n=1}^3 E_n = 1.
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

ここで， C_r と C_f は分光反射率と蛍光発光関数の滑らか拘束項に対する重み係数であり，また $\mathbf{E} = [E_1, E_2, \dots, E_n]$ である．3.13 から導かれる最小二乗項と式 3.37 の滑らか拘束項には，値の大きさに直接的な関係はない．そのため，重み係数を適切に選択する必要がある．

同様に，式 3.14 の最小二乗式にも拘束条件を適用することができる．

$$\begin{aligned}
 (\hat{\beta}, \hat{\alpha}) &= \arg \min_{\beta, \alpha} \left[\sum_n (\mathbf{p}_n - \mathbf{H}_n \beta - \mathbf{F} \alpha E_n)^2 \right. \\
 &\quad \left. + C_r \int \left| \sum_{j=1}^8 \beta_j \frac{\partial^2 b_j(\lambda)}{\partial \lambda^2} \right|^2 d\lambda + C_f \int \left| \sum_{j=1}^9 \alpha_j \frac{\partial^2 a_j(\lambda)}{\partial \lambda^2} \right|^2 d\lambda \right], \\
 \text{s.t. } &s(\lambda) \geq 0, A(\lambda) \geq 0.
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

また，反射成分と蛍光成分を分離する際の大きな問題の一つに，ある波長において，反射が生じているのか，または蛍光吸収・発光が同時に生じているのかの区別がつかないことが挙げられる．例えば，図 2.4 の蛍光吸収・発光スペクトルが重なっている領域では，吸収・発光が同時に生じており，これは観測側からは反射と同等である．しかしながら，実際には図 2.4 のように，蛍光吸収・発光スペクトルのピークには隔たりが存在し，吸収スペクトルの方がより短い波長領域に存在している [22, 34]．そのため，蛍光現象として，ある波長領域で吸収されそのまま発光することは少ない．そこで，このストークスシフトと呼ばれる蛍光吸収・発光関数の関係にも注目し，拘束条件に加えることとした．この特徴は，様々なアルゴリズム，例えば蛍光物体の鏡面・拡散反射の推定や蛍光成分を用いた照度差ステレオの精度向上に利用されている [28]．今回は，蛍光吸収・放出スペクトルの重なり領域が小さいという仮定を置くこととした．ただし，蛍光発光はカメラ分光感度を含めた色相 \mathbf{E} としてしか推定できていないため，直接重なり領域を計算することができない．よって，蛍光色相とカメラ分光感度から蛍光発光の平均波長を計算し，蛍光吸収スペクトルがこの平均波長よりも短くなるという拘束を設定した．

蛍光発光の平均波長は，蛍光色相とカメラ分光感度から次のように計算できる．

$$\gamma = \sum_{n=1}^3 E_n c'_n. \tag{3.39}$$

ここで γ と c'_n は蛍光発光と各チャンネルにおけるカメラ分光感度の平均波長である．この γ を用いることで，式 3.37 に次の拘束条件を追加した．

$$\int A(\lambda)U(\lambda - \gamma)d\lambda \leq C_s. \quad (3.40)$$

ここで， $U(\lambda)$ は $U(\lambda) = \{0 (\lambda < 0), 1 (\lambda \geq 0)\}$ のようなステップ関数であり， C_s はストークスシフト拘束の適当な閾値である．

このストークスシフト拘束を用いる上で注意しなければならないのは，この拘束条件が非線形拘束なことである．式 3.37 は元々非線形であるが式 3.38 は線形であるため，このような拘束条件を追加することは線形計算のメリットを消すことになり好ましくない．計算速度と安定性の点において，状況に応じて使い分ける必要があると考える．

第4章

実験

提案手法の有効性を検証するために、様々な蛍光物体に対し実験を行った。

4.1 実験環境

4.1.1 実験機器

周囲が暗幕で覆われた暗室において実験を行った。光源には自由光源 (Nikon ELS-VIS, 出力波長領域 400-720 nm) を、画像の撮影には RGB カメラ (SONY DXC-900) を用いた。本研究では鏡面反射成分は考慮していないため、その影響が低減されるよう図 4.1 のように光源、対象物、カメラのなす角が 45 度になるよう配置した。光源の強度は均一ではなく中央ほど強くなっているが、全面にすりガラスを置くことでほぼ均一であるとみなすことができる。ノイズによる影響を除去するために、10 枚撮影した画像の平均を結果に使用した。カメラの分光感度は図 4.2(a) であり、感度の平均波長は $c'_n = \{606, 532, 439 [nm]\}$ である。光源や分光反射率・蛍光特性の真値の測定には、可視領域における反射率が 1.00(誤差 1%) であるホワイトマーカと、シーン中のある 1 点の分光分布を測定することのできるスペクトルメータ (測定領域 680-780 nm, 波長分解能 2nm) を用いた。また真値測定の光源として、分光反射率・蛍光吸収特性に対しては図 4.2(b) のようなナローバンド光源を、蛍光発光特性に対しては UV ライ

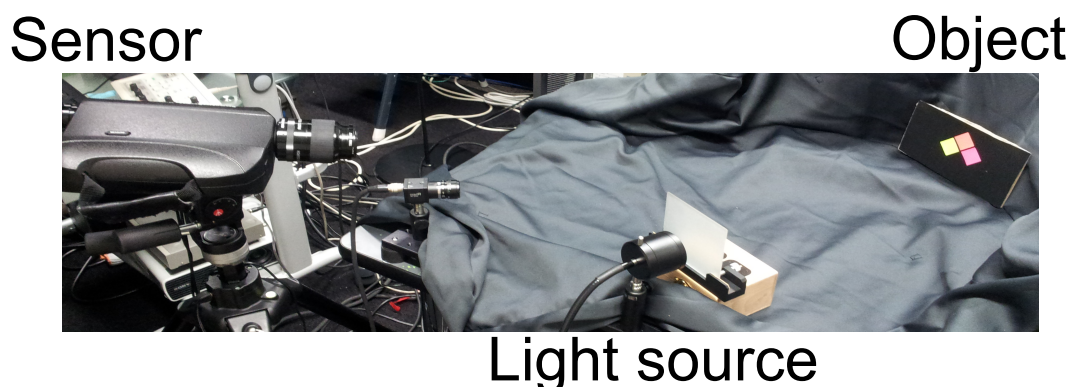


図 4.1: 実験環境.

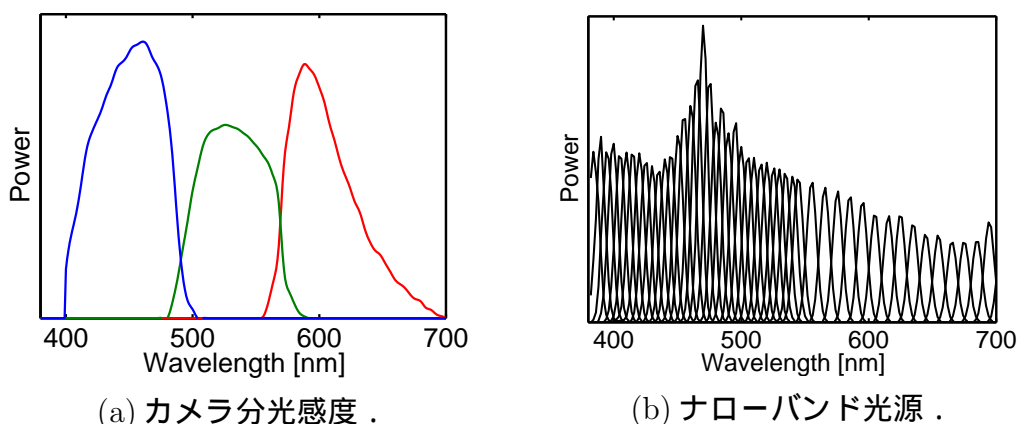


図 4.2: カメラ分光感度とナローバンド光源 .

トを用いた．測定毎に対象物体の横にホワイトマーカを置くことで，カメラ感度のキャリブレーションを行った．

4.1.2 真値測定

分光反射率・蛍光特性の真値の測定は次のように行った．蛍光物体に UV ライトを照射すると可視領域では蛍光成分しか観測されない．よって，蛍光発光特性は UV ライトとスペクトルメータを用いて測定した．分光反射率と蛍光吸収特性は Donaldson 行列を測定することで求めた．Donaldson 行列は，ナローバンド光源を 380-700 [nm] 区間において 5nm ごとに照射し，その観測強度と光源分光分布の比率から求めた．分光反射率は，この Donaldson 行列の対角成分とした．また Donaldson 行列の三角部分が蛍光成分であるため，観測側の長波長領域から蛍光吸収特性を求めた（図 4.3）．反射成分のみを含むサンプルの分光反射率については，ホワイト光源とスペクトルメータによる観測結果の比率から直接求めた．

4.1.3 理想光源と使用光源

式 3.33 より，最適な光源の作製を行った．光源基底には次のようなフーリエ級数を用いた．

$$e_k = \cos\left(\frac{k(\lambda - \lambda_0)}{K}\right) \quad (4.1)$$

ここで，基底の波長領域が 400-700nm になるよう $K = 300$ ， $\lambda_0 = 400$ とした．また，自由光源がおよそ 20nm ほどの間隔で波形を再現できることから，基底数は 16 とした．さらに，自由度を持つ基底数に対し最適化する要素数の方が圧倒的に多く，全てを最適化するには無理があったため，優先度の高い H_Σ ， F に対してのみ最適化を行った．これにより導出された理想光源が図 4.4(a) であり，反射成分行列 $[H_1 \ H_2 \ H_\Sigma]$ と蛍光成分行列 F が図 4.4(b) である． H_Σ がゼロ行列， F が対角行列に近づいていること

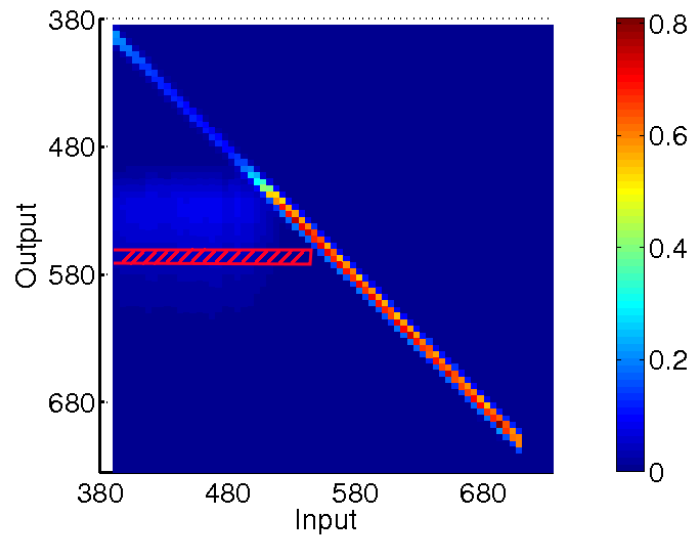


図 4.3: Donaldson 行列による真値測定.

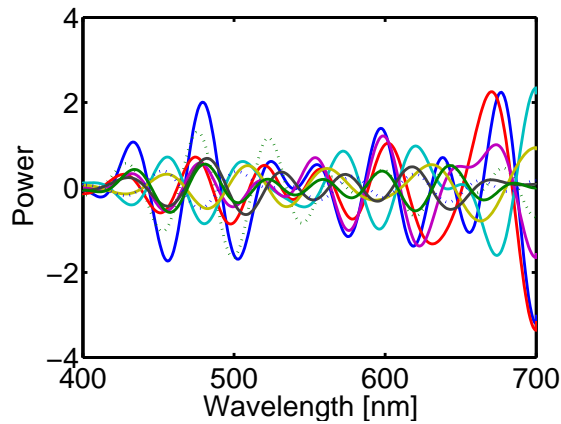
この図では，Output の 550nm 付近に蛍光発光のピークが見える．その波長より長波長側，例えば 570nm で赤斜線部のように Output 波長を固定すれば，Input 側から見た蛍光成分に蛍光吸収特性が現れる．

が確認できる．実際に光源を照射する際には負の値は出力できないため，ホワイト光源を全ての光源に足し，後でホワイト光源の撮影結果を各々引くことで補正することとなる．

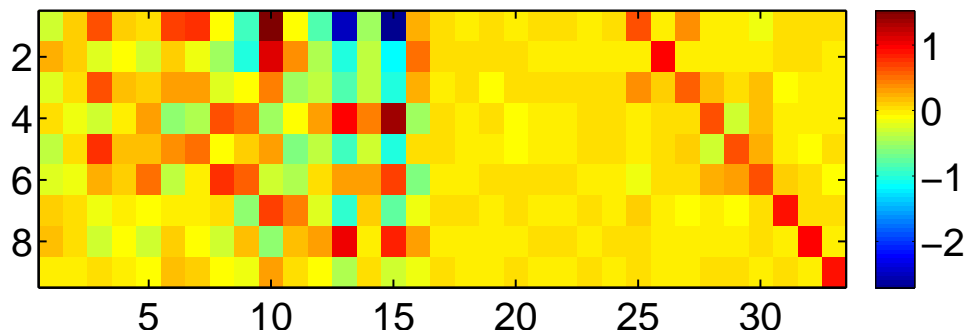
しかしながら，実際の機器でこの分光分布を出力すると，図 4.5(a) のようなズレが生じており予定通りの反射・蛍光行列を得ることができなかった．そこで，図 4.6(a) のような 13 種の適当な光源を準備した．図 4.6(b) がそれにより得られた反射・蛍光成分の行列である．非線形成分である H_{Σ} が非常に大きく出てしまっていることがわかる．今後理想光源の作成方法の見直しが求められる．

4.2 特性推定

前節で準備した光源を用いて，蛍光成分を含む様々なサンプルに対し特性推定を行った．サンプルには，図 4.7 のようなシート状のものを用いた．各式において，波長 λ の積分範囲は，反射成分では [420, 700 nm]，蛍光吸収成分では [380, 700 nm] とした．反射成分の範囲が若干狭いのは，[3] の反射率基底がこの範囲であったからである．



(a) フーリエ級数による理想光源.



(b) 理想光源により得られた行列.

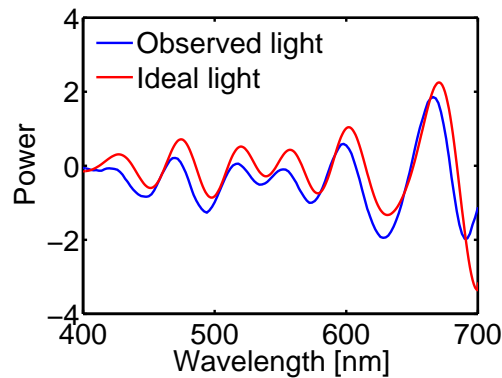
図 4.4: 理想光源とそれにより得られた行列.

行列は H_1 , H_2 , H_Σ , F を順に横に並べたもの. 左から 1-8 列目が H_1 , 9-16 列目が H_2 , 17-24 列目が H_Σ , 残りが F . H_Σ がゼロ行列に, F が対角行列になっていることがわかる.

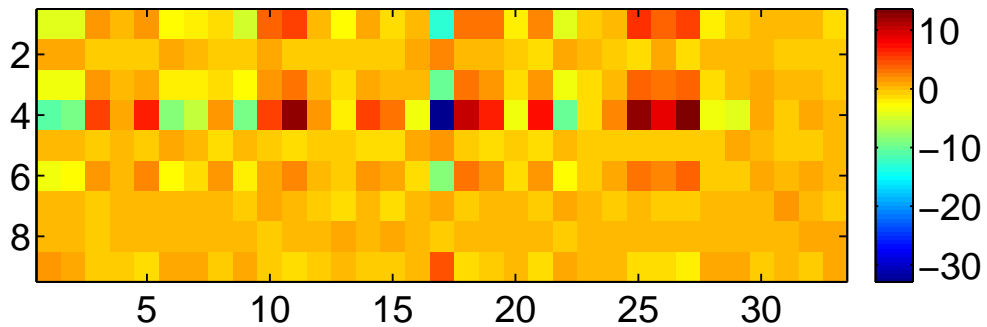
4.2.1 UV ライトを用いた推定

UV ライトを用いた推定手法について, 検証を行った. まず UV ライトをサンプルに照射し RGB カメラで撮影した. 得られた画像の各ピクセルにおける RGB 値の割合により, 蛍光色相を求めた. 次に, 図 4.6(a) の 13 種を光源として撮影を行い, 観測結果に式 3.38 を用いることでパラメータ推定を行った. パラメータ探索には, Matlab の `lsqlin` 関数を用いた. `lsqlin` 関数は, 範囲制約付き線形最小二乗法を行うのに適した関数である.

図 4.8(a) は式 3.38 の各拘束係数を動かした場合の推定反射率の RMS エラーの変化をプロットしたものである. 図 4.7(a) の 3 サンプルを対象とし, その RMS エラーの RMS を求めた. C_f , C_r とともに, 拘束係数が大きすぎても小さすぎても RMS エラーが増大していることがわかる. これは, 拘束係数が小さすぎると拘束条件が意味をなさなくなり, 大きすぎるとオーバーフィッティングが生じていることによる. このような



(a) 理想光源と実際に生成した光源の比較.



(b) 測定結果から得られた行列.

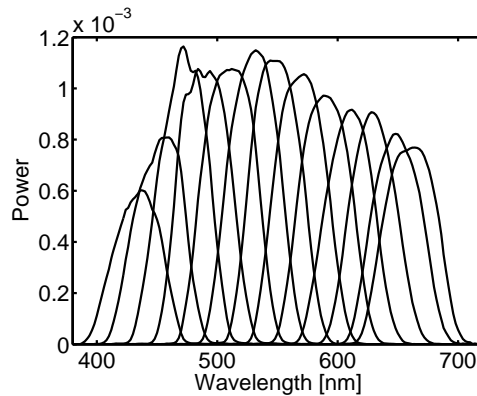
図 4.5: 理想光源を実際に生成した結果.

特に4番目の光源が著しくずれており、行列条件が悪化する原因となっている。その他光源も、波長方向でのずれや振幅の変化に対応できていない箇所が見受けられる。

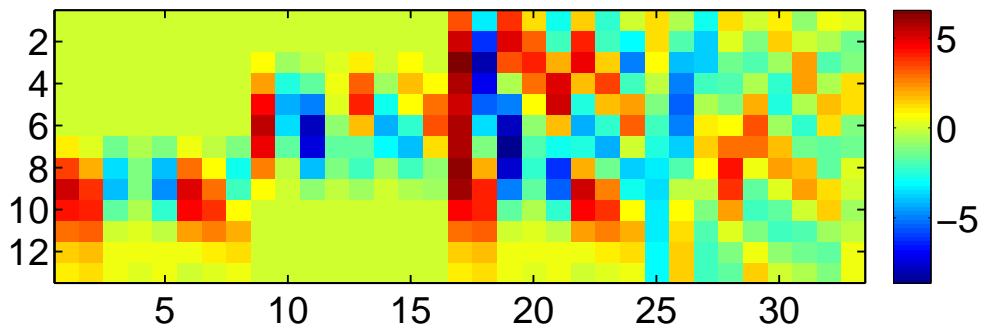
探索によって、推定反射率の RMS エラーが小さくなるよう適当な拘束係数を決定した。図 4.8(b) は反射成分のみを持つ物体に対し、拘束係数 C_r を変化させた場合の反射率 RMS エラーの変化である。図 4.8(a) と同様の傾向が見られるが、蛍光成分が存在する場合と比べて拘束係数に対し安定している。このことより、3.38 により推定されるパラメータは安定性が十分でないことがわかる。この問題は、最適光源の利用により改善が見込めると思われる。

図 4.9 は、 $C_r = 2000$ 、 $C_f = 0.5$ として式 3.38 および拘束条件 3.40 を用いて特性推定を行った結果である。拘束係数 $C_s = 1000$ とした。ストークスシフト拘束なしの場合は、推定された蛍光吸収特性が真値よりも長波長側に伸びていることが確認できる。ストークスシフト拘束なしでは波長領域において、蛍光吸収・発光特性が互いに独立なパラメータとなっている。そのため、測定に伴う誤差や光源条件が最適でないことなどにより、反射と蛍光吸収・発光の混同が生じてしまうと考えられる。

ストークスシフト拘束によって上記の問題は改善されたが、分光反射率に関してはむしろ精度が悪化しているサンプルも見られる。原因としては、蛍光吸収特性がバランスを取ることで相殺されていた観測誤差などによる誤差成分が、ほとんど分光反射



(a) 使用光源.



(b) 光源により得られた行列.

図 4.6: 使用光源とそれにより得られた行列 .
適当に選んだ光源のため, 各行列もランダムな分布を示している .

率で釣り合いを取らなければならなくなったからであると考えられる .

4.2.2 可視光源と RGB カメラを用いた推定

UV ライトを用いず, 蛍光色相も未知として式 3.38 および拘束条件 3.40 による特性推定を行った . ここでの推定は非線形最小二乗法を用いており, 解の探索には初期値を必要とし, その初期値に探索結果は依存する . そこで, 次のようなステップにより解探索を行った . 拘束係数は前節と同様とした

1. 蛍光色相 E_n を固定し, ストークスシフト拘束も用いなければ線形最小二乗法となる . 固定する値をグリッド状に動かし, 3.38 のスコアが最も良くなる E_n と探索解を初期値とした . E_n は区間 $[0,1]$ において重なりの無いよう 0.1 ずつ動かした . 探索には Matlab の lsqin 関数を用いた .
2. 上で求めた初期値を用い, 式 3.38, 拘束条件 3.40 により解を探索した . 探索には Matlab の fmincon 関数を用いた . fmincon 関数は制約付き非線形式を解くのに適した関数である .

表 4.1: 蛍光色相推定結果 .

サンプル	E_1 真値	E_1 推定値	E_2 真値	E_2 推定値
Yellow	0.22	0.22	0.76	0.78
Orange	0.98	0.99	0.02	0.01
Red	0.99	1.00	0.01	0.00
DIC595	0.89	0.94	0.09	0.04

表 4.1, 図 4.10 は, 各特性の推定結果である. 従来法との比較として, 蛍光を考慮しない手法 [33] を用いた分光反射率の推定も行った. 図 4.10 より, 蛍光を無視した場合においても, 最小二乗を計算することである程度真値に近い分光反射率が推定されている. ただし, 蛍光成分が存在する波長領域で推定結果が正方向に引っ張られていることが見て取れる. それに対し, 提案手法はより良い推定が行えており, 蛍光吸収スペクトルについても, 真値の波長領域に対応したスペクトルが推定できていることがわかる. 蛍光色相も, 誤差 0.05 以下の範囲で推定が行えていた.

4.2.3 各手法の推定精度の比較

より定量的な評価を行うため, 分光反射率について, サンプルに含まれる蛍光成分の割合に応じて, 提案手法と従来手法の推定精度がどのように変化するかを調査した. 蛍光成分の割合 ν としては, 白色光源下での全成分に対する蛍光成分の比率, すなわち

$$\nu = \frac{\int A(\lambda)d\lambda \int E(\lambda)d\lambda}{\int s(\lambda)d\lambda + \int A(\lambda)d\lambda \int E(\lambda)d\lambda} \quad (4.2)$$

を用いた. 図 4.11 は, 図 4.7 のサンプルに対し, 横軸を蛍光割合, 縦軸を分光反射率の RMS エラーとした場合の結果である. ただし UV ライトあり手法の結果には, 線形計算であるメリットを失わせないためにストークス拘束を用いない場合の結果をプロットに採用した. 提案手法では, 蛍光割合が増加してもエラーに大きな変化がみられないことがわかる. 一方, 従来手法のエラー値は, 蛍光割合が増加するにつれて増加する傾向が見られた. 従来手法の結果については, サンプルの分光反射率と蛍光特性の分布によって異なる結果が得られる可能性もあるが, 今回観察された傾向は理にかなっていると思われる.

4.3 リライティング

一般的なシーンに対して, 各ピクセルにおける分光反射率と蛍光特性を推定し, 任意の光源下での見えを復元するリライティングを試みた. 光源として用いた 13 種のうち, G チャネル付近の光源を除く 12 種でパラメータ推定を行い, 推定から除いた光源, 均一白色光源, そして蛍光灯の 3 種をシーンの光源として復元に用いた. シーンの大

きさは縦 120 ピクセル，横 90 ピクセルとした．真値は，復元に用いる光源で照らしたシーンを撮影することで用意した．

UV ライトを用いた手法と蛍光を無視した手法は線形計算であるので，合計約 1 万ピクセルの推定もおおよそ 5~20 分程度で完了した．一方 UV ライトを用いない手法では，1 ピクセルあたり初期値探索に 7 秒，最適化に 3 秒をパラメータ推定に要した．すなわち 1 万ピクセルでは約 30 時間がリライティングに必要となる．実際には似たような輝度値を持つピクセルも多く存在し，計算コストを削減できることが予想された．そこで似た画素値を持つピクセルをクラスタリングし，代表値のみに対して特性推定を行う手法を試みた．具体的なクラスタリングによるシーン復元は以下のように行った．クラスタリングに k-means を用いたのは，実装が単純であったからである．

1. 12 光源下で観測された RGB 値をまとめ，ピクセルごとに 36 次元ベクトルを作る．
2. 36 次元ベクトルの L2 ノルムから図 4.12(a) のような明るさマップを作成し，各ベクトルは L2 ノルムで正規化する．ただし，L2 ノルムが非常に小さいピクセルについてはシーン復元から除外する．
3. 正規化ベクトルを図 4.12(b) のように k-means によりクラスタリングする．
4. クラスタ代表値のみ特性推定を行い，推定結果（図 4.12(c)）に明るさマップを掛けることで復元する．

図 4.13 は緑色光源を用いて復元したシーンの結果である．蛍光を無視した手法では，緑色光源下では反射のみでは生じ得ない赤色成分が表現できていないことがわかる．一方，3 種の提案手法による結果は全て蛍光色による赤色成分を再現できている．クラスタリングによる復元は他の 2 つの提案手法結果と比較してやや絶対誤差が大きいものの，復元に要した時間は 10 分程度と十分なメリットがある．

図 4.14 は白色光源を用いて復元したシーンの結果である．白色光源の場合にも，絶対誤差の生じ方は緑色光源の場合とほぼ同様である．実際には蛍光色によって赤色が表現されていた部分は同時に反射による赤色を含むため，白色光源の場合には蛍光を無視した手法でもある程度蛍光色を再現できている．しかし蛍光色の持つ鮮やかな質感は提案手法によってのみ感じられる結果となっており，可視領域全体に分布する光源下においても，提案手法がシーン復元に有効であることが示された．

図 4.15 は蛍光灯の分光分布を用いて復元したシーンの結果である．蛍光灯は暗室上部に取り付けてあり光源の位置が異なるため，図 4.15(b) はあくまでも参考画像である．復元結果からわかるように，このように均一ではなく特定の波長にピークを持つ光源¹の場合でも，白色光源とほぼ同じシーンが求められている．蛍光吸収特性はある程度広い領域に滑らかに分布しているため，光源にピークが存在することで偶然蛍光成分が非常に強くなることは生じにくかったためと思われる．参考画像と復元結果から，光源の位置の違いによる見えの変化は非常に大きく，位置関係を含めたシーンの再現の必要性を感じることができる．こうした見えの変化は，キャストシャドウ，物体

¹ 蛍光灯も，放電によって生じる紫外線を蛍光物体に照射することで発光している．そのためこのようなある特定の波長にピークをもつ分光分布となっている．

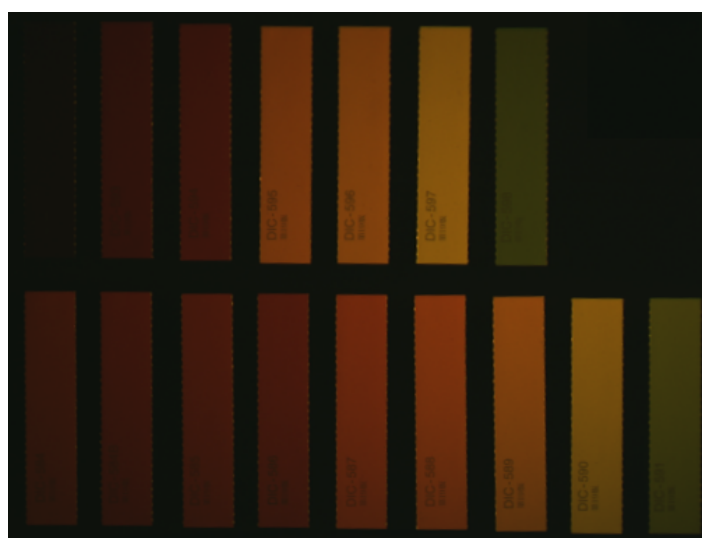
表面の法線と光源の角度，そして鏡面反射が関係している．蛍光を含む場合に位置関係を含めて見えをどのようにモデル化できるのか考えていきたい．

次に，UV なし手法で推定した蛍光成分と，UV 光を照射した場合の観測結果を比較した．図 4.16(a) は UV ライトを照射したシーンであり，UV 利用手法において蛍光色相の決定に用いた画像である．図 4.16(b) は白色光源で復元された画像の蛍光成分を取り出したものである．復元された画像のうち，けん玉の玉の部分がほぼ赤成分となっており，緑成分が少ない結果になっているものの，その他箇所については概ね UV ライトを照射した画像と同じ結果となっている．このことは，図 4.14(e) の絶対誤差の結果とも一致しており，蛍光色相の誤推定が緑成分の誤差を生み出していることがわかる．けん玉のヒモの部分の青成分も復元できていないが，これは UV ライト自体にやや青成分が含まれているか，もしくは紫外線領域の蛍光吸収を復元できていないことにより再現できなかったと考えられる．蛍光吸収特性のデータベースは紫外線領域も存在するため，より短波長側まで基底を作ることが可能である．しかしながら，推定には紫外線領域も出力できる光源機器が必要であるため，今回は推定不可能であった．今後，機器自体を準備するか，可視領域光源のみから紫外線領域の蛍光吸収特性を推定するアルゴリズムの考案が必要である．

最後に，緑色・白色光源における真値と復元結果の絶対誤差が各種法でどの程度異なるのか検証した．図 4.17 は各手法の RGB チャネルでのピクセル RMS 誤差をプロットした結果である．今回対象としたシーンに含まれる蛍光成分は R チャネルのものが多く，従来手法の赤チャネル誤差の値が大きいのは，この蛍光成分に由来する．一方，GB チャネルは各種法においてほとんど変化がない．反射成分を推定する際に生じる推定誤差の中に，蛍光成分による変化が埋もれてしまったためであると考えられる．またポイントとして，UV ライトを用いた手法には今回ストークスシフト拘束を用いていないにも関わらず，誤差が UV なし手法と同程度であることが挙げられる．これは，緑色光源のシーンでは光源より長波長側での反射・蛍光の混同を受けなかったと考えられる．また白色光源のシーンでは，反射成分が蛍光成分と誤認識されても，復元されたシーンはその和であるため大きな影響を受けなかったと考えられる．今後，反射・蛍光成分の分離の意義についても考えていきたい．

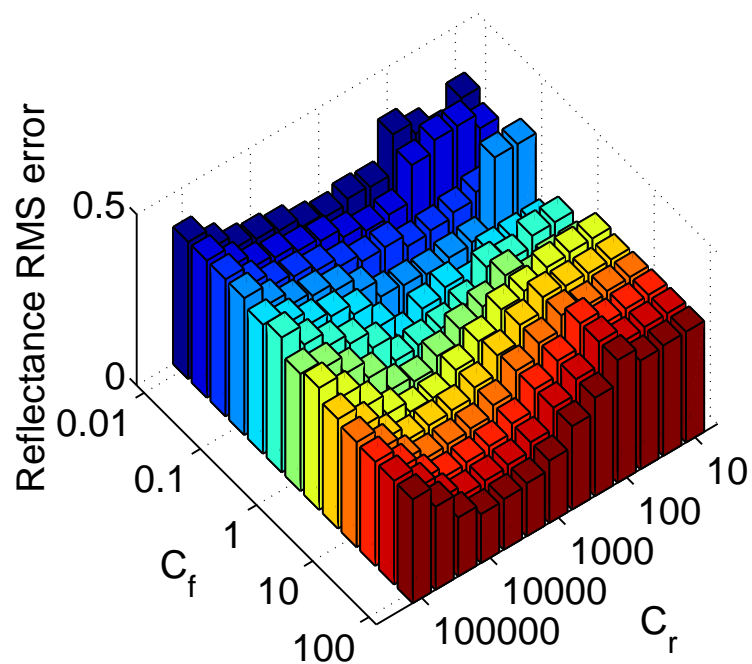


(a) 強い蛍光吸収特性を持つサンプル

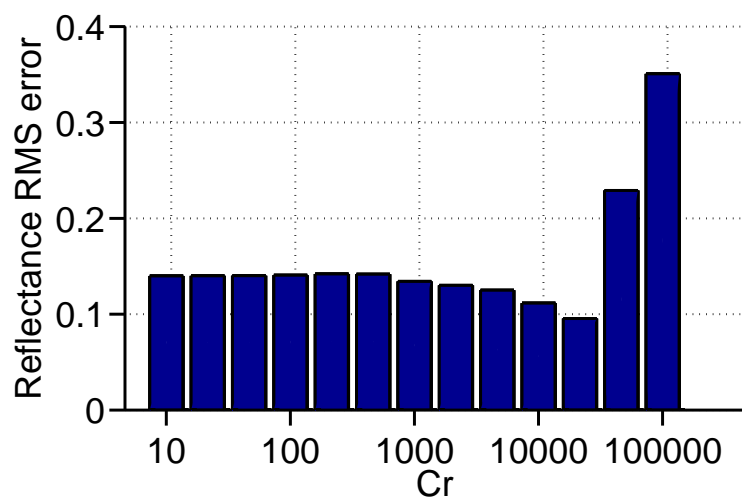


(b) 弱い蛍光吸収特性を持つ，もしくは蛍光成分を持たないサンプル

図 4.7: サンプル.

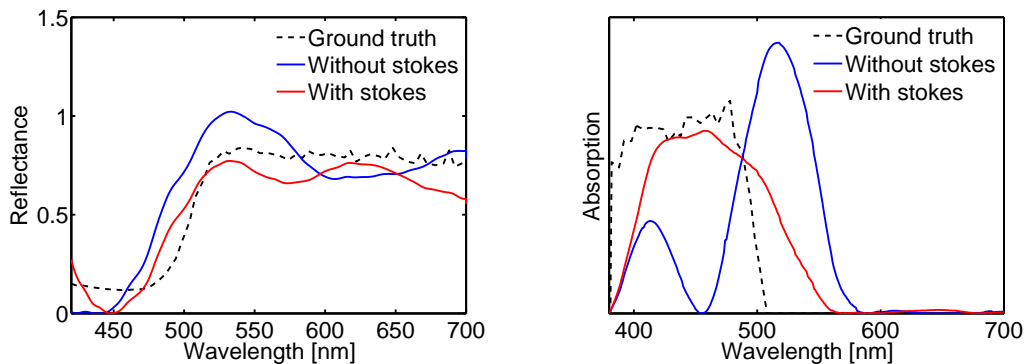


(a) 拘束係数と推定反射率 RMS エラー（蛍光物体，UV ライト使用）

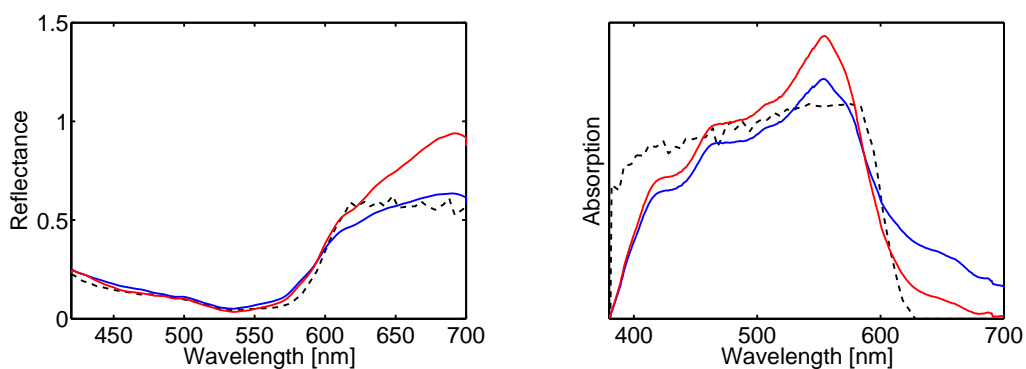


(b) 拘束係数と推定反射率 RMS エラー（反射物体）

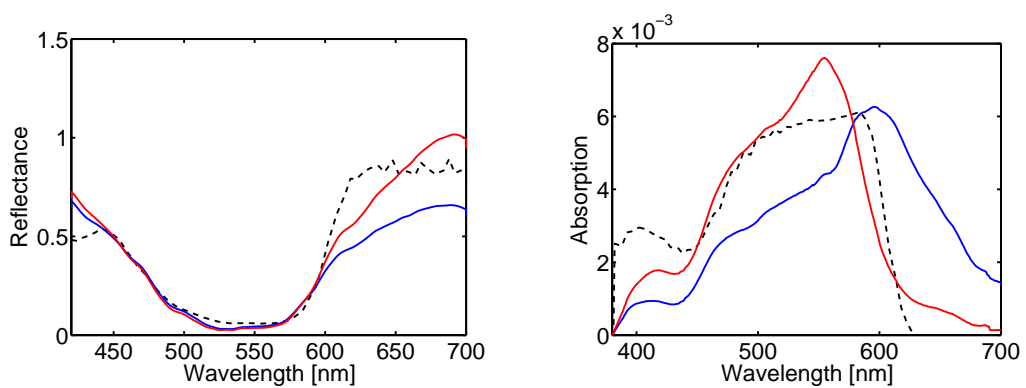
図 4.8: 拘束係数と推定反射率 RMS エラー．
拘束係数が大きすぎても小さすぎても推定精度は低下することがわかる．



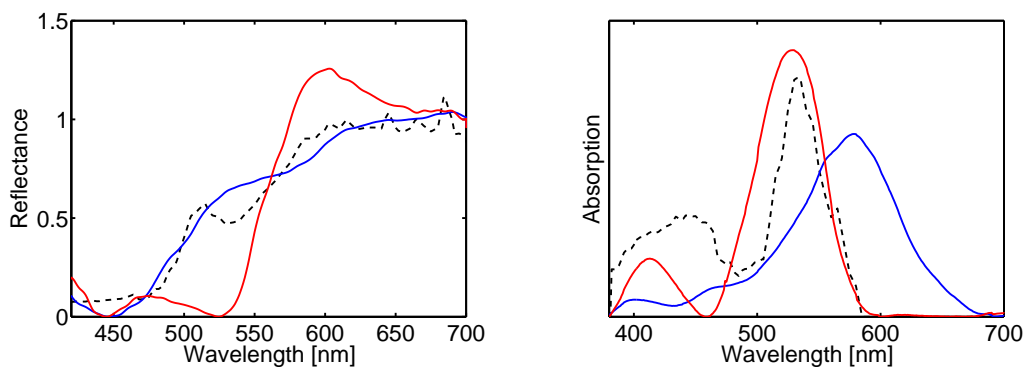
(a) 黄色サンプル (図 4.7(a) 左下)



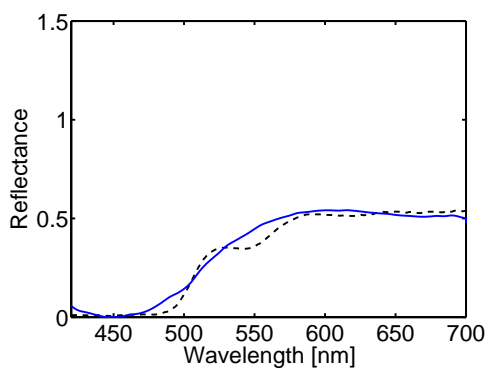
(b) 橙サンプル (図 4.7(a) 中央)



(c) 赤サンプル (図 4.7(a) 右下)

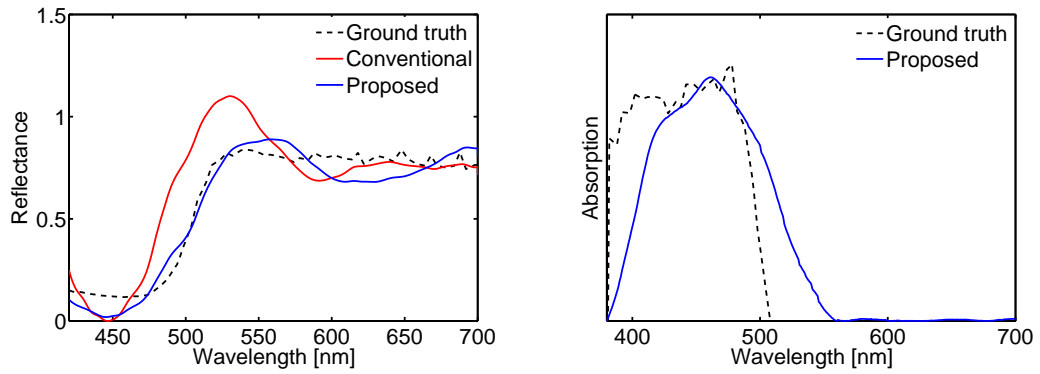


(d) 蛍光成分が少量のサンプル (図 4.7(b) 上段中央)

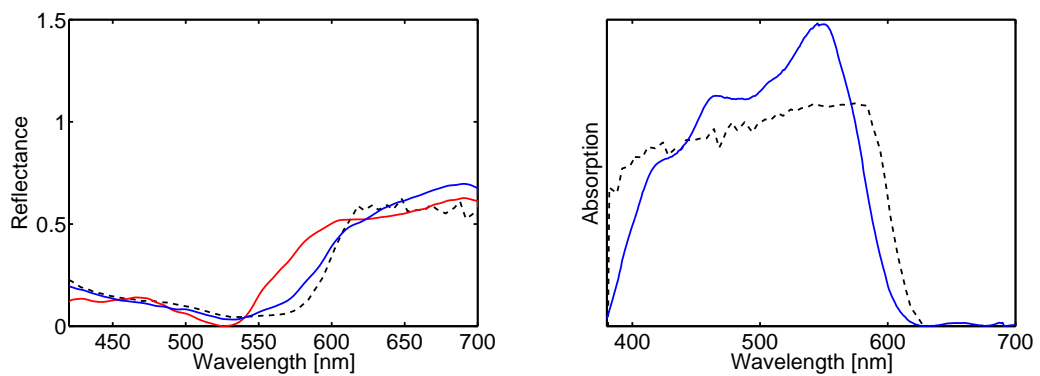


(e) 反射成分のみサンプル (図 4.7(b) 下段中央)

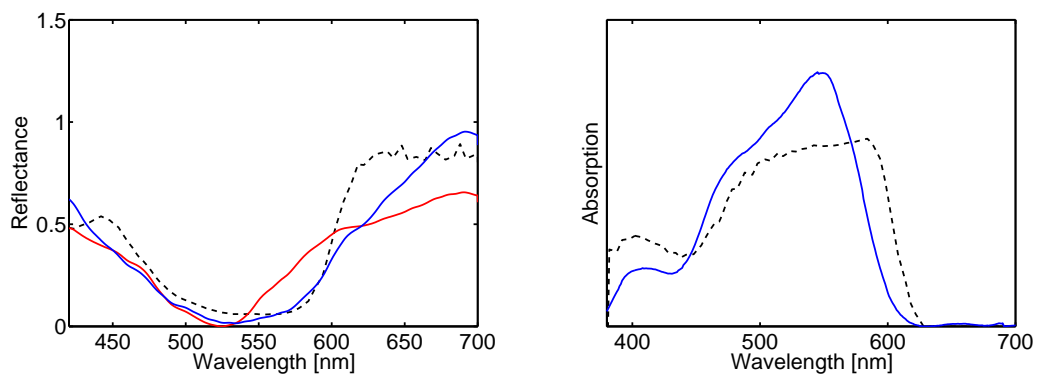
図 4.9: UV ライトを使用した分光反射率・蛍光吸収特性の推定結果。
 黒点線：真値．青実線：ストークスシフト拘束なし．赤実線：ストークスシフト拘束あり．



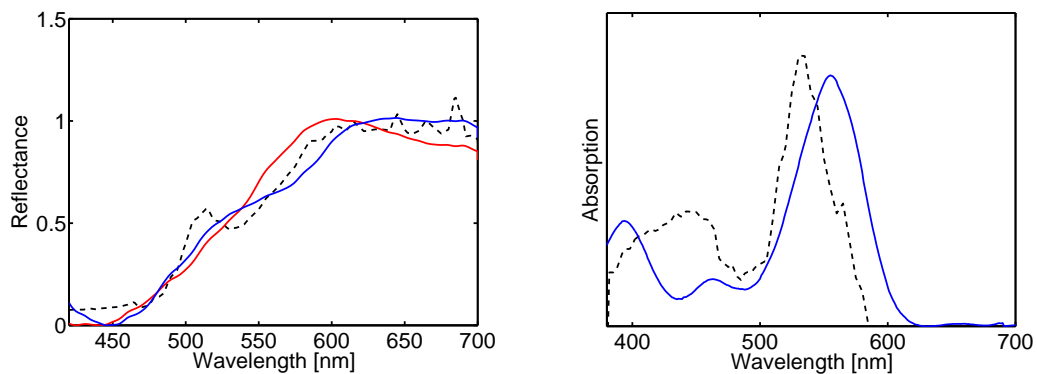
(a) 黄色サンプル (図 4.7(a) 左下)



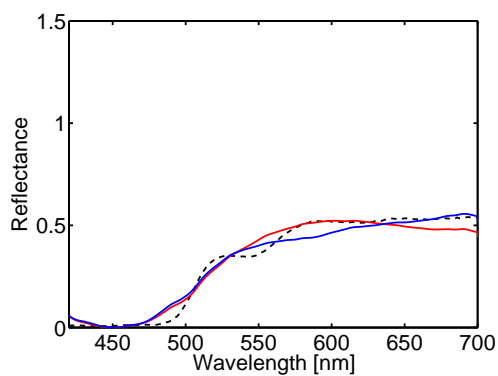
(b) 橙サンプル (図 4.7(a) 中央)



(c) 赤サンプル (図 4.7(a) 右下)



(d) 蛍光成分が少量のサンプル (図 4.7(b))



(e) 反射成分のみサンプル (図 4.7(b))

図 4.10: 分光反射率・蛍光吸収特性の推定結果 .

黒点線 : 真値 . 青実線 : 提案手法による推定結果 . 赤実線 : 蛍光を無視した手法による推定結果 .

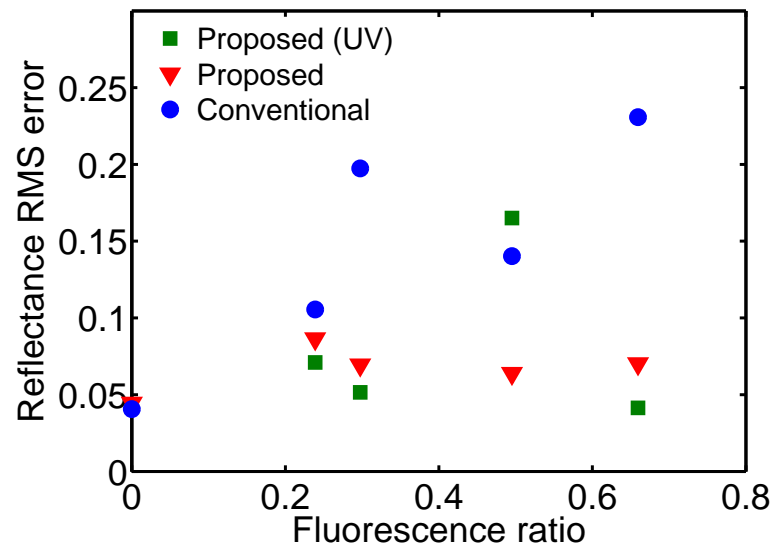


図 4.11: 蛍光割合に対する分光反射率推定の RMS エラー .
 緑四角 : UV を利用した提案手法 . 青丸 : UV を利用しない提案手法 . 赤三角 : 蛍光を考慮しない従来手法 .



(a) クラスタリング

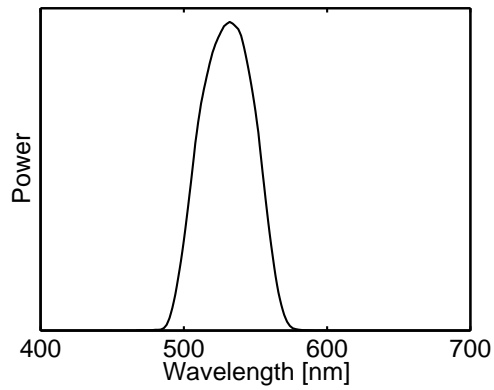


(b) 明るさマップ

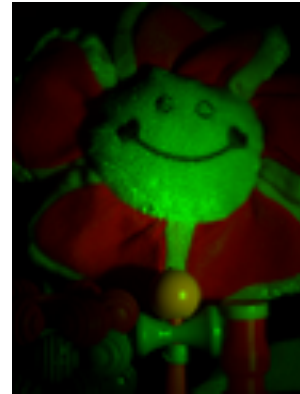


(c) 代表値を用いた推定

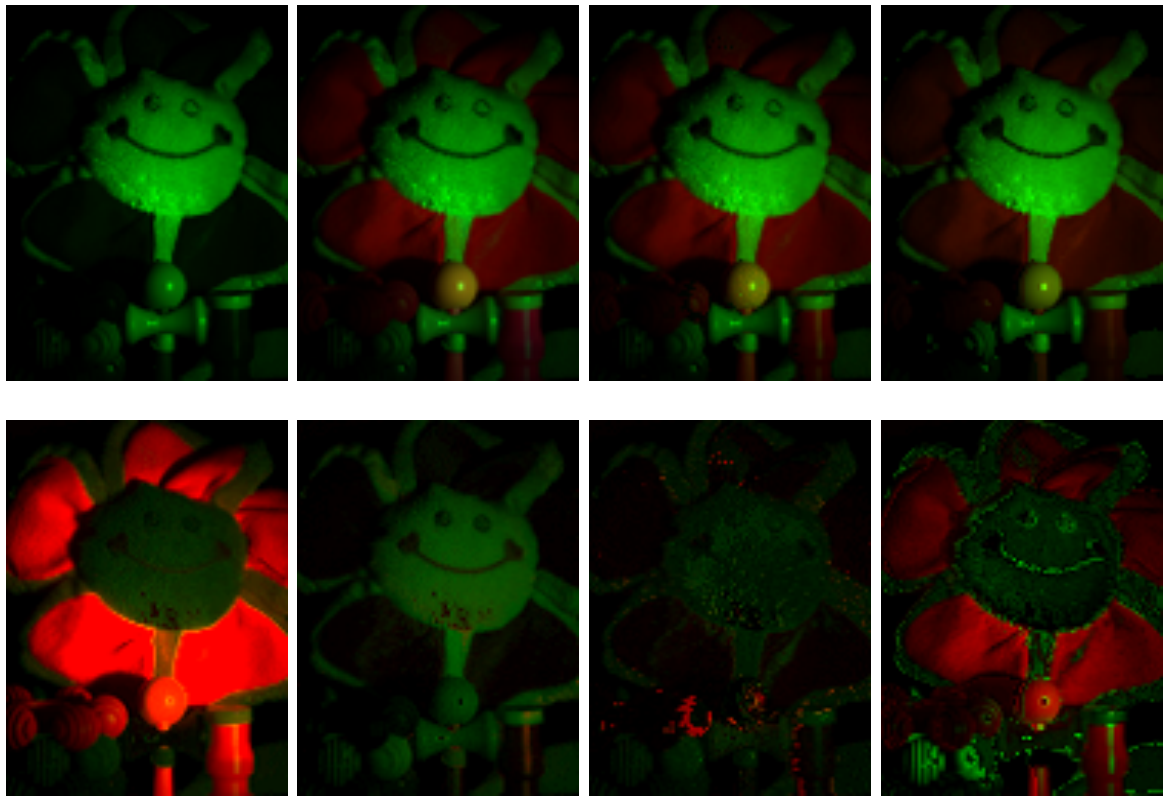
図 4.12: クラスタリングの各マップ .
 (a) はクラスタ番号 $\times 5$ を輝度値とした .



(a) 緑色光源



(b) 真値



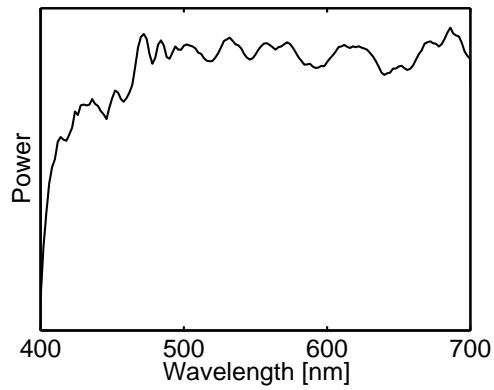
(c) 蛍光無視手法

(d) UV 利用手法

(e) UV なし手法

(f) クラスタリング

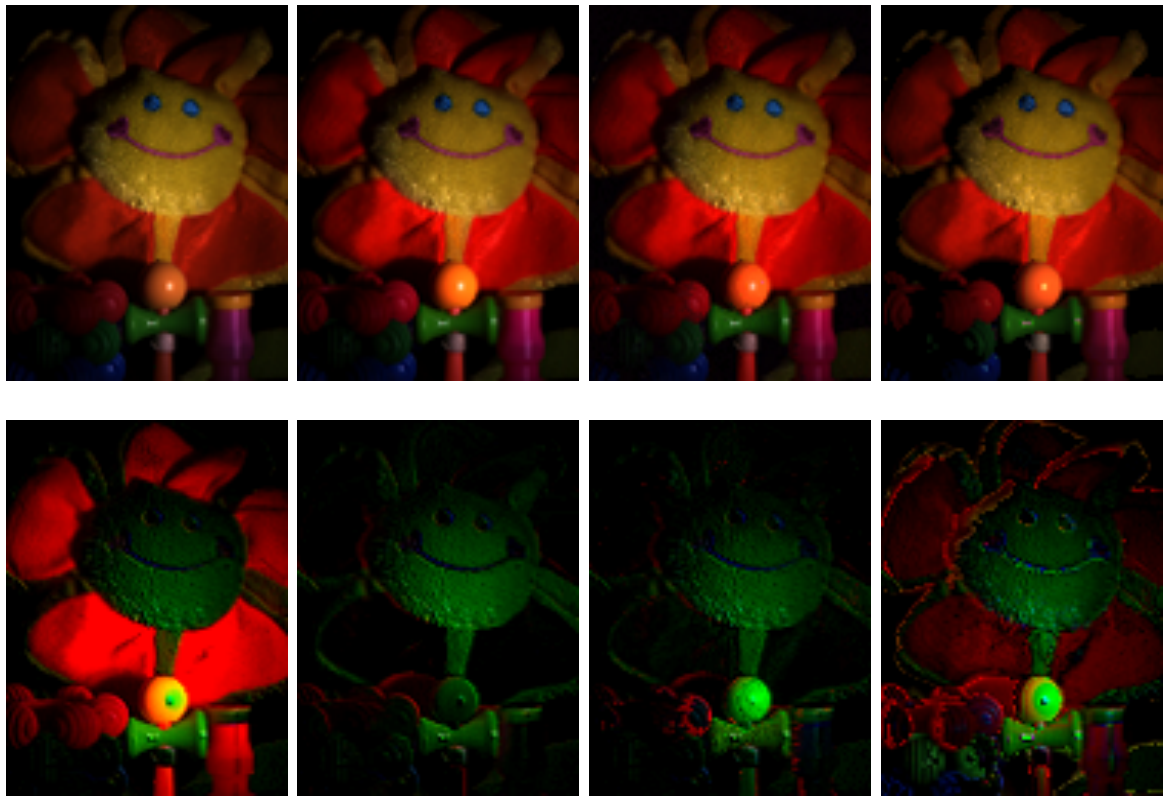
図 4.13: 緑色光源によるリライティング結果と輝度値の絶対誤差。
 上段: リライティング結果。下段: 輝度値の絶対誤差を 5 倍にした誤差マップ。蛍光無視の手法では蛍光色である赤成分が復元できていないのに対し, 提案手法によって改善されていることがわかる。



(a) 白色光源



(b) 真値



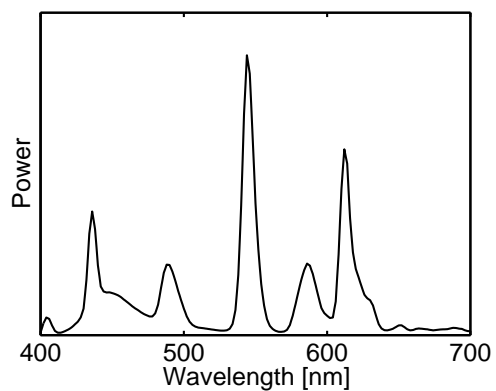
(c) 蛍光無視手法

(d) UV 利用手法

(e) UV なし手法

(f) クラスタリング

図 4.14: 白色光源によるリライティング結果と輝度値の絶対誤差。
 上段: リライティング結果。下段: 輝度値の絶対誤差を 5 倍にした誤差マップ。蛍光無視の手法でも反射成分として蛍光色の赤成分もある程度復元されているが、提案手法によってより鮮やかに復元できている。



(a) 蛍光灯



(b) 参考画像



(c) 蛍光無視手法

(d) UV 利用手法

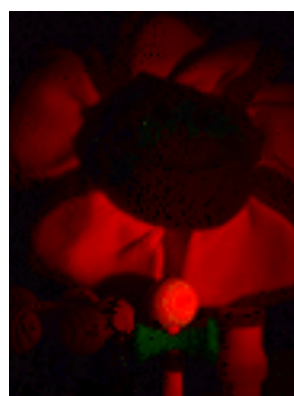
(e) UV なし手法

(f) クラスタリング

図 4.15: 蛍光灯によるリライティング結果。
参考画像と復元画像は照明方向が異なる。

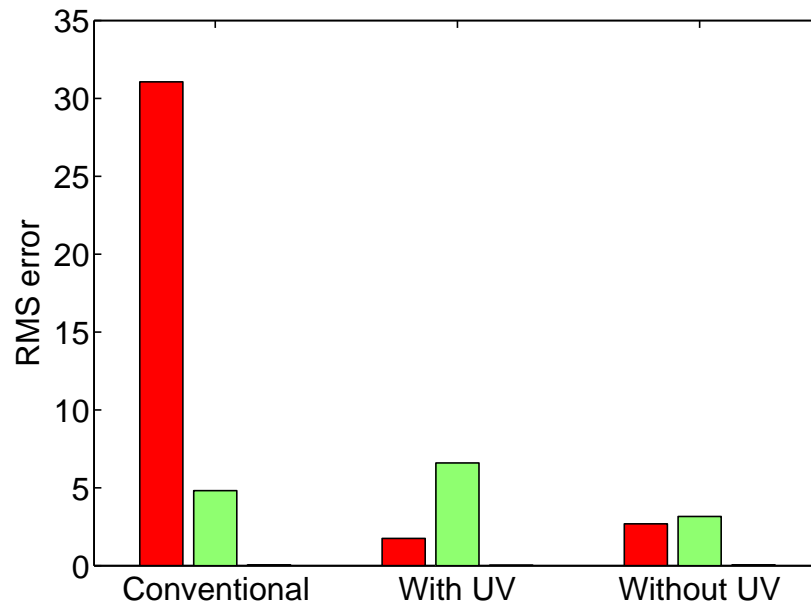


(a) UV ライトを照射したシーン

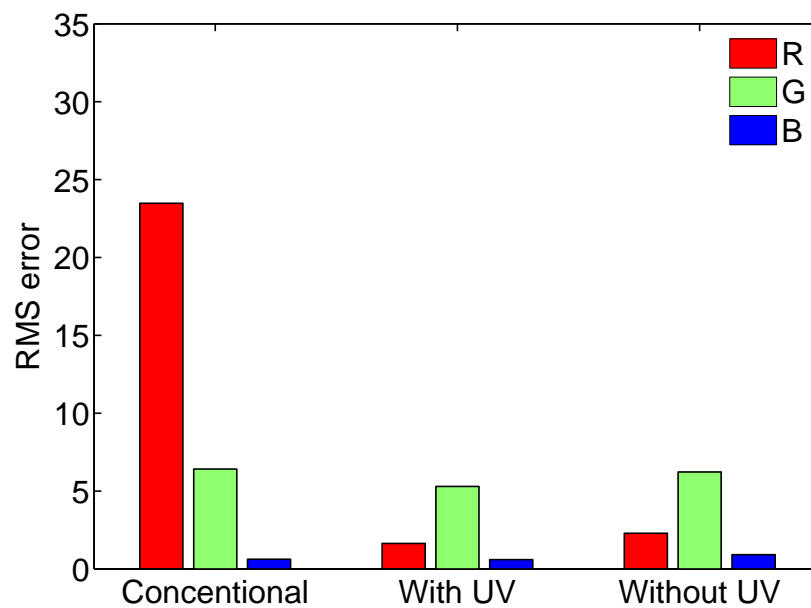


(b) 白色光源における推定蛍光成分

図 4.16: 蛍光成分の比較。



(a) 緑色光源における RMS エラー



(b) 白色光源における RMS エラー

図 4.17: 各手法のシーン復元精度比較 .

第5章

結論

5.1 結論

本稿では，RGB カメラと複数光源を用いることで，蛍光物体の特性を推定する手法を提案した．必要な画像枚数は最低 9 枚，実際には 10 枚程度であり，スペクトルメータや特殊な観測機器も必要としない．これにより，ピクセル毎の容易な反射・蛍光特性推定が可能となった．

我々は，分光反射率と蛍光吸収特性に基底表現を導入し，観測強度を双線形方程式でモデル化することで，従来手法よりも推定すべきパラメータを削減した．そして，分光分布が既知の複数光源下で撮影した画像群から，分光反射率と蛍光特性を全て推定するアルゴリズムを導出した．提案手法の有効性は，様々な蛍光サンプルに対する精度評価や，光源に対応したシーンの復元を行うことで確認された．

UV ライトを用いた手法では，UV ライトを用いる手法と比較して蛍光色相の推定エラーと計算時間を抑えることができた．また，UV ライトを用いることができない状況においても，可視光源のみによって分光反射率・蛍光特性全てを推定することが可能である．これら 2 種の提案手法による分光反射率の RMS エラーは 0.05 程度，また任意の光源下においてカラー画像を復元した場合の絶対 RMS エラーは各チャンネルで約 5 以下という結果が，今回の実験環境で得られた．この精度は十分実用に耐えるものであると思われる．

5.2 課題と展望

一方，計算コストの増大や，鏡面反射・相互反射の悪影響を受けるという課題が残っている．現時点では，計算コストと推定精度はトレードオフの関係となっており，推定精度を落とすことなく計算コストを減らす方法を模索する必要がある．また，推定された蛍光色相はカメラ分光感度を含んだ形のものであり，蛍光発光スペクトルは未知のままである．蛍光発光特性にも基底表現を導入することで，スペクトルも推定できると考えられる．さらに，光源には独自に生成した特殊なものを用いている．より普遍的な光源の選択や，光源数の削減といったことも，今後検討していきたい．

最適な光源選択と解の一意性については十分な証明ができておらず，未だ議論する余地のある所である．また今回作成した最適光源は，実際には再現できないという結

果となった。デバイスの再現能力を含めた、別のアプローチが必要であるかもしれない。さらに、カメラ、対象物体、光源の幾何学的位置関係は固定していたが、これらが変化した場合にもモデルを拡張することが可能であると考えられる。蛍光という発色モデルを考慮した物体色の理解・応用の今後の発展を期待する。

謝辞

本論文は、東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学コースの修士研究として行われた2年間の研究の成果をまとめたものです。研究の進行および論文の執筆に際しては、多くの方々にご助力いただきました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

本研究は、東京大学生産技術研究所戦略情報融合国際研究センターの佐藤洋一教授のもとで行われました。佐藤先生には、指導教官として研究の道筋を示していただくと同時に、共同研究者として、日頃から活発なディスカッションをさせていただきました。ミーティングや発表練習での先生のアドバイスを通して、その研究の意義と本質は何なのか、これを考えることの重要性を学びました。今後の人生においても、常に心に留めておきたいと思います。

国立情報学研究所准教授の佐藤いまり先生には、蛍光という面白いテーマをいただいただけではなく、実験の準備や指導に至るまで幅広いサポートをしていただきました。また研究に行き詰まった際、それを打破する多くの糸口をいただきました。

東京大学生産技術研究所特任准教授の岡部孝弘先生には、日々の研究進捗に対して丁寧にご指導いただきました。また、理論や考え方の妥当性について深くアドバイスをいただき、自らの理解に対する未熟さを感じると同時に、厳密な議論をすることの楽しさを知ることができました。

東京大学生産技術研究所特任助教授の菅野裕介さんには、多岐に渡る分野に対する質問に答えていただいただけでなく、私の気の緩みに喝を入れて下さるなど、人間としての成長を促していただきました。

東京大学生産技術研究所特任助教授の松川徹さんには、陰影除去に関する知識や研究の進め方へのアドバイスだけでなく、論文執筆やモデルの検討に行き詰まったときなど、快く相談に乗っていただき、多くの時間を割いて指導していただきました。

共に学び、ときに切磋琢磨してきた東京大学大学院の同期の友人たちにも感謝しています。ちょっとした疑問や新しいアイデアについてこれほど深く議論し、また意見をぶつけることができる友人と出会うことは、今後なかなかないことだと思います。日頃の研究生活を共にした佐藤研究室の皆様にも大変お世話になりました。毎日がとても楽しく、過ぎ去った日々がほんの少し前のことのように思い出されます。

ここに書ききれない多くの友人たちの協力、多くの先生方のご指導によって本論文を完成させることができました。この場を借りて、深く御礼申し上げます。

小橋 泰之

参考文献

- [1] E. Land, “The retinex,” *American Scientist*, pp.247–264, 1964.
- [2] L.T. Maloney, and B.A. Wandell, “Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance,” *JOSA A*, vol.3, no.1, pp.29–33, 1986.
- [3] J.P.S. Parkkinen, J. Hallikainen, and S. Kuopio, “Characteristic spectra of munsell colors,” *JOSA A*, vol.6, no.2, pp.318–322, 1989.
- [4] S. Tominaga, “Multichannel vision system for estimating surface,” *JOSA A*, vol.13, no.11, 1996.
- [5] C. Chi, H. Yoo, and M. Ben-Ezra, “Multi-spectral imaging by optimized wide band illumination,” *IJCV*, vol.86, no.2-3, pp.140–151, nov 2008.
- [6] K. Barnard, and B. Columbia, “Color constancy with fluorescent surfaces,” In *Proc. CIC*, pp.257–261, 1999.
- [7] S. Han, Y. Matsushita, I. Sato, and T. Okabe, “Camera spectral sensitivity estimation from a single image under unknown illumination by using fluorescence,” In *Proc. CVPR*, 2012.
- [8] M. Alterman, Y. Schechner, and A. Weiss, “Multiplexed fluorescence unmixing,” In *Proc. ICCP*, pp.1–8, march 2010.
- [9] S. Shafer, “Using color to separate reflection components,” *Color Research & Application*, vol.10, no.4, pp.210–218, 1985.
- [10] F. Nicodemus, J. Richmond, and H. J.J., *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*, vol.160 National Bureau of Standards, 1977.
- [11] R. Gershon, and A. Jepson, “The computation of color constant descriptors in chromatic images,” *Color Research & Application*, vol.14, no.6, pp.325–334, 1989.
- [12] S. Lombardi, and K. Nishino, “Reflectance and natural illumination from a single image,” In *Proc. ECCV*, pp.582–595, 2012.
- [13] G. Buchsbaum, “A spatial processor model for object colour perception,” *Journal of the Franklin institute*, vol.310, no.1, pp.1–26, 1980.

- [14] J. DiCarlo, and B. Wandell, “Spectral estimation theory: beyond linear but before bayesian,” *JOSA A*, vol.20, no.7, pp.1261–1270, 2003.
- [15] S. Han, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, “Fast spectral reflectance recovery using dlp projector,” In Proc. ACCV, pp.323–335, 2011.
- [16] S. Tominaga, and T. Horiuchi, “Spectral imaging by synchronizing capture and illumination,” *JOSA A*, vol.29, no.9, p.1764, 2012.
- [17] Y. Monno, M. Tanaka, and M. Okutomi, “Multispectral demosaicking using guided filter,” In Proc. Electronic Imaging, vol.8299, pp.82990–1, 2012.
- [18] J. Lichtman, and J. Conchello, “Fluorescence microscopy,” *Nature Methods*, vol.2, no.12, pp.910–919, 2005.
- [19] A. Springsteen, “Introduction to measurement of color of fluorescent materials,” *Analytica chimica acta*, vol.380, no.2, pp.183–192, 1999.
- [20] C. Zhang, and I. Sato, “Separating reflective and fluorescent components of an image,” In Proc. CVPR, no.20-25 June 2011, pp.185–192, 2011.
- [21] A. Wilkie, A. Weidlich, C. Larboulette, and W. Purgathofer, “A reflectance model for diffuse fluorescent surfaces,” In Proc. GRAPHITE, pp.321–331, 2006.
- [22] R. Donaldson, “Spectrophotometry of fluorescent pigments,” *BJAP*, vol.5, no.6, pp.210–214, 1954.
- [23] B. Lee, F. Shen, and C. Chen, “Spectral estimation and color appearance prediction of fluorescent materials,” *SPIE Opt. Eng.*, vol.40, no.10, pp.2069–2076, 2001.
- [24] 卓也中島, 昌治富永, “カメラ画像を用いた蛍光物体の分光反射率推定,” *日本色彩学会誌*, vol.30, pp.74-75, 2006.
- [25] 慧一内山, 時也阿部, 秀昭羽石, “蛍光を含む反射物体の反射・発光特性の推定と色再現性,” *映像情報メディア学会技術報告*, vol.32, no.34, pp.57-60, 2008.
- [26] I. Tominaga, T. Horiuchi, and T. Kamiyama, “Spectral estimation of fluorescent objects using visible lights and an imaging device,” In Proc. CII, vol.19, pp.352–356, 2011.
- [27] M. Hullin, J. Hanika, and B. Ajdin, “Acquisition and analysis of bispectral bidirectional reflectance and reradiation distribution functions,” In Proc. SIGGRAPH, 2010.

- [28] I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, “Bispectral photometric stereo based on fluorescence,” In Proc. CVPR, pp.270–277, jun 2012.
- [29] A. Glassner, “A model of fluorescence and phosphorescence,” In Proc. the Eurographics Workshop on Rendering, pp.57–68, 1994.
- [30] G. McNamara, A. Gupta, J. Reynaert, T. Coates, and C. Boswell, “Spectral imaging microscopy web sites and data,” *Cytometry Part A*, vol.69, no.8, pp.863–871, 2006.
- [31] J. Gu, and C. Liu, “Discriminative illumination: Per-pixel classification of raw materials based on optimal projections of spectral brdf,” In Proc. CVPR, pp.797–804, 2012.
- [32] 森正武, 数值解析, 共立出版, 1973.
- [33] J. Park, M. Lee, M. Grossberg, and S. Nayer, “Multispectral imaging using multiplexed illumination,” In Proc. ICCV, 2007.
- [34] P. Emmel, and R. Hersch, “Spectral colour prediction model for a transparent fluorescent ink on paper,” In Proc. CIC, pp.116–122, 1998.

発表文献

- [1] 小橋泰之, 松川徹, 佐藤洋一 “色相平面とポアソン方程式を用いた色ずれの少ない陰影除去”, 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会, 2012-3
- [2] 小橋泰之, 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一 “蛍光成分存在下における分光反射率復元”, 画像の認識・理解シンポジウム, 2012-8
- [3] 小橋泰之, 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一 “蛍光成分を含む物体の分光反射率と吸収・発光特性の推定”, 電子情報通信学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2013-1