

対数空間における基底関数の線形従属性と推定精度の検証

小林由枝[†] 川上玲^{††} 池内克史^{†††}

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

^{††} 東京大学 生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

^{†††} 東京大学大学院 情報学環 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: [†]{yoshie, rei, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本論文では、対数空間におけるスペクトルの光源と反射率の分離における不安定性要因の検証を行う。通常観察されるスペクトルは光源と反射率の積である。物体からの反射光である分光スペクトルから光源と反射率を分離することにより、物体固有の色情報である反射率を得ることができる。これはデジタルアーカイビングにおける色の保存や利活用のための見えの再合成やロバストな物体認識に役立つ。これまで提案されてきたスペクトル分離手法は、光源と反射率を既知の基底関数の線形和で表現し、それらと入力スペクトルとの二乗誤差が最小となる基底関数の重み係数を推定するものであった。これらの手法には Annealing や Hit-and-Run といった計算コストの高い手法が用いられていたため、計算コスト削減のために対数空間を利用して線形計算量で推定を行う手法が提案されている。しかし、この手法では用いる光源と反射率の基底関数によっては推定が非常に不安定になるという問題点があった。この問題点については、これまで分離結果に対し最適化を行うことで解決が試みられているが、その根本原因については述べられていない。そこで、本論文では、対数空間における推定には光源と反射率の基底関数に関する一次方程式を解く必要があることから、光源と反射率の基底関数の線形従属性に注目し不安定性の検証を行った。さらに、光源と反射率の基底関数間で線形独立である基底関数を用いて、その推定誤差評価を行った。

キーワード 光源, 反射率, 分離, 基底関数, 線形従属

1. はじめに

光の三原色として知られている RGB よりも更に細かな色情報を得ることができるスペクトルを用いた解析手法が、化学分析、生物分析、考古学分野での遺物解析で盛んに用いられている。これは、分光スペクトルから光源をキャンセルすることにより物体固有の色情報である反射率分布を得ることができ、物質特定に有効であるためである。例として、デジタルアーカイビングでは反射率のこの性質を用いて、色の記録・保存や照明の当て方による見えの違いのシミュレーションを行っている。

現在まで、分光スペクトルから光源と反射率を分離する様々な手法が提案されてきた。それらには二色性反射モデルを用いた手法と分光スペクトルを光源と反射率の基底関数を用いて近似することで推定する手法がある。二色性反射モデルは、S. A. Sharfer [1] によって提案された反射モデルで、反射光のスペクトルを鏡面反射成分と拡散反射成分のスペクトルの線形和で表すことができる。Tominaga ら [2] は二色性反射モデルを用い、分光スペクトルから光源スペクトルである鏡面反射成分を求め、光源と反射率の分離を精度よく実現した。

一方、基底関数を用いる手法は、鏡面反射成分を必要としないため、推定を行うシーン中にスペキュラーが含まれている必要がない点で二色性反射モデルを用いた手法よりも利点がある。先駆的な手法として、Wandell

ら [7] や Ho ら [8] は、光源と反射率を基底関数の線形和で表現し [3] [6] [5] [4]、その積とスペクトルの二乗誤差が最小になるようにそれぞれの基底関数の係数の推定を行った。しかし、この手法では推定した光源や反射率が負の値を持つ可能性があり、推定値が局所解に陥ってしまうという問題点があった。

Chang ら [9] は光源は負の値を持たない、反射率は 0 と 1 の間の値を持つといった拘束を用いることで、この問題の解決を図った。また、Ohta ら [10] は光源に CIE 昼光の制約を設けることにより推定精度が向上することを示した。しかし、これらの手法では推定の際に Annealing や Hit-and-Run といった計算コストの高い手法が用いられており、基底関数の数を一つ増やすごとに指数関数的に計算量が増加するという問題点があった。

そこで、Drew ら [11] は対数空間で光源、反射率ともに基底関数の線形和で表現可能であることを示し、対数空間での光源・反射率の推定手法を提案した。Drew ら [11] の手法により、推定にかかる計算コストは線形計算量に抑えられたが、用いる光源と反射率の基底関数によっては推定が非常に不安定になってしまうという問題点があった。

この問題点については、推定された光源と反射率に対して最適化を行うことにより解決が図られているが、その根本原因については触れられていない。この推定不安定性の原因を解明することにより、推定結果に対する最

適化を必要とせず、従来手法よりも安定な推定が可能な手法の提案が実現できると考えられる。

そこで、対数空間における推定が光源と反射率に関する一次方程式を解いていることから、光源と反射率の基底関数の線形従属性に注目し不安定性の検証を行った。さらに、光源と反射率の基底関数間で線形独立である基底関数を用いて、その推定誤差評価を行った。

本稿の内容は以下の通りである。二章では、従来の実空間のスペクトルモデル、Drew ら [11] の対数空間のスペクトルモデルと分離手法について述べる。三章では、光源と反射率の基底関数の線形従属性の検証を行う。四章では、線形独立な基底関数を用いた場合の推定誤差評価を行う。五章で、まとめと今後の課題を述べる。

2. 論理的背景

2.1 実空間のスペクトルモデル

実空間において観察される分光スペクトルは式 (1) のように光源と反射率の積で表わされる。

$$\hat{I}(\lambda) = \hat{E}(\lambda)\hat{S}(\lambda) \quad (1)$$

$\hat{I}(\lambda)$ はスペクトル、 $\hat{E}(\lambda)$ は光源スペクトル、 $\hat{S}(\lambda)$ は反射率分布、 λ は波長である。

光源は式 (2) に示すように基底関数の線形和で表現可能である。自然光については、Judd ら [3] によって三つの基底関数で十分であることが示された。Ho ら [8] や Chang ら [9] は光源と反射率の推定に三つの基底関数を用いた。Slater ら [4] は八つの基底関数で、人工光、自然光を十分表現可能であることを示した。

$$\hat{E}(\lambda) = \sum_{i=1}^m \hat{e}_i \hat{E}_i(\lambda) \quad (2)$$

$\hat{E}_i(\lambda)$ は光源スペクトルの基底関数、 $\hat{e}_i$ はその係数である。

反射率も光源同様に式 (3) で表わされることが、Cohen ら [5] や Parkkinen ら [6] により示された。Cohen ら [5] は Munsellchip のスペクトルデータに対し、主成分分析を行うことで基底関数を求めた。Parkkinen ら [6] は Munsellchip 以外にも様々な人工物などのスペクトルデータを用いて基底関数を求め、八つの基底関数によりほぼすべての反射率を表せることを示した。

$$\hat{S}(\lambda) = \sum_{j=1}^n \hat{s}_j \hat{S}_j(\lambda) \quad (3)$$

$\hat{S}_j(\lambda)$ は反射率分布の基底関数、 $\hat{s}_j$ はその係数である。

2.2 対数空間のスペクトルモデル

式 (1) に対し、対数を取ると式 (4) のようになる。 $I(\lambda)$ はスペクトル、 $E(\lambda)$ は光源スペクトル、 $S(\lambda)$ は反射率分布である。

$$I(\lambda) = E(\lambda) + S(\lambda) \quad (4)$$

Drew ら [11] は、対数空間においても光源と反射率が実空間同様、基底関数の線形和で表現できることを示した。すなわち、対数空間で、

$$E(\lambda) = \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \quad (5)$$

$$S(\lambda) = \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) \quad (6)$$

のように書ける。ただし、 $E(\lambda)$ は対数での光源スペクトル、 $S(\lambda)$ は対数での反射率分布、 $E_i(\lambda)$ は対数での光源スペクトルの基底、 $S_j(\lambda)$ は対数での反射率分布の基底、 e_i は光源の基底関数の重み係数、 s_j は反射率の基底関数の重み係数である。

2.3 対数空間のスペクトル推定手法 [11]

式 (5) と式 (6) を式 (4) に代入すると分光スペクトルは式 (7) のようになる。

$$I(\lambda) = E(\lambda) + S(\lambda) \simeq \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) + \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) \quad (7)$$

したがって、光源と反射率の推定は式 (8) を最小化する光源と反射率の重み係数 e_i 、 s_j を求めることにより行われる。

$$\min L = \int \left[\sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) + \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) - I(\lambda) \right]^2 d\lambda \quad (8)$$

式 (8) を簡潔にすると、式 (9) となる。

$$\mathbf{i} = \mathbf{E}\mathbf{e} + \mathbf{S}\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{s} \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (9)$$

$\mathbf{i}$ は $w \times 1$ の分光スペクトルのベクトル、 $\mathbf{E}$ と $\mathbf{S}$ はそれぞれ $w \times m$ 、 $w \times n$ の基底関数の行列、 $\mathbf{e}$ 、 $\mathbf{s}$ はそれぞれ $m \times 1$ 、 $n \times 1$ 重み係数のベクトルである。つまり、 $\mathbf{A}$ は $w \times (m+n)$ の基底関数のベクトル、 $\mathbf{x}$ は $(m+n) \times 1$ の重み係数のベクトルである。式 (9) から分かるように、スペクトルの離散点が重み係数の次元以上であれば、式 (9) は解を持つことができる。したがって、推定を行うには光源と反射率の重み係数 e_i 、 s_j を式 (9) から求めることになるため、 $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{i}$ を計算すればよいことになる。

3. 基底関数の線形従属性の検証

前章で述べたように対数空間において光源と反射率の推定を行うには、基底関数の行列 $\mathbf{A}$ の逆行列を安定に求める必要がある。そのためには、以下の二つの条件を満たす必要がある。

- (1) 行列 $\mathbf{A}$ のランクがフルランクである
- (2) 行列 $\mathbf{A}$ の条件数が十分小さい

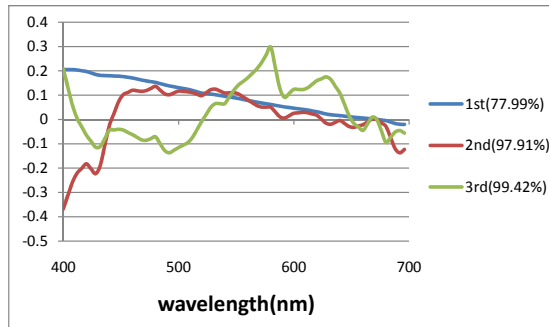


図 1 可視光領域の光源の基底関数．累積寄与率 99%以上となる上位三つ．

行列 A がフルランクでないと，行列 A の逆行列が存在しないため，式 (9) を解くことができない．行列 A のランク落ちが，光源と反射率の基底関数が持つデータ空間の一部が重なることで発生し，この曖昧性のために推定したい光源と反射率のデータ空間の分離を不可能にするためである．

条件数とは $Ax = i$ を解くときに i に加わったノイズによって，解 x がどの程度不安定になるかの割合を示すものである．基底関数 E と S が直交していれば，ノイズに影響を受けることはないが，直交していない場合は E と S が直交な関係から歪むほどノイズの影響を強く受けることになる．したがって，条件数が小さいほど直交な関係からの歪が小さく推定もより安定になることを示している．

そこで，本章では光源を自然光と仮定した場合に，以下で述べる可視光領域と吸収スペクトル領域の二つの波長範囲における基底関数行列 A のランクと条件数を求め，安定な推定が可能な基底関数の検証を行う．可視光領域は，光源と反射率の推定に一般的によく用いられる波長範囲である．また，吸収スペクトルは大気中に浮遊している金属等の影響によって生じる光の吸収であり，自然光特有のものである．したがって，吸収スペクトル部分では反射率と異なるデータ空間を持つために，光源と反射率の基底関数が可視光領域全体の基底関数よりも線形従属になりにくいと考えられる．本章では，吸収スペクトル領域として可視光範囲の 400nm ~ 472nm，648nm ~ 696nm の領域を用いて検証を行う．

検証方法として，ランクについては行列 A に対して特異値分解を行い得られる累積寄与率 99%の固有値の数とする．条件数は行列 A に特異値分解を行い得られる最大固有値と最小固有値の比とする．

3.1 可視光領域

基底関数は，光源と反射率のデータに対し，特異値分解 (SVD) を行うことで求めた．光源データは，Judd ら [12] の自然光スペクトルを計算する式より求めたシミュレーションデータを用いた．また，この光源データは色差が等間隔になるように色温度を定め計算している．

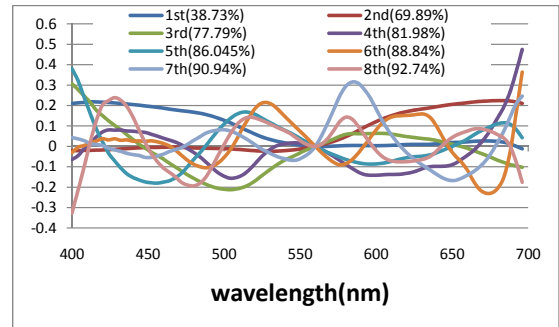


図 2 可視光領域の反射率の基底関数．累積寄与率 92%以上となる上位八つ．

反射率については，Vrhel ら [13] の反射率データを使用した．これらのデータは，波長範囲が 400nm ~ 696nm であり，4nm ごとにサンプリングされている．また，これらのデータは 560nm で正規化されている．正規化を行わないと，得られた第一基底関数がスケール項となり，光源と反射率の第一基底関数間で線形従属となってしまうためである．得られた光源と反射率の基底関数をそれぞれ図 1，図 2 に示す．

図 1，図 2 に示す基底関数を用いて，ランクと条件数の検証を行った結果を表 1 に示す．フルランクの基底関数でも条件数がランク落ちをしている基底関数と近いものは，ランク落ちをしている基底関数と同程度の不安定性があるものと考えられる．したがって，表 1 に太字で示す (光源の基底関数の次元，反射率の基底関数の次元) = (1,1), (1,2), (2,1), (2,2), (3,1) の基底関数は安定な推定が可能であると言える．次章でこれらを用いて推定誤差評価を行う．

表 1 行列 A の可視光領域のランク・条件数の検証結果

光源の次元	反射率分布の次元	A のランク	フルランク	条件数
1	1	2	2	3.1108
1	2	3	3	16.6011
1	3	4	4	35.8913
1	4	4	5	36.2154
2	1	3	3	4.05371
2	2	4	4	19.1814
2	3	4	5	35.9355
3	1	4	4	12.5062
3	2	5	5	29.1210
3	3	5	6	36.0603

3.2 吸収スペクトル領域

基底関数は，前節と同様のデータから吸収スペクトル領域部分のデータを用いて，特異値分解 (SVD) を行うことにより求めた．前節と同様に基底関数からスケール項を取り除くため，400nm ~ 472nm においては 432nm で，648nm ~ 696nm においては 672nm で正規化を行っている．

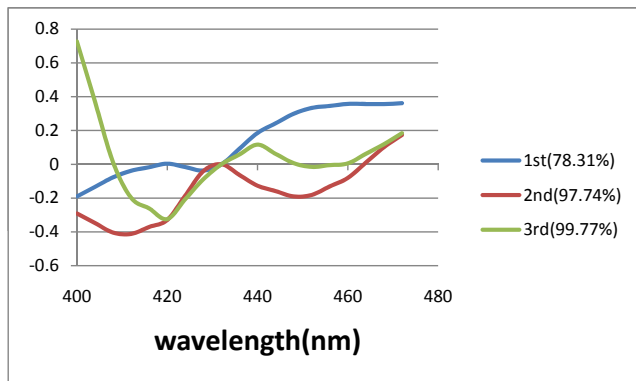


図 3 400nm～472nm の自然光の累積寄与率 99%以上となる上位 3 つの基底関数

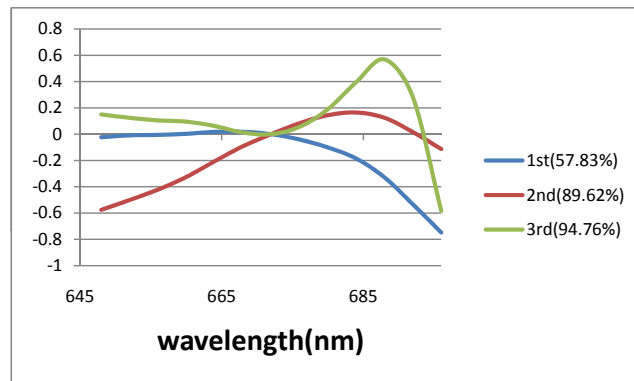


図 6 648nm～696nm の反射率分布の累積寄与率 94%以上となる上位 3 つの基底関数

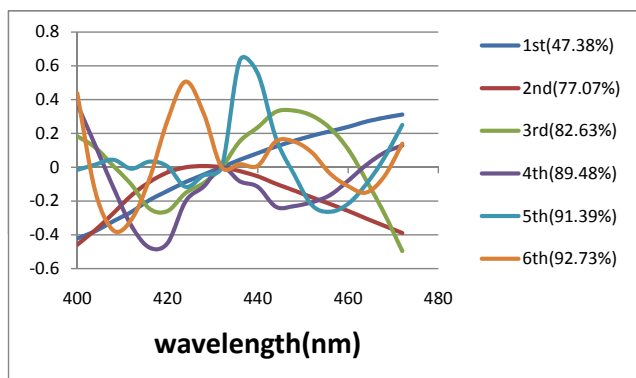


図 4 400nm～472nm の反射率分布の累積寄与率 92%以上となる上位 6 つの基底関数

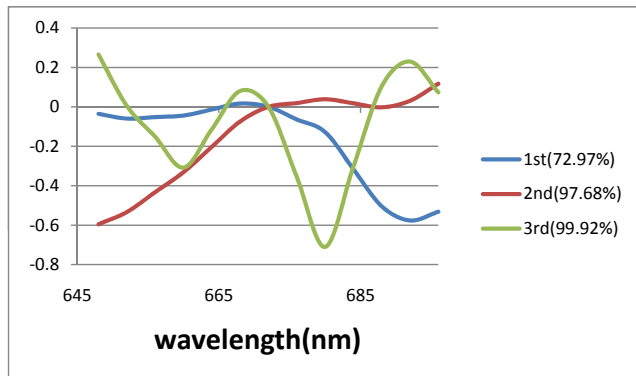


図 5 648nm～696nm の自然光の累積寄与率 99%以上となる上位 3 つの基底関数

る．図 3，図 4 に 400nm～472nm の基底関数，図 5，図 6 に 648nm～696nm の基底関数を示す．

これらの基底関数を用いて，ランク・条件数の検証を行った．その結果を表 2，表 3 に示す．ランク落ちしておらず，条件数も十分小さい基底関数について太字で示している．400nm～472nm では，(光源の基底関数の次元，反射率の基底関数の次元) = (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (3,1) の基底関数，648nm～696nm では，(光源の基底関数の次元，反射率の基底関数の次元) = (1,1), (1,2), (2,1), (3,1) の基底関数が安定な推定が可能であると言える．次

章でこれらの基底関数を用いて推定誤差評価を行う．

表 2 行列 A の 400nm～472nm のランク・条件数の検証結果

光源の次元	反射率分布の次元	A のランク	フルランク	条件数
1	1	2	2	3.0167
1	2	3	3	6.3675
1	3	4	4	6.9067
1	4	4	5	44.5438
2	1	3	3	11.2026
2	2	3	4	61.5711
3	1	4	4	21.9913
3	2	5	5	79.9554

表 3 行列 A の 648nm～696nm のランク・条件数の検証結果

光源の次元	反射率分布の次元	A のランク	フルランク	条件数
1	1	2	2	6.0663
1	2	3	3	6.0663
1	3	4	4	33.4971
1	4	4	5	39.2084
2	1	3	3	6.3844
2	2	4	4	23.8402
2	3	4	5	33.5165
2	3	4	5	54.6315
3	1	4	4	6.6038
3	2	5	5	29.4922
3	3	5	6	34.5490

4. 推定誤差評価

本章では，前章で求めたフルランクであり条件数が十分小さい光源と反射率の基底関数の組を用いて，光源・反射率推定を行い，その誤差評価を行う．評価には，式 (10) に示す平均二乗誤差 (RMSE, 単位: %) を用いた．使用した分光スペクトルデータは，光源の基底関数作成でも使用した Judd ら [12] の式より求めたシミュレーショ

ンデータとマクベスチャートの白・黒・グレーの反射率を除いた 18 パッチの反射率から計算したものである．

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum (I_{estimate}(\lambda) - I_{true}(\lambda))^2}}{\sqrt{\sum I_{true}(\lambda)^2}} \quad (10)$$

$I_{true}(\lambda)$ は真値のスペクトル， $I_{estimate}(\lambda)$ は推定によって得られたスペクトルである． n はスペクトルのサンプリング点の数である．

4.1 可視光領域における推定

前章で求めたランク落ちしておらず，条件数が十分小さい可視光領域の基底関数を用いて推定誤差評価を行った．その結果得られた実空間の平均二乗誤差を表 4 に示す．この結果から，実空間で光源には 67%，反射率には 73%の誤差が少なくともあることが分かる．

この誤差は，評価に用いた反射率の基底関数のモデル化誤差がノイズとして影響したことが原因と考えられる．推定に用いた光源と反射率の基底関数は，直交していないため，入力となる分光スペクトルにノイズがあるとノイズによって推定結果に誤差が含まれてしまう．評価に用いた基底関数はノイズの影響をより受けにくいものであるが，反射率の次元が低いいため図 2 に示す累積寄与率よりモデル化誤差が 30%から 60%と大きく，ノイズによる誤差が大きくなってしまったと考えられる．

表 4 可視光の基底を用いた時の実空間における平均二乗誤差

光源の次元	反射率分布の次元	光源の平均二乗誤差 (%)	反射率分布の平均二乗誤差 (%)
1	1	104.67	82.20
1	2	122.87	243.05
2	1	85.96	73.62
2	2	66.59	105.56
3	1	148.09	111.17

4.2 吸収スペクトル領域に限定した推定

前章で求めた吸収スペクトル領域の基底関数を用いて推定誤差評価を行った．得られた実空間の平均二乗誤差を表 5，表 6 に示している．この結果より 400nm～472nm においては，光源で 11%，反射率で 10%の誤差を少なくとも持つことが分かる．また，648nm～696nm においては光源・反射率ともに 4%の誤差を少なくとも持つ．

この誤差も前節同様に光源と反射率のモデル化誤差がノイズとして影響し発生したものであるが，以下の二点が影響し，推定誤差が小さくなったと考えられる．

(1) 吸収スペクトル部分のスペクトルが可視光領域と比べて互いに似ており，データ空間が狭い

(2) 基底関数の直交な関係からの歪具合が可視光領域の場合より小さい

表 5 400nm～472nm の基底を用いた時の実空間における平均二乗誤差

光源の次元	反射率分布の次元	光源の平均二乗誤差 (%)	反射率分布の平均二乗誤差 (%)
1	1	11.70	11.96
1	2	11.70	10.87
1	3	11.85	10.69
2	1	27.76	26.89
3	1	47.08	44.99

表 6 648nm～696nm の基底を用いた時の実空間における平均二乗誤差

光源の次元	反射率分布の次元	光源の平均二乗誤差 (%)	反射率分布の平均二乗誤差 (%)
1	1	3.59	5.65
1	2	3.58	4.08
2	1	5.54	5.79
3	1	5.37	5.61

4.3 吸収スペクトルから可視光領域全体の推定

吸収スペクトルの推定においては，吸収スペクトル領域のみでは解析などに用いる情報として不十分なため，推定された吸収スペクトル部分から可視光領域全体のスペクトルを推定する必要がある．吸収スペクトルは可視光領域のスペクトルに含まれているため，吸収スペクトル領域と可視光の吸収スペクトル領域の基底関数は式 (11) に示すように変換係数を掛けることで相互変換可能である．変換係数は吸収スペクトルの基底関数を可視光の基底関数でモデル化することで求められる．

$$E' = Ee \quad (11)$$

E' は $p \times n$ の吸収スペクトルの基底関数の行列， E は $p \times m$ の可視光の吸収スペクトル領域の基底関数の行列， e は $m \times n$ の変換係数行列である． p はスペクトルのサンプリング数， m ， n は基底関数の次元である．

式 (11) を用いて可視光領域全体のスペクトルを推定する際に問題になる点の一つある．それは，変換に用いている可視光の基底関数は可視光領域全体の基底関数から吸収スペクトル領域部分を抜き出したものであるため，この基底関数自体が互いに直交しているという保証はない．したがって，可視光領域全体の基底関数から抜き出した吸収スペクトル部分の基底関数についても，ランク落ちしておらず，条件数も十分小さいものを用いる必要がある．

そこで，基底関数が滑らかで部分的に見た場合，線形従属になりやすい反射率の基底関数を用いず，吸収スペクトルの凹み特徴となっている光源の基底関数を用いて検証を行った．光源の可視光領域の基底関数はそれぞれ 432nm，672nm で正規化したものを三章と同じデータを用いて求めたものを使用している．ランクと条件数の検証は三章と同様の手法で行った．その結果，400nm～

表 7 400nm ~ 472nm における実空間の光源スペクトルの平均二乗誤差

吸収スペクトルの 基底関数の 次元	可視光領域の 基底関数の 次元	平均二乗誤差 (%)
2	2	34.53
2	3	39.32
3	2	34.56
3	3	37.87

472nm, 648nm ~ 696nm において可視光の基底関数の次元が 2, 3 のときにランク落ちせず, 条件数も十分小さいことが分かった。

これらの基底関数を用いて, 吸収スペクトルから可視光領域全体の自然光スペクトルの推定誤差評価を行った結果が表 7, 表 8 である。評価に用いたデータは三章でも述べた Judd ら [12] の式より求めたシミュレーションデータである。この結果から 400nm ~ 472nm では 34%, 648nm ~ 696nm では 9%の実空間での推定誤差が少なくともあることが分かる。これらの推定誤差も抜き出した可視光の基底関数が直交な関係から歪んでいるために, モデル化誤差の影響を受け発生したものと考えられる。また, 吸収スペクトルの推定誤差, 吸収スペクトルから可視光のスペクトルの推定誤差を考慮すると, 400nm ~ 472nm では 11%に 34%, 648nm ~ 696nm では 5%に 9%の誤差が加わることになり, 従来手法の推定誤差が 15% ~ 20%であることを考えると十分な推定誤差と言えないことが分かる。

5. おわりに

本論文では, 対数空間における推定には光源と反射率の基底関数に関する一次方程式を解く必要があることから, 光源と反射率の基底関数の線形従属性に注目し不安定性の検証を行った。さらに, 光源と反射率の基底関数間で線形独立である基底関数を用いて, その推定誤差評価を行った。

その結果, 可視光領域については基底関数に含まれるモデル化誤差がノイズとなり十分な推定精度が得られないことが分かった。また, 吸収スペクトル領域においては, 吸収スペクトル部分の推定は十分な精度が得られるが, 吸収スペクトルから可視光全体のスペクトルを推定する際にモデル化誤差による推定誤差が大きく十分な推定精度が得られないことが分かった。

以上の結果より, 解析などに十分な波長範囲を持ったスペクトルに対して, 対数空間で安定な光源・反射率推定を行うには以下の二つの条件を全て満たすような基底関数が必要であるといえる。

(1) 光源と反射率の基底関数においてランク落ちしておらず, 条件数が十分小さい

(2) 基底関数のモデル化誤差が十分小さい

表 8 648nm ~ 696nm における実空間の光源スペクトルの平均二乗誤差

吸収スペクトルの 基底関数の 次元	可視光領域の 基底関数の 次元	平均二乗誤差 (%)
2	2	9.04
2	3	17.43
3	2	17.41
3	3	24.76

しかし, (1) と (2) の条件はトレードオフの関係にあり, 両方を満たすような基底関数を求めることは難しい。四章で示したようにフルランクで条件数の十分小さい基底関数は, 次元が低いためモデル化誤差が大きくなる。基底関数のモデル化誤差を小さくするには, 基底関数の次元を上げる必要があるが, 三章で示したように高次元の基底関数はその自由度によってランク落ちや条件数の増大が問題となる。したがって, これらの問題を解決するような新たな推定手法の提案が今後の課題となる。

6. 謝 辞

本研究の一部は文部科学省デジタルミュージアムプロジェクトの援助を受けて行われた。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- [1] S.A.Sharfer. Using color to separate reflection components. *COLOR Research and Application*, (3): 241-272,1985.
- [2] S. Tominaga and B. A. Wandell. Standard surface reflectance model and illumination estimation. *Journal of the Optical Society of America*, pages 576-584, April 1989.
- [3] D. B. Judd and D. Macadam, and F. Wyszecki. Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature. *Journal of the Optical Society of America*, 54(8): 1031-1040, 1975.
- [4] D. Slater and G. Healey. What is the spectral dimensionality of illumination functions in outdoor scenes? *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '89)*, pages 318-322, 1989.
- [5] J. Cohen. Dependency of spectral reflectance curves of munsell color chips. *Psychonomic Sci*, 1:369-370, 1964.
- [6] J. P. S. Parkkinen and J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen. Characteristic spectra of munsell colors. *Journal of the Optical Society of America*, 6(2): 318-322, 1989.
- [7] L. T. Maloney and B. A. Wandell. Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance. *Physics-based vision: Principles and practice. Jones and Bartlett Publishers, Inc*, 1992.
- [8] J. Ho and Brian V. Funt and M. S. Drew. Separating a color signal into illumination and surface reflectance components: Theory and applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(10): 966-977, 1990.
- [9] P. R. Chang and Tsung-Hsieh Hsieh. Constrained

- nonlinear optimization approaches to color-signal separation. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, 4(1): 105-110, 1994.
- [10] T. Ohta and Y. Hayashi. Recovery of illumination and surface colors from images based on the CIE daylight. *Proceeding of European Conference on Computer Vision*, pages 966-977, 1994.
 - [11] Mark S. Drew and Graham D. Finlayson. Analytic solution for separating spectra into illumination and surface reflectance components. *Journal of the Optical Society of America*, 24(2): 294-303, 2007
 - [12] D. B. Judd and G. Wyszecki. Color in Business, Science and Industry. *Wiley, New York*, 3rd edition, 1975.
 - [13] M. J. Vrhel, R. Gershon, and L. Iwan. The Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra, *Color Research and Application*, 19(1): 4-9, 1994.