

# スペクトルカメラによる 3 次元都市空間の光学解析について

猪狩 壮文<sup>†</sup> 肥後 智昭<sup>†</sup> 宮崎 大輔<sup>†</sup> 小野晋太郎<sup>†</sup> 池内 克史<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京大学生産技術研究所池内研究室

〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 池内研究室 Ee405

E-mail: †{ika,higo,miyazaki,onoshin,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**論文概要** 都市空間の光学情報を取得し解析することは、都市空間のモデリングにおける 3 次元の形状情報と同じように非常に重要である。都市空間の光学情報はカーナビゲーションシステムや都市計画などに使われるため非常に利用価値が高い。しかし物体の色は光源環境に影響されてしまうという問題があり、また RGB の 3 色の情報では情報量が少なく、その処理において誤差が生じる。そこで本研究では都市空間のスペクトルを取得することで光源環境 (撮影時間帯) によらない物体の反射率を取得する手法を示す。またスペクトルを取得することで高精度の色情報処理が行えることを示し、さらに効率的に都市空間のスペクトルを取得する方法について論じる。

## Spectral Based Optical Analysis of 3D Urban Space

Akifumi IKARI<sup>†</sup>, Tomoaki HIGO<sup>†</sup>, Daisuke MIYAZAKI<sup>†</sup>, Shintaro ONO<sup>†</sup>, and Katsushi  
IKEUCHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo  
Ikeuchi Laboratory(Ee405) 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN  
E-mail: †{ika,higo,miyazaki,onoshin,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** Optical information of an urban city is important factor for three dimensional model of urban city. The color information is used in car navigation system, city planning and so on. But, the color information is effected by illumination, so it is necessary to use a color that is not effected by illumination. And, RGB three channel is not efficient for color information, so an error in calculation is exist. In this research, by using spectral, we show the way to analyze a color of an urban city exactly that is not effected by illumination. And we show the way to measure spectral of urban space efficiently.

**Key words** color signal spectrum, illumination spectral power distribution, surface spectral reflectance

### 1. はじめに

色情報はコンピュータビジョンにおいて非常に重要な要素であり、都市空間のコンピュータビジョンでの表現において不可欠な要素である。しかしその色情報をコンピュータ上に正確に表現するに問題が存在する。その 1 つが色はその光源環境によって大きく変化してしまうことである。そこで色情報を正確に表現するためには、物体によって反射されてくる光の量を情報として保持するのではなく、物体の反射率を保持することが必要である。しかし反射率そのものを測定する

ことは出来ず、既知の光源を与えて返ってくる光量から計算するのが一般的である。しかし都市空間において光源環境を計測するのは非常に難しい。そこで本研究では色情報をスペクトルとして保持することでそれらの問題を解決した。

物体から返ってくる光量である反射光スペクトルをその構成成分である光源スペクトルと分光反射率とに分離することはコンピュータビジョンにおいて重要な課題である。分光反射率を得ることによって光源に影響されない物体固有の色を得ることができ、物体の認識等で非常に役立つ。そして今までこの分離の問題は Finlayson が提唱した Color

Constancy(色の恒常性) [6] [3] [5] [4] のアルゴリズムで行われた。Color Constancy では主に3つの色のチャンネル (RGB) を使い、光源が黒体輻射であると仮定し、黒体輻射の方程式を用いることによって行われる。

しかし反射光スペクトルを用いる場合にはそれらの方法では不十分である。そこでそれに対応する手法として Ho [7] らは推定光源スペクトルとの最小化による手法を提案した。その手法は光源スペクトル及び反射率分布をその基底関数の線形和で表すことが出来る [10] [2] [11] [8] と仮定し、反射光スペクトルとそれぞれの基底関数の線形和の積との差分が最小化されるように基底関数の係数を探し出すというものである。しかしこの時求まる光源スペクトルや反射率分布が物理法則を無視し反射率が1を越えたり負の値になってしまったりした。そこで Chang [1] らはさらにそれらに物理制約を加えてその矛盾を解消した。しかしこれら2つの方法では単一点の反射光スペクトルのみの分離を行っており、それだけでは分離には制約が不十分である。そこで我々は複数の反射光スペクトルを用いてより精度良く分離を行った。ここで都市空間における反射率の推定において我々が使う複数のスペクトルは、同一光源異物体のスペクトル、鏡面反射・拡散反射のスペクトルである。

また一般的なカメラの RGB の色情報だけでは不十分であるという問題もスペクトルを測定することで解決できる。色情報が不足することで色変換等を繰り返すことで情報が劣化することがあるが、スペクトルによりそれらを防ぐことが出来、よりリアルな都市空間の表現が行える。

本研究はスペクトルを用いることで都市空間の光源環境によらない反射率成分を取得し、同時に高次元の色情報により臨場感のある都市空間の表現を行うことを目的とする。

## 2. 背景

### 2.1 スペクトル

スペクトルとは一般的に用いられるような RGB の3色による色表現ではなく、波長ごとの光強さのことである。図1のように波長ごとの光の強さで表現され、スペクトルから RGB への変換のみが可能である。スペクトルを用いることの利点はいくつかあるが、1つはスペクトルを得ることで測定機器に依存しないデータが得られることである。カメラによって RGB の値は異なってしまうが、スペクトルにおいてはそのようなことはない。またスペクトルを用いることで、3色の色情報では不十分で行うことのできなかつた処理を行ったり、より正確に色情報処理を行うことができる。その反面、情報量が増大するため処理や保存に手間が必要となる。

### 2.2 スペクトルの取得および測定機器

スペクトルを取得する方法は数々存在する。点から発せられる光をプリズムで分解して測定する方法、一定の波長の光

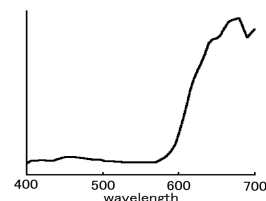


図1 スペクトル分布

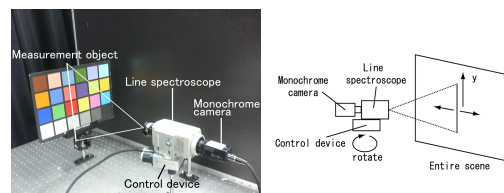


図2 左:ライン上のスペクトル測定装置 (Line spectroscopy, モノクロカメラ) 及び移動機構 右:平面上のスペクトルの測定

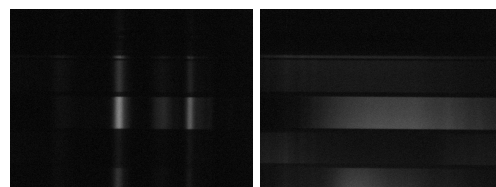


図3 撮影画像 左:蛍光灯下 右:太陽光下 画像上の横位置が波長 (400nm ~ 700nm) 縦位置が対象物の高さ位置 (図2: 右:y) 画像の明るさが波長毎のスペクトルの強さを表す

のみを通すフィルターをカメラに装着し交換しながら撮影する方法、干渉フィルターを用いカメラを移動させながら撮影を行う方法、ラインの光をプリズムで分解してカメラで光量を測定する方法等である。本研究では都市空間を測定するために、車両に機器を搭載し移動しながら測定を行うことを目標とするためラインの光をプリズムで分解する方法 (図2) を用いることとする。測定装置はモノクロカメラ・ライン分光器 (Inspector) からなり、縦のライン上の光 (対象物の高さ方向の光) をプリズムでそれぞれ分解し、それをモノクロカメラで撮影することでライン上のスペクトルを得ることができる。得られた画像は図3のようになる。そしてカメラを、制御して動かし撮影することで、2次元平面上のスペクトルを計測することができる。

### 2.3 反射率

物体色は光源色と反射率との積で表され、光源環境によって物体の見えが大きく異なる。物体の本当の色を得るためには反射率を得ることが重要である、光源が既知でない限り得ることはできない。そこで本研究ではスペクトルを用いることで測定されたスペクトルから反射率を求める。

### 3. 反射率の推定

#### 3.1 基底関数

反射光スペクトルは光源スペクトルと反射率分布との積で表され、式で表すと次のようになる。

$$I(\lambda) = E(\lambda)S(\lambda) \quad (1)$$

ここで  $I(\lambda)$  は反射光スペクトル、 $E(\lambda)$  は光源スペクトル  $S(\lambda)$  は反射率分布。

Judd ら [8] は自然光及び人工光のスペクトルは基底関数の線形和で表されることを次式のように示した。

$$E(\lambda) \simeq \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \quad (2)$$

ここで  $E_i(\lambda)$  は光源スペクトルの基底関数、 $e_i$  はその係数。

さらに Judd らは3つの基底関数 ( $m = 3$ ) を用いることで光源を十分に表すことが出来ると示した。また Slater ら [11] は十分な精度を得るためには8つの基底関数が必要であると示した。そして Ho ら [7] や Chang ら [1] は3つの基底関数を用いて反射光スペクトルの分離を行った。図1：左は Judd が求めた3つの基底関数である。

光源スペクトルと同様に Cohen ら [2] や Parkkinen ら [10] は反射率分布は基底関数の線形和で表せることを示した。

$$S(\lambda) \simeq \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) \quad (3)$$

ここで  $S_j(\lambda)$  は反射率分布の基底関数、 $s_j$  はその係数。

Cohen らは Munsell chip のスペクトルのデータの処理を行ってその基底関数を求め、Parkkinen らは様々な物体の反射光スペクトルを測定し、8つの基底関数によってほぼ全ての反射光スペクトルを正確に表現できることを示した。さらに Cohen らは3つの基底関数によって十分に精度良く反射率分布を表現できると示した。図.1 右は Parkkinen の4つの基底関数である。そして Ho ら [7] や Chang ら [1] は3つの基底関数を用いて分離を行った。ここで、もちろん基底関数を増やせばより光源スペクトルと反射率分布を正確に表現できるが、正しくない解が分離となる可能性が増大してしまう。よって出来るだけ少ない基底関数を用いる必要である。

#### 3.2 分離のモデル

式 (2)(3) を式 (1) に代入すると反射光は次式となる。

$$I(\lambda) = E(\lambda)S(\lambda) \simeq \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) \quad (4)$$

これより光源スペクトルと反射率分布は次式を最小化することによって求めることが出来る。

$$ERROR = \sum_{\lambda} \left[ \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) - I(\lambda) \right]^2 \quad (5)$$

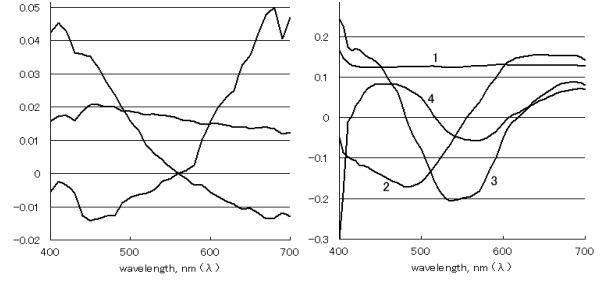


図4 左：Judd [8] の3つの光源基底関数。右：Parkkinen [10] の4つの反射率分布基底関数。

本論文で用いる実際の波長の範囲は可視光の範囲であり、400nm から 700nm の範囲でその間隔は 5nm である。 $ERROR$  を最小化させるような変数  $e_i, s_j$  を求めることで光源スペクトルと反射率分布が得られる。

しかし式 (5) だけでは物理則を満たさない解が得られる。例えば解が負になったり反射率が1を越えたりする。そこで物理則に基づいた解を得るため Chang ら [1] は光源スペクトルの基底及び反射率分布の基底の係数に次式のような制約式を設けた。

$$I(\lambda) \leq \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \leq \text{maxlimit} \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) \leq 1 \quad (7)$$

式 (6) は光源は反射光よりも強く、ある一定の上限値を与えることが出来ることを示す。上限値は物理的な物ではないが計算処理のために重要である。式 (7) は反射率は0から1の間であるということを示す。

Chang ら [1] はこれらの制約を hit-and-run 及び simulated annealing のアルゴリズムを用いて式 (5) に適用した。ただし、この分離結果はそのスケールに不定性がある。

### 4. 複数スペクトルでの分離

#### 4.1 同一光源異物体のスペクトル

ここで我々は今までに Ho ら [7] や Chang ら [1] によって提案された単一点の反射光スペクトルを用いて分離を行う手法に代えて複数点の反射光スペクトルを用いて分離を行う手法を提案する。一定の条件の下での複数の反射光スペクトルを用いることで我々は様々な制約を得ることが出来る。先ず一つ目として、ある単一光源下での複数の物体の反射光スペクトルを考える。この場合、物体が異なればその反射光スペクトルは異なるが、その構成成分である光源スペクトルは同じである。このとき式 (5) の和を光源基底の係数を共有しながら最小化することで分離を行うことができ、その最小化する式は次式で表すことが出来る。

$$\sum_{p=1}^{points} \sum_{\lambda} \left( \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \sum_{j=1}^n s_{p,j} S_j(\lambda) - I_p(\lambda) \right)^2 \quad (8)$$

物理制約式は式 (6) と次式で表される。

$$0 \leq \sum_{j=1}^n s_{p,j} S_j(\lambda) \leq 1 \quad (9)$$

出来るだけ多くの物体の反射光スペクトルを用いればより多くの制約式が得られ、より正確な解を得ることが出来る。またより効率的に良い解を得るためにはより色の異なった物体の反射光スペクトルを用いる方が良い。

#### 4.2 拡散反射・鏡面反射のスペクトル

次に鏡面反射のスペクトルを利用する。物体には拡散反射に加えて鏡面反射をしている部分がある。これらは dichromatic reflection model によって表現でき、これにより反射光スペクトルの分離で制約式を追加出来る。dichromatic reflectance model によると、鏡面反射部分における反射光スペクトルは次式で表される。

$$I(\lambda) \simeq E(\lambda)(m_s(i, e, g)S_s(\lambda) + m_b(i, e, g)S_b(\lambda)) \quad (10)$$

ここで  $m_s, m_b$  は幾何学的強度で、 $i, e, g$  はそれぞれ測定点の法線と光源方向との角度、測定方向の角度、光源と測定方向の角度であり、 $\lambda$  に依らない。 $S_s(\lambda)$  は鏡面反射関数  $S_b(\lambda)$  は拡散反射関数である。そして  $S_b$  は次式で表すことが出来る。

$$S_b(\lambda) \simeq \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) \quad (11)$$

またスカラー係数の  $m_s \cdot m_d$  は次式で表すことが出来る。

$$m_s(i, e, g) = C_s, m_b(i, e, g) = C_b \quad (12)$$

ここで誘電体の鏡面反射の鏡面反射成分はその光源色と同一であると見なすことが出来る。Lee ら [9] はこの仮定を the neutral interface reflection (NIR) assumption と名づけた。そしてこの NIR 仮定を用いることで、 $S_s(\lambda)$  を  $\lambda$  によらず一定であると見なすことが出来る。また更に本論文の仮定として Parkkinen ら [10] の求めた一番目の反射率分布基底  $S_1$  (図 1 右, 曲線 1) を  $\lambda$  によらず一定であると仮定する。これらをまとめると次式のように表すことが出来る。

$$S_s(\lambda) \simeq kS_1(\lambda) \simeq Constant \quad (13)$$

ここで  $k$  はスカラーである。これにより次式となる。

$$I(\lambda) \simeq C_s E(\lambda) S_s(\lambda) + C_b E(\lambda) S_b(\lambda) \quad (14)$$

$$\simeq C_s E(\lambda) k S_1(\lambda) + C_b E(\lambda) \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) \quad (15)$$

$$= E(\lambda) \sum_{j=1}^n s_{1,j} S_j(\lambda) \quad (16)$$

また物体の拡散反射部分の反射光スペクトルは次のようにあらわすことが出来る。

$$I'(\lambda) \simeq C'_b E(\lambda) S_b(\lambda) \quad (17)$$

$$\simeq C'_b E(\lambda) \sum_{j=1}^n s_j S_j(\lambda) = E(\lambda) \sum_{j=1}^n s_{2,j} S_j(\lambda) \quad (18)$$

式 (16)(18) より拡散反射と鏡面反射との関係は式 (8) と次式で表すことが出来る。

$$s_{1,2} : s_{1,j} = s_{2,2} : s_{2,j} (j = 3 \sim n) \quad (19)$$

同一光源下の場合の制約に更にこの制約式が加わったことにより、より安定的に分離を行うことが出来る。

またこの時実装の問題として、hit-and-run algorithm を使うために新たな変数  $\alpha_p$  を導入して式 (8) と (19) を次の式に書き直すことが出来る。

$$\sum_{p=1}^{points} \sum_{\lambda} \left( \alpha_p \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \sum_{j=1}^n s_{p,j} S_j(\lambda) - I(\lambda) \right)^2 \quad (20)$$

$$s_{1,j} = s_{2,j} (j = 2 \sim n) \quad (21)$$

更に式を展開していくと反射率成分を除去でき、式 (14)(17) より、次式で表される。

$$C'_b I(\lambda) - C_b I'(\lambda) = C'_b C_s E(\lambda) S_s(\lambda) \quad (22)$$

ここで式 (22) の両辺を  $C'_b$  で割り、変数を置き換える。

$$q_1 = \frac{C_b}{C'_b}, q_2 = C_s S_s(\lambda) \quad (23)$$

これにより次式で表すことが出来る。

$$\begin{aligned} I(\lambda) - q_1 I'(\lambda) &= q_2 E(\lambda) \simeq q_2 \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \\ &= \sum_{i=1}^m e_i'' E_i(\lambda) \end{aligned} \quad (24)$$

さらに式 (24) を変形し次式のような最小化の式で表す。

$$\sum_{\lambda} (I(\lambda) - q_1 I'(\lambda) - \sum_{i=1}^m e_i'' E_i(\lambda))^2 \quad (25)$$

また物理制約式として全  $\lambda$  に対して式 (6) と次の式を用いる。

$$0 \leq q_1 \leq \frac{I(\lambda)}{I'(\lambda)} \quad (26)$$

そしてこの式を最小化する係数  $q_1, e_i''$  を求めることで正確に光源スペクトルを求めることが出来る。これは多くの論文 [12] [13] が示すように鏡面反射はその光源を求める重要な手がかりであることと合致する。さらに式 (25) は次式の線型方程式に変換することが出来る。

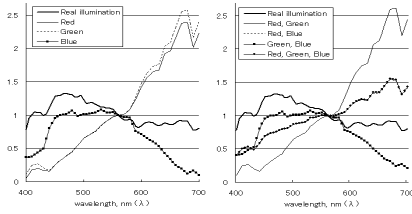


図 5 青色光源下での分離結果、(左:単一、右:複数)スペクトル

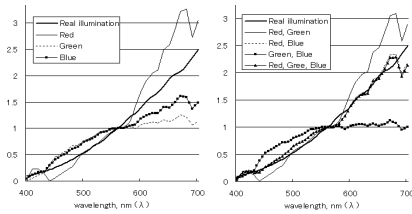


図 6 赤色光源下での分離結果、(左:単一、右:複数)スペクトル

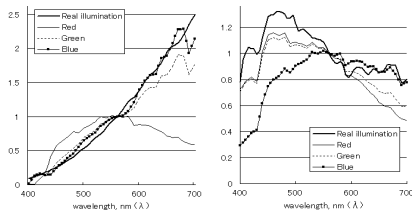


図 7 式 (20) 及び (21) による拡散反射・鏡面反射のスペクトルの分離結果 (左:赤、右:青)光源

$$\begin{pmatrix} E_1(\lambda) & \dots & E_m(\lambda) & I'(\lambda) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_m \\ q_1 \end{pmatrix} = I(\lambda) \quad (27)$$

これにより、より安定的に高速に解を求めることが出来る。

## 5. 実験

まず 1 点のスペクトルを計測できるスペクトルメータ (Spectrascan PR650) を用いて測定した反射光スペクトルの分離の実験を行った。図 5,6 はマクベスチャートの赤青緑の 3 色のスペクトルを用いて分離を行いその時求めた光源スペクトルである。図 5 は青色光源 (外光)、図 6 は赤色光源 (白熱灯) を用いており、実際の光源は太い曲線で表されている。またそれぞれ左側は単一点を用いたもの右側は複数点を用いたものである。特に赤色光源の時複数点を用いることで精度が向上している。ここで、正しい光源のスペクトルはホワイトバランスを用いて測定している。

次に図 7 はマクベスチャートの青赤緑の 3 色の鏡面反射・拡散反射の反射光スペクトルを用いて式 (20) 及び (21) により分離を行って得られた光源スペクトルの結果である。それぞれ左側が赤色光源下、右側が青色光源下での結果である。

次に図 8 はマクベスチャートの青赤緑の 3 色の鏡面反射・

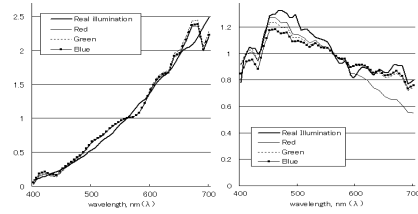


図 8 式 (24) 及び (26) による拡散反射・鏡面反射のスペクトルの分離結果。(左:赤、右:青)光源

光源色	単一点	同一光	式 (20)(21)	式 (24)(26)
青	34.55	11.39	13.01	0.76
赤	11.22	0.79	3.18	0.54

表 1 分離における光源の平均誤差

拡散反射の反射光スペクトルを用いて式 (24) 及び (26) により分離を行って得られた光源スペクトルの結果である。それぞれ左側が赤色光源下、右側が青色光源下での結果である。このとき分離の精度が格段に向上している。

表 1 は分離における平均誤差のデータである。分離により求めた光源スペクトルと実際の光源スペクトルとの誤差を次の式によって求める。

$$\sum_{\lambda} (I_{\text{分離光源}}(\lambda) - I_{\text{実光源}}(\lambda))^2 \quad (28)$$

青色・赤色光源下でのマクベスチャートの青・赤・緑系のそれぞれ 3 色を用い単一 (9 通り)、各色 1 つずつの 3 色の組み合わせ (27 通り) 及び、その鏡面反射・拡散反射 (9 通り) のデータの分離を行うことによって得られた平均の誤差である。これにより同一光の場合誤差は縮小し、特に鏡面・拡散反射のスペクトルを用いてその分離を行った場合非常に精度良い結果が得られる。

次にシーンのスペクトル測定を行った。モノクロカメラとして SONY XC-55 を用いた。図 9 はマクベスチャートを撮影して得られた多波長画像に対して分離を行った結果である。ここでの画像は画像としてわかりやすくするためにスペクトルから RGB に情報を落としている。上の画像が取得した多波長画像、真中が分離結果、下が分離で得られた反射率画像で、左側が太陽光、右側が白熱灯での画像である。上側の画像に比べて下側の画像はより近い色となっている。

次に図 10 の左上が統合によって得られた多波長画像である。図の右上がこれによって得られた画像の青色の四角の中心部のスペクトルのデータである。図の右下がこのスペクトルのデータを拡散反射・鏡面反射の分離アルゴリズムを用いて求めた光源スペクトル (青) と実際の光源 (黄) である。そして画像の左下がこれにより求めた反射率画像である。光源のスペクトルが良い精度で求まっている。

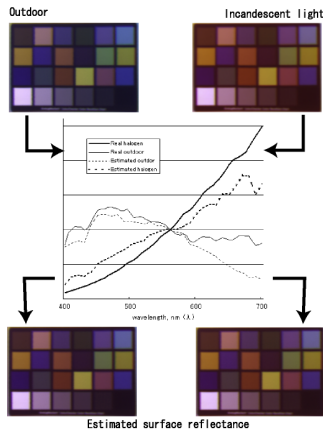


図 9 異光源(青・赤)でのマクベスチャートの分離結果

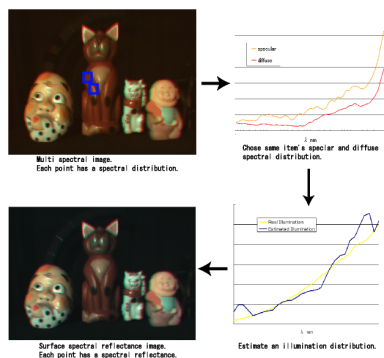


図 10 多波長画像の鏡面反射・拡散反射による分離

## 6. 都市空間への応用

我々はこれらの方法を用いて都市空間の反射率によらない色情報を取得することを目標とする。前章の分離方法を利用することで光源色によらない反射率を効率良く取得することができるため、撮影を行う時間帯等光源環境によらない一定の画像を得ることができる。また高次元色情報によってよりリアルに色を再現することも可能となる。しかしここでスペクトルを測定するに当たって1つの問題が存在する。それは測定スピードに比べ車両の移動速度が速いため十分な密度でスペクトルを測定することができないことである。例えば時速36kmで走る車で30fpsの速度で撮影を行うと連続する画像間で33cm移動することになる。そこで図5に示すように車両からスペクトル撮影と同時にRGBカメラによる撮影を行い統合し補完し合う事で都市空間の高密度な高次元反射率情報を取得することを目標とする。

## 7. まとめ

本論文では都市空間をスペクトルで測定し、複数の反射光スペクトル(同一光源異物体または拡散反射・鏡面反射)を用いた光源スペクトル・分光反射率の分離により光源色によらない反射率を精度良く取得する方法を示し、シーンのスペク

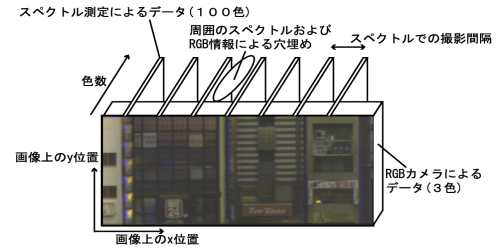


図 11 スペクトルと RGB を組み合わせた都市空間の色計測

トルに対し反射率の推定を行った。複数の反射光スペクトルを用いることで分離の精度が向上し、特に鏡面反射・拡散反射のスペクトルを用いることで更に精度良く分離を行うことが出来、シーンに対してもより光源色によらない画像を取得した。そしてこれらによって光源色によらない都市空間の色情報を効率良く取得することをこれからの目標としたい。

## 文 献

- [1] Po-Rong Chang and Tsung-Hsieh Hsieh. Constrained nonlinear optimization approaches to color-signal separation. *IEEE trans. image processing*, 4(1):81–93, 1995.
- [2] J. Cohen. Dependency of the spectral reflectance curves of Munsell color chips. *Psychon. Sci.*, 1:369–370, 1964.
- [3] G.D. Finlayson, B.V. Funt, and K. Barnard. Color constancy under varying illumination. *ICCV*, pages 720–725, 1995.
- [4] G.D. Finlayson, Steven D. Hordley, and Paul M. Hubel. Color by correlation: A simple, unifying framework for color constancy. *PAMI*, 23(11):1209–1221, 2001.
- [5] G.D. Finlayson and Gerald Schaefer. Solving for colour constancy using a constrained dichromatic reflection model. *IJCV*, 42(3):127–144, 2001.
- [6] Graham D. Finlayson and Steven D. Hordley. Color constancy at a pixel. *J. Opt. Soc. Am. A*, 18(2):253–264, 2001.
- [7] Jian Ho, Brian V. Funt, and Mark S. Drew. Separating a color signal into illumination and surface reflectance components: Theory and applications. *IEEE PAMI*, 12(10):966–977, 1990.
- [8] Deane B. Judd, David L. Macadam, and Gunter Wyszecki. Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature. *J. Opt. Soc. Am.*, 54(8):1031–1040, 1964.
- [9] H. C. Lee, E. J. Breneman, and C. P. Schulte. Modeling light reflection for computer color vision. *PAMI*, 12:402–409, 1990.
- [10] J. P. S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen. Characteristic spectra of Munsell colors. *J. Opt. Soc. Am. A*, 6(2):318–322, 1989.
- [11] David Slater and Glenn Healey. What is the spectral dimensionality of illumination functions in outdoor scenes? *CVPR*, pages 105–110, 1998.
- [12] Robby T. Tan, Ko Nishino, and Katsushi Ikeuchi. Illumination chromaticity estimation using inverse-intensity chromaticity space. *CVPR*, 1:673–680, 2003.
- [13] Shoji Tominaga and Brian A. Wandell. Standard surface-reflectance model and illuminant estimation. *J. Opt. Soc. Am. A*, 6(4):576–584, 1989.