

# 波長時間変調のイベント計測による 分光分布の適応的サンプリング

北野 和哉<sup>1,a)</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 安國 良平<sup>1</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

## 概要

一般的な分光解析では、分光分布におけるピーク検出によって物性などの手がかりを得る。従来の分光計測では波長範囲を一様にサンプリングするため、計測時間・データともに膨大となるが、その多くは解析に無用である。そこで本研究は、分光透過率を時間的に変化させるフィルタを用い、それにより生じる輝度変化をイベントカメラで計測する事で、分光分布を適応的にサンプリングする手法を提案する。本手法の原理検証を行い、実現可能性を示した。

## 1. 分光分布の計測手法とサンプリング

人工衛星で地上の状態を計測するリモートセンシングや空気中のガス濃度の計測、果物や作物などの糖度計測など、分光解析は物性を知る手法として様々な分野で利用されている。一般的に、分光解析は原子中の電子の励起や分子構造による振動によって生じる山や谷を手掛かりにシーン中の現象を解析する。

シーン中の分光分布を撮影する分光撮像には様々な手法があり、Hagen らは大きく 2 つに分類している [1]。1 つは波長を空間に写像する方法である。この方法では、波長を空間的に分解するプリズム・回折格子を用いたり、画素ごとに異なるカラーフィルタを取り付けたりすることで、分光分布を撮影する。もう 1 つは波長を時間に写像する方法である。この方法では、液晶チューナブルフィルタなど、分光透過率を時間的に制御できるフィルタを用いて分光分布を撮影する。一般的にこの手法では波長を一様にサンプリングするが、細かいサンプリングには計測に時間がかかる上、分光分布の変化が少ない部分は解析に役立たず、膨大なデータが無駄になる。シーンの分光分布が既知であれば、特定の波長のみを計測することも可能であるが、特定の応用にしか使えず、汎用性が犠牲となる。

そこで、本研究ではシーンの分光分布が未知の下で、分光分布の山や谷に対して適応的なサンプリングを行う分光計測を提案する。具体的には、図 1 に示すように分光透過

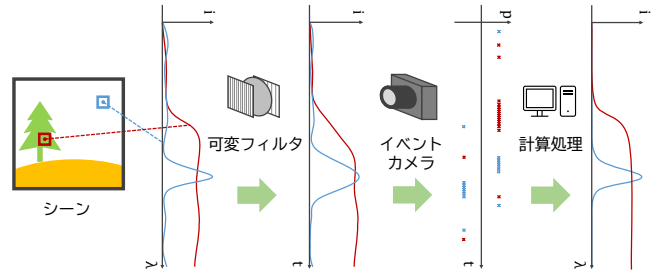


図 1 提案手法の概要

率を時間的に変調する光学素子と、輝度変化を効率的に計測可能なイベントカメラを組み合わせることで、分光分布の適応的なサンプリングを実現する。

本研究の貢献は次の 3 点である。1 つめは、シーンの分光分布が未知の下における、分光撮像の適応的サンプリングを初めて提案した点である。2 つめは、イベントカメラの新しい応用として、分光撮像の適応的サンプリングを示した点である。3 つめは、分光分布の適応的サンプリングモデルを構築し実環境にて原理検証を行い、実現可能性を示した点である。

## 2. 分光分布の適応的サンプリング手法

### 2.1 分光分布の時間変調

ここでは、一般的なイメージセンサに入射する輝度と分光分布の関係を示す。センサへ入射する光の輝度値は、光源の分光分布と物体の分光反射率、センサの分光感度特性を掛け合わせたものを観測可能な波長範囲で積分することで得られる。このとき、得られる輝度値は画素ごとに独立である。ここで、電圧によって分光透過率を制御可能な可変フィルタをセンサの手前に挿入する。ある時刻  $t$  におけるセンサへの入射光量  $i_t$  は次式で表される。

$$i_t = \int f(\lambda)w(\lambda, \phi_t)s(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $f(\lambda)$  は光源と物体の分光分布の積、 $w(\lambda, \phi_t)$  は時刻  $t$  における可変フィルタの分光分布、 $s(\lambda)$  はセンサの分光感度特性であるシーンの分光分布  $f(\lambda)$  が周期信号で制御した可変フィルタによって変調されるためにセンサへの入射輝度は時刻によって変化する。

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

<sup>a)</sup> kitano.kazuya.jy9@is.naist.jp

## 2.2 イベントカメラによる輝度変化の適応的サンプリング

イベントカメラでは、直前に発生したイベント時刻における輝度値と現時点での輝度値の差分がしきい値を超えたとき、輝度の増加と減少を区別する 1bit の極性を出力する。このときカメラはイベントを極性・座標・イベント発生時刻として出力する。このカメラは、輝度の変化がないときには何も出力せず、変化が起こったときのみイベントを出力する。従来のカメラが時間軸に対して一定間隔で各画素の輝度値を出力していたのに対し、イベントカメラは輝度の変化を適応的にサンプリングしているといえる。

ある時刻  $t$  におけるイベントと光量の関係は次式で表される。

$$p_t i_{th} = \ln \left( \frac{i_t}{i_{t-1}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $i_t$  はイベント発生時刻  $t$  における輝度値、 $i_{t-1}$  は直前のイベント発生時刻  $t-1$  における輝度値、 $p_t$  はある時刻  $t$  で発生したイベント、 $i_{th}$  はイベントが発火する輝度変化量のしきい値を示す。イベントカメラでは、入射光量を対数増幅した値に対してイベント発火のしきい値を最小間隔とした離散化を行う。この式を変形すると各時刻におけるイベントと輝度値の関係は以下ようになる。

$$i_{t+1} = e^{p_t i_{th}} i_t \quad (3)$$

イベント発火のしきい値が既知であれば計測区間全体の相対的な輝度値を求めることができる。推定されたしきい値はスケールの不定性が残る。この不定性によって輝度値ベクトルの波形にもスケール不定性が生じるが、輝度値ベクトルは正規化されるので影響しない。ある区間全体で計測されたイベントと光量の関係は次式で表される。

$$\mathbf{i} = P\mathbf{i} \quad (4)$$

$$(P - I)\mathbf{i} = \mathbf{0} \quad (5)$$

$\mathbf{i}$  は計測範囲全体の輝度値ベクトル、 $P$  は直前に発生したイベントと光量の関係を定義した行列、 $I$  は単位行列、 $\mathbf{0}$  はゼロベクトルである。ここで得られる輝度値ベクトルは時間軸に対して非一様にサンプリングされたものである。

## 2.3 計算処理による分光分布の推定

時間変調された分光分布をイベントカメラで観測する場合を考える。まず、分光分布の時間変調と輝度値の関係を示した式 (1) をイベント発火のタイムスタンプに沿って離散化すると、

$$\mathbf{i} = W(\mathbf{s} \otimes \mathbf{f}) \quad (6)$$

で表される。ここで、可変フィルタを駆動する信号 1 周期で発生したイベント数を  $T$ 、推定する分光分布のバンド数を  $\Lambda$  として、 $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^T$  はイベント発火時の輝度値ベクトル、 $W \in \mathbb{R}^{T \times \Lambda}$  は可変フィルタの時間ごとの分光透過率行列、 $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^\Lambda$  はカメラの分光感度特性、 $\otimes$  はアダマール積、

$\mathbf{f} \in \mathbb{R}^\Lambda$  はシーンの分光分布ベクトルである。ここで、 $W$  はイベント発火のタイムスタンプに沿って分光透過率が格納されているために時間軸に対して非一様となる。ある時刻  $t$  で発生したイベントと時間変調された分光分布の関係は式 (5) に式 (6) を代入して、

$$(P - I)W(\mathbf{s} \otimes \mathbf{f}) = \mathbf{0} \quad (7)$$

で表される。シーンの分光分布  $\mathbf{f}$  は最小二乗法を用いて次式で求められる。

$$\underset{\mathbf{f}}{\operatorname{argmin}} \left\| (P - I)W(\mathbf{s} \otimes \mathbf{f}) \right\|_2^2 \quad (8)$$

それぞれのパラメータは観測値から次のように求められる。 $P$  はカメラに設定されたイベント発火しきい値と観測されたイベントの極性より設定する。 $W$  は、可変フィルタの時間ごとの分光透過率と観測されたイベント時刻を用いて作成する。 $\mathbf{s}$  は、カメラの分光感度特性を用いて作成する。

## 3. 原理検証

本手法の実現可能性を検証する実験を行った。まず、白色 LED 光源の計測値と仮想的な可変フィルタを用いたシミュレーションにより、イベントカメラによる観測からシーンの分光分布が復元できることを示す。次に、提案した装置でカラーチェッカーを観測した結果を示し、シーン中の分光分布に応じて異なるサンプリングが行われていることを示す。最後に、計測されたイベント列からシーンの分光分布の推定を試みる。

### 3.1 シミュレーション実験

可変フィルタを用いて時間変調した光をイベントカメラで観測することにより、シーンの分光分布が復元できることをシミュレーションによって示す。ここでは狭帯域なバンドパスフィルタを想定し、図 2 に示すように 20 nm 幅のカーネルが時間的に掃引するものを正弦関数を用いて生成した。また、イベントカメラのセンサ感度として、Taverni ら [3] の論文より取得し分光感度特性を用いた。なお、イベントしきい値は後述する実験で用いた実機での値を設定した。

また、シーンの分光分布として、この実験では白色 LED 光源を分光器で測定したスペクトルを用いた。イベントカメラのセンサが感度を持つ範囲を内包する 300 nm–1100 nm に対し、10 nm 間隔でサンプリングしたデータを用いた。

以上を用いた観測をシミュレートした出力 (図 3) を基に、式 (8) に従って分光分布を推定した。図 4 に真値 (青) と推定結果 (橙) の比較を示す。なお、提案手法では原理的に絶対的な光の強度は求められないため、ここでは正規化した分光分布で比較している。真値と比較して概ね一致していることが分かる。結果より、図 2 に示したような可変

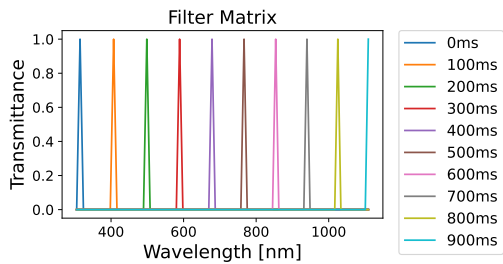


図 2 シミュレーション実験に用いたフィルタ。フィルタ形状は sin 波で波長軸上で 20 nm ある。グラフではフィルタを 10 サンプル間隔で抜き出して表示している。

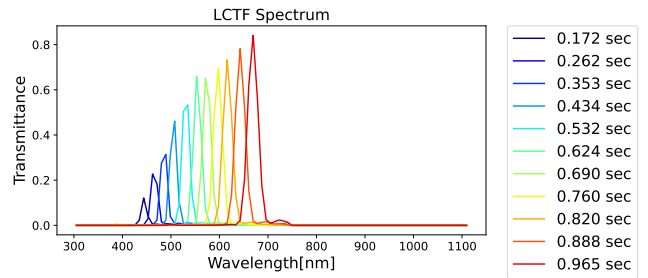


図 6 液晶チューナブルフィルタの分光透過率の時間変化。1 秒間より 11 個を抜き出して表示している。

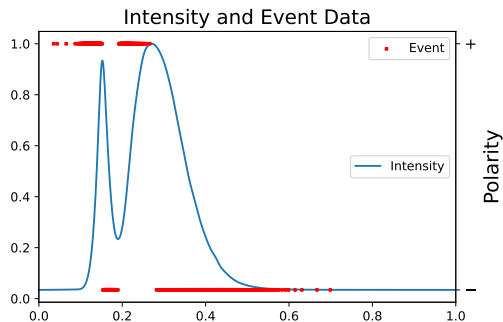


図 3 生成した輝度値とイベントデータ

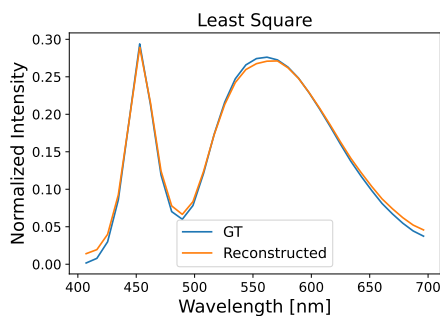


図 4 分光分布の真値 (青) と推定結果 (橙)。

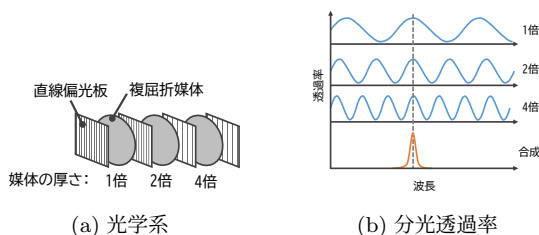


図 5 液晶チューナブルフィルタの光学系と分光透過率の時間変調

フィルタを用いれば、原理的には分光分布の推定が可能であることが示された。

### 3.2 実験環境

次に、可変フィルタとして液晶チューナブルフィルタを用いて実機による検証を行った。液晶チューナブルフィルタは、リオフィルタと呼ばれる波長軸において透過率変化が正弦波のように変化するフィルタ (図 5) を複数段組み込んだものである [2]。それぞれ複屈折媒体の屈折率が異なる

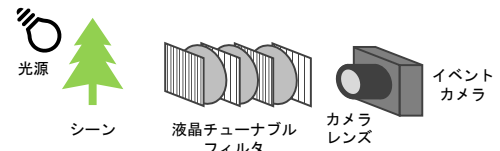


図 7 実験環境の光学系

ため、得られる分光透過率が異なる。実験では、液晶チューナブルフィルタをイベントカメラのレンズの手前に配置した。また、時間ごとの分光透過率行列  $W$  を構成するため、0.5 Hz の三角波信号で駆動した液晶チューナブルフィルタの分光透過率の時間変化を予め分光器で計測した。その結果を図 6 に示す。グラフの濃淡で 0–1 秒間における分光透過率の変化を示している。グラフより、400 nm–700 nm の波長帯で分光透過率が時間変化している様子が分かる。

実験に用いた光学系を図 7 に示す。なお、イベント発火しきい値は、周期変動する光源をイベントカメラで観測した際のイベント発生パターンから推定した。

### 3.3 適応的サンプリングの検証

提案手法によって、シーンの分光撮像において適応的サンプリングが実現されていることを確認するため、前述の装置でカラーチェッカーを観測した。イベントカメラの画素とシーン中のカラーパッチが対応付けられるように、イベント計測と通常のカメラのフレーム撮像を兼ね備えた DAVIS 346 を用いた。液晶チューナブルフィルタによる時間変調に合わせ、10 ms 間隔で積算し各画素のイベント数を可視化したものを図 8 に示す。参考として、撮影に用いたカラーチェッカーのカラー画像と、DAVIS 346 で撮影したフレーム画像も示す。通常のカメラによる 30FPS のフレーム撮像であれば、33 ms ごとに全画素で 1 回輝度値がサンプルされることになる。これに対し、提案した構成では 10 ms でおおよそ 0–5 回のイベントがパッチによって異なる回数発生しており、またその回数も時刻と共に変化していることが見て取れる。このイベントの発生パターンは、液晶チューナブルフィルタによる時間変調と各パッチの分光分布が異なることに起因しており、分光分布の適応的サンプリングが実現できているといえる。

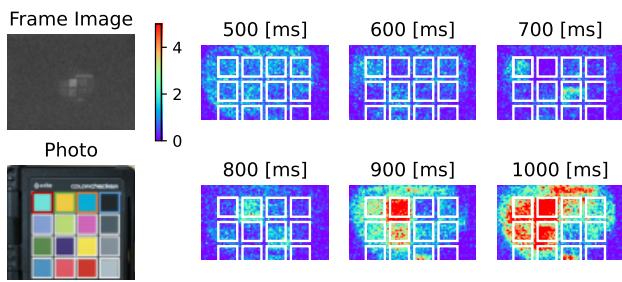


図 8 カラーチェッカーを計測したときのイベント数の時間変化。液晶チューナブルフィルタによる時間変調に合わせて 10 ms に積算したものを 100 ms ごとに可視化した。白枠はカラーパッチを表している。

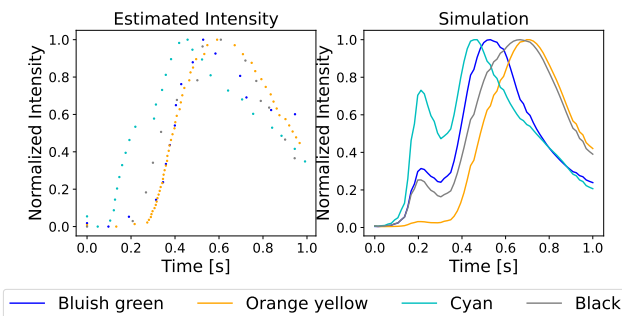


図 9 各カラーパッチにおける時間変調による輝度変化の推定結果。

### 3.4 イベント列からの分光分布の推定

次に、実機を用いて計測したイベント列から分光分布の推定を試みる。まず、式 (5) に基づき、輝度変化の復元結果を確認した。いくつかのカラーパッチについて、観測されたイベント系列を基に復元した輝度変化を図 9 左に示す。なお、グラフの色は図 8 に示したカラーパッチの色と対応している。カラーパッチごとに立ち上がりや立ち下りの波形が異なること、輝度変化が少ないところではイベントがあまり発生していないことが分かる。

前節で計測したカラーチェッカーは、観測環境における分光分布の真値を測定することが困難であり、評価として用いるのは不十分である。DAVIS346 で撮影したフレーム画像を真値として用いることも試みたが、液晶チューナブルフィルタを通して観測した光量が小さすぎ、真値として用いることができなかった。イベント系列から有意な輝度変化が復元できたのは、低照度でも感度がよいというイベントカメラの利点による結果であるといえる。フレーム画像の代わりとして、用いたカラーチェッカーの分光反射率 [4]、分光器で測定した白色 LED 光源の分光分布、イベントカメラのセンサ感度、および液晶チューナブルフィルタの分光透過率の時間変化を用い、想定される輝度の時間変化を計算した。これを図 9 右に示す。左右のグラフを見比べると、概形は復元できていることが確認でき、分光分布を復元可能なことが示唆された。ただ、式 (8) により分光分布の復元を試みたが、分光分布をうまく復元するとこ

ろまでは至らなかった。これは、図 9 で概形は復元できていたものの、シミュレーション結果に合わなかったことが原因と考えられる。今回の実験を通して、以下のことが分かった。まず第一に、輝度の時間変化の復元結果がイベントカメラの発火しきい値の推定精度に大きく影響を受けた。そのため、しきい値を精度よく校正する方法が肝要である。また、イベントカメラで発生するノイズの影響も大きいと考えている。これは比較的狭帯域な透過特性を持つ液晶チューナブルフィルタを用いたため、光量が少ないことによる影響も少なくない。ノイズと波長分解能の間にはトレードオフがあると考えられ、用いるフィルタについても検討の余地が残されている。

## 4. まとめ

本研究では、分光透過率の時間変調とイベント計測を組み合わせることによって分光分布の適応的なサンプリングを実現する方法を提案した。分光透過率の時間変調とイベント計測の関係を定式化し、分光分布を推定する手法を提案した。実験では、白色 LED 光源の計測値と仮想的な可変フィルタを用いたシミュレーションにより、イベントカメラによる観測からシーンの分光分布が復元できることを示し、提案手法の実現可能性を示した。また、実際に液晶チューナブルフィルタを用いて構成した装置でカラーチェッカーを観測した結果を示し、未知のシーンに対して適応的サンプリングが行われていることを示した。最後に、液晶チューナブルフィルタで時間変調することで得られる輝度が、シーンの分光分布の概形と一致することを確認できた。しかしながら、実環境における分光分布の推定には至らなかった。

提案手法では適応的サンプリングによる高効率な分光撮像が見込まれる。一方、イベントカメラを用いる欠点として、絶対的な輝度が定まらず、スケールの不定性が残ることが挙げられる。応用によっては問題にならないと考えられるが、この点についても検討の余地がある。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP20K21816 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Nathan A. Hagen, Michael W. Kudenov, "Review of snapshot spectral imaging technologies", *Optical Engineering*, 52(9), 090901, 2013.
- [2] 富永昌治, 岡島良介, 液晶フィルタによる分光画像計測システムの改良, *映像情報メディア学会誌*, 54(2), 268-276, 2000.
- [3] G. Taverni, "Front and Back Illuminated Dynamic and Active Pixel Vision Sensors Comparison", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 65, 5, 677-681, 2018.
- [4] Myers R (2020) Spectral library, Chromaxion™. <https://chromaxion.com/spectral-library.php>