

令和 4 年 10 月 24 日現在

機関番号：14603
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2020～2021
課題番号：20K21816
研究課題名（和文）波長微分分光の直接計測のための分光変復調への挑戦

研究課題名（英文）Design of Coded Differential Spectroscopy

研究代表者

船富 卓哉（Funatomi, Takuya）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：20452310

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、光学系の工夫と情報処理の融合により分光分布とその波長微分を直接計測することである。この目的に向けて、2種類の方法を考案した。1つは、光学素子によって空間的に展開された分光分布を、わずかに傾けた2次元画像センサによって観測し、超解像処理を行う方法である。一般的な1次元センサを利用した場合と比較して最大20倍の波長分解能を達成できることを示した。もう1つは、分光透過率を時間的に変調するフィルタと、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た分光撮像である。未知の分光分布を持つシーンに対して、波長微分値が大きいところを重点的にサンプリングする、新しい原理の手法である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1つめの手法は、光学系の論文誌であるOptics Expressに掲載された。
2つめの手法は、未知の分光分布を持つシーンに対して、波長微分値が大きいところを重点的にサンプリングし、波長微分が小さいところはほとんどサンプリングをしない、新しい原理の分光計測手法である。従来の分光カメラはいずれも波長軸に対して等間隔なサンプリングを行うが、本手法は分光分布に適応的なサンプリングを実現するため、計測する分光分布に応じた効率的なデータ圧縮が可能になると期待される。この特性により、リモートセンシングなど遠隔地における計測に重要な役割を果たすと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This project aims to directly measure spectral distributions and their wavelength derivatives by combining optics and computing. We proposed two methods: one uses a slightly tilted area sensor to observe the spectral distribution dispersed by an optical element such as grating. By adopting the super-resolution technique, this method can achieve a wavelength resolution up to 20 times higher than that of a conventional linear sensor. The other is spectral imaging which combines a temporally modulated spectral filter and an event camera that can efficiently measure intensity changes. This method enables adaptive sampling along wavelengths for unknown spectral distribution.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：分光 コンピュータショナルフォトグラフィ 超解像 イベントカメラ 時間変調 適応的サンプリング

1. 研究開始当初の背景

物質の状態や性質が得られる分光計測は、計量化学だけでなく宇宙観測や細胞観察など、幅広い分野で活用されている。分光計測に利用される分光器はプリズムや回折格子を用いて分光し、波長軸を空間軸に展開する方式が一般的である。空間的に展開された分光分布を1次元に並べられたセンサを用いて計測する。この分光器の基本的な構造は19世紀から大きな変化はなく、光学素子の性能向上やセンサの半導体化などのハードウェアの進化によって性能向上が支えられてきた。しかし、光には回折限界があり、光学系やセンサなどの微細化などのハードウェアの性能向上は限界が近づいている。

2. 研究の目的

近年、情報学、電子工学、光学の融合領域として、ハードウェアとソフトウェアの協調設計によって従来の一般的なカメラの性能限界を突破する研究が台頭しており、Computational Photography と呼ばれている。本研究の目的は、光学系の工夫と情報処理の融合により分光分布とその波長微分を直接計測することである。葉緑素の可視化や希土類元素の含有量測定などにおいて、外乱の影響を排除するため、計量化学の分野では波長微分した分光分布が用いられている。一般的には、分光器で計測した分光分布を計算処理によって波長微分して取得される。このアプローチは、微分の精度が分光器の波長分解能に依存し、センサにおけるノイズの影響を大きく受ける問題がある。本研究では、分光分布を数値的に微分するのではなく、光学素子やセンサを制御して分光分布を変調し、情報処理によって波長微分値を取り出す新しい原理の分光計測手法の開発に挑戦する。これは、古典的な計測系を現代の光学機器と情報処理に即して再構築する新しい試みである。

3. 研究の方法

研究目的を達成するため、以下に述べる2つのアプローチを考案し、検証した。

- (1) 先述の通り、一般的な分光計測は、回折格子などの光学素子によって波長軸を空間軸に展開し、これを1次元に並べられたセンサを用いて分光分布を計測する。ここで、分光計測の波長分解能を制約する大きな要因はセンサ画素の大きさと数である。画素を小さくし数を増やせば、波長分解能の向上につながる。しかし、1つ1つの画素が受ける光量が減少するため、ノイズの影響を受けやすくなるという問題が出てくる。また、センサ製造上の物理的制約もあるため、画素サイズを小さくするのにも限界がある。

一般に広く普及しているカメラのセンサでも画素のサイズは十分に小さい。これを分光計測に用いる場合、画素は2次元的に配置されているが、そのうち1次元しか活用できない。そこで本研究では、残る1次元を波長分解能の向上に役立てる試みを行った。具体的には、図1に示すように、光学素子による分光の空間軸に対し、センサの画素の空間軸を少し傾けて配置する。これによって、各行では従来と同じ分光計測になるが、各列にあるセンサはそれぞれわずかに異なる波長域を観測することになる。この観測過程を、光学系によって生じる波長依存のボケと連続的な分光分布に対するセンサの受光領域に応じた窓関数による畳み込み演算としてモデル化する。複数の行からの観測に対し逆畳み込み演算(超解像処理)を行うことで、元のセンサと比較して数倍の波長分解能を達成できることが見込まれる。

また、分光器を用いた分光計測を空間的に走査することで、分光撮像を行う手法の開発にも取り組んだ。空間走査に時間を要するため、撮像が照明の時間変化の影響を受ける。この問題を解決するため、図2に示すように空間走査を少し余分に行うことでその影響を大幅に軽減できることが見込まれる。

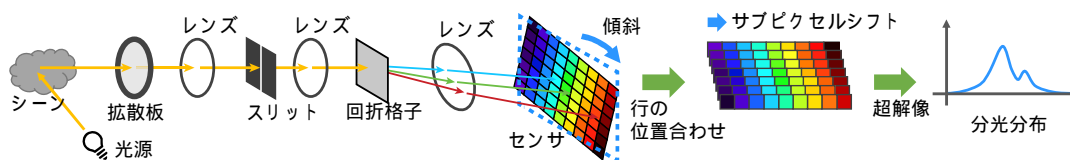


図1: センサの傾斜による分光分布の超解像計測

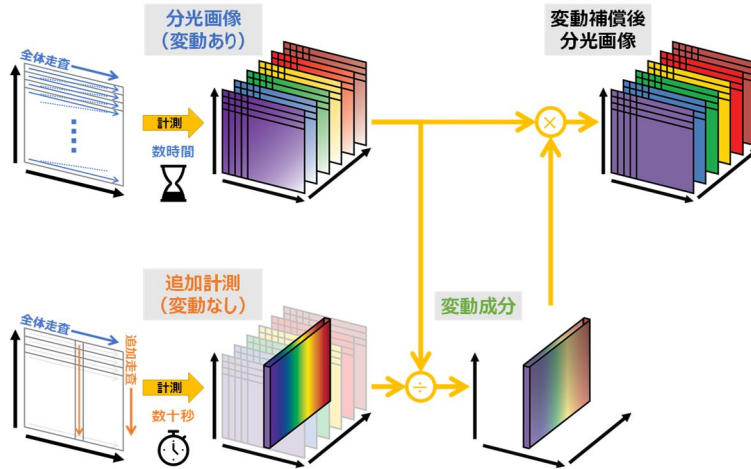


図 2：分光撮像における照明変化の補償

- (2) 上記とは異なる分光計測のアプローチとして、分光透過率を電子制御可能な光学素子によって波長軸を時間軸に展開し、光量の時間変化を効率的に検出するセンサを用いて観測する、新たな分光計測の方式を考案した。具体的には、図 3 に示すように分光透過率を時間的に変調するフィルタと、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た。フィルタの分光透過率を時間的に変化させることにより、センサに入射する光量が分光分布に応じて変化する。イベントカメラが搭載する Dynamic Vision Sensor は光量の増減を適応的に出力するセンサであり、分光分布の変化に応じて適応的なサンプリングが可能となる。2 次的に配置された画素の各々で分光分布を適応的にサンプリングできるため、分光撮像が可能になる。従来の分光撮像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。一方、本手法では分光分布の変化に応じて適応的にサンプリングすることが可能となるため、解析に有用なデータのみを効率よく取得できることが見込まれる。手法の実現可能性を示すためにシミュレーション実験を行い、実環境における実現性を示すために光学系を構築し分光分布が既知の物体に対する計測を行う。

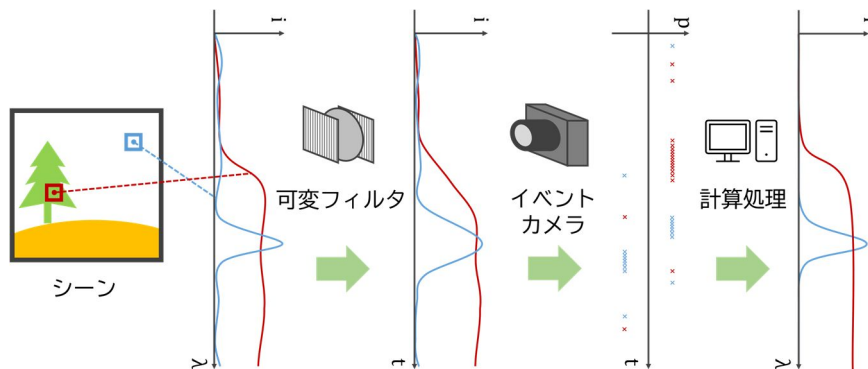


図 3：分光分布の適応的サンプリング手法

4. 研究成果

前章で示した 2 つのアプローチについてそれぞれの成果を以下に示す。

- (1) センサ傾斜による分光分布の超解像計測では、実際に分光器を構築しその分光器で計測した低圧水銀ランプの輝線を復元することで本手法による分解能向上を評価した。構築した分光器を図 4 に示す。光学系は一般的な透過型分光器の構成であるが、イメージセンサが光軸に対して数度だけ傾けてある点が従来構成と異なる。

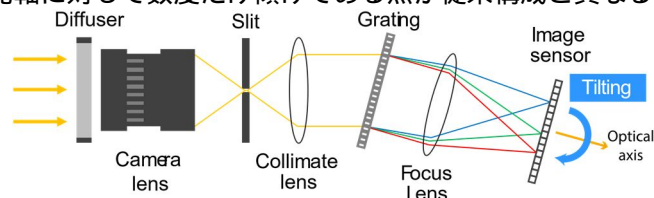


図 4：構築した分光器の上面図

構築した分光器で計測した低圧水銀ランプの輝線を復元した結果を図 5 に示す。光源として低圧水銀ランプを利用し、波長範囲 400 ~ 800nm の輝線を使用した。低圧水銀は、インパルス状の分光分布が得られ、それらの波長は高精度な値が知られているため、分光器の精度評価やキャリブレーションによく利用される。低解像度な分光分布と超解像によ

って得られた分光分布を比較した結果、3.5~4 倍程度の分解能向上が確認された。また、本手法で提案するボケ除去を適用することで最大 20 倍程度の分解能向上を実現できた。この成果は、光学系の論文誌である Optics Express に掲載された。

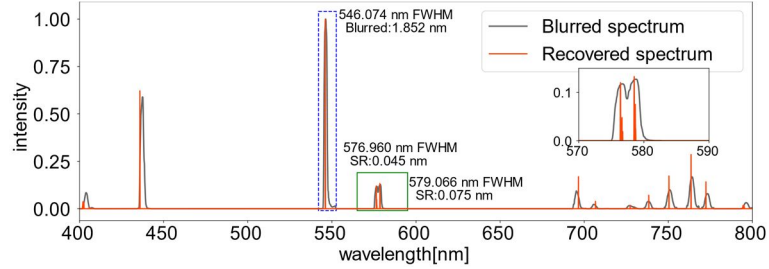


図 5：低圧水銀ランプを用いた実環境実験の結果

また、時間変化する照明環境下において分光分布が既知のカラーチェッカーを分光撮像し、照明変動の補償の有無を比較した結果を図 6 に示す。カラーチェッカーのいずれのパッチに対しても、真値に近い補償結果が得られた。この成果については、国際論文誌 International Journal of Computer Vision に掲載された。

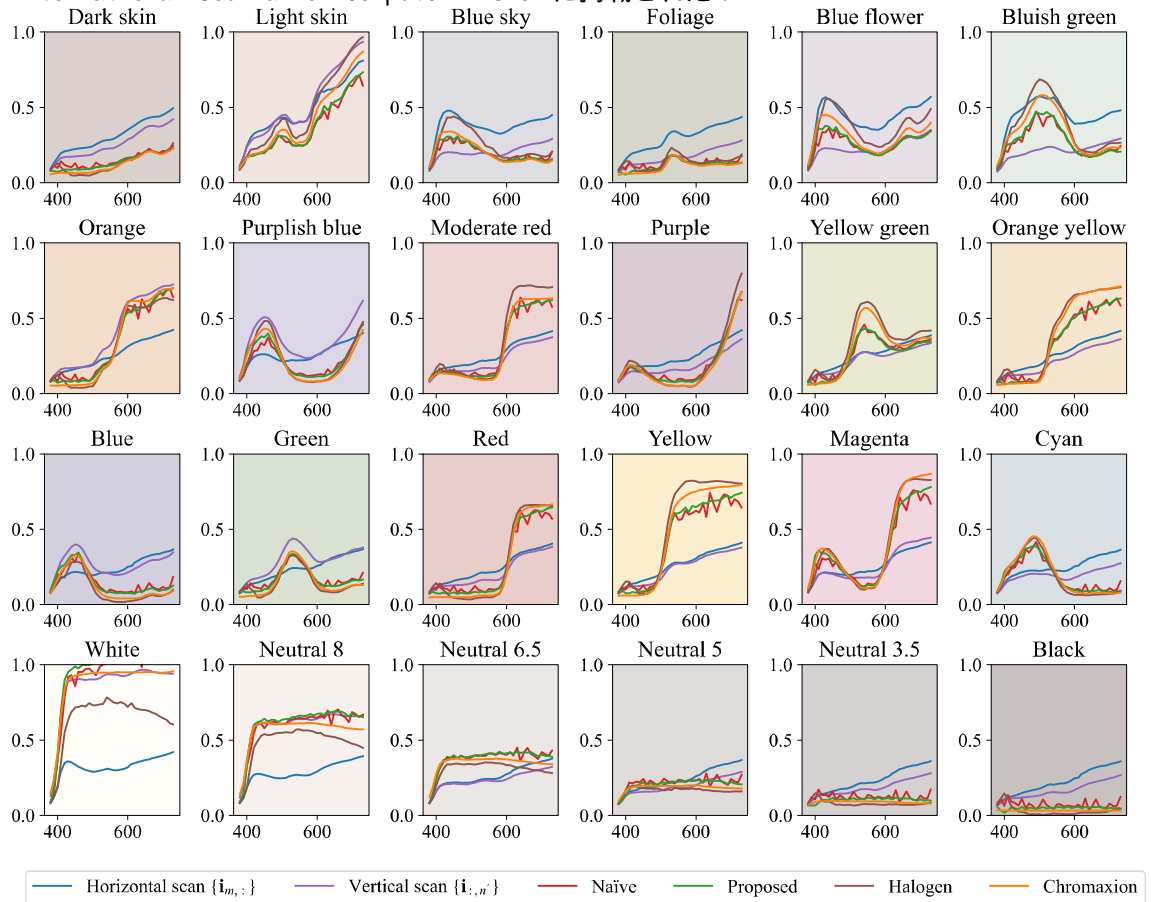


図 6：時間変化する照明環境下での分光撮像結果

- (2) 分光分布を適応的にサンプリングする分光カメラを試作した。図 7 に示すように、時間的に分光透過率を変調可能な液晶チューナブルフィルタを用いて波長軸を時間軸へ展開し、イベントカメラを用いて光量の増減を検出する構成とした。

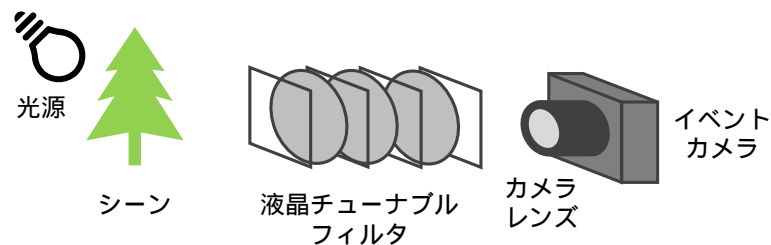


図 7：構築した分光カメラの構成

原理検証を行うため、シミュレーション実験を行った。実験では、白色 LED 光源と液晶チューナブルフィルタの分光分布として実測値を用い、光量の増減イベントを計算によ

て生成した .生成したデータを用いて元の分光分布を推定できるかどうかを検証した .結果を図 8 に示す .青色が真値の分光分布で ,橙色が推定した分光分布である .結果より ,本手法が原理的に動作する事が確認された .

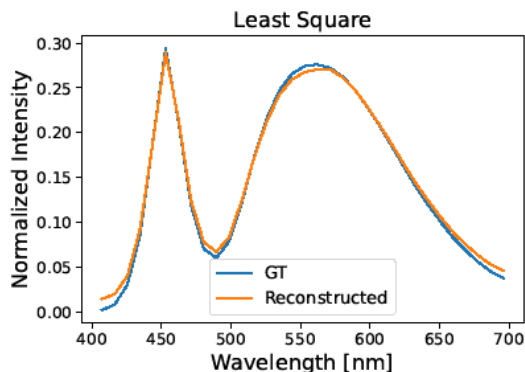


図 8 : シミュレーション実験結果

また ,構築した分光カメラを用いた実環境実験を行った .先述と同様 ,分光分布が既知の対象としてカラーチェッカーを撮影した .カラーチェッカーに白色 LED 光を照射し ,得られたイベントデータをシミュレーション結果と比較することで適応的サンプリングが想定通りにできているか評価した .実環境実験にて得られた結果を以下に示す .図 9 は 10 ミリ秒間のイベントデータを累積した結果である .カラーパッチ毎に ,時間によってイベント数が異なり ,適応的なサンプリングが実現できていることが分かる .また ,図 10 左は 1 秒間の変調周期で観測された各カラーパッチのイベントデータから ,輝度変化を復元した結果である .また ,参考値として ,対応するカラーパッチの分光分布を用いて ,観測される輝度変化のシミュレーションした結果を図 10 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 .

これらの成果は第 25 回 画像の認識・理解シンポジウムにて発表する予定である .

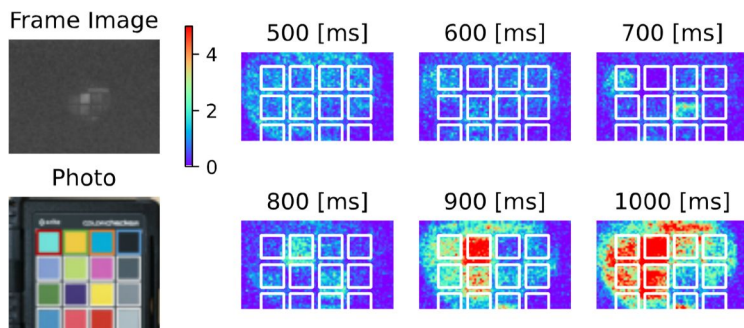


図 9 : カラーチェッカーを計測したときのイベント数の時間変化

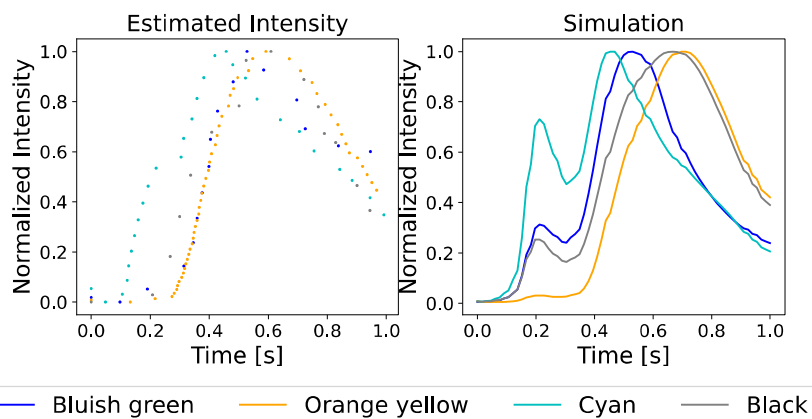


図 10 : 各カラーパッチにおける時間変調による輝度変化の推定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kitano Kazuya, Funatomi Takuya, Yasukuni Ryohei, Tanaka Kenichiro, Kubo Hiroyuki, Hosokawa Yoichiroh, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 29
2. 論文標題 Super-resolution for a dispersive spectrometer using a tilted area sensor and spectrally varying blur kernel interpolation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 2809 ~ 2809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.414479	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Funatomi Takuya, Ogawa Takehiro, Tanaka Kenichiro, Kubo Hiroyuki, Caron Guillaume, Mouaddib El Mustapha, Matsushita Yasuyuki, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 130
2. 論文標題 Eliminating Temporal Illumination Variations in Whisk-broom Hyperspectral Imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Vision	6. 最初と最後の頁 1310 ~ 1324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11263-022-01587-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 部 竜太, 藤村 友貴, 船富 卓哉, 向川 康博, 森本 哲郎, 大石 岳史, 高松 淳, 池内 克史
2. 発表標題 物理ベースオートエンコーダを用いた分光画像からの塗布顔料の厚みと混合比率推定
3. 学会等名 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青山 尚正, 知念 響紀, 船富 卓哉, 向川 康博, 森本 哲郎, 大石 岳史, 高松 淳, 池内 克史
2. 発表標題 古墳顔料解析のためのKubelka-Munkモデルの妥当性
3. 学会等名 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北野 和哉, 船富 卓哉, 安國 良平, 向川 康博
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第25回 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	安國 良平 (Yasukuni Ryohei) (40620612)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教 (14603)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	北野 和哉 (Kitano Kazuya)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・研究員 (14603)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス	University of Picardie Jules Verne		