

エリアセンサの傾斜による分光計測の超解像と波長依存なボケ関数の推定 Spectral Super-resolution Using Tilted Area Sensor and Spectrally-varying Blur Kernel Estimation

北野 和哉[†] 船富 卓哉[†] 安國 良平[†] 田中 賢一郎[†] 久保 尋之[‡]

細川 陽一郎[†] 向川 康博[†]

Kazuya Kitano[†] Takuya Funatomi[†] Ryohei Yasukuni[†] Kenichiro Tanaka[†] Hiroyuki Kubo[‡]

Yoichiroh Hosokawa[†] Yasuhiro Mukaigawa[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学

[†] Nara Institute of Science and Technology

[‡] 東海大学

[‡] Tokai University

E-mail: [†] kitano.kazuya.jy9@is.naist.jp

1 緒論

分光計測は、食品検査やリモートセンシング、天体分光学[1-3]など広い分野で利用されている。これらの分野では、計測対象によって分解能が必要な場合や広い計測範囲が必要な場合がある。分光器の波長分解能はスリット幅や回折格子の溝数、センサのピクセル数やピクセルの面積によって決定される。従来の分光器は、光学系の改良[4-7]によって高い分解能を実現した。しかし、従来手法では分解能と計測範囲にトレードオフが生じるため両方の性能を向上させることは難しい。

コンピュータビジョン分野では、計算処理によって解像度を向上させる超解像と呼ばれる技術が提案されている。超解像技術は多く存在する[8,9]が、中でもセンサシフト方式[10,11]は簡単で効果的な方法である。これは、異なる視点から複数の画像を撮影し、計算処理によって高解像度な画像を復元する技術であり、オーバーサンプリングの実現、ボケ除去に必要なボケ関数の推定が必要である。

本手法では、分光器に超解像技術を適用し、波長分解能と計測範囲のトレードオフを解消することを目的とする。超解像技術を分光器に適用するにあたり、2つの課題がある[9,12]。1つは、低解像度のセンサをサブピクセル精度で移動させるもしくは撮影後に正確に位置合わせする作業が困難な点である。もう1つは、波長軸のボケ関数を全ての計測範囲に対して推定する事が困難な点である。計測装置のボケ関数はレンズの収差や回折の影響により波長に依存して変化するが、これを数千から数万バンドある計測範囲全体に対して計測するのは困難である。

そこで、我々はセンサ傾斜を用いたオーバーサンプリングと波長依存なボケ関数を疎な原子輝線から推定する方法を提案する。図1に分光超解像の概要を示す。まず、Watanabeらの手法[13]を応用し、1次元のセン

サをシフトするのではなく2次元のセンサを少し傾ける事で簡単かつ正確なセンサシフトを実現する。提案する分光器は一般的な分光器と同様の構造であるが、少し傾けたエリアセンサを配置している点が異なる。エリアセンサの画素は規則正しく並んでいるので、隣接する行の計測はサブマイクロメートル精度でセンサシフトした場合と同等の計測が可能になる。次に、疎な原子輝線から補間により波長依存なボケ関数を推定する。原子輝線は極めて狭い波長帯域を持つため、精度よくボケ関数が得られる反面、疎にしか得られない。そこで疎に得られたボケ関数を補間することで計測範囲全体でのボケ関数を推定する。これを逆畳み込み演算することで超解像された分光分布が得られる。

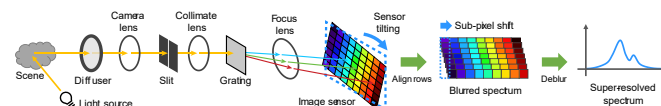


図1 分光超解像の概要

2. センサ傾斜による超解像

2.1 センサ傾斜法の数学モデル

本節の目的は、分光器に入射する光線の分光分布 $f(\lambda)$ を推定することである。実際の分光器の光学系では光軸と焦点距離に誤差があるため、回折された光線が空間的にボケる。これが観測された分光分布にボケを生じさせる原因となる。またこのボケは光学系の収差や回折の影響により波長によって変化する。分光器内部の光学系によってボケた分光分布 $\bar{f}(\lambda)$ は光学系のボケ関数 $o_\lambda(u)$ と入射光の分光分布 $f(\lambda)$ との畳み込みで表される。

$$\bar{f}(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} o_\lambda(u) f(\lambda - u) du \quad (1)$$

光学系のボケ関数 $o_\lambda(u)$ の波形は、波長 λ によって変化する。画素サイズが波長軸のサンプリング幅に対応するため、画素サイズに対応した波長範囲の積分を考え

必要がある。\$N\$ピクセルのリニアセンサにおける\$n\$番目の画素の輝度値\$i_n\$は次式で表される。

$$i_n = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(\lambda) \bar{f}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ここで、\$p_n(\lambda)\$ (\$0 \le n < N\$)は画素の窓関数を表す。この窓関数は、各画素における波長軸のサンプリング幅に対応する矩形関数である。

\$M\$回のサブピクセルシフトで1ピクセル分のシフトがなされる場合を考える。このとき、\$m\$回サブピクセルシフトした場合の\$n\$番目画素の輝度値は以下の式で表される。

$$i_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} p_{m,n}(\lambda) \bar{f}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

このとき、\$n\$はリニアセンサの画素の位置を表し、\$m\$はサブピクセルシフトの移動量を表す。式(3)を離散化すると以下のように表される。

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

このとき、\$f\$は\$S\$次元の離散化された分光分布、\$i\$は\$M \times N\$の画像として観測された\$MN\$次元の輝度値ベクトル、\$\mathbf{P}\$は離散化された画素の窓関数行列である。\$\mathbf{O}\$は\$S \times S\$次元の畳み込み行列で光学系のボケを表す。窓関数\$\mathbf{P}\$とボケ関数\$\mathbf{O}\$の積が分光器の観測過程を表している。\$i\$はボケた分光分布の輝度値ベクトルである。ここで、行列\$\mathbf{P}\$の大きさは\$M \times N\$である。

分光分布の強度が常に正であるという点を利用して、超解像された分光分布は次式のように非負制約付きの最小二乗法を用いて求められる。

$$\hat{f} = \underset{f \ge 0}{\operatorname{argmin}} \|i - \mathbf{P}\mathbf{O}f\|_2^2 \quad (5)$$

この問題は、凸最適化問題であるため、大域的最適解を求めることができる。本手法では、[14]による非負制約付きの最小二乗法を用いた。

2.2 波長依存なボケ関数の推定方法

超解像を実現するためには、オーバーサンプリングである\$\mathbf{P}\$とボケ関数である\$\mathbf{O}\$を正確に求めることが重要となる。本手法では、低圧水銀ランプ[15]のように原子固有の鋭いピークを持つ分光分布を計測し、ピークに対する応答を波長軸に沿って補間することで\$MN \times S\$行列である\$\mathbf{PO}\$を推定する。実際の計測では、観測過程の行列\$\mathbf{PO}\$が得られ、それぞれを分離して求めることができないが、最適化処理では行列\$\mathbf{PO}\$をまとめて計算するためその必要はない。

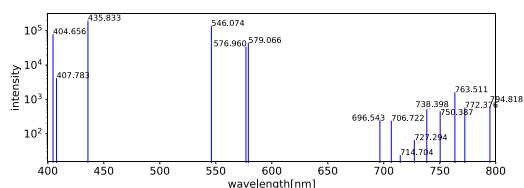


図 2 低圧水銀ランプの輝線

図 2 で示すように、水銀ランプの輝線は波長軸に沿って疎に分布しており、それぞれの輝線が特定の波長に対応している事が知られている。また、輝線の半値幅はおよそ 0.0010nm であり、一般的な分光器の分解能に対して無視できるほど小さい。この輝線を分光器で計測すると、図 3 に示すように、斜めに並んだ線の集合として観測される。それぞれの観測された輝線は、対応する波長の観測値とみなすことができる。

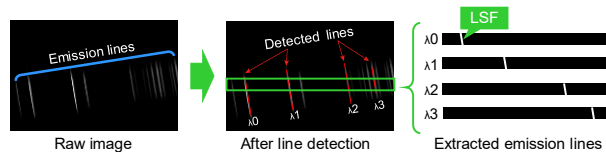


図 3 輝線の検出と LSF の生成方法

撮影された画像からそれぞれの輝線を切り出す。なお、(404.656, 407.783)nm や(576.960, 579.066)nm のように輝線間の間隔が狭いものは光学系のボケによってそれぞれ重なるために除外している。提案手法では、Line Segment Detector[16]を用いて直線検出し、検出された線分の周囲をあらかじめマージンを持って画像から切り出し、各輝線のみを観測した個別の\$M \times N\$の画像として抽出する。なお、他の輝線を観測した部分は 0 で埋める。抽出した画像の各行は、対応する波長を観測した場合の強度分布とみなすことができる。観測は、光学系に起因するボケのために波長によって輝度分布が変化する。さらに、抽出した画像の各列は異なる観測過程それぞれにおける観測を表している。よって、各輝線を抽出した画像の各行は、輝線の波長に対応する \$M\$ 回分の観測として \$\mathbf{PO}\$ のうち \$M\$ 個の列に含まれる。輝線は波長軸に対して疎であるため、上記の処理では \$\mathbf{PO}\$ の列の全てを埋めることはできない。

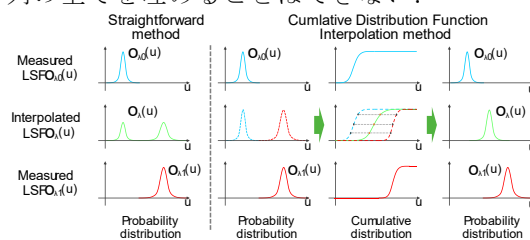


図 4 LSF の補間方法

そこで、疎な観測を補間することで輝線が観測できない波長における観測過程を推定する。この補間は、輝線を観測した画像の各行に対して独立に行う。各輝線の観測過程を確率密度関数とみなし、それを累積度分布に変換し、それを線形補間する方法[17]を採用した。そして、補間された累積度分布から確率密度関数を復元する。この方法は、図 4 で示すように、観測を確率密度関数とみなして直接補間する方法よりもより有効な方法である。

3. 分光器の実装と実験

3.1 分光器の実装

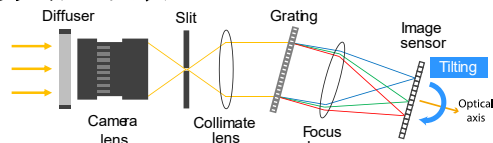


図 5 構築した分光器の上面図

図 5 に示すような透過型分光器を構築した。入射光を均一にする目的で拡散板を配置し、カメラレンズ (FUJINON HF12.5HA-1B) で集光し、スリット (Thorlabs VA100C) で横方向の空間軸を遮蔽し、コリメートレンズ (Thorlabs LB1471) で回折格子 (Thorlabs GT25-06V) に集光した。回折された光はアクロマートレンズ (AC254-050-A-ML) を介してイメージセンサ (FLIR BFS-U3-200S6M-C) に集光される。このセンサは、回折格子と集光レンズを通過する光軸を中心に傾けることができる。スリットの幅は 1 μ m に設定した。

3.2 分光超解像のシミュレーション実験

超解像技術が分光計測に適用できることを検証するためにシミュレーション実験を行った。実験では、実環境で計測した分光分布をダウンサンプリングして複数の低解像度な分光分布を生成し、それを用いて超解像した分光分布をダウンサンプリング前の元の分光分布と比較する。元の分光分布は実環境で計測した太陽光の分光分布を使用した。元の分光分布は 2 次元画像の中央列を切り出した 5472 次元のベクトルである。

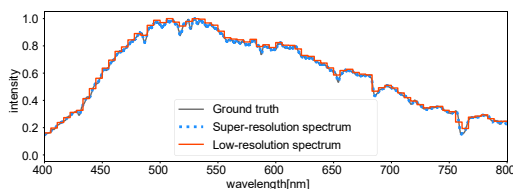


図 6 シミュレーション実験の結果

ダウンサンプリングでは、計測値を 72 画素からなる 76 個のグループに分割し、それぞれの合計を取り、76 個の画素で計測した分光分布を合成する。センサシフトを模するため、合成に用いる画素を移動させながら、異なる 72 個の分光分布を得る。これは 76 \times 72 ピクセルのセンサを用いたセンサシフト方式の計測と等価である。なお、合成した分光分布には量子化誤差を含めている。図 6 に実験結果を示す。

分光分布の谷は空気中の原子による吸収を示す Fraunhofer 線に対応している。500-600nm の範囲では、分光分布の小さな谷がぼけており、低解像度な分光分布では谷の識別が困難である。一方、超解像された分光分布では、谷が復元されていることが分かる。本実験では、量子化誤差が含まれている低解像度な分光分布から高解像度な分光分布を復元し、復元結果が真値とほぼ一致することを確認した。

3.3 水銀ランプの分光分布を用いた実環境実験

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することにより、本手法による分解能を評価する。光源は、低圧水銀ランプ (Ocean Insight HG-2) を用いた。観測過程の推定には、低圧水銀ランプの 400-800nm の範囲にある輝線を使用した。そのうち、近接する二つの輝線である (404.656, 407.783)nm と (576.96, 579.066)nm を推定から除外した。輝線の傾きを計算し、超解像した分光分布の倍率を計算した。実験では、 M を 6 とし、超解像する分光分布の範囲を 400-800nm、サンプリング周期を 0.015nm とした。ボケた分光分布と超解像した分光分布の半値幅を用いて分解能を評価した。計測した分光分布と超解像した分光分布を図 7 に示す。

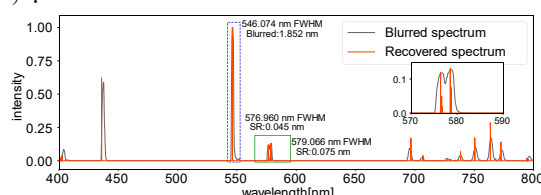


図 7 低圧水銀ランプを用いた実環境実験の結果

分解能の評価は観測過程の推定から除外した二つの輝線である 576.96, 579.066nm を用いた。これらの輝線は従来研究 [15] により計測された半値幅がある。評価に用いた輝線の半値幅は 0.00010nm であり、構築した分光器の分光分布のサンプリング幅よりもはるかに小さい。二つの輝線の間隔は約 2nm であるが、構築した分光器で計測した分光分布では、これらの輝線を分離できなかった。546.074nm の二つのピーク付近のボケた分光分布の半値幅は 1.85nm であり、これは二つの輝線の間隔に近い。一方、提案手法では、超解像によって二つの輝線が明確に分離された。また、576.960nm と 579.066nm の半値幅はそれぞれ 0.045nm と 0.075nm であった。結果より、ボケ除去と超解像を組み合わせる事で約 20 倍の分解能向上を達成したといえる。また、それぞれの効果を個別に評価するために、ボケ除去のみを適用する目的で $M = 1$ として同様の評価を行った。その結果、576.960nm と 579.066nm の半値幅はそれぞれ 0.183nm と 0.275nm であった。つまり、超解像処理は、 $M = 6$ の場合、3.5-4 倍の解像度向上に寄与したといえる。

3.4 波長依存な観測過程推定手法の評価

本手法で推定した観測過程を輝線から計測した観測過程と比較することで観測過程の推定精度を評価する。低圧水銀ランプの輝線のうち 435.833, 546.074, 696.543, 738.398nm の 4 本の輝線を推定に使用し、累積度数分布を用いて観測過程を補間した。精度評価のために、補間した輝線とは異なる 5 本の輝線を選択した。計測範囲や分解能、傾斜角は 3.3 節の設定と同様

である。指標として、観測値と推定値の類似性を確認するためにピーク間の距離と正規化相互相関を利用した。観測過程の真値は、低圧水銀ランプの輝線を用いた。図 8 は、補間された観測過程と輝線から得られた実測値を示している。

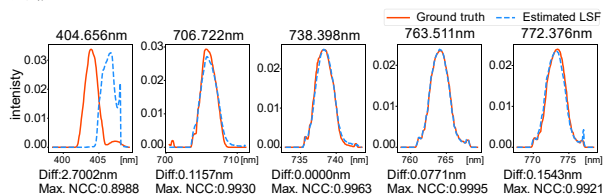


図 8 真値と推定された LSF の比較

700nm 付近の輝線は、真値とよく一致しており、ピーク間の誤差も小さい。しかし、404.656nm は、推定された観測過程の形状が測定された形状と異なり、また、ピークが大きく移動している。この推定精度が悪い要因には以下の 3 つが考えられる。まず、この波長は推定に用いた輝線の外側にあるため、外挿により推定精度が悪化した点である。次に、407.783nm にある輝線が推定精度に影響を与えた点である。最後に、この波長はレンズの周辺部に近いためレンズ歪みの影響を受けた点である。

4. 結論

本研究では、リニアセンサをシフトする代わりに、エリアセンサをわずかに傾けることで分光計測の分解能を向上させる超解像法を提案した。センサシフト方式による超解像は、異なる視点から複数回撮影するため動的なシーンに不向きだが、本手法は、2次元画像のうち、分光計測に用いない1次元をオーバーサンプリングに利用するためワンショットの撮影が可能である。実験では、分光器を構築し、実環境から高解像度な分光分布を復元した。また、累積度数分布による補間法を用いて、疎な輝線を計測した観測過程から波長方向に変化する観測過程を推定した。推定された観測過程と水銀ランプの観測値を比較することで、観測過程の推定精度を評価した。

謝辞

本研究の一部は、JST CREST JPMJCR1764, 科研費 JP19J14999, JP20K21816, JP18K04977, JP19H04138 の助成を受けた

文 献

[1] J.-H. Qu, D. Liu, J.-H. Cheng, D.-W. Sun, J. Ma, H. Pu, and X.-A. Zeng, “Applications of near-infrared spectroscopy in food safety evaluation and control: A review of recent research advances,” *Critical reviews food science nutrition* 55 (2014).

[2] E. J. MILTON, “Review article principles of field spectroscopy,” *Int. J. Remote. Sens.* 8, 1807–1827 (1987).

[3] F. Eisenhauer and W. Raab, “Visible/infrared imaging spectroscopy and energy-resolving detectors,” *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 53, 155–197 (2015).

[4] S. Vogt, S. Allen, B. Bigelow, L. Bresee, B. Brown, T. Cantrall, A. Conrad, M. Couture, C. Delaney, H. Epps, D. Hilyard, E. Horn, N. Jern, D. Kanto, M. Keane, R. Kibrick, J. Lewis, J. Osborne, G. Pardeilhan, and M. Z. Wei, “Hires: the high-resolution echelle spectrometer on the keck 10-m telescope,” (1994).

[5] C. Schwab, J. Spronck, A. Tokovinin, and D. Fischer, “Design of the chiron high-resolution spectrometer at ctio,” *Proc SPIE* (2010).

[6] A. Scheeline, “How to design a spectrometer,” *Appl. Spectrosc.* 71, 2237–2252 (2017). PMID: 28644044.

[7] T. Konishi, Y. Yamasaki, and T. Nagashima, “Super spectral resolution beyond pixel nyquist limits on multi-channel spectrometer,” *Opt. Express* 24, 26583–26598 (2016).

[8] Sung Cheol Park, Min Kyu Park, and Moon Gi Kang, “Super-resolution image reconstruction: a technical overview,” *IEEE Signal Process. Mag.* 20, 21–36 (2003).

[9] K. Nasrollahi and T. B. Moeslund, “Super-resolution: A comprehensive survey,” *Mach. Vis. Appl.* 25, 1423–1468 (2014).

[10] M. Irani and S. Peleg, “Improving resolution by image registration,” *CVGIP: Graph. Model. Image Process.* 53, 231 – 239 (1991).

[11] E. Michael and F. Arie, “Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images,” *IEEE transactions on image processing : a publication IEEE Signal Process. Soc.* 6, 1646–1658 (1997).

[12] P. Gege, J. Fries, P. Haschberger, P. Schötz, H. Schwarzer, P. Strobl, B. Suhr, G. Ulbrich, and W. Jan Vreeling, “Calibration facility for airborne imaging spectrometers,” *ISPRS J. Photogramm. Remote. Sens.* 64, 387 – 397 (2009).

[13] A. Watanabe and H. Furukawa, “Super-resolution technique for highresolution multichannel fourier transform spectrometer,” *Opt. Express* 26, 27787–27797 (2018).

[14] D. Kim, S. Sra, and I. S. Dhillon, “A non-monotonic method for largescale non-negative least squares,” *Optim. Methods Softw. (OMS)* (2012).

[15] K. Alexander, Yuri, Ralchenko, R. Joseph, and NIST ASD Team, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.7.1), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2020, March 16]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. (2019).

[16] R. Gioi, J. Jakubowicz, J.-M. Morel, and G. Randall, “Lsd: A fast line segment detector with a false detection control,” *IEEE transactions on pattern analysis machine intelligence* 32, 722–32 (2010).

[17] A. Read, “Linear interpolation of histograms,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A: Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 425, 357 – 360 (1999).