

トマトの品質推定精度を向上させる 直交性を持った複数枚モノクロカメラ用光学フィルタの設計

石田 周汰 【画像情報工学研究室】

1 はじめに

トマトの成熟度（カラスケール）およびリコピン濃度は品質指標として重要であるが、目視評価のばらつきや化学分析のコスト・破壊性が問題となる。

ハイパースペクトル画像（HSI）は高精度な推定を可能にする一方、装置が高価で農業現場への適用が難しい。そこで必要波長のみを通す光学フィルタを設計し、安価な RGB カメラで推定する手法が提案されている [1]。しかし RGB カメラでは固定フィルタにより重要な波長情報が損なわれる可能性がある。本研究では、HSI 由来のスペクトルデータを用いてモノクロカメラ向け学習可能光学フィルタを設計し、安価な撮像素子で高精度推定を実現することを目的とする。さらに複数枚フィルタが冗長な波長を強調しないよう直交性正則化を導入し、推定精度への影響を検証する。

2 提案手法

2.1 データ

実験に用いるスペクトルデータは 2025 年 5 月 12 日に KOA 敷地内のハウスで撮影した。収穫したトマトは白色反射板と共に並べ、Specim 社製ハイパースペクトルカメラ Specim IQ を用いて上から撮影した。

この画像から、YOLOv8 を用いてトマトを検出し、各トマトの中心付近の画素スペクトルを取得した。

2.2 深層モデル

入力には 397–1000nm（202 バンド）の反射率スペクトルを用いる。学習可能な 2 枚の光学フィルタ F_1, F_2 を長さ 202 のパラメータベクトルとして定義し、スペクトルとの内積 I_1, I_2 を取得する。この I_1, I_2 を成熟度に基づく 7 段階のカラスケールとリコピン濃度を同時に推定する深層回帰ネットワークへ入力する。

フィルタ学習には、フィルタ形状を滑らかにするための二階差分に基づく平滑化正則化と両フィルタが同一方向を持たないようにする直交性正則化 (1) を導入し、互いに異なる波長帯を強調するように制御した。

$$L_{\text{ortho}} = \cos^2 \theta = \left(\frac{\mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{F}_2}{\|\mathbf{F}_1\| \|\mathbf{F}_2\|} \right)^2 \quad (1)$$

3 実験

提案手法の有効性を確認するために同様の分光反射データを用いた比較実験を行った。5 分割交差検証により、データは学習 132 個、評価 33 個に分割し、評価データの中で MSE ロスが最も小さいモデルを固定の 29 個のテストデータに適用し、5 回のテスト結果の平均を評

価した。比較対象としてフィルタ同士の直交性を考慮しないモデルを構築した。

4 結果と考察

学習されたフィルタは、直交性正則化を導入したモデルでは互いに異なる波長帯を強調する形状を獲得した。例として設計されたフィルタの透過率の 1 つを図 1 に示す。次に、これらのフィルタを用いた推定性能を表 1 に基づき評価する。カラスケール推定では、直交性ありモデルの平均正解率が 68.3 % となり直交性なしモデルの 58.6% より 9.7% 向上した。特に図 2 の散布図で示す通りカラスケールが 3~6 付近の推定値のばらつきが直交性の有無により抑制されていることが確認できる。一方、リコピン推定の MAE が直交性なしモデルが 0.429、直交性ありモデルが 0.430 とほぼ同値ではあるが、僅かに直交性なしのモデルが良好な結果となった。

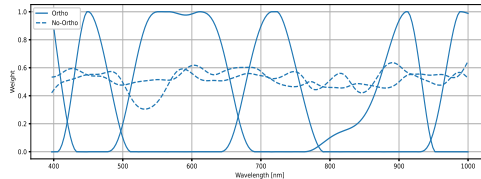


図 1 設計されたフィルタ

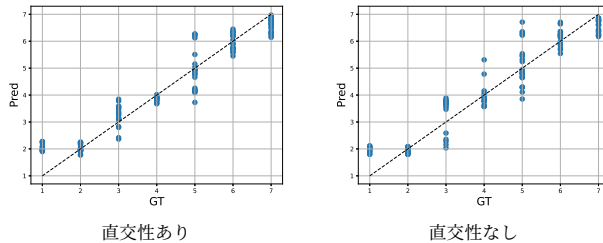


図 2 カラスケールの散布図

表 1 テスト結果

	直交性あり	直交性なし
正解率 (CS)	68.3%	58.6%
MAE (CS)	0.406	0.469
MAE (リコピン)	0.430	0.429

これらの結果より、複数フィルタに直交性を付与する設計は、安価なモノクロカメラを用いたカラスケール推定の高精度化に有効であることが示された。しかし、推定対象の特性によっては直交性が必ずしも最適ではない可能性も示唆された。

参考文献

- [1] 栗原徹, 武居祐子, 松原夏生, 長田広幸, 松井貴弘, “トマトカラスケール推定精度を向上させる光学フィルタの End-to-End 設計の検討,” ViEW, IS1-11, pp. 234–238, パシフィコ横浜, 12/05-06, 2024. (2024/12/05)