

ハイパースペクトルイメージングシステムによる農産物の等級選別

ジェームズ・キャロル

非破壊的な品質管理システムにより、タバコのブレンド等級の違いを判別することができる。

従来、米国でブレンドされるタバコに使われるタバコの葉は、視覚的、物理的、感覚的特徴に基づいて手作業で検査しなければならず、それは、人的ミスが生じやすく、人件費のかかる処理である。主観を取り除いてこの選別処理の効率化を図るために、米アルトリア社 (Altria) の科学者らは、同社のタバコ葉処理施設において、タバコのさまざまなブレンド等級を検証するためのハイパースペクトルイメージングシステムを開発した(図1)。

収穫して乾燥させたタバコ葉は一般的に、フルキュアド、バーレー、オリエンタルの主に3種類に分類される。栽培地、天候、植物における葉の位置、色、手触りなどの外的要因に基づいて、さらに細かい等級に分類されるが、こ

の処理はこれまで、手作業の検査によって行われていた。アルトリア社は、タバコ選別処理の効率化を図るために、タバコ葉のブレンド等級を検証するための新しいハイパースペクトルイメージングシステムを開発した。アルトリア社のシニアサイエンティストであるアマリタ・サフ氏 (Amrita Sahu) とその同僚のヘンリー・ダンテ氏 (Henry Dante) は、その取り組みが認められて、2016年の Jack Nelson Innovator of the Year Award を受賞している(図2)。

「このシステムは、米国のバーレー、フルキュアド、オリエンタルという、タバコの3つの主な種類を区別することができる。また、同じ植物の茎の位置の違いも区別できる」とサフ氏は述

べている。

このシステムの中で画像取得に使われているのは、米サーフェスオプティクス社 (Surface Optics) 製の可視近赤外 (VNIR) ハイパースペクトルカメラで、中国レノボ社 (Lenovo) 製の PC とモニターで構成される「ThinkCentre M93p」に接続されている。プッシュブルーム方式のこのラインスキャンカメラは、400～1000nm のスペクトル範囲、4.69nm の空間分解能、128 のスペクトルチャンネルを備える。

120V/250W のタングステンハロゲンランプ2個が、カメラの上の固定照明として筐体上部に配置されている。冷却ファンによって温度を調整し、両側に1つずつ取り付けられた2つのファンによって負圧レベルを維持することにより、カメラレンズに埃がたまらないようになっている。また、カメラを囲む金属製の覆いには十分に大きな開口部があり、レンズが出し入れしやすく、また、ケーブルの管理や取り外しのためにカメラの裏にアクセスできるようになっている。覆いには、センサの過熱を防いで、画像ノイズを抑える効果もある。

米L3ハリス・ジオスペーシャル社 (L3Harris Geospatial) のプログラミング言語であるIDL (Interactive Data Language) で記述されたカスタムソフトウェアにより、カメラによって収集された画像が蓄積される。同社ソフト



図1 タバコ葉ブレンド等級検証システムは、筐体、タングステンハロゲンランプ、冷却ファン、ハイパースペクトルカメラで構成される。

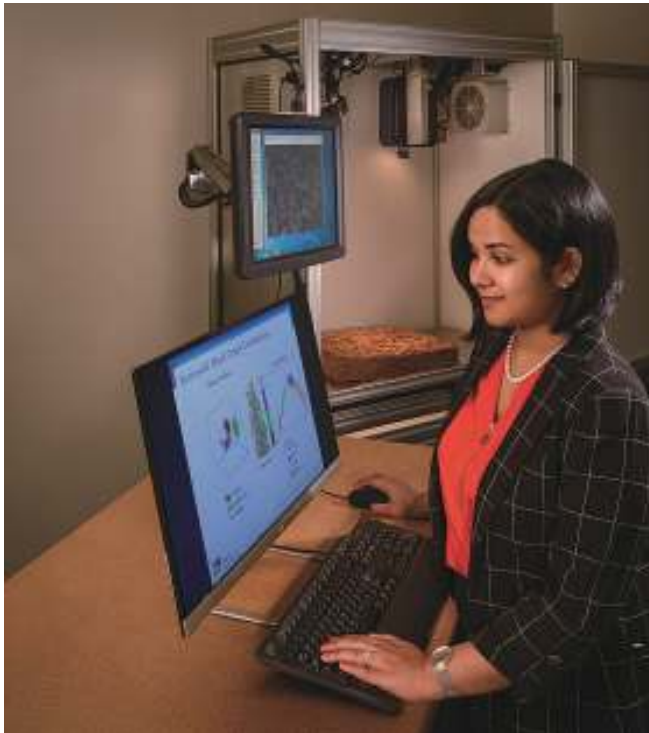


図2 アルトリア社のシニアサイエンティストであるアマリタ・サフ氏が、ハイパースペクトルイメージングに基づく農産物選別システムの開発を支援した。

$$CR = \frac{1}{hw} \left(\sum_i^h \sum_j^w x_{ij} \right)$$

CRは補正比ベクトルで、hとwはそれぞれ高さと幅である。

各ピクセルベクトルの算術平均を計算し、標準リファレンスベクトル(SR)で除算する。SRは、処理の最初に撮影した白色基準の平均である。最後に、単位ベクトル正規化を適用して、各スペクトルの長さを1にする。

システムは画像解析ソフトウェアを使用して、サンプルがラベルどおりの等級に対応しているか、隣接する等級に対応しているか、あるいは、2つ以上離れた等級に対応しているかを表示する(図3)。ラベルどおりでない場合は、分類異常として判定される。白色基準の撮影はプログラムの初期起動時に行われた後、セッション内で30分おきに行われる。

ハイパースペクトルイメージングのデータは次元数が多いため、スペクトル特性の抽出が必要である。チームは、事前計算で減少させた各種類と等級のスペクトルシグネチャに対する距離指標に基づいて、タバコ画像を分類するためのブレンド等級検証アルゴリズムを設計した。これには、各タバコ等級に固有のスペクトル特性のライブラリ

ウェアのバージョン4.5とプログラミング言語IDLによって、画像解析が行われる。

アルトリア社のチームは、3年間のタバコ収穫シーズンを通して、ブレンド等級検証アルゴリズムのトレーニングに使用するデータを収集した。サンプルの画像を取得する前に、白色基準とする米ラブスフェア社(Labsphere)のスペクトラロン(Spectralon)標準反射板(白色)を撮影し、暗電流を記録する。その後、オペレータがタバコのサンプルを筐体内に配置し、520 x 696の空間サイズで撮影する。前処理として、画像全体をピクセル単位でスキャンし、飽和と陰影を除去する。飽和ピクセルは、各ピクセルの最大値が4096(12ビットセンサの最大値)に等しいかどうかを確認することによって判定する。陰影ピクセルのしきい値は500で、この値は、既知の陰影ピクセルの統計解析に基づいて定められている。

ダークノイズを除去した後、ソフト

ウェアはメディアンフィルタを適用して、特定帯域に存在するあらゆる種類の装置アーティファクトを除去する。続いて、3 x 3ピクセルブロックのすべてのスペクトルの平均をとり、そのスペクトルを新しい画像に割り当てることにより、元の1/9のサイズに画像を空間的に縮小する。これを行うのは、特性抽出時の演算負荷とノイズを低減するためである。各ピクセルに、次の補正比が乗じられる。

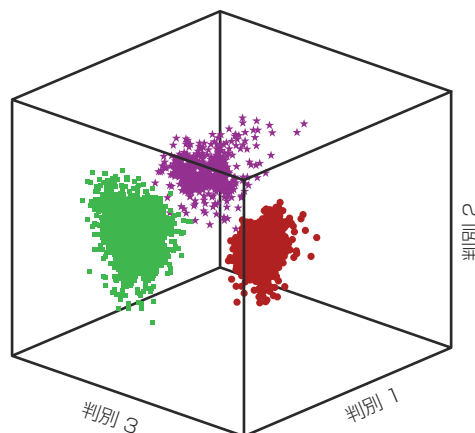


図3 複数の種類のタバコ葉の判別解析の様子。

- 米バーレー
- 米フルキュアド
- ★ オリエンタル

を構築する必要があった。SMACC (Sequential Maximum Angle Convex Cone) エンドメンバモデル (bit.ly/VSD-SMACC) を、エンドメンバ抽出方法として使用した。

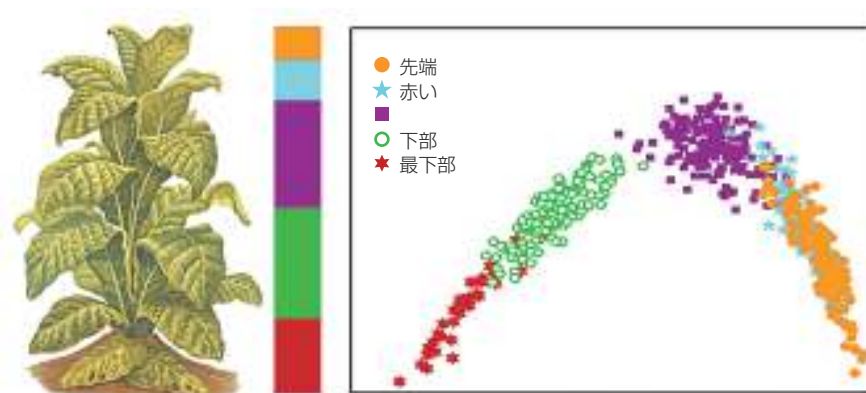
タバコの種類によって、タバコの各種類と等級のスペクトル特性を表す、5～6つのエンドメンバを抽出した。線形スペクトルアンミキシングにより、各種類と等級の組み合わせに対する存在量値を計算し、分類のための定義パラメータ (スペクトルプロファイル) として使用した。年度ごとの作物の違いに対応するために、タバコの収穫シーズンごとに、各タバコ等級の最初の6つのサンプルが、モデルの初期値の校正に用いられる。

画像の前処理を終えたら、定義済みのエンドメンバを使用してデータの線形アンミキシングが行われる。各ピクセルのエンドメンバ存在量値を計算し、画像全体に対する存在量値の平均を取得する。これにより、スペクトルプロファイルを表す、5特性ベクトルが得られる。

解析対象画像のスペクトルプロファイルと特性抽出時に検出したスペクトルプロファイルの間のマハラノビス距離 (bit.ly/VSDMAHA) が計算される。サンプルが、ラベルクラスを中心点から3標準偏差以内ならば、合格である。3標準偏差の範囲外ならば、以下の式によってクラス距離が計算される。

$$CDR = 1 - \frac{LCD}{LCD + MACD}$$

CDRはクラス距離比、LCDはラベルクラス距離、MACDは最小隣接クラス距離である。クラス距離比が70%未満ならば、サンプルの検査が行われる。70%以上ならば、サンプルは合格と判定される。



タバコ植物

図4 タバコ植物の茎の位置による違いを示したグラフ。赤い葉と先端の葉は、特徴がかなり類似しており、重なりが最も大きくなっている。

3つすべてのタバコグループのスペクトルプロファイルを、クラスタリングと視覚化のために、線形判別分析 (Linear Discriminant Analysis: LDA) によって3つの特性に減少させる。3D LDAクラスタのプロットには、3つの主なタバコグループが明らかに互いに分離していることが示されている。タバコ植物の異なる茎の位置 (先端、赤い葉、葉、下部、最下部) のスペクトルプロファイルを、LDAによって2特性に減らし、プロットした。タバコ植物の茎の位置に基づくスペクトルデータの2D LDAプロットには、それらの間の違いが明らかに示されている。先端と赤い葉の間には重なりがあるが、両者の化学的及び感覚的特徴は似ているので、これは予想どおりである (図4)。

タバコブレンド等級検証アルゴリズムの結果を、人間による検証結果と比較した。フルキュアドとバーレーの相対精度は93%に達した。正しく分類されたサンプル数を、その生産年に画像取得したサンプル総数で除算することによって、この値を算出した。

電球が切れたり、レンズの焦点があつていなかったりといった問題が、サ

ンプルの分類ミスにつながった。この問題に対処するために、サフ氏はマスターサンプル特性を導入した。異常判定が生じた場合に、オペレータは、元のラベル等級を代表するマスターサンプルを入力し、システムが正しく動作しているかどうかを確認する。システムがマスターサンプルを同じ等級と判定すれば、オペレータは、異常判定されたサンプルを、訓練を受けた人間の選別者によるさらなる検査に回す。システムがマスターサンプルを確認できない場合は、ソフトウェアが終了し、問題の原因が特定できるまでオペレータはシステムを使用できなくなる。

チームによって実装されたシステムは、1時間おきにサンプル画像を取得し、是正措置が必要な場合は電子レポートを出力する。

「システムによって検査処理の効率が上がり、タバコが直ちに出荷できるようになって、施設での保管コストや、出荷のバックログが減少した」とサフ氏は述べた。

このシステムは、タバコを対象に開発されているが、紅茶、コーヒー、ブドウなどの農産物の選別にも適用できるとサフ氏は提案している。