

論文の内容の要旨

生物環境工学専攻

平成 14 年度博士課程 入学 (進学)

氏 名 黄 立 翰

指導教員名 芋生憲司

論文題目 サトウキビ梢頭部の分別システムに関する研究

1. 序論

サトウキビ生産農家戸数の減少や高齢化、後継者不足から、サトウキビ生産の機械化が望まれ、特に収穫作業の機械化が実施された。その結果、作業効率は高くなったが、これまでの人力収穫に比較して大量のトラッシュが工場に持ち込まれる状況となった。製糖工場では、風選によりトラッシュを分離している。この方法で、大部分のトラッシュは除去できるが、梢頭部と呼ばれるサトウキビの葉と茎に介する部分がなかなか分別できない。ハーベスタで収穫した梢頭部の重さや形状は、原料茎と非常に似ているので混入したまま製糖の圧搾作業に持ち込まれてしまう。梢頭部は糖の含有率が低く、バガスへの糖分損失を大きくする。また、梢頭部に多く含まれるでんぷんは蔗糖の結晶化を阻害する。このため、本研究では、梢頭部を分別するシステムの開発を目的とする。

2. 実験システム及び方法

本研究では、レーザービームで、対象物の表面を走査し、光源の方向に戻った反射光の強度を測る。梢頭部と原料茎の表面粗さの違いによって、反射光強度の分布するパターンの違いを分析して、対象物を認識する。図 1 に測定原理を示す。集光されたレーザービームが左側の対象物に照射し、中心部分から光源に戻った反射光の量は両側より顕著に多い。予想される高いピークを持った反射光パターンを下側に示す。右側にある対象物の場合には、走査によって光源に戻った反射光の量は対象物の細かい表面形状に従って変化する。そのため、予想された反射光パターンに幾つの小さなピークが見られる。

測定装置の概略を図 2 に示す。光源には、出力 4mW のヘリウムネオン(He-Ne)グリーンレーザー(発振波長 543.5nm、ビーム径 0.8mm、Uniphase 社製)を用いた。光センサには、高感度光検出器(C5460-01、浜松ホトニクス社製)を採用した。コンベヤのベルト移動速度は 5.85mm/s とした。フォトインタラプタがベルトの縁に 2cm ピッチで張り付けた白いマーカを検出するごとに、モータでミラーを回して、ベルトの進行方向に対して垂直な方向にレーザー光を走査する。レーザービームは照射光レンズ (レンズ (a))、ハーフミラーを通過し、回転ミラーを介してコンベヤの表面に至る。焦点距離 400mm のレンズ (a) を通過したレーザービー

ムはコンベヤの表面付近に集光され、極めて小さな光点になる。レーザービームは対象物から反射され、反射光の中で、後方反射光（光源の方向に戻る光）だけが計測される。後方反射光は回転ミラー、ハーフミラー、レーザーミラーを介し、焦点距離 50mm の受光レンズ（レンズ (b)）によって集光され、光センサに到達する。回転ミラーから試料が置かれているコンベヤまでの距離は 13.5cm とした。尚、測定は外乱の影響を考慮して暗室内で行った。ベルトと試料の乱反射の影響を抑えるためにベルトに暗幕シートを張り付けて、試料と光センサの間に遮光板を設置した。データのサンプリング周波数を 10kHz に、一回のサンプリング数を 3000 件に設定した。この実験装置を利用して、一本の試料を自動的に一端から 2cm ずつ 20 回走査した。供試したサンプルは原料茎 40 本と梢頭部 40 本である。

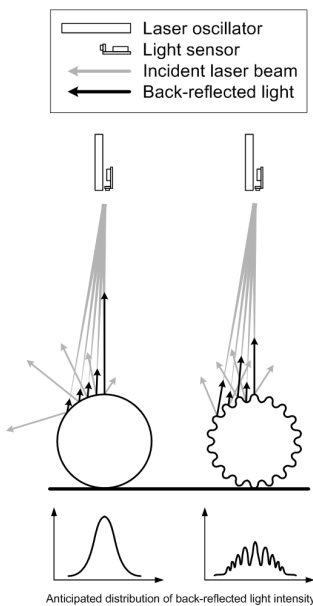


図 1 測定原理

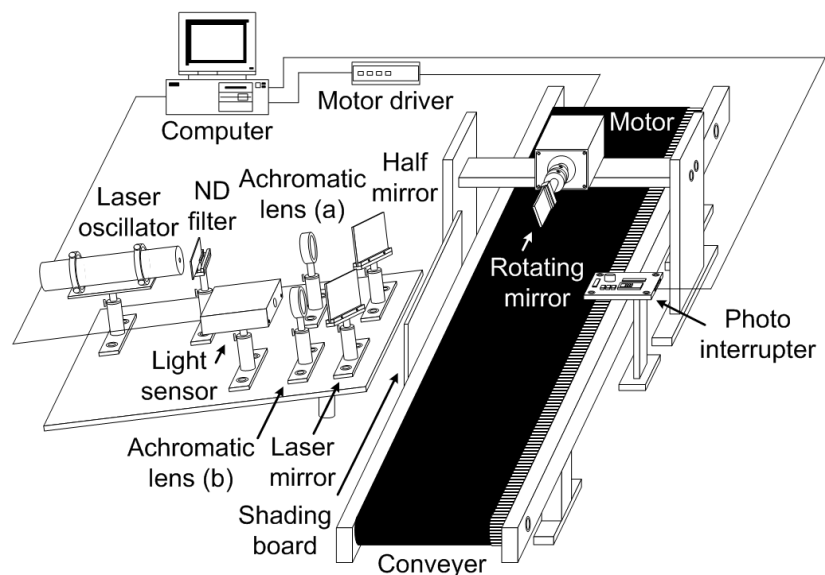


図 2 測定装置の概略

3. 分析パラメータ

原料茎から得られたパターンで比較的大きなピークが現れるということは、梢頭部から得られたパターンより尖っているといえる。このため、それぞれの波形がどの位に尖っているかを見分ければよい。正規分布を標準として、分布のとがり具合（平坦度）を求めるパラメータのことを尖度（Kurtosis）と呼ぶ。尖度の関数 KURT は次式で表される。

$$KURT = \frac{(x_1 - \bar{x})^4 + (x_2 - \bar{x})^4 + \dots + (x_n - \bar{x})^4}{nS^4} - 3 \quad (1)$$

n : データ総数、 x_i : 個々のデータ、 \bar{x} : 平均値、 S は標準偏差である。

そして、反射光パターンの中に存在すると予想される梢頭部から得られる特徴的な波形をとらえることを目的として、フーリエ解析を行った。離散的フーリエ変換（discrete Fourier transform）の式を以下に示す。

$$G(h) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} x(k) e^{-2\pi i h k / n} \quad h = 0, 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2)$$

n : データ総数、 $x(k)$: 個々のデータ、 $G(h)$ は周波数 h について対称となるので、データの前半 ($h < n/2$ の部分) だけが利用される。また窓関数には最も一般的なハンギングウィンドー（Hanning window）を使用した。解析にはパワースペクトルを用いた。周波数 h の成分のパワー $P(h)$ は次式で表される。

$$P(h) = |G(h)|^2 = G(h) \cdot G(h)^* \quad (3)$$

ここで、 $G(h)^*$ は $G(h)$ の共役複素数を示す。

4. 実験結果

実験結果の例として、原料茎の部位による受光パターンを図 3 に、梢頭部の部位による受光パターンを図 4 に示す。図 3 のパターン Q は原料茎の滑らかな表面から得られた波形、パターン O は茎の節から得られた波形である。図 4 のパターン K、M とも比較的粗くなっている梢頭部の表面から得られた波形である。反射光パターンは全体的半円形に近い形状になり、その上多数の小さなピークから構成された周期的な波形が存在する。この波形は梢頭部の葉脈により、形成したものである。

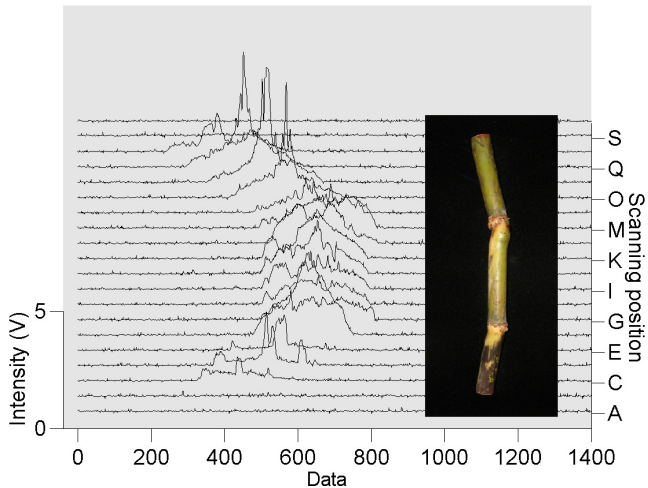


図 3 原料茎と得られたパターン

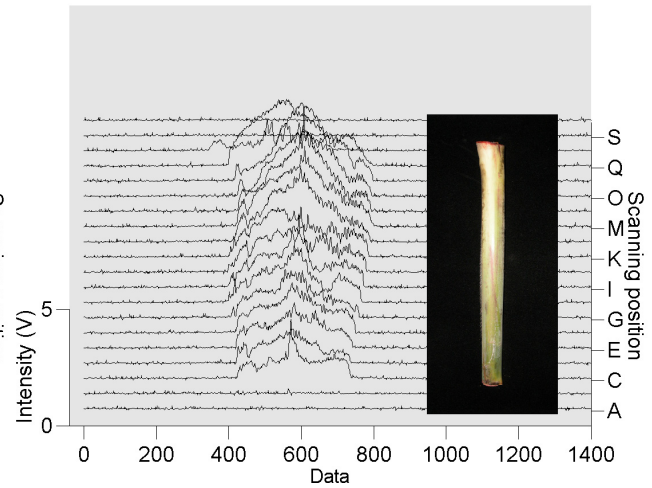


図 4 梢頭部と得られたパターン

5. パターン分析

フーリエ解析について説明する。抽出された 512 件のデータが含まれる反射光パターンにハニングウィンドーを乗算し、この窓関数にかけられたデータをフーリエ変換して、パワースペクトルを求める。梢頭部の特徴的な波の波長は 8 から 12 であり、パターンのデータ数は 512 である。従って ($512/12 = 42.7$, $512/8 = 64.0$)、この波は周波数 43~64 に相当し、分析結果と一致している。梢頭部の特徴を一つのパラメータとして表現できるように、周波数 43 から 64 の値のパワーの総和を算出し、この数値を FFTSUM と呼ぶことにする。

尖度とフーリエ解析により全ての実験データを分析した結果を述べる。本実験では、一本のサンプルに 20 回の走査を行ったが、サンプルの長さは完全に均一ではないので、サンプルの両端付近で得られたデータは、場合によってサトウキビから得られた反射光パターンが含まれていないものもある。そのため、本実験では一本のサンプルから得られた 20 箇所データのうち前後を除き、真中の 16 箇所のものだけを分析の対象とした。供試した梢頭部と原料茎は各 40 本なので、分析したデータの数は 1280 である。

FFTSUM vs. Kurtosis の分析結果 (図 5) を見ると、梢頭部から得られたデータと原料茎から得られたデータは、混合しているものも多少存在しているが、明確に離れた場所に分布しているものが圧倒的に多い。このことから、効果的に梢頭部と原料茎を分別できる可能性が高いと考えられる。

6. 判別

判別の流れを述べる。「Sampling」では、40 本の梢頭部と 40 本の原料茎から、それぞれランダムで選択して、各 20 本を実験組 (Testing set) に、各 20 本を教師組 (Training set) に入れる。「Classifying」では、線形判別分析 (Linear discriminant analysis) により、教師組から得られた値を基準にして、実験組にある 40 本のサンプルから得られた 640 個のデータを二つのグループに分類する。グループ 1 は梢頭部から得られたデータとして判別されたもの、グループ 2 は原料茎から得られたデータとして判別されたものである。ここまでで、データは分類されたが、本研究の目的はデータ単位で (パターンごとに) 分別することではなく、サンプル単位で分別することである。つまり、梢頭部か原料茎か、サンプルごとにて分け

なければならない。そのため、線形判別分析で判別されたデータに基づき、サンプル単位で判別する必要がある。

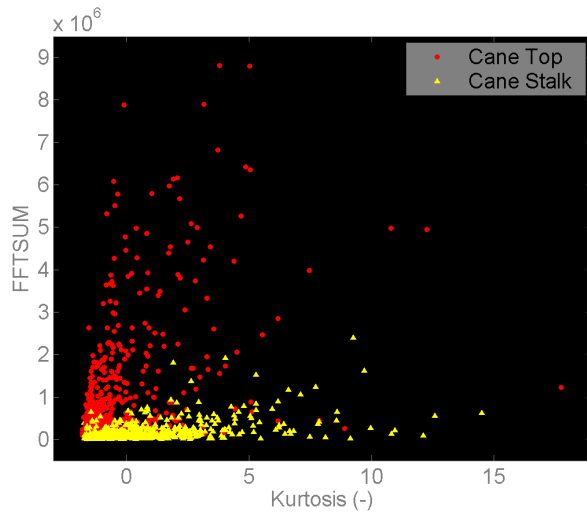


図5 分析結果

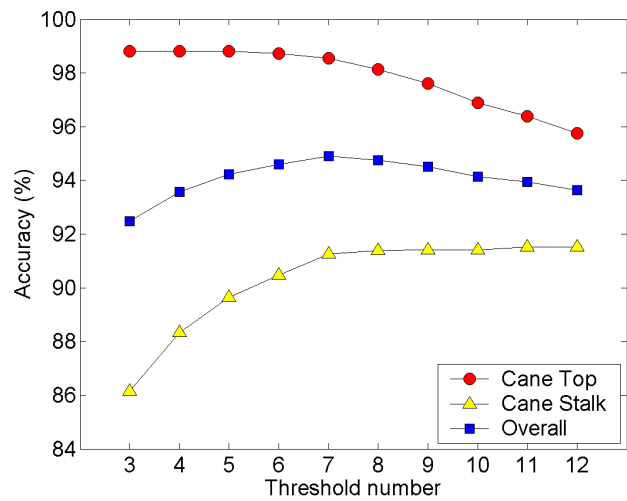


図6 判別結果

「Judging」では、データをサンプル単位で分類する。一本のサンプルから得られた 16 個のデータの中に、前段階でグループ 1 に入れられたデータの個数を計算する。そして、この数値（各サンプルのグループ 1 に入れられたデータの数）に対して、一つの閾値を設定することにより、サンプルを判別する。一つの閾値において、判別の三段階を 100 回繰り返し、毎回到、梢頭部の正答率、原料茎の正答率及び全正答率を算出し、結果として記録する。そして、100 回の結果の平均値を計算し、判別結果を出力した。

判別結果を見ると、閾値の増大に従い、梢頭部の正答率は徐々に減少し、原料茎の正答率は向上する。全正答率（Overall accuracy）を表す青い曲線の真中に頂点が現れた。閾値 7 における青い四角は、94.90%の最高正答率を表している。

7. 研究成果

- サトウキビにレーザを照射して、後方反射光を測定することにより、様々な表面状態に対する反射光パターンを得ることができた。
- レンズでレーザを更に集光し、縮小した照射スポットにより、梢頭部の表面に存在する葉脈の微細な凸凹を検知することができた。
- 反射光パターンに特定のパラメータを用いた判別を行うことで、原料茎と梢頭部とをかなりの高精度で分けることができた。
- 現在日本の製糖工場で行われている手作業の代替として、レーザを用いた梢頭部を分別するシステムを導入することの可能性が示された。