

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26850165

研究課題名(和文)ポイントクラウドを用いた農産物の品質評価手法

研究課題名(英文)Quality assessment for agricultural products using point-cloud

研究代表者

山本 聡史(Yamamoto, Satoshi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業技術革新工学研究センター総合機械化研究領域・上級
研究員

研究者番号：20391526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、比較的低価格な三次元センサを用いて果実や野菜のポイントクラウドを取得し、カラー画像の情報を活用しながら距離情報を修正し、実物に忠実な三次元モデルを生成する手法を考案した。リンゴの三次元モデルを100個以上構築し、実測値と比較した結果、RMS誤差は、体積で6cm³未満、赤道部最大径で1mm未満であった。リンゴ以外にナシ、スイカ、メロン、カボチャ、タマネギなど多種多様な三次元モデルを構築できたことから、野菜・果実の三次元的な形状・色の特徴について、これまでにないような数値化の可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional reconstruction has great potential to improve not only the post-harvest quality control but also the breeding efficiency in horticulture. The depth information of the consumer-grade RGB-depth sensor was unreliable compared to that obtained from industrial sensors. To cope with this disadvantage, the generated point cloud was corrected within a region of interest of the target fruit, which was extracted from the color image of the sensor. Evaluating more than a hundred apple fruits, the root-mean-square error of the volume and the largest diameter were less than 6 cm³ and 1 mm, respectively. Reconstruction of various kinds of fruits and vegetables were demonstrated. The proposed method can be applied to accelerate the quantification of three-dimensional features of agricultural products.

研究分野：農業環境・情報工学

キーワード：三次元モデリング ポイントクラウド フェノタイピング 画像処理 三次元センサ

1. 研究開始当初の背景

(1) 農産物の密度を評価する選別は、古くから主に種子を対象として非破壊的な内部品質の判定手法として知られている。果実・果菜類では、リンゴ、ナシ、メロンの熟度判定、カンキツ類のすあがり、浮き皮、皮厚さの判定、スイカの空洞検出などに有効と言われていたが、農産物の質量は簡易に計測できるものの、体積測定に高度な技術を必要とするため、質量選別や糖酸度選別と比較して実用化された事例は極めて少ない。一方、外観品質については、最終的に熟練作業者が農産物の形状のバランスや表面上の色の配置を総合的に評価して選別、出荷するのが実情であり、農業現場の高齢化と労力不足が進む中、従来の品質を維持できない状況が生じつつある。

(2) 筆者らは2010年11月にマイクロソフト社から販売開始された3次元センサ「キネクトセンサ」にいち早く着目し、農業分野への応用を試み、学会での話題提供を行った。キネクトセンサは元々人間の動きを認識するモーションセンサとしてテレビゲーム用に開発されたが、30万画素以上の距離画像とカラー画像を同時に取得し、毎秒30フレームの速度で出力できること、販売価格が250米ドルと既存の3次元センサに比べて格段に低価格であることから、販売開始以来、世界中でキネクトセンサを用いた研究開発が爆発的に増加している。例えば、医療分野では背中の変形検出に使用され、建築分野では住宅の室内空間のスキャニングによる3次元モデル化に使われている。サービス分野ではキネクトセンサで撮影した物体をミニチュアモデルとして3Dプリンタで作成する技術が商用化されている。筆者らは、収穫箱からイチゴを取り出し、選別してパック詰めする装置にキネクトセンサを適用し、距離画像を解析してもっとも拾いやすい果実を検出する技術を開発した。また、イチゴ群落の生育情報を得るため、キネクトセンサによりイチゴの栽培ベッドを撮影し、イチゴ群落の表面形状を3次元点群(ポイントクラウド)として取得することに成功した。

2. 研究の目的

本研究では、この革新的な3次元センサと筆者が蓄積してきたポイントクラウドの解析技術をベースにして、熟度や空洞などの内部品質の重要な指標である農産物の体積の推定を簡易に行うとともに、客観的な評価が難しく、熟練作業者に依存していた外観品質の評価手法を明らかにし、付加価値の創出や出荷作業の自動化につながる基盤研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 果実の3次元モデル構築手法の検討

最初に、距離情報と色情報を同時に取得可能な3次元センサを用いて果実全面を撮影

する装置を試作した(図1)。装置は3Dセンサ、LED照明(50W、4,200lumen、5,500K)2台、回転台から構成された。回転台は手動により30°刻みで位置合わせでき、1回転で12セットの距離画像とカラー画像を取得した。その後、1回転目で撮影できなかった部分を撮影するため、果実の赤道部で上下方向に位置した部分を人手により左右方向を向くように置き換えて、再び回転台を回転しながら12セットの画像を取得し、果実全面を撮影した。

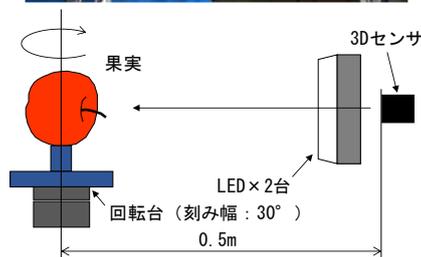


図1 撮影装置

次に、撮影装置により得られた情報をオフラインで解析し、3次元モデルを生成する手法を開発した(図2)。

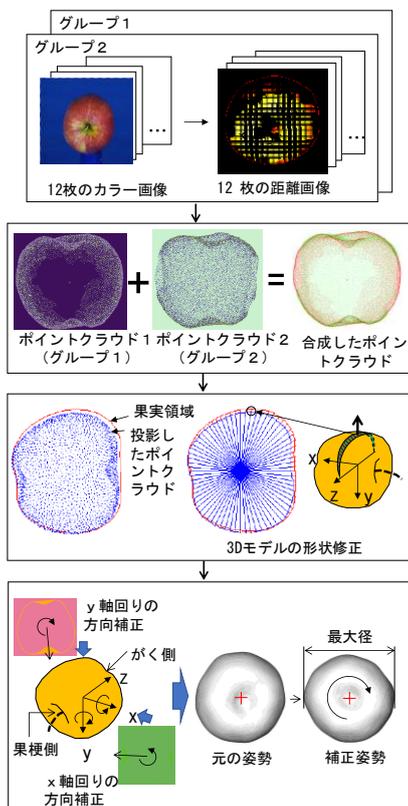


図2 3次元モデル生成の流れ

まず画像を読み込み、12セットの画像からなる2グループにおいて果実の距離情報を抽出して組み合わせ、2つのポイントクラウドを生成した後、マッチングにより統合した。3次元センサから得られたポイントクラウドは位置情報の誤差を含み、回帰直線を用いて最大径や体積を推定することは可能であったが、実物に忠実なモデルを生成するには位置情報の補正が必要であった。そこで、カラー画像を解析して得られる果実の輪郭線からポイントクラウドの位置情報を補正するため、統合したポイントクラウドをカラー画像の果実領域に投影し、境界線と比較しながらポイントクラウドの形状を修正した。

(2) 3次元モデルの精度評価

モデルの体積は、表面の三角形ポリゴンとモデル中心との4頂点からなる四面体の体積を積算して推測した。また、モデルのくぼみの位置から果実方向を求めて果実の姿勢を補正し、果実方向に垂直な平面に投影した領域から赤道部における最大径を推測するアルゴリズムを開発した。リンゴを供試して3次元モデルを生成し、体積と赤道部最大径について実測値と比較した。

111果のリンゴ(品種「Gala」、質量:148.0~284.1g)を供試し、カラー3Dモデルを生成し、体積と赤道部付近の最大径を推測した。目視により実物とモデルの形状や色分布などの外観特徴を比較するとともに、体積と最大径について実測値と比較した。なお、実際の体積は水道水を用いた液体置換法により簡易に測定した。

(3) 測定手法の高度化

市販されている複数の三次元センサの機種を比較し、農産物のモデル構築に適したものを選定し、ポイントクラウドを取得するための撮影装置を構築した。ポイントクラウドを取得するためにこれまで使用してきたキネクトセンサは、対象から少なくとも0.4m以上離れて撮影する必要があるため、リンゴなどの果実の詳細な凹凸形状を取得するにはデータ量が不足していた。そこで、農産物のモデル構築に適したものを選定するため、市販されている複数の三次元センサの4機種を比較した。インテル社のRealSenseは顔や手の認識も含めているため、0.2mまで対象に接近することができ、画素数がほぼ同程度であることから、より多くの果実形状の情報を取得できると考えられた。

三次元センサにより果実全面のポイントクラウドを取得するための撮影装置を構築した(図3)。自動撮影装置は、三次元センサ(RealSense F200)、ステップモータ2台、複動エアシリンダ5台からなり、PCで制御した。果実を上下エアシリンダの台の上に置くと、最初に、台を持ち上げ、相対するエアシリンダにより果実を両側から挟み、台が下降した後、果実を360°回転させた。その

後、直交するエアシリンダで持ち替え、最初の撮影で取得できなかった部分の情報を取得した。最後に、台を再度上昇させ、挟持していた果実を台の上にリリースし、下方に降ろした。1回転約2秒で撮影し、台の上昇開始から下降終了までの果実1果当たりの撮影時間は約12秒であった。1回転につきカラー・距離・IR画像を50セット取得した。

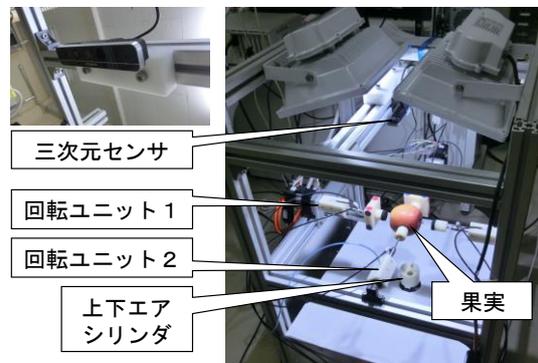


図3 自動撮影装置

4. 研究成果

(1) 果実の3次元モデル構築手法の検討

リンゴ果実の3次元モデルの例を示す(図4)。平滑化処理により果梗などの細かい形状特徴が失われたが、果実表面の色の分布など、概ね実物を忠実に再現できた。

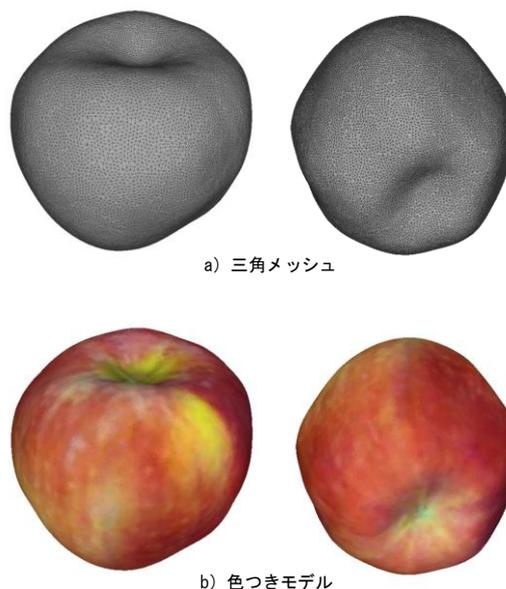


図4 3次元モデルの例(上:三角メッシュによる表現、下:色付き)

ソフトウェアの閾値に若干の変更を加えるだけで、リンゴの他、スイカ、メロン、カボチャ、パパイヤ、マンゴー、アボカド、ザクロ、タマネギの3次元モデルを生成し、表面の色分布の他、損傷も一部検出できた(図5)。一方、トマト、パプリカ、レモンなどでは、距離情報が得られず、3次元モデルの生成ができないことがわかった。

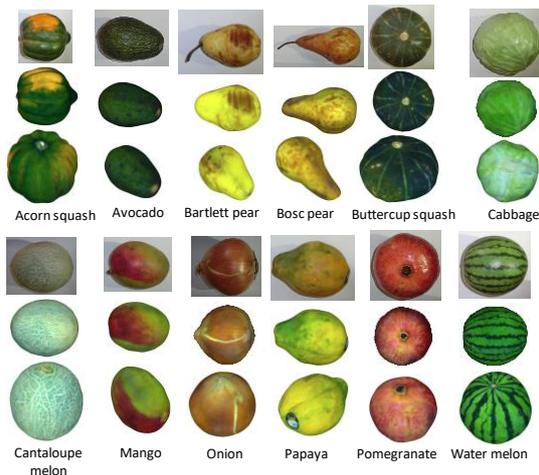
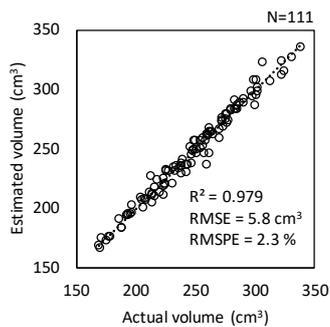


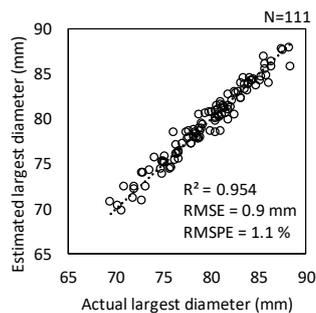
図5 3次元モデルの例（上：三角メッシュによる表現、下：色付き）

(2) 3次元モデルの精度評価

体積の推定誤差は、実測値に対するRMS誤差が 6cm^3 （誤差率2%）以下であり、最大径の推定誤差は、RMS誤差 0.9mm （誤差率1%）程度であった（図6）。



a) 体積



b) 赤道部最大径

図6 体積と赤道部最大径の測定精度

(3) 測定手法の高度化

撮影装置により色画像と距離画像を縦横1回転当たり50組ずつ、計100組取得し、ポイントクラウドを合成した。三次元センサの距離画像をそのまま合成すると階段状になり、滑らかな果実表面を再現できなかったため、連続して取得した複数の距離画像で同一箇所をマッチングし、移動平均処理を行った。さらに、データの分散が大きな画素を排

除し、ノイズ低減を図った。リンゴを供試して三次元モデルを構築した結果、初年度の三次元モデルと比較し、細かい凹凸の表現など、より実物に忠実なモデルを構築できる見込みが得られた（図7）。

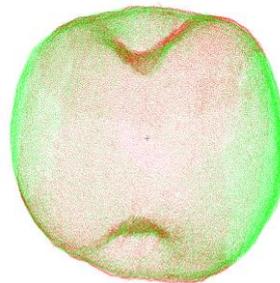


図7 自動撮影装置による三次元モデルのポイントクラウド

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 6件）

- ① 山本聡史, 紺屋朋子. 農業における低コスト三次元センサの適用. 第75回農業食料工学会年次大会. 2016年5月29日. 京都大学（京都府京都市）
- ② Yamamoto, S. and Konya, T. 3D Reconstruction of a fruit and a vegetable using consumer-grade RGB-Depth sensor. ISMAB2016. 2016年5月23日. 朱鷺メッセ（新潟県新潟市）
- ③ 山本聡史, 紺屋朋子. ポイントクラウドを用いた農産物の品質評価手法. 農業環境工学関連5学会2015年合同大会. 2015年9月15日～17日. 岩手大学（岩手県盛岡市）
- ④ 山本聡史, 紺屋朋子. キネクトを用いた農産物の三次元再構築手法. 3次元画像コンファレンス2015. 2015年7月10日. 海洋研究開発機構（神奈川県横浜市）
- ⑤ Yamamoto, S. and Karkee, M. 3D reconstruction of apples using consumer-grade RGB-Depth sensor. Washington State Horticultural Association 2014 Annual Meeting. 2014年12月1日～3日. Kennewick (U.S.A)
- ⑥ Yamamoto, S. Automation technology for tomorrow's food production. Webinar 22: IEEE Robotics & Automation Society Technical Committee on Agricultural Robotics and Automation. 2014年10月29日. Prosser (U.S.A)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本聡史 (YAMAMOTO, Satoshi)
 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業技術革新工学研究センター
 総合機械化研究領域・上級研究員
 研究者番号：20391526