

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	蘇 清華
論文題目	Potato Shape Grading Using Depth Imaging (深度イメージングを用いたジャガイモの形状評価)		
(論文内容の要旨)			
<p>ジャガイモは多くの国で食べられており、世界中で1,900万haもの農地で栽培されている重要な農産物のひとつである。また、サラダやスナック菓子、揚げ物といった加工食品としても多く流通しており、我々の生活にも馴染み深い。しかし形状や大きさが様々であり、表面の傷などを判別することが難しいことから、選別過程の自動化が困難な農産物である。また、加工の際にも大きさや形状を均一にすることが難しいため人手による選別作業で大きさと品質を選り分ける必要があり、人的コストの増加につながっている。さらに皮むきやカットの際にはその歪んだ形状のため加工現場では廃棄ロスが大きな問題となっている。これらを解決するために画像処理を用いた自動化の研究開発が進められているが、その多くは二次元画像に留まっており、三次元的に形状を把握する技術については報告されていない。そこで本研究では二次元画像と深度画像を組み合わせた計測手法により、ジャガイモの外観および表面形状を計測する手法の開発を目指している。</p> <p>本論文では三次元画像の深度情報を取得するために深度イメージャーが用いられた。この技術は近赤外光の投影パターンのズレを認識し、瞬時に奥行き形状を認識するもので、今後様々な産業分野で活用されることが期待される画像認識技術である。ジャガイモの表面の傷や障害は正常箇所と比較して色による判別が困難な場合が多いものの、加工性の面からは表面の凹凸が選別や検査の自動化のために不可欠な情報と言える。そこで通常 of 二次元情報から得られる色、寸法、形状に加えて、体積、質量、表面の凹凸や傷といった三次元情報から得られる品質パラメータを追加可能な新たな品質評価法の研究を行った。まず、ジャガイモを対象として二次元画像と深度画像を組み合わせるシステムを構築し、表裏2方向からの画像を取得することで非侵襲的に質量や凹凸を予測する手法を開発した。次に、機械学習を用いて寸法や外観品質に基づき分類する手法の開発を行うことで、本方式の有用性について述べている。さらに、700 msで三次元モデルの再構築が可能なアルゴリズムを開発し、複雑な形状を有する農産物の非破壊検査や選別への応用可能性について論じている。</p> <p>本論文は6章から構成されており、第1章で本研究の背景、研究目的、論文の構成を述べた後、第2章では数多くの先行研究を調査し、ジャガイモの市場性や重要性、既存のマシンビジョン技術による選別技術やそれぞれの判別性能について述べている。</p> <p>第3章では二次元画像と深度画像を組み合わせ、110個のジャガイモを用いて表面状態を計測している。予め測定したジャガイモの比重を用いて深度画像から質量や形状を取得するアルゴリズムを開発すると共に、幅や厚さ、長さについても画像から計測した結果、予測誤差は幅、厚さ、長さでそれぞれ2.1 mm, 2.4 mm, 2.3 mmとなり、良好な成績を得た。一方、質量予測は二次元画像からの面積で予測した時の結果が供試材料の73%の正答率であったのに対し、深度情報を組み合わせた本手法では93%にまで向上した。この誤検出の要因としてジャガイモ表面の傾斜角に着目した考察を加えている。実際に、平板で詳細な実験を行った結果、本方式の深度イメージャーでは65度以上の傾斜面では情報が欠落して正しく計測できず、その結果誤認識が生じていた。また、今回用いた深度イメージャーは近赤外光を用いているため、外部照明の影響を受けないこと、追加して照明を設置する必要がないといった有利な点についても言及している。</p> <p>第4章ではジャガイモ形状の曲がり、突起等を評価する画像認識アルゴリズムにつ</p>			

いて述べている。1個当たり3枚の画像取得を行い、処理した結果、140ms以下の速度で判別でき、その質量予測誤差は平均7.7g(4.2%)であった。このアルゴリズムと体積予測モデルを用いて、実際に様々な形状の質量選別作業を行ったところ、約90%の選別成功率を得た。現在、ジャガイモの選別作業においては、このような曲がりや突起等の評価指標は用いられておらず、これらの項目に関する基準は作業者の判断に依存しているが、本結果から新しい客観的な判断基準として提案できる可能性があると結論づけている。

第5章ではこれまでに構築したシステムを使ってデータの収集を行い、機械学習のアルゴリズムを組み合わせた品質評価法の開発を行った。7084枚の深度画像を用いてジャガイモの寸法と外観形状の特徴を6つの等級に分類する実験を行ったところ、ソフトマックス回帰モデルでは、寸法判別は94.4%の成功率であったものの、最も精度の悪かった外観の分類では14.5%に留まった。そこで、ソフトマックス回帰モデルを修正し、新たに畳み込みレイヤーを追加したところ、寸法と外観の両方で高い成功率となり、供試材料の86.6%を人間の判断する等級に分類できた。これは、畳み込みニューラルネットワークによって勾配部分の変化を学習でき、形状予測がより正確にできるようになったためと考察している。

第6章は各章の総括をすると共に、本研究で使用した深度イメージャーや形状認識アルゴリズムの問題点についても述べ、今後の農産物の品質評価に適した計測技術の必要性を提案して締めくくっている。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本研究は二次元画像と深度画像を組み合わせ、ジャガイモの表面形状、体積、質量等、従来の二次元画像のみでは評価が困難であった計測項目の定量評価の可能性を示したものである。これまでに深度画像をジャガイモの形状認識に使った研究例は無く、本研究は新しい計測技術の農業分野への応用可能性を探索し、今後の新たな農産物品質評価技術の開発に貢献するものである。本論文は試作した画像計測システムで二次元画像と深度画像を組み合わせた画像認識アルゴリズムを開発し、多くの供試材料を用いて実験することにより、ジャガイモの体積や質量、表面の凹凸等の計測可能性を示したものであり、評価できる点は以下の通りである。

1. 画角や画素数、深さ計測の精度等を考慮して深度イメージャー、カラーカメラ、照明、コンピュータからなるジャガイモ計測用のイメージングシステムを構築し、表と裏の2枚の画像計測でジャガイモの三次元形状を再構築することに成功した。このとき、ジャガイモ表面の1画素あたりの大きさや、比重計測の結果から三次元モデルを構築し、体積及び質量を推定することにより、従来の二次元画像を用いた推定よりも格段に高い精度で計測できることを明らかにした。
2. ジャガイモの外形や凹凸を定量的に評価できるアルゴリズムを構築し、三次元情報による質量をパラメータとして加えることで、良好な選別成功率を得た。この結果は、ジャガイモの形状に基づく選別を自動化できる可能性を示唆している。
3. 296個のジャガイモを人手による選別工程で6種類の等級のジャガイモに選別し、深度画像と可視画像に基づいて機械学習させた画像解析システムで選別性能を評価したところ、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を利用することで、86.6%の成功率で人間の判断に追従可能であった。

以上のように、本論文はジャガイモの選別のための深度画像の有用性を明らかにしたものである。開発されたジャガイモの三次元モデルの構築技術は、計測困難であった不定形農産物の寸法、質量、三次元形状を再現できることより、選別作業のみならず自動加工装置の設計等にも利用可能と考えられる。このことから農産物生産の機械化、情報化に関して大きな貢献が期待でき、生物センシング工学、フィールドロボティクス、農業システム工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(農学)の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成30年4月17日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士(農学)の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降 (学位授与日から3ヶ月以内)