

道産食品のための複雑形状カット技術の開発

鎌田 英博, 櫻庭 洋平, 戸羽 篤也, 中村 勝男
 和田 充雄*, 石村 康生**, 松本 英二***, 村井 努***
 福井 努****, 酒井喜久夫****

Development of Cutting Process for Food of Irregular Shape Harvested in Hokkaido

Hidehiro KAMATA, Yohei SAKURABA, Atsuya TOBA, Katsuo NAKAMURA
 Mitsuo WADA*, Kousei ISHIMURA**, Eiji MATUMOTO***, Tsutomu MURAI***
 Tsutomu FUKUI****, Kikuo SAKAI****

抄 録

曲面形状の根菜類を消費者の嗜好にあった多面体にカットする工程では、縦・横の2次元を基準とする裁断機構では限界があり、未だに人手に頼らざるを得ないのが現状である。例えば、カボチャのカット工場で裁断作業を担う熟練技能者は、連続した裁断動作により腱鞘炎を発生しやすいため、地元企業から自動化の要望が特に強い。本研究ではこのような生産ラインで必要とされている熟練技術について人間工学的評価を行い、それにもとづいて人手の介入を最小に抑えた加工システムを開発し、硬野菜加工作業の機械化・省力化を実現した。中でも、3次元CADを活用した裁断シミュレーションは、カット形状や重量を予測可能な上、裁断工具の形態やその姿勢・位置を決定するのに有効であることがわかった。

キーワード：食品，ロボット，動作分析

Abstract

Most of Consumer likes polyhedron cutting crops, but If we cut like them, cutting mechanism using a horizontal plane and a vertical plane is not simple and not effective. So that human workers have cut with food chopper yet. In the process of cutting the root-crop like pumpkin, workers are liable to cause wrist problem. Therefore people of local factories need the automation machine for cutting pumpkin. In this study we measured human skill and evaluated ergonomically. On the basis of the results, we developed automate cutting system controlled with a small number of workers. Especially, we invented cutting simulation by 3dCAD, so that we could cut the pumpkin of equally size and make inexpensive manufacturing process.

KEY-WORDS : food, robot, worker's skill

* 北海道大学

* Hokkaido University

** 宇宙航空研究開発機構

** Japan Aerospace Exploration Agency

*** シンセメック株式会社

*** Synthemec Co.,Ltd.

**** びえいフーズ株式会社

**** BieiFoods Co.,Ltd.

事業名：重点領域特別研究

課題名：道産食品のための複雑形状カット技術の開発

1. はじめに

農水産物の裁断加工工程には、様々な機構の専用カット機が利用されている。しかし、不定形の農産物を消費者の嗜好にあった形態や重量にカットするためには、縦・横の2次元を基準とする裁断機構では限界がある。Julian F. V. Vincent は果実の裁断に必要な被切削特性を検討するため、その繊維方向による影響を論じている¹⁾。また、我妻等は、魚フィレの定量カットのために画像による形状認識方法を提案している²⁾。さらに、細川等は、スイカのハンドリングについて³⁾、林等は、習熟度の違いによる包丁の動きについて⁴⁾検討している。一方、和田等は、熟練作業工程のロボット化を目指して運動学的な同定を試みている^{5)~8)}。本報では、地元企業から特に要望の強いカボチャカット処理の自動化に関して、新たなカット軌道を考案することによりその特性に最適な裁断方法を提示することができると考え、この軌道を実現する機構や工具形態や搬送機能を備えた生産性の高い加工システムの開発を目標とした。その中で、現状の生産ラインに働く熟練作業者の動作を測定し裁断作業を解析すると共に、最適な裁断機構の設計、製品重量の均一化を図る新たな手法等についても検討し、ロボット化への糸口を探った。

曲面形状の根菜類を、一定重量で消費者の嗜好に合った多面体にカットする工程は、機構も複雑で自動化が困難となるため、人の視覚に頼って裁断しているのが現状である。したがって、過疎化が進む地域では、安定した労働力を確保できなければ、生産体制に深刻な影響があるため、地元企業からは自動化の要望が挙げられている。本報では、実物（南瓜）

の3次元形状を測定し、CAD上でそのモデルデータの裁断シミュレーションを試みた。南瓜の適正なカット軌道を生成する場合には、現状のカット製品の誤差範囲と照合しながら、最適な裁断機構の設計、製品重量の均一化を図った。また、ハンドリング機能や搬送機能も考案し、生産性の高い加工システムの開発を目指した。

2. 現在の処理手法

2.1 汎用裁断機による加工

図1は、現在の加工工程（右）と開発計画（左）の概要である。現在の加工作業は実線矢印のように、新たな手法はブロック矢印のように提案するものである。従来まで行われていた馬蹄形を基本とした裁断方法を見直し、歩留まり向上や乱切りカット品の均等化を目指した。また、実用性を最重要課題として、新たな裁断手法を可能にするための機構を設計した。

図2から図4は、実際の生産ラインの様子である。工場へ搬入されたカボチャは、人手で洗浄および欠陥除去後に、水平に2分割する裁断機を通過する。次に、図2に示すように丸鋸状のスライサーで馬蹄形断面に縦割りする。この際、カボチャの内部に含まれている「ワタ（internal organs）」と呼ばれる粘性繊維組織や種子を除去する。尚、搬送はベルトコンベアによるが、それぞれの処理装置の連結部において人が加工途中のカボチャの切片（これ以降、ワークと称する）の整列等を行っている。多くの工場ではカット工程の最終段階で、図3に示すように多数の作業者が作業台の両脇に並んで乱切りを行っている。

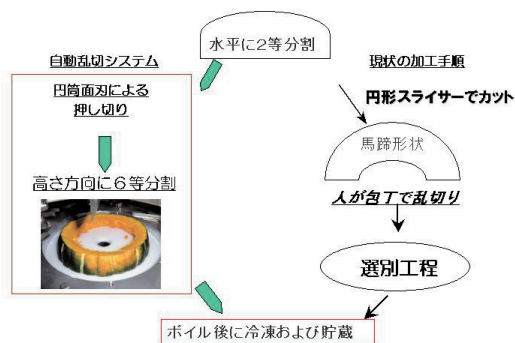


図1 裁断工程の作業フロー



図3 乱切り作業の実工程（現状）



図2 馬蹄形に裁断（現状）



図4 カボチャ乱切り作業（現状）

2.2 人の手による裁断（乱切り）方法

乱切りとは、ニンジン、ゴボウ、キュウリの場合には長手方向の軸で回転させ、斜めに不規則な形に切るという表現で定義されている。その形状は、ほぼ正四面体様の形状である。一方、カボチャの場合は、概ね立方体に近似した状態が見た目にも好評で、消費者の嗜好に合致しているとされる。図4は、カボチャの乱切り作業の様子である。作業者は、前述した馬蹄形状切片の両端に、中途半端な端切れを残さないように注意しながら、均一でしかも指定された重量の誤差範囲で瞬時に裁断位置を決断している。その際、切片を任意抽出し重量計測も行うが、主に五感と経験で判断していると思われる。図5は、この工程で生成された切片重量を測定した一例であるが、目標とする重量： $35\text{ g} \pm 5\text{ g}$ に対して、偏差は±20%以内には収まっている。しかし、偏差のプラス方向に誤差が発生しやすい傾向が認められる。このデータは、現場の熟練者の判断に委ねた場合の裁断の特徴を良く表している。

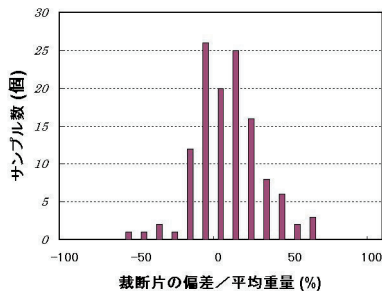


図5 乱切り加工品の重量分布
(切片の平均重量：28.3g)



図6 カボチャ裁断作業計測実験

3. カボチャ裁断作業の計測

馬蹄形のカボチャの小口カット（乱切り）作業は、一人の作業者が1日0.8ton程度を処理する。1片は150～200gであるから、1日5,000切片程度であり、熟練者は左手で切片のハンドリングを行い右手で包丁によるカットを3秒程度で処理していることになる。このような高速かつ精緻な熟練作業の合目的性とそれを実現しているスキルを計測で捉え、定量化することを試みる。

カボチャの馬蹄形ブロックを5～6個の小片に切り分ける実作業を実験室で再現し、ビデオトラッカー（応用計測研究所G280）による肩、肘、手首、包丁先端の4標点の動作計測、及び包丁先端の加速度計（NECsanei製）による3軸加速度を測定した。筋電位は、筋電位計（DELSYS）より電極を前腕2筋（手根屈筋、短母指伸筋）、上腕2筋（上腕二頭筋、上腕三頭筋）にとりつけ、各筋の表面筋電位を計測した。被験者は、予備実験で非経験者2名、熟練者3名に実際にカット作業を行って状態で計測した。

筋電位計測は橈側手根屈筋（FCR）・短母指伸筋（EPB）・上腕二頭筋・上腕三頭筋の4点について行っているが、それぞれ被験者ごとにS、T、U、Vの4chデータとしてまとめた。なお、サンプリング時間は $240\mu\text{sec}$ （ $=\Delta t$ ）である。

3次元トラッキングデータは、肩Xs、肘Xe、手首Xw、包丁先端Xcの3次元空間座標データにまとめた。サンプリングレートは $1/120\text{ sec}$ である。

これらのデータを用いて解析を行うが、トラッキングデータと筋電位データの間で、開始時点では同期をとっているが、その後はサンプリングレートの違いのため、時間軸は異なってしまう。このため、以下の前処理を行って同期をとれるようなサンプリングレートの形態に変更した。

筋電位データは、差動増幅されて検出された活動電位の絶対値について連続した4個のデータの平均をとり、データ数を4096個とした。また、トラッキングデータは、データを多項式で内挿し、これを上述のレートで再サンプリングした。多項式には1次、2次式を検討したが、ノイズの大きいデータであるため、1次の線形補間にとどめた。さらにトラッキングデータは、肩の位置をX-Y座標の原点とし、またその肩と包丁先端を結ぶ線分を新たにX軸となるように回転して、座標系のとり方を被験者ごとに同一基準とした。

作業座標空間でのXs、Xe、Xw、Xcより、関節座標空間での角度を求め、これらを θ_s 、 θ_e 、 θ_w とした。ただし、これらはX-Y平面とのなす角度としてある。

以上により、スキル解析するデータを以下に示す。

筋電位データ：

$$S(n\Delta t), T(n\Delta t), U(n\Delta t), V(n\Delta t)$$

作業空間データ：

$$X_s(n\Delta t), X_e(n\Delta t), X_w(n\Delta t), X_c(n\Delta t)$$

関節空間データ：

$$\theta_s(n\Delta t), \theta_e(n\Delta t), \theta_w(n\Delta t) \\ \phi_s(n\Delta t), \phi_e(n\Delta t), \phi_w(n\Delta t)$$

$$n = 1, 2, \dots, 4096$$

前処理後の計測データの一例を図7及び図8に示す。ここで図7は、筋電位計測した結果の一例である。上から橈側手根

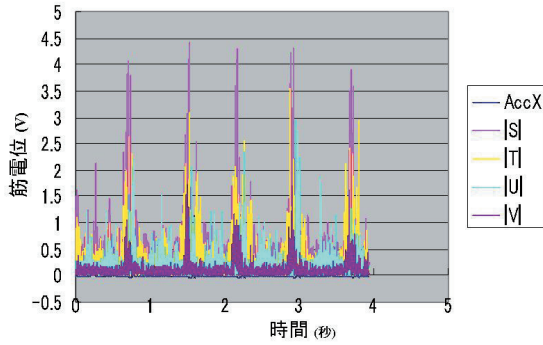


図7 筋電位計測の一例

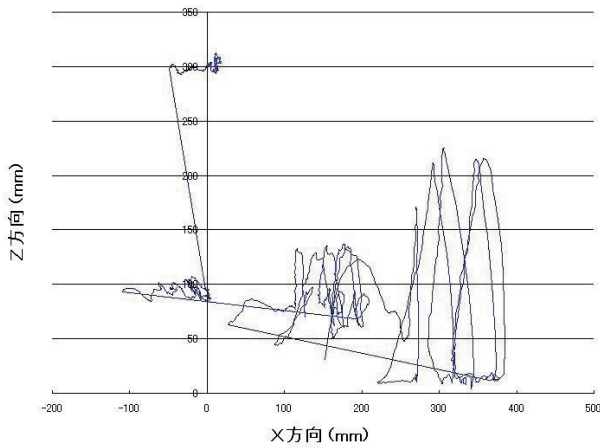


図8 ビデオトラッカーによる評点計測データ

屈筋 (S)・短母指伸筋 (T)・上腕二頭筋 (U)・上腕三頭筋 (V) の活動電位。4秒間に5回のカット動作が行われている。加速度計のデータも同時に記録しており、このピークがカットの打撃時点である。

また、図8は3次元空間座標のX-Z平面すなわち、作業者を右側から観察したとき人の前方をX、上方をZとして表示したものである。カット作業時には、腕全体の動きは小さく、筋力の出力が包丁の動きに対して間歇的で筋力を集中している様子が伺える。

4. 筋電位と作業空間データからのスキル分析

被験者データは、熟練者A, B, Cと非熟練者Wの合計4名のデータから分析した。カボチャカット動作を観察すると、非熟練者は手首を柔らかくし、スナップを効かせて包丁に衝突させるが、カボチャは硬いので包丁が喰い込んでしまう。これを避けるために過渡に動作が大きく、強い打撃を与えてしまいがちである。長年この作業を担当している熟練者に言わせると、このようなカットでは、長時間の作業を維持するのは不可能で、腱鞘炎発生の恐れもある。それに対し、熟練者は、カット動作がコンパクトで振りも小さいが、しっかりリズムカルにカットする。図9にデータの一例を示す。手首関節 θ_w とその微分である角速度 ω_w の変動を示したもので

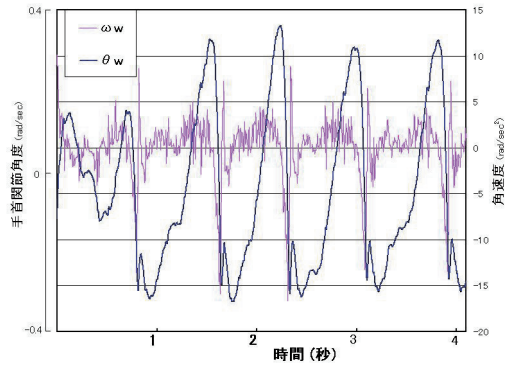


図9 手首関節と角速度の変化

あるが、ほぼ一定のリズムで、かつ打撃時に最大角速度を与えるように振り下ろしている様子がわかる。

カット作業を以下の2つの動作フェーズに分けて考える。

- ① アップスイングからダウンスイング (Free Motion) : 包丁をあげて、適切なタイミングで打ち下ろす動作フェーズ。
- ② カボチャカット、まな板と包丁の衝突までの打撃時の動作フェーズ。(Impact Motion)

本研究では筋電位図と手首関節の動きの相互相関関数 Cross Correlation 解析に基づいてカット動作を分析した。分析は、筋活動S,T,U,Vと手首角速度 ω_w の相互相関関数 (Cross Correlation) をFFT 解析から求め、その逆変換から計算した。その結果を、以下、図10(熟練者: B), 図11(非熟練者: W) にて示す。

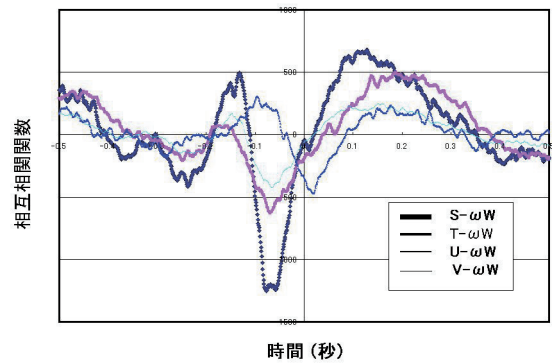


図10 Cross Correlation (熟練者: B)

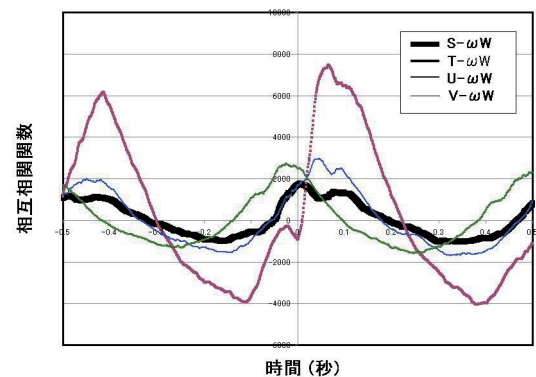


図11 Cross Correlation (非熟練者: W)

まず、前述した動作フェーズのうち、①のFree Motionについて分析する。カット作業は、 $t=t_0$ より包丁をゆっくり持ち上げ、あるタイミング $t=t_p$ で最高点まで達した後、打撃時点 $t=t_f$ まで一気に振り下ろす。この時、打撃時点で最高速度に達し、包丁先端はz軸面で5 m/sec～6 m/secの速度である。この速度は、熟練者、非経験者ともにほぼ同レベルであるので、熟練者の技はこの t_p を各関節でどのようなタイミングでそろえていることによると思われる。

図10は、熟練者(B)の上腕二頭筋U- ω_w 、上腕三頭筋V- ω_w 、手根屈筋S- ω_w 、短母指伸筋T- ω_w 、の場合である。角速度のピーク(負)を基準に時間軸負では打撃前の活動を、正では打撃後の活動を表す。このデータでは、打撃の約0.06秒前のタイミングで上腕三頭筋の活動がピークとなり、続いて手根屈筋、短母指伸筋と活動のピークが連鎖する。これは、手を鞭のように使う運動連鎖と関係あると推測できる。

図11は、非経験者の結果を示している。表示は同上。打撃の約0.03秒前のタイミングで上腕三頭筋の活動がピークとなり、続いて打撃時及びその後に手根屈筋、短母指伸筋が活動する。運動連鎖は、明確には見えない。

次に②のImpact Motionを分析する。カット時のImpactは、運動量 mv が力積 $F\Delta t$ となり、衝撃的な力 F で南瓜を切る動作である。動作を観察すると、非経験者は、まな板と包丁の衝突時には加速度 G も高く、筋力も過大に使うことになる。熟練者はこの衝撃力を最小限に抑えているように見える。

カボチャのカット時には衝撃力が包丁に作用し、その反作用力が手首から肘関節へと関節に衝撃的なトルクとして加わる。これをどのように吸収し緩和しているかが問題である。

図11で非経験者は、打撃直後に筋肉を活動させている。これは、包丁をゆるく持って衝撃が手首に伝わらないようにしていると思われる。しかし、これがうまくいくのは包丁の撃心をうまく使っているときであり、これが外れると手首への負担は大きい。

これに対して、図10の熟練者は、運動連鎖で腕を一体化し、衝撃的な外力を最小限に抑さえ、かつ反力は腕全体で吸収している。また、打撃時に握り力を強め、手首に外力がかからないように肘の動きでカット作業を行っている。このように熟練者は、長時間の作業で疲労や負荷を最小限に抑えた効率的な作業スキルを備えていると推定できる。この一連の動作のキーワードは、腕を鞭のように振る運動連鎖であり、関節への反力を抑える包丁の撃心を体得していることにあると思われる。

5. カット時の打撃力の測定

次に包丁先端での3軸加速度計データよりカット時の打撃力を推定する。図12は熟練者(B)のZ軸(高さ方向)、X軸(前後)、Y(左右)の加速度である。加速度のピークは、まな

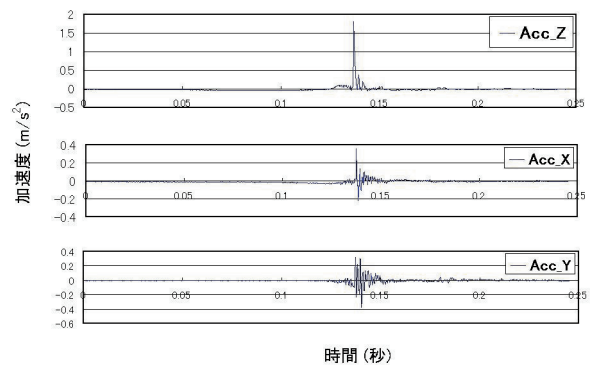


図12 包丁先端の3軸加速度データ

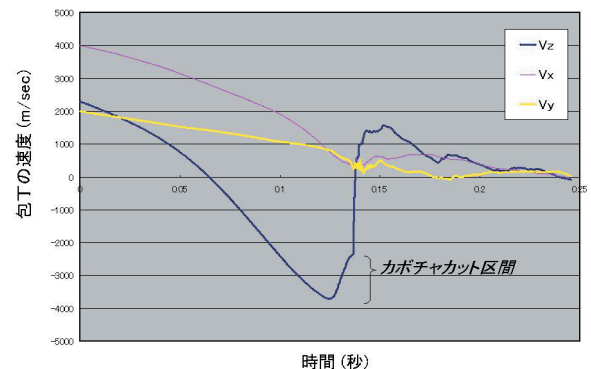


図13 カット打撃時の包丁の速度

板との衝突時であり、その手前の小ピークが、カボチャカット時の衝撃と思われる。

図13は、図12の加速度データから計算した速度データである。図中0.1255secから0.1366secまで、約0.01秒間がカボチャカット時間で、この間、Z軸速度は、 -3.7m/sec から -2.3m/sec まで変化する。これから包丁を1 Kgとすると、打撃力 F は、122.5Nと推定できる。

6. ロボット化のための最適カット軌道生成の試み

前項で行った熟練者のスキル分析に基づき、熟練者の包丁裁きの同定、すなわちカット軌道の同定を試みる。包丁先端の軌跡は、図7に示されているが、この中にはノイズや不要な動きを全てふくんでいる。これら不要なデータを除去するにはモデルを作成する必要がある。本研究では平面内4自由度系で軌道の運動学的同定モデルを考える。

図14は、人の腕手によるカット動作モデルである。腰の位置を基準座標原点 $\langle 0, 0 \rangle$ とし、以下の座標系を設定する。

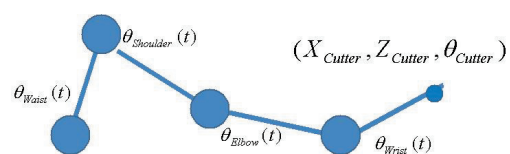


図14 人の腕手によるカット動作モデル

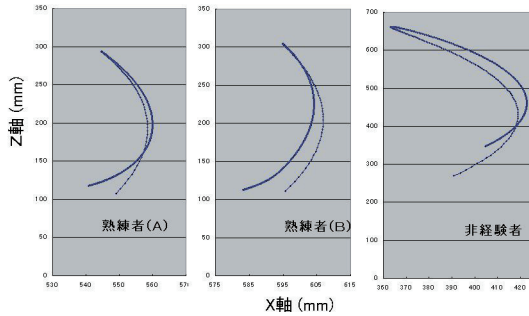


図15 カット軌道の同定結果

肩位置：(X_s, Z_s), 上腕：長さ L_u, 関節角 θ_s, 前腕：長さ L_f, 関節角 θ_e, 手と包丁：長さ L_{wc}, 関節角 θ_w. これらにより、モデルは、肩の並進1自由度、腕・手の3リンク系の3自由度の平面内シリアルリンクマニピュレータである。リンク長は計測データより平均値で求めた。関節角軌道について述べると、始点 t₀, 終点 t_f として、t₀ では角速度 0, t_f では最大角速度をもつ。中間 t_p で、運動の Up から Down に切り替わるのであるから、角速度は 0 とする。これらを考慮すると関節角度は以下の関数に当てはめられる。

$$\theta_i(t) = \alpha_i t^m (T_f - t)^n e^{-\beta(T_f - t)} + \gamma,$$

ここで、βは、 $d\theta(t_p)/dt = 0$ より定め、αは

$$d\theta(t_f)/dt = -\alpha T_f$$

より、t_f で速度が最大になるように与える。γはオフセット



図16 多関節ロボットによる裁断試験

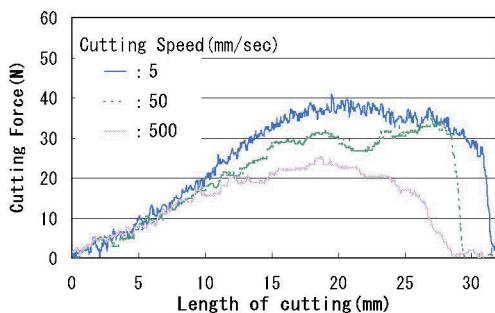


図17 裁断時の刃物の移動と裁断抵抗力 (果肉面押し切り)

である。α, β, γは関節ごとに推定し、また被験者ごとにも整理して当てはめた。この結果、包丁先端の運動学的軌道のうち、カット動作時の変位を X-Z 平面で図示したのが図15である。前者2名は熟練者、最後の1名は非経験者である。熟練者の軌道は、きれいな半月状の軌道を描き、上下動だけでなく、前後、また包丁の回転力をも利用したカット軌道生成していることが分かる。これらから、打ち下ろしのカット軌道はほぼ垂直に近いが、まな板との衝突の前には手前に引く傾向が共通して見られる。経験者ごとの相違はあるが、この「半月切り」は共通である。このことは、カボチャに対して刃物を垂直に当て、まな板との衝突直前には手前に引いて衝撃を和らげているとみることができる。この現象が顕著なのは熟練者 B10 の場合であり、この動きは肩関節の動きと関係していると思われる。

7. 裁断方法と裁断力

切削加工学分野では、金属、樹脂、木材などの加工データは豊富に蓄積されているが、カボチャのような農産物に関するデータは皆無である。そこで、カボチャの被加工特性を得るために図16に示すような産業用多関節ロボット（川崎重工製 FS20N）を用いた裁断実験を行った。裁断方法は、刃物を垂直にワークに押し付ける「押し切り」方式と手前に引きながら押し付ける「引き切り」方式の2通りに、また、果肉面から包丁を入れる場合と外皮面からの2通りで裁断力の変動を観察した。裁断時のワークは、把持せず、無拘束状態

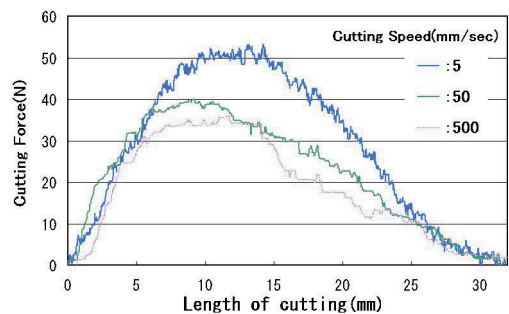


図18 裁断時の刃物の移動と裁断抵抗力 (外皮面押し切り)

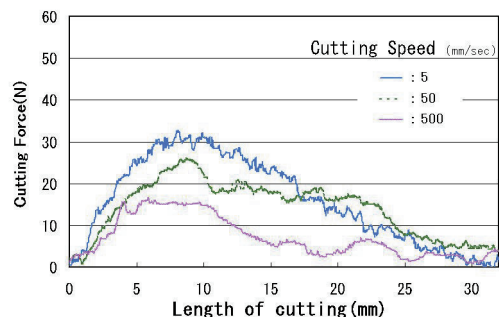


図19 裁断時の刃物の移動と裁断抵抗力 (外皮面引き切り)

である。まな板は、工場で使用されているものと同等のポリエチレン製を使用した。裁断抵抗の測定は、まな板の下部に固定した切削動力計（佐藤マシンリー製）により測定した。

図17から図19は、裁断時の刃物の移動量とカボチャが刃物から押される力（裁断抵抗力）との関係を示している。送り速度については5, 50, 500mm/secの3段階に分けて測定したが、500mm/secは、最大合成速度に近い値と思われる。送り速度が大きいほど、最大裁断抵抗力が低下する傾向はいずれも共通しており、熟練者のカット方法からも示されているように速度変動の効果は大きいことがわかる。また、図17のように果肉面からカットする場合には、刃物の移動に伴ない徐々に抵抗は増加する傾向にあるが、裁断終了直前には、抵抗が急激に低下している。一方、図18の外皮面から刃を挿入する場合には、裁断開始直後に急激に抵抗値が上昇し、ピークを過ぎると緩やかに減少している。これは果肉面からカットする場合と逆の傾向であり、果肉と外皮付近の密度あるいは組織的な特性の差異が顕著であることが明らかである。

さらに、最大裁断抵抗値についてみると、外皮面押し切り、果肉面押し切り、外皮面引き切り（図19）の順で小さくなっており、カボチャの裁断においては、果肉面で引き切りする手法が最も裁断しやすいことがわかった。特に、引き切りの

場合には、最大裁断抵抗力は、32N, 25N, 15Nと図18のおよそ半分の数値となっており、引き切りの効果も大きいことは明らかである。

前項で述べたように、熟練作業者の裁断時の包丁先端速度は、約4000mm/secであり、約0.01secで裁断し、瞬間的に120Nの最大裁断力を発生している。単純な比較はできないが、上記試験のように産業用ロボットに代替する場合、現状の性能では人の約1/10の裁断速度でしか実現できない、しかし、ロボットの場合には裁断力がピーク時でも、50N以下であることがわかった。

8. カット軌道の生成手法

実物のカボチャを非接触三次元測定システム（COMET VarioZoom：Steinbichler 社製）で測定すると点群座標の形式で記録することができる。このデータをサーフェスデータへ変換することにより、3次元CAD（Rhinoceros）の仮想空間内で編集作業が可能となる。図20は、水平面で上下に等分割したカボチャを垂直面で6分割した様子である。このように3次元CAD上では分割、ブール演算等の機能を使用することで立体形状を裁断に似た扱い方で処理することができる。さらに切片の体積や重量も正確に計算することができる。そこで、この方法を、裁断シミュレーションとして扱い、最適な裁断軌道を見つけ出す手段として活用することにした。図20の分割方法は、従来のカット方法と同じであり、図2で示したような裁断機で、馬蹄形状の切片を6つ作成した状態をシミュレーションしている。中央の2つの馬蹄形を裁断すると、外皮を底面とする立方体状の乱切り切片が生成される。しかし、中央を除く外側の4つの馬蹄形は、やや歪（いびつ）であり、裁断しても正規の立方体状には加工できない。

例えば、図21は、両端部の馬蹄形を3分割した様子で、いずれも、立方体とはならない。現場作業を観察しても、ベル

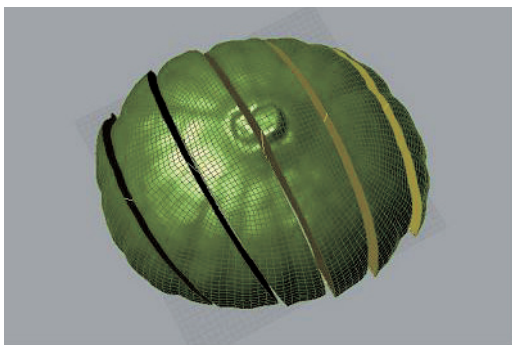


図20 裁断シミュレーション

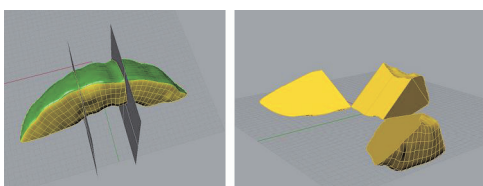


図21 馬蹄形からの乱切り片



図22 多くの切片が四角錐台状になる裁断軌道

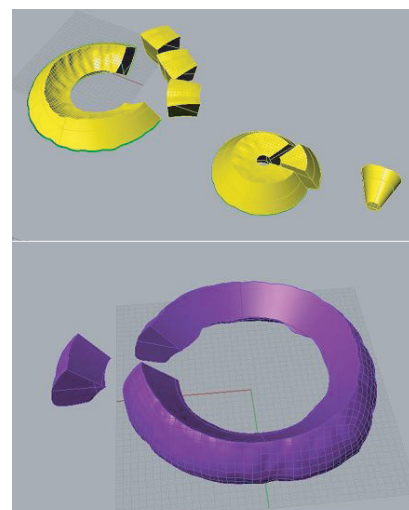


図23 円錐面によるカット軌道

トコンベア上にこのような三角錘台あるいは傾斜の急な4角錘台の切片が見受けられる。それらは何れも選別工程で除去されることになるため、歩留まり低下やコスト増の一因となっている。しかし、この裁断軌道を基本としたカット工程であるから、必然的に一定量の規格外切片が発生するので、根本的な歩留まり向上対策には他の裁断軌道を考案する必要もあった。そこで、カボチャを楕円体とすると外皮を底面とし、その法線が楕円体の中心に向かう四角錘台の集合と考えられる。具体的には図22に示すような軌道で、イヌイットのイグルー(冬の家)からヒントを得たものである。この軌道線に忠実に裁断できれば、歩留まりの向上は確実に期待できる。

図23は、前述の軌道を実現するために、円錐面でリング状にカットした後、放射状に小割りする新たな方式の加工軌道である。この方法では、円錐の曲率や頂点の位置を調整し、小片のサイズや分割数を重量が一樣となるように設定した。また、カボチャの外径を最大、標準、最小の3サイズについて、本軌道でカットした場合のサイズ、重量を確認し小片の重量が許容重量内に収まっているかを確認した。

9. 試作装置の概要

前項で提示したような円錐面によるカット軌道を実現するための刃物および裁断機構について検討した。円錐面でカットするためには刃物を円錐面形状に仕上げなければならない。したがって、その製作にはワイヤカットマシンを使用して削りだした。また、カボチャをリング状にくり抜くには、この刃物を円錐面の中心軸廻りに回転させる必要があるため、第7項図16に示した6軸多関節マニピュレータによる移動機構

を使用した。その際、マニピュレータに刃物を把持させるための専用工具ホルダーも併せて試作した。実験では、刃物の裁断開始直後にロボットコントローラが過負荷エラーを表示して停止した。停止の原因は、200Nの重量物の搬送が可能の本ロボット移動機構では、裁断力が不十分であったためと思われる。以上の結果から、円錐面刃物を使用して、円錐の中心軸で1回転させる方法は、非常に短い時間で加工できるという効果も期待できたが、大きなパワーの移動機構が必要であることが明らかとなったため、次善の策として、円錐面に近似した円筒面刃物を利用することを検討した。前述の裁断シミュレーションを再度利用して、円錐面を垂直平面で4等分割すると、合同な1/4の円錐面ができる。この1/4の円錐面に近似した円筒面を作成してみた。図24に示すように、円筒刃を対向して配置し、押し切りを行う方法を実験的に検討した。しかし、例えば、1/4円錐面の代わりに近似円筒面を使用すると、カット面上には円錐状との誤差が凹凸として残る。この凹凸を最小とする円筒面の曲率や相対的な位置・姿勢を計算で求めた。刃物は1.0mmの鋼板を円筒面状に成形したもので、コーナー部に面取りを施し、把持部を除く端面は、刃先角度約30度で片面研磨して、切刃(きりは)としてある。移動は、1軸方向のスライド機構を活用することとした。この方式では加工時間も短く、機構もシンプルとなる。1軸の押し切りにはエアシリンダによるスライド機構を利用し、図25に示すような加工実験を行った。

この刃物2枚を対向した状態(図24)の押し切り機構を2ステージ用意し、ワークを90度回転させて再度押し付けることでリング状の全周を円錐面状にくり貫くことができる。

図25の裁断実験によると、円筒面による裁断方式では、4つの裁断面の間に不連続な段差が発生し、商品として不都合



図24 円筒面状の刃物による裁断機構

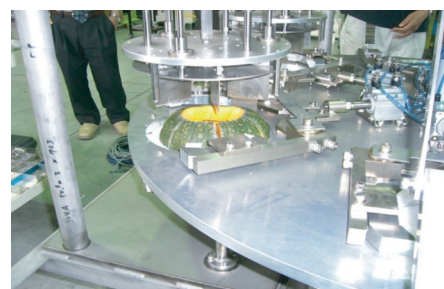


図26 乱切りカット機構



図25 リング状の線り抜き機構

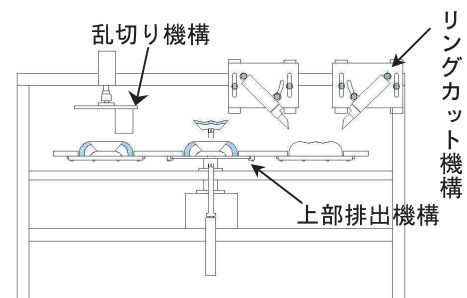


図27 試作機の概略図

が生じる可能性もあったが、現場の熟練者作業からの意見を聞いた結果、乱切りカット後の裁断面の外観には不快な痕跡が残っておらず、この裁断方式で妥当と判断した。

図26は、リング状にくり抜いた後に行う6等配分割機構で、本装置の最終目標とする乱切り処理である。上方から平面状の刃物を6枚押し付けることで6等配に分割される。この刃物はリング状切片の中心に対して放射状に並べられており、一回の刃物の下方移動で中心角60度の切片が得られる。この裁断ステージを2つ用意し、回転テーブルによりワークを30度回転させれば12等分の乱切り切片が加工できることになる。

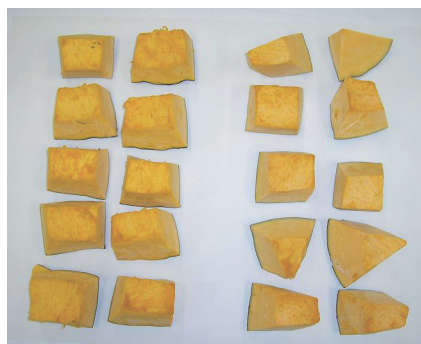
本装置ではリング状および乱切りに使用する刃物の位置および角度を一定とした。これは、前述の図5で示したように、カット片はその重量誤差を広く設定できるため、その誤差値から逆算すると、本装置で処理可能なカボチャの外径を決定することが可能だからである。また、実験で使用したカボチャの外観を観察した結果からは、縦横サイズ比に大きな差異は認められず、カボチャの形態は楕円体様で、凹凸などの変形を考慮しても概ね類似していると思われる。

図27は、前述のリング状カット機構と乱切り機構に搬送・排出機構を加えて構成した自動カボチャ乱切り装置の概略図である。また図28には製作した試作機の外観である。縦、横、高さサイズは1,500mm、カット作業用テーブル高さは920mmである。外周はアクリル板で蔽い稼働中の事故を防止している。

円形の回転テーブル上に60度毎に円状のワーク台を設けて



図28 試作機の外観



(左) 本装置 (右) 人手による裁断
図29 乱切りサイズの比較

いる。ワーク台は、それぞれに把持ハンドを備えており、裁断抵抗や刃物の抜き刺しの時に生じるワークの“ぶれ”を制限するように働く。裁断動作は、リング状に成形する工程、くり抜かれた上半部を排除する工程、それに続いて放射状に等分割する乱切り工程等を、回転テーブル上で連続して行うことになる。作業者は、ワークを円形ワーク台に供給し、安全を確認してから手元の始動ボタンを押すだけの安全な作業を行うこととなる。テーブルが60度回転すると各ワーク台上では加工が自動的に進行していく。現在、試験運転、改良、現場運転のテストを終了し、処理プロセスやカット機構の性能等を検証中である。今後は、工場内の生産ラインに組み込み、現実的な課題の抽出を行う予定である。

図29は、乱切片の外観で、(右)は人の手による裁断片、(左)は、本研究で開発した自動乱切り装置によるものである。視覚的にも(左)の方が、極めて均一な形状となっている。

10. まとめ

以上の結果をまとめると以下の通りである

- (1) 高速かつ精緻な熟練作業を実現しているスキルを計測で捉え、定量化するため、ビデオトラッカーによる肩、肘、手首、包丁先端の標点計測、及び包丁先端の3軸加速度測定、前腕2筋・上腕2筋表面筋電位を計測した。
- (2) 筋電位の計測結果から、熟練者は、運動連鎖で腕を一体化し、衝撃的な外力を最小限に押さえ、かつ反力は腕全体で吸収している。また、打撃時に握り力を強め、手首に外力がかからないように肘の動きでカット作業を行っていることが明らかとなった。このように熟練者は、長時間の作業で疲労や負荷を最小限に抑えた効率的な作業スキルを備えていると推定できる。
- (3) 熟練者の軌道は、きれいな半月状の軌道を描き、上下動だけでなく、前後、また包丁の回転力をも利用したカット軌道生成していることが分かる。まな板との衝突の前には手前に引く「半月切り」傾向が共通して見られる。このことは、カボチャに対して刃物を垂直に当て、まな板との衝突直前には手前に引いて衝撃を和らげているとみることができる。
- (4) カボチャの被加工特性を得るために産業用多関節ロボットを用いた裁断実験を行った。刃物の送り速度が大きいほど最大裁断抵抗は、減少する。また、押し切りより引き切りの裁断方式の方が、裁断抵抗は小さい。
- (5) 裁断シミュレーションを試行した結果、カットサイズや重量などの特徴を容易に把握することができるため、最適な刃物の形状や姿勢などの決定に有効であった。
- (6) シミュレーションの結果を基に、その機能を実現するための刃物および裁断機構を設計・試作した。

(7) 自動乱切り装置の試作機の設計および試作を行った。試験運転、改良、現場運転のテストを完了し、処理プロセスやカット機構の性能等を検証中である。

今後は、本試作機の改良を進め道内のカボチャカット工場への普及に努める。また、人間工学的解析で蓄積したヒューマンスキルに関する知見を有効に活用して試作機の改良も進める予定である。

尚、本研究は、「北海道大学連携融合事業次世代型産業支援装置群の開発」で行った共同プロジェクトであることを付記する。また、本研究で使用した産業用多関節ロボットは競輪補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) Julian F. V. Vincent: Mechanical and Fracture Properties of Fruit and Vegetables, Spec Publ R Soc Chem, No.113, Page.191-203 (1993)
- 2) 我妻義也, 松浦賢志, 高津宣夫, 渡邊 眞: 魚フィレの応用を目的とした不定形立体の定量切断, 設計工学, vol.34, No.1, pp23-27, (1999)
- 3) 細川 寿, 深澤秀夫: 柔軟物の物性とそのハンドリングのための研究, 環境適応型自律作業知能視覚ロボットに関する基礎研究, pp135-144, (1996)
- 4) 林 知子・柳沢幸江: 動作解析法を用いての熟練度による「切る」操作の検討, 日本調理科学会誌, Vol.37 No.3 Page.299-305
- 5) 鎌田英博・櫻庭洋平・戸羽篤也・中村勝男・佐藤哲史・井原誠也・石村康生・和田充雄: 硬野菜カットロボットの開発(第1報) 第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会論文集
- 6) 佐藤哲史, 井原誠也, 石村康生, 和田充雄, 櫻庭洋平, 鎌田英博: 硬野菜カットロボットの開発(第2報), 第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会論文集
- 7) 和田充雄, 佐藤哲史, 石村康生, 鎌田英博, 櫻庭洋平: 硬野菜カットロボットの開発(第3報), 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会論文集
- 8) 鎌田英博, 櫻庭洋平, 戸羽篤也, 中村勝男, 和田充雄, 石村康生, 佐藤哲史: 硬野菜カットロボットの開発(第4報) 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会論文集