

# 遮蔽物の回避動作に注目したブドウ収穫作業の解析

石黒 慎<sup>1</sup> 川上 玲<sup>1</sup> 佐藤 啓宏<sup>1</sup> 池内 克史<sup>1</sup>

**概要：**農作物の収穫を効率化する収穫ロボットが注目されている。従来研究では、収穫対象に至る視覚が遮られる場合、果房・果柄を認識できないことや、十分な空間がない場合に切断機構を挿入できない課題があった。そこで本研究は、果房、果柄、主茎等の位置を確認し、遮蔽物を動かすことで障害を回避する双腕ロボットによる収穫タスクの記述を目的とした。人間のブドウ収穫作業および操作対象の果房に対する遮蔽物回避作業の解析を行った。その結果をもとに、収穫対象の見え方の違いに基づいて遮蔽物の回避動作を行うことが可能な収穫タスクを設計した。

## 1. はじめに

### 1.1 背景

農作業は一般的に作業時間が長く、かつ作業負荷が大きいため、作業者にとって負担となっている。また、我が国では、少子高齢化により労働人口が減少傾向にあり、作業の後継者が不足する問題が発生している。今後、農業を維持し発展させていくためにロボットによる農作業の効率化が必要になると考えられる。中でも収穫作業は労働時間の大きな割合を占めることが知られている。これまで、果菜類の収穫作業を行う収穫ロボットに関する研究が行われてきたが、農作物の生産現場における複雑な着果状態に十分対応することができず、普及には至っていない。

### 1.2 目的

従来の収穫ロボットには、収穫対象の前方に遮蔽物があった場合に、収穫対象に至る視覚が遮られ、果房・果柄の認識や操作ができない課題がある。一方、人間は視覚による認識と緻密な動作をともなう両手による操作によって遮蔽物を回避し、精度の高い収穫を行うことが可能である。そこで、人間の収穫作業を観察し、作業を習得させることができれば、遮蔽物がある場合にも、ロボットによる作物の収穫が可能になると考えた。

本研究では、ブドウ収穫作業の遮蔽物を回避する動作を獲得させることを目標とし、人間の収穫作業の解析から、遮蔽物を動かすことで障害を回避する作業の理解と的確な行動パターンの獲得を実現するためのタスクモデルを設計する。研究に用いる収穫対象としては酒造用に使われる垣

根式のブドウを選択した。

## 2. 関連研究

### 2.1 収穫ロボット

収穫ロボットによる収穫対象の認識手法としてこれまで様々なものが提案されてきた。Schertzら [1] は果実の機械的な収穫方法について基礎的な考察を行い、特定波長の反射特性の比較により果実と葉を識別する手法と吸引式エンドエフェクタを提案した。Parrishら [2] はカメラで果実を撮影し、画像中の果実の重心位置から果実が存在する可能性のある直線を算出し、その軌跡に沿って、接近センサが果実を検出する距離までマニピュレータの先端を移動させ、採果する line-of-sight という果実認識方法を提案した。Harrelら [3] はマニピュレータの先端にマシンビジョンを搭載するハンドアイカメラによる果実接近手法を提案した。近藤ら [4] は分光反射特性を考慮した果実認識のための視覚センサを研究し、キュウリなどの葉と似ている色の果実を検出する手法を提案した。林ら [5] はマシンビジョンにより取得した情報に基づきロボットの動作を逐次修正しながら制御する手法であるビジュアルフィードバック制御によるナス収穫ロボットを提案した。Rajendraら [6] はステレオ画像法により果実の大まかな位置を算出し、センターカメラで果柄の切断位置を検出するマシンビジョンを搭載したいちご収穫ロボットを提案した。

本研究の対象作物であるブドウは、果実形状にばらつきが大きく、果実が房状であるため、隣接果実との境界を区別することが難しく、また、ブドウ果房自体によっても果柄に対する遮蔽が発生するため、遮蔽物を回避する動作が多く必要である。

<sup>1</sup> 東京大学  
The University of Tokyo

## 2.2 タスクモデル

ロボットに人間の動作を獲得させる手法として、人間が行う作業動作をロボットに観察させ、どのような作業が行われたかを理解させることで、ロボットに動作プログラムを獲得させる観察学習の手法が研究されている。Ikeuchi[7]らによって、組立作業をロボットに指導するための、”Learning from Observation”(LFO)パラダイムが提唱された。LFOではタスクモデルと呼ばれるシンボリックな記述によってモデルを構成することで動作を保存する。まず予め、物体同士の接触状態など、動作を保存するために必要な情報を含んだモデルを作る。モデルは、複数の動作の実演から予め人間によって手動で抽出されるか、特定のルールに基づいた動作の認識系によって展開される事で定義される。ロボットは外界から情報を認識することで、どのタスクを実行するか、またどのようにタスクを実行するかを決定する。このアプローチでは、作業の領域を限定し、その作業領域に現れる全ての動作をモデル化する。特定の動作に限定されず、その作業領域に含まれる全ての動作に対して作成したモデルを適用することが可能となるのが、この理論を用いる利点である。

LFOによる動作の模倣は観察、認識、再現の3つの段階で構成される。観察ではいくつかのセンサによって、人間の作業の実演を記録する。認識では記録された作業の実演動作をタスクの列に変換することで、元となる全体のタスクを表す。再現ではタスクの列と実演から抽出されたスキルに基づいて、ロボットの作業を実行する。抽象化されたタスクは人間とロボット、双方の動作に対応し観察学習の橋渡しとして機能する。したがって、タスクをどのように定義するかが重要となる。ある作業領域を表現するタスクを作るためには、個々のタスクを明確な基準によって区別できなくてはならない。

本研究はブドウを対象とする。ブドウ収穫ではブドウとの接触を含む操作や見え方に基づいた作業方針の決定が行われる。本研究ではLFOによりトップダウンに動作の理解と獲得を行うアプローチを採用し、各物体間の相対位置関係に着目することで、作業モデルを設計する手法を提案する。ブドウ収穫作業のタスクを解析するため、農業従事者への取材をもとに動作の観測を行った。

## 3. 遮蔽の回避動作の解析

果房と果柄が遮蔽物によって遮られ視界から隠れる時、視覚認識システムではそれらの位置情報を獲得することが困難となる。ゆえに、必要な情報を遮られた状態から遮蔽を回避し、情報を視界内にとらえることができる状態に遷移させる動作が肝要である。

### 3.1 果房・果柄・主茎に着目したブドウの見え方

ブドウは果房・果柄・主茎で構成されており、これらに

着目することでブドウの見え方を分類することができる。ここで、果房・果柄・主茎の見え方を以下に定義し、図1に全場合を挙げる。

- 果柄と果房の接点が果房の前方にある場合を T, 果柄と果房の接点が果房の後方にある場合を U と定義。
- 果房が主径の前方を交差する場合を Fr-Front, 後方を交差する場合を Fr-Back, 果房と主茎が交差しない場合を Fr-Free と定義。
- 果柄と主茎の接点が主茎の前方にある場合を St-Front, 果柄と主茎の接点が主茎の後方にある場合を St-Back と定義。
- 果柄が果房・主茎と重なる場合を Stem-Inside, 果房・主茎と重ならない場合を Stem-Outside と定義。

果柄が果房・主茎と重なる Stem-Inside となる時、果柄に至る視界が遮られ、道具を接触させるための空間を得ることが出来ずに収穫することが困難となる。人間の収穫動作を解析すると、人間は Stem-Inside から収穫可能な Stem-Outside への見え方の遷移が行われる動作を行うことによって収穫を行うことが解析された。

Stem Outside	Fr-Free St-Front	Fr-Free St-Back	Fr-Front St-Front	Fr-Front St-Back	Fr-Back St-Front	Fr-Back St-Back
T						
U						

Stem Inside	Fr-Free St-Front	Fr-Free St-Back	Fr-Front St-Front	Fr-Front St-Back	Fr-Back St-Front	Fr-Back St-Back
T						
U						

図1 果房・果柄・主茎に着目した見え方

### 3.2 対象とする果房の移動操作による遮蔽回避動作の解析

果柄が果房・主茎と重なり、かつ果房と主茎は交差せず、果柄と果房の接点が果房の後方にあり、果柄と主茎の接点が主茎の前方にある場合 (Stem-Inside, Fr-Free, St-Front, U), 人間の動作を観察すると、多くの場合で、対象とする果房の下方を主軸から離れるように移動することで、果柄を視認できるように調整することがわかった。すなわち、Stem-Inside, Fr-Free, St-Front, U の状態では、Stem-Outside, Fr-Free, St-Front, U への遷移を実行することで遮蔽を解決できる。図3に実際に人間の手によって果房を移動している様子を示す。

一方、果柄が主茎をまわり込む場合、対象とする果房の下方を主茎から離す方向に移動するだけでは茎の前方に存



図 2 果房の移動による状態遷移の例

在する遮蔽物を解決できない場合がある。ブドウ果柄と主茎を回りこむ例として、果柄が主茎の前方を交差する場合 (Stem-Inside, Fr-Front) と、果柄が主茎の後方を交差する場合 (Stem-Inside, Fr-Back) が、ブドウの様子から観測された。図 3(a) に果柄が主茎の前方を交差する様子を、図 3(b) に果柄が主茎の後方を交差する様子をそれぞれ示す。



図 3 果房と主径の交差 (a: 果柄が主径の前方を交差する例, b: 果柄が主径の後方を交差する例)

果房が主茎の前方を交差する場合 (Stem-Inside, Fr-Front) は対象とする果房を前方から交差を解くように移動することで、果柄を視認できるように調整することがわかった。すなわち、Stem-Inside, Fr-Front では、Stem-Outside, Fr-Free への遷移を実行する移動を行うことで遮蔽を解決できる。図 4 に果房の移動による果柄と主径の交差の解決を示す。ここでは、果柄が主径の前方にある状態を+, 果柄が主径の後方にある状態を-と表現する。

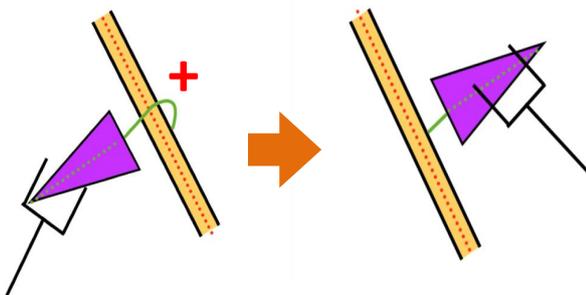


図 4 果柄が主径の前方を交差する場合

果房が主茎の後方を交差する場合 (Stem-Inside, Fr-Back) は対象とする果房を前方から交差を解くように移動することで、果柄を視認する。すなわち、Stem-Inside, Fr-Back では、Stem-Outside, Fr-Free への遷移を実行する移動を行

うことで遮蔽を解決できる。図 5 に果房の移動による果柄と主径の交差の解決を示す。

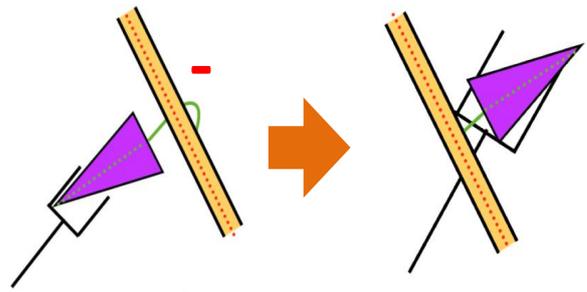


図 5 果柄が主径の後方を交差する場合

また、図 6 に示すように対象とする果房の果柄が接続される主茎とは異なる別の主茎が果房の前方を交差する場合がある。このような場合、果柄に生じている遮蔽がなくなるまで、果房の先端から順に交差を解く動作を繰り返すことによって、遮蔽を解決する。

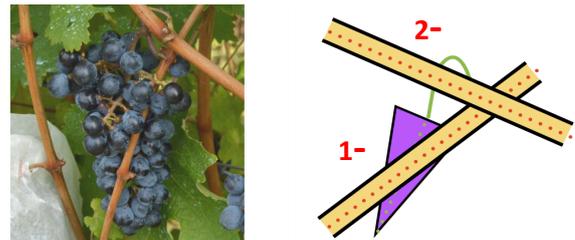


図 6 複数の交差が生じる場合

### 3.3 対象とする果房の移動操作では遮蔽が解決できない場合

人間は果柄が主茎の後方、または収穫対象の果房の後方にある場合に、果房を移動することによって果柄の視認を行う動作を行うが、果柄の長さが短く、かつ果房や主茎がちょうど果房の前方を通るように位置している場合に、上述した対象の果房の操作を行うことでは果柄を視認する事ができないことがある。このような場合には、果柄を視認できる位置に視点を変更する動作が見られた。図 7 に視点を変更することで果柄を視認する例を示す。図 7(a) は果房を移動操作することで、果柄を視認することに失敗している様子である。図 7(b) は視点を変更し、右方から観察することで、見え方が遷移され、果房・果柄の双方が視認できる状態となっている。

視点変更による見え方の遷移は、Stem-Inside, Fr-Free の場合は、主茎を回転軸として、果房のある方向に視点の移動を行うことで、Stem-Outside, Fr-Free に遷移することが確認できた。一方、Stem-Inside, Fr-Front の場合



図 7 視点変更による果柄の視認の例

では、主茎を回転軸として、果房のある方向に視点の移動を行うことで、Stem-Outside, Fr-Free に遷移し、果房を回転軸として果房を回りこむように視点移動を行うことで、Stem-Outside, Fr-Front への遷移が行われることが確認された。Stem-Inside, Fr-Back の場合では、主茎を回転軸として、果房のある方向に視点の移動を行うことで、Stem-Outside, Fr-Free に遷移し、果房を回転軸として果房を回りこむように視点移動を行うことで、Stem-Outside, Fr-Back への遷移が行われることが確認された。

## 4. 収穫動作の解析

### 4.1 ブドウ収穫タスクモデル

表 1 は人間の収穫作業から代表的な動作を抜き出し、現れる手の動作を解析したものである。観測された収穫作業における動作の手順は、

- (1) 左手をブドウに伸ばす。
- (2) 左手でブドウに接触する。
- (3) 左手でブドウを把持する。
- (4) 右手のハサミをブドウ茎に接触させる。
- (5) 右手のハサミでブドウ茎を切断する。
- (6) 左手のブドウから手を離す。

という順序で行われていた。これらの動作について、ブドウと手の接触点数、果柄と道具との接触点数、ブドウの拘束状態に着目することで、それぞれの状態を明確に分けられると考えた。

これらの動作はブドウと手の接触点数、果柄と道具との接触点数、ブドウの拘束状態に着目すると、それぞれの状態を明確に分けられる。ここで分けた作業の状態に基づいてタスクの定義を行う。表 2 に定義したタスクを示す。

CONTACT はブドウへの接触を試みる動作に対応する。手とブドウとの接触が発生した段階で CONTACT へ遷移する。HOLD はブドウを把持する動作に対応する。把持されたブドウは拘束され、ブドウの位置の移動や姿勢の変更が可能となる。また、果柄を切断しても落とさないように左手で安定した状態で保持することを目的とする。柔軟物体であるブドウを安定して把持する方法として、力に着目した拘束状態である Force Closure[8] を HOLD への遷移と定義した。PUSH はブドウを押し移動する動作に対

表 1 果房・果柄を共に視認できる場合のブドウ収穫作業の解析

図	概要	左手動作	右手動作
	左手を果房に伸ばす	0 点接触	0 点接触
	左手で果房に接触する	1 点接触	0 点接触
	左手で果房を把持する	Force closure	0 点接触
	右手の道具を果柄に接触させる	Force closure	2 点接触
	右手の道具で果柄を切断する	Force closure	0 点接触
	左手を果房から離す	0 点接触	0 点接触

表 2 ブドウ収穫タスクの記述

タスク	動作の概要
CONTACT	対象物と接触する
HOLD	把持する
PUSH	押して対象物を移動する
MOVE	把持したまま対象物を移動する
RELEASE	接触していた対象物から離れる
TOOL CONTACT	ハサミで対象物を挟む
CUT	対象物を切る

応する。CONTACT した接触点の垂直方向に力を加える事によってブドウを移動することを可能とする。ブドウは拘束されていないので接触点の垂直方向以外への移動では接触が外れる。MOVE は HOLD 状態のブドウを移動する動作に対応する。ブドウが拘束されているので、ブドウの可動範囲内では把持した手の移動にブドウが追従する。TOOL CONTACT は道具によって果柄に接触する動作に対応する。ここでは茎を切断する準備が整った状態に移行することが目的である。ハサミを使う場合、果柄と各刃に対して 1 点ずつ合計 2 点の接触が生じた時点で TOOL CONTACT へ遷移する。CUT は道具によって果柄を切断する動作に対応する。道具が接触した接点に対して力を加える事によって、果柄が完全に切断され道具との接触が無くなった時点を CUT への遷移と定義する。ハサミを使う場合、果柄に接触した 2 点の接点に最も力が加わる操作を実行する。RELEASE はブドウから手や道具を離す動作に対応する。ブドウと手や道具の間にいずれの接触も生じていない状態となった時点で RELEASE に遷移する。

連続するタスクには順序関係が存在する。CONTACT はブドウとの接触点がない状態から接触する動作に対応する。HOLD は CONTACT が発生した状態から、ブドウを拘束する動作に対応する。PUSH は CONTACT が発生した点に対し、押し動作を行うことに対応する。MOVE

は HOLD で拘束されたブドウを移動する動作に対応する。TOOL CONTACT は果柄と道具との接触点が無い状態から、2つの刃の内側にそれぞれ1点ずつ接触させる動作に対応する。CUT は TOOL CONTACT で発生した接点に対して、力をかけ切断する動作に対応する。タスクの順序関係に基づいたタスクの有向グラフを図8に示す。

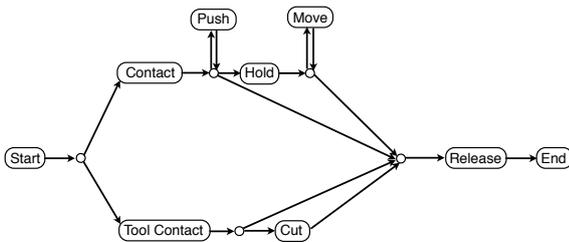


図8 有向グラフによるタスクモデルの記述

## 5. おわりに

本研究では、人間の収穫作業からブドウ収穫作業の遮蔽物を回避し、収穫を実行する動作の解析を行った。ブドウは果房・果柄・主茎に着目した見え方を示し、遮蔽の回避動作では収穫対象とする果房を把持し、移動することで遮蔽が発生する見え方について遮蔽を回避する遷移を発生させる事ができることが分かった。また、解析結果に基づいて、遮蔽物の回避動作について双腕ロボットが実現できるブドウ収穫タスクモデルの設計を行い、これに基づいて収穫を実行させる手法を提案した。今後は、提案したブドウ収穫タスクモデルを用いて双腕ロボットに収穫動作の模倣を目指す。

謝辞 本研究は、科研 24240034 プログラム可能な紐結びシステムに関する研究の補助を受けている。

## 参考文献

- [1] C.E. Shertz and G.K. Brown: Basic considerations in mechanizing citrus harvest, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (1968).
- [2] E.A. Parrish and A.K. Goksel: Pictorial pattern recognition applied to fruit harvesting, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (1977).
- [3] R.C. Harrel, D.C. Slaughter, P.D. Adsit: Vision guidance of a robotic tree fruit harvester, Proceedings of the International Society for Optical Engineering (1985).
- [4] 近藤直, 川村登: マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法, 農業機械学会誌 (1985).
- [5] 林茂彦: ナスのロボット収穫システムの開発に関する研究, 野菜・茶業試験場研究報告 (2001).
- [6] P. Rajendra, N. Kondo, K. Ninomiya, J. Kamata, M.

- [7] K. Ikeuchi, T. Suehiro: Towards an Assembly Plan from Observation, Part I: Assembly task recognition using face-contact relations (polyhedral objects), IEEE International Conference on Robotics and Automation (1992).
- [8] V.D. Nguyen: Constructing Force-Closure Grasps, International Journal of Robotics Research (1988).