

# ブドウ収穫ロボットのための遠隔操縦支援システムの開発

○吉川 成輝, 川口 達也, 佐藤 啓宏, 大石 岳史, 池内 克史 (東京大学)

## Development of the teleoperation assistance-system for grape harvesting robots

○Naruki Yoshikawa, Tatsuya Kawaguchi,  
Yoshihiro Sato, Takeshi Oishi, Katsushi Ikeuchi(The University of Tokyo)

**Abstract**—This manuscript describes the system to support the teleoperation of humanoid robot for harvesting grapes. The system provides semi-auto movement by introducing task models and interfaces to help understanding the situation. Robots must sweep leaves to grasp the fruit. This leaf-sweeping can be regarded as flexible object operation to create space. Experiments are conducted to verify the system.

### 1. はじめに

ロボットによる柔軟物操作の重要性が注目されている。産業用ロボットの分野においては、ワイヤハーネスや布製品などの柔軟物を取り扱うことが難しく、依然として人手による作業を多く必要とすることが課題になっている。日常生活支援ロボットにおいては、衣服・紙・紐などの様々な柔軟物を取り扱えることが望ましい。一般的にロボットによる物体操作は、操作対象の物理モデルを構築し、綿密な動作計画を立ててから行う必要がある、柔軟物のモデル構築の難しさに本質的な問題がある。

しかし、人間は無意識に柔軟物操作を行うことがある。例えば、のれんをくぐる際にのれんを押す動作や、山野で道に生えた草をかきわけて進む動作が挙げられる。これらの動作は、操作対象の柔軟物を明確に意識せずに行われる。とくに空間を確保する場合に多く見られるこのような柔軟物操作では、厳密な動作計画を立てる必要がないため、従来とは異なるアプローチをとることができる。

空間確保のための柔軟物操作は、農作業においても見ることができる。木に生えた農作物を収穫する際に、腕や手の甲を使って邪魔な葉や枝を押し払う動作が、その一例である。ブドウのような高価な農作物は、実の損傷が商品価値を大きく損なうため丁寧に扱う必要があり、十分な作業空間が確保されてから収穫作業が行われる。

本研究では、開発中の遠隔操縦ブドウ収穫ロボット 3) を用いて、物理モデルを構築しない柔軟物操作について検討する。遠隔地にいる人間のジェスチャ動作によってロボットへの動作指令を生成し、その動作指令とタスクモデルに基づいてヒューマノイドロボットを操縦し、果実を収穫するというテーマに取り組む。人間からの指示は、収穫に適した熟した果実を選択するといった高度な知能判断を必要とする事柄のみに集中させて、人間が無意識下に行う空間確保のための柔軟物操作は、人間の指示を仰ぐことな

く画像処理によってロボット側で判断し、必要に応じて葉を払う動作を自動生成することで容易に操縦できるインターフェースにしたい。そこで本研究の目的は、ブドウを収穫するロボットの遠隔操縦を支援するシステムの開発とする。このシステムは、

1. 半自動的にロボットが動作するタスクモデルの仕組み
2. 人間が必要な情報を判断しやすくするための、ロボットから人間への目標選択インターフェース
3. ロボットが細かい作業を暗黙のうちに自動判断する、人間からロボットへの動作指令インターフェース

で構成される。

### 2. 関連研究

ブドウ収穫機械は一部で既に実用化されている。Pezziら 1) は、ブドウの実の固有振動数を調べることで、大量のブドウを勢よく叩き落として収穫するブルドーザのような収穫機の実用化に貢献した。しかし、一本一本の木の構造を考慮せず、振動を用いて収穫するため葉が落ちてブドウの木が損傷するという問題点があった。Berensteinら 2) は、ブドウの木の構造に着目して、画像処理によって果房を検出することで、ロボットが効率よく農薬散布ができるようにした。また石黒ら 3) は、実と茎の位置関係を考慮して、遮蔽物を回避してブドウ収穫を行う作業を考察している。農作物の価値を高めるために、人間が扱うのと同じように、機械が柔軟物である農作物を丁寧に扱えるようにすることが求められている。

本研究では、人間の動作を元にロボットを遠隔操縦することによって知能と機能を分離し、高度な知能判断を必要とする丁寧な農作業を行うことを目指す。木の構造理解や大筋の行動戦略などの高度な知能判断は人間が行い、局所的に必要なとされる柔軟物操作を含む実際の作業はロボットが行う。

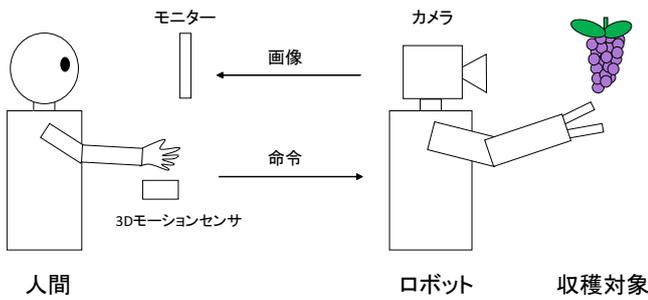


Fig. 1 システムの構成

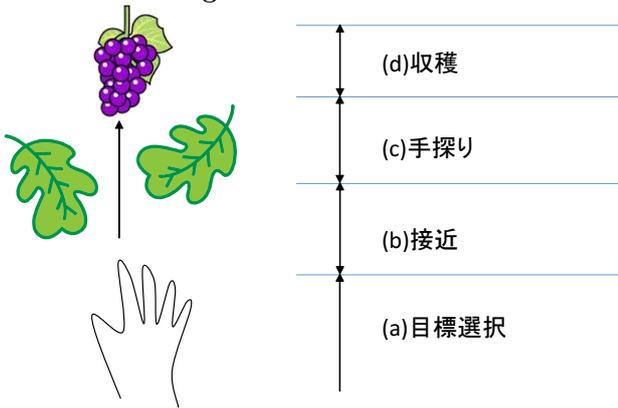


Fig. 2 距離に基づくタスクモデルの切り替え (俯瞰)

### 3. タスクモデルに基づく遠隔操縦支援システム

人間とロボットを一人称視点でつないで自然な操作感を提供することを目指して、遠隔操縦システムの開発を進めている。Fig.1 にシステムの概要を示す。システムは、ロボットと、ロボットを操縦する人間および、収穫対象のおかれた環境からなる。ロボットの頭部にカメラが搭載されており、ネットワーク通信によって、画像が人間側のモニターに送信され表示される。人間は画像を見ながら状況を判断し、あたかもロボットの立場になったつもりで、実際に腕を伸ばしてブドウをつかむ仕草を行う。3D モーションセンサで動作を読み取り、動作意図を解析してロボットの動作計画を生成し、ネットワーク通信を介してロボットへ指令を送る。ロボットは、動作指令を元にアームとハンドを駆動し収穫対象をつかむ。その際、人間の指示だけでは不足する情報をロボット側で自律的に補完する点に、システムの工夫がある。

#### 3.1 タスクモデルの設計

ロボットの動作は、タスクモデルに基づき計画する。タスクモデルとは、動作意図を表すタスクと、その実行のために必要なパラメータセットであるスキルを、一組にして動作を記述するものである 4)。

人間の収穫作業を観察すると、手と収穫対象の距離に応じて動作意図を切り替えているように見える。これに倣い、Fig.2 に示すような、距離に基づくタスクモデルの切り替えの仕組みを設計し、4 種類のタスクモデルを設定した。収穫作業を (a) 目標選択, (b) 接近, (c) 手探り, (d) 収穫

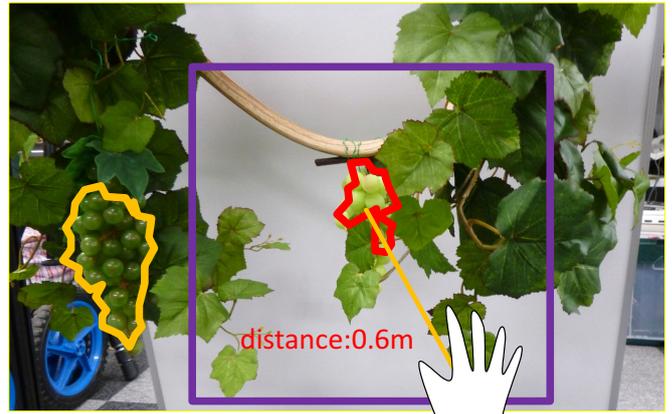


Fig. 3 目標選択インターフェース

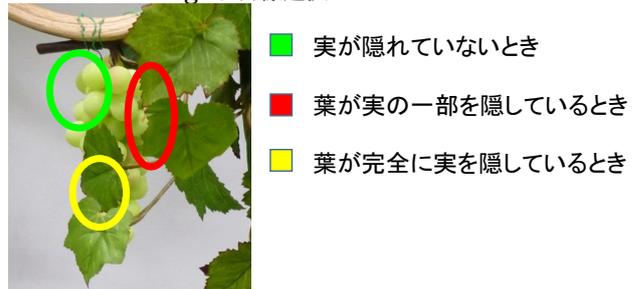


Fig. 4 動作指令インターフェース

の4段階に分けて、それぞれの段階で人間に適切な情報を提示し、ロボットが事前に組み込んだ動作を行うことで半自動的な操作を行うことができる。各段階でシステムが行う動作は次の通りである。

- (a) 目標選択 カメラ画像に重畳して収穫対象を強調表示する。収穫対象を人間に選択させる。
- (b) 接近 選択された収穫対象までの距離を表示する。人間の手の動きに応じて、近くまでアームを伸ばす。
- (c) 手探り 収穫対象の周囲を判断し掴み方を決定する。ロボットは、必要に応じて葉を払い作業空間を確保する。
- (d) 収穫 ロボットは選択された収穫対象をつかむ。

#### 3.2 目標選択インターフェース

(a) 目標選択と (b) 接近では、人間の指示を容易にするために、必要な情報を視認しやすいように強調表示する。

Fig.3 に、情報提示インターフェースのイメージを示す。画面は、カメラ画像と追加情報からなる。収穫対象の周囲の枠はブドウの位置を強調しており、候補を目視しやすくしている。収穫対象が選択されると接近画面に移行し、目標の周囲のみが四角い枠のようにトリミングされ、実と手の距離などの接近に有用な情報が提示される。

#### 3.3 動作指令インターフェース

(c) 手探りと (d) 収穫の段階では、人間の細かい指示が無くともロボットが半ば自律的に動くように、必要な情報

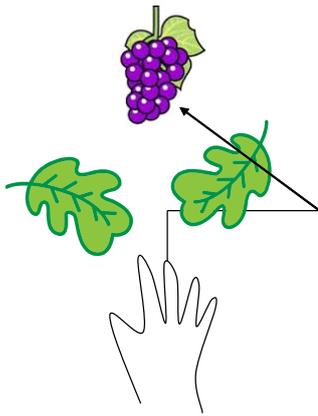


Fig. 5 払い動作の生成 (俯瞰)

を暗に取得して最適な動作をシステムが選択する。収穫対象の周囲の見掛けの状況と、腕を伸ばそうとしている先の位置と方向から、掴み方のパターンを選択して実行する。

Fig.4に動作指令インターフェースのイメージを示す。実が隠れていないときは、ロボットはそのまま収穫対象をつかむ。葉が実の一部を隠しているときは、ロボットは手前の葉を払い、空間を確保してから収穫対象をつかむ。葉が完全に実を隠しているときは、ロボットはアームを伸ばさない。

### 3.3.1 空間確保のための払い動作

葉の払い動作は「葉を右にずらした後に実の位置に手を動かす」などの事前に設定したパターンに則って行われる。Fig.5に、空間確保のための柔軟物操作である払い動作の軌跡を示す。ハンドを差し込んで、葉などの異物を巻き込まずに収穫対象だけをつかむことができる空間を確保できればよいので、必要な空間の大きさは、収穫対象の大きさよりもハンドの大きさに依存すると考えられる。したがって、対象物によらずハンドの大きさから決定した一定値としても適当であると想定した。

## 4. 遠隔操縦によるブドウ収穫実験

遠隔操縦ロボットと提案した支援システムを用いて、葉の陰に隠れたブドウをつかむ実験を行う。必要な空間を確保し、うまくブドウをつかむことができるかを検証する。

### 4.1 ハードウェアシステム

実験には、屋内に設置したブドウ棚の模型と、川田工業のHIRONXを用いた(Fig.6)。ロボットのアームは6自由度であり、エンドエフェクタとして3自由度の指が3本あるハンドを取り付けた。ロボットの頭部には、Kinectとステレオカメラを搭載している。ここではKinectは使用せず、ステレオカメラのみを用いた。PointGrey社のGiGE CMOSカメラBlackflyBFLY-PGE-13E4C-CSを2台使用してステレオを構成している。

人間の動作を取得する3Dモーションセンサには、LeapMotionを用いた。



Fig. 6 ハードウェアと実験環境

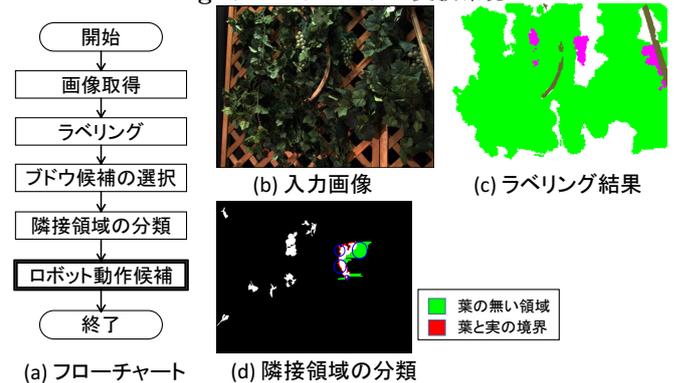


Fig. 7 画像処理の流れ

### 4.2 ソフトウェアシステム

ロボットのハードウェア基本制御を行うソフトウェアとして、hiro\_handle 6)を用いた。画面表示やセンサーの制御および、ロボットのGUIコントローラは、cvl-robot 7)で開発されているものをベースにした。

### 4.3 画像処理

目標選択インターフェースと動作指令インターフェースの基幹となる画像処理について説明する。この処理はロボット側システムでバックグラウンド処理され、ユーザは意識する必要が無い。

Fig.7(a)に画像処理の流れを示す。ステレオカメラからの入力RGBD画像(Fig.7(b))に対して、川口ら5)の手法を用いて房・枝・葉のクラス分類を行う(Fig.7(c))。ラベリングで果房と判定された領域のうち、一定面積より大きいものをブドウ候補とし座標を得る。取得した座標を元に、RGBD画像にラベリング面積に応じた大きさの球を重ねて画面に表示し(Fig.8)、LeapMotionで取得した手の位置データを用いて、収穫するブドウ候補を操作者に選択させる。選択されたブドウ果房の隣接領域を、葉の無い領域と葉がある部分に分類し(Fig.7(d))、その結果を利用して払いの必要性を判断する。一連の画像処理を行った後、ロボットの動作候補が選択され、収穫作業が行われる。



Fig. 8 ブドウ候補選択画面

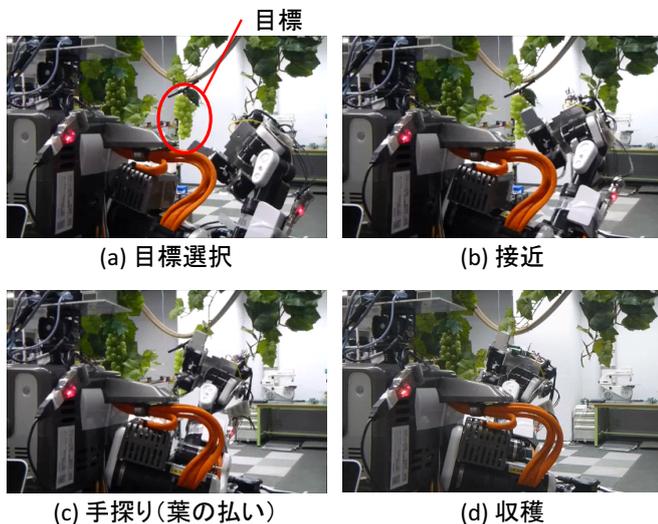


Fig. 9 各タスクモデルごとの状態

#### 4.4 実験結果

ロボットからは葉に隠れて右半分が見えない画面中央に位置するブドウを遠隔操縦でつかむ実験を行った。3次元表示された画像を見ながら中央のブドウの右側を狙ってつかむ動作をすると、ロボットが反応し、葉を払いブドウをつかむことが出来た。5回試行し5回つかんだ。Fig. 9に、実験結果の各タスクモデルごとの状態を示す。(a)で操作者からの指示を受け取って目標を選択した。(b)では選択された目標の位置に向けて手を動かした。(c)では実の近くにある葉を事前に指定した動作に従って払った。(d)では実をつかんで持ち帰る動作を行った。

#### 4.5 考察

実験の結果、空間確保の後、ブドウをつかんで収穫することができたが、手の動きは人間の動きと全く異なり不自

然なものであった。また、画像処理の誤検出がしばしば見られた。

人間は意識しない動作においても、手首のスナップを利かせて、操作対象に合わせて上手く払い動作を生成している。これは物体の柔らかさや重さなどに応じて適度に速度や強さを変えているものと考えられ、人間は何かしらの物理モデルを経験的に持っているのではないかと推察される。

### 5. まとめ

本研究では、葉の払いを行ってブドウを収穫するロボットの操縦を支援するシステムの開発を行った。手と収穫対象の距離に応じてタスクモデルを切り替える仕組みを提案し、システムがバックグラウンドで実行する画像処理を基盤とした目標選択インターフェースと、動作指令インターフェースによって、人間とロボットの動作指令のやり取りを円滑に行えるようにした。

しかし葉の払い動作を一定パターンとしたため自然な動作になっておらず、操作対象の柔軟物が違う物に変わった場合上手くいかない恐れがある。人間の払い動作の実例を観察し、ロボットの自然な動作の生成に反映したい。また、画像処理の誤差によりロボットの動作が失敗する事例も見られたため、精度の向上が必要である。手の位置を認識して、デプス画像から取得したブドウ座標に誤差があった場合にフィードバックする機構を導入することでより頑強なシステムになると予想される。今後は、タスクモデルを基盤としたヒューマノイドロボットの遠隔操縦システムを用いて、動的な操作対象を取扱えるようにしたいと考えている。

#### 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支援を得た。

#### 参考文献

- [1] F. Pezzi and C. Caprara, "Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations," *Biosystems engineering*, 103, pp.147–151, 2009.
- [2] R. Berenstein, O. B. Shahar, A. Shapiro and Y. Edan "Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer," *Intelligent Service Robotics* 3, pp.233–243, 2010.
- [3] 石黒, 川上, 佐藤, 池内, "遮蔽物の回避動作に注目したブドウ収穫作業の解析", *情報処理学会研究報告. CVIM*, 17, 1-5, 2014.
- [4] K. Ikeuchi, T. Suehiro, "Toward an Assembly Plan from Observation Part I: Task Recognition With Polyhedral Objects," *Trans. on Robotics and Automation*, Vol.10, No.3, 1994.
- [5] 川口, 川上, 池内, "RGBD 画像を用いたブドウの房・枝・葉の認識", *MIRU2014, SSI-59*, 2014.
- [6] [http://www.taka.is.uec.ac.jp/~suehiro/cgi-bin/moin\\_main.cgi/hiro\\_handle](http://www.taka.is.uec.ac.jp/~suehiro/cgi-bin/moin_main.cgi/hiro_handle)
- [7] <http://cvl-robot.hateblo.jp/>