

卒 業 論 文

収穫ロボット用エンドエフェクタの開発 - 設計指標に関する検討 -

Development of an end effector for a harvesting robot
- Consideration of design indicators -

2024 年 12 月 29 日 提出

指導教員 林原 靖男 教授

千葉工業大学 先進工学部 未来ロボティクス学科

21C1010 池田晃輝

概要

タイトル

キーワード:

abstract

title

keywords:

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	5
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	要素技術	6
2.1	3D スキャナ	6
2.2	Blender	7
第 3 章	設計指標の構築	8
3.1	設計に資する収穫物の特性	8
3.2	エンドエフェクタの形状	9
3.3	設計指標	9
3.4	成功率の算出	10
第 4 章	植物特性の計測	11
4.1	実験目的	11
4.2	実験装置	11
4.3	実験方法	12
4.4	実験結果	12
第 5 章	実験	13
5.1	実験目的	13

目次	vi
5.2 実験装置	13
5.3 実験方法	14
5.4 実験結果	14
第 6 章 結論	15
6.1 まとめ	15
6.2 今後の展望	15
参考文献	16
付録	17
謝辞	18

目次

1.1	Fin Ray end effector (left) and Lip-type end effector (right)	2
1.2	vibrating knife end effector	2
1.3	End effector that directly approaches the peduncle	3
1.4	Example green pepper plant	4
2.1	Artec Leo	6
2.2	Example Blender	7

表目次

第 1 章

序論

1.1 背景

農林水産省 [1] によると, 日本の農業従事者数は, 2000 年から 2023 年にかけて約 50 %減少している. また, 2023 年の農業従事者のうち約 7 割が 65 歳以上の高齢者となっている. そのため, 日本の農業分野では人手不足と高齢化による農作業の負担増大が深刻な問題となってきた. これらの問題を解決するために作物を自動で収穫することができるロボットの開発が望まれる. 収穫ロボットに求められる技術のうちの 1 つに収穫用のエンドエフェクタが挙げられる.

現在, 収穫用エンドエフェクタに関する研究は多く, 既に様々なエンドエフェクタが提案されている. 例えば, Bac らはピーマン収穫ロボットを開発し, 2 種類のエンドエフェクタを提案している [2]. 1 つがフィンレイエンドエフェクタであり, グリッパで果実を把持して, ハサミで花柄を切断するものである. グリッパにはフィンレイ効果が利用されていて, 果実を包み込むように把持することができる. もう 1 つがリップ型エンドエフェクタであり, 吸着パッドで果実を把持して, 唇のような形の刃で花柄を切断し収穫する.

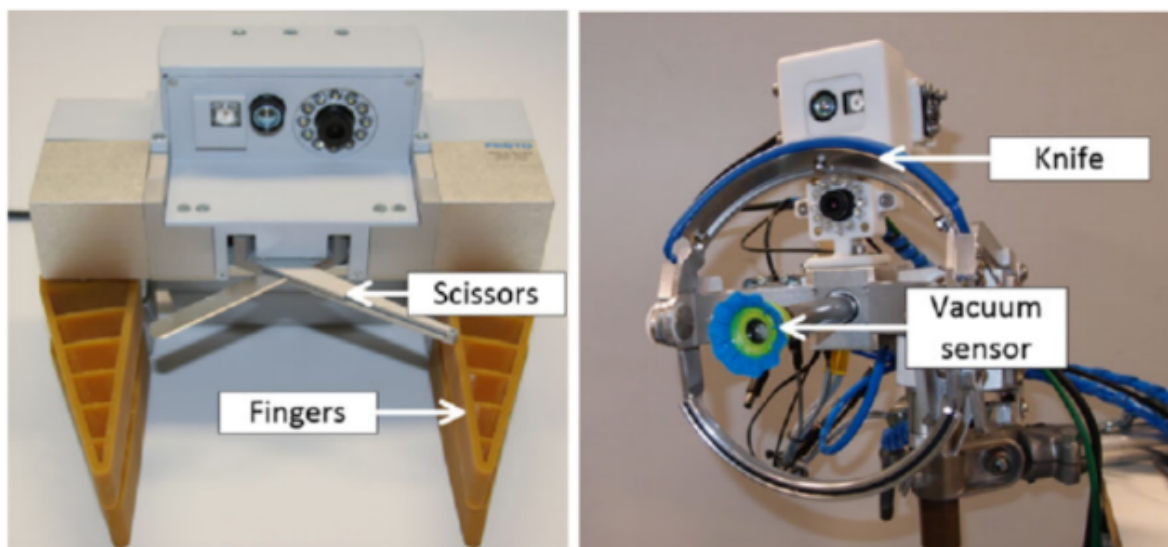


Fig. 1.1 Fin Ray end effector (left) and Lip-type end effector (right)

また, Arad らは「SWEEPER」と呼ばれるピーマン収穫ロボットを開発し, 振動ナイフを用いて収穫するエンドエフェクタを提案している [3]. こちらは刃を振動させて花柄を切断し, エンドエフェクタの下部についた指のようなもので果実をキャッチしている. このエンドエフェクタは果実を把持しないため, 把持によってピーマンに傷がつくことはない.



Fig. 1.2 vibrating knife end effector

論文で提案されているもの以外にも、市販されている収穫ロボットに独自のエンドエフェクタが取り付けられているものもある。AGRIST が開発した「L」という収穫ロボットに搭載されているエンドエフェクタは、花柄に直接アプローチしてピーマンを収穫する [4]。花柄を切断後、そのまま花柄を把持して収穫するので、果実を傷つける心配がなく、花柄さえ見れていれば収穫することができる。



Fig. 1.3 End effector that directly approaches the peduncle

しかし、それらのエンドエフェクタの設計指針については明確に示されていない。そのため、収穫する作物に対して優れた形状がわからないことや、具体的な改善点が見つけにくいことが問題となる。

Fig. ? のような場合において、赤で示されたピーマンは花柄が露出しているが果実は葉で隠れてしまっているのに対し、オレンジで示されたピーマンは花柄が葉で隠れているが果実は露出している。赤で示されたピーマンは花柄にアプローチしやすく、AGRIST の「L」に搭載され

ている花柄に直接アプローチするタイプのエンドエフェクタが適していると考えられる。一方でオレンジで示されたピーマンは果実にアプローチしたほうがよく、果実を掴んで引っ張るなどの方法で収穫するエンドエフェクタが良いのではないかと予想できる。このことから、収穫物のいくつかの特性を定量化することで収穫物に適したエンドエフェクタの形を考える。



Fig. 1.4 Example green pepper plant

1.2 目的

本研究では, 3D スキャナを用いて収穫物の 3D モデル化を行い, 3DCG ソフトウェアである Blender を利用して設計に資する特性を定量化し, エンドエフェクタの設計指標を構築する. また, 既に提案されているエンドエフェクタを参考に簡易的なエンドエフェクタのモデルを作成し, 実際に実環境でエンドエフェクタを収穫物にアプローチさせることで, 構築した設計指標の有効性を検証する.

1.3 本論文の構成

本論文の構成を述べる. 第 1 章では本研究の背景と目的について述べた. 第 2 章では設計指標の構築に必要な収穫物の特性について述べる. 第 3 章では本研究の設計指標の構築方法について述べる. 第 4 章では収穫物の特性を測定した方法について述べる. 第 5 章では構築した設計指標の有効性を検証するための実環境で行った実験について述べる. 第 6 章では本論文の総括を述べる.

第 2 章

要素技術

2.1 3D スキャナ

3D スキャナは物体の形状を取得し、3D データへと変換する装置である。この装置は接触式と非接触式が存在し、測定する物体に応じて使い分ける。Fig.2のような非接触式 3D スキャナのハンディタイプはレーザや光を使って物体の表面をスキャンし、そのデータを 3 次元点群に変換する。このようなハンディタイプは、測定する環境が狭い場合や、測定したい物体が複雑な構造を持つ場合でも小回りがきくため、細かい部分まで計測できるという利点がある。3D スキャナは、品質検査やリバースエンジニアリング、文化財等をデジタルアーカイブとして保存することなど、幅広い分野で活用されており、物体を 3D データ化することができる。



Fig. 2.1 Artec Leo

2.2 Blender

Blender は、3D コンピュータグラフィックスやアニメーションを制作することができるオープンソースの 3DCG ソフトウェアである。モデリング機能やテクスチャ機能など、豊富な機能が備わっている。また、Blender 内に独立した Python 環境が搭載されており、Python 言語を使用して独自のスクリプトを作成することが可能となっている。Blender は商用のアニメーション映画にも利用されているほか、建築の透視図や CAD にも活用されている。

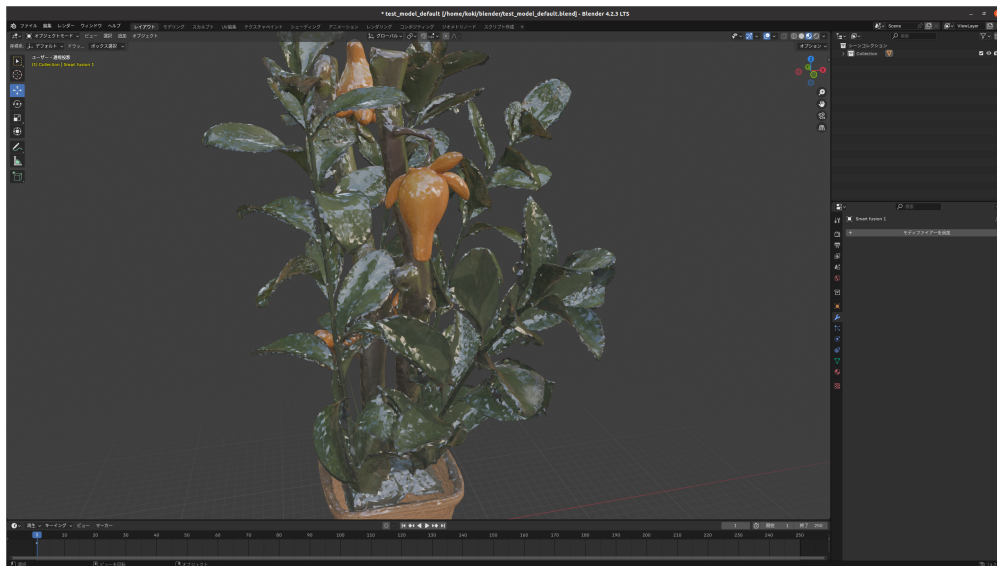


Fig. 2.2 Example Blender

第 3 章

設計指標の構築

収穫物は多種多様であり、一般論で議論することは難しいため、以後の議論はピーマンを対象に行う。また、エンドエフェクタのアプローチの方法は様々であり、今回は単純化するために正面からのアプローチに限定する。

3.1 設計に資する収穫物の特性

収穫物のどの部分に接近しやすいかで好ましいエンドエフェクタの形状が決まるため、個体の特性よりも株の特性から議論する。アプローチの容易さを推測する特性としては以下が考えられる。

- 花柄露出面積 S_p : 露出している花柄の投影面積
- 花柄側面障害物間距離 d_p : 花柄の横方向にある障害物の最小距離
- 果実露出面積 S_f : 露出している果実の投影面積
- 果実側面障害物間距離 $d_{f\text{side}}$: 果実の横方向にある障害物の最小距離
- 果実上面障害物間距離 $d_{f\text{above}}$: 果実の上方向にある障害物の最小距離
- 果実下面障害物間距離 $d_{f\text{under}}$: 果実の下方向にある障害物の最小距離

3.2 エンドエフェクタの形状

3.1 節を踏まえて、アプローチの容易さを推測するために必要なエンドエフェクタの形状は以下が考えられる.

- 花柄アプローチ幅 l_p : 花柄にアプローチする部分の幅
- 花柄アプローチ高さ h_p : 花柄に触れる部分の高さ
- 花柄アプローチ面積 $S_{papproach}$: 把持または切断時に予想されるアプローチ部分の面積, $h_p \times$ (花柄の幅の平均) で算出する
- 果実アプローチ幅 l_f : 果実にアプローチする部分の幅, 幅の方向はエンドエフェクタによって異なる
- 果実アプローチ高さ h_f : 果実に触れる部分の高さ
- 果実アプローチ面積 $S_{fapproach}$: 把持時に予想されるアプローチ部分の面積, $h_f \times$ (果実の幅の平均) で算出する

3.3 設計指標

収穫物の特性とエンドエフェクタの形状から設計指標を構築する. 設計指標は以下のように設定した.

- 花柄側面障害物間距離が許容範囲内か: $d_p > l_p$
- 花柄アプローチ面積より花柄が露出しているか: $S_p > S_{papproach}$
- 果実側面障害物間距離が許容範囲内か: $d_{fside} > l_f$
- 果実上面障害物間距離が許容範囲内か: $d_{fabove} > l_f$
- 果実下面障害物間距離が許容範囲内か: $d_{funder} > l_f$
- 果実アプローチ面積より果実が露出しているか: $S_f > S_{fapproach}$

3.4 成功率の算出

各エンドエフェクタはそれぞれピーマンにアプローチする部分が異なるため、必要に応じて指標を取り入れることになる。例えば、AGRIST の L に搭載されているエンドエフェクタの場合は、果実にアプローチを行わないため、花柄に関わる指標しか取り入れないこととなる。取り入れた指標をすべて満たすものを成功とし、それ以外は失敗とする。成功率 p_h は以下のように表す。

成功率 p_h = 指標をすべて満たすもの / 計測した収穫物の数

AGRIST の L に搭載されているエンドエフェクタの場合、成功率に関わる設計指標は、花柄側面障害物間距離が許容範囲内かというのと花柄アプローチ面積よりも花柄が露出しているかの2つである。よって成功率は以下ようになる。

$$p_h = p(d_p > l_p \cap S_p > S_{p\text{approach}})$$

第 4 章

植物特性の計測

4.1 実験目的

構築した設計指標をもとに成功率を算出するため、収穫物を計測し、必要な特性のデータを取得する。実環境のピーマンを手作業で計測していくのは困難なため、ピーマン株の 3D スキャンを行い、3D モデル化したピーマンを Blender 内で計測する。詳しくは次章で説明するが、スキャンしたピーマンに対して実際にエンドエフェクタのモデルをアプローチさせるため、人が視認できるピーマン 30 個にシールを貼り、ID 付けを行った。

4.2 実験装置

以下に実験に使用した装置およびスキャンした収穫物を示す。3D スキャナは非接触式でハンディタイプの Artec Leo を使用した。スキャンした収穫物は、Fig. ? に示すようなハウス内で栽培されているピーマン株である。

- 非接触式 3D スキャナ
- ID 付け用シール
- Blender

4.3 実験方法

収穫物の特性を計測する手順は以下のとおりである。計測する特性は 3.1 節で提案した特性と、アプローチ面積を求めるために花柄と果実の幅をそれぞれ計測する。計測対象は 30 個のピーマンだが、奥の方にあるピーマンはスキャンできていないことや 3D モデルが欠損している場合は計測が困難なため、計測結果からは除外する。

1. 左から順に人が視認できるピーマン 30 個に ID 付け用のシールを貼る
2. シールを貼ったピーマンがあるピーマン株に対して、Artec Leo を用いて 3D スキャンを行う
3. 計測して得たピーマン株の 3D モデルを Blender 内に取り込み、特性を計測する

4.4 実験結果

ピーマンの 3D モデルの計測結果は以下の通りである。3D モデルの欠損が激しいものやモデル化できていないものを除外し、12 個のピーマンの特性を計測した。

第 5 章

実験

5.1 実験目的

構築した設計指標の有効性を検証するため、従来の提案されているエンドエフェクタを参考に簡易的なモデルを 3 つ作成し、前章で 3D スキャンした 30 個のピーマンに対してそれぞれアプローチさせて、その成功率を求める。そして、設計指標から算出した成功率と実環境での成功率を比較する。簡易モデルを作成する際に参考にするエンドエフェクタは、ピーマンまたはパプリカを収穫するエンドエフェクタであり、その中で引用件数が比較的多いものや、市販されているものである。

5.2 実験装置

実験装置を以下に示す。アプローチするピーマンは前章でスキャンしたピーマンである。

- エンドエフェクタの簡易モデル
 - － フィンレイグリッパ型
 - － 振動ナイフ型
 - － 花柄アプローチ型
- 1 自由度でアプローチさせる装置

5.3 実験方法

実験手順を以下に示す.

1. ピーマンの正面にエンドエフェクタが位置するように実験装置を配置する
2. 実験装置をスライドさせ, ピーマン株に対して垂直方向にエンドエフェクタをアプローチさせる.
3. アプローチの可否を判断
成功条件 ピーマンがエンドエフェクタの収穫範囲内に入る
失敗条件 収穫対象の果実と花柄以外のものに接触する, または収穫範囲内に収穫対象以外のものが含まれている
4. 各エンドエフェクタモデルで手順 1~3 を 30 個のピーマンに対して行う
5. 実環境での成功率と設計指標から求めた成功率を比較する

5.4 実験結果

実験結果を以下に示す.

第 6 章

結論

6.1 まとめ

6.2 今後の展望

参考文献

- [1] 農林水産省. 力強く持続可能な農業構造の実現に向けた担い手の育成・確保. https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r5/r5_h/trend/part1/chap4/c4_2_00.html. (Accessed on 12/29/2024).
- [2] C. Wouter Bac, et al. "performance evaluation of a harvesting robot for sweet pepper.". *Journal of Field Robotics* 34.6, pp. 1123–1139, 2017.
- [3] Boaz Arad, et al. "development of a sweet pepper harvesting robot.". *Journal of Field Robotics* 37.6, pp. 1027–1039, 2020.
- [4] AGRIST. 吊り下げ式ピーマン自動収穫ロボット「L」. <https://agrist.com/archives/6505>. (Accessed on 12/29/2024).
- [5] The robocup japanese regional committee — ロボカップとは. <https://www.robocup.or.jp/robocup/>. (Accessed on 12/29/2022).

付録

謝辞

本研究を進めるにあたり，1年に渡り，熱心にご指導を頂いた林原靖男教授に深く感謝いたします．