

地表に散在する物体拾得のための

移動ロボットの設計と制御

(Design and Control of a Mobile Robot for Collecting Objects  
Scattered on the Ground)

2026 年 1 月

博士（工学）

佐藤 隆史

豊橋技術科学大学



2026年1月7日

機械工学専攻	学籍番号	第 189102 号	指導教員	内山 直樹
氏名	佐藤 隆史			佐藤 海二

## 論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	地表に散在する物体拾得のための移動ロボットの設計と制御
---------	-----------------------------

(要旨 1,200 字程度)

アーム型移動ロボットは、人手不足や作業環境の厳しさを背景に、多様な分野で活用が期待されている。拾得作業に関しては、清掃分野における固形ゴミ、スポーツ分野におけるゴルフボール・テニスボールなど応用範囲は広い。特に、農業分野における農産物の拾得は広範囲かつ過酷な屋外作業を伴い、自動化の要請が高く、ここに着目する。

日本の農業従事者の減少および高齢化に伴う労働力不足は深刻な問題である。農業は人手作業に依存する労働集約型産業であり、中でも収穫作業は全労働時間の20~50%を占めるとされている。屋外での収穫作業は低姿勢の作業が多いなど身体的負荷が大きく、単調な繰り返し作業であり、熱中症や虫刺されなどの危険性のリスクも高い。島嶼地域においては、過疎化の進行による労働力不足もあり、例えば、伊豆諸島などで盛んな椿油産業（利益率が高く、有力な伝統産業）の継続が危惧されている。このような背景から、農作業の自動化に対するニーズは高い。しかし、林床における屋外農作業は、不整地環境かつ樹間移動の中で、拾得作業の生産性を確保することの技術的難易度が高く、自動化の実例は数少ない。そこで本研究では、地表に散在する堅果（椿の実と種子を代表的に取り上げる）の拾得作業に着目し、堅果拾得ロボットシステムの開発を行う。拾得作業の自動化を通じて、産業の持続性確保と活性化への貢献を目指す。

一つ目の主要テーマとして、小型・低コスト・メンテナンス性の高さを基本コンセプトとし、一連の拾得作業の自動化に適した堅果拾得ロボットの設計および製作を行った。日本の中山間地や実際の椿圃場を想定した機械サイズ、電動車いすに一般的に用いられている差動二輪駆動方式、市販品を活用するなど実用性にも配慮した。籠状エンドエフェクタを用い、ロボットの前進移動と同時に連続的な拾得を行うことで、高い拾得効率を実現した。さらに、不整地での拾得作業に耐え得るようアーム駆動系にウォームギアを用いることで高い機械剛性を確保するとともに、エンドエフェクタ部をバネ付勢とすることで、地表面の起伏に対する柔軟性を両立した。これらの構成に対し、地表面への押し付け角度と押し付け力、エンドエフェクタのワイヤ開口量との相関に基づき、最適条件を実験的に導出し、自動化に向けた指針を示した。

二つ目の主要テーマとして、大きな起伏への柔軟な対応と拾得効率の向上を目的とした接触力制御を実現した。ウォームギアは逆駆動不可であるため、地表面の起伏に追従させる力制御は実現困難である。そこで、エンドエフェクタに取り付けたポテンショメータにより、地表面の起伏をバネ変位として計測し、アームのフィードバック制御による接触力制御系を構築した。屋外環境において、椿の実と種子を想定した拾得実験により、提案手法の有効性を検証した。その結果、制御を行わない場合と比較し、実の拾得成功率90%以上、拾得個数のばらつき半減を達成した。

三つ目の主要テーマとして、樹木をランドマークとし、拾得位置までロボットを近接させるための画像認識および移動制御系を構築した。単眼カメラおよび差動二輪駆動の車体構成とすることで、実用性と低コスト化を考慮した。画像内で大きさが変化する特徴量に基づいた進行速度制御と差動二輪駆動の非ホロノミック拘束を考慮した姿勢制御を実現した。シミュレーションおよび安価なロボットを用いた実機検証により、所望の位置姿勢に収束することを示し、提案手法の有効性を確認した。

これらの研究成果により、堅果を代表とした物体拾得を伴う不整地移動ロボットの実用化に向けた基礎的知見を得るとともに、その構成法を体系的に示した。



Date of Submission (month day, year) : January 7th, 2026

Department of Mechanical Engineering	Student ID Number D189102	Supervisors Naoki Uchiyama Kaiji Sato
Applicant's name Ryuji Sato		

## Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Design and Control of a Mobile Robot for Collecting Objects Scattered on the Ground
-----------------	---

Approx. 800 words

Arm-type mobile robots are expected to be utilized in various fields against the backdrop of labor shortages and harsh working environments. Regarding collection operations, applications are diverse, including solid waste in the cleaning sector and golf balls/tennis balls in the sports sector. In particular, we focus on the collection of agricultural products in the agricultural sector. Because extensive and harsh outdoor work is required, and the demand for automation is high.

The labor shortage caused by the decline and aging of Japan's agricultural workforce is a serious problem. Agriculture is a labor-intensive industry reliant on manual work, with harvesting alone accounting for 20–50% of total labor hours. Outdoor harvesting work involves a significant physical burden, such as frequent low-posture tasks, and consists of monotonous repetitive labor. It also carries high risks of heatstroke and insect bites. In island regions, labor shortages due to depopulation are also a concern, threatening the continuation of thriving industries like the camellia oil industry (a highly profitable and influential traditional industry) in the Izu Islands, etc. Against this backdrop, there is a high demand for automation in agricultural work. However, outdoor agricultural work on forest floors presents significant technical challenges in ensuring productivity for collection tasks within uneven terrain and while navigating between trees, resulting in few automation examples. Therefore, this research focuses on the task of collecting nuts scattered on the ground (primarily focusing on camellia nuts and seeds) and develops a nut-collecting robot system. By automating the collection task, we aim to contribute to ensuring the sustainability and revitalization of the industry.

The first major theme involved designing and constructing a nut-collecting robot suited for automating a series of collecting tasks, based on the fundamental concepts of compact size, low cost, and high maintainability. The machine size was designed with Japan's mountainous regions and actual camellia plantations in consideration, incorporating practical features such as the differential two-wheel drive system commonly used in electric wheelchairs and utilizing commercially available components. By employing a cage-type end effector, continuous collecting was achieved simultaneously with the robot's forward movement, realizing high collecting efficiency. Furthermore, to withstand collection operations on uneven terrain, the arm drive system employs worm gears to ensure high mechanical rigidity. Simultaneously, the end effector incorporates spring biasing to achieve flexibility in response to ground undulations. For these configurations, optimal conditions were experimentally derived based on the correlation between the pressing angle and force applied to the ground and the wire opening amount of the end effector, providing guidelines for automation.

As the second major theme, we achieved contact force control aimed at flexible adaptation to larger undulations and improved collection efficiency. Since worm gears cannot drive in reverse, force control that follows ground undulations is difficult to achieve. Therefore, we constructed a contact force control system using feedback control of the arm by measuring ground undulations as spring displacement via a potentiometer attached to the end effector. In an outdoor environment, we verified the effectiveness of the proposed method through a collection experiment simulating camellia nuts and seeds. As a result, compared to the case without control, we achieved a nut collection success rate of over 90% and halved the variation in the number of collected nuts.

As the third major theme, we developed an image recognition and motion control system to guide the robot close to the collection point using trees as landmarks. We employed a monocular camera

and a differential two-wheel drive vehicle configuration to consider practicality and low cost. We achieved velocity control based on features whose size changes within the image and posture control considering the non-holonomic constraints of the differential two-wheel drive. Through simulations and experiments using inexpensive robots, we demonstrated convergence to the desired position and orientation, confirming the effectiveness of the proposed method.

These research findings have provided fundamental insights toward the practical application of rough-terrain mobile robots capable of collecting objects, particularly nuts, while also systematically demonstrating their construction methodology.

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 関連研究	3
1.2.1 収穫ロボット	3
1.2.2 屋外清掃ロボット, 物体拾得ロボット	10
1.3 研究の目的と論文構成	12
<b>第2章 地表に散在する物体拾得のための移動ロボットの設計</b>	<b>19</b>
2.1 要求仕様の策定	19
2.1.1 拾得作業分析と要求仕様および設計方針	19
2.1.2 拾得対象物(樁の実, 種子)の特徴	21
2.1.3 フィールドの想定と拾得作業時間分析による自動化効果試算	23
2.2 ロボットのコンセプトと全体構成	25
2.3 拾得機構の設計	35
2.3.1 アーム機構	35
2.3.2 エンドエフェクタ機構	38
2.4 エンドエフェクタの初期角度の決定	44
2.5 屋内走行での物体拾得能力の検証	49
<b>第3章 不整地対応のための接触力制御および実験検証</b>	<b>53</b>
3.1 地表面の検知手段および接触力制御の方針	53
3.2 動力学モデルと接触力制御	54
3.3 シミュレーション	58
3.4 スロープを用いた接触力制御系の検証	61
3.5 屋外走行での物体拾得能力の検証	64
<b>第4章 画像特徴量の大きさを用いた差動ロボットの位置制御と実験検証</b>	<b>69</b>
4.1 樹間移動のための樹木の計測	69
4.2 画像フィードバックによる走行制御の方針	70
4.3 差動ロボットの構成および開発環境	72
4.4 問題設定と差動ロボットの姿勢推定	74
4.4.1 問題設定	74
4.4.2 画像特徴量を用いた差動ロボットの姿勢推定	76

4.5	差動ロボットの画像フィードバック制御 . . . . .	77
4.5.1	差動ロボットの運動学モデルと制御系の構成 . . . . .	77
4.5.2	進行速度制御 . . . . .	79
4.5.3	旋回速度制御 . . . . .	80
4.6	シミュレーションおよび実験結果 . . . . .	82
4.6.1	画像特徴量の抽出およびマッチング . . . . .	82
4.6.2	シミュレーション . . . . .	84
4.6.3	実機実験 . . . . .	85
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>87</b>
5.1	本研究の結論 . . . . .	87
5.2	今後の課題と展望 . . . . .	89
	<b>謝辞</b>	<b>93</b>
	<b>論文リスト</b>	<b>95</b>
	<b>参考文献</b>	<b>97</b>
	<b>付録 A 図面</b>	<b>A1</b>
	<b>付録 B アーム機構の駆動設計</b>	<b>A2</b>
B.1	慣性モーメントの計算 . . . . .	A2
B.2	ペイロードの計算 . . . . .	A5
B.3	必要トルクの計算 . . . . .	A6
	<b>付録 C 摩擦係数測定方法</b>	<b>A7</b>
	<b>付録 D 樁の種子選別のための画像認識手段の検討</b>	<b>A9</b>
D.1	研究背景・目的 . . . . .	A9
D.2	実験材料と実験方法 . . . . .	A10
D.3	実験結果 . . . . .	A12
D.4	まとめ . . . . .	A17

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

アーム型移動ロボットは、人手不足や作業環境の厳しさを背景に、屋内・屋外を問わず多様な分野で活用が期待されている。Fig.1.1に示すように、拾得作業においては、清掃分野における固形ゴミの拾得、スポーツ施設におけるゴルフボールやテニスボールの拾得など、応用範囲が広い。特に、農業分野における農産物の拾得は広範囲かつ過酷な屋外作業を伴い、自動化の要請が高く、ここに着目する。



Fig. 1.1 Application fields of arm-type mobile robots

日本の農業従事者の減少および高齢化に伴う労働力不足は、深刻な問題である。農林水産省の調査によると、2020年の日本の農業従事者は136万人で平均年齢は67.8歳（約7割が65歳以上）と推計されている。これは、日本全体の平均である46.9歳はもちろんのこと、同様に高齢化が進む漁業の56.6歳（2020年時点）を遥かに上回る<sup>[1]</sup>。更に、2030年には83万人で平均年齢は約69～70歳（70代以上が主要層）に上昇する見込みであり、2050年には36万人で平均年齢は70歳超え（85歳以上が30%以上）となり、30年間で100万人減（70%減）と推計されている。また、農地面積は、2020年の437万haが2050年には304万haへと減少（30%減）すると推計されている<sup>[2][3]</sup>。大幅に生産性を上げなければ現在と同等の需給は成立しない。

農業は、人間の労働力への依存度が高い労働集約型産業である。特に、収穫作業は人的負担が大きく、収穫にかかる労働時間は全体の20～50%に及ぶ<sup>[4]</sup>。収穫作業は体力的に過酷で、夏の暑さ・冬の寒さの中での作業が多い、作業時間が天候や作物の成長に左右されるため長時間労働になりやすい、中腰・低姿勢での作業が多く身体的な負担が大きい。また、収穫時期が限られた季節労働のため、通年での人材雇用が難しい。さらには、土作り・剪定・収穫タイミングなど、長年の経験に基づく作業が多く、マニュアル化やデータ化が難しく、経験と勘の属人化が起きやすい。人手不足のため技能継承も困難となっている。

このような背景から、「スマート農業技術活用促進法（2024年10月施行）」などの政策が掲げられ、認定による税制・融資・助成の優遇措置がとられている<sup>[5]</sup>。その一環として、農業ロボットによる省力化・自動化の研究が精力的に進められている<sup>[6]</sup>。省力化・自動化によって、人的コストの大幅な削減や労働力不足の解消（重量物の搬送、繰り返し作業、作業時間の限界）、作業効率の向上、品質の安定化など様々な効果が期待できる。さらには過去のデータに加えて、気象情報、栽培状況などを総合的に分析することで、生産計画を最適化し過不足を減らす、将来の収穫量を予想する（収穫時期やピークを正確に把握する）ことも可能になっている。このように、省力化・自動化は労働力不足の解消に留まらず、営農の意思決定方法を革新する可能性があり、持続可能な農業の実現に寄与するところが大きい。

## 1.2 関連研究

### 1.2.1 収穫ロボット

Fig.1.2に農作業の全体像を示す。また、地上ロボットやドローンなどのフィールドロボットの対象となる作業範囲を破線で囲った。栽培管理，防除，除草，収穫などの個別作業の自動化が望まれている。これらを対象とした収穫ロボットの研究は近年活況であり，2018年頃から一部のスタートアップが製品プロトタイプを開発し，実証的な上市が進んでいる。収穫ロボットの国内市場規模は，2030年には約800億円に伸長すると予想されている<sup>[7]</sup>。世界市場は，2030年までに32億9,380万ドルに達すると予測されている<sup>[8]</sup>。

収穫ロボットは，収穫対象物を検知判断する画像センシングの技術，収穫物を柔軟に掴むロボットアーム・ハンドの技術，圃場を自在に走行する移動技術の主に三つから構成される。近年，屋外の自然光下でも使いやすい画像・形状計測センサ，深層学習による画像AI技術，通信インフラの整備が進んできたという技術的背景がある。Fig.1.3に，近年研究が行われている収穫ロボットの位置付けを示す。横軸を作業環境の種類（屋内作業～屋外作業），縦軸を収穫方式の種類（選択収穫：果実の色や大きさから収穫時期を判別～一斉収穫：収穫時に判別せず，後工程で選別）として分類した<sup>[9]</sup>。ここで，屋内作業は環境制御型施設からビニールハウスなどの施設栽培，屋外作業は露地，果樹園，林床，広大な農地における畝間作業型など，更に細分化される。以下に，各象限の特徴を先行例とともに記載する。

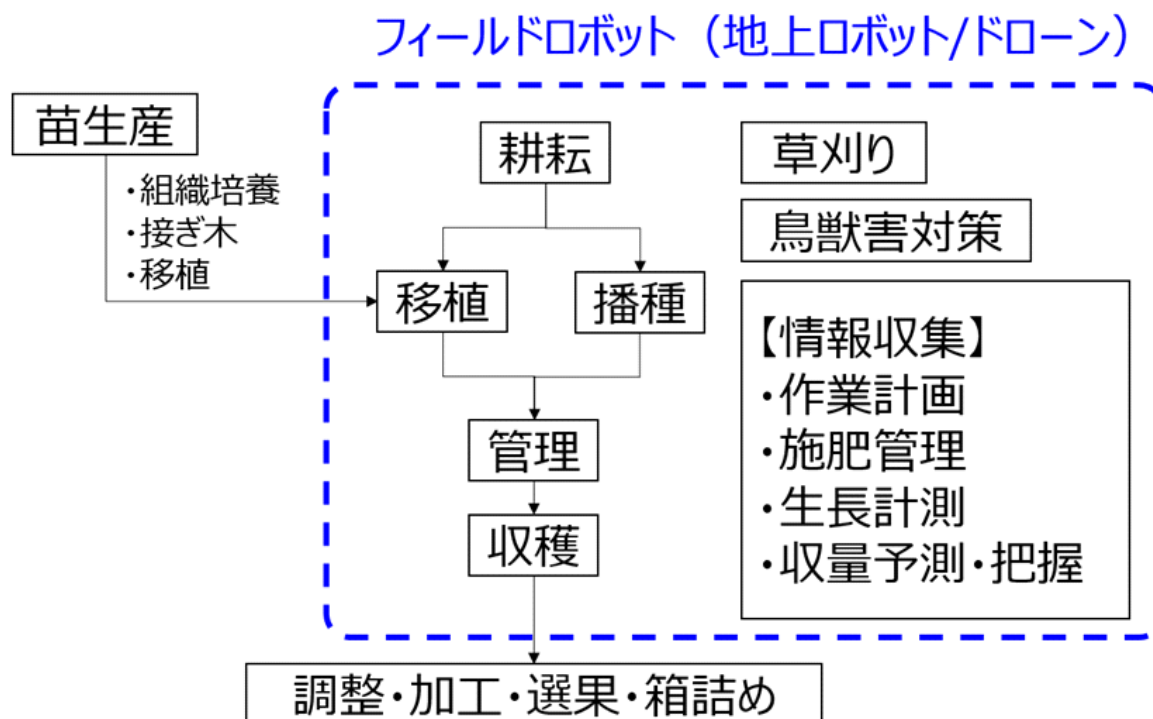
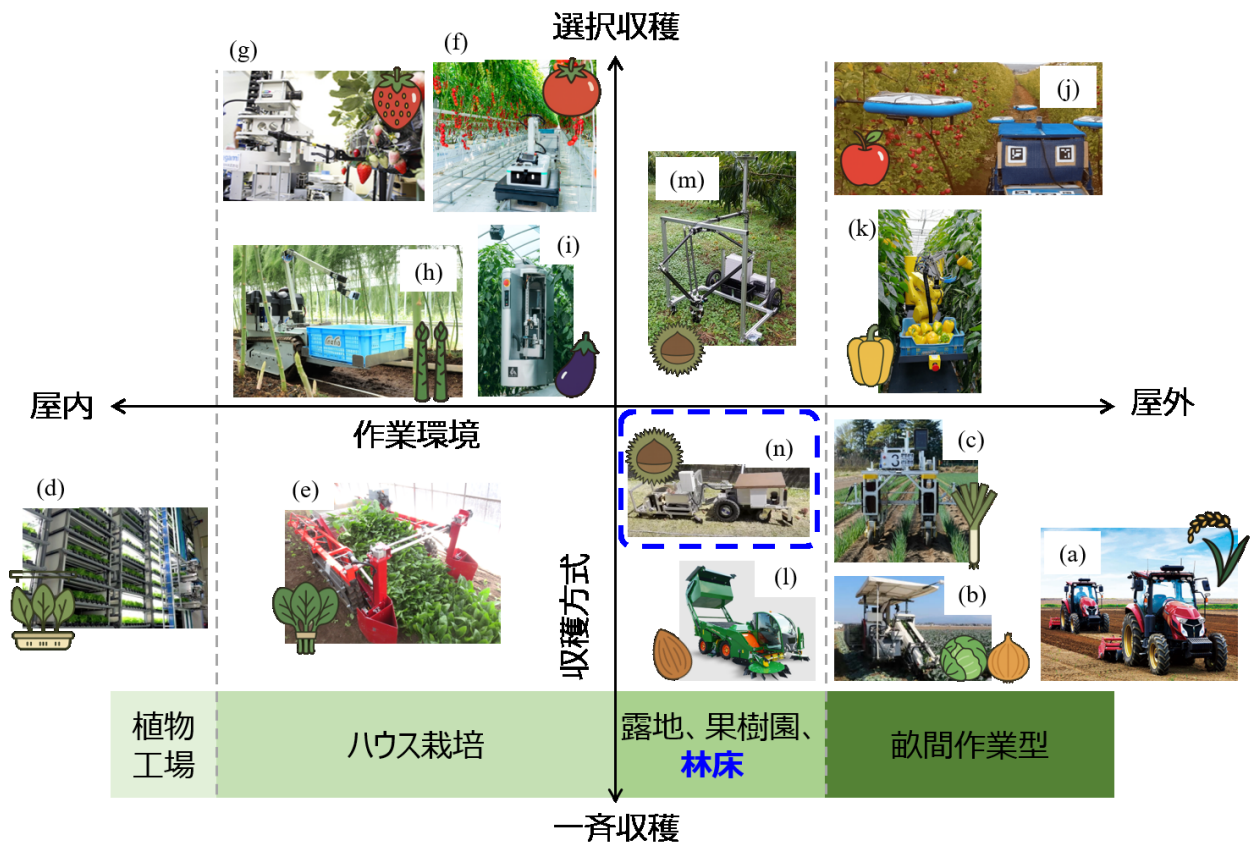


Fig. 1.2 Applications of agricultural robots



- ※出典
- (a) ロボットトラクタによる無人農作業システム, 北海道開発協会開発こうほう
  - (b) 環境変化にロバストなキャベツ認識と自動収穫
  - (c) 株式会社レグミン, <<https://legmin.co.jp/>>
  - (d) The Role of Automation in Vertical Farming Optimization
  - (e) ほうれん草自動収穫装置, <<https://smartnogyo.com/archives/1129.html>>
  - (f) トマト自動収穫ロボット「FARO」, <<https://www.denso.com/jp/ja/driven-base/project/artemy/>>
  - (g) イチゴ摘みロボット, <<https://special.nikkeibp.co.jp/NBO/businessfarm/agribusiness/04/>>
  - (h) Inaho株式会社, 高畝アスパラガス収穫ロボット, <<https://www.inaho.co/product/asparagus-harvesting-robot>>
  - (i) AGRIST株式会社, <<https://agrist.com/>>
  - (j) Tevel tech, <<https://www.tevel-tech.com/>>
  - (k) pepper harvesting robot
  - (l) Monchiero, Nut Harvester
  - (m) 栗拾いロボット「Arm-I」, <<https://smartagri-jp.com/news/1914>>.
  - (n) 熊本県立大学 栗収穫ロボット, <<https://kuri-robo.com/>>

Fig. 1.3 Positioning map for harvesting robots(Reference Date: December 31, 2025)

## 屋外 × 一斉収穫

この象限は、露地の広大な農地において、成熟した作物を一括で刈り取る大規模機械化農業に該当する。稲、麦、とうもろこし、じゃがいもなどが代表的な作物で、コンバインや自走式収穫機などによる効率的な作業が確立されている。技術的には非常に成熟しており、自動操舵・GPS連携による自律運転機も普及が進んでいる。大手農機メーカーが市場を寡占しているため、新規参入や差別化は難しく、技術革新の余地は比較的小さい領域である。

Fig.1.3(a)に示すように、自動運転トラクタやコンバインなどが既に製品化している<sup>[10][11]</sup>。GPSを利用した自動運転トラクタが数センチ単位の精度で耕耘を行い、AIカメラやミリ波レーダーによって周囲を測距し、収穫対象の稲と周囲のひとや障害物との識別を行い、無人で収穫作業を行える。自動車に比べて自動運転の移動速度は遅く、人通りが少ないエリアの走行に限定されるため、複数台の同時走行、圃場間の公道走行などの先進的な取り組みも増えている。稲作は耕耘、移植、収穫といった作業工程が単純であり、比較的機械化しやすい。畑作においても応用が広がっている。

Fig.1.3(b)に示すように、深尾らは、既存のタマネギ自動収穫機にRGB-Dカメラと制御装置を搭載した事例を報告している<sup>[12]</sup>。ディープラーニングの一手法であるESP Net (Efficient Spatial Pyramid of Dilated Convolutions)によるセマンティックセグメンテーションを用いて土壌とタマネギをピクセル単位で識別し、デプスカメラで土壌の高さを計測することで収穫部の高さを自動制御する。また、同様に既存のキャベツ自動収穫機にRGB-Dカメラと制御装置を搭載した事例も報告されている<sup>[13]</sup>。複数視点からの画像を取得し、SSD (Single Shot Multi Box Detector)を用いた深層学習によるキャベツ下部の検出モデルにより逆光下での認識精度を向上させた。さらに、RGB-Dカメラによる距離情報に基づき収穫対象を選別し、スライディングモード制御によって軟弱土壌でもロバストな経路追従を実現している。

Fig.1.3(c)に示すように、株式会社レグミンは、畝に沿って走行する農作業用走行車の安定性を向上させる制御技術に関する特許取得を行っている<sup>[14]</sup>。GPSによる自動走行に加え、車体前方にLiDARを搭載し、畝や溝の形状を点群データとして取得する構成とし、取得した点群データを三次元データに変換し、畝の方向を推定する方向特定用データを生成する。これに基づき、畝の方向に沿って車輪の向きと速度を制御する。さらに、凹凸検出による作動機構の根切り高さ制御も備える。

### 屋内 × 一斉収穫

この象限は、人工光型植物工場や中小規模のハウス栽培などで、一定期間成長した葉物野菜をまとめて一括で収穫する領域である。対象作物には、水耕レタス、ベビーリーフ、ホウレンソウ、スプラウトなどがあり、栽培密度が高く、生育が均一であるため、比較的自動化しやすい。既に完全自動収穫ラインが実用化されており、播種から収穫・包装までが一体化したシステムが稼働している。市場は成熟しつつあるが、省人化と衛生性の観点から今後も拡大が見込まれる。

Fig.1.3(d) に示すように、Spread 社の Techno Farm は、レタス生産の全工程（播種、移植、収穫、包装）をロボットアームとコンベアで自動化している<sup>[15]</sup>。IoT センサ群とデータ解析により環境要因をリアルタイム監視・最適化する閉ループ制御を実装し、品質の均一化と稼働効率向上を図る。これにより労務コストを 50% 超削減しつつ、量産性と経済性を両立している。

Fig.1.3(e) に示すように、信州大学とカイシン工業が共同開発したホウレンソウ自動収穫装置は、畝に植えられたホウレンソウを傷つけずに根元から一括収穫する機械設計と制御技術を備えている<sup>[16]</sup>。約 750mm 幅の金属平板刃を地中約 30mm に維持しつつ進行し、根を切断すると同時に茎葉を倒しながらコンベアに搬送する構造である。この刃の深さ・角度は地表面センサで検知し、フィードバック制御によって自律的に調整される。本機はクローラ推進力を用いて土中の小石や勾配のある圃場でも安定的に作動するよう設計されている。また搬送はパッシブハンドリングと呼ばれる手法を採用し、把持せずにはうれん草を倒して搬送するため、茎や葉へのダメージを最小限に抑える。走行制御は条間の境界をカメラ等で検知して直進走行を維持する軌跡追従型制御であり、収穫作業を高精度かつ効率的に実現する。これらにより圃場条件や品種・葉の絡まりなどの変動要因を吸収し、ホウレンソウ本来の形を保ったまま高速収穫を可能にした機器設計である。

## 屋内 × 選択収穫

この象限では、ビニールハウスや植物工場といった人工環境下で、熟した作物を見極めて摘み取る選択収穫が行われる。イチゴやトマトなどが代表的な作物で、環境制御が可能なため、ロボットの移動や視覚センサの安定性が高く、屋外に比べて自動化が実現しやすい。既にイチゴ収穫ロボットなどが商用化され始めており、技術的・経済的に現実的な導入が進んでいる。ニッチながらも高単価作物に特化したビジネスとして有望な領域である。野菜や果樹の青果物に関しては、品目が多く、ハンドリング対象や作業環境も多様で不定のため、個別対応となるため、これまで自動化が進展して来なかった。しかし、青果物生産における全作業時間に占める収穫作業の割合は大きく、ニーズも大きい。イチゴやキュウリで約5割、アスパラガスやピーマンで約6割とされている（品目や栽培方法などによって異なる）。

Fig.1.3(f)に示すように、長谷川は、自走式移動台車上に産業用6軸ロボットアーム（VS 060）と専用収穫ハンドを搭載したトマト自動収穫ロボット「FARO」について報告している<sup>[17]</sup>。ハンドは実際の農業用ハサミを流用し、果柄を切断しつつ把持可能な機構であり、メンテナンス性と信頼性を確保している。また、画像認識のために左右固定カメラ2台とハンドカメラ1台を配置し、並行処理による収穫速度向上を図っている。単位収穫時間は約20秒/果と公表されている。画像を用いたディープラーニング技術によりミニトマトの房位置と切断箇所を推定し、特に太陽光下での距離情報欠損に対しては独自の奥行き補完アルゴリズムを用いて精度改善を実現している。認識した3次元点群をボクセル化して障害物をモデリングし、回避軌道を生成する。これにより、トマトや茎・葉などに干渉せず安全かつ安定した収穫動作を達成している。矢口らは、色抽出と球形フィッティングによる果実認識に加え、果柄方向推定には中心から果柄への方向と境界勾配を用いたロバスト推定手法を採用している。これにより、隣接果実の干渉を避けつつ、高信頼に果柄位置を特定し安定した切断動作を実現している<sup>[18]</sup>。

Fig.1.3(g)に示すように、尾崎らは、「果皮に触れないことで高品質なイチゴ収穫を実現するロボット」を開発した<sup>[19]</sup>。画像認識用の視覚モジュール、果柄を切断・把持するハンドモジュール、および自走可能な車体モジュールの三要素から構成する分割設計を採用している。視覚モジュールには自然照明下でも安定してイチゴの熟度と位置を識別可能な色座標系を用いた画像処理技術を搭載しており、果実ではなく茎の部分に触れずに把持・切断する設計である。また、環境光に依存しない色特徴抽出による認識処理と連動して、自走型車体が対象位置まで移動し作業範囲を効率的にカバーする制御を実装している。この構成により、果皮損傷を防ぎつつ高品質な摘み取りを実現している。さらに、大果系イチゴ用非接触型個別容器『フレッシュ』との組み合わせにより付加価値を創出している<sup>[20][21]</sup>。フレッシュは、収穫後に果実の可食部が容器や他の果実に接触しないように保持する専用パックである。容器内部には果実が宙に浮くように支える構造が採用されており、スレ傷やオセによる損傷を軽減する役割を担う。この包装により完熟イチゴでも外観と食味が保たれるため、高単価商品（1粒1600円程度）としての流通が可能であり、高品質イチゴを希望する高級市場や輸出向けに展開している。

Fig.1.3(h)に示すように、inaho株式会社によって、枠板式高畝栽培に対応したアスパラガス収穫機が報告されている<sup>[22][23]</sup>。小型追従型台車に赤外線センサとステアリング走行機構を搭載し、白線をトレースする自律移動を実現している。収穫用エンドエフェクタはカッター付きグ

リッパを備え、アスパラガス若茎を把持して切断後、バスケットへ投下する構造である。赤外線検出と視覚認識アルゴリズムによって収穫適期の若茎をリアルタイム判定し、移動および把持・切断のタイミングを制御する。収穫速度は、約12秒/本と公表されている。実地試験において春芽80%、夏芽65%の収穫率を達成している。

Fig.1.3(i)に示すように、斎藤は、吊り下げ式の自動収穫ロボットを提案している<sup>[24]</sup>。ビニールハウス内に張設されたワイヤーにロボット本体を吊り下げる方式とし、地面の凹凸や障害物の影響を受けず安定した移動を実現している。収穫ハンドは独自設計のグリッパ構造で、収穫対象の茎を適切に把持しつつ切断および不要茎の除去を同時に処理する仕組みを備えている。このように構造を簡素化しつつ、農家が手軽に導入できる低コストで保守性に優れた設計をしている。制御面では、AI（深層学習）により画像認識機能を実装し、ピーマンやナスの位置や成熟度を高精度に判別する。センサ画像から収穫可否をリアルタイムに判断し、ハンド制御を指令する閉ループ制御システムを構築している。これにより、振動や揺れに影響されず高収穫率を維持し、生産性向上と人件費削減を両立している。これらの収穫ロボットは主に施設栽培を対象としている。収穫物の品質を担保することが重要であるため、収穫タイミングを見計らい選択収穫する戦略を用いている。時間当たりの生産性よりも収穫作業の確実性が優先される。

### 屋外 × 選択収穫

この象限は、果樹園や林床などの自然環境下で、果実の熟度や形状を見極めて1つずつ摘み取る選択収穫を行う領域である。対象作物には、ぶどう・りんご・栗など高付加価値な果実が多く、傷つけずに収穫するために高度な視覚認識・熟度判定・把持制御が求められる。作業環境は複雑かつ不規則であり、技術的ハードルが非常に高い一方で、自動化による労働力削減ニーズは強く、将来的な成長が期待される未開拓市場でもある。現在は一部のドローンやロボットアームによる実証実験が行われている段階である。

Fig.1.3(j)に示すように、FAR (Flying Autonomous Robots) は、イスラエルの Tevel 社が開発した果物収穫用の空中ロボットシステムである<sup>[25]</sup>。複数の小型ドローンにカメラと吸着式グリッパを搭載し、果実を吸引しながら把持・ねじ切りして収穫する機構を備える。ドローンは地上の移動台車に係留された構成であり、電力供給と位置安定性を両立している。ディープラーニングを用いた果実検出と成熟度判定をリアルタイムに行い、障害物を回避しながら最適な経路を生成する。各ドローンは個別に飛行制御される一方、中央制御ユニットが群制御により全体の収穫効率を最大化する。果実の位置・品質・収穫日時などのデータはクラウドに記録され、農業経営へのフィードバックも可能である。

Fig.1.3(k)に示すように、Aradらは、商業温室環境におけるパプリカ収穫ロボット「SWEEPER」の開発と検証を行った<sup>[26]</sup>。6自由度の産業用ロボットアームを搭載し、果実を傷つけずに把持・切断・収納可能な専用エンドエフェクタを設置している。RGB D カメラおよびGPU搭載の高性能コンピュータを備え、カート式の自律走行プラットフォーム上で温室パイプレール上および床面を移動して作業を実行する構成である。視覚アルゴリズムによる果実検出・位置推定・把持姿勢決定と軌道計画が統合的に制御される。また、移動、動作、果実排出の一連処理を同期制御している。平均1果実あたり約24秒の収穫サイクルを実現し、条件が最適な場合には成

功率 61 %，通常条件下でも 18 % の収穫成功率を示した。

特に、屋外作業の中でも果樹園や林床への収穫ロボットの導入は、地形の不整地性、樹木の配置・形状の不定形性、障害物の多さが大きな課題である。起伏のある地面、雑草、落枝などにより走行が困難となる。また、果実は高所や枝の陰に存在し、視認性が低いため、高精度なセンシングとロボットアームの柔軟な動作制御が求められる。さらに、樹種ごとに果実の形状や熟度判別基準が異なるため、品種特化した識別アルゴリズムが必要である。収穫時の傷や落果を防ぐための繊細な把持技術も不可欠である。このように、環境の多様性と作業要件の複雑さが導入の難しさを高めている。

Fig.1.3(l) に示すように、海外の農業機械の事例も含め、平地かつ大規模圃場に対して、トラクタと連結した重機などが製品化されている<sup>[27]-[29]</sup>。樹木を振動させて強制的に収穫作業を行う方式の機械が存在する。振動式が多く採用される最大の理由は、経済性とスケール適合性に優れている点にある。樹木全体に加速度を与えることで多数の果実を一括して落下させる方式であり、個々の果実を認識・把持する必要がない。そのため機構が単純で耐環境性が高く、屋外での連続作業に適している。さらに、1本の樹木を数秒から数十秒で処理できるため、単位時間当たりの処理量が極めて大きく、ヘクタール規模の果樹園において高い生産性を実現できる。一方で、振動式は、樹木が小さい、あるいは樹形が不整形で把持が困難な場合や、傾斜地・林床など大型機械の進入が制約される場合には適用が難しい。日本の農地は中山間地や小規模圃場が多く、樹間を小回りで移動できる収穫ロボットが望まれる<sup>[30][31]</sup>。また、すでに地表に落下している果実に対しては不適である。樹木に実った果実ばかりではなく、ナッツなどの堅果をはじめとして、椿の実、栗、銀杏などの堅果が熟れて地表面に落果したものや、未熟果（摘果みかん等）など早期落果したもの拾得するニーズも存在するが、これらを対象とした事例は少ない。樹木ごとにシートを常設し、落果を拾得する手段もあるが、個々の樹木に対し着脱する負担が大きい<sup>[32]</sup>。

Fig.1.3(m) に示すように、栗拾いロボット「Arm-I」が報告されている<sup>[33]</sup>。林床に散在する栗を自律的に検出・拾得することを目的としている。広範囲な可動域を有するパラレルリンクアームを搭載しており、林内の起伏や障害物への対応力を有する。深層学習に基づく物体検出アルゴリズムにより、イガや果実を高精度に識別し、適切な把持点を自動推定する。把持にはソフトグリップを用い、果実損傷を抑制している。移動しながら、AIによる画像認識で対象物を正確に拾得する。しかし、拾得作業は2秒に1個であり、作業速度が遅いという課題がある。

一方、Fig.1.3(n) に示すように、熊本県立大学などが研究している栗収穫ロボットは、自律走行と収穫・運搬機能を一体化したシステムである<sup>[34][35]</sup>。イガ付き栗とイガ無し栗の両方を同時に拾得できる独自のブラシ式収穫機構を採用しており、円筒の外周に配置された柔軟性のある白色の実用ブラシ（柔軟性・形状・間隔が調整されている）がイガ栗と栗実を適切に挟み込む構造となっている。移動しながら拾得し、コンテナへの移載も連続的に行うことができる。しかし、拾得物が外周に露出しているため、回転力で脱落し、拾得不良の懸念がある。また、外周被覆と複雑形状が故のメンテナンス性の課題がある。

## 1.2.2 屋外清掃ロボット，物体拾得ロボット

労働力不足を背景とした省力化のために様々な業界においてロボットの導入が増加している。2025年には、製造業をはじめとした既存市場の分野を、新たな市場であるサービスロボット分野が上回り、約2.6兆円まで拡大するとの推計がある<sup>[36]</sup>。特に、業務用清掃ロボットは、国内外で本格的な市場導入期を迎えている<sup>[37]</sup>。最近の業務用清掃ロボットは、清掃箇所を学習し自律走行する機能や、搭載したカメラやセンサで部屋の形状や置物を検知し、障害物を避けながら清掃する機能を有する。また、作業者が柔軟かつ簡便にティーチングすることができ、現場作業での使い勝手も考慮されている<sup>[38]-[40]</sup>。しかし、多くは屋内作業に限定されており、屋外作業を対象として製品化に成功しているサービスロボットはほとんど見当たらない。この原因として、不整地走行や未知の移動障害物の存在など、環境変動への対応が困難であり、要求される機能が高度なことが原因と考えられる<sup>[41]</sup>。

Fig.1.4に代表されるように、ゴルフボール等の競技用ボールあるいは固形ゴミ等の物体を拾得す拾得装置の報告がある<sup>[42]-[44]</sup>。左右駆動車輪移動により、物体を拾得するとともに回収容器に向けて搬送する揚上コンベアを備えている。揚上コンベアの拾得部は、上方に向けて移動でき、拾得部が、地面に対して所定の距離を保って配置されるように構成されている。このため、整地もしくは拾得部と地面との間の距離が確保可能な程度のなだらかな起伏の不整地であれば、物体の拾得動作を行うことができる。しかしながら、上記距離の確保が阻害される局所的な起伏や大きな起伏を有する不整地においては、物体の拾得は困難である。

本研究室においても屋外清掃ロボットの設計、制御の研究がおこなわれている。Fig.1.5(a)に相馬らによる屋外清掃ロボット「はくろうくん」の外観と内部構造を示す<sup>[45]</sup>。これは、既存のマニュアル操作型清掃機にモータ含む制御装置を外付けし、RTK-GPSを用いて走行時の位置情報を取得し、操作特性（ハンドル操作量と操舵角，アクセル操作量と走行速度）を推定することで自動走行を実現している。また、屋外清掃ロボットは、障害物位置が変化する広大な環境に適用することが求められる。これに対して、Fig.1.5(b)に示すように、領域内被覆経路（長方形で清掃領域を指定し、ロボット幅に応じて経路を分割）を生成する。また、リアルタイム経路生成アルゴリズムであるDWA(Dynamic Window Approach)を応用して、障害物を回避しながら目標地点に向かい、その領域の被覆清掃を行う。Fig.1.6にTobiasらによる屋外清掃ロボットの外観と内部構造を示す<sup>[46]-[50]</sup>。移動ロボットによる領域被覆経路計画問題に対し、局所探索手法であるTASP(Turn-Away Starting Point)とBSA(Backtracking Spiral Algorithm)を組み込んだハイブリッド遺伝的アルゴリズムHGA(Hybrid Genetic Algorithm)を提案した。環境は格子グリッドで表現され、ロボットの軌道をクロスオーバー・突然変異で進化させながら最適化を行う。特に、加減速・旋回・直進といった動作単位に分解して実測に基づいたエネルギー消費を評価関数とする新たな設計が特徴である。HGAは従来法より最大38.4%経路性能を改善し、特にTASPを用いた手法は移動時間・省エネルギーの両方で優れることを示した。

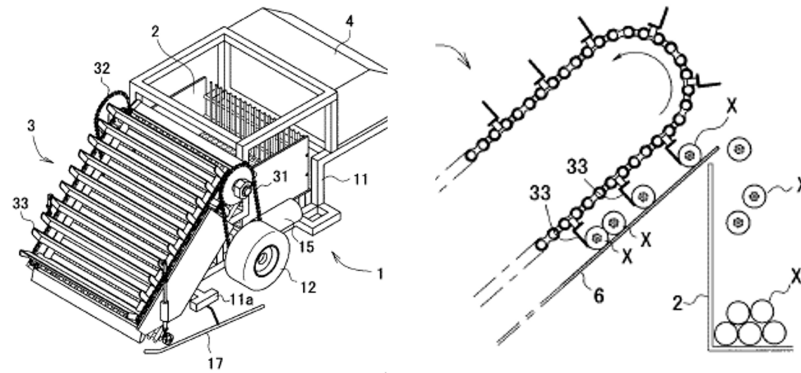


Fig. 1.4 A practical example of an object-collecting robot<sup>[42]</sup>

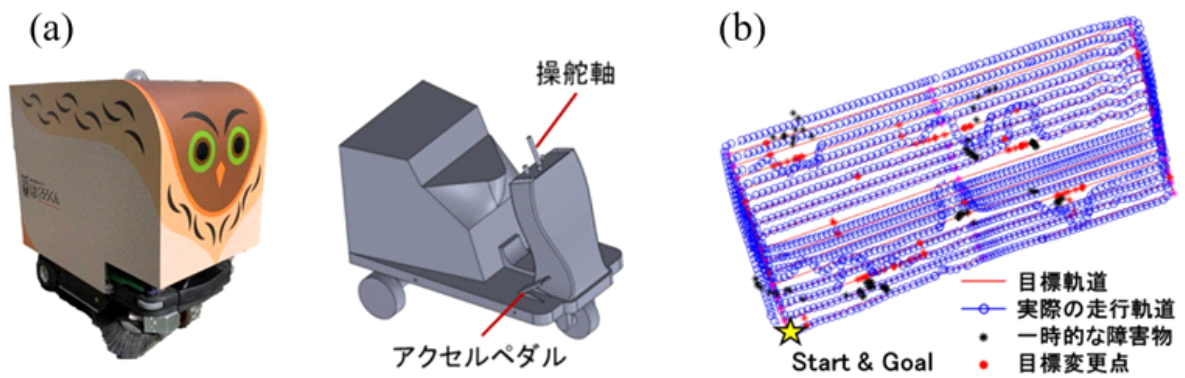


Fig. 1.5 Research projects 1 in our laboratory<sup>[45]</sup>

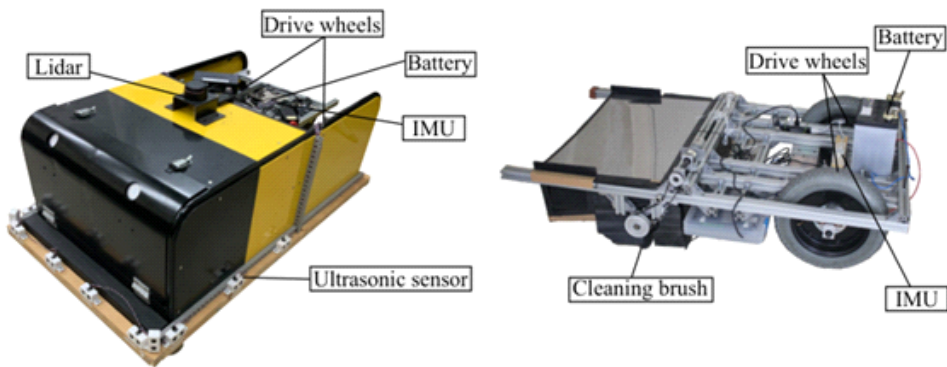


Fig. 1.6 Research projects 2 in our laboratory<sup>[46]-[50]</sup>

## 1.3 研究の目的と論文構成

1.2.1節で述べたように、現段階では、単価が高い、収穫時期が長い、収穫量が多い、施設栽培のように生育環境が工場化されているなど変動要因が少なく、ビジネス的に成立しやすい作物を対象とした収穫ロボットの導入が先行している。今後は、作物を傷つけない収穫、高速な収穫、不整地走行などの技術進展とともに、対象範囲が拡大していくものとする。

そこで、本研究では、市場としては有望であるが、技術課題が大きく、未開拓である林床での屋外農作業において、特に地表に散在する収穫物の拾得作業に着目する（Fig.1.3に破線で示した領域に相当する）。これに、1.2.2節で述べた屋外清掃ロボットの設計思想・技術を用いて自動化にアプローチする。

具体的なニーズに対する検討として、島嶼地域において盛んな椿油産業を取り上げ、椿の実および種子の拾得作業を対象とした。島嶼地域は、豊かな天然資源があり、海洋権益を守り国益を維持する上でも重要な役割（漁業、海洋調査、領海警備などを通じた領海・経済的排他水域の保全の拠点としての機能）を担っている。その役割を永続的に果たしていくためには、住み続けられる島として活性化していることが前提である。しかし、高齢化・過疎化の影響を受け、労働力が減り、伝統的な産業の維持が危惧されている。本土よりも人口減少および高齢化の進行が顕著である<sup>[51]</sup>。このような状況に対し、国境に位置する有人離島の振興及び国土保全を目的とした有人国境離島地域法が2016年に施行された<sup>[52]</sup>。これは、産業振興、生活基盤整備、交通確保等を包括的に支援する枠組みを定めたもので、制定29地域・148島に、国費50億円を投じ、「航路・航空運賃の引き下げ／物資の輸送負担の軽減／雇用機会の拡充／滞在型観光の促進」などの施策がとられる。同法の対象地域には、伊豆諸島・利島など椿油産業が基幹産業として根付く島嶼も含まれる。

これら地域では、椿油は長年にわたり重要な特産品であり、観光資源や地域ブランド形成にも直結している。法に基づく交付金や特別措置により、椿園の管理、収穫・加工施設の整備、輸送費補助などが可能となり、産地の生産性向上と担い手確保に寄与する。また、交通運賃低廉化やインフラ整備は、製品出荷や観光客誘致の円滑化を促進し、販路拡大につながる。さらに、同法は離島の定住促進や雇用創出を目的としており、椿油産業の6次産業化や地域内加工の推進にも資する。椿油産業の市場規模は、世界全体では、食用・化粧品用を含む広義の市場で2024年時点約147億米ドル規模と推計され、2033年には300億米ドル超に拡大する見込みである。年平均成長率は5～9%程度であり、特にアジア市場の伸びが顕著である<sup>[53]</sup>。日本国内では正確な統計は公表されていないが、伊豆諸島や五島列島などの産地を中心に数十億円規模と推定され、化粧品用途が高付加価値分野を占める。利益率は製品グレードや販路によって大きく異なり、精製度の高いエクストラバージン油や化粧品用原料は原価率が低く、営業利益率20～40%に達する事例もある。一方、大量生産の食用油は価格競争が激しく、利益率は10%前後に留まる傾向にある。このように、有望な産業であるが、収穫などの手間があって今後の維持が不安との声もある。Table 1.1に椿油の製油工程を示す<sup>[54]</sup>。

Table 1.1 Camellia oil production process

工程	内容
栽培管理	椿園の整備, 下草刈り, 剪定, 病虫害防除を行い, 開花・結実を促進する. 品種選定や施肥管理が油分含有率と収量に直結する.
開花・結実管理	開花期の天候や受粉状況を観察し, 結実率を高める管理を行う. 受粉媒介昆虫の保護や結実率調査が重要である.
拾得 (採取)	熟した椿の実を地面から拾得するか, 枝から収穫する. 熟度確認と異物混入防止が必要である. 製油業者が, 椿農園を営む専業農家から大量購入する場合と, 島民が自生樹木 (街路樹含む) か拾得したものを購入する場合とがある.
果皮除去	椿の果実から外皮と殻を除去し, 種子を取り出す. 手作業または機械による脱殻が行われる.
乾燥	含水率を約 10 %以下に下げするため, 天日干しまたは温風乾燥機で乾燥させる. 乾燥は酸化防止と搾油効率向上に重要である.
選別	大きさ, 形状, 色などの外観で選別し, 不良品や異物を除去する. 光学選別機やふるいを用いる場合が多い.
搾油	圧搾法 (冷搾または温搾) または溶剤抽出法により油分を取り出す. 化粧品用は風味と成分保持のため冷搾が多い.
濾過	粗油に含まれる微細な固形分をフィルターで除去する. 濾過精度が製品の透明度や保存性に影響する.
精製	脱酸, 脱色, 脱臭などの工程を行い, 安定性と品質を高める. 精製度は用途に応じて調整する.
調合・充填	遮光瓶や食品用容器に充填し, 酸化防止のため窒素充填や密封包装を行う.
品質検査	酸価, 過酸化値, 水分などを分析し規格適合を確認する.
販売・流通	直販 (店舗・EC) や卸売 (メーカー原料供給) を行う. ブランド戦略, 販路開拓, 輸出規制対応が必要である.

伊豆大島にて, フィールドワークおよびヒアリングを実施した結果, Table 1.1 における「拾得」と「選別」の工程において自動化ニーズを得た. 拾得作業の風景を Fig.1.7 に示す. 拾得作業は, 腰をかがめる作業のため身体的な負担が大きい, 虫刺され・熱中症・害獣との遭遇などの現場作業の危険性がある, 人手不足により製油に対する必要量が確保できない, 遊休木を有効活用できていないという課題がある. また, 専業農家からは, 収穫作業よりも農業経営に時間を充てたい要望もある. これらに応えることができれば, 産業振興に貢献できると考える. 選別作業は, 作業工数が多い (2人で3ヶ月間作業) 上に職人技の目視判別である. また, 油の含有量, 腐敗具合は目視判別できないため, 可視化手段の要望があった. 工程の自動化に留まらず, 椿油産業の訴求につながる話題性, 観光なども含めた取組が望まれた.

上記を鑑みて, 本研究で目指す自動化システムの全体像を Fig.1.8 に示す.



Fig. 1.7 Scene of collecting camellia seeds < <https://sites.google.com/site/shimatsubaki/> >  
 (Reference Date: December 31, 2025)

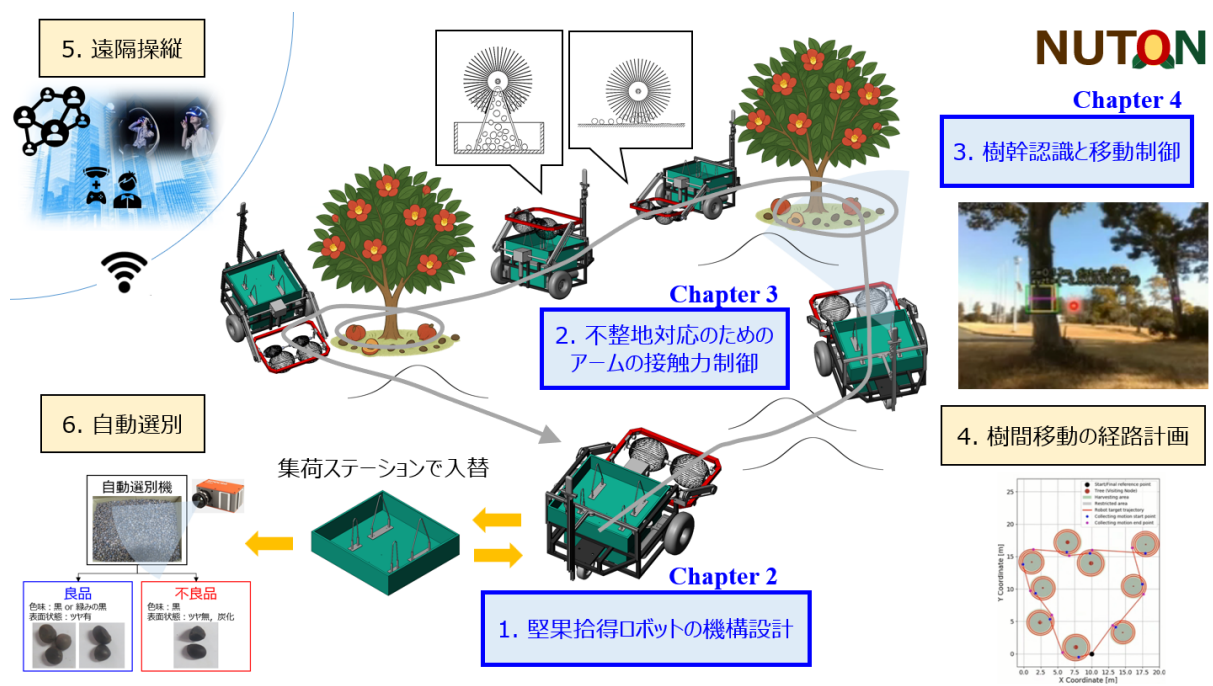


Fig. 1.8 Final target system of this study

1. 不整地に柔軟に対応可能なアーム型移動ロボット設計  
林床のような傾斜や起伏の多い不整地環境においても安定して移動可能な走行機構と、柔軟に作業姿勢を変えられるアーム構造を実現する。これにより、樅の実に接近可能な範囲を広げ、拾得効率の向上を図る。
2. 不整地に柔軟に対応可能なアーム制御  
地形の傾斜や不整地に起因する姿勢変化を吸収する柔軟性を制御に持たせ、接触力の調整を行う。
3. 樹幹認識と移動制御  
周囲の樹幹の位置・形状を正確に認識し、その情報をもとにロボットの位置姿勢を適切に制御する。樅の実が散在する樹木への効果的なアプローチを図る。
4. 樹間移動および拾得作業を効率的に行うための経路計画  
複数の樹木間を効率よく移動しながら樅の実を拾得するために、最適な経路をリアルタイムで計画するアルゴリズムを構築する。移動経路と拾得対象の優先順位を同時に考慮することで、無駄な移動を抑え、作業全体の生産性向上を目指す。
5. 遠隔操縦  
移動ロボットにカメラを搭載し、作業者が現地に赴かずとも、遠隔地からロボットを操作・監視できる仕組みを構築し、労働負荷の軽減を図る。本島の住民による代替作業も可能となる。また、VR (Virtual Reality) を用いることで、現地に行ったかのような超臨場感の観光体験など新たな6次産業化の可能性も広がる<sup>[55][56]</sup>。
6. 画像AIによる自動選別  
拾得後の樅の種子の形体・表面状態を基に、非破壊かつ簡便な選別手段を提供する。人手による選別作業の省人化および出荷品質の向上を図る。

本論文においては、上記1,2,3を主要な研究範囲とする（6.については付録Dにて詳述する）。

本論文の全体構成を Fig.1.9 に、パラメータリストを Table 1.2 に示す。本章では、研究背景および研究目的について述べた。第2章では、樅の実と種子の拾得作業における要求仕様および設計方針を立て、これに基づいた「地表に散在する物体拾得のための移動ロボット」の構成方法について述べる。第3章では、より大きな起伏への対応とエンドエフェクタによる拾得性能の向上を狙った不整地対応のための接触力制御および実験検証について述べ、屋外実験によって、制御の有効性を検証する。第4章では樹下の拾得位置までの近接移動の自動化に向けた画像特徴量の大きさをういた差動ロボットの移動制御と実験検証について述べる。最後に、第5章では結論と今後の展望を述べ、本論文を締めくくる。

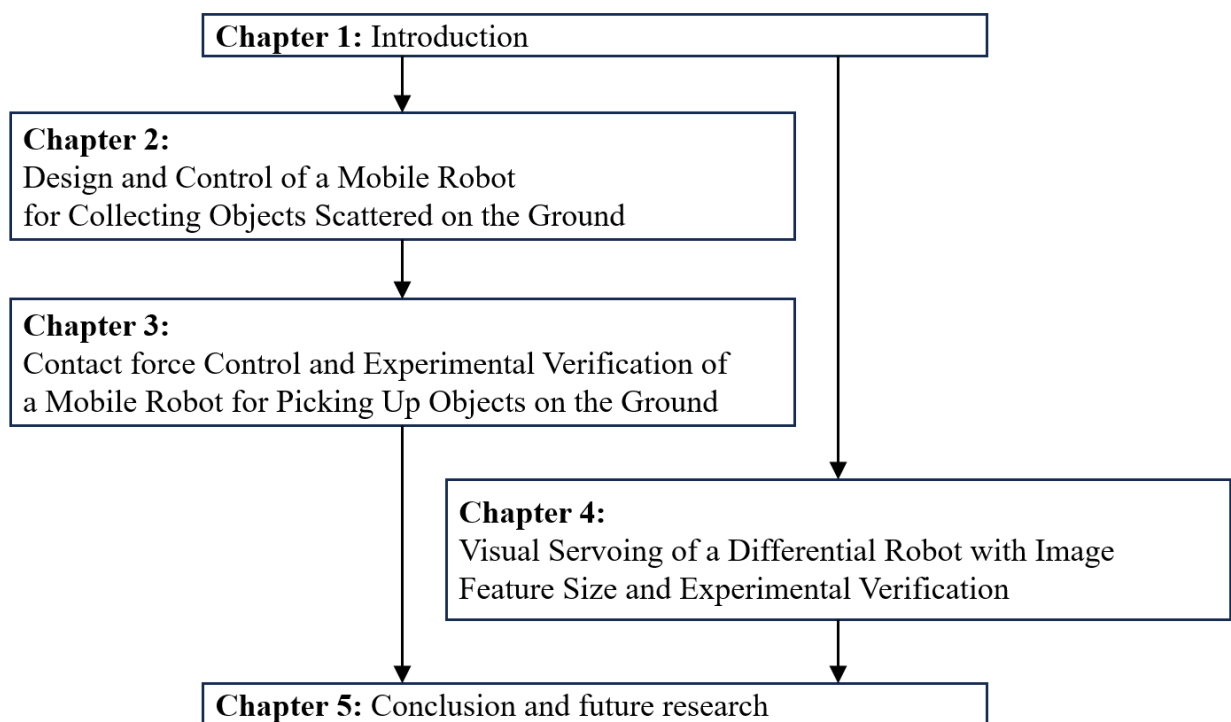


Fig. 1.9 Outline of this thesis

Table 1.2 Parameters values

Parameters[Unit]	Definition	Value
$L_a$ [m]	Length of arm link	0.375
$L_g$ [m]	Length between arm rotation axis and arm center of gravity	0.177
$L_b$ [m]	Length between O4' and the fixed end of the spring	103.2
$L_s$ [m]	Length between O4' and the movable end of the spring	55.5
$\theta_e$ [deg]	Angle of the end-effector	Variable
$\theta_a$ [deg]	Angle of the arm link	Variable
$\theta_{a0}$ [deg]	Initial Angle of arm link	39.1
$\theta_l$ [deg]	Angle detected by the potentiometer (Left side)	Variable
$\theta_r$ [deg]	Angle detected by the potentiometer (Right side)	Variable
$\theta_1$ [deg]	Initial angle of the movable end of the spring	7.77
$\theta_2$ [deg]	Initial angle of the fixed end of the spring	3.61
$\theta_p$ [deg]	Angle around vehicle pitch axis	Variable
$\phi$ [deg]	Angle around vehicle roll axis	Variable
$\psi$ [deg]	Angle around vehicle yaw axis	Variable
$z_a$ [mm]	Spring length (Average)	Variable
$z_l$ [mm]	Spring length (Left side)	Variable
$z_r$ [mm]	Spring length (Right side)	Variable
$z_0$ [mm]	Initial spring length	62.852
$z$ [mm]	Spring displacement (Average)	Variable
$y$ [mm]	Base frame displacement	Variable
$F_0$ [N]	Initial tension of the spring	1.37
$F_a$ [N]	Load at arm end	Variable
$F_e$ [N]	Contact force on the ground	Variable
$\tau_a$ [N·m]	Torque around arm rotation axis	Variable
$\tau_m$ [N·m]	Motor torque	Variable
$M$ [kg]	Total mass of the arm	6.83
$m_a$ [kg]	Arm link mass	1.74

$J_a$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Moment of inertia around the arm rotation axis	0.238
$J_{m1}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Rotor moment of inertia	142E-07
$J_{m2}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Load moment (converted to motor shaft)	3.98E-07
$J_m$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Moment of inertia on the motor shaft	146E-07
$k_t$ [N·m/A]	Torque constant of motor for arm control : Maxon RE40	0.0302
$F_{t1}$ [N]	Tangential force of worm gear	Variable
$F_n$ [N]	Normal force of worm gear	Variable
$\alpha_n$ [deg]	Tooth perpendicular pressure angle	20 °
$\gamma$ [deg]	Lead angle of worm gear	3 ° 42 '
$\mu$ [-]	Coefficient of friction of worm gear	Variable
$G$ [-]	Gear ratio of worm gear	857.5
$G_1$ [-]	Gear ratio : Maxon GP42C 148867	42.875
$G_2$ [-]	Gear ratio : Worm Gear W2SR1-B to Worm Wheel G2A20R1-15	20
$\eta$ [-]	Maximum transmission efficiency of gearhead	0.72
$k_e$ [N/mm]	Spring constant	0.14
$k_{p-p}$ [A/rad]	Proportional gain for position control	21.7
$k_{i-p}$ [(A/s)/rad]	Integral gain for position control	718.2
$k_{d-p}$ [(A·s)/rad]	Differential gain for position control	0.153
$k_{p-c}$ [Ω]	Proportional gain for current control	1.13
$k_{i-c}$ [Ω/s]	Integral gain for current control	2854.3
$k_g$ [rad/mm]	Proportional gain to follow the ground (Simulation)	1.0
$k_g$ [rad/mm]	Proportional gain to follow the ground (Experiment)	0.8

## 第2章 地表に散在する物体拾得のための移動ロボットの設計

本章では、第1章の1.3節で述べたように、椿の実と種子を拾得作業の対象物として取り上げ、自動化を検討する。拾得作業分析から要求仕様および設計方針を立て、これに基づいた「地表に散在する物体拾得のための移動ロボット」の構成方法について述べる。

### 2.1 要求仕様の策定

#### 2.1.1 拾得作業分析と要求仕様および設計方針

本研究の拾得対象樹木であるヤブツバキ（学名・英名：Camellia japonica）の特徴について述べる。分類は常緑広葉樹、樹高は5–10[m]程度（剪定により低木化可能）である。樹形・枝は、直立性が強く上方に伸長しやすく、主幹が明確で側枝が放射状に分岐する。年成長量10–30[cm]程度であり、成長期間は比較的長い。実用段階（開花・結実）に至るまで10年以上を要する。発芽–幼木期（0–5年）、若木期（5–10年）、成木期（10–30年）、老木期（30年以上–数百年）と、産業利用のためには15年間隔以上のライフサイクル設計が必要となる。

Fig.2.1に示すように、椿の実の形状は、球形もしくは扁平形状である。成熟期は秋（9–11月）であり、例年9月頃が収穫時期である。複数の種子が内包された硬い外殻（以下、実と呼称する）が熟して爆ぜたものが拾得に適した状態である。樹木に実ったものよりも爆ぜて自然落果したもののほうが熟しており、より多くの油が採取できる。実と種子単独のものが混在して散乱した状態で拾得作業を行う。両方を区別なく拾得して後工程で選別を行う。椿油の搾油を目的とした場合、外殻は不要であるが、圃場整備のため拾得が必要となる。残渣としての外殻は、燃料や炭化材、園芸資材、工芸材料など多様に活用されている。乾燥・炭化することで消臭や土壌改良に用いられ、粉碎すればマルチング材や堆肥原料として利用可能である。近年では、バイオ炭や活性炭、粉体材料などのバイオマス資源としての研究も進められている。椿の実の殻は廃棄物ではなく、工程設計次第で付加価値を生む資源である。

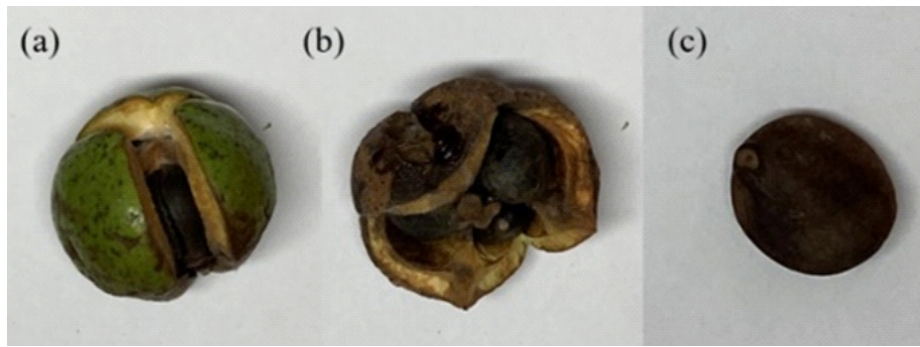


Fig. 2.1 States of camellia nuts and seeds ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

現地でのヒアリングに基づいた拾得作業の分析・要求仕様・ロボットの設計方針を Table 2.1 に示す。

Table 2.1 Requirements for collecting operations and robot design policy

項目	人手作業の特性と課題	要求仕様	ロボットの設計方針
拾得対象物の検知・近接	色・形・経験に基づき、手探りで探索。視認した順にランダムに拾得対象まで移動。種子は地面と同化しており視認困難。	-	椿の実、種子を検知しない。樹木をランドマークとして検出し、その周囲に被覆領域を形成
把持・拾得	実と種子を区別なく拾得、後工程で選別（殻は不要だが、圃場整備のため拾得）。種子は小さく拾得困難。	種子を極力、傷つけずに拾得すること	ロボットの移動に伴い拾得。エンドエフェクタを弾性体で構成し、種子の損傷を最小限に抑制
拾得量・作業速度	1日当たり約 60[kg]（実の状態では約 2,500 個）を拾得できることが熟練者の水準。人の歩行速度（平均）は約 4[km/h](=1.11[m/s])。	制限時間内に一定量の拾得を行うこと。1日当たり約 60[kg]（実で約 2,500 個）	積載重量は 100[kg] を確保。圃場条件によって、回収容器の荷下ろし作業を複数回想定。人の歩行速度同等とする（移動に伴い拾得するため、人手作業に対して優位）。
連続作業時間	4[kg] 程度の拾得あるいは 2 時間程度の拾得作業で多くの場合は疲労。	同上	バッテリー充電もしくは換装、複数台での作業で対応可能。
環境適応性	環境変化に柔軟に対応可能だが、視認困難時は効率低下。夜間作業は不可	日照変化、地形の起伏、落葉などの影響下でも安定して作業可能であること。	アーム角度制御により地表面の起伏に対応。夜間作業に関しては、将来的に機能拡張。

### 2.1.2 拾得対象物（椿の実，種子）の特徴

椿の実と種子の外観を Fig.2.1 に示す．農園では，(a)～(c) の状態が混在して地表面に散乱する．ここで，(a) 爆ぜ始めの状態，(b) 爆ぜ終えた状態，(c) 種子単独が殻から飛び出した状態をそれぞれ示す．椿の実は茶系の色味をしており，地表面と同系色のため識別が困難である．また，Table 2.2 に椿の実と種子の大きさと質量の例を示す．ここで，実物をサンプリングしたものを計測して得たデータから算出した統計量である．Table 2.2 の記号は Fig.2.1 に対応し，平均と標準偏差 ( $\mu \pm 2\sigma$ ) を表記する．Fig.2.2 に椿の実の度数分布および Q-Q プロット，Fig.2.3 に椿の種子の度数分布および Q-Q プロットを示す．いずれも正規性を示している．

Table 2.2 Size of camellia nuts and seeds ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

Parameter[Unit]	(a) , (b) Nuts N=36[pcs.]	(c) Seeds N=100[pcs.]
Ave. diameter[mm]	$\phi 42.9 \pm 21.4$	$\phi 14.7 \pm 9.3$
Max. diameter[mm]	$\phi 48.8 \pm 19.3$	$\phi 19.0 \pm 4.0$
Min. diameter[mm]	$\phi 37.1 \pm 10.6$	$\phi 10.4 \pm 3.0$
Weight[g]	$21.6 \pm 18.4$	$1.0 \pm 0.6$

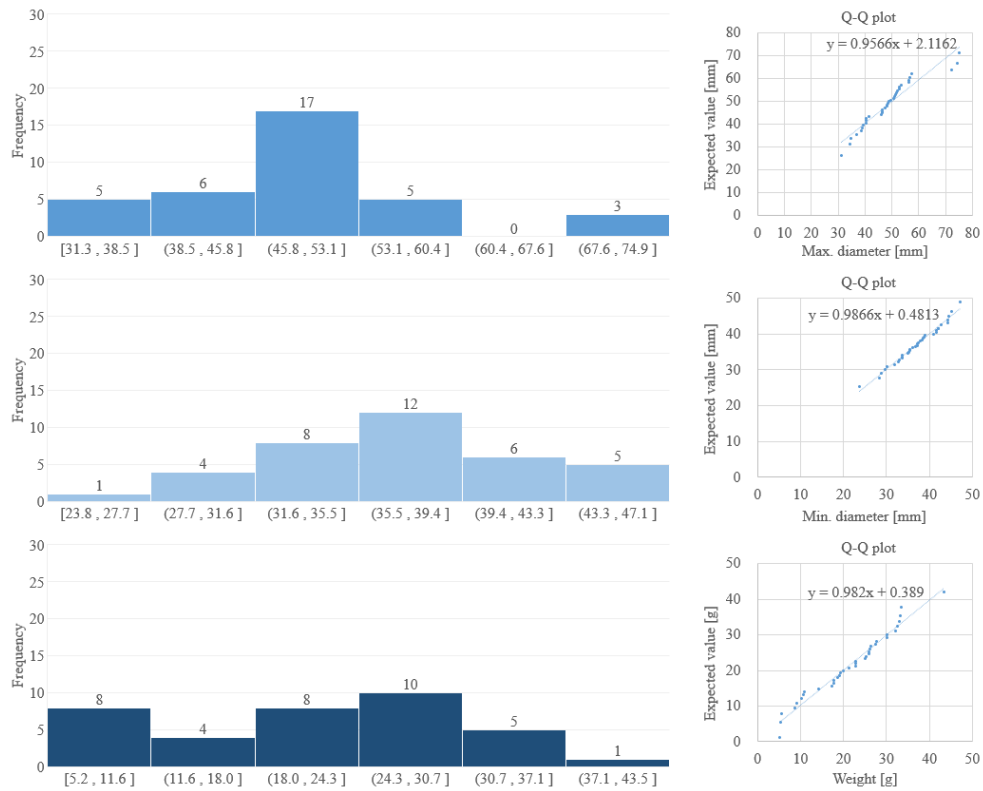


Fig. 2.2 Frequency distribution and Q-Q plot of camellia nuts

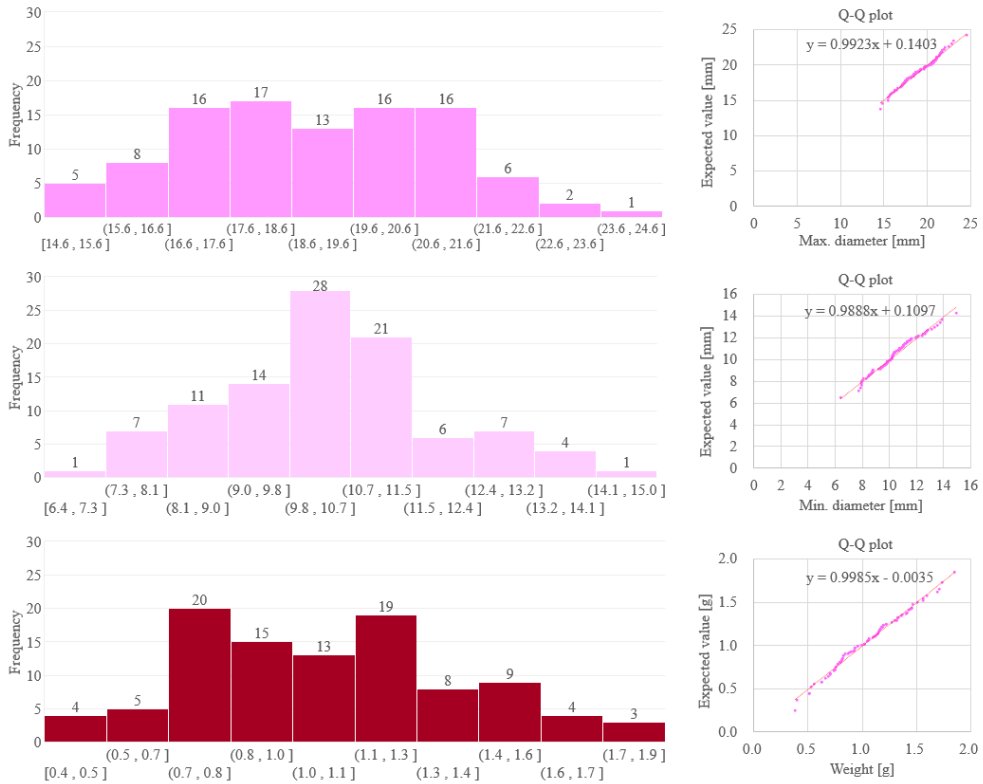


Fig. 2.3 Frequency distribution and Q-Q plot of camellia seeds

### 2.1.3 フィールドの想定と拾得作業時間分析による自動化効果試算

まず、人手作業による拾得作業に掛かる工数試算を行う。ここでは、椿油専業農家による生産が行われている伊豆諸島の利島を想定する。過去の生産量変動の最大値から、年間生産量20,000[L]の製油を仮定する<sup>[57]</sup>。

- 100,000[kg]の種子が必要（1[L]の椿油を得るのに必要な種子量は約5[kg/L]）<sup>[58]</sup>。
- 人手による拾得作業能率は、60[kg/日]（7.5[kg/hour]）が熟練者の水準
- 1人日を8時間として換算
- 利島の椿農家は、島全体で40軒程度<sup>[59]</sup>。

上記の条件を用いると、拾得工数は、41.7[人日/軒]と試算できる。

ロボットによる拾得作業の設計目標と仕様を設定し、作業時間の短縮を図る。圃場条件はTable 2.3のように仮定した。椿や栗の作目毎の圃场面積に関する統計データは存在しないため、果樹栽培の農家数と面積の平均値から、1戸あたり1.2[ha]と算出した<sup>[60]</sup>。植栽幅は4×4[m]、樹幹幅は2×2[m]、樹木数は750本、椿の実の個数を100個/本とした<sup>[61][62]</sup>。このときの拾得対象となる椿の実の総数は75,000個（2500[kg]）となる。Table 2.4とFig.2.4に樹木周辺のロボット経路計画を示す。Table 2.5にロボットの可搬重量と拾得した実の移載に要する時間を示す。

Table 2.3 Assumed working conditions in this study ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

Parameter[Unit]	Value
Camellia field area [ha]	1.2
Planting area [m × m]	4 × 4
Each tree trunk width area [m × m]	2 × 2
Total number of trees to be considered [pcs.]	750
Number of nuts per tree [pcs.] (Weight [kg])	100 (3)
Total number of nuts collected [pcs.] (Weight [kg])	75,000 (2,500)

Table 2.4 Path planning and motion planning parameters in this study in Fig.2.4 ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

Parameter[Unit]	Value
Entrance Distance (Non collecting) $d_1$ [m]	2.0
Collecting radius $r_1 / r_2 / r_3$ [m]	0.5 / 0.75 / 1.0
Exit Distance (Non collecting) $d_2$ [m]	2.0
Motion speed during collecting [m/s]	0.25
Motion speed during non collecting [m/s]	1.0
Collecting work time per each tree[s]	45.9



## 2.2 ロボットのコンセプトと全体構成

本研究では、大きく以下3つを基本コンセプトとして、堅果拾得ロボット（アーム付き移動ロボット）を設計製作した。製作したロボットの概観を Fig.2.5 に、基本仕様を Table 2.6 に示す。また、付録 A に詳細図面を示す。

1. 小型、低コスト、良好なメンテナンス性
2. 高い拾得効率：移動と同時に連続的に拾得できる籠型エンドエフェクタの採用
3. 不整地作業での高い機械剛性（振動や衝撃への耐性）と柔軟性の両立：アーム駆動系にウォームギアを利用することで高い機械剛性を確保する。また、エンドエフェクタ部をバネ付勢することで柔軟性を確保する。

日本の農地は中山間地や小規模圃場が多く、樹間を小回りで移動できる収穫ロボットが望まれる。機械サイズに関しては、樹間を通り抜けられ、小回りの利く機械幅 800[mm] 以下とした。また、公共空間での法的制約、安全性確保、参入障壁を下げるため、40[km/h] 以下で走行する超小型モビリティ型 LSV (Low Speed Vehicle) の範囲 (1,500[mm] 以下の車幅) に収めることが望ましい<sup>[63]</sup>。地表面の物体を拾得するロボットの移動機構の方式としては、車輪型、クローラ型、多脚型、ハイブリッド型、全方向移動型などがある<sup>[64]-[68]</sup>。車輪型は構造が簡単で軽量、高速走行が可能であり、制御も容易である反面、不整地での走行性能や段差越え能力に劣る。クローラ型は高い不整地走破性と安定性を有し、段差や軟弱地盤に強いが、機構が重くエネルギー効率が低く、小回りが苦手である。多脚式は高い地形適応性を持ち、障害物越えや柔らかい地面での走行に優れるが、機構と制御が複雑で移動速度が遅く、高コストである。ハイブリッド型は高速走行と障害物越えの両立が可能であるが、複雑化と重量増加が課題である<sup>[69]</sup>。全方向移動型は小回り性能に優れるが、オムニホイールやメカナム機構によるものは不整地や段差での性能が低下する。不整地に対応したものも存在するが構成が複雑で高コストである<sup>[70]-[72]</sup>。屋外農場における堅果拾得作業では、走行速度、構造の簡易性、エネルギー効率、メンテナンス性の観点から総合的に判断すると、車輪型が最も適している。椿農園の路面状態を確認したところ、市販されている屋外走行を考慮した電動車いす同等の登坂性能 (12° 前後)・段差乗り越え性能 (約 5~7[cm]) を有していれば十分と判断した。これは、中山間地域の緩傾斜地域 (斜度 8~15°) に対しても遜色ない。耕作地のような軟地面ではないため、土壌条件は考慮しない。また、街路樹付近の拾得作業への対応も考慮し、舗装された路面での走行性能と両立させるため、車輪型が適していると判断した。また、駆動方式としては、機構が比較的簡単で低コストである差動二輪型 (前輪が左右独立駆動) とした。超信地旋回も可能であり、小回りも利く。

本ロボットは主に、移動体、回収容器、アーム、エンドエフェクタおよびベースフレームから構成される。移動に伴い、地表面に散乱した物体を、ベースフレームに支持されたエンドエフェクタにより拾得する。エンドエフェクタ内部に格納された物体を、移動体に付設された回収容器に移載する。エンドエフェクタは、複数のワイヤを籠状に張ることで構成され、地面に

押し当て従動回転することにより物体を拾得する。このエンドエフェクタは、ベースフレームの支持シャフトに対して回転可能である。これに連結された棒状の部材からなるアームを左右に一对設ける。回収容器は、上面開口の箱形状を有し、移動体に着脱可能であり、移動体から取り外して、拾得した物体を外部に取り出すことができる。また、回収容器の内部には、エンドエフェクタに対応した所定位置にワイヤを開くための突起状部を配備する。

Table 2.6 に示した起伏に対する仕様について述べる。最大段差高さに関しては、移動機構は車輪半径、エンドエフェクタは揺動高さがそれぞれ律速となる。第3章で後述する接触力制御によって、地表面からのベースフレーム高さを起伏によって変更可能となるため、実質的には車輪半径程度までの起伏対応能力を有する。また、姿勢変動に関しては、ピッチ角とロール角に分けて定義した。ピッチ角はホイールベースが律速となる。ロール角は、移動機構に関しては車輪径・車両トレッド、拾得機構に関してはエンドエフェクタのトレッドがそれぞれ律速となる。第3章で後述する接触力制御において、進行方向の凹凸の粒度に対する追従性能、すなわち、凹凸空間波長 $\lambda$ を、起伏が空間的に一周期繰り返される距離として定義する。ロボットが速度 $v$ で移動する場合、凹凸に起因する外乱周波数は $f = v/\lambda$ で与えられ、制御帯域との関係から凹凸追従性能が評価される。

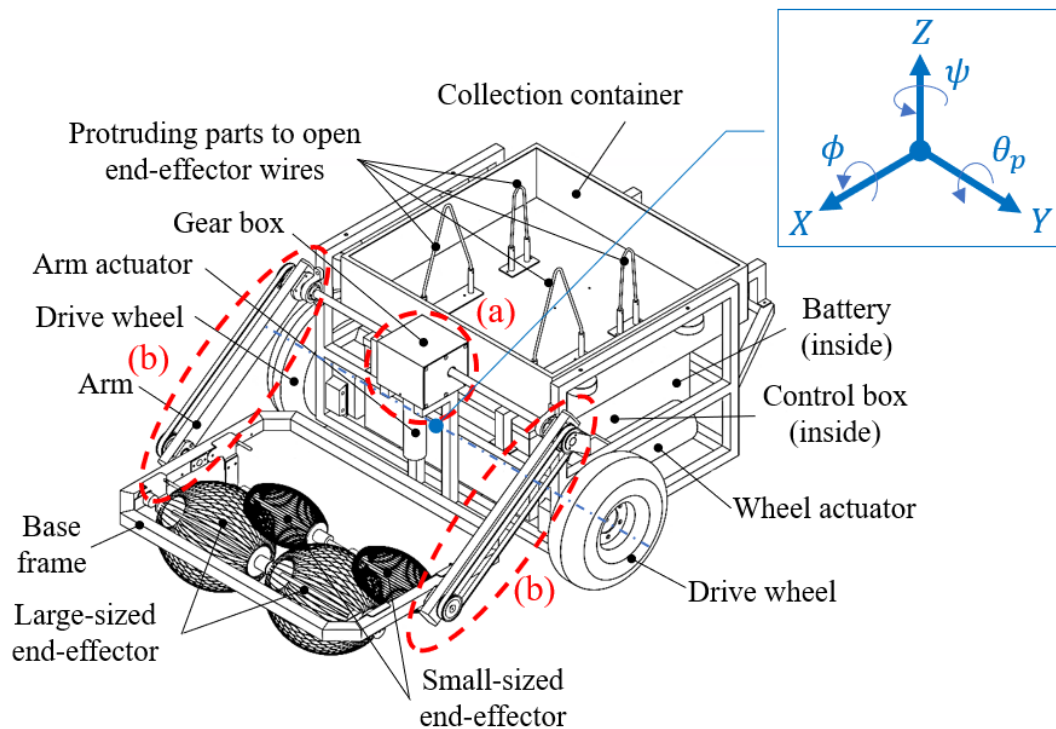


Fig. 2.5 Structure of the proposed robot ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

Table 2.6 Specifications of the proposed robot ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

Parameter[Unit]	Value	Notes
Mass[kg]	72	
Size (L x W x H) [mm]	765 x 796 x 650	
Max. size (L x W x H) [mm]	1292 x 796 x 800	
Drive wheels radius[mm]	130	
Caster wheel radius[mm]	76.5	
Wheel distance[mm]	512	
Tread[mm]	716	
Max. velocity[m/s]	1.67	
Max. angular velocity[deg/s]	180	
Max. payload [kg]	100	
Collecting accuracy [mm]	$\phi 5 - \phi 60$	
O1 (motor shaft)	-	
O2 (active joint)	-	
O3, O4, O4', O5, O5' (passive joint)	-	
Maximum Step Height (Movement Mechanism)[mm]	$h \leq 130$	Wheel radius is rate-limiting
Maximum Step Height (Collecting Mechanism)[mm]	$\pm 19.4$	End-effector swing height is rate-limiting
Pitch Angle Variation[ $^{\circ}$ ]	$\leq \pm 14.3^{\circ}$	Wheelbase is rate-limiting
Roll Angle Variation (Movement Mechanism)[ $^{\circ}$ ]	$\leq \pm 10.3^{\circ}$	Wheel diameter and vehicle tread are rate-limiting
Roll Angle Variation (Collecting Mechanism)[ $^{\circ}$ ]	$\leq \pm 4^{\circ}$	Large end-effector tread is rate-limiting
Undulating Space Wavelength $\lambda$ [mm]	$\lambda \geq v/15.7$ ( $\lambda \geq 15.9$ )	Control bandwidth 15.7[Hz] (For collecting speed $v=0.25$ [m/s])
Function Guarantee[N]	$22 \pm 2.5$	Under uneven terrain conditions

拾得動作の流れを Fig.2.6 に示す. (a) 拾得位置にベースフレームを配置した状態において, 移動に伴いエンドエフェクタにより地面の物体が拾得される. (b) 一定量の物体がエンドエフェクタに格納された後に, アーム駆動によって, 地面から離れ, 矢印 DR1 方向に回転する. (c) ベースフレームが回収容器の直上に配置された状態となり, エンドエフェクタのワイヤ間が突起状部材によって開口され, 物体が回収容器に移載される. その後, 矢印 DR1 方向とは逆方向にアームが回転し, 物体が引き続き拾得される. 上述した一連の動作は, 回収容器に移載された物体が所定量に達するまで繰り返される. このように, 本ロボットの機構は, 物体の拾得を低駆動源かつ簡素な構成で行う実現性の高いものである. また, エンドエフェクタが回転自在なため, 地表面の起伏に対して柔軟に物体を拾得できる.

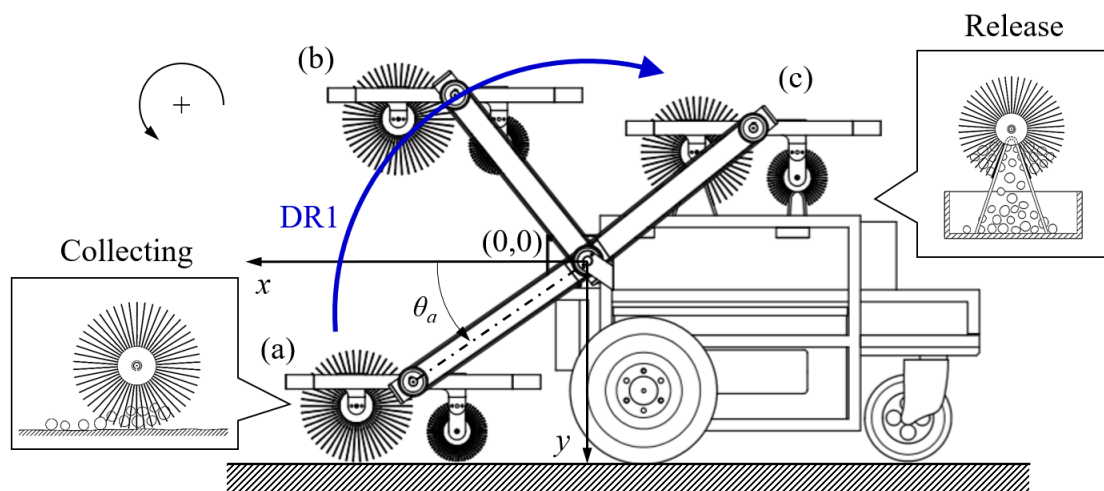


Fig. 2.6 Transfer operation of collected objects ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

本装置の制御機器の構成図を Fig.2.7, 外観写真を Fig.2.8 に示す. 制御部, IMU (慣性計測装置) 付き GPS モジュール, バッテリー等を移動体フレームの下端に格納した. 制御部には, 高性能なエッジ AI コンピュータである Jetson AGX Xavier を用いた. 高性能な CPU (8 コア Carmel ARM v8.2), GPU (512 の CUDA コア・64 基の Tensor コア) を搭載し, 画像認識・経路計画などの深層学習推論をリアルタイムに処理できる. また, PCIe, MIPI CSI, CAN, GPIO など多様な I/O を標準でサポートし, カメラやモータ制御基板との接続が容易であり, 各種センサ・制御との統合性に優れる. 車輪, アームなどの下位層の制御に関しては, Arduino UNO を用いた. Jetson AGX Xavier に対し, 外部 PC からリモートアクセスすることで遠隔操縦も可能である. IMU 付き GPS モジュールは, 駆動輪の車軸中心に配置されており, 移動体の 3 軸方向の加速度および傾斜角を検出可能である. また, リチウムイオン電池を動力源とし, 安全性を考慮して直流 24[V] であり, 一般的な鉛蓄電池よりも小型・軽量で, 急速充電が可能なものを選定した. 以下, 構成要素の仕様を Table 2.7~2.17 および Fig.2.9~2.11 に示す.

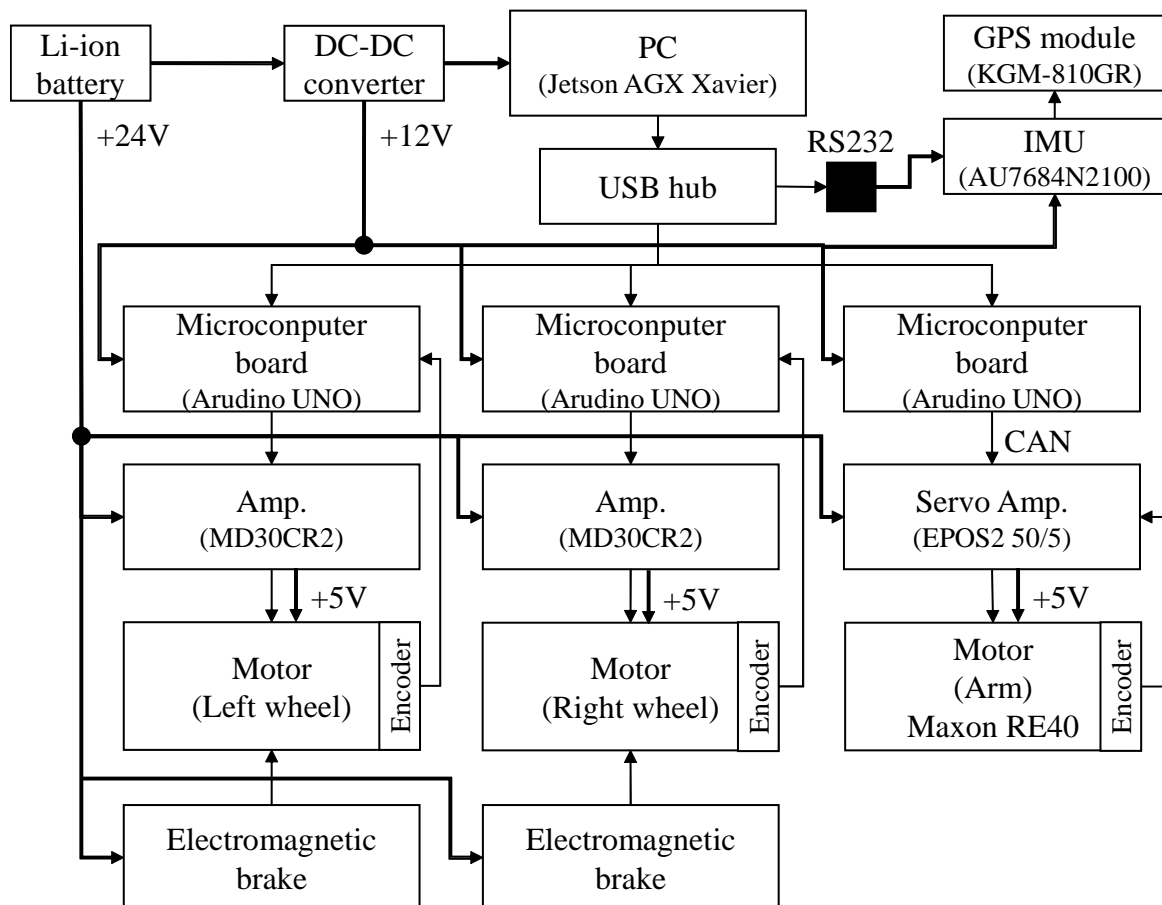


Fig. 2.7 Structure of control units

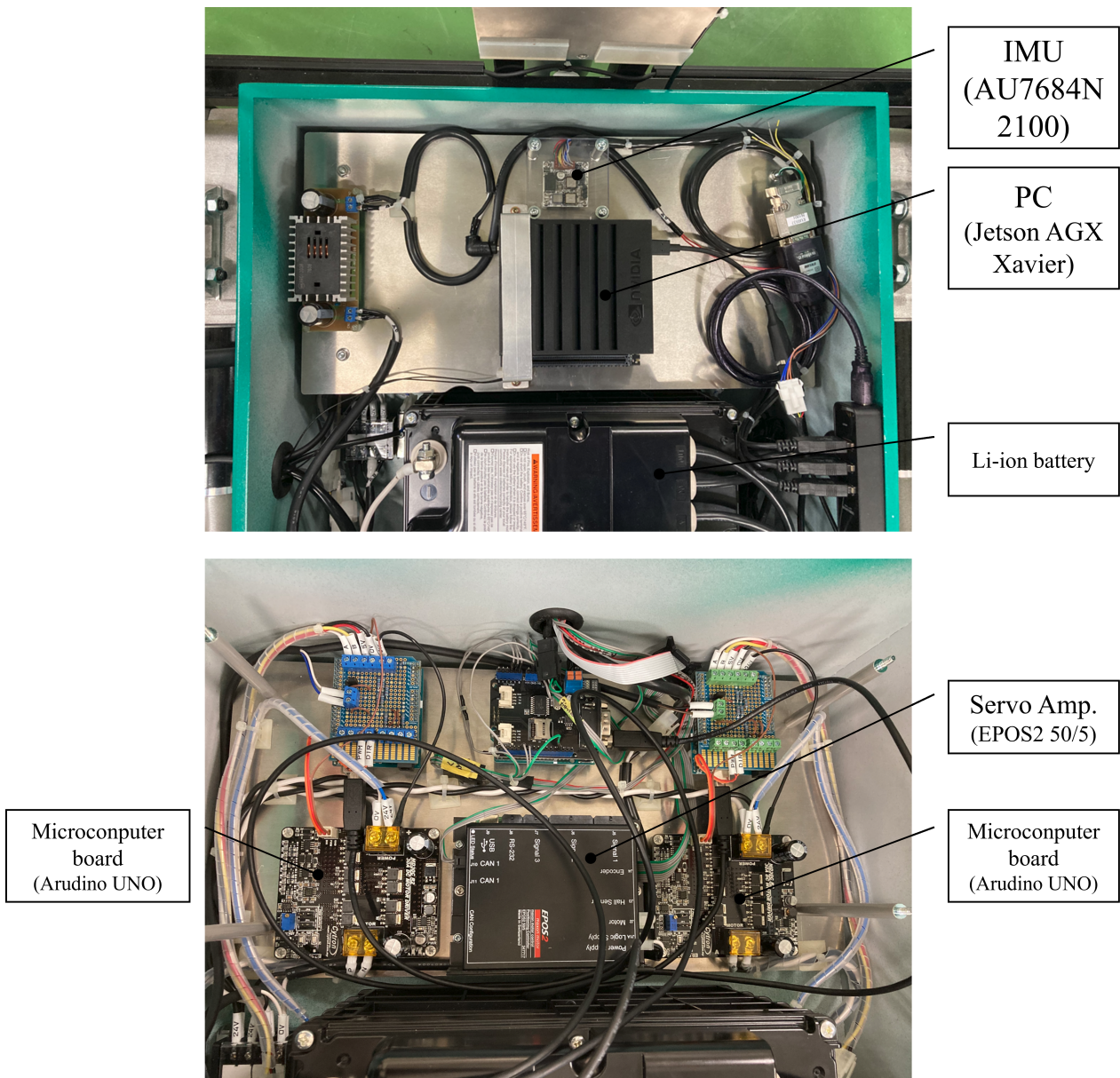


Fig. 2.8 Photo of control units

Table 2.7 Specifications for Single-Board Computer

Manufacturer	NVIDIA
Model	Jetson AGX Xavier
GPU	512 NVIDIA CUDA cores and 64 Tensor cores
CPU	8-core NVIDIA Carmel Armv8.2 64-bit CPU 8MB L2 + 4MB L3
Memory	64GB 256-bit LPDDR4x 136.5GB/s
Storage	32GB eMMC 5.1
Number of members	1[pcs.]

Table 2.8 Specifications for Li-ion battery

Manufacturer	TOSHIBA
Model	SIP24-23(FP01101MCB01A)
Nominal Voltage	DC25.3[V]
Rated capacity	556[Wh](22[Ah])
Maximum Allowable Current	125[A](200[s])
Number of members	1[pcs.]

Table 2.9 Specifications for Wheel Drive Motor

Manufacturer	SIGMA GIKEN
Model	SCM3-28-L(TD3293G-250L)
Nominal Voltage/Current	DC24[V] / 6.9[A]
Gear ratio	1:28
Number of members	2[pcs.]



Fig. 2.9 Photo of wheel drive motor

Table 2.10 Specifications for Arm Control Motor Driver

Manufacturer	Maxon
Model	EPOS2 50/5 (347717)
Nominal Voltage/Current	DC11 to 50[V] / 5[A]
Number of members	1[pcs.]

Table 2.11 Specifications for Arm Drive Motor

Manufacturer	Maxon
Model	RE40 (148867)
Outer diameter	$\phi 40$ [mm]
Output power	150[W]
Nominal voltage	24[V]
No-load speed	7580[rpm]
Maximum continuous torque	177[mNm]
Torque constant of motor for arm control	0.0302[Nm/A]
Mechanical time constant	4.67[ms]
Number of members	1[pcs.]

Table 2.12 Specifications for Motor Encoder

Manufacturer	Maxon
Model	MR (225785)
Count/Rotation(Resolution)	512
Number of Channels	3
Line Driver	Yes
Number of members	1[pcs.]

Table 2.13 Specifications for Motor Gear-head

Manufacturer	Maxon
Model	GP42C(203120)
Outer diameter	$\phi 42$ [mm]
Gear ratio	1:43 (42.875)
Maximum continuous torque	15[Nm]
Number of members	1[pcs.]

Table 2.14 Specifications for Worm gear

Manufacturer	Misumi
Model	Worm Gear: W6SR1-B Worm Wheel: G2A20R1-15
Gear ratio	20
Number of members	1[set]

Table 2.15 Specifications for Potentiometer

Manufacturer	SENSATEC
Model	ELV-24
Outer diameter	φ24[mm]
Power supply voltage	DC5[V] ± 10 %
Output Voltage	DC 0.02 to 4.95[V] ± 1 % FS
Detection angle range	360° (Endless)
Number of members	Arm drive unit : 1[pcs.] End effector unit : 2[pcs.]

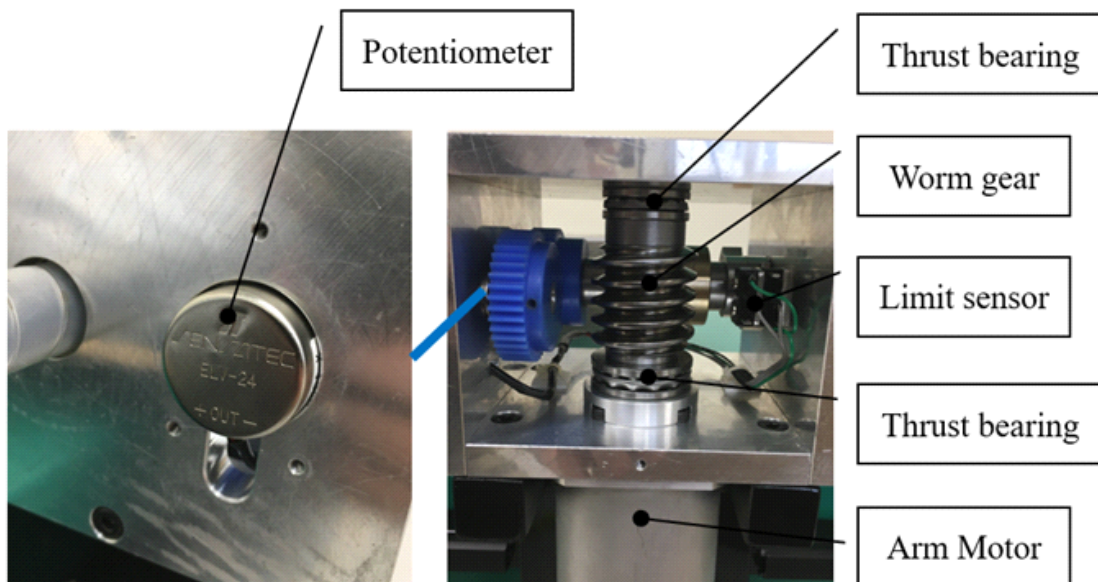


Fig. 2.10 Photo of Arm Drive Unit

Table 2.16 Specifications for IMU module

Manufacturer	TAMAGAWA SEIKI Co., Ltd.
Model	AU7684N2100
Power supply voltage	DC8 to 28[V]
Angular velocity detection range	± 200[deg/sec.]
Acceleration detection range	± 29.4[m/s <sup>2</sup> ] (± 3G) ± 58.8[m/s <sup>2</sup> ] (± 6G)
Number of members	1[pcs.]

Table 2.17 Specifications for GPS module

Manufacturer	Position Co., Ltd.
Model	KGM 810GRB1 PS 917
Supported GNSS	GPS/GLONASS/BeiDou/Galileo/SBAS/QZSS
Receiver Power	Acquisition: -148[dBm] (GPS) Tracking: -168[dBm] (GPS)
Initial Positioning Time	Cold Start: 40[sec.] (typ.) Warm Start: 35[sec.] (typ.) Hot Start: 3[sec.] (typ.)
Tracking Performance	Altitude: 18,000[m] or less Speed: 1,800[km/h] or less Acceleration: 2g or less
Number of members	1[pcs.] End effector unit:2[pcs.]

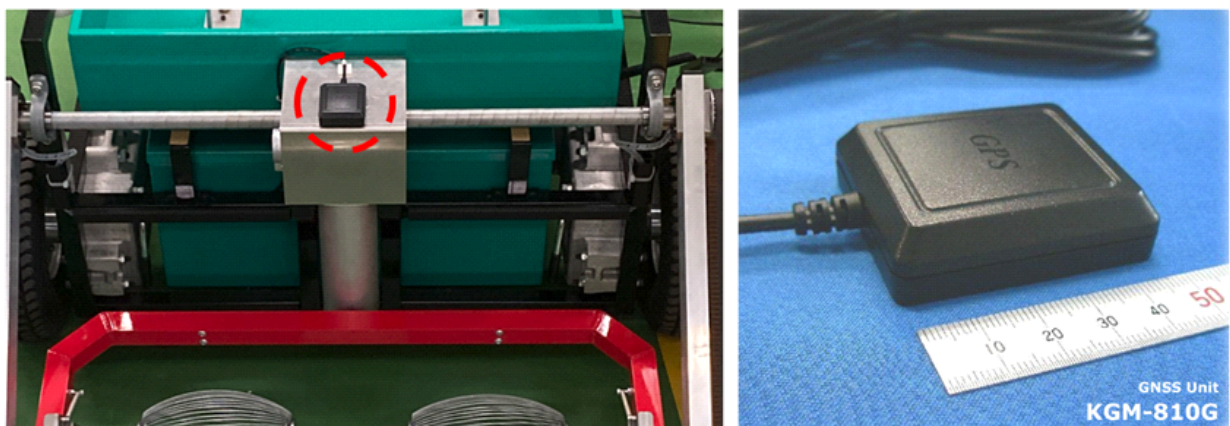


Fig. 2.11 Photo of GPS module

## 2.3 拾得機構の設計

### 2.3.1 アーム機構

アームに連結されたベースフレームは、移動体フレームの一端を中心として回転可能であり、地表面との接触位置と回収容器への移載位置との間で揺動する。Fig.2.12(a)に、アームの駆動伝達部を示す。アーム駆動モータの出力軸  $O1$  にウォームが固定され、ウォームギアを介して伝達シャフトを駆動し、 $O2$  を回転軸としてアームを回転させる。ここで、ウォームをスラストベアリングで挟持することにより、スラスト荷重を支えている。駆動伝達機構の一部にウォームを含めることにより、大きな減速比および回転トルクが得られ、アームによる重量物の揚上が可能となる。また、ウォームによるセルフロックが働く。ウォームギアが所定の角度で機械的に保持されるため、他のロック手段等を設ける必要がなく、本質的に安全である。さらに、伝達シャフトに取り付けられた偏心カムおよびアーム回転角上下限検知センサにより、アームの可動域に制限を設け、安全に配慮している。ここで、ウォームのセルフロック条件について補足する。ウォームギアは、入力側のねじ状のウォームが回転することでウォームホイールを駆動する構成を持つ。セルフロックとは、出力側のウォームホイールに回転力をかけても、入力側のウォームが逆駆動しない現象である。ウォームとウォームホイール間の接線力  $F_{t1}$  は以下の式で表される<sup>[73]</sup>。

$$F_{t1} = F_n(\cos \alpha_n \cdot \sin \gamma - \mu \cos \gamma) \quad (2.1)$$

ここで、 $F_n$  は法線力、 $\alpha_n$  は歯直角圧力角、 $\gamma$  はリード角、 $\mu$  は摩擦係数である。 $F_{t1}$  が0より大きい場合はセルフロックしない。すなわち、リード角が小さく、静摩擦係数が大きいほど、セルフロックが作用する可能性が高まる。ただし、 $\mu$  は、潤滑状況、歯面粗さ、衝撃・振動など多くの要因に影響を受ける不確定要素であるため、必ずしも理論どおりとはならない。一般的には、一条のウォームでリード角  $4^\circ$  以下でセルフロックが作用するとされている。本ロボットにおいては、条数は一条、リード角  $3^\circ 42'$  のウォームを採用している。

上述の利点の一方で、ウォームギアの減速比が大きいため、アーム駆動用モータにエンコーダを直結する方式では、アームの回転角度を精度よく検出することが困難である。このため、出力側である伝達シャフトにアームの回転角度検出用ポテンシオメータを設けた。これにより、アームの回転角度を精度よく検出することが可能となる。

Fig.2.12(b)に示すように、伝達シャフト側とベースフレーム側のそれぞれにプーリを設置し、タイミングベルトで連動する（ベースフレームがアームに対して相対的に回転軸  $O3$  を中心に回転する）。プーリの回転を同期させることでアームの回転角全域において、ベースフレームを水平に維持できる。これにより、回収容器への移載時に、ベースフレームを裏返す動作が不要になり、アーム駆動機構に加わる負荷を大幅に軽減できる。

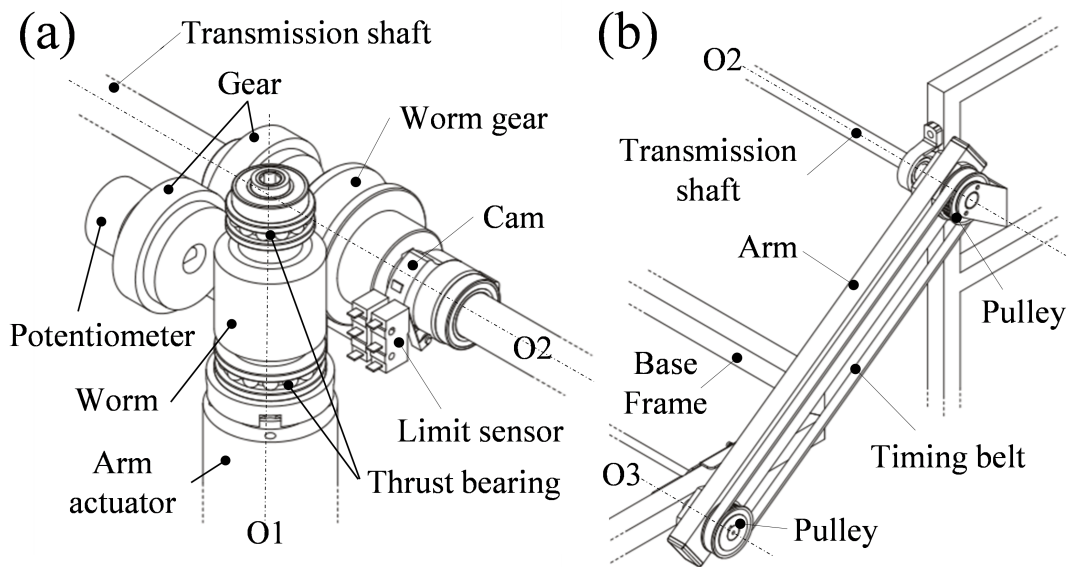


Fig. 2.12 Drive transmission mechanism ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

本ロボットは減速比が大きいウォームを用いており、アーム駆動系は、荷重・重力・バネの反力の影響を受けない（無視できるほど小さい）。付録Bにアーム機構の駆動設計について説明する。

アーム駆動用モータに加わる負荷トルクを印加電流値から推定することで、エンドエフェクタに格納された物体の重量を検出できる。エンドエフェクタの積載量のアーム制御性能への影響を確認するために、Fig.2.13に示すように、アーム先端のベースフレーム部分に拾得物体を想定した0, 3, 6[kg]相当の錘をそれぞれ載せた水準にて動作させた。Fig.2.6に示す揚上方向DR1にアームに位置指令を与えたときのアーム角度変化と負荷トルク（印加電流値から推定）の変動をFig.2.14に示す。Fig.2.14(b)の1~4[s]の区間（丸枠部）のトルクの平均値は、搬送物重量が0[kg]のときに-40.5[N·m], 3[kg]のときに-64.2[N·m], 6[kg]のときに-89.4[N·m]であった。これらアームを昇降させたときのトルクの平均値からエンドエフェクタ内の格納重量を推定し、回収容器から物体を取り出すタイミングを判断できる。モータトルクは、以下のように計算することができる。ここで、Table 1.2のパラメータリストに記号と値の一覧を示す。

$$\tau_m = Current \cdot k_t \cdot \eta \cdot G_1 \cdot G_2 \quad (2.2)$$

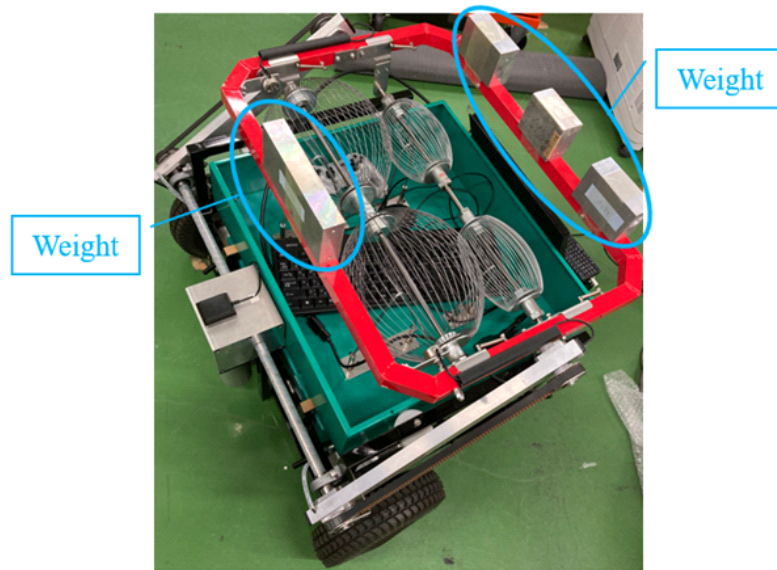


Fig. 2.13 Weight mounting on arm

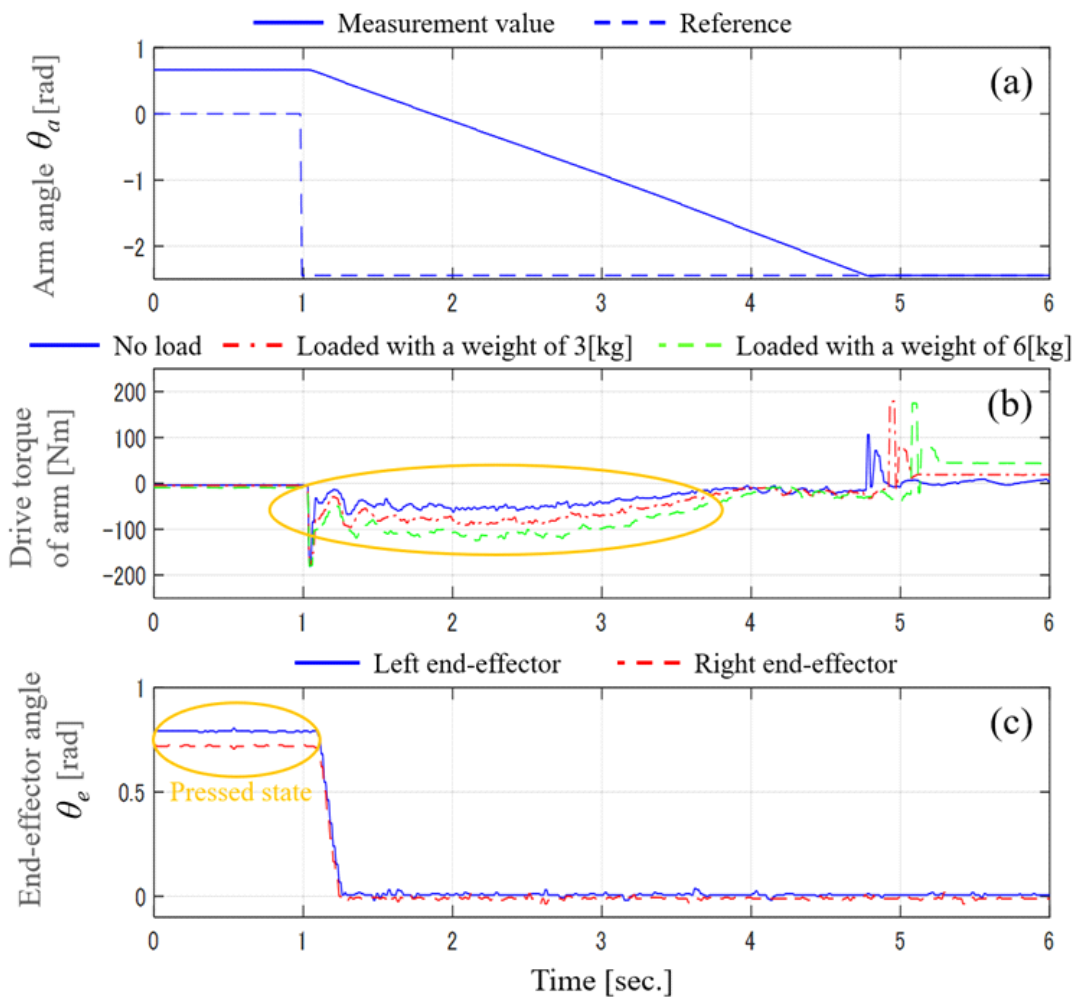


Fig. 2.14 Motor drive torque and end-effector angle for different load weight

### 2.3.2 エンドエフェクタ機構

収穫機構のエンドエフェクタの機構の方式には、吸引型、針刺し型、粘着シート型、ソフトロボティクス型、フィンガーグripper型などがある。吸引型は幅広い形状に対応可能であるが、表面が粗い物体や湿った環境では吸着力が低下し、異物混入による性能低下が起こりやすい<sup>[74]</sup>。清掃ロボットにみられるスパー方式はゴミを吸引するためにコンプレッサーを駆動源としたバキュームを用いているが、装置の大型化、騒音などの課題がある。針刺し型は柔らかい物も把持できるが、対象物に損傷を与えるため食品用途には不向きである<sup>[75]</sup>。粘着シート型は多様な形状を拾得可能で低エネルギーだが、砂や泥で粘着力が劣化しやすく、交換頻度が高い<sup>[76][77]</sup>。ソフトロボティクス型は柔らかい指状構造で包み込むため不定形物やサイズ差への適応性が高いが、空圧制御が必要で機構が複雑になる<sup>[78]-[80]</sup>。フィンガーグripperは、指状の機構で対象物を挟持する最も汎用的な方式である。構造が比較的単純で制御も容易であり、摩擦材やゴムパッドを付与すれば球体や滑りやすい対象も安定して把持できる。一方で、不定形や柔軟な物体では変形や滑落のリスクがあり、複数対象を同時に扱う効率性には限界がある<sup>[81][82]</sup>。

上記の得失を鑑みて、本装置は機械的な手段での物体拾得方式を採用している。本装置のエンドエフェクタの外観を Fig.2.15 に、主要寸法を Table 2.18 に示す。機能面での課題に加え、コスト、メンテナンス性、入手性も考慮して市販品を活用した<sup>[83]-[85]</sup>。このエンドエフェクタは、複数のワイヤと、一对のハブを有している。複数のワイヤが所定のピッチ間隔で並行するように張られた楕円体の籠形状を有する。両端是一对のハブに固定されている。一对のハブには、支持シャフトが貫通し、これによりエンドエフェクタは、回転軸 O4、O5 を中心として支持シャフトに対し回転可能である。

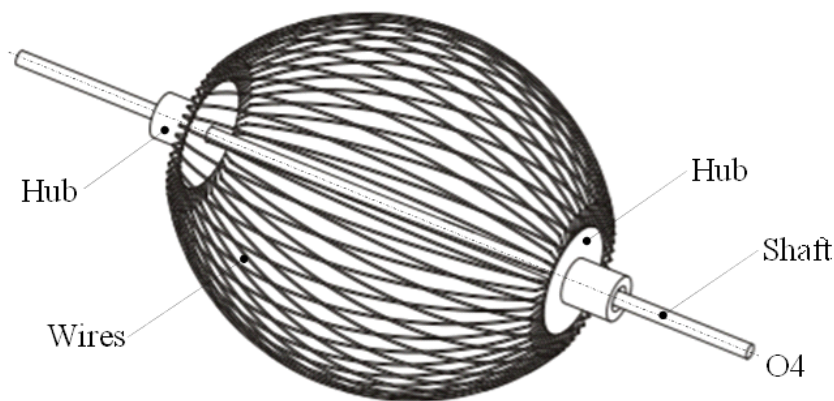


Fig. 2.15 Schematic of end-effector

Table 2.18 Specifications of end-effector ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

Parameter[Unit]	Large-sized end-effector	Small-sized end-effector
Mass[kg]	0.56	0.545
Number of wires[pcs.]	53	60
Wire diameter[mm]	$\phi 1.2$	$\phi 1.0$
Max. diameter[mm]	$\phi 192.4$	$\phi 102.4$
End diameter[mm]	$\phi 90$	$\phi 63$
Length[mm]	222	156
Nominal wire pitch[mm]	10	5
Max. wire pitch[mm]	90	40
Catalog specifications of object sizes that can be collected (Min.)	25.4	9.525
Catalog specifications of object sizes that can be collected (Max.)	50.8	25.4

Fig.2.16 に示すように、エンドエフェクタの下端と地表面との接触時には、ワイヤが弾性変形してラジアル方向に一時的に間隔が広がり、エンドエフェクタ内部に物体を逐次取り込むことができる。また、移動体が前方に向けて走行することに伴い、従動回転する。効果的に物体を拾得するためには、地面の起伏状態に関わらずに適切な力で、押し当てることが必要であり、バネ機構を設けた。回転軸 O4, O5 を形成する支持シャフトは、回転ブラケットに取り付けられている。回転ブラケットは、L 字状の形状を有しており、一方が支持シャフトに固定され、他方がベースフレームに取り付けられている。回転ブラケットは、回転軸 O4', O5' (軸支ピンが設けられた位置) 周りにベースフレームに対して揺動する。揺動方向は移動体の前進に対してトレイルとなるようにすることで地表面の起伏から受ける抗力を低減している。ここで、回転ブラケットには折り曲げ部がありベースフレームの上面に接触し機械的に、下側に動作制限する。これらにより、大きな起伏に対してもエフェクタを常に地面に押し付けることができる。

本ロボットは、約  $\phi 5 \sim 60$ [mm] の拾得物を対象とする。樁の実を約 2,500 個拾得すると、60[kg] 相当になる。大小 2 種のエンドエフェクタを用いる。大エンドエフェクタは実の拾得を、小エンドエフェクタは種子の拾得をそれぞれ担わせる。ワイヤ部が弾性変形によって開口した最大ピッチよりも、実と種子の最大径が小さくなるように設定しており、取り込みが可能である。また、ワイヤ部の通常ピッチよりも、実と種子のそれぞれにおける最小径が大きく、拾得後の脱落を防止する。大きな拾得物が小さなエンドエフェクタに入り込むと、網目を必要以上に拡げ、破損するため、ロボット進行方向の前側に大きなエンドエフェクタを配置することにより、これを防ぐ。種子は大きなエンドエフェクタの網目を擦り抜け、後方に配置された小さなエンドエフェクタで拾得する。Fig.2.17 に示すように、ワイヤ部が弾性変形によって開口した最大ピッチよりも実と種子の最大径が小さく、取り込みが可能である。また、ワイヤ部の通常ピッチよ

りも、実と種子のそれぞれにおける最小径が大きく、拾得後の脱落を防止できる。Table 2.18より、網目の間隔に関しては、通常時のピッチを拾得対象物の最小サイズの約0.4~0.6倍とすることが推奨される。また、最大ピッチは、拾得対象物の最大サイズの約1.5~1.8倍が推奨される。これらの網目の開口量との比率（ワイヤピッチ÷拾得対象物のサイズ）は、カタログ推奨値とも整合している<sup>[83]-[85]</sup>。回収容器への移載時にも最大ピッチと同程度となるような突起形状あるいは開口を拡げる差し込み量が必要である。その他、拾得対象物の形状としては球体もしくは楕円体が好ましく、ピッチに引っ掛かって目詰まりするものは適さない。また、硬度が高く、表面性状としては粘着性が低いものが推奨される。Fig.2.18に、本研究で拾得対象としている樺の実と種子以外の様々な堅果（栗、銀杏、ヘーゼルナッツ）の外形寸法の統計データを示す<sup>[86]-[89]</sup>。また、ゴルフボールなどの工業製品などに対しても、同一のエンドエフェクタ構成で対応できる。更に大きな拾得物に対しては、Fig.2.17に示すように、大きな水準のエンドエフェクタに置き換えることで対応することもできる。

押し付け力は、拾得対象物の最小サイズ以下のピッチ間隔となる力の大きさとなるように、ばね力および押し付け角度を調整することで対応できる。積載重量に関しては、アーム先端の機構重量と拾得物の重量の総和によるモーメントがアーム駆動力以下であれば、自由に設計できるものと考えた。

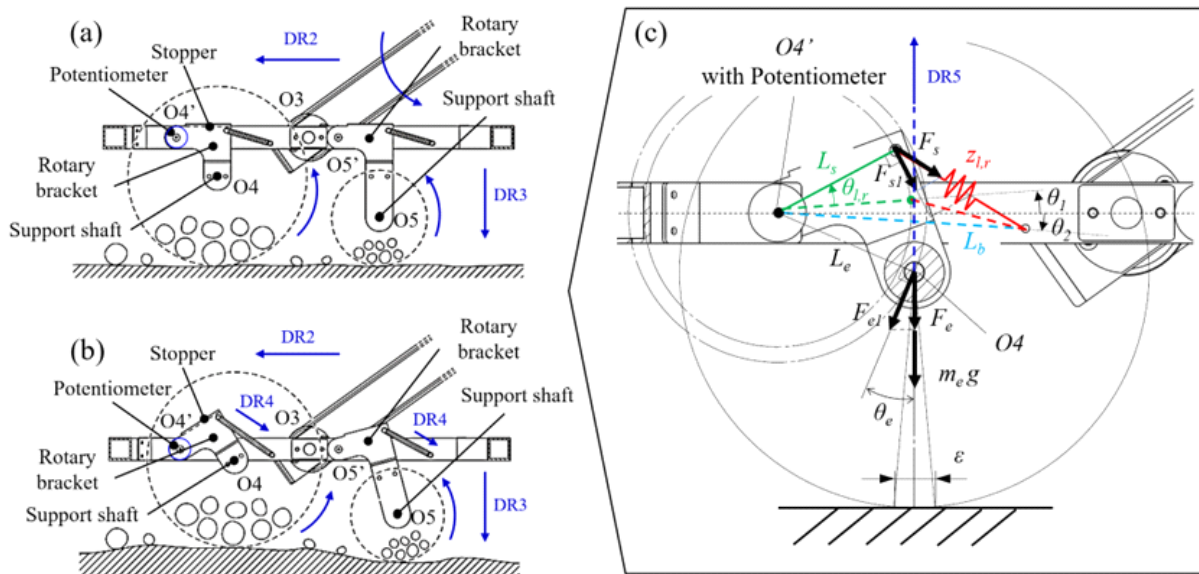
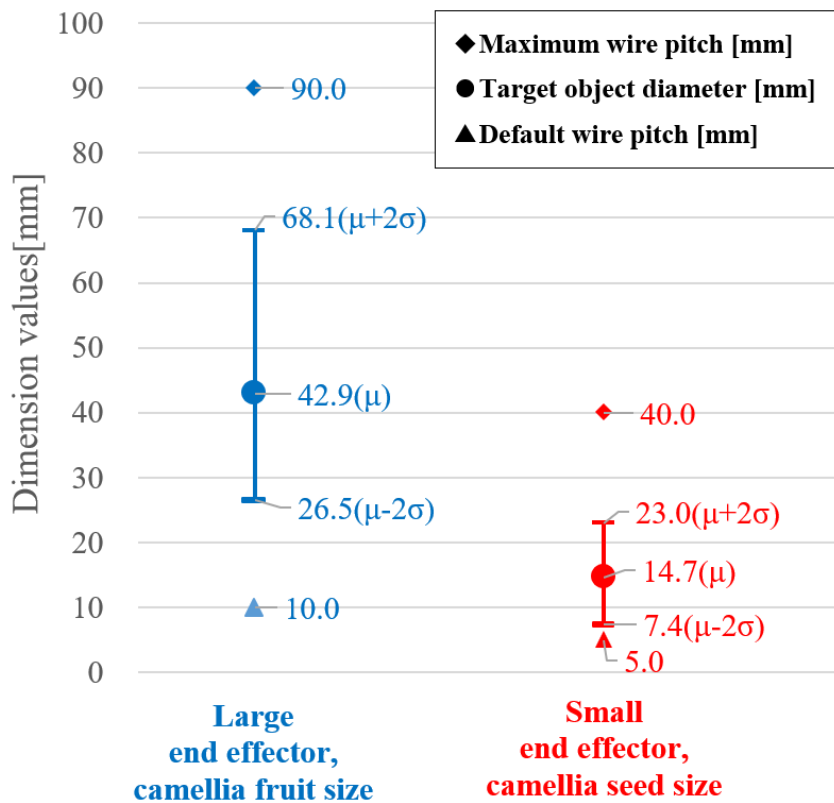






Fig. 2.16 Structure of an end effector with springs ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.



	End Effector Specifications						Target Object Size *Catalog Value		Camellia nuts and seed size ※Actual measurements		Example objects	Price [USD]
	Diameter [mm]	Width [mm]	Wire Diameter [mm]	Number of Wires [pcs.]	Pitch Min. [mm]	Pitch Max. [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]	Max. [mm]		
 Mini Nut Wizard	102	156	1	60	5	40	9.53	25.4	7.4	23	Most acorns (including white and black oak) Small and native pecans Hickory nuts (shagbark, bitternut, mockernut, water) Hazelnuts and filberts Crab apples Macadamia nuts	45
 Medium Nut Wizard	192	222	1.2	53	10	90	25.4	50.8	26.5	68.1	English walnuts and butternuts Large and paper shell pecans Red, chestnut, and bur oak acorns Shellbark hickory nuts Buckeyes and chestnuts Golf balls Shotgun hulls	57
 Large Nut Wizard	240	280	N/A	N/A	N/A	N/A	32	102			Black walnuts Sweet gum balls Apples and pears Magnolia seed heads	59
 Extra Large Nut Wizard	254	432	N/A	N/A	N/A	N/A	76	200			Pine Cones (Flared out >3") Chestnut Burs	85

0.52 1.57 0.68 1.74  
0.39 1.77 0.38 1.32

The min. pitch is recommended to be approximately 0.4 to 0.6 times the min.size of the target object.  
The max. pitch is recommended to be approximately 1.5 to 1.8 times the max. size of the target object.

Fig. 2.17 Relationship between end effector opening and the size of camellia nuts and seeds

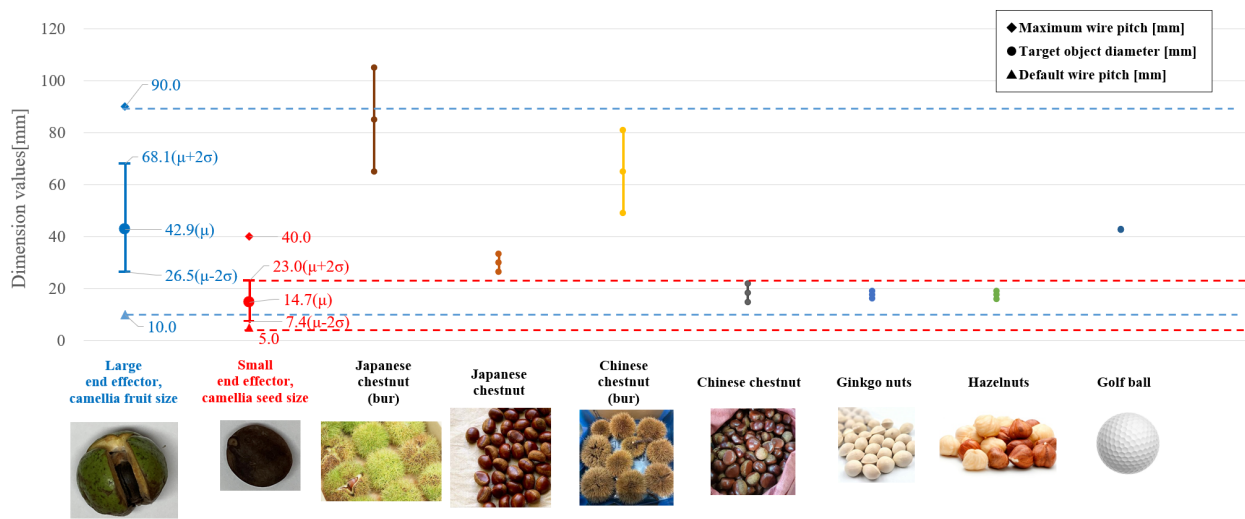


Fig. 2.18 Relationship between the opening amount of the end effector and the sizes of various target objects

本ロボットで用いたエンドエフェクタはロール方向の起伏に対しても配慮している。Fig.2.19にエンドエフェクタの形状とロール方向の対応角度を示す。Fig.2.19(a)に示すように、大エンドエフェクタは高さ約55[mm]、斜度約27°の起伏まで対応できる。Fig.2.19(b)に示すように、小エンドエフェクタは高さ約22[mm]、斜度約15°の起伏まで対応できる。

Fig.2.20にエンドエフェクタの保持構成のロール方向の対応角度を示す。ここで、ロボットを前方から見た投影図を示し、左端はエンドエフェクタを上限角度45°まで揺動させた位置、右端はエンドエフェクタを下限角度0°とした位置であり、ロール方向の左右差が最大となった状態を示す（左右のエンドエフェクタは同軸に保持されているが、リンクが左右別体となっており、個別に揺動する）。Fig.2.20(a)に示すように、大エンドエフェクタは斜度約4°の起伏まで対応できる。Fig.2.20(b)に示すように、小エンドエフェクタは斜度約5°の起伏まで対応できる。エンドエフェクタ形状を楕円体とすることで、様々な形体のロール方向の地表面の起伏に対しても曲線の一部が滑らかに点接触し、摩擦抵抗を低減することができる。もし、円筒形状とした場合には、角部が起伏に引っ掛かるなどして摩擦抵抗が増大することが考えられる。

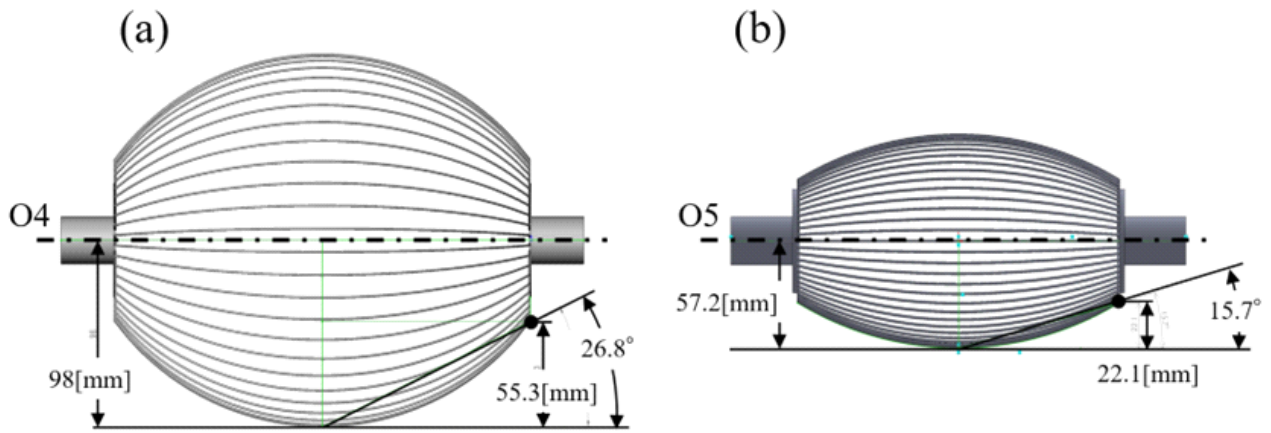


Fig. 2.19 Roll direction angle of the end effector shape

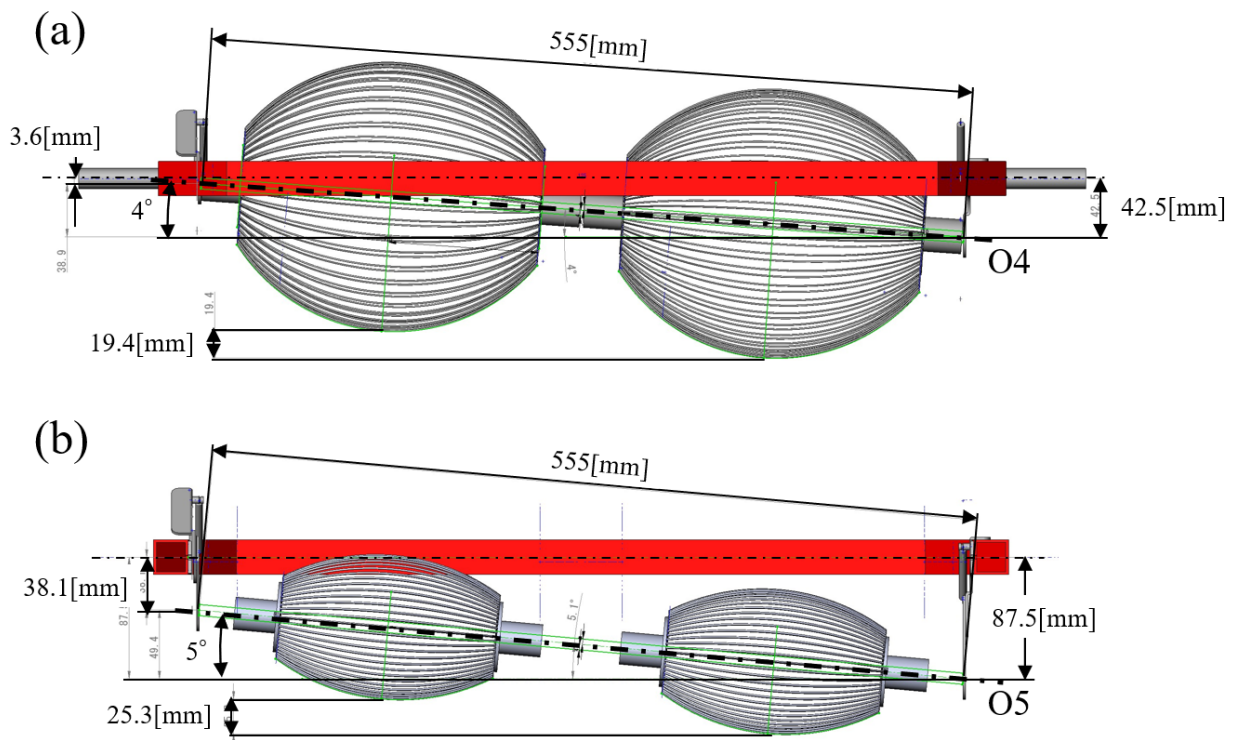


Fig. 2.20 Roll direction angle of the end effector holding configuration

## 2.4 エンドエフェクタの初期角度の決定

本ロボットは、市販品のエンドエフェクタ<sup>[83]-[85]</sup>を用いている。Fig.2.21(a)に示すように、作業者が柄を持って操作するように構成されたものである。作業者は、地表面へのエンドエフェクタの押し付け力、転動速度、進行方向を無意識的に調整する。すなわち、人間の知覚・判断を内包した適応系と考えられる、しかし、Fig.2.21(b)に示すように、例えば、操作者の身長差は操作時の姿勢および手元位置の違いとして現れる。この手元位置の違いは、ハンドルに入力される押し付け角度の差が地面に作用する法線力の変動に影響する。さらに同一操作者においても姿勢や歩行状態の変化により時間的に変動する。ここに、長時間の繰り返し操作による疲労・集中力低下などの不安定要素が加わる。拾得対象に合わせたツールの持ち替え動作時間なども加わる。すなわち、手動操作における押し付け力は、人の身体特性および動作に強く依存する確率変数として扱わざるを得ない。この押し付け力のばらつきは、拾得機構の挙動に直接影響を及ぼす。押し付け力が不足する場合には接触部が十分に地表に押し付けられず、拾得率が低下する。一方、過大な押し付け力は転がり抵抗や滑りを増大させ、操作性や作業効率を著しく損なう。したがって、手動操作では、拾得性能の再現性および安定性を確保することが困難である。押し付け力を制御可能な自動化機構の導入は、単なる省力化の手段ではなく、拾得性能の再現性と信頼性を確保するために重要であり、最適な押し付け力量と角度の指針を見出すことが望まれる。

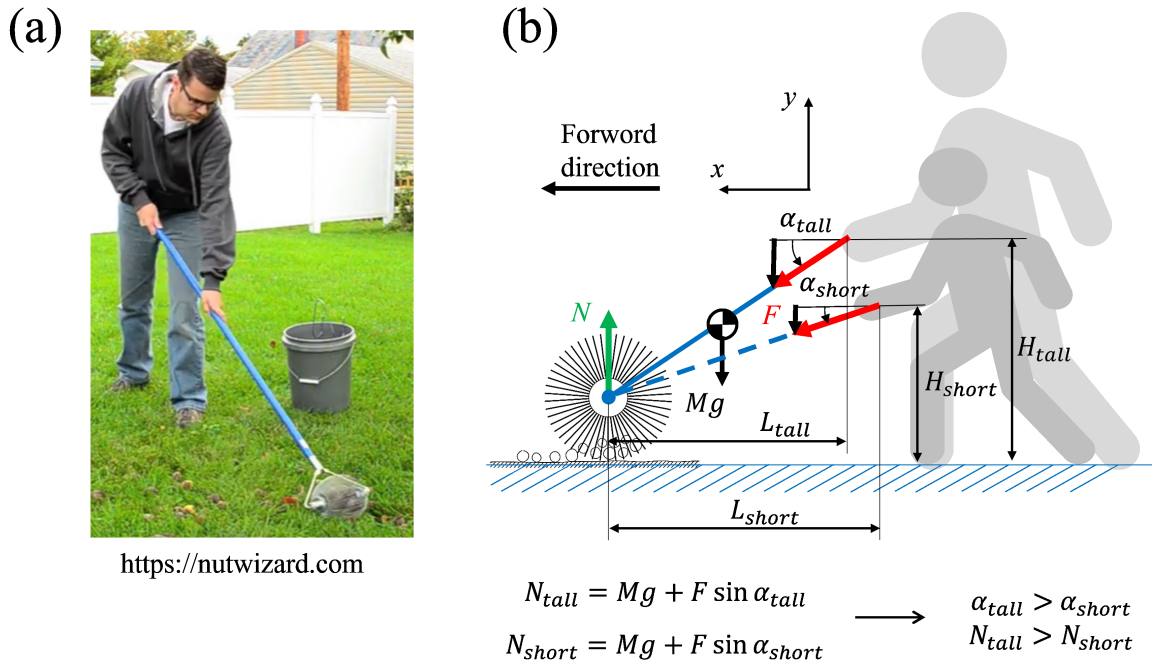


Fig. 2.21 Manual work using Nutwizard

そこで、地表面に対するエンドエフェクタの押し付け力を計測することで、物体拾得に適する角度設定値の範囲を実験的に求める。まず、エンドエフェクタ角度と地表面に対する押し付け力との関係を導出する。Fig.2.16(c)に力の作用状態を示す。引張ばねによる荷重は以下のように表せる。

$$F_s = k\delta + F_0 \quad (2.3)$$

ここで、 $k$ はバネ定数、 $\delta$ はバネの変位量、 $F_0$ は引張ばねにおける初期張力を表す。バネ設置側、エンドエフェクタ回転軸側の各々における接線方向の分力は、支点 $O4'$ 周りの各モーメントは同一と見なせるため、以下の関係が成り立つ。

$$L_s \cdot F_s \cos \theta_s = L_e \cdot F_e \cos \theta_e \quad (2.4)$$

(2.3), (2.4)式から、地表面に対するエンドエフェクタ回転軸側でのバネによる押付力が求められる。

$$F_e = \frac{L_s \cdot \cos \theta_s}{L_e \cdot \cos \theta_e} \cdot (k\delta + F_0) \quad (2.5)$$

ここにエンドエフェクタの自重 $m_e g$  ( $g$ は重力加速度)、エンドエフェクタ内の拾得物の重量 $m_p g$ が加わり、一軸あたりの押付力の総和は以下となる。

$$F'_e = N_s F_e + (N_e m_e + m_p)g \quad (2.6)$$

ここで、 $N_s$ はバネの個数、 $N_e$ はエンドエフェクタの個数を表す。

Fig.2.22 にエンドエフェクタ角度 $\theta_e$ と地表面に対する押圧力 $F'_e$ について、測定値を実線、(2.6)式による理論値を破線でそれぞれ示す。本構成では、 $N_s=N_e=2$ であり、エンドエフェクタエンドエフェクタ内の搬送物重量が0[kg]、すなわち、 $m_p=0$ として測定を行った。また、実験は、表面が平滑で硬質なフェロコン床（静摩擦係数0.77-0.78[-]、動摩擦係数0.62-0.72[-]で、滑りにくい床面）で行った。エンドエフェクタ角度 $\theta_e$ が所定の角度となるようにアーム駆動モータを制御した。計測方法をFig.2.23に示す。デジタルフォースゲージ（IMADA製：ZTS-50N）を用いて、回転軸 $O4$ を鉛直上方向（Fig.2.16(c)のDR5方向）に持ち上げ、床面と離れる瞬間の荷重を計測した。このときの引張方向は水平器を用いて調整した。測定値と理論値の傾向が一致しており、エンドエフェクタ角度の増加に伴って押圧力も増加している。加えて、エンドエフェクタの角度設定値を決定するための実験を行った。Fig.2.24にエンドエフェクタ角度 $\theta_e$ とエンドエフェクタと床面が接触している部分の網目の開口量 $\epsilon$ の関係を示す。実線は測定値であり、破線はTable 2.2に示した実と種子の最小直径（ $\mu-2\sigma$ ）である。開口量が大きすぎると取り零しや脱落があるため、拾得物体の大きさ以下に設定する。一方で、エンドエフェクタの初期角度は地表面と確実に接触する角度以上とする必要がある。本研究では、 $20^\circ \pm 15^\circ$ とすることが望ましいと判断した。ここで、機構の揺動限界角度は $45^\circ$ 程度である。

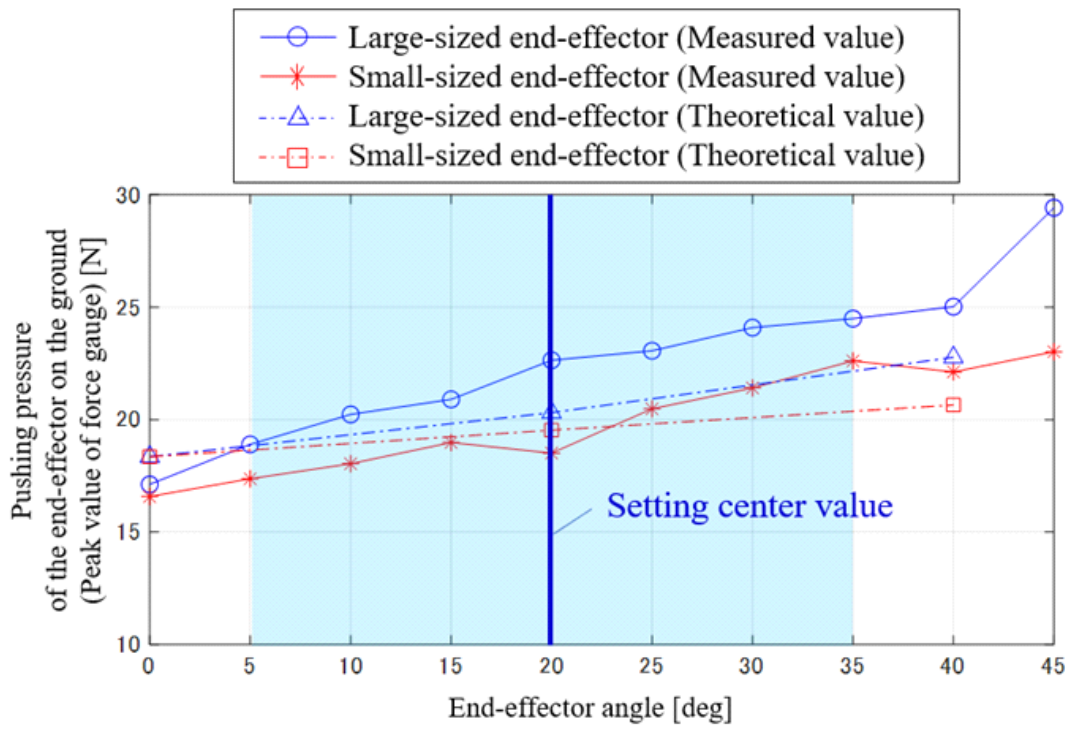


Fig. 2.22 Relationship between the rotational angle of the end-effector and contact force ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

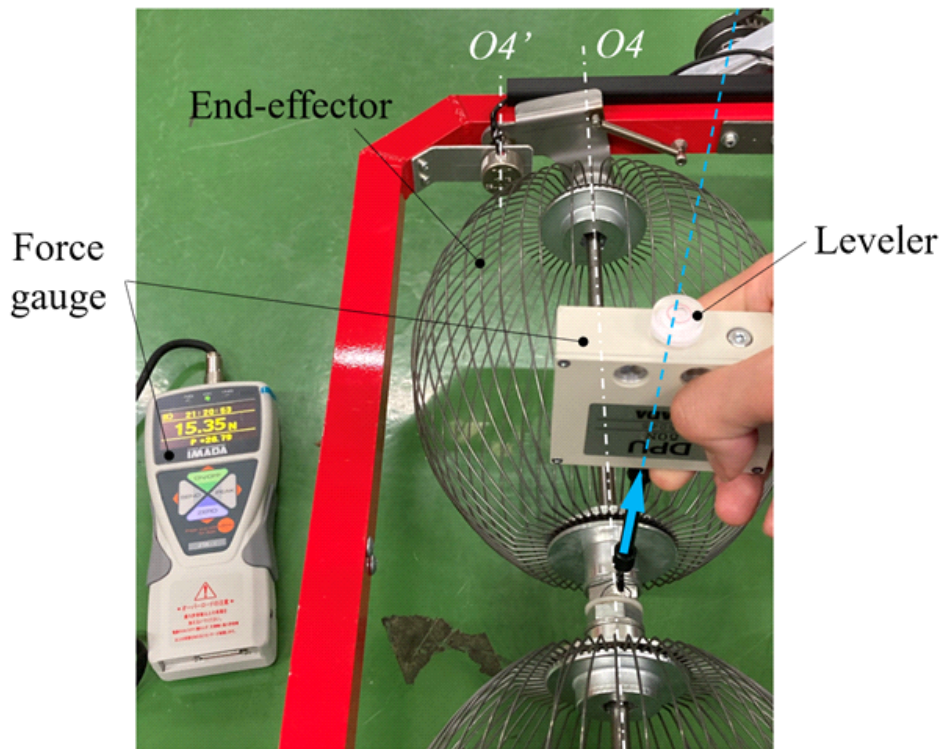


Fig. 2.23 Pressing force measurement method

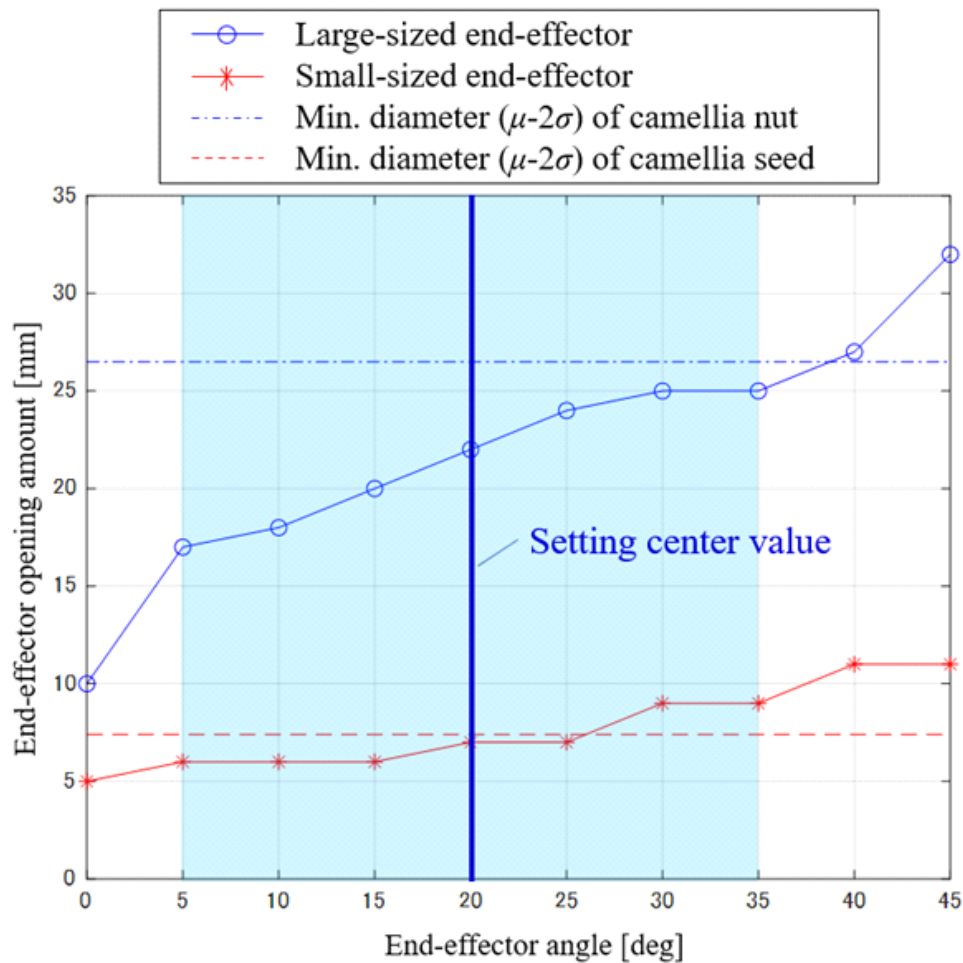


Fig. 2.24 Relationship between the rotational angle of the end-effector and wire opening amount ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

押し付け力とワイヤ開口量の関係式を示す。エンドエフェクタの寸法は Table 2.18 に示した値を用いる。前提として、ワイヤを1本を片持ち梁としてみなした。断面二次モーメントは、

$$I = \frac{\pi d_e^4}{64} \quad (2.7)$$

と求められる。ここで、 $d_e$  はエンドエフェクタのワイヤの線径である。また、ばね定数は、

$$k_e = \frac{3EI}{R_e^3} \quad (2.8)$$

と求められる。ここで、 $E=200[\text{GPa}]$  はステンレス材のヤング率、 $R_e$  はエンドエフェクタの半径を示す。地表面への押し付け力  $F_e[\text{N}]$  とした場合における開口量  $\epsilon$  は、フックの法則より以下のように求められる。

$$\epsilon = \frac{\eta_e F_e}{nk_e} \quad (2.9)$$

ここで、開口方向に効く成分を係数  $\eta_e=0.5$  と仮定して掛けた。複数本のワイヤが同時に開くため、並列ばねとした。開口の両側で  $n$  本が変位するものとした。Fig.2.25 に地表面への押し付け力とワイヤの開口量の関係を示す。例として、大エンドエフェクタのワイヤが  $n=6$ [pcs.]、 $F_e=22.64$ [N]（エンドエフェクタ角  $\theta_e=20^\circ$ ）としたとき、 $\epsilon=27.5$ [mm] となり、Fig. 2.22 のプロット点と近い値となる。しかし、実機はエンドエフェクタのワイヤの形状・張り方が複雑かつ複数本が動的に作用する。このため、前述のとおり、実験的に押し付け力と開口量の関係性を求めた結果を採用した。

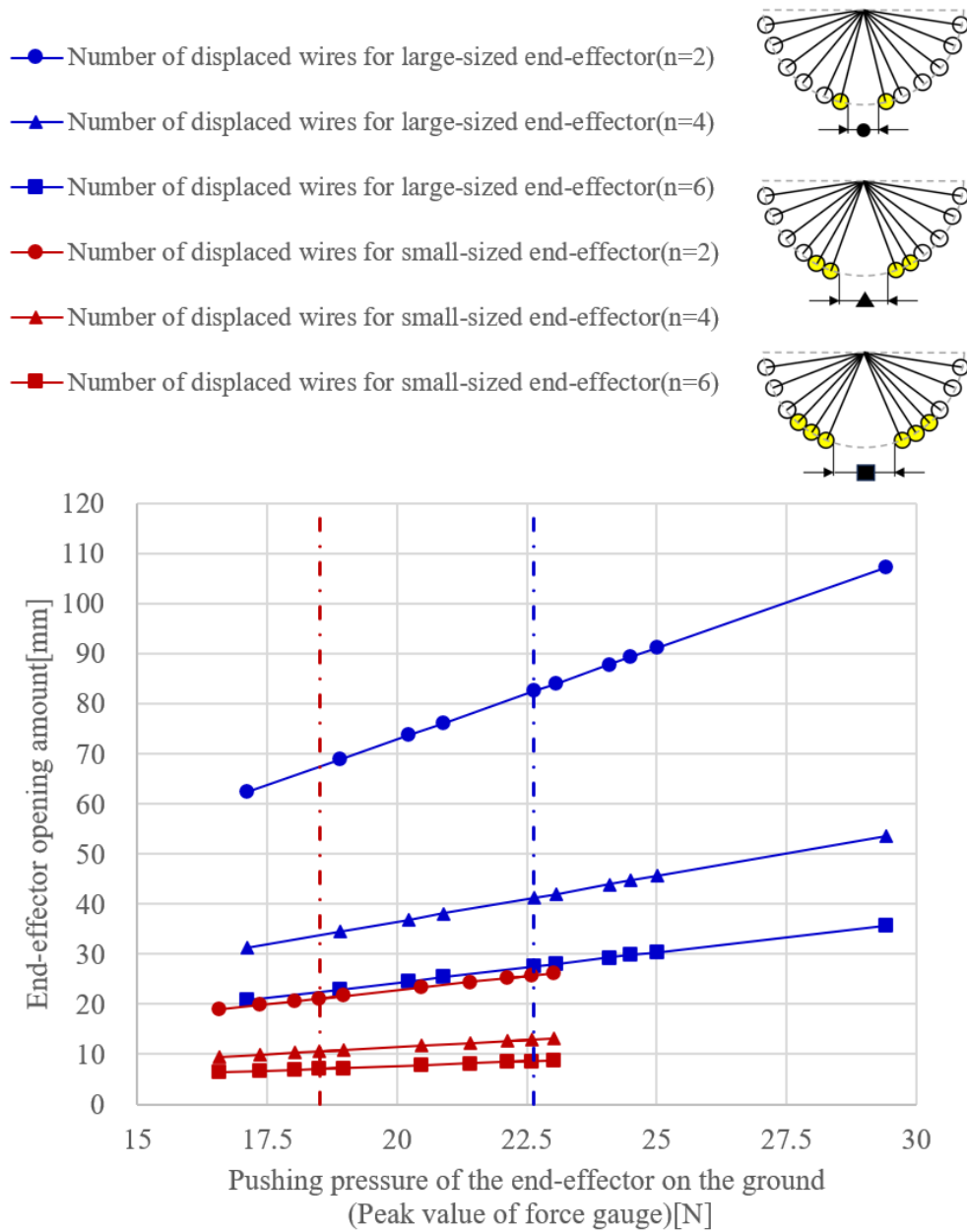


Fig. 2.25 Relationship between contact force and wire opening amount

## 2.5 屋内走行での物体拾得能力の検証

前節で決定した設定値の妥当性を確認するために、屋内走行での拾得能力の確認を行った。Fig.2.26 に実験条件とタスクを示す。Fig.2.26(a) に示すように、拾得動作を行う区間（0.5～3.25[m] の位置）を含めてロボットを4[m] 直進走行させ、目標速度0.25[m/s]、等加速運動時は $\pm 0.0625[\text{m/s}^2]$ となる台形速度指令とした。ここで、エンドエフェクタの角度を所定角度に固定した状態で、ロボットを走行させた。拾得対象物として、Fig.2.26(b) に示すように樁の実のダミーと実物の樁の種子を一定間隔で配置した。樁の実はFig.2.1のように時間経過に従って爆ぜ、安定した物が入手困難であるため、Fig.2.27のように代用品を製作した。直径40[mm]のプラスチック製の球体を一部開口（完全な球体では、地面との間で滑るもしくは転がるため）して、内部に30[g]の錘を固定した。ロボットが想定した走行経路を逸れると種子が拾得できない場合があるため、各列3個ずつ配置した。同一列の3個の内の1個以上を拾得できれば、その測定地点での拾得を成功とし、まとめて1個としてカウントした。樁の実と種子のそれぞれにおいて、全ての拾得を成功すると最大12個となる。ここで、走行区間全域の床面に滑り止め用のグリップパターンが形成されたポリ塩化ビニール製のスタッドレスマット（静摩擦係数1.001[-]、動摩擦係数0.477[-]で、滑りにくいマット）を敷いた。これは、表面が平滑な床面との間で拾得対象物が滑り、拾得不能になることを防ぐためである。

Fig.2.28 に拾得結果の一例を示す。ここで、図中の球体の色に意味はなく、サイズと錘はすべて同一である。Fig.2.29 に実験結果のグラフを示す。横軸にエンドエフェクタの角度設定値の各水準を示す。そのときの拾得個数を縦軸に示す。拾得個数を縦軸に示す。繰り返し測定回数は5回とし、平均値（×印）、最大値、最小値をプロットした。上段は実について、下段は種子についての拾得結果である。ここで、列毎の拾得成否はロボットに固定したカメラで確認した。

実験の結果、実の拾得に関しては、どのようなエンドエフェクタ角度設定値でも概ね拾得可能であった。種子については、エンドエフェクタ角 $0^\circ$ とすると、地表面との接触力が小さく拾得が不可能であった。また、前方のエンドエフェクタによって、種子が除かれ、拾得できない場合があった。前節の結果から、エンドエフェクタ角を $30^\circ$ 以上に設定すると、種子の擦り抜けが発生すると予想されたが、拾得個数が低減することはなかった。これは、マットの弾性変形が影響し、エンドエフェクタの開口量が小さく抑えられたためと考える。最終的には、実験結果および機械的な制限である $50^\circ$ に対し余裕を与え、 $20^\circ$ を設計中心値として選んだ。Fig.2.30 にエンドエフェクタの角度変化およびIMUで取得した車体傾きを示す。エンドエフェクタの角度は約 $20^\circ$ を維持して走行できていることが分かる。

ここで、エンドエフェクタが満杯に近い状態での拾得能力について補足する。拾得する物体が球体であるため、エンドエフェクタの内部に空隙が生じる。この空隙に物体が入り込むため、拾得能力が著しく低下することはなかった。エンドエフェクタが満杯になる前に、拾得した物体をコンテナに移すことでも対応可能である。

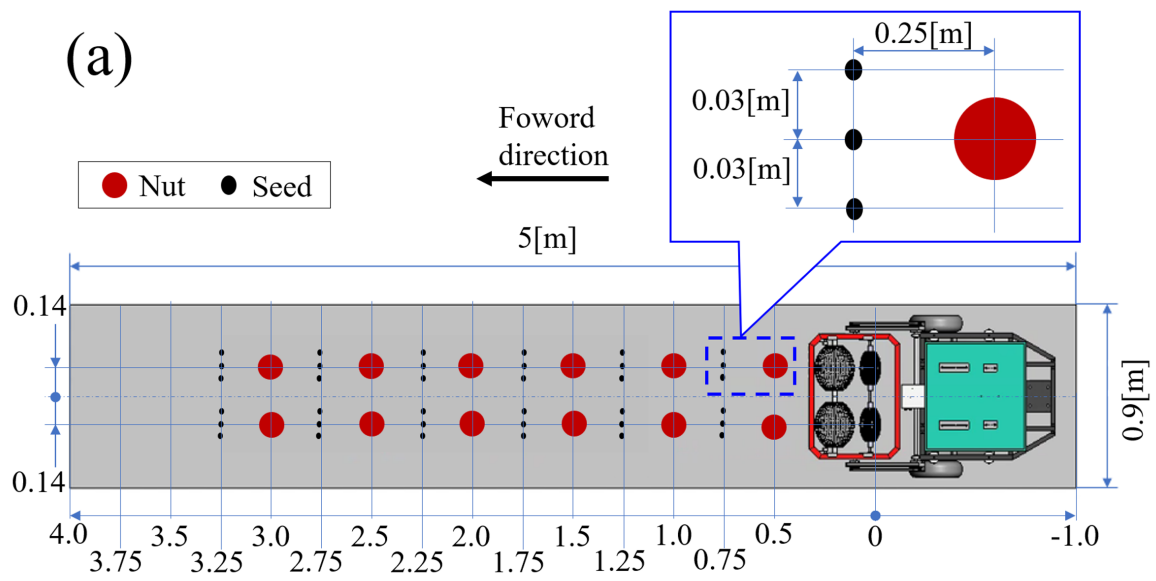


Fig. 2.26 Experimental conditions and tasks (Indoor)



Fig. 2.27 Photos of dummy object ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

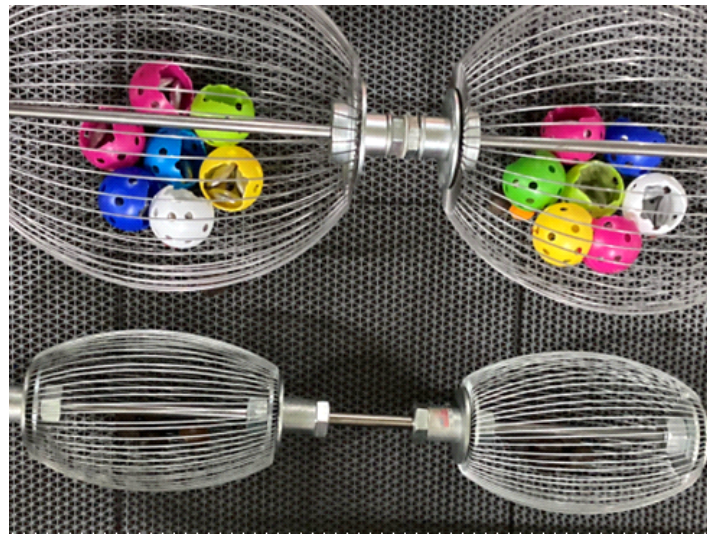


Fig. 2.28 Experimental collecting results in indoor environment

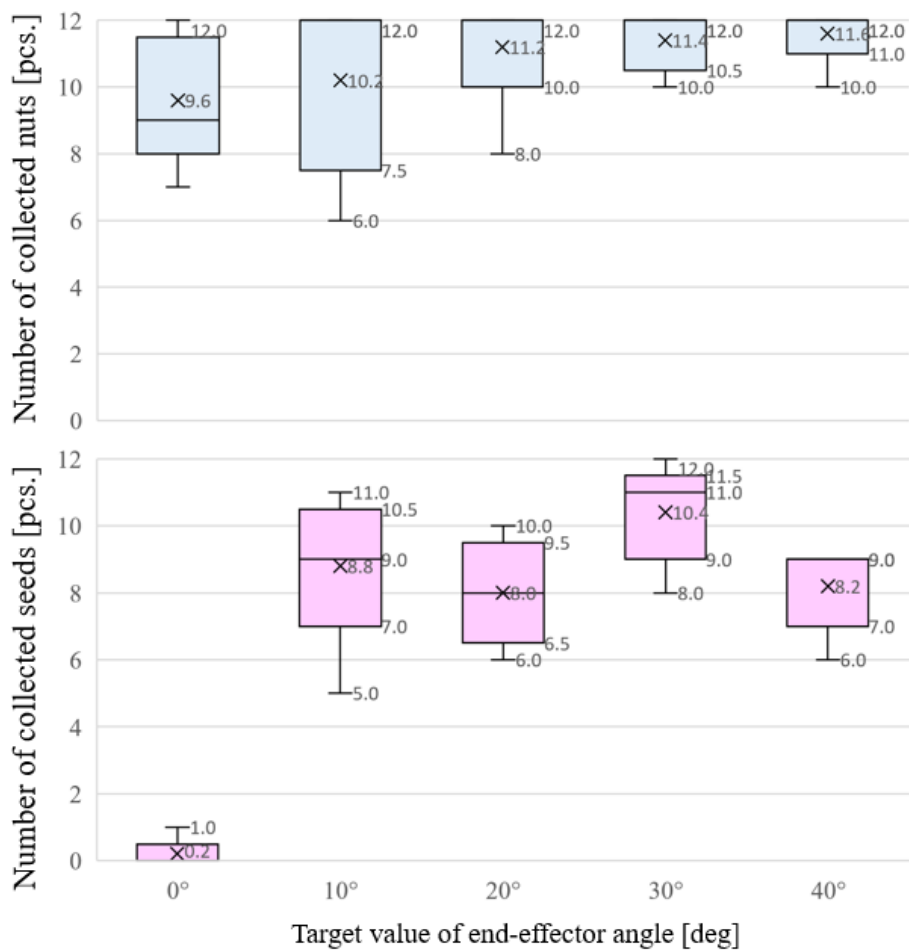


Fig. 2.29 Number of objects collected in indoor environment

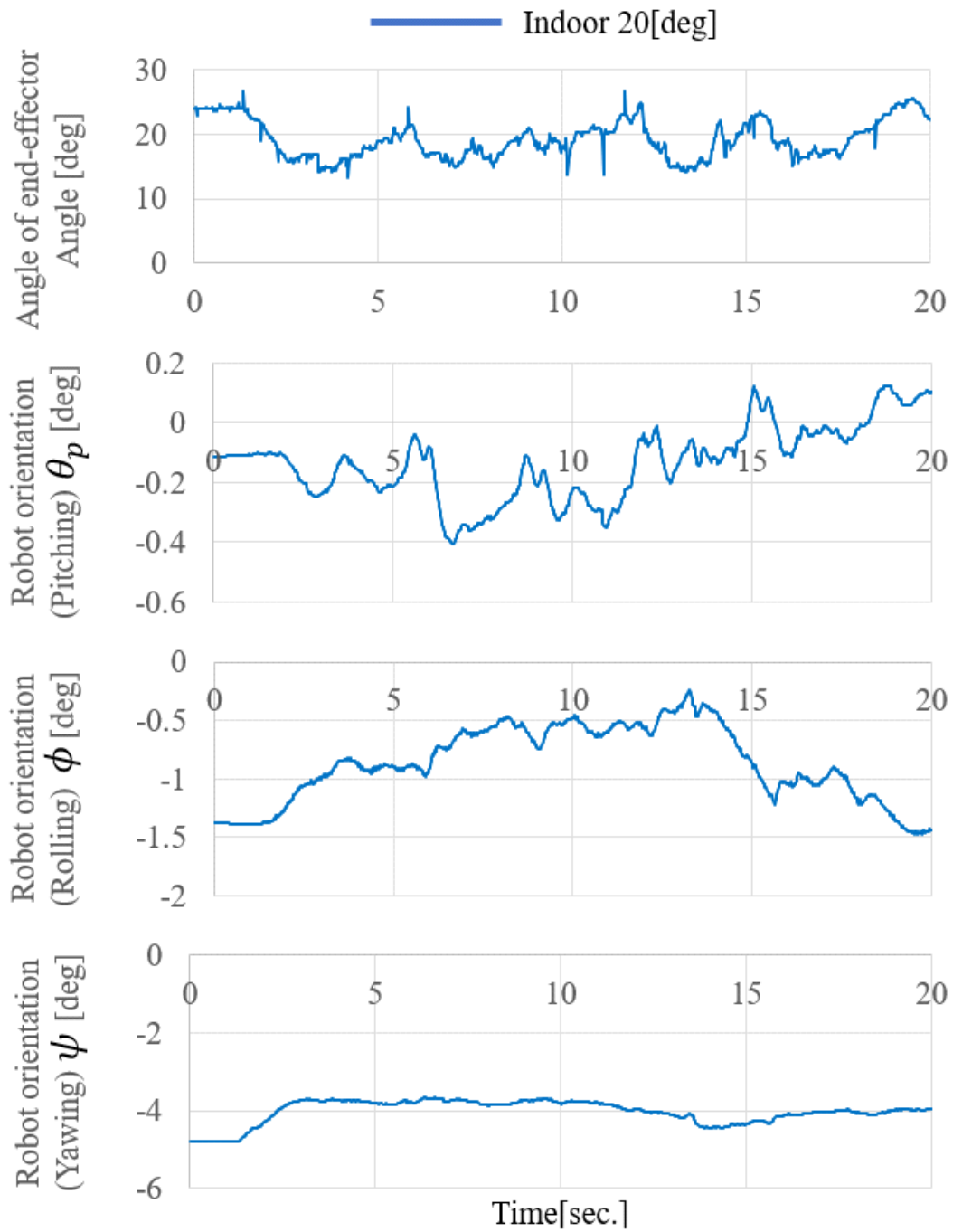


Fig. 2.30 Results of robot and end-effector orientation

## 第3章 不整地対応のための接触力制御および実験検証

本章では、より大きな起伏への対応とエンドエフェクタによる拾得性能の向上を狙った不整地対応のための接触力制御および実験検証について述べ、屋外実験によって、制御の有効性を検証する。

### 3.1 地表面の検知手段および接触力制御の方針

複雑な作業を行うために汎用アームロボットを搭載した移動ロボットの研究が広く行われているが、拾得対象物に合わせた把持姿勢と移動の協調制御は容易でない<sup>[90][91]</sup>。また、不整地作業においては地表面からの振動や衝撃に耐える高い剛性に加えて、拾得部を常に地表面に接触させる場合は起伏の影響を考慮した柔軟性も同時に求められる。この対策として、起伏を検知し、拾得部の高さを制御する対応が考えられる。

地表面の起伏を事前に非接触で検知して、予め拾得部の高さを制御する方法がある。例えば、デプスカメラから得られた画像に対しディープラーニングの一手法であるセマンテックセグメンテーション（画像に対してピクセル単位でクラス分類を行う手法）を適用し、タマネギと地表面とを識別して拾得部までの高さを計測する手法が提案されている<sup>[12]</sup>。しかし、日照条件によって逆光や影による誤検知、膨大なデータセットを用意する手間、リアルタイム性などの課題がある。また、Fig.2.1に示すように、椿の実は地表面と同系色であり識別が困難である。他にも、レーザスキャナの受光強度の差異を利用して、芝生とアスファルトなど地表面を識別する計測方法が提案されている<sup>[92]</sup>。本研究では、樹間移動を対象としている。反射率が低い黒体に近い茶系色の地表面に対しては、十分な検出精度が得られない。

そこで、地表面と接触し、確実に直接計測する方法が有力となる。位置制御のみによるアームでは、接触力を検出することができないため、地表面との接触時に素早く停止できずに、アームが破損する懸念がある。破損に至らなくても、起伏による外乱で位置の誤差が発生した場合に振動的になる。アームを地表面に柔軟接触させるためにコンプライアンス特性を与えたい<sup>[93]</sup>。平滑な床、壁、物体との接触力制御に力センサを用いた事例が報告されている<sup>[94][95]</sup>。

しかし、屋外環境で力センサを用いることは現実的ではなく、使用中の性能低下やノイズにより、制御欠陥が生じる。この問題を解決するために、力センサを用いず、推定した接触力をインピーダンス制御に適用し、ロボットのアクティブコンプライアンス制御を実現する足接触力推定法が提案されている<sup>[96]</sup>。しかし、ウォームは逆駆動できない特性があり、一般的には力制御が困難とされている。これに対し、スードメカニズムなどが提案されている<sup>[97]</sup>。ウォームホイールにかかる負荷トルクはウォームに対する軸力として作用する。この軸力によって駆動ユ

ニットのハウジングが回転しようとするのを板ばねによって止め、板ばねに発生した曲げひずみをひずみゲージで検出し、負荷トルクに対応した力センサ出力を得る。この検出値をサーボ系に正帰還し、ウォームギアの逆駆動を可能とし、コンプライアンス特性を付与している。しかし、本ロボットの構成においてアーム駆動軸周りでのひずみ計測は困難である。

そこで本研究では、地表面の起伏をエンドエフェクタ周りのバネ変位として計測し、アーム昇降制御に用いることで、接触力を間接的に調整するものとした。

### 3.2 動力学モデルと接触力制御

Fig.3.1 に示すように、ベースフレームとエンドエフェクタがバネで接続された2質点系を考える。制御入力をアームによる荷重  $F_a$ 、ベースフレームの変位を  $y$ 、エンドエフェクタに取り付けられたバネの変位を  $z$  とするとき、これらの相対的な位置であるバネ変位  $y - z$  を制御量とする。前章にて、確実に拾得対象物を取り込める押し付け力および網目の開口量とするためにエンドエフェクタ角度は  $20^\circ$  が望ましいことを確認している。このため、この角度での変位を動作の基準とした。地表面の起伏に応じてアームを昇降させることで接触力を一定に保つ。Fig.3.2 に接触力制御系のブロック線図を示す。ここで、モータドライバは市販のものを使用し、アーム制御は位置指令により行う。Table 1.2 のパラメータリストに記号と値の一覧を示す。

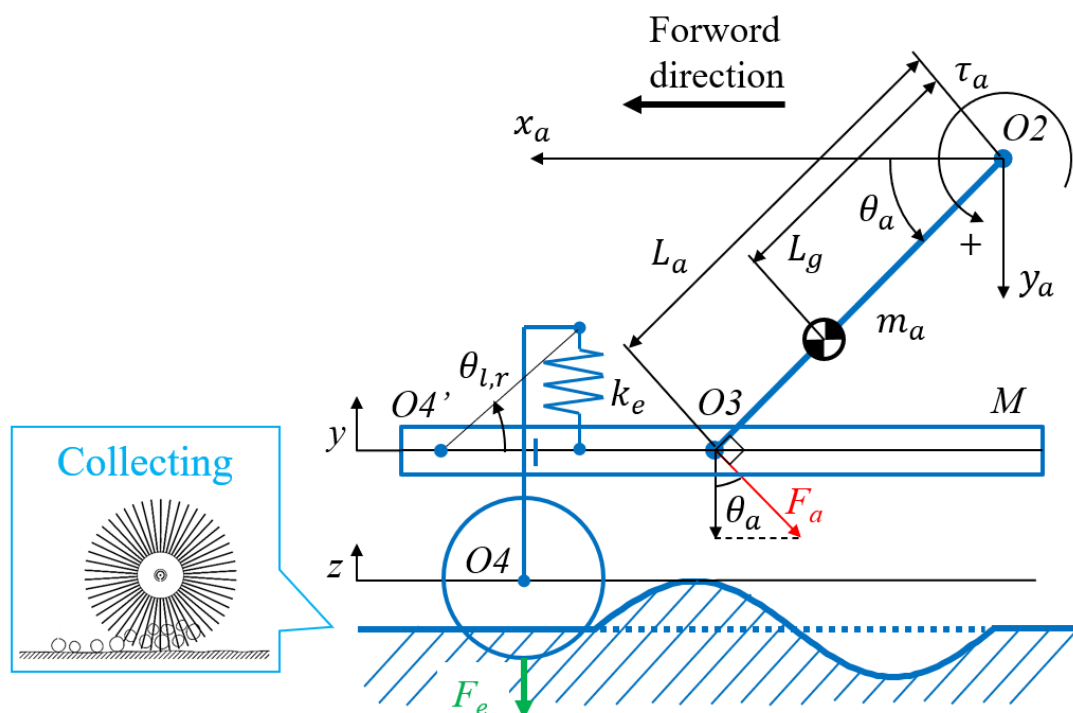


Fig. 3.1 Conversion from spring displacement to contact force on the ground ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

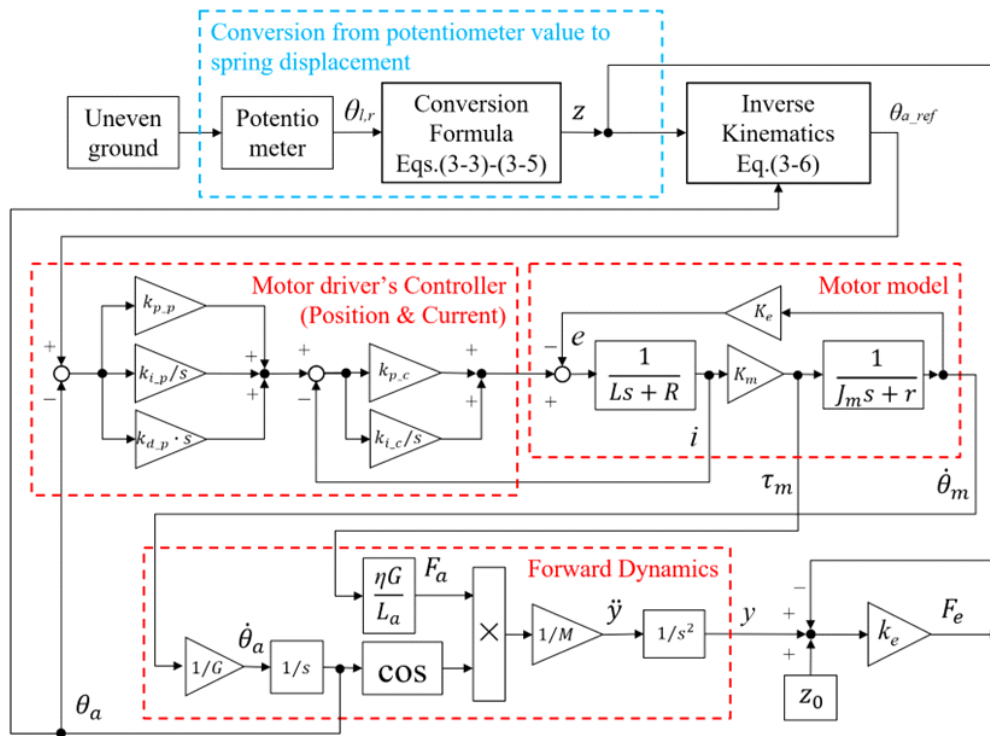


Fig. 3.2 Block diagram of contact force control ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

Fig.3.1 の荷重  $F_a$  は以下のように算出される.

$$F_a = \frac{\eta G \tau_m}{L_a} \tag{3.1}$$

ここで、ウォームの減速比が大きいため、アーム駆動系は荷重や重力、バネの反力の影響を受けないものと仮定する。前章にて、アームの先端にベースフレームに拾得する物体を想定した重り (3[kg] 以上) を載せてアームを上昇方向 (Fig.2.6 の DR1) に駆動しても、アームの角度に変化がないことを確認している。したがって、ベースフレームの並進方向の運動方程式は以下および Fig.3.2 のように表せる。

$$\ddot{y} = \frac{1}{M} F_a \cos \theta_a = \frac{1}{M} \frac{\eta G \tau_m}{L_a} \cos \theta_a \tag{3.2}$$

Fig.3.3にエンドエフェクタ周りの構成を示す. エンドエフェクタの回転角度は, 回転軸  $O4'$  上に設置されたポテンシオメータを用いて検出した. 変位は, エンドエフェクタの回転軸  $O4'$  に対するポテンシオメータの測定値から算出した. 実機は, Fig.3.3に示すように回転方向にバネが設置されているため, Fig.3.1に示すように上下方向の並進運動として近似した. ここで, (3.6)式に示すように, バネ変位にゲイン  $k_g$  を乗じることで調整するコントローラ設計としたため, バネ変位方向の影響は小さいと仮定した. Fig.3.2のモデルはコントローラ設計に適している.

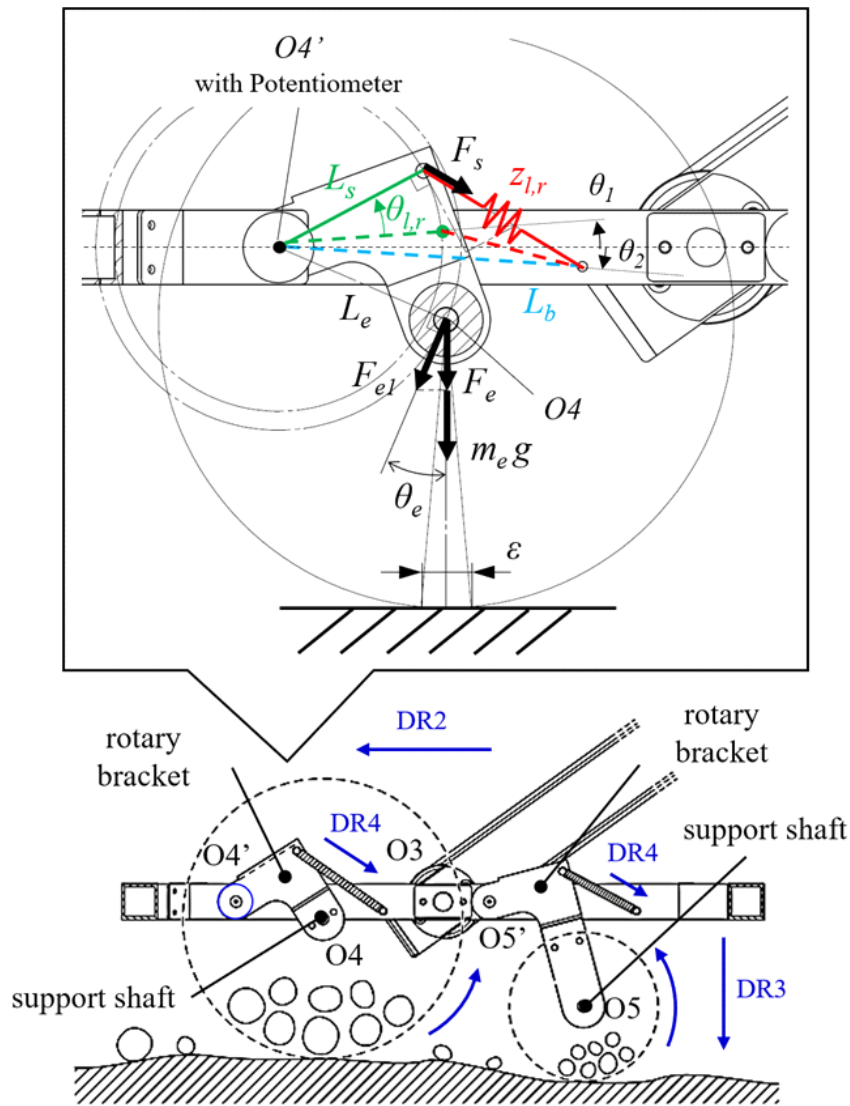


Fig. 3.3 Relationship between the spring displacement and potentiometer angle ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

左右のポテンシオメータの計測値  $\theta_l$ ,  $\theta_r$  は, Fig.3.3 においてそれぞれ次のようにばね変位  $z_l$ ,  $z_r$  に変換される.

$$z_l = \sqrt{L_b^2 + L_s^2 - 2L_bL_s \cos(\theta_l + \theta_1 + \theta_2)} \quad (3.3)$$

$$z_r = \sqrt{L_b^2 + L_s^2 - 2L_bL_s \cos(\theta_r + \theta_1 + \theta_2)} \quad (3.4)$$

左右  $z_l$ ,  $z_r$  の平均値  $z_a$  をベースフレームの制御に用いる. すなわち, 基準からのバネ変位を,

$$z = z_a - z_0 = \frac{z_l + z_r}{2} - z_0 \quad (3.5)$$

とする. ここで, 接地面との接触箇所は2点あり, それぞれに対応するばねを用いて検出した. アクチュエータは1つしかないため, フィードバック制御には平均値を用いた.

(3.5) 式より, アーム昇降モータを制御するための指令値を,

$$\theta_{aref} = \theta_a - \Delta\theta_a = \theta_a - \frac{k_g z}{L_a \cos \theta_a} \quad (3.6)$$

と与え,  $z$  の変化量に応じてアーム角度を  $\Delta\theta_a$  変化させ, ベースフレーム位置  $y$  を制御する.

ここで,  $k_g$  は地表面への追従感度を調整するための係数である.

また, バネによる押し付け力は, フックの法則より,

$$F_e = nk_e(y - z + z_0) + F_0 \quad (3.7)$$

ここで, 大小のエンドエフェクタに取り付けられたバネ変位が等しくなるようにリンクの長さを調整した. 後述するシミュレーションと実験では, (3.7) 式を用いて得られた値を用いた.

このように,  $y - z = 0$  となるようにベースフレームの位置を制御することで, 地面との接触力を一定に保つ.

### 3.3 シミュレーション

Fig.3.2の制御系の調整パラメータを Table 1.2のパラメータリストに示す。  $k_g$  は地表面への追従性に関する感度パラメータである。シミュレーションにおいては、  $k_g=1.0$  と設定した。モータドライバ内部のコントローラは、PID 制御 (Fig.3.2の位置フィードバックがメインループ、電流フィードバックがサブループのカスケード制御) で構成した。

Fig.3.4にシミュレーション結果を示す。ここで、アーム角度  $0^\circ$  から下降動作を開始させ、1秒後に目標角度  $39.1^\circ$  に接触力制御基準高さ ( $y=0$ ) に到達させる。また、接地後の振動抑制時間を加味して2秒後に接触力制御をONさせるスイッチング制御を行う。Fig.3.4(a), (b)をみると、1秒未満はアームの自重が影響するが、過渡的な追従性が確保できている。また、5秒後に地表面凹凸による外乱入力 (模式化入力として、振幅  $\pm 20[\text{mm}]$ , 周波数  $2\pi$ ) を与えた。

結果より、アームは、Fig.3.4(c)に示すように、 $z$ の変動に対して、 $\theta_a$  および  $y$  が追従し、 $y-z$  はゼロに保たれる。これに伴い、Fig.3.4(d)に示すように、接触力  $F_e$  も一定に保たれている。Fig.3.4(d)において、破線はばね1つ分の力量を示す。また、実線はばね4つ分の力量を示す。実際に走行させた際の地表面の凹凸に伴うポテンシオメータの変動値を入力として、シミュレータに与えたときの応答を Fig.3.4(e),(f)に示す。波形より所望の制御が働いていることが確認できる。

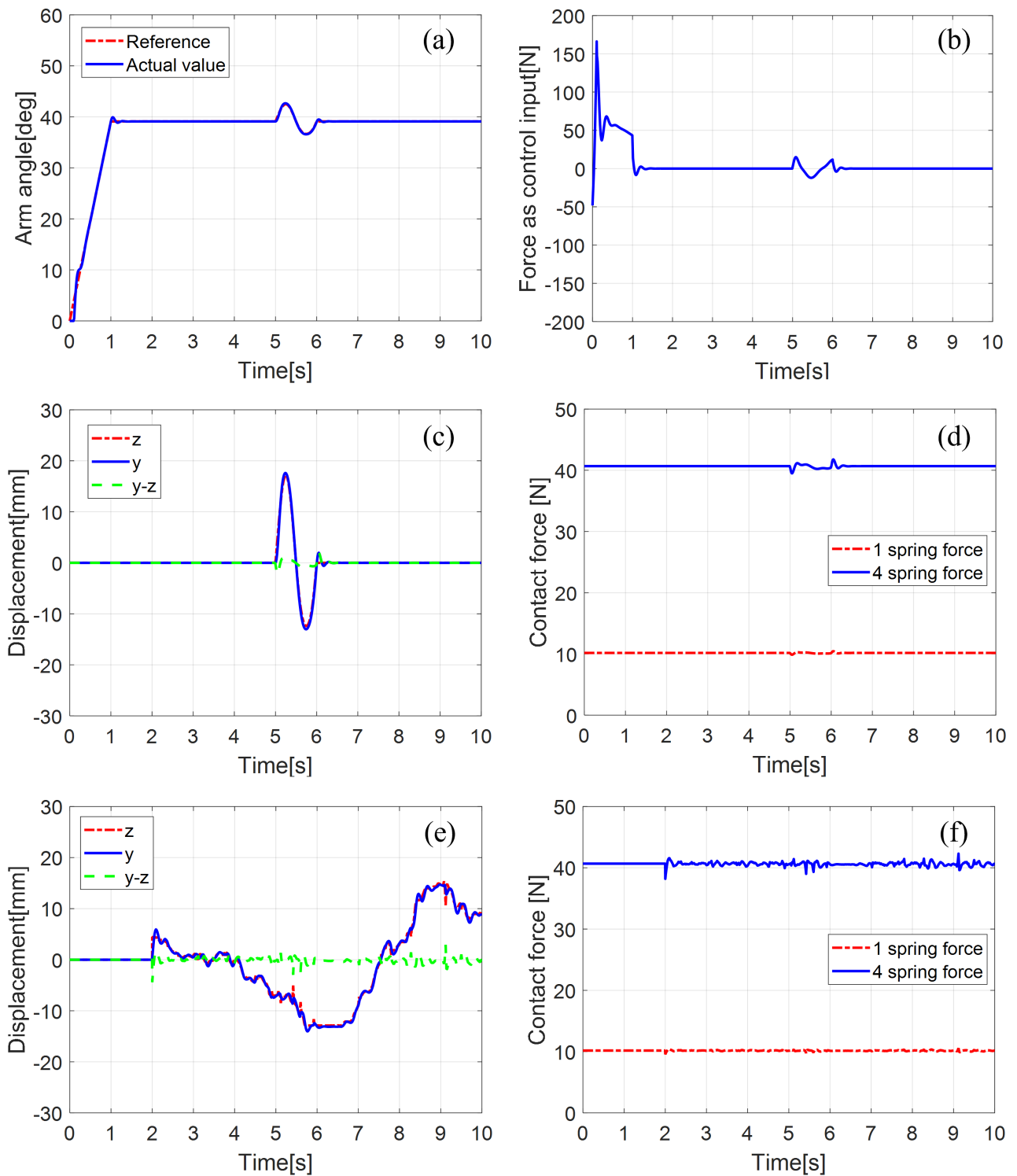


Fig. 3.4 Simulation results of contact force control ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

コントローラの性能評価として、周波数特性を確認した。アーム角度指令値  $\theta_{aref}$  からアーム角度  $\theta_a$  までの閉ループ系としてのボード線図を Fig.3.5 に示す。また、コントローラの制御性能を Table 3.1 に示す。ゲイン余裕および位相余裕についても追従制御における一般的な指標（ゲイン余裕は 10~20[dB]，位相余裕は 40~60° 以上とされている）に対して十分と考えられる。

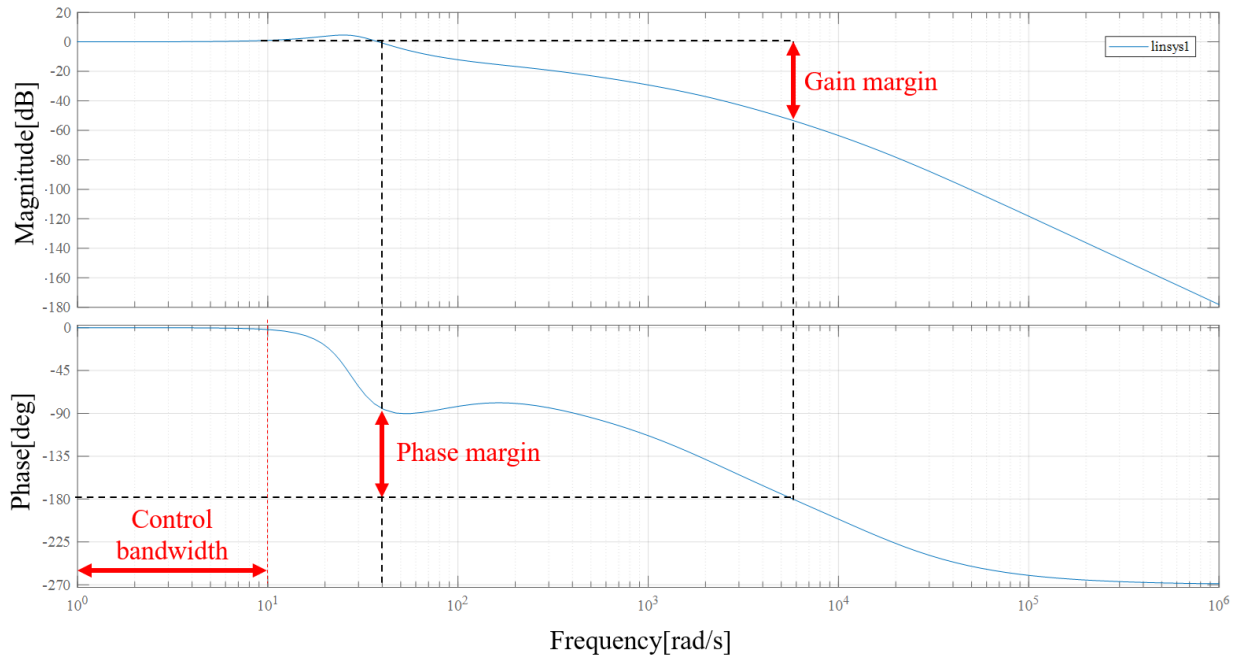


Fig. 3.5 Bode diagram of the proposed control system

Table 3.1 Controller performance

Definition[Unit]	Value
Sampling frequency[Hz]	100
Control bandwidth[Hz]	≒ 15.7
Gain margin[dB]	≒ 50
Phase margin[deg]	90

### 3.4 スロープを用いた接触力制御系の検証

前節で示したシミュレーション結果の妥当性を確認するために、屋内にて実証実験を行った。Fig.3.6に示すように、台形状スロープ（傾斜角  $20^\circ$ ，最大高さ  $100[\text{mm}]$ ）を用いた。傾斜角は中山間地域の緩傾斜地域（斜度  $8\sim 15^\circ$ ），急傾斜地域（斜度  $15\sim 20^\circ$ ）であることから最大  $20^\circ$  を想定して設定した。また，大サイズエンドエフェクタの半径から最大高さ  $100[\text{mm}]$  と設定した。ロボットの目標速度  $\pm 0.1[\text{m/s}]$ ，等加速運動時  $\pm 0.2[\text{m/s}^2]$  の台形速度指令を与え，エンドエフェクタ部のみをスロープに載せ，“A  $\rightarrow$  B：前進しながら登坂，B：頂上で一時停止，B  $\rightarrow$  A：後退しながら降坂”といった一連の動作をさせた。

また， $k_g$  を変化させてアームの挙動を調べた。 $k_g=2.0, 0.8, 0.0[\text{rad/mm}]$  での実験結果を Fig.3.7 に示す。 $k_g=2.0[\text{rad/mm}]$  とした場合，アームが振動的となり不安定な挙動を示した。他方， $k_g=0[\text{rad/mm}]$ （接触力制御なし）の場合，ベースフレームは初期値のままであり，登坂に伴い，機構としての限界まで，ばねが大きく変位する。その結果，接触力が過剰に大きくなり，Fig.3.8(b) のようにエンドエフェクタのワイヤも大きく開口し，拾得物の取り零しが生じる。 $k_g=0.8$  の場合は，Fig.3.7 および Fig.3.8 (a) に示すように，バネの変位はゼロ付近を維持し，接触力は  $\pm 1.0[\text{N}]$  に収束し，ワイヤの開きはなく，所望の制御が実現できている。

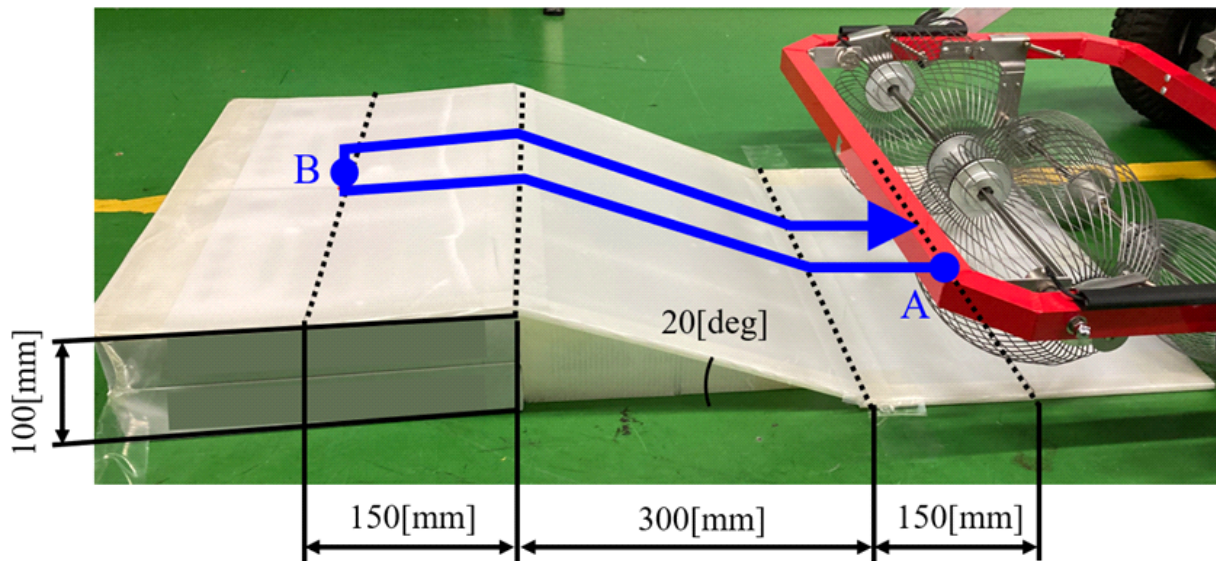


Fig. 3.6 Slope climbing experiment ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

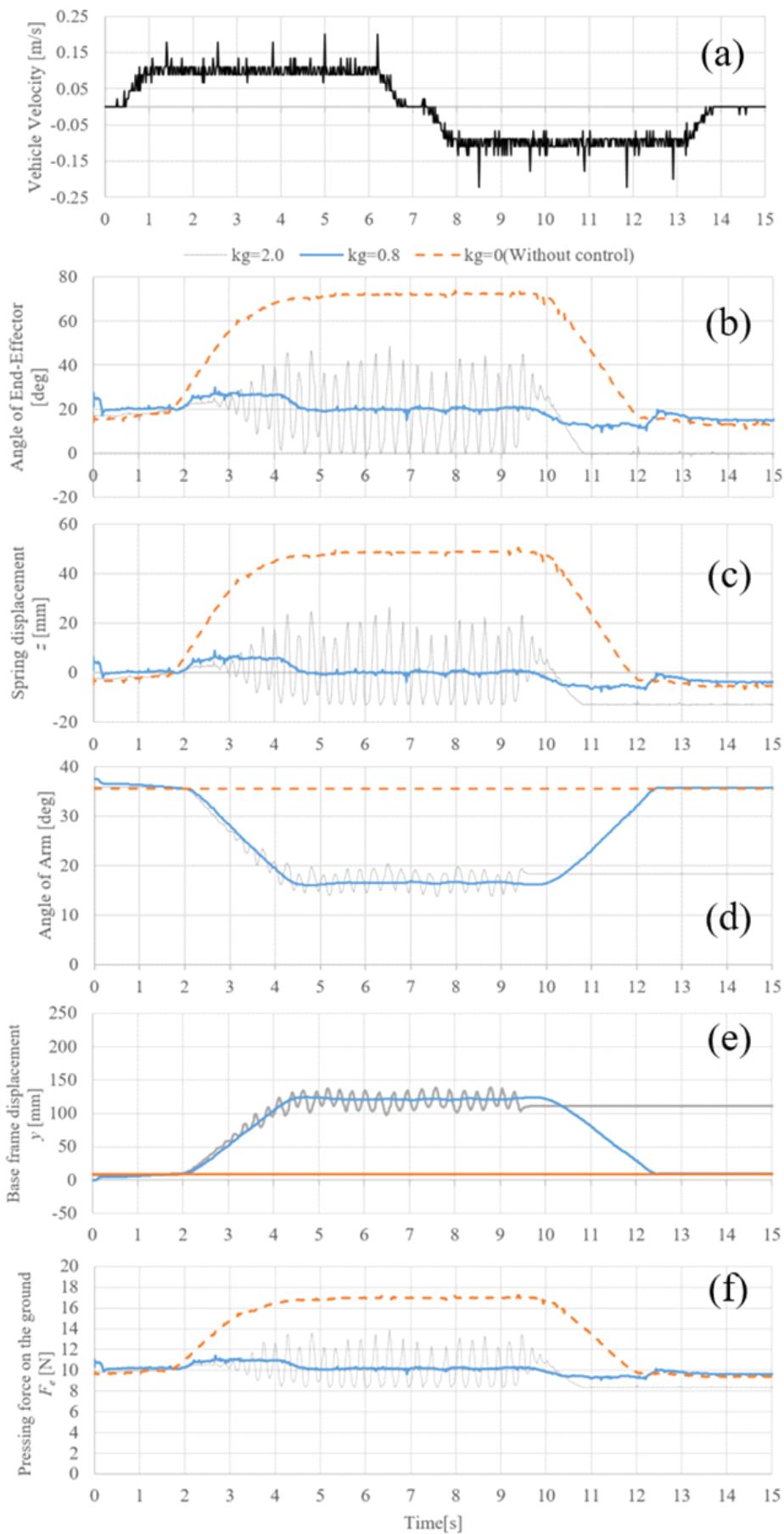


Fig. 3.7 Experimental results of slope climbing ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

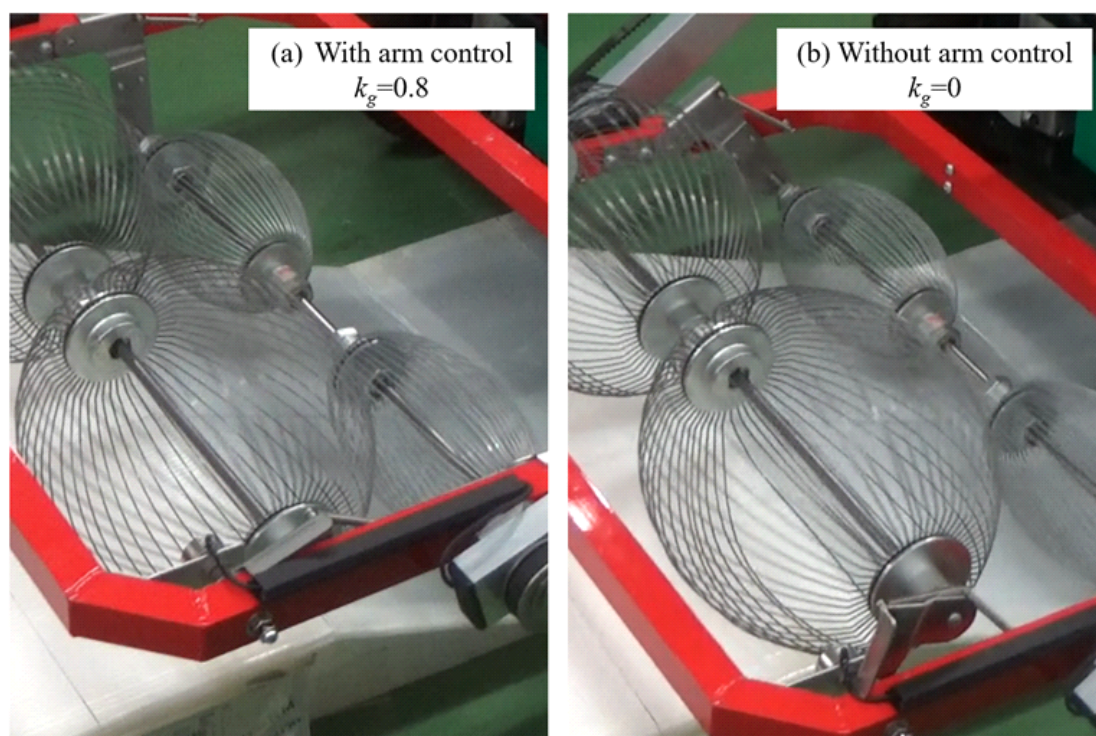


Fig. 3.8 Experimental results of wire opening ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

### 3.5 屋外走行での物体拾得能力の検証

提案ロボットの屋外地面条件下（地面の軟弱性などに対する）での有効性を実験的に検証した。屋外走行実験にて、アームの接触力制御有無による拾得能力の比較を行った。

Fig.3.9 に実験条件とタスクを示す。Fig.3.9(a) に示すように、拾得動作を行う区間（0.5～3.25[m] の位置）を含めてロボットを4[m] 直進走行させ、目標速度0.25[m/s]、等加速運動時は $\pm 0.0625[\text{m/s}^2]$ となる台形速度指令とした。拾得対象物として、Fig.3.9(b) に示す樁の実のダミーと実物の樁の種子を一定間隔で配置した。樁の実はFig.2.1のように時間経過に従って爆ぜ、安定した物が入手困難であるため、Fig.2.27のように代用品を製作した。直径40[mm]のプラスチック製の球体を一部開口（完全な球体では、地面との間で滑るもしくは転がるため）して、内部に30[g]の錘を固定した。また、樁の実は地表面と同系色であるため、実験における視認性を向上させるため、黄色のラッカースプレーで塗装した。ロボットが想定した走行経路を逸れると種子が拾得できない場合があるため、各列3個ずつ配置した。同一列の3個の内の1個以上を拾得できれば、その測定地点での拾得を成功とし、まとめて1個としてカウントした。樁の実と種子のそれぞれにおいて、全ての拾得を成功すると最大12個となる。ここで、静摩擦係数0.957[-]、動摩擦係数0.58[-]、滑りにくいフィールドで実験を行った。

Fig.3.10 に、接触力制御ありにおける拾得結果の一例を示す。ここで、図中の球体の色に意味はなく、サイズと錘はすべて同一である。また、Fig.3.11 に接触力制御有無による拾得結果の比較を示す。横軸に接触力制御有無の各水準を示す。拾得個数を縦軸に示す。繰り返し測定回数は5回とし、平均値（×印）、最大値、最小値をプロットした。上段は実、下段は種子についての拾得結果である。ここで、列毎の拾得成否はロボットに固定したカメラで確認した。拾得の成功率をFig.3.11のデータプロットの上方に示す。実の拾得成功率に関しては概ね90%以上を達成した。接触力制御有無の比較において、平均拾得個数はほぼ同等であったが、ばらつきは約48%低減することが確認された。これは提案制御法により接触力を適切な値に維持し、実が地面に埋もれること、網目が過度に開口して取り零すことを防止できたためである。なお、本ロボットは大エンドエフェクタ周りに設置したポテンシオメータの値を基準に制御しているため、小エンドエフェクタによる種子の拾得率は向上が見られなかった。これは、小エンドエフェクタにはポテンシオメータを設置しておらず、個別の制御を行っていないためである。

Fig.3.12 にエンドエフェクタの角度変化を示す。接触力制御なしの場合、地表面の凹凸によって約 $\pm 20^\circ$ の変動が生じている。一方、接触力制御により、実との接触時を含め約 $\pm 10^\circ$ の変動に収まっており、一定角度を維持する所望の動作が実現できている。これにより、大きな起伏によって機構部が可動域の限界まで揺動して破損しない効果も得られる。Fig.3.13(a), (b) に示すように、エンドエフェクタによって押し付けられた種子が地表面に埋もれて拾得できない場合があった。また、Fig.3.13(c) に示すように、拾得対象外の物体（落葉、落枝、小石）がエンドエフェクタに目詰まりし、局所的にピッチが広がり、次の種子が擦り抜けて拾得できない場合があった。地表面を清掃することで、目詰まりの影響が除外され、僅かに拾得率が改善した。事前に一定の環境整備作業が必要となる。Fig.3.14 に示すように、実際の樁の実の拾得作業においても、除草や野焼きなどの事前整備が行われている。

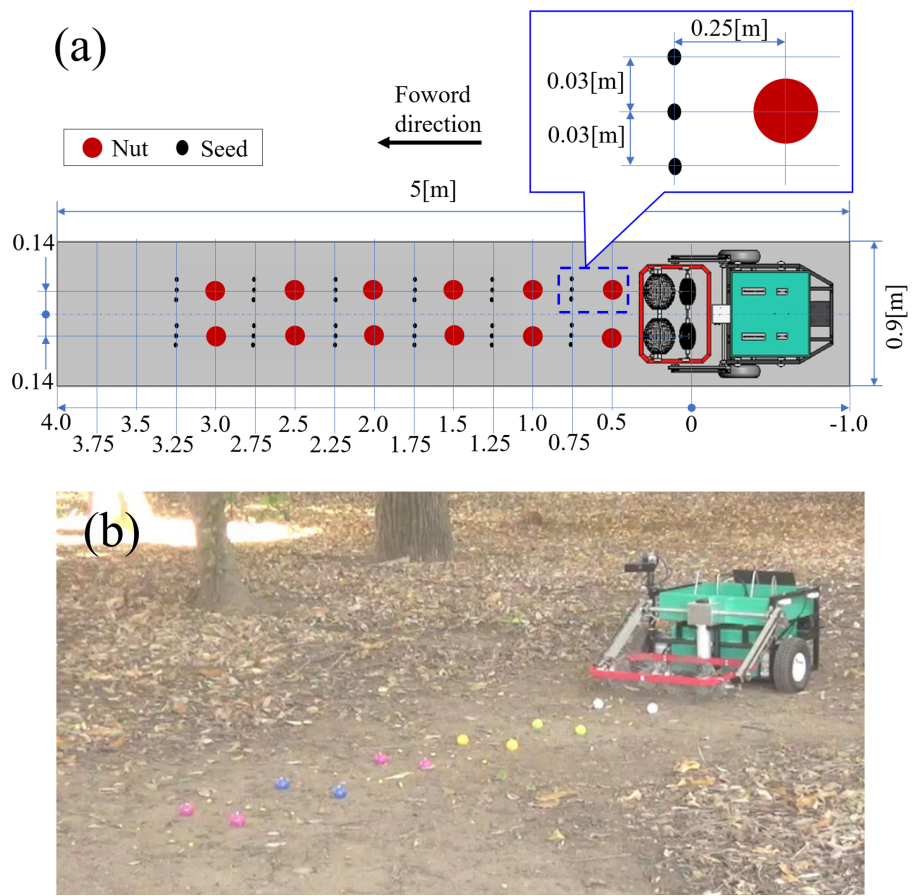


Fig. 3.9 Experimental conditions and tasks (Outdoor) ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.



Fig. 3.10 Experimental collecting results in outdoor environment ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

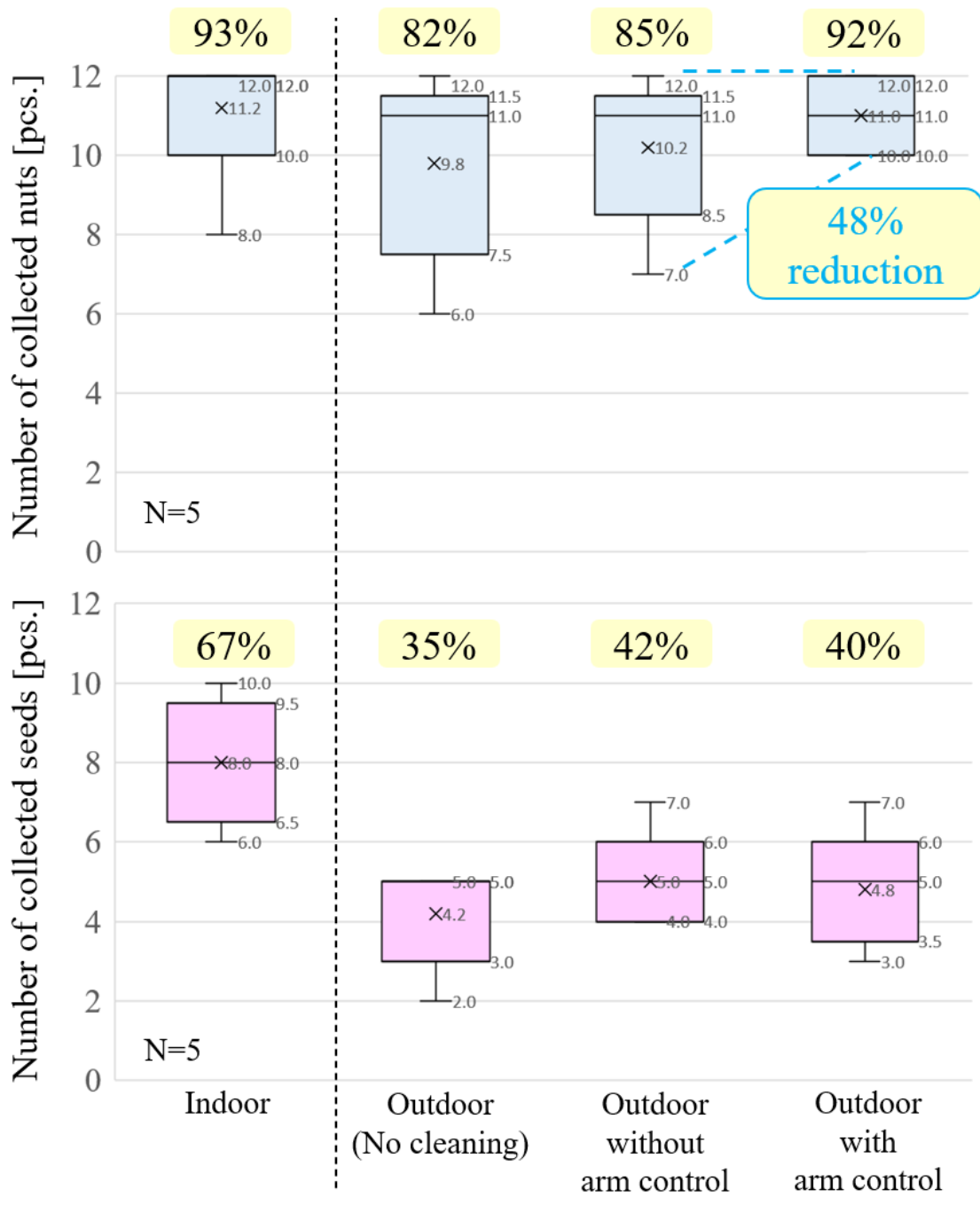


Fig. 3.11 Number of objects collected

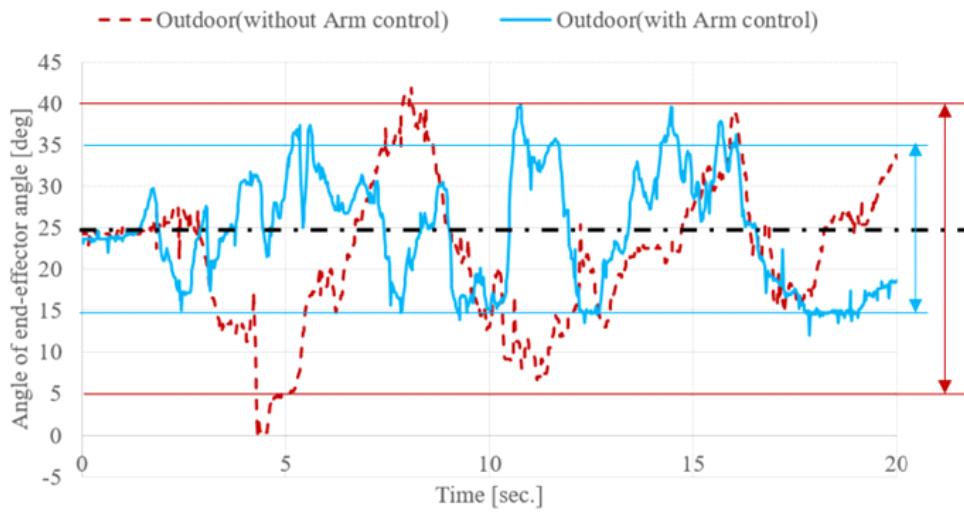


Fig. 3.12 Transition of the rotational angle of the end-effector ©Fuji Technology Press Ltd., reprinted with permission from Journal of Robotics and Mechatronics.

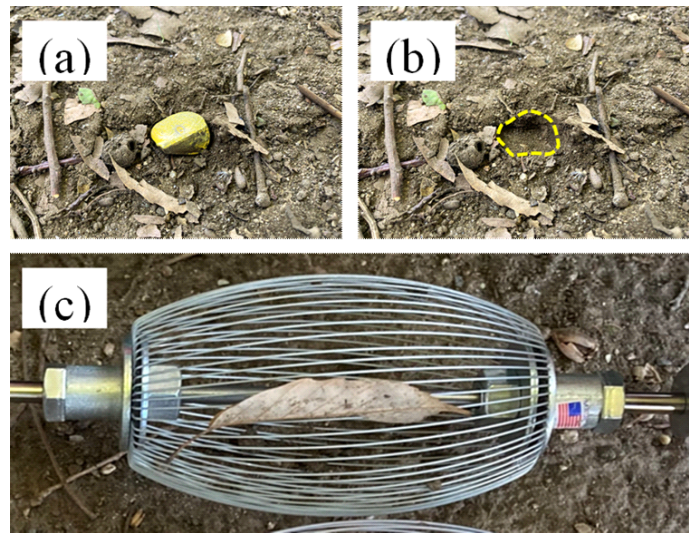


Fig. 3.13 Transition of the rotational angle of the end-effector



Fig. 3.14 Weeding and burning in the field < <https://trip.iko-yo.net/articles/847> > (Reference Date: December 31, 2025)



## 第4章 画像特徴量の大きさを用いた差動ロボットの位置制御と実験検証

本章では、樹下の拾得位置までの近接移動の自動化に向けた画像特徴量の大きさを用いた差動ロボットの移動制御と実験検証について述べる。

### 4.1 樹間移動のための樹木の計測

樹間移動のための樹木計測は、ドローンなどによる計測と地上ロボットによる計測の二つに大別される。

ドローンなどによる計測は、上空から森林全体を俯瞰し、樹木配置や樹冠分布を広域かつ一括で把握することを目的とする。この方式は、作業計画やエリア管理などの事前設計に有効であり、グローバルな地図を絶対座標系で構築できる点に特徴がある。ヤマハ発動機のRINTO森林解析サービスは、無人ヘリによる高密度点群データを用いて森林全域の立木や地形を精緻にデジタル化し、位置、樹高、胸高直径、材積、樹種等の定量データを個々の立木ごとに解析・可視化するサービスである<sup>[98]</sup>。点群解析から作成される立木MAP、傾斜分布図、高精密等高線図などは施業計画、路網設計、治山、防災などの多様な用途に利用できる。金澤らは、ドローンで取得した画像から作物や圃場状態を観測し、画像処理で植生指数（NDVI等）や近赤外波長を推定する方法を解説している<sup>[99]</sup>。RGB画像から多波長情報を機械学習で推定し、3次元再構成と組み合わせて作物品質や健康状態の可視化する手法を述べている。一方で、この方式は、地表付近の障害物や走行条件といった局所的かつ時間変動的な情報を十分に反映できないという課題がある。

地上ロボットによる計測は、樹幹や地形をロボット視点で直接観測しながら、実際の走行条件を反映したローカルマップを生成できる利点を持つ。特に樹間移動では、数十センチメートルオーダーの誤差が走行可否を左右するため、地上ロボットによる計測は安全性と確実性の面で優位であり、実用的観点で不可欠である。

両者は空間スケール、地図の更新頻度、地図に求める機能面で本質的に異なり、優劣関係ではなく、計画と行動という異なる時間軸を担う階層的地図として統合することが望ましい。

本論文においては、地上ロボットによる計測手段に焦点を当てる。

## 4.2 画像フィードバックによる走行制御の方針

移動ロボットで様々な作業を行うためには、各種センサから取得した情報から、目標の位置姿勢に移動する制御が必要である。従来、ロボットに複数のカメラを搭載したものや、様々なカメラ、LiDAR、超音波センサなどのセンサを複合的に組み合わせたものが提案されている。しかし、コストとロバスト性の面では問題がある。そこで、単眼カメラのみによる移動ロボットの制御法が望まれている<sup>[100]</sup>。

カメラを用いた移動制御手法としてルックアンドムーブと呼ばれる方法がある。これはカメラにより目標物体の位置姿勢をカメラ座標系で計測し、ロボット座標系に変換して、ロボットを目標位置に制御するものであり、複雑な座標変換が伴い、キャリブレーションエラーに対して弱いという欠点を持つ。

これに対して、カメラ画像中の特徴量の誤差から直接フィードバック入力を生成するビジュアルサーボが提案されている。従来、ビジュアルサーボは運動拘束のない6自由度マニピュレータ制御の研究で展開されていた<sup>[101]-[103]</sup>。

しかし、Brockettの必要条件<sup>[104]</sup>に基づき、ビジュアルサーボの制御法は時不変フィードバック制御則による漸近安定化が実現不可能であることが知られている。すなわち、車いすのような形式の真横方向に瞬間的に移動できない車輪移動ロボットに対しては、拘束条件を考慮して目標画像を実現する必要がある。汎用性が高く、製造コスト面で優位である差動車輪構成に対して適用可能なビジュアルサーボによる移動制御法が望まれる。

ビジュアルサーボは、カメラ画像に基づいて推定されたデカルト座標系における三次元位置を特徴量として移動制御をする位置ベース法 (PBVS: Position-Based Visual Servoing)<sup>[105][106]</sup>と画像上の二次元の特徴量から直接移動制御をする画像特徴ベース法 (IBVS: Image-Based Visual Servoing)<sup>[107][108]</sup>に大別される。位置ベース法は、通常の位置制御系であり、軌道の推定などの見通しが良いが、三次元位置を推定するために、正確なカメラ角が必要である。また画像から三次元位置を計測している最中に対象が大きく変化した場合、目標のカメラ画像上の位置と三次元座標上の位置との関係が崩れ制御が困難になる可能性がある。また、特徴点がカメラの視野から消失するという問題があるが、Murrier氏により提案された制御法により解決された<sup>[109]</sup>。しかし、この方法は三次元情報を必要とするため、デプスカメラと共に高速のプロセッサなども必要とする。一方、画像特徴ベース法は、位置推定を行わないため位置ベース法に比べて計算量が少なく済む。しかし、画像中の特徴量の変化とロボットの移動速度を関係づける画像ヤコビアンにカメラ角を含むため、正確なカメラ角を必要とする。エピソード幾何の計算のため、2段階制御法が必要となる。現在位置と目標位置との距離が未知のため、ベースラインの縮退による検出精度低下が問題となる。

近年、Zhang氏により、位置ベースと画像特徴ベースの利点を統合した制御法が提案された<sup>[110]</sup>。3つの画像特徴点のみから平面運動ロボットの相対姿勢角を直接推定する方法であり、深度情報やホモグラフィ分解が不要で、視野外や部分遮蔽環境でも動作のロバスト性が改善された。しかし、いくつか残課題がある。位置情報に基づく画像特徴は、ノイズの影響や照明条件などの環境的要因により、画像処理の過程で消失する可能性がある。これは、複数の点からな

る長さや面積などの画像特徴量の大きさを用いることでロバスト性を向上できると考える。すなわち、目標状態までの距離に応じて画像上での大きさが変わるものであれば、この大きさに基づきロボットの速度を調整する制御系を構築できる。また、ロボットの初期姿勢のみ考慮しており、移動途中の停留が発生する。これは、移動途中でのロボットの停留の問題を考慮した姿勢制御を組み込むことで対応できると考える。

本研究では、文献<sup>[110]</sup>における姿勢推定の方法を応用し、画像特徴量の大きさを用いた制御系によって、非ホロノミック拘束による動作途中での停留を回避する方法を示す。第4.2節では、差動ロボットに単眼カメラを搭載し、目標画像を与え、これに一致するようにロボットを誘導するための姿勢推定方法を示す。第4.3節では、画像特徴量に基づいた制御器の設計方法について示す。第4.4節では、システムの有効性を検証するためにシミュレーションおよび実機実験を行う。

### 4.3 差動ロボットの構成および開発環境

基礎研究として TurtleBot3 Waffle Pi を利用した。概観を Fig.4.1, ロボットの仕様を Table 4.1, 開発環境を Table 4.2, カメラの仕様を Table 4.3 にそれぞれ示す。TurtleBot3 Waffle Pi は、差動二輪型ロボット（前輪が左右独立駆動）である。第2章で製作した拾得ロボットと幾何学的拘束は同等であり、縮小版として考えられる。ただし、後輪がボールキャスタであるため、改造をしない限りは屋内走行での用途に限定される。画像認識手段として、ロボットに標準搭載されている単眼カメラを利用する。ロボット制御には ROS (Robot Operating System) を用いた。ROS は、ロボットアプリケーション構築を支援するソフトウェアライブラリとツールの集合体である。

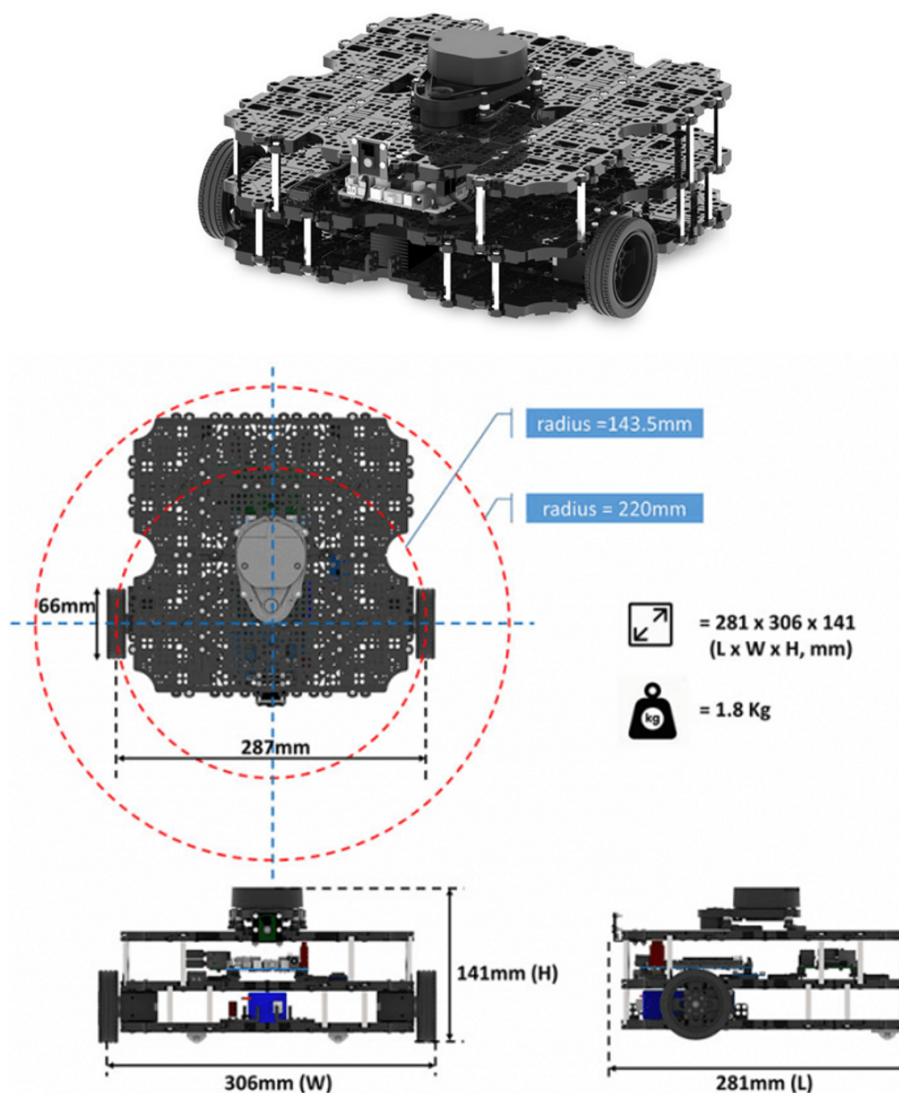


Fig. 4.1 Overview of the TurtleBot3 Waffle Pi < <https://www.turtlebot.com/turtlebot3/>> (Reference Date: December 31, 2025)

Table 4.1 Specifications for Turtlebot3 Waffle Pi

Parameters[Unit]	Value
Size(L x W x H) [mm]	281 x 306 x 141
Weight[kg]	1.8
Maximum Speed[m/s]	0.26
Maximum Angular Velocity[rad/s]	1.82
Wheel distance[mm]	287
Drive wheels radius[mm]	66

Table 4.2 Development Environment

PC OS	Ubuntu 16.04
ROS Version	Kinetic
Simulator	Gazebo 7.0
Programming language	Python
SBC (Single-board computer )	Raspberry Pi 3 Model B+
SBC OS	Raspbian

Table 4.3 Specifications of the Camera

Camera	Rasp-Pi Camera Module v2.1
Interface	CSI
IC chip model	Sony IMX219
Still image resolution	8 megapixels
Resolution / Frame rate	1080p (1920x1080) / 30fps 720p (1280x720) / 60fps 480p (640x480) / 90fps
Size (L x W x H) [mm]	24 x 25 x 9
Weight[g]	5

## 4.4 問題設定と差動ロボットの姿勢推定

### 4.4.1 問題設定

本研究では文献<sup>[110]</sup>と同様に、単眼カメラを搭載した差動ロボットを所望の画像特徴量における位置・姿勢へと誘導する問題を考える。Fig.4.2, Fig.4.3に示すように、カメラの中心を画像平面の中心  $O$  と一致させた直交座標系  $F$  を定義する。  $z$  軸はロボットの動作平面と直交する。  $x$  軸はカメラの光軸とロボットの前進方向とを一致させるように設定する。また、ロボットを所望の位置・姿勢まで移動させた状態を座標系  $F^*$  とする。画像フィードバックにより、  $F$  と  $F^*$  とを一致させることを目的とする。

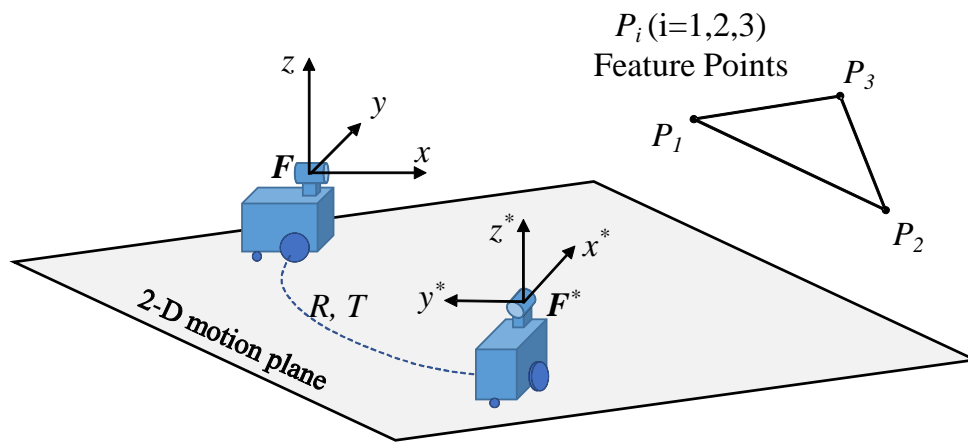


Fig. 4.2 Problem Definition ©2022 IEEE.

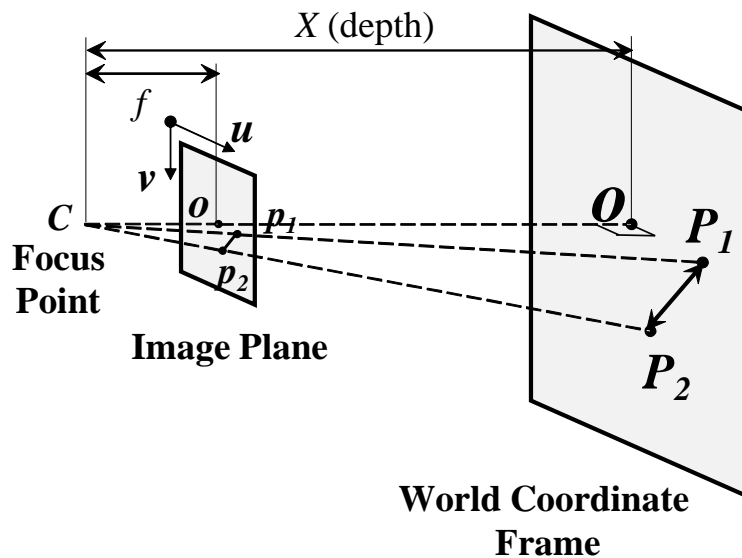


Fig. 4.3 Visual system Model ©2022 IEEE.

Fig.4.2において、3つ以上の特徴点  $\mathbf{P}_i$  ( $i=1,2,3,\dots,N$ ) の存在を仮定する. この3次元ユークリッド座標  $\mathbf{P}_i$ ,  $\mathbf{P}_i^* \in \mathbb{R}^3$  を,  $\mathbf{F}$  と  $\mathbf{F}^*$  に対して以下のように表す.

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{P}_i^* = \begin{bmatrix} X_i^* & Y_i^* & Z_i^* \end{bmatrix}^T \quad (4.1)$$

対応する画像平面上の座標  $\mathbf{p}_i$ ,  $\mathbf{p}_i^* \in \mathbb{R}^3$  を以下とする.

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} 1 & u_i & v_i \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{p}_i^* = \begin{bmatrix} 1 & u_i^* & v_i^* \end{bmatrix}^T \quad (4.2)$$

両者には以下の関係が成り立つ.

$$\mathbf{p}_i = \frac{1}{X_i} \mathbf{K} \mathbf{P}_i, \quad \mathbf{p}_i^* = \frac{1}{X_i^*} \mathbf{K} \mathbf{P}_i^* \quad (4.3)$$

ここで,  $\mathbf{K}$  はカメラの内部パラメータ行列を示す.

また, ロボットの平面運動における回転行列  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  と平行移動ベクトル  $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^3$  を用いて以下が成り立つ. ここで,  $\theta$  はロボットの姿勢を示す.

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{R} \mathbf{P}_i^* + \mathbf{T}, \quad (4.4)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

#### 4.4.2 画像特徴量を用いた差動ロボットの姿勢推定

本研究では文献<sup>[110]</sup>の方法により、ロボットの姿勢 $\theta$ を推定し、制御に利用する。

(4.1)-(4.4)式より、以下の式が得られる。

$$Y_i = \frac{\sin \theta + Y_i^* \cos \theta + T_y/X_i^*}{\cos \theta - Y_i^* \sin \theta + T_x/X_i^*} \quad (4.5)$$

$$Z_i = \frac{Z_i^*}{\cos \theta - Y_i^* \sin \theta + T_x/X_i^*} \quad (4.6)$$

文献<sup>[110]</sup>に従い、以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} a_{ij} & b_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = -c_{ij}, \quad i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, i \neq j \quad (\xi_1 : \sin \theta, \quad \xi_2 : \cos \theta) \quad (4.7)$$

ただし、 $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \in \mathbb{R}$  であり、以下のように定義される。

$$a_{ij} = \frac{Z_i^*}{Z_i} (Y_i Y_j^* + 1) - \frac{Z_j^*}{Z_j} (Y_i^* Y_j + 1) \quad (4.8)$$

$$b_{ij} = \frac{Z_j^*}{Z_j} (Y_j - Y_i^*) - \frac{Z_i^*}{Z_i} (Y_i - Y_j^*) \quad (4.9)$$

$$c_{ij} = (Y_i - Y_j) \frac{Z_i^* Z_j^*}{Z_i Z_j} + (Y_i^* - Y_j^*) \quad (4.10)$$

上式を複数の $i, j$ に関して連立させ、最小二乗法を用いて、 $\xi_1, \xi_2$ を求める。制約のいずれか2つは線形独立であることに注意が必要である。 $\hat{\theta}$ を以下より推定する。

$$\hat{\theta} = \text{atan2}(\xi_1, \xi_2) \quad (4.11)$$

## 4.5 差動ロボットの画像フィードバック制御

### 4.5.1 差動ロボットの運動学モデルと制御系の構成

本研究では、ロボットの絶対座標での位置・姿勢は以下の運動学モデルで示す<sup>[11]</sup>。

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_x \\ \dot{T}_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

すなわち、ここでは $v$ と $\omega$ が制御入力となる。

制御系の構成を Fig.4.4 に示す。ロボットに搭載されたカメラから、現在位置での画像を取得する。それと事前に用意した目標画像を画像処理の入力とし、両者の特徴量を一致させるようにロボットを動作させる。

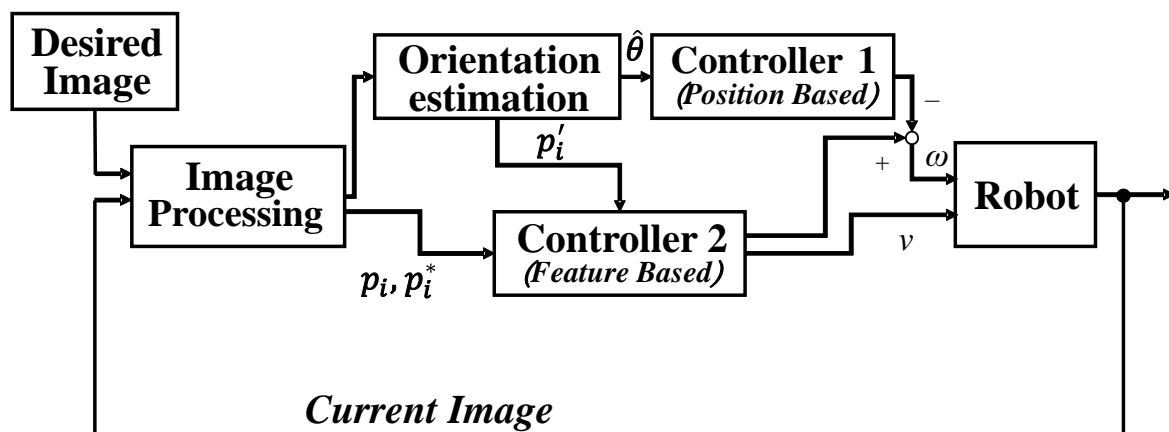


Fig. 4.4 Block diagram of the proposed control system ©2022 IEEE.

変換器により、ロボットの移動に伴って取得された各フレームの画像情報を変換して、制御器への入力値を生成する。制御器1は姿勢ベースの制御器であり、(4.11)式から、ロボット姿勢の推定値を算出し、角速度指令値 $\omega$ を生成する。比例制御により推定姿勢角を漸近収束させる。一方、制御器2は特徴量ベースの制御器である。ロボットの目標状態における画像特徴量と各時点の画像特徴量からロボットの速度指令値 $v$ を生成する。また、移動途中の停留を回避すると共に収束のロバスト性向上のために、特徴量の姿勢制御を用いる。

目標位置から見た現在位置の画像は、(4.3)式および $P' = R^{-1}P^*$ の関係から以下の式として導出される。

$$p'_i = \frac{X_i^*}{X_i'} K R^{-1} K^{-1} p_i^* \quad (4.13)$$

Fig.4.5は、始点から終点までのロボットの状態推移および、それに対応する画像フレーム上の特徴点の画像面上の座標を示す。左に現在の座標系における画像，右に目標状態における望ましい画像，中央に目標位置と現在の姿勢の変換画像を示す。

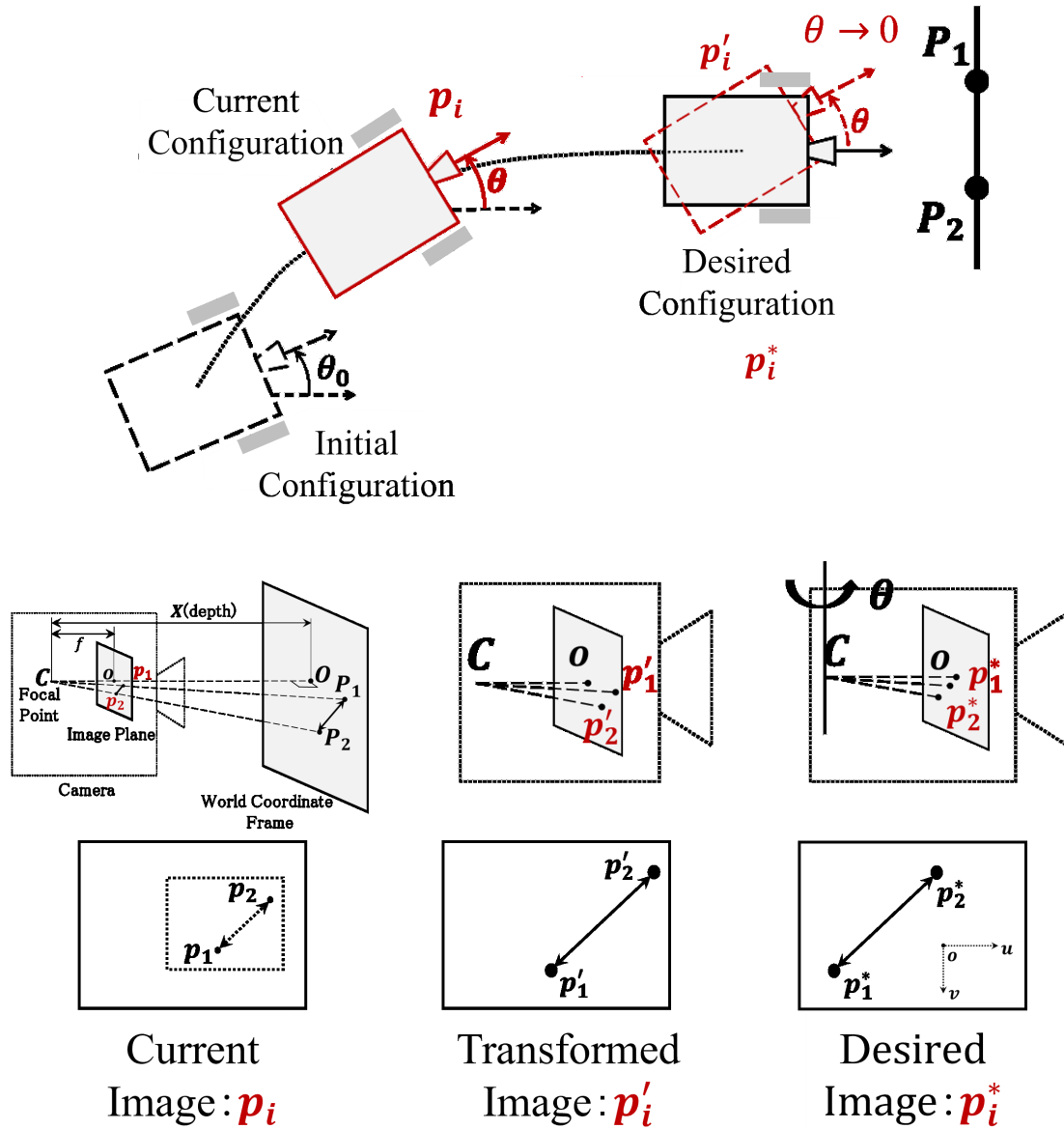


Fig. 4.5 Transformed image for orientation control ©2022 IEEE.

### 4.5.2 進行速度制御

画像特徴量を特徴量の位置点として用いる方法が存在するが、画像処理の過程で消失する可能性があり、複数の点からなる長さや面積などを用いることでロバスト性を向上できると考える。すなわち、目標状態までの距離に応じて画像上での大きさが変わるものであれば、この大きさに基づきロボットの進行速度を調整する制御系を構築できる。本研究では、進行速度  $v$  を特徴点間の距離に応じて調整する方法を提案する。すなわち、Fig.4.6 および以下の式に示すように、画像内の二点間の距離が一致したときに速度がゼロとなる。

$$v = K_0(\|\overrightarrow{p_1^* p_2^*}\| - \|\overrightarrow{p_1 p_2}\|), \quad K_0 > 0 \quad (4.14)$$

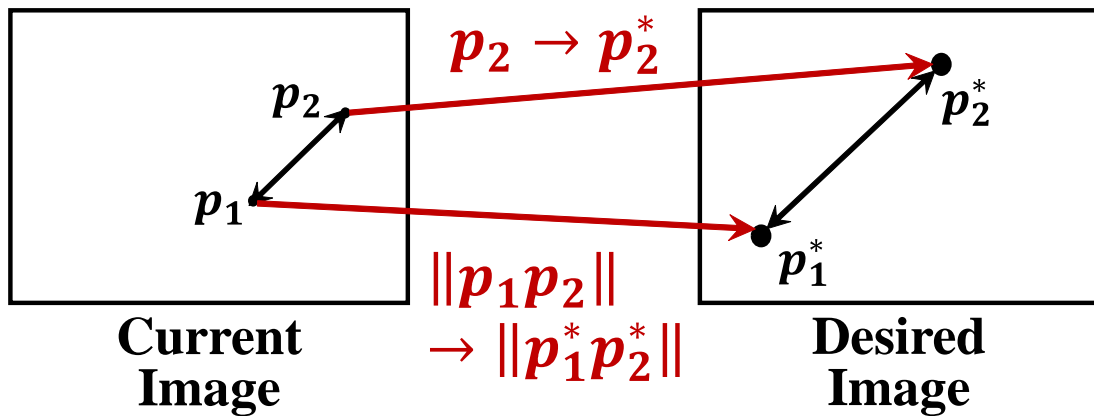


Fig. 4.6 Velocity control using feature points ©2022 IEEE.

### 4.5.3 旋回速度制御

旋回速度制御では、画像処理によって得られた推定角度  $\hat{\theta}$  と変換器で変換した目標位置から見た現在位置の画像のピクセル情報を入力として利用する。差動ロボットのフィードバック制御では非ホロノミック拘束により、ロボットが停留する場合がある。これを回避するために、旋回速度制御には指数減衰時変項のゲインと共に特徴点の座標の  $u$  成分も以下のように組み入れた。

$$\omega = -\{K_1 - \lambda \hat{\theta} \exp(-\alpha t)\} + K_2(u_{p'1} - u_{p1}), \quad K_1, K_2, \lambda, \alpha > 0 \quad (4.15)$$

ここで、 $u_{p1}$  は現在の座標系における画像特徴量の水平方向成分、 $u_{p'1}$  は変換した座標系における画像特徴量の水平方向成分をそれぞれ示す。

Fig.4.7 および Fig.4.8 に停留が発生する可能性のあるシナリオとその解決案を示す。

Fig.4.7 は旋回動作が直進動作より先に収束し、目標位置に未達となっている。この問題を解決するために、目標への接近度に応じて制御ゲインを小さくするために指数減衰項  $\lambda \hat{\theta} \exp(-\alpha t)$  を含めた。Fig.4.8 は初期位置での姿勢が目標位置での姿勢と同等となり、初動ができなくなる場合である。この問題を解決するためには、初期位置でのロボットの姿勢を変更する必要がある。そこで、特徴点の水平方向成分を用いた比例制御項  $-K_2(u_{p'1} - u_{p1})$  を含めた。これにより、 $\hat{\theta}$  の推定誤差を補償する。

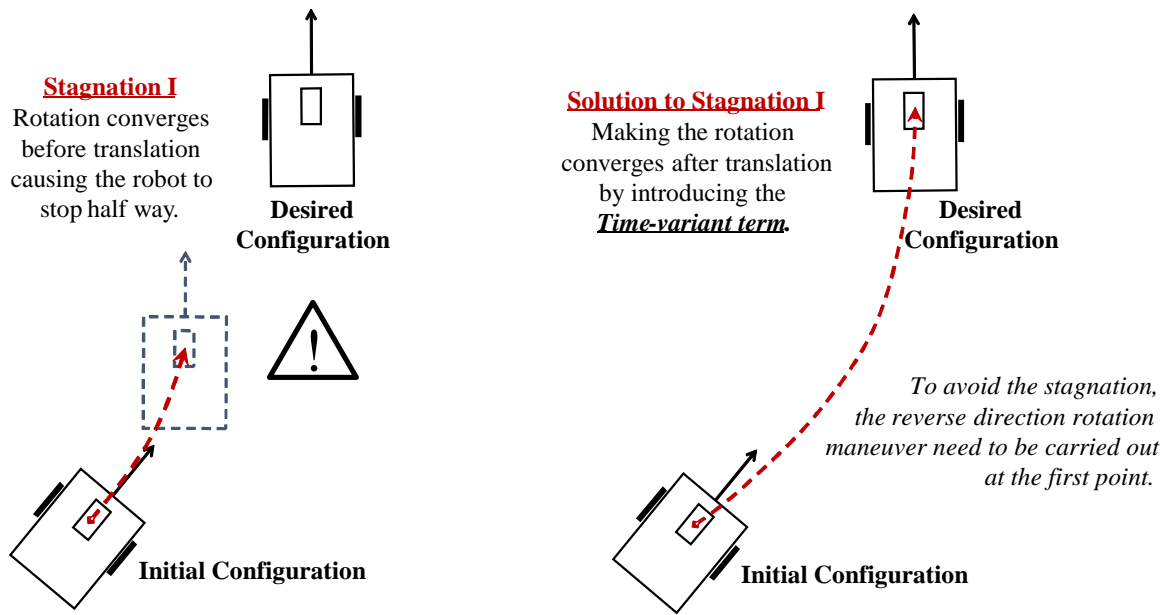


Fig. 4.7 Stagnation 1 scenario and countermeasures ©2022 IEEE.

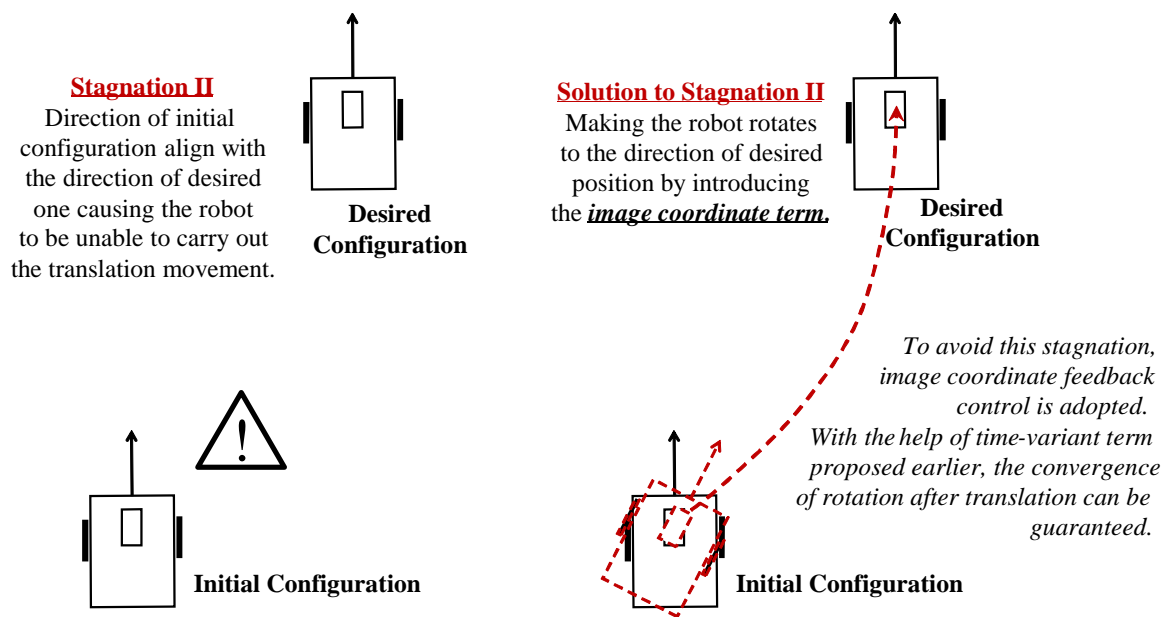


Fig. 4.8 Stagnation 2 scenario and countermeasures ©2022 IEEE.

## 4.6 シミュレーションおよび実験結果

### 4.6.1 画像特徴量の抽出およびマッチング

本研究では、画像解析により得られた特徴点を制御入力として利用する。オープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリである OpenCV に標準で用意されている特徴点マッチングアルゴリズムをベースに実装を行った。Table 4.4 に各アルゴリズムの得失比較を示す。本研究では、ロバスト性の高さ、計算速度の速さ、ライセンスフリーといった観点から ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) <sup>[112]</sup> を利用した。また、画像間の特徴点の対応付けに関しては、画像間の距離を総当たり計算で行い、最小となるものを最適として対応付けを求める Brute-Force Matcher を利用した。しかし、スケールの異なる画像の解析では、外れ値による誤認識が多発し、ロボットがうまく動作しなかった。これらを改善するために、特徴点のピクセル座標の整列などの条件に基づく確率分布のフィルタとして、 $\mu \pm 0.2\sigma$  の区間にある特徴点を選択し、その中で最も類似度の高いものを3点利用した。Fig.4.9 は確率分布フィルタを用いない場合の結果である。図中の丸で囲まれた点のペアに注目すると、左画像の認識位置と右画像のものが異なり、誤認識していることがわかる。Fig.4.10 は確率分布フィルタを用いた場合の結果である。Fig.4.9 に比べて、丸で囲まれた点が消え、マッチング結果が改善された。しかし、特徴点が密集し、その中の同一点を重複して認識され、解が求められなくなる場合もあり、更なる改良が必要である。

Table 4.4 Feature descriptor method comparison

手法	ロバスト性	速度	ライセンス	備考
Harris	回転	○	○	スケールが変わると精度が低下
SIFT	回転・スケール・明るさ	×	×	特徴量が128次元のためメモリ負荷大。特許取得のため商用利用不可
SURF	回転・スケール・明るさ	△	×	SIFT を高速化。特許取得のため商用利用不可
ORB	回転・スケール・明るさ	○	○	特徴量を2値化しており速い。特許問題がない
KAZE	回転・スケール・明るさ	×	○	Gaussian カーネルではなく非線形フィルタを使用。特許問題がない
AKAZE	回転・スケール・明るさ	○	○	KAZE を高速化。特許問題がない

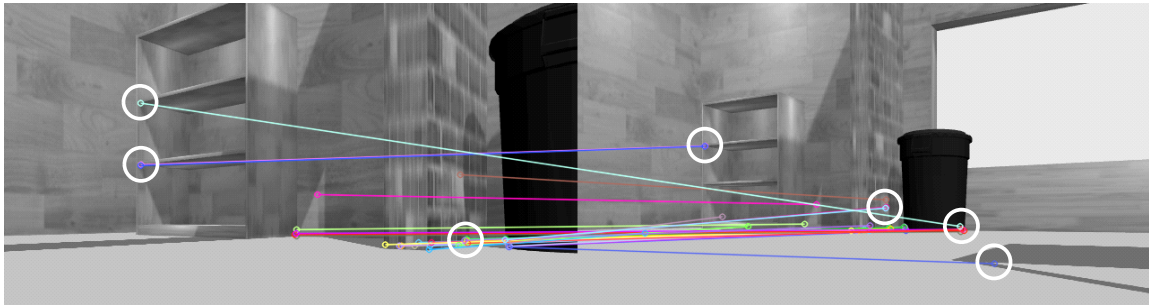


Fig. 4.9 Extraction result of image feature points without any filter ©2022 IEEE.

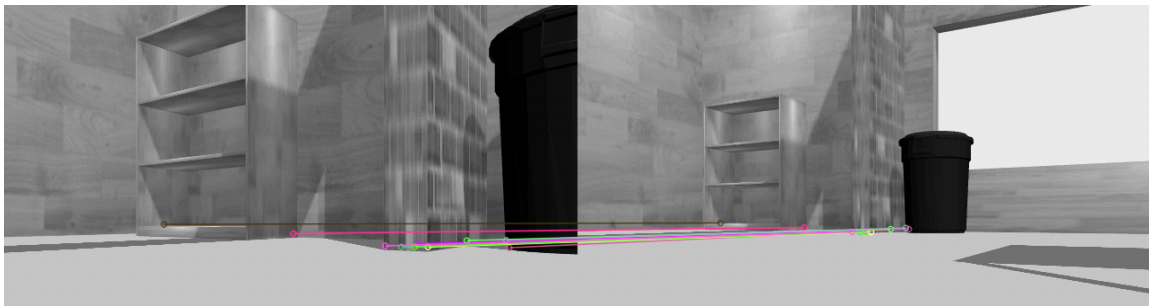


Fig. 4.10 Extraction result of image feature points with a filter ©2022 IEEE.

### 4.6.2 シミュレーション

提案した画像認識アルゴリズムと制御器の有効性を ROS (Robot Operating System) のシミュレータである Gazebo を用いて検証する。

制御パラメータは Table 4.5 に示すようにチューニングした。Fig.4.11 にカメラ画像, Fig.4.12 にロボットの位置姿勢の遷移を示す。Fig.4.11 において, (a) 初期画像, (b) 収束画像, (c) 目標画像をそれぞれ示す。Fig.4.12 において (a) 初期状態, (b) 過渡状態, (c) 収束状態をそれぞれ示す。ここで, ロボットの初期位置は, 目標位置に対して 3[m] 後方斜め  $15^\circ$  とした。また, 初期姿勢角は目標姿勢に対して時計周りに  $45^\circ$  とした。Fig.4.12(b) から, 特異状態を避けつつ, 位置・姿勢を修正しながら進行している挙動が確認できた。また, Fig.4.12(c) から, 最終的に, 目標通りの位置姿勢で収束していることが確認できる。

Table 4.5 Control parameters in simulation ©2022 IEEE.

Parameters[Unit]	Value
$K_0[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	0.15
$K_1[\text{s}^{-1}]$	0.15
$K_2[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pixel}^{-1}]$	0.00025
$\lambda[\text{s}^{-1}]$	0.45
$\alpha[\text{s}^{-1}]$	0.025

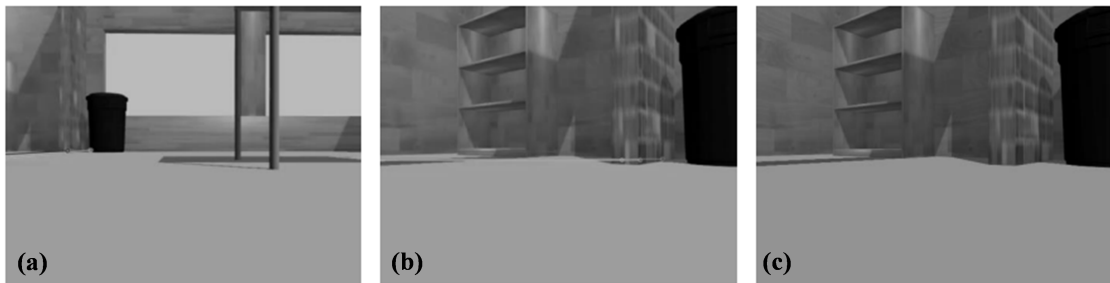


Fig. 4.11 Image of camera mounted on the robot in the simulation (a) Initial config., (b) Final config., (c) Desired config. ©2022 IEEE.

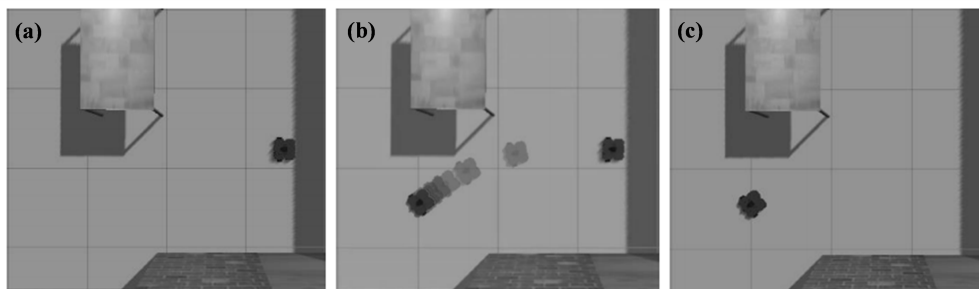


Fig. 4.12 Robot position and orientation in the simulation (a) Initial config., (b) Transient config., (c) Final config. ©2022 IEEE.

### 4.6.3 実機実験

実験には、TurtleBot3 Waffle Pi を用いた（計算機：Raspberry Pi 3 Model B+, カメラ：Rasp-Pi Camera Module v2.1）。

制御パラメータは Table 4.6 に示すようにチューニングした。Fig.4.13 にカメラ画像，Fig.4.14 にロボットの位置姿勢の遷移を示す。Fig.4.13 において (a) 初期画像，(b) 収束画像，(c) 目標画像をそれぞれ示す。Fig.4.13 において (a) 初期状態，(b) 過渡状態，(c) 収束状態をそれぞれ示す。ここで，ロボットの初期位置は，目標位置に対して 2[m] 後方斜め  $15^\circ$  とした。また，初期姿勢角は目標姿勢に対して反時計周りに  $35^\circ$  とした。目標地点に本を設置したものを目標画像とした。Fig.4.14(b) から，特異状態を避けつつ，位置・姿勢を修正しながら進行することを確認できたが，タイヤと床のスリップが発生していることも確認できた。Fig.4.14(c) から，最終的に，目標位置よりも約 0.06[m] 右側，姿勢角は反時計周りに若干傾いている状態で停止した。目標とした半径 0.1[m] 以内での収束を概ね達成した。

Table 4.6 Control parameters in experiment ©2022 IEEE.

Parameters[Unit]	Value
$K_0[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	0.125
$K_1[\text{s}^{-1}]$	0.15
$K_2[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pixel}^{-1}]$	0.00025
$\lambda[\text{s}^{-1}]$	0.55
$\alpha[\text{s}^{-1}]$	0.025

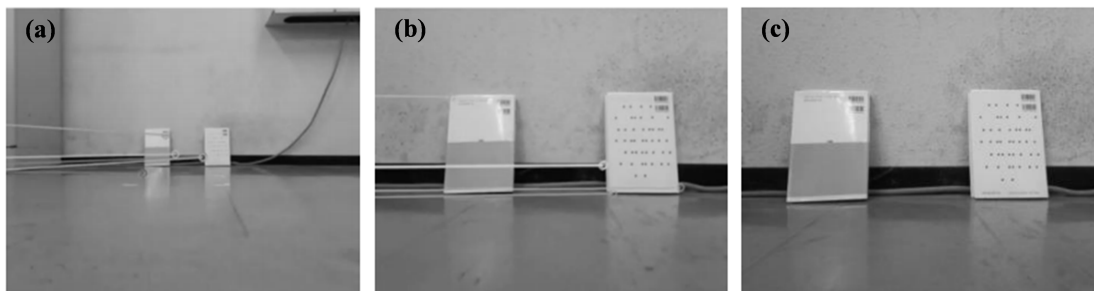


Fig. 4.13 Image of camera mounted on the robot in the experiment (a) Initial config., (b) Final config., (c) Desired config. ©2022 IEEE.

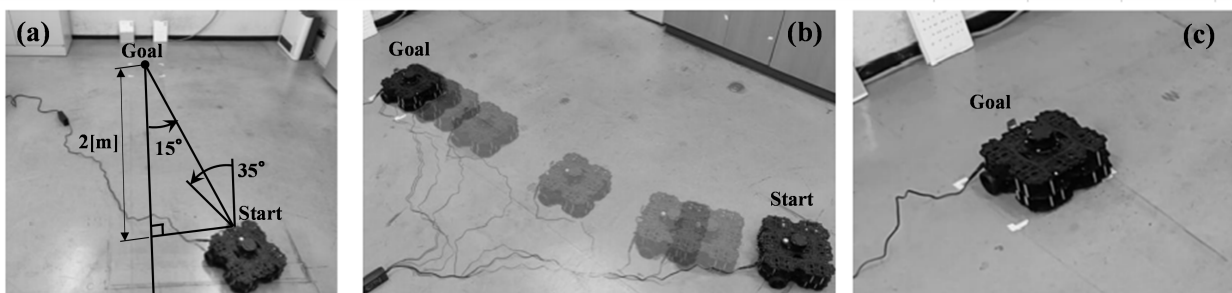


Fig. 4.14 Robot position and orientation in the experiment (a) Initial config., (b) Transient config., (c) Final config. ©2022 IEEE.



## 第5章 結論

### 5.1 本研究の結論

「地表に散在する物体拾得のための移動ロボットの設計と制御」の研究を行う中で、以下の結果が得られた。

第2章の「堅果拾得ロボットの機械設計」では以下の結果が得られた。

1. 地表面に散在する樁の実および種子に関して一連の拾得作業の自動化に適した堅果拾得ロボット（アーム型移動ロボット）を設計・製作し、その構成法を示した。
2. 地表面へのエンドエフェクタの押し付け角度と押し付け力およびエンドエフェクタのワイヤ開口量との相関から実験的に最適条件を求め、一定の拾得能力を有していることを確認することで、自動化に向けた指針を見出した。

第3章の「不整地対応のための接触力制御および実験検証」では以下の結果が得られた。

1. 堅果拾得ロボットのエンドエフェクタに取り付けたポテンショメータにより、地表面の起伏をバネの変位として計測し、アームのフィードバック制御による接触力制御系を実現した。
2. 屋外環境で樁の実および種子を想定した拾得実験により提案法の有効性を検証した。制御を行わない場合に比べ、実の拾得成功率90%以上、拾得個数のばらつきが約48%低減を達成した。

第4章の「画像特徴量の大きさをを用いた差動ロボットの位置制御と実験検証」では以下の結果が得られた。

1. 到達地点の目標画像を与えることによる差動車輪移動ロボットの制御系を構築した。画像特徴点の抽出およびマッチングに関しては、従来のアルゴリズムに確率分布フィルタを加えることによって認識精度を向上させた。また、目標状態までの距離に応じて画像上で大きさが変わる特徴量に基づいて、ロボットの速度調整を行う制御系の構築およびロボットの停留問題を考慮した姿勢制御の方法を示した。
2. シミュレーションと、安価なロボットでの実機検証を実施した。実機検証にて、目標位置の0.1[m]の半径に所望の姿勢で収束させることができ、提案した制御系の有効性を示した。

本研究で提案した堅果拾得ロボットは、小型（樹間を小回りで移動）・低コスト・良好なメンテナンス性などを基本コンセプトとした。日本の中山間地や実際の椿園のフィールドを想定した機械サイズとした。ロボットの構成要素として、電動車いすで一般的に用いられている差動二輪駆動方式とし、また、市販品の籠型エンドエフェクタを利用することで低コストかつ交換性を確保しており実用性が高い。また、エンドエフェクタのワイヤピッチと拾得対象物の大きさの関係性を分析し、設計の拡張性および汎用性についても検証を行った。屋外清掃ロボットをアナロジーとして、ロボットの前進移動と同時に連続的に拾得するように籠型エンドエフェクタを配備し、高い拾得効率を実現した。また、不整地での拾得作業に耐え得るように、高い機械剛性（振動や衝撃への耐性）と起伏への柔軟性を両立した。高い機械剛性はアーム駆動系にウォームギアを利用し、起伏への柔軟性はエンドエフェクタ部をバネ付勢することで実現した。

上記のような機構設計としての工夫に加え、制御により、さらに大きな起伏への対応を可能とした。エンドエフェクタを地面の起伏に柔軟に追従させる力制御が望ましいが、本ロボットの構成上、ウォームを利用しており逆駆動が不可能である。そこで、地面の起伏をエンドエフェクタ周りのバネ変位として計測し、アーム角度を調整する接触力制御を構築した。これにより大きな起伏への対応および椿の実の拾得率の向上を実現した。

林床での拾得作業では樹木をランドマークとして、樹下の拾得位置にアプローチすることが有効である。単眼カメラかつ差動二輪駆動の車体で構成できれば低コストに抑えられる。そこで、画像上での大きさが変わる特徴量に基づいて、ロボットの速度調整を行う移動制御系を構築した。併せて、差動ロボットの非ホロノミック拘束による停留点回避も考慮した姿勢制御を構築した。これにより、頑健な認識性能と低コストを実現しており、実用的である。本アルゴリズムは、目標画像を用いた画像フィードバックによる移動制御の応用としては、何らかの人工的なランドマークに対して精確な位置姿勢制御が求められる場面に応用可能であり、将来的にはランドマークの設置が困難な場所においても、類似画像から人工知能に学習させ、目標画像自体を生成することで適用範囲を拡大できると考えられる。

上述のように、機構および制御としての実用性・新規性・独創性に加え、拾得作業を伴う不整地移動ロボットとして、有用な構成法を体系的に示した点で学術的な意義も高いと考える。

## 5.2 今後の課題と展望

本研究では、前節のとおり一定の成果が得られた。これらを基盤として、実用化に向けて以下のような課題と展望が挙げられる。

### 1. 拾得効率の更なる向上

本研究で設計・製作したロボットを設計変更することで更なる拾得効率の改善を図れると考える。例えば、エンドエフェクタの数・配置の最適化が考えられる。今回、大小のエンドエフェクタを2つずつ・2列・同一進行方向に配置したが、Fig.5.1に示すように進行方向に対して隙間なく交互に配置することで被覆領域を増やせる。また、Fig.3.11に示したように屋外圃場の整備状況によって、拾得効率が左右される。事前に整備されていない環境においても拾得効率を向上させるために、ベースフレーム先端側にファンを追加することで、進行方向の落ち葉を除去するなどの対策が考えられる。また、小エンドエフェクタのリンク回転軸  $O_5'$  にもポテンショメータを追加し、局所的な起伏に追従させ、樁の種子に対しても押し付け力を調整することで拾得率を向上できると考える。他にも、地表面に散在する樁の実や種子をカメラなどの外界センサで捉えて、密集度を割り出して、そこに向けて位置合わせしながら進路を取り、拾得率を向上させることなどが考えられる。

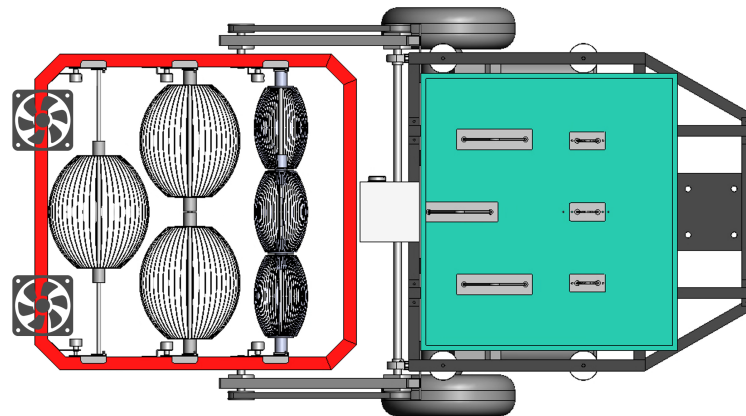


Fig. 5.1 Alternative proposal for end effector placement

### 2. 様々な起伏や傾斜への対応力強化

アーム部の自由度を拡張することによる対応が考えられる。例えば、ベースフレームの回転軸  $O_3$  を駆動軸とすることで、ベースフレームをピッチ方向に揺動させる。また、脚機構を追加し、車両姿勢を斜面に倣わせるように可変させる手段も考えられる<sup>[115]</sup>。既存のIMUで計測した車両姿勢情報を用いて、起伏に対してアーム角度や車輪速度を制御する方法も考えられる。いずれも機構の複雑化および多変量の制御パラメータが発生するため、技術難易度は高いものとなる。

### 3. 軟弱地盤などフィールド環境変動への対応力強化

機械と土壌の相互力学関係（テラメカニクス）を考慮した不整地移動ロボットの研究が

行われている<sup>[116]</sup>。これらの知見を活用し、軟弱地盤（砂地・耕地・レゴリスなど）で、テラメカニクスに基づいたアームや車輪のトラクション制御を行うことが考えられる<sup>[117][118]</sup>。エンドエフェクタの接触状態から地盤パラメータを推定し、地表面の特性に合わせた制御（エンドエフェクタの接地圧や車輪のトラクション制御を動的にパラメータ調整）あるいは車輪のスリップや沈下を予測して回避するように経路選択を最適化するなどが考えられる。

#### 4. 外界認識や移動制御系などとの統合

本研究においては、小型の差動二輪ロボットを用いて屋内の狭環境での誘導には成功したが、屋外で走行可能なロボットに適用し、環境変動に対するロバスト性の検証が課題として残る。また、本研究で提案した物体認識アルゴリズムは、目標画像を事前に用意する手間が課題として残る。樹木の状態変化、日照影響などを踏まえて安定した目標画像を得ることは困難である。そこで、物体認識に関してはデプスカメラを利用し、樹幹幅を直接的かつリアルタイムに検出する手法に代替する。以降の画像特徴量の大きさに基づいた差動ロボットの制御は、提案手法をそのまま活用することを考える。本研究室において、樹木をデプスカメラで物体認識し、樹木の周回および樹間移動の経路計画・最適化の研究を進めており、電動車いすによる屋外実験で一定の成果が得られている<sup>[119][120]</sup>。

#### 5. 複数台のロボットによる協調制御、群ロボットとしての展開

本研究で設計・製作したロボットは複数台で運用することにより、作業効率を倍増することができる。その際、ロボット同士の協調制御や拾得工程の全体最適化が研究課題となる。また、群ロボットという観点で、単一の高性能なロボットではなく、比較的単純な機能を持つロボットを多数用意することも考えられる。この場合、エンドエフェクタを1つだけ有する小型の不整地移動ロボットを設計・製作する方向性が考えられる。

#### 6. ビジネスモデルの検討

近年、RaaS（Robot as a Service）と呼ばれ、ロボットを購入するのではなくサービスとして利用するモデルが登場している。これにより、従来、初期投資の高額なロボットの導入のハードルを低減し、手軽にロボットを利用できるようになりつつある<sup>[121]</sup>。RaaSには大きく4種類あり、一定の月額料金を支払う「サブスクリプションモデル」、ロボットの操作やメンテナンスなども含め特定業務を任せる「業務請負モデル」、利用時間や作業量に応じて料金が発生する「従量課金モデル」、ロボットが達成した成果に対して報酬を支払う「成功報酬モデル」が挙げられる。収穫作業は季節限定であることから、「業務請負モデル」とし、複数台のロボットを持参し巡業する形態で現場作業のノウハウ蓄積も同時に進めることが望ましいと考える。また、ロボットにLiDARなどを搭載し、樹木の状態を三次元計測してデータ化することで、環境モニタリングおよび環境保護に寄与するという副次効果も考えられる<sup>[122]</sup>。

最後になるが、農業ロボットの開発と社会実装は、日本の持続的な発展にとって不可欠なものであり、今後さらに重要性が高まる。現段階では、「単価が高い・収穫時期が長い・収穫量が多い・生育環境が安定している」などビジネス的に成立しやすい作物が優先的に収穫ロボットの対象になっているが、「植物を傷つけない、高速での収穫、不整地での走行」などの技術の進展とともに、その応用範囲がより多くの作物に拡大していくと考えられる。本研究における地表面に散在する堅果拾得作業の自動化アプローチは、技術進展の大きな方向性と合致しており、一石を投じたものとする。果樹の収穫作業は作物ごとに多種多様であるが、本研究の方法論が今後の研究開発の解決策の一助になることを期待する。



## 謝辞

本論文は、2018年10月から2025年3月までに社会人学生として遂行した研究をまとめたものであり、多くの先生方のご指導と多くの方々のご協力の賜物であります。ここに、万感の思いを込めて、深い感謝の意を表します。

豊橋技術科学大学の皆様に深く感謝致します。博士後期課程2年次当初の研究室異動時より、指導教員をお引き受けいただいた機械工学系教授 内山 直樹 先生には、ご多忙な中、本論文の作成、定期的な研究相談、論文投稿や発表など、全面的なご支援と懇切丁寧なご指導をいただきました。加えて、研究活動を継続する上で紆余曲折があり、お手数をお掛けしましたが、あらゆる局面で親身になって調整をいただきました。内山先生に伴走していただき、本研究を成し遂げられたことを最大の幸運に思います。深く感謝致します。本論文の審査委員を務めていただきました機械工学系 教授 高山 弘太郎 先生、同准教授 高橋 淳二 先生にはご多忙な中、お時間をいただき、貴重なアドバイス・ご指導を賜りましたことを深く感謝致します。そして、ご助言、ご協力いただきましたシステム工学研究室の皆様、特に、同じ班で研究をさせていただいた Chansocheat Tieng 氏、水野 元博 氏、石山 拓矢 氏、Carey Sinaga 氏、林 凌生 氏に深く感謝致します。定期的なミーティングの中での議論が主でしたが、画像認識や経路計画などの本研究にも寄与する基盤技術に関して連続的に研究を進めていただきました。また、学会発表においては共著者として連名いただきましたことに感謝致します。

また、かつての恩師であり、博士後期課程入学当初の指導教員を快くお受けいただき、研究初期段階の方向性をご指導いただいた旧システム制御研究室 准教授、現 長岡技術科学大学システム安全工学系 教授 三好 孝典 先生に深く感謝致します。同じく、かつての恩師である寺嶋 一彦 前学長には入学許可証の授与とともに「君ならできる」と激励をいただき、本研究の初動に背中を押していただきました。感謝致します。そして、研究室は解散しましたが、旧システム制御研究室の皆様には感謝致します。

株式会社ケーイーアール 代表取締役社長 柿原 清章 氏には、修士時代に共同研究をさせていただいた繋がりから、本研究に対してもご厚意で実験装置の設計製作にご協力いただきましたことに深く感謝致します。技術者・経営者の両方の視点を改めて学ばせていただき、本研究においては企業間の交渉などへの向き合い方、厳しさも同時に学ばせていただきました。社会発展に向けた人財育成の眼差しと献身に敬服致します。同じく、株式会社ケーイーアールの柿原 亮也 氏には要求仕様に基づいた装置設計を、佐郷 幸法 氏（現 豊田高専 准教授）には制御設計を通してご支援いただきました。厚く御礼申し上げます。

私の勤務先であるコニカミノルタ株式会社の皆様に深く感謝致します。産学連携を牽引されていた芝田 兆史 氏（旧開発推進部）には、社会人学生という道をご提案いただき、挑戦を決意してからも多くの温かいお言葉で鼓舞していただき、挫折しそうな場面でも奮起することが

できました。また、実験装置製作のための資金面のご支援など、研究を進める上での多くの困りごとに親身になって対応いただきました。同じく、錦内 裕史 氏（旧開発推進部）にも多くの相談事に親身になって対応いただきました。お二方の実質的なご支援がなければ本研究が軌道に乗ることは無かったです。深く感謝致します。自職場の皆様にも感謝致します。直接的には通常業務とは関連しない研究内容であるにも関わらず、ご理解をいただき、様々な調整に奔走いただいた歴代の上長各位 関野 仁志 氏、丸地 典利 氏、豊田 恵子 氏、田中 宏樹 氏、杉浦 太 氏に感謝致します。また、製品開発業務で多忙な中、研究活動を並行することへの理解を示し、ご支援いただいた同僚の皆様、深く感謝致します。

東京都立大学システム学部サービスロボットインキュベーションHUB serBOTinQの笠松 慶子 先生、相野谷 威雄 先生、武居 直行 先生、久保田 直行 先生、池井 寧 先生に深く感謝致します。本研究の前身となる社外研修でのコンセプト検討をはじめ、「島しょエリアの産業活性化プロジェクト」への参画を通して伊豆大島での現地ヒアリングの機会をいただき、ニーズ調査の手助けをいただきました。

豊橋技術科学大学先端農業・バイオリサーチセンターの山内 高弘 先生には、「最先端植物工場マネージャー育成プログラム8期」にて、研究課題のご指導をいただきました。また、この講座を通して、地域の農業について学ぶことができ、広く課題認識を得ることができました。深く感謝致します。

最後に、長期に渡る社会人学生としての研究への挑戦を許し、支援してくれた家族に深く感謝します。在学期間中に他界した祖父 国雄、実母 美恵子に深い感謝と共に本論文を手向けます。仕事と研究で休日も相手できないことが多かったが我慢してくれた幼少期只中の息子の全、娘の花奏にも感謝致します。子供たちの面倒を見ていただき、日々ご支援いただいた義父・義母に深く感謝致します。共働きかつ子育てをしながらも忍耐強く献身的に日々を支えてくれた妻 文恵には、格別の感謝をするとともに、敬意を表します。

皆様の長期に渡る多大なるご支援の下、今日まで研究を遂行できたことを深く感謝するとともに、今後はこれらの貴重な経験を糧として、社会と多くの方々に貢献していく所存です。

# 論文リスト

## 査読付学術論文

1. 佐藤 隆史, 柿原 清章, 佐郷 幸法, 柿原 亮也, 内山 直樹, 地表に散在する物体回収のための移動ロボットの設計と実験検証, 日本ロボット学会誌, vol.41, no.1, pp.82-91, 2023.
2. R.Sato, N.Uchiyama, Contact Force Control and Experimental Verification of a Mobile Robot for Picking Up Objects on the Ground, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.37, no.3, pp.720-730, 2025.

## 査読付国際会議論文

R.Sato, T.Chansocheat, N.Uchiyama, Visual Servoing of a Differential Robot with Image Feature Size and Experimental Verification, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Narvik, Norway, Jan. 9-12, 2022, pp.690-694.

## 特許

特許第 7443998 号 物体拾得装置

## 口頭発表

1. 佐藤 隆史, 内山 直樹, 地表に散在する物体回収のための移動ロボットにおける接触力制御と実験検証, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会,RSJ2025AC3G1-01,2025.
2. 石山 拓矢, 水野 元博, SINAGA Carey, 佐藤 隆史, 内山 直樹, 地表に散在する物体回収のための移動ロボットの制御, SICE SI, vol.23, pp.3P2-A03, 2022.
3. C.Sinaga, T.Ishiyama, R.Sato, N.Uchiyama, Optimal Motion Generation of Mobile Robots for Collecting Fruits Scattered on the Ground, 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), pp.1271-1272, 2023.



## 参考文献

- [1] 農林水産省公式ウェブサイト, 農業労働力に関する統計,  
< <https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [2] 農林水産省公式ウェブサイト, 将来推計人口,  
< [https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/shuraku\\_data/2020/sc/index.html](https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/shuraku_data/2020/sc/index.html) >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [3] Jacom, 基幹的農業従事者 2050年36万人 100万人減 農地集約 喫緊の課題 全中が中長期見通し推計,  
< <https://www.jacom.or.jp/nousei/news/2024/01/240115-71762.php> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [4] 農林水産省公式ウェブサイト, 農業の「働き方改革」主要品目ごとの課題と経営者の取組,  
< <https://www.maff.go.jp/j/study/work/attach/pdf/index-15.pdf> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [5] ツギノジダイ, スマート農業技術活用促進法, 2024年10月施行 優遇税制や融資も紹介,  
< <https://smbiz.asahi.com/article/15395161> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [6] 農林水産省公式ウェブサイト, 開発供給実施計画の認定状況について, < [https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/houritsu/kaihatsu\\_keikaku\\_ninntei\\_jyoukyou.html](https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/houritsu/kaihatsu_keikaku_ninntei_jyoukyou.html) >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [7] FINTOS!, 世界で待望される「自動収穫ロボット」(野村のフード&アグリ経営塾),  
< <https://fintos.jp/page/16938> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [8] PRTIMES, 収穫ロボット市場は2030年に3,293.8百万米ドルに達すると予測,  
< [https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000055.000087115.html](https://prt看imes.jp/main/html/rd/p/000000055.000087115.html) >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [9] 村上, 収穫ロボットの現状, 展望, 日本ロボット学会誌, vol.39, no.10, pp.885-887, 2021.
- [10] 農林水産省公式ウェブサイト, ロボット農機, < <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/forum/R2smaforum/mattingu/robot.html> >  
(Reference Date: December 31, 2025).

- [11] ロボットトラクタによる無人農作業システム, 北海道開発協会開発こうほう, no.571, pp.17-21, 2011.
- [12] 菅谷, 青山, 藤田, 小野山, 深尾, 松田, デプスカメラを用いた収穫部の高さ制御によるタマネギ自動収穫, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, ROMBUNNO.1A1-A204, 2020.
- [13] 浅野, 大西, 深尾, 環境変化にロバストなキャベツ認識と自動収穫, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, ROMBUNNO.1P2-A06, 2021.
- [14] 株式会社レグミン, 農作業用走行車, 制御装置及びプログラム, 特許第 6700500 号, 2020.
- [15] P.Mokhadkar, Precision and Productivity, The Role of Automation in Vertical Farming Optimization, International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, vol.14, iss.1, 2025.
- [16] スマート農業 360, ほうれん草自動収穫装置,  
< <https://smarnogyo.com/archives/1129.html> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [17] 長谷川, トマト自動収穫ロボット「FARO」の開発, 日本ロボット学会誌, vol.39, no.10, pp.907-910, 2021.
- [18] 矢口, 長谷川, 長濱, 稲葉, 収穫装置と視覚認識に着目したトマト自動収穫ロボットの構成法, 日本ロボット学会誌, vol.36 no.10, pp.693-702, 2018.
- [19] 尾崎, 原, 鹿内, 大山, 出射, イチゴ摘みロボットの開発—果皮にふれないことによる高品質イチゴの摘み取り—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, ROMBUNNO.1A1-A21, 2010.
- [20] 第 42 回発明大賞特集号 発明と生活, 公益財団法人 日本発明振興協会, no.594, pp.22-23, 2017.
- [21] 国立大学法人宇都宮大学, 果物類の容器及びその容器の使用法, 特許第 5733863 号, 2015.
- [22] 田口, 入江, 堀江, 陣野, 片岡, 近藤, 全自動収穫ロボットシステムの開発, 長崎県工業技術センター研究報告, 2010.
- [23] S.Slajpah, M.Munih, M.Mihelj, Mobile Robot System for Selective Asparagus Harvesting, Agronomy, vol.13, no.1766, iss.7, 2023.
- [24] 斎藤, AI を活用した吊り下げ式の自動収穫ロボット, 日本ロボット学会誌, vol.39, no.10, pp.901-906, 2021.
- [25] Tevel tech, < <https://www.tevel-tech.com/> > (Reference Date: December 31, 2025).

- [26] B.Arad, J.Balendonck, R.Barth, O.Ben-Shahar, Y.Edan, T.Hellström, J.Hemming, P.Kurtser, O.Ringdahl, T.Tie-len, B.Tuijl, Development of a sweet pepper harvesting robot, *Jornal of FIELD ROBOTICS*, vol.37, no.6, pp.1027-1039, 2020.
- [27] Saya Giken, Inc., Sphere Accenting Device, Teikaihei 08-000769, 1996.
- [28] Octinion, Press release:Octinion presents the world's first strawberry picking robot, < <http://octinion.com/> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [29] Monchiero, Nut Harvester 20125, 20125 Ferox-Raccogliatrice Semovente-Monchiero.
- [30] 農林水産省, ロボット技術・ICT の今後重点的に取り組む課題について, < [https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g\\_smart\\_nougyo/pdf/02\\_kadai.pdf](https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_smart_nougyo/pdf/02_kadai.pdf) > (Reference Date: December 31, 2025).
- [31] 西, スマート農業におけるマニピュレーション技術の課題, *日本ロボット学会誌*, vol.37, no.6, pp.499-502, 2019.
- [32] 株式会社椿, 椿の実の回収用網およびこの回収網を使用した椿の実の回収方法, 特開 2007-166935.
- [33] SMART AGRI, AI 認識&ロボットアームによる栗拾いロボット「Arm-I」の実証実験がスタート, < <https://smartagri-jp.com/news/1914> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [34] 公立大学法人熊本県立大学, 栗の収穫機, 特許第 7296072 号, 2023.
- [35] OREC Co., LTD, バーディーマロンピッカー (BX800/M8-MP750), < <https://www.orec.co.jp/info/2232/> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [36] NEDO, 2035 年に向けたロボット産業の将来市場予測, < <https://www.nedo.go.jp/content/100929667.pdf> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [37] PRTIMES, 業務用掃除ロボット 2024 年に 150 億円規模に, < <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000019.000035568.html> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [38] ロボスタ, 三菱地所に 5 種類の業務用清掃ロボットが大集合, < <https://robotstart.info/2019/01/31/mec-autonomous.html> > (Reference Date: December 31, 2025).

- [39] 石川, 青山, 関, 岡村, 石村, 尾崎, 横田, 山本, 屋外清掃ロボットの实用化, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.6, pp.802-812, 2007.
- [40] 小畑, 西田, 宮河, 近藤, 大川, 投棄ゴミの回収を行う屋外サービスロボットの開発, 電気学会論文誌 C, vol.126, no.7, pp.840-848, 2006.
- [41] NEDO, フィールドロボットの現状と課題, NEDO ロボット白書 2014, pp.51-548, 2014.
- [42] 株式会社ケーイーアール, 物体回収装置, 特許第 6562400 号, 2019.
- [43] N.Pereira, F.Ribeiro, G.Lopes, D.Whitney, J.Lino, Autonomous golf ball picking robot design and development, *Industrial Robot: An International Journal*, vol.39, no.6, pp.541-550, 2012.
- [44] I.Elamvazuthi, J.Law, V.Singh, M.K.A.Khan, S.Parasuraman, M.Balaji, M.Chandrasekaran, Development of an autonomous tennis ball retriever robot as an educational tool, *IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS) 2015*, *Procedia Computer Science*, vol.76, pp.21-26, 2015.
- [45] 相馬, 山口, 福岡, 内山, 屋外清掃ロボットの設計と制御, 第 23 回システムインテグレーション部門講演会, 計測自動制御学会, pp.2313-2314, 2022.
- [46] T.R.Schafle, A.Tokui, N.Uchiyama, A Hybrid Systems Approach with Input-Output Linearization for Automotive Parking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, *IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics*, pp.240-245, 2018.
- [47] T.R.Schafle, M.Mitschke, N.Uchiyama, Generation of Optimal Coverage Paths for Mobile Robots Using Hybrid Genetic Algorithm, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.33, no.1, pp.11-23, 2021.
- [48] T.R.Schafle, N.Uchiyama, Probabilistic Robust Path Planning for Nonholonomic Arbitrary-Shaped Mobile Robots Using a Hybrid A\* Algorithm, *IEEE Access*, vol.9, pp.93466-93479, 2021.
- [49] T.R.Schafle, S.Mohamed, N.Uchiyama, O.Sawodny, Coverage path planning for mobile robots using genetic algorithm with energy optimization, *International Electronics Symposium*, pp.29-30, 2016.
- [50] M.Mitschke, N.Uchiyama, O.Sawodny, Online Coverage Path Planning for a Mobile Robot Considering Energy Consumption, *IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering*, pp.20-24, 2018.

- [51] 大島町まち・ひと・しごと創生総合戦略, 大島町人口ビジョン大島町まち・ひと・しごと創生総合戦略,  
< <https://www.town.oshima.tokyo.jp/uploaded/attachment/950.pdf> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [52] 内閣府, 有人国境離島法,  
< <https://www8.cao.go.jp/ocean/kokkyouritou/yuujin/yuujin.html> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [53] Business Research Insights, 2025 年から 2033 年までのアプリケーション（食品, 化粧品など）, 地域の洞察, 予測（食品, 化粧品など）によるタイプ（エキストラバージンカメラアオイル, および純粋なカメラアオイル）別のカメラアオイル市場の規模, シェア, 成長, および産業分析, < <https://www.businessresearchinsights.com/jp/market-reports/camellia-oil-market-100056> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [54] ”椿の花工房, 伊豆大島・椿の実の仕事,  
< <https://sites.google.com/site/shimatsubaki/> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [55] デジタルコンテンツ EXPO2017, TWINCAM：全天球リアルタイム立体視テレプレゼンスシステム, < <https://www.dcxpo.jp/archives/2017/17686.html> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [56] V.Yem, R.Nashiki, T.Morita, F.Miyashita, T.Amemiya, Y.Ikei, TwinCam Go: Proposal of Vehicle-Ride Sensation Sharing with Stereoscopic 3D Visual Perception and Vibro-Vestibular Feedback for Immersive Remote Collaboration, Proc. ACM SIGGRAPH Asia 2019, pp. 53-54, Nov. 2019.
- [57] 毎日新聞 経済プレミア, アマゾンで年間 1 万本販売「利島ツバキ油」の魅力, < <https://mainichi.jp/premier/business/articles/20160510/biz/00m/010/021000c> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [58] TOKYO ISLANDS, Make your own Tsubaki oil!, < <https://tokyoislands.jp/post/page/make-your-own-tsubaki-oil-oshima-island> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [59] PRTIMES, 【東京の離島】人口 300 人, 20 万本の椿と生きる「利島」. 日本有数の椿油産地の未来を繋ぐ”オーガニック椿油”を数量限定販売, < <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000002.000098144.html> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [60] 公益財団法人 中央果実協会, 果樹農業の現状と振興方策, < <https://www.japanfruit.jp/Portals/0/images/research/kinenshi/50syuunen/dai1bu.pdf> >  
(Reference Date: December 31, 2025).

- [61] 日本政策金融公庫, 平坦地における収穫ネットを活用したクリ収穫作業の省力化,  
< <https://www.jfc.go.jp/n/finance/keiei/pdf/2398.pdf> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [62] 久林, 田嶋, 西, 松本, 野崎, 松尾, 城山, 畑地へ植栽したヤブツバキの結実数と種子の状況,  
長崎県農林技術開発センター研究報告, vol.1, pp.135-144, 2010.
- [63] 国土交通省, 超小型モビリティの可能性と課題,  
< <https://www.mlit.go.jp/common/000132670.pdf> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [64] 山下, 浅間, 新井, 太田, 金子, ロボットの移動機構に関する研究動向, 日本ロボット学会誌,  
vol.21, no.3, pp.282-292, 2003.
- [65] 市川, 車輪移動機構の ABC 車輪移動機構の走行力学, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.2,  
pp.213-218, 1995.
- [66] 高野, 車輪移動機構の ABC 運動学, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.3, pp.355-360, 1995.
- [67] 広瀬, 屋外で活躍する移動ロボットの機構設計, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.7, pp.904-  
908, 2000.
- [68] 米田, 不整地移動の将来展望, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.3, pp.265-266, 2002.
- [69] K.Nagatani, S.Kiribayashi, Y.Okada, S.Tadokoro, T.Nishimura, T.Yoshida, E.Koyanagi,  
Y.Hada, Redesign of rescue mobile robot Quince -Toward emergency response to the nu-  
clear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011, IEEE Inter-  
national Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp.2374-3247, 2011.
- [70] 多田隈, 全方向移動・駆動機構, 日本ロボット学会誌, vol.29, no.6, pp.516-519, 2011.
- [71] 山田, 古村, 遠藤, 鈴森, 螺旋形状を持つメカナムホイールによる全方向移動車両の不整地  
走行実験, 2A1-06b3(1)-(2), JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016.
- [72] 上野, 全方向移動ロボットのための差動駆動操舵機構の開発, Doctor's thesis, 豊橋技術科  
学大学大学院, 2014.
- [73] KHK Kohara Gear Industry Co., Ltd., 歯車の設計,  
< [https://www.khkgears.co.jp/gear\\_technology/basic\\_guide/KHK380.html](https://www.khkgears.co.jp/gear_technology/basic_guide/KHK380.html) >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [74] Sukho Song, et al., Suction-based Soft Robotic Gripping of Rough and Irregular Parts,  
arXiv preprint, arXiv:2009.08156, 2020.

- [75] Z.Wang, et al., A Soft Needle Gripper Capable of Grasping and Piercing for Handling Food Materials, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.33, no.4, pp.935-942, 2021.
- [76] Bo N.J.Persson, J.Guo, Electroadhesion for Soft Adhesive Pads and Robotics:Theory and Numerical Results, arXiv preprint, arXiv:1908.01140, 2019.
- [77] M.Hork, Gripping Adhesive Principles in the Design of Effectors, *SN Applied Sciences*, vol.4, no.52, pp.1-12, 2022.
- [78] Y.Liu, et al., Intelligent Soft Robotic Grippers for Agricultural and Food Applications:A Review, *Advanced Intelligent Systems*, vol.5, no.8, 2300233, 2023.
- [79] E.Navas, et al., Soft Gripper for Small Fruits Harvesting and Pick and Place Applications, *Frontiers in Robotics and AI*, vol.10, 1330496, 2024.
- [80] K.Tadakuma, M.Fujita, T.Fujimoto, A.Nishimura, A.Nomura, H.Tetsui, T.Shimizu, E.Takane, H.Komatsu, M.Konyo, S.Tadokoro, Omnidirectional Jamming Gripper, *The 8th Conference of Transdisciplinary Federation of Science and Technology*, 2017.
- [81] C.Mucchiani, et al., Object Picking through In-Hand Manipulation using a Two-Fingered End-Effector, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1-7, 2018.
- [82] 門田, 脇元, 農業ロボットの収穫機構用アクチュエータ, *日本ロボット学会誌*, vol.33, no.9, pp.680-683, 2015.
- [83] Nut Wizard, < <https://nutwizard.com/> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [84] Holt Jr., Method of Constructing a Nut Harvesting Device, US 6,460,249 B1, 2002.
- [85] Pope et al., Nut Gatherer and Method of Constructing Same, US 2014/0161574 A1, 2014.
- [86] Specialty Produce, Chestnuts With Burrs, < [https://specialtyproduce.com/produce/Chestnuts\\_With\\_Burrs\\_24185.php](https://specialtyproduce.com/produce/Chestnuts_With_Burrs_24185.php) > (Reference Date: December 31, 2025).
- [87] P. Corona, M. T. Frangipane, R. Moscetti, G. Lo Feudo, T. Castellotti, and R. Massantini, Chestnut cultivar identification through the data fusion of sensory quality and FT-NIR spectral data, *Foods*, vol.10, no.11, art. no.2575, 2021.
- [88] P.E.Ch'ng, A.H.Kassim, M.A.Rahman, Some physical properties of ginkgo nuts and kernels, *International Agrophysics*, vol.27, no.2, pp.145-152, 2013.
- [89] K.C.Selvi, E.Y.Cevher, H.Sauk, Engineering properties of two hazelnuts varieties and its kernel relation to harvest and threshing, *Italian Journal of Food Science*, vol.32, pp.528-539, 2020.

- [90] 大隅, 移動マニピレータの制御, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.7, pp.904-907, 1995.
- [91] 単, 永谷, 田中, 移動しながら物体を把持する移動マニピレータの動作計画, 日本ロボット学会 創立 20 周年記念学術講演会, 3B33, 2002.
- [92] 伊達, 大川, 滝田, 菊池, 地表面の反射輝度を活用した自律移動ロボットの高精度自己位置推定, 日本機械学会論文集, vol.79, no.806, pp.3389-3398, 2013.
- [93] 谷江, 福田, コンプライアンス制御と柔軟接触問題, 精密工学会, vol.55, no.7, pp.1189-1193, 1989.
- [94] T.Yamada, A.Tanaka, M.Yamada, Y.Funahashi, H.Yamamoto, Identification of Contact Conditions by Active Force Sensing, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.23, no.1, pp.44-52, 2011.
- [95] I.Hashlamon, K.Erbatur, Ground Reaction Force Sensor Fault Detection and Recovery Method based on Virtual Force Sensor for Walking Biped Robots, Asian Control Conference (ASCC), pp.1-6, 2013.
- [96] Z.Cong, A.Honglei, C.Wu, L.Lang, Q.Wei, M.Hongxu, Contact force Estimation Method of Legged-Robot and Its Application in Impedance Control, IEEE Access, vol.8, pp.161175-161187, 2020.
- [97] 岩本, 板井, 白山, ウォームギアを用いたスードメカニズム機能の実現, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.10, pp.1154-1159, 2009.
- [98] ヤマハ発動機株式会社, 森林計測サービス RINTO, < <https://www.yamaha-motor.co.jp/ums/forest/>> (Reference Date: December 31, 2025).
- [99] Y.Kanazawa, Drone sensing for AgriTech using computer vision, ICoSIET, 2024.
- [100] T.Taketomi, H.Uchiyama, S.Ikeda, Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, pp.17-27, 2017.
- [101] S.Hutchinson, G.Hager, P.I.Corke, A Tutorial on Visual Servo Control, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.12, no.5, pp.651-670, 1996.
- [102] F.Chaumette, S.Hutchinson, Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches, IEEE Robotics and Automation Magazine, 13(4):82-90, 2006.
- [103] F.Chaumette, S.Hutchinson, Visual Servo Control, Part II: Advanced Approaches, IEEE Robotics and Automation Magazine, 14(1):109- 118, 2007.

- [104] R.W.Brockett, R.S.Millman, H.J.Sussmann, Asymptotic stability and feedback stabilization, *Differential Geometric Control Theory*, Eds. Boston, MA: Birkhauser, pp.181-191, 1983.
- [105] P.K.Allen, B.Yoshimi, A.Timucenko, Real-time visual servoing, *Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Conference on Robotics Automation*, pp.851-856, 1991.
- [106] A.J.Koivo, N.Houshangi, Real-time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller, *IEEE Trans.Systems, Man, and Cybernetics*, 21(1), pp.134-142, 1991.
- [107] L.E.Weiss, A.C.Sanderson, C.P.Neuman, Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback, *IEEE Journal of Robotics And Automation*, RA-3(5), pp.404-417, 1987.
- [108] W.Jang, Z.Bien, Feature-based Visual Servoing of an Eye-In-Hand Robot with Improved Tracking Performance, *IEEE Ing. Conf.Robotics and Automation*, SacramentoCA, pp.2254-2260, 1991.
- [109] P.Murrier, D.Fontanelli, A.Bicchi, A hybrid-control to the Parking Problem of a Wheeled Vehicle Using Limited View-Angle Visual Feedback, *Int.J.Robot.Res.*, vol.23, no.4-5, pp.437-448, 2004.
- [110] X.Zhang, Y.Fang, X.Liu, Motion-Estimation-Based Visual Servoing of Nonholomic Mobile Robots, *IEEE Trans. Robot.*, vol.27, no.6, pp.1167-1175, 2011.
- [111] K.Malu, J.Majumdar, Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot, *Global Journal of Researches in Engineering*, vol.14, pp.0975-5861, 2014.
- [112] E.Rublee, V.Rabaud, K.Konolige, G.R.Bradschi, ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, *ICCV*, pp.2564-2571, 2011.
- [113] G.L.Mariottini, G.Oriolo, D.Prattichizzo, Image-Based Visual Servoing for Nonholonomic Mobile Robots Using Epipolar Geometry, *IEEE Trans. Robot.*, vol.23, no.1, pp.87-100, 2007.
- [114] T.R.Schafle, A.Tokui, N.Uchiyama, A Hybrid Systems Approach with Input-Output Linearization for Automotive Parking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, *IEEE ICARM*, pp.240-245, 2018.
- [115] 織田, 井田, 石川, 平岡, 実, 相, 全身トルク制御可能な油圧ローバーの実現, *日本ロボット学会誌*, vol.40, no.5, pp.421-430, 2022.
- [116] 永谷, 石上, 遠藤, 不整地移動ロボティクス, コロナ社, 2023.

- [117] S.Ye, Y.Liu, Z.Zhou, Y.Wang, X.Chen, Predict the Rover Mobility over Soft Terrain using Articulated Wheeled Bevameter, arXiv, pp.1-15, 2022.
- [118] T.Li, H.Gao, Z.Deng, H.Gao, An Improved Robotic Arm Constant Force Control Method for Forward Terrain Sensing System on Planetary Rovers, International Journal of Advanced Robotic Systems, vol.21, no.2, pp.1-13, 2024.
- [119] 石山, 水野, C.Sinaga, 佐藤, 内山, 地表に散在する物体回収のための移動ロボットの制御, SICE SI, vol.23, pp.3P2-A03, 2022.
- [120] C.Sinaga, T.Ishiyama, R.Sato, N.Uchiyama, Optimal Motion Generation of Mobile Robots for Collecting Fruits Scattered on the Ground, 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), pp.1271-1272, 2023.
- [121] PRTIMES, 国内初! inaho が RaaS モデルで自動野菜収穫ロボットのサービス提供を開始, < <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000014.000024969.html> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [122] 板倉, LiDAR や画像による農業・林業分野での 3D データ解析, MATLAB EXPO 2021.
- [123] 機械設計メモ～ソリッドワークスの慣性モーメントの見方～, < [http://blog.livedoor.jp/shiba\\_makoto-c1vv9a084dhea/archives/ソリッドワークスの慣性モーメントの見方.html](http://blog.livedoor.jp/shiba_makoto-c1vv9a084dhea/archives/ソリッドワークスの慣性モーメントの見方.html) > (Reference Date: December 31, 2025).
- [124] MIKI PULLEY, 負荷トルク計算式・算出式, < [https://www.mikipulley.co.jp/JP/Services/Tech\\_data/tech26.html](https://www.mikipulley.co.jp/JP/Services/Tech_data/tech26.html) > (Reference Date: December 31, 2025).
- [125] コンクリート一体型 (モノリシック) 工法, フェロコンのカタログ, < [http://www.morijariten.com/\\_userdata/14.monolithic%20catalog.pdf](http://www.morijariten.com/_userdata/14.monolithic%20catalog.pdf) > (Reference Date: December 31, 2025).
- [126] JBMS-88, 用紙の摩擦力計測による脂粉量の測定方法, < <https://hyojunka.jbmia.or.jp/hyojun2/upload-v3/archive/JBMS-88.pdf> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [127] 屋内外歩行滑り止めスタッドレスマット, < <http://newtons.co.jp/stud/stud-setsume.pdf> > (Reference Date: December 31, 2025).
- [128] 小池, IT 農家のラズパイ製ディープ・ラーニング・カメラ, CQ 出版社, 2020.

- [129] 森本, 青果物の品質評価に関する基礎的研究－ナスのつやなし果判別手法の考察－,  
< <http://mama.agr.okayama-u.ac.jp/kenkyu/01/jun/jun.html> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [130] 農研機構, 野菜・果実の光沢の測定, < <https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nfri/1993/nfri93-09.html> >  
(Reference Date: December 31, 2025).
- [131] H.Masuzawa, J.Miura, Image-based recognition of green perilla leaves using a deep neural network for robotic harvest support, *Advanced Robotics*, vol.35, pp.359-367, 2021.
- [132] 長崎県農林技術開発センター, 収穫時期別のツバキ油含有量, < <https://www.pref.nagasaki.jp/e-nourin/nougi/theme/result/H24seika-jouhou/shidou/S-24-28.pdf> > (Reference Date: December 31, 2025).





## 付録B アーム機構の駆動設計

アーム機構を駆動させるための必要トルクを求め、モータの選定を行う。

### B.1 慣性モーメントの計算

慣性モーメントは、物体が回転運動する際、その回転速度の変化を妨げる役割を果たし、物体の回転状態の変化のしにくさを表す量である。計算方法は、形状・質量分布・回転軸によって異なり、複数部品で構成される機構を対象とする場合、3DCADの機能を用いることで比較的簡便に計算することができる<sup>[123]</sup>。以下に手順を示す。重心周りの慣性モーメント測定方法をFig. B.1に示す。また、本ロボットにおけるアームの構成部品の慣性モーメントと質量をFig. B.2に示す。

1. 対象軸の決定
2. 各部の質量（材料密度と形状体積の積）を入力
3. 対象軸から重心までの距離を測定
4. 平行軸の定理で、重心周りの慣性モーメントから対象軸周りの慣性モーメントに変換

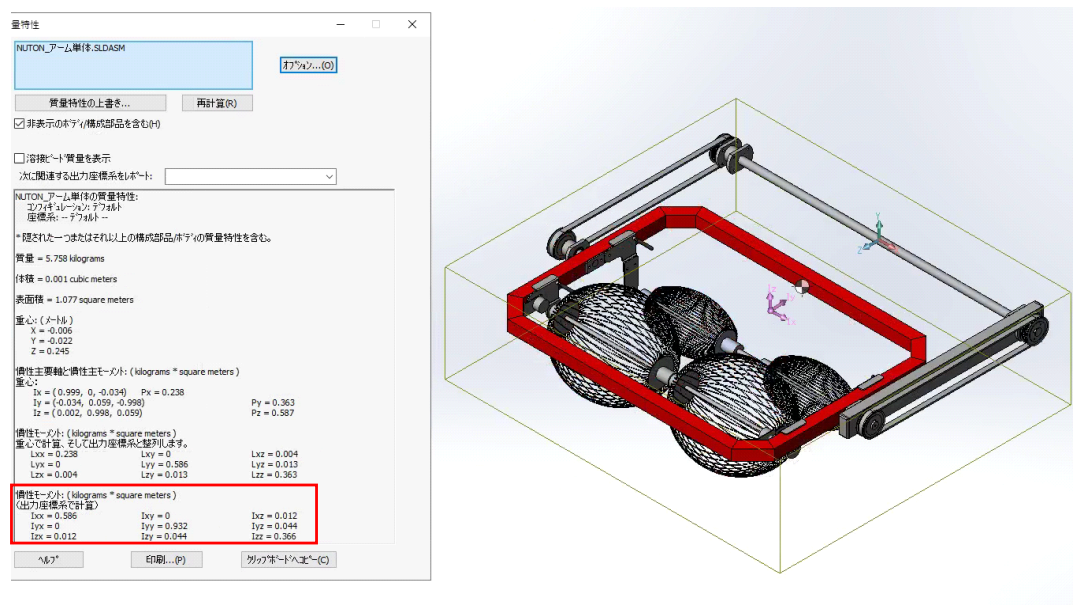


Fig. B.1 Measurement of moment of inertia around center of gravity

			D mm	d mm	L mm	材料	慣性モーメント ( $gcm^2$ )(CAD)		モー軸上換算	質量[g]	質量[g] 実測	体積[ $cm^3$ ]	員数
1	支点軸		15	0	736	SUS304	290.079	lxx	116031.600	1031.39		130.062	1 1031.391
2	G2A-20R1_16_HUB		47	15	35	CAC702	745.826		298330.400	286.495		38.199	1 286.495
3	アーム				455	A5052	148152.417	lxx	59260966.800	276.256		102.317	2 552.512
4	シャフト締結金具/ トップ側		55	15	26	SUM22	368.885	lyy	147554.000	146.351		18.643	2 292.702
5	シャフト締結金具/ ボトム側		55	15	6	SUM22	259.735	lyy	103894.000	74.413		9.479	2 148.826
6	ベアリングホルダ		50	20	26	SUM22	259.644	lyy	103857.600	98.019		12.486	2 196.036
7	6802ZZ		24	15	5	SUS304	4.768	lxx	1907.200	3.854		0.803	4 15.416
8	/		51.172	7.5	16	SUM22	463.313	lxx	185325.200	134.456		17.128	4 537.824
9	タイミングベルト900								0.000				2 0
10	シャフト		15		85.5	SUS304	33.258		13303.200	118.141		14.898	2 236.282
11	シャフトプレート		40		2.3	SUM22	27.659	lyy	11063.600	13.652		1.739	2 27.304
12	ベースフレーム		450		616	A5052	307215.463	lzz	122886185.200	955.933		354.049	1 955.933
13	支持板/右		72		23	SUM22	7809.947	lzz	3123978.800	59.961		7.638	2 119.922
14	支持板/左		72		23	SUM22	7809.947	lzz	3123978.800	59.961		7.638	2 119.922
15	支持板/延長		75		2	SUM22	356.353	lzz	142541.200	32.903		4.191	2 65.806
16	出力軸		8	0	558	SUS304	17.685		7074.000	220.119		27.758	2 440.236
17	フックガイド 大		25	8.5	275	SUS304	5551.776	lyy	2220710.400	313.469	560	39.469	2 1120
18	フックガイド 小		23.5	8.5	222	SUS304	2239.55	lxx	895820.000	361.67	545	45.61	2 1090
19	ロー		9.5	6	55	SUS304	2.933	lzz	1173.200	18.583		2.343	1 18.583
20	ポテンシヨメータ 固定板		25		62.4	SUM22	165.805	lzz	66322.000	21.645		2.757	2 43.29
21	ポテンシヨメータ ELV-24		24		34	A5052	12.552	lyy	5020.800	12		7.343	2 24
22	SR-407		5.5		60	SUS430	89.698	lzz	35879.200	9.437		1.195	4 37.748
計									<b>192750917.200</b>	<b>19.2751</b>			7360.232
									<b>g・cm<sup>2</sup></b>	<b>kg・m<sup>2</sup></b>			7.360232

Fig. B.2 Moment of inertia and mass of arm components

アーム支点軸周りのモーメントは, アーム重心周りのモーメントに平行軸の定理を用いて,

$$J_{m2} = \frac{m_a \cdot L_g^2 + J_a}{G^2} \quad (\text{B.1})$$

と求められる. モータ軸上の慣性モーメントは,

$$J_m = J_{m1} + J_{m2} \quad (\text{B.2})$$

となる. Table B.1 に計算結果を示す.

Table B.1 Calculation results

Parameters[Unit]	Definition	Value
$L_g$ [m]	Length between arm rotation axis and arm center of gravity	0.177
$G$ [-]	Gear ratio of worm gear	857.5
$\eta$ [-]	Maximum transmission efficiency of gearhead	0.72
$M$ [kg]	Total mass of the arm	6.83
$m_a$ [kg]	Arm link mass	1.74
$J_a$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Moment of inertia around the arm rotation axis	0.238
$J_{m1}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Rotor moment of inertia	142E-07
$J_{m2}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Load moment (converted to motor shaft)	3.98E-07
$J_m$ [kg·m <sup>2</sup> ]	Moment of inertia on the motor shaft	146E-07

## B.2 ペイロードの計算

エンドエフェクタに取り込み可能な椿の実と種子の質量を Table B.2 を Table B.3 に示す。ここで、エンドエフェクタの容積に対して、実と種子を完全な球体と見なして容積を計算し、内部に取り込み可能な個数を算出した。

Table B.2 Large end effector payload

a	Volume of end effector [mm <sup>3</sup> ] measured by 3D CAD	4728834.1
b	Average diameter of nut [mm]	48.8
c	Volume of nut assumed as a sphere [mm <sup>3</sup> ]	60849.6
d	Loading capacity [pcs.] ( $a \div c$ )	78
e	Average mass of nut [g]	21.6
f	Payload [g] ( $d \times e$ )	1684.8
g	Payload [g] Two end effectors	3369.6

Part3の質量特性:  
 コアインシレーション: デフォルト  
 座標系: --デフォルト--

密度 = 0.001 grams per cubic millimeter  
 質量 = 4728.834 grams  
体積 = 4728834.134 cubic millimeters  
 表面積 = 137821.998 square millimeters

重心: (ミメータ)  
 X = 0.015  
 Y = 110  
 Z = 0

慣性主要軸と慣性主モーメント: (grams \* square millimeters)  
 重心:  
 Ix = (0, 1, 0) Px = 18197823.13  
 Iy = (-1, 0, 0) Py = 22151418.139  
 Iz = (0, 0, 1) Pz = 22151421.043

慣性モーメント: (grams \* square millimeters)  
 重心で計算、そして出力座標系と整列します。  
 Lxx = 22151419.591 Lxy = 0 Lxz = 0  
 Lyx = 0 Lyy = 18197823.131 Lyz = 46.935  
 Lzx = 0 Lzy = 46.935 Lzz = 22151419.591

慣性モーメント: (grams \* square millimeters)  
 (出力座標系で計算)  
 Ixx = 79370286.861 Ixy = 7617.802 Ixz = 0.001  
 Iyy = 18197823.131 Iyz = 46.935 Izz = 22151419.591

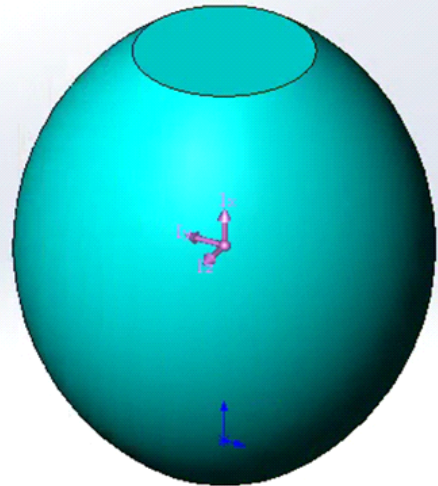
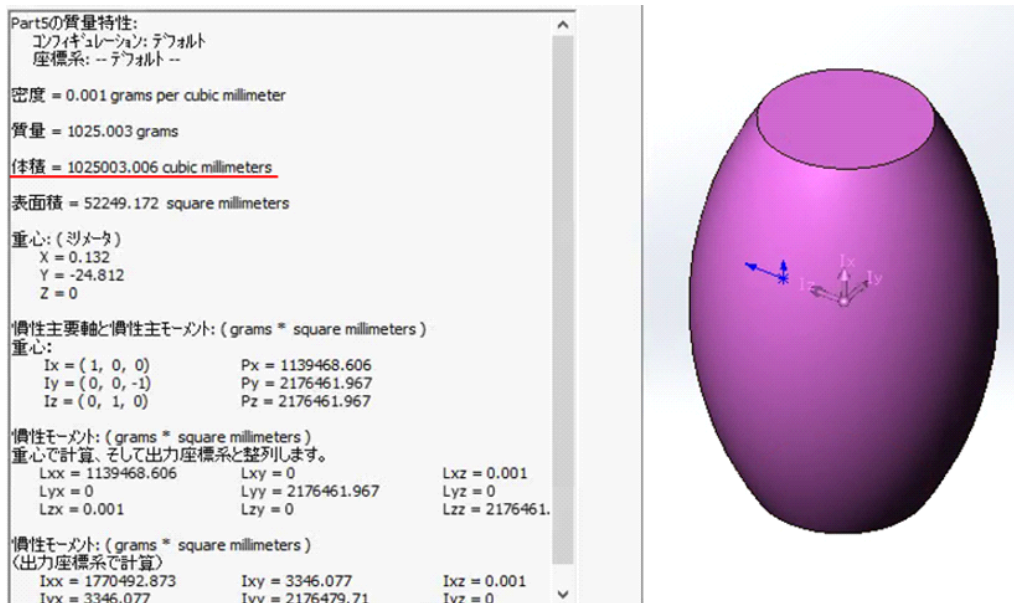


Table B.3 Small end effector payload

a	Volume of end effector [mm <sup>3</sup> ] measured by 3D CAD	1025003
b	Average diameter of nut [mm]	19
c	Volume of nut assumed as a sphere [mm <sup>3</sup> ]	3591.4
d	Loading capacity [pcs.] (a ÷ c)	285
e	Average mass of seed [g]	1
f	Payload [g] (d × e)	285
g	Payload [g] Two end effectors	570



### B.3 必要トルクの計算

モータの必要トルクは以下の式より得られる<sup>[124]</sup>.

$$T_{motor} = T_{inertia} + T_{load} + T_{friction}$$

$$\begin{cases} T_{inertia} = J_m \cdot \alpha \\ T_{load} = \frac{(M+m) \cdot g \cdot L_g}{\eta} \\ T_{friction} = 0 \end{cases} \quad (B.3)$$

ここで、慣性トルク  $T_{inertia}$ 、負荷トルク  $T_{load}$ 、摩擦トルク  $T_{friction}$  と表す。動作条件として、0[deg/s] から 45[deg/s] に 7.39[s] で到達する角加速度  $\alpha=106.3[\text{rad/s}^2]$  を想定する。負荷トルクは、回転モーメントが最大となるアームが地表面と水平となった角度を想定する。各関節にはベアリングを備えているため、摩擦トルクは無視する。安全率 2.0 とすると、 $T_{motor}=64.44[\text{N}\cdot\text{m}]$  と算出される。Table 2.11 に示すように、モータ単独の最大連続トルクは 0.177[ $\text{N}\cdot\text{m}$ ] であるが、減速後は  $T_{motor}=111.9[\text{N}\cdot\text{m}]$  であり、安全率を含めても倍近くのトルク余裕度を確保している。



## 付録C 摩擦係数測定方法

2.4節の実験は、表面が平滑で硬質なフェロコン床（一般的な工場等で用いられている緑色の床材）の上で行った。カタログ仕様値は、静摩擦係数 0.77-0.78[-]、動摩擦係数 0.62-0.72[-] であり、摩擦係数が 0.4[-] 以上であり、滑りにくい床面の範疇である<sup>[125]</sup>。2.5節の屋内実験は、走行区間全域の床面に滑り止め用のグリップパターンが形成されたポリ塩化ビニール製のスタッドレスマットを敷いて行った。上記フェロコン床のように、表面が平滑な床面との間で拾得対象物が滑り、拾得不能になることを防ぐことを目的としている。

Fig.C.1(a) に示すように、摩擦係数測定を実測した。エンドエフェクタと同等材の SUS 部材を接触子として取り付けてスタッドレスマットの断片と摺動させて測定した。計測装置としては TRILAB TL201Ts 静・動摩擦測定機を用い、すべり速度 0.5[mm/s]、垂直荷重 2[N]、滑り距離 100[mm] (JBMS-88 準拠<sup>[126]</sup>) を測定条件とした。測定結果は、静摩擦係数 1.001[-]、動摩擦係数 0.477[-] となり、摩擦係数が 0.4[-] 以上であり、滑りにくい床面の範疇であった<sup>[127]</sup>。

同様の方法で、3.5節の屋外実験フィールドに関しても、土を採取して、Fig.C.1(b) に示すように摩擦係数測定を実測した。測定結果は、静摩擦係数 0.957[-]、動摩擦係数 0.58[-] となり、摩擦係数が 0.4[-] 以上であり、滑りにくいフィールドの範疇であった。

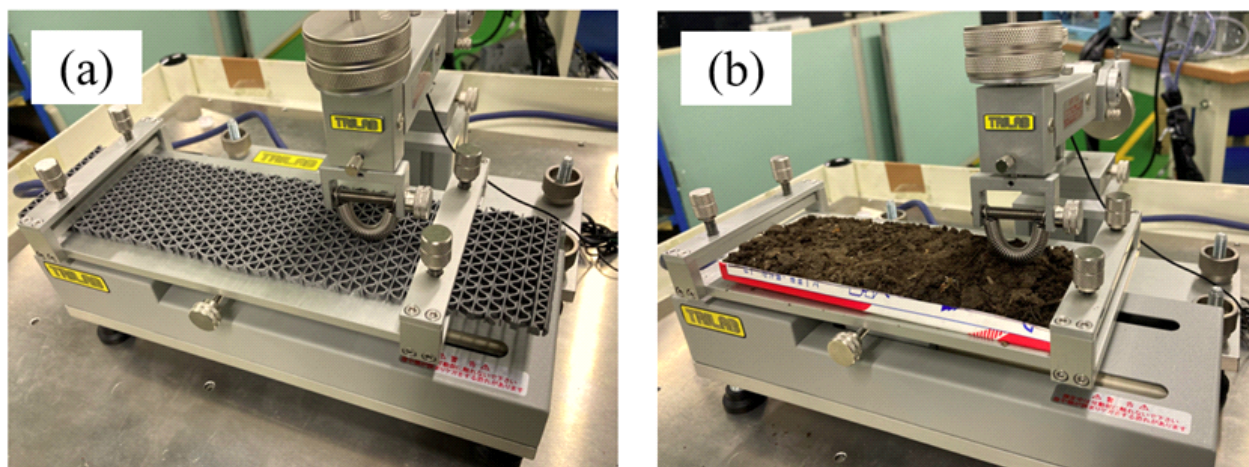


Fig. C.1 Experiment scene for measuring friction coefficient



## 付録D 椿の種子選別のための画像認識手段の検討

ここでは、本学の先端農業・バイオリサーチセンター主催の「最先端植物工場マネージャー育成プログラム8期」での研究成果について述べる。

### D.1 研究背景・目的

椿の種子の選別作業は、Fig.D.1に示すように、熟練者の目視判別による選別がなされている。また、手間が掛かり、2人×3ヶ月間の作業量である。このため、省力化が望まれる。



Fig. D.1 Scene of sorting camellia seeds < <https://sites.google.com/site/shimatsubaki/> > (Reference Date: December 31, 2025)

上記課題に対し、近年発展が目覚ましいAI画像認識技術による解決策が考えられる。既往の研究では、農作物の画像判別に関して多くの研究が行われている。農作物の種類としては、イチゴ、トマト、エンドウマメ、キュウリ、大葉などが対象とされている<sup>[128]-[131]</sup>。これらは、形体情報、茎と果実の位置関係、色の濃淡を特徴量に用いている。しかし、農作物の画像判別は作物毎に特徴量が異なるため、固有の課題がある。椿の種子を工芸品利用する場合においては、表面の滑らかさ、実の大小、形状の違いによって用途が変わるため、これらの特徴量として用いた画像判別が有効である。その他にも、椿油として利用する場合においては、中身の油が表出し炭化して黒ずんだ種子を除外して油品質を確保したいという要望や、おおよその油含有量を簡易的に測定したいという要望がある。そこで、本研究では、椿の種子の形体情報・表面状態を基に、非破壊かつ簡便な選別手段を提供することを目指し、その第一歩として、AI画像認識による形状分類に取り組む。

## D.2 実験材料と実験方法

1. 試作物：ヤブツバキ（学名・英名：Camellia japonica）
2. 栽培法：9～10月にヤブツバキを収集（豊橋市）
3. 取得データ：画像データ，種子のサイズ，重量，収集日
4. 選別基準の規格：丸型，ラグビー型，分裂型に分類（Fig.D.2）
5. 分析項目：画像判別システムの認識精度
6. 計測システム（Fig.D.3）および学習モデル生成フロー（Fig.D.4）
7. 実装環境：Google Colaboratory，言語：python，画像処理手段：OpenCV



Fig. D.2 Types of Camellia Seed Shapes

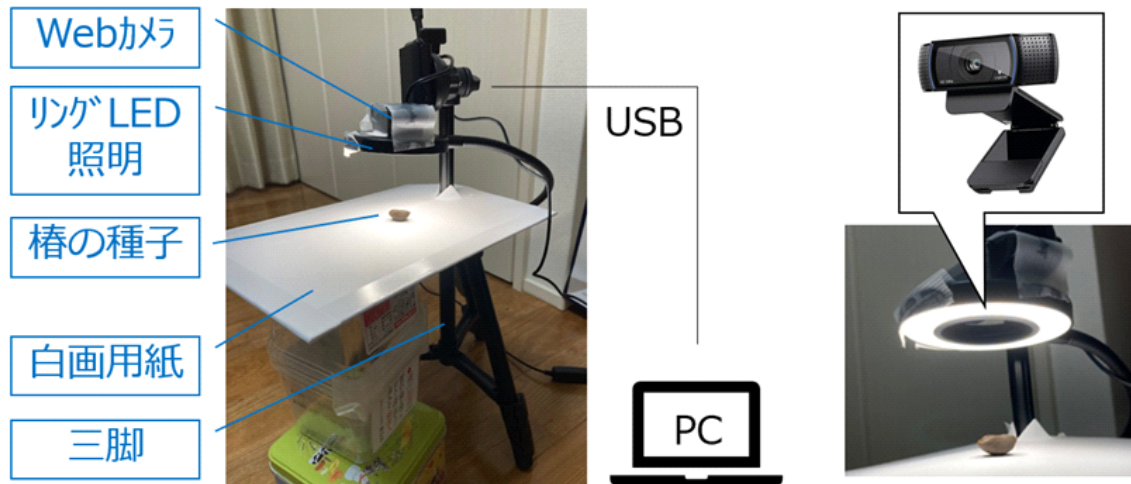


Fig. D.3 Measurement System for Camellia Seeds

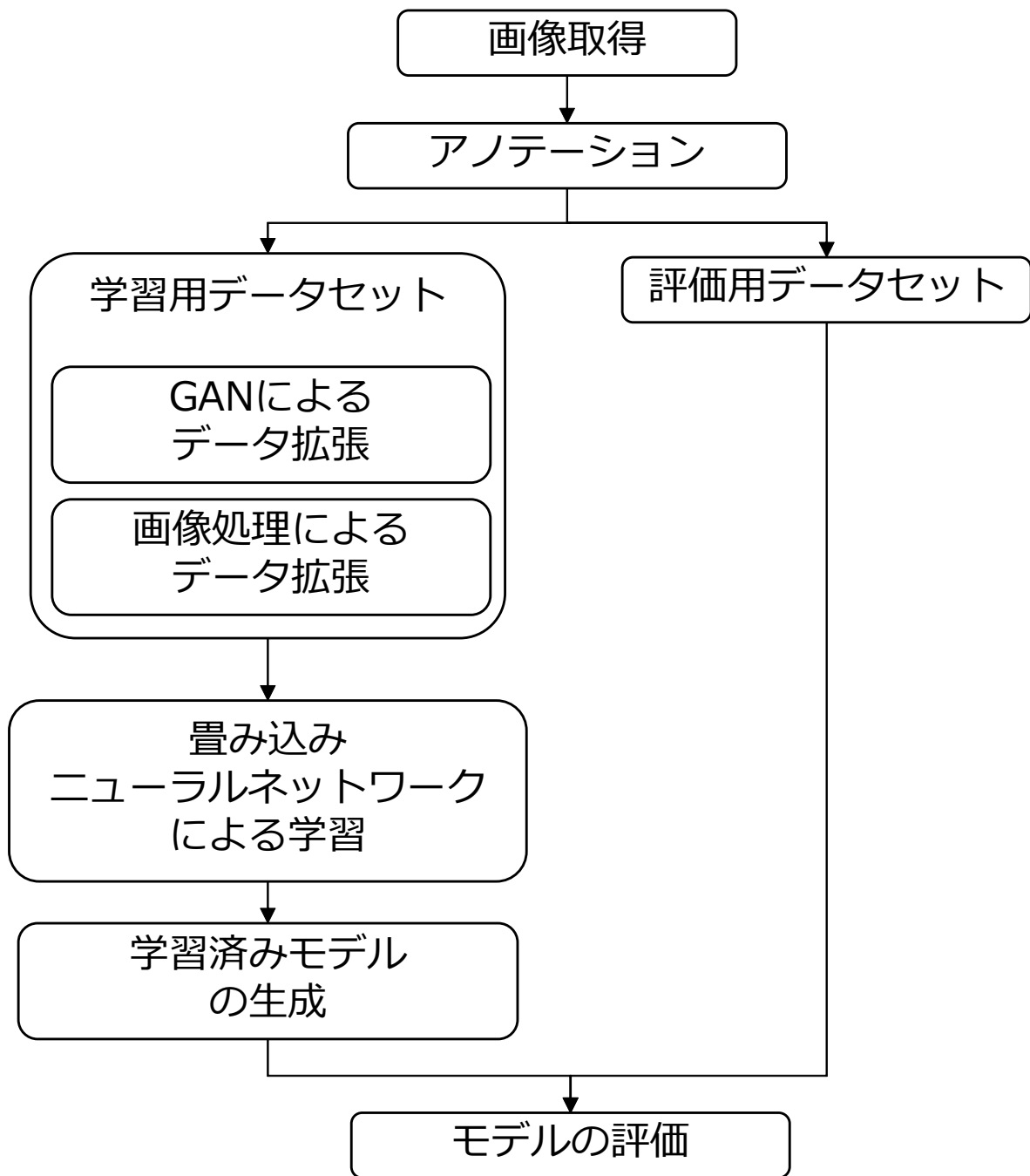


Fig. D.4 AI-Based Learning Model Generation Flow for Classification

### D.3 実験結果

Table D.1 に収集したヤブツバキの種子の寸法および重量の計測結果を示す。ここで、各ラベルのサンプル数  $N=30$  とし、記載値は  $\mu \pm 2\sigma$  とする。併せて、Fig.D.5 に示すように、計測システムにて画像データの収集を行った。類型毎に 300 枚ずつ画像データを取得し、グレースケール化してラベル付けを行い、学習データセット用 200 枚、評価データセット用 100 枚に分けた。

Fig.D.4 に示すように、学習データセットを畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) に与え、学習済みモデルを得る。「データ拡張なし」と「GAN + 反転と回転」の 2 手法を比較した。ここで、「GAN + 反転と回転」とは、GAN (GAN (Generative Adversarial Networks: 敵対的生成ネットワーク)) を用い、種子に似た画像データを大量に自動生成した中から選出したものであり、反転+回転とは、元画像に画像処理を加えたものである。Fig.D.6 に GAN によるデータ拡張、Fig.D.7 に利用した CNN の構成を示す。いずれも元画像データ数の不足を補い、ノイズ範囲を広げて学習させることで認識精度向上に寄与することを目的としたものである。Fig.D.8, D.9 にそれぞれの手法の学習の損失と正答率のグラフを示す。また、テストデータに対する平均正答率および F 値 (F-measure, 再現率と適合率の調和平均) を Table D.2 に示す。狙い通りに、複数のデータ拡張手法を混ぜて適用することで、より正答率を向上させることができた。

Table D.1 Measurements of Mass and Size for Each Type of Camellia Seed Shape

Shape type	LABEL0 Round type	LABEL1 Rugby ball type	LABEL2 Split type
Mass[g]	1.3±0.4	1.1±0.6	0.7±0.4
Max. Diameter [mm]	20.4±2.8	22.2±2.8	18.1±2.8
Min. Diameter [mm]	11.7±2.4	10.2±1.6	11.1±2.6

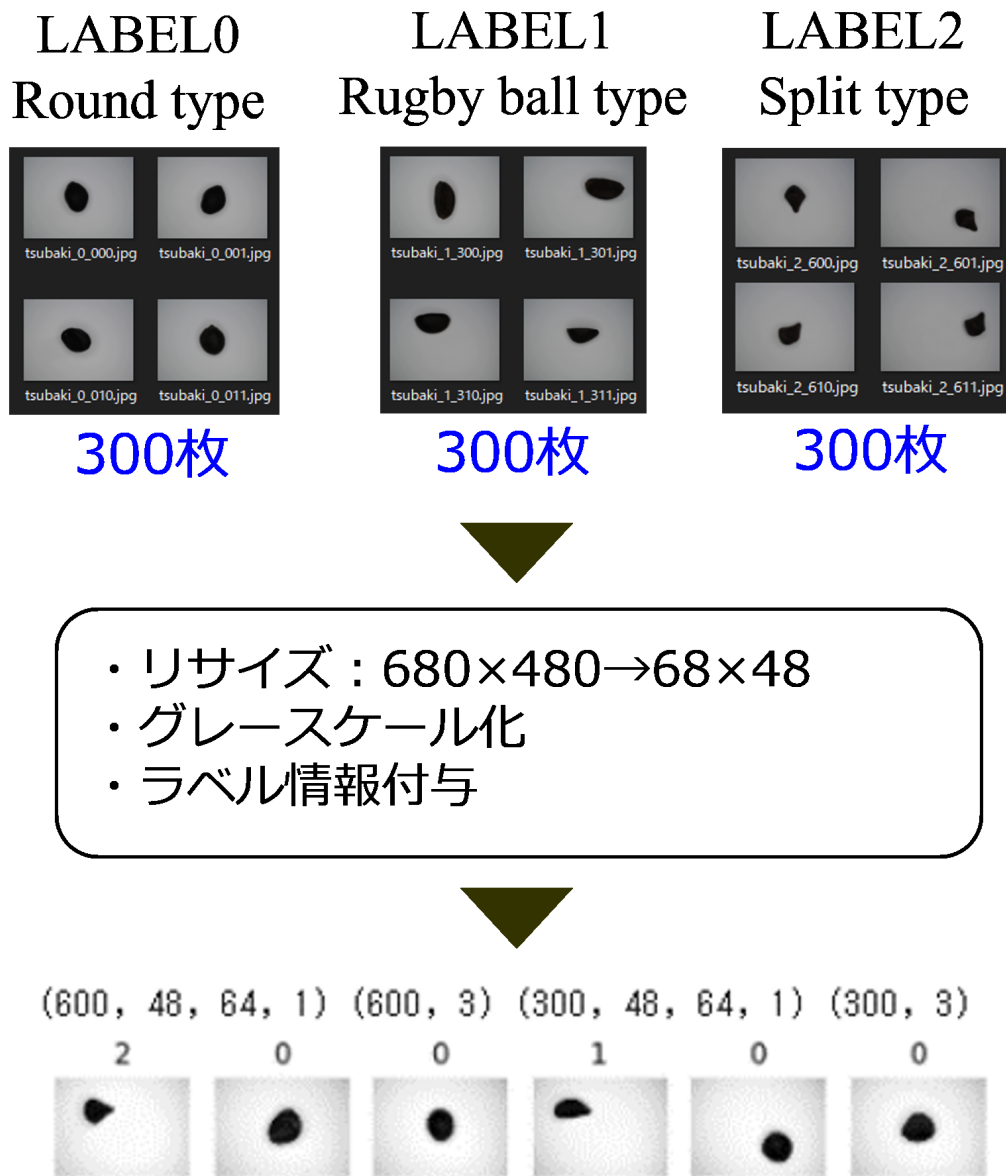


Fig. D.5 Preprocessing and Annotation of Acquired Images

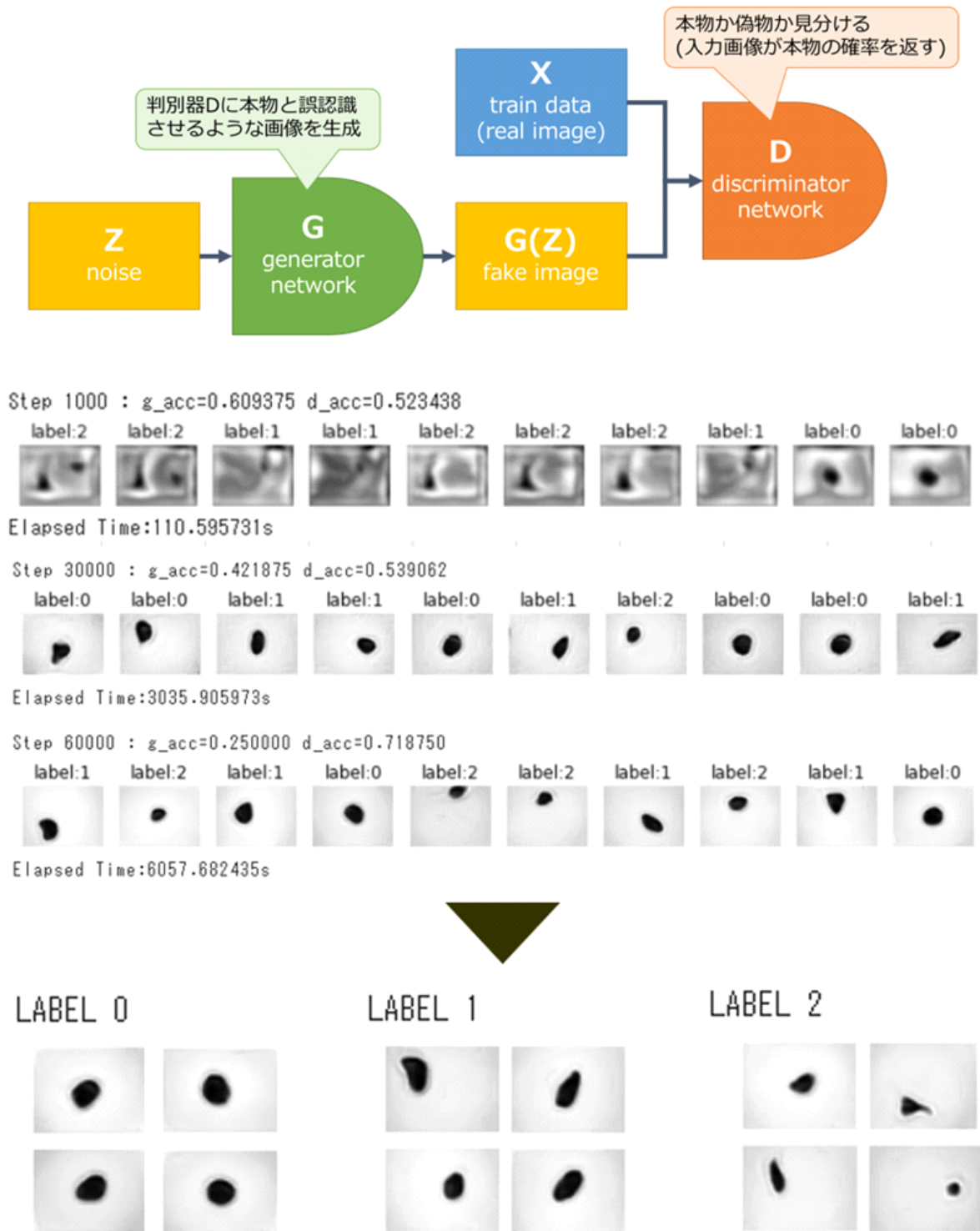
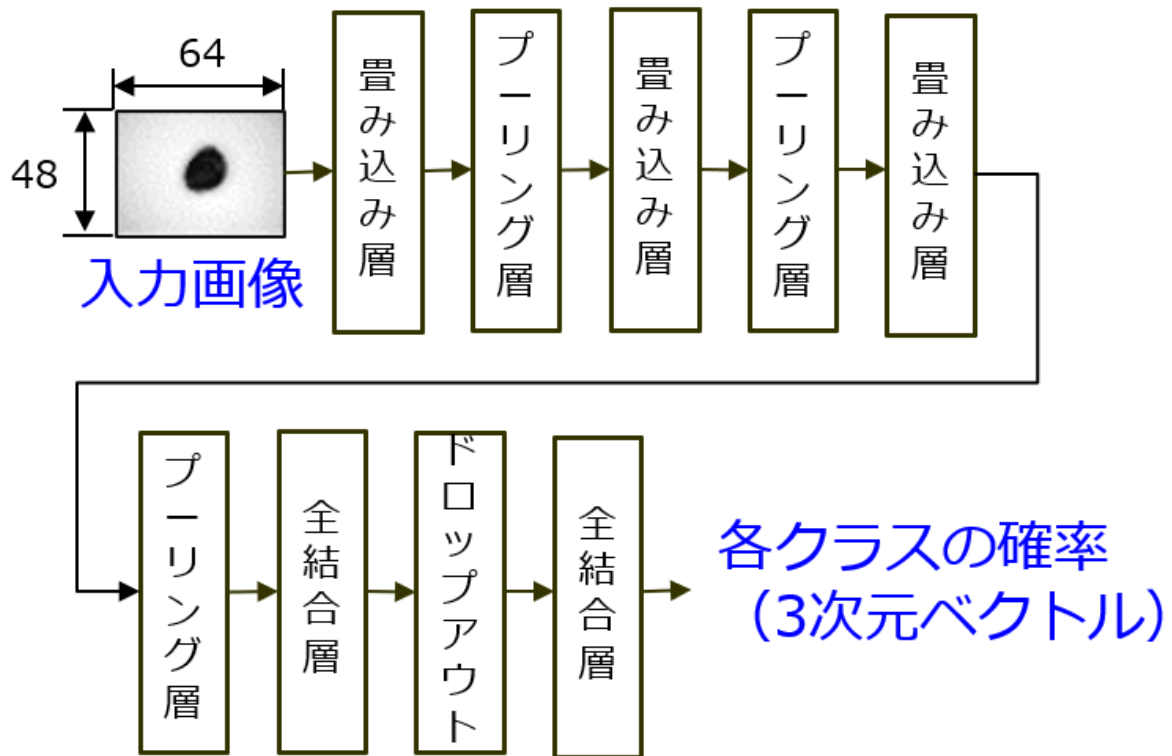


Fig. D.6 Data Augmentation using GANs



●畳み込み層

- ・カーネルサイズ：5×5
- ・カーネル数：32, 64, 128
- ・Max値プーリング
- ・活性化関数：ReLU

●全結合層

- ・ユニット数：256, 2
- ・活性化関数：ReLU, Softmax (最終)

Fig. D.7 The CNN architecture used in this study

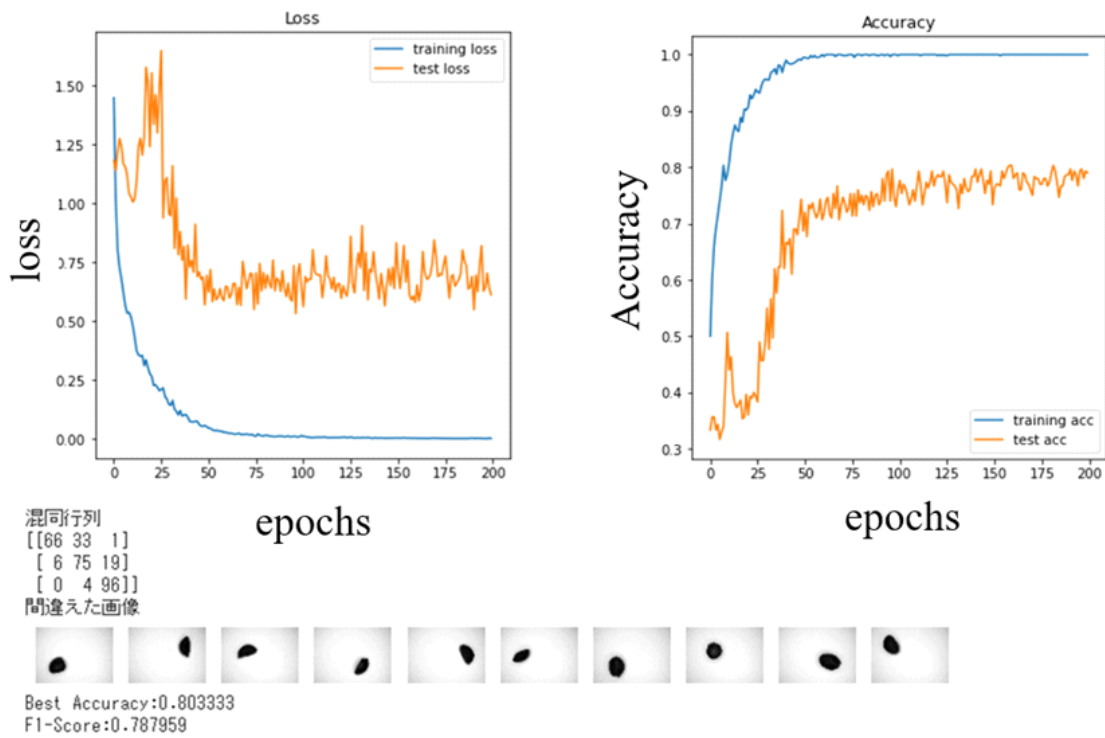


Fig. D.8 Learning Loss and Accuracy Graph(No data augmentation)

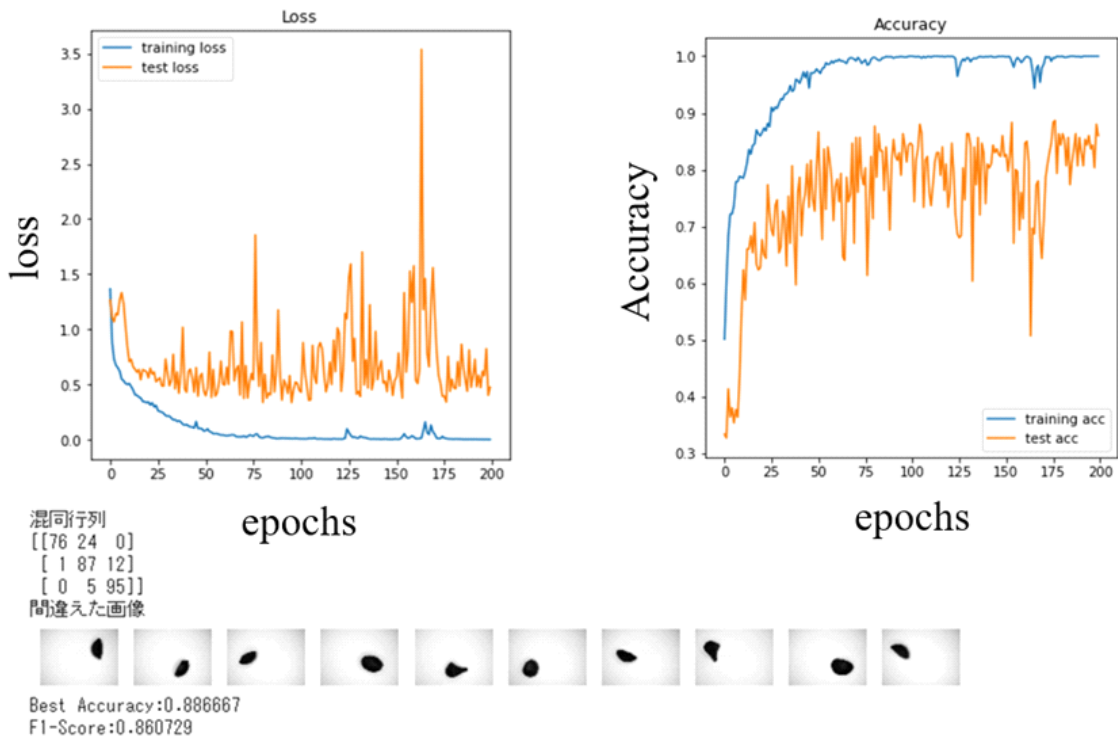


Fig. D.9 Learning Loss and Accuracy Graph(GAN + Inversion and rotation)

Table D.2 Comparison of Recognition Accuracy

Method	No data augmentation	GAN + Inversion and rotation
Accuracy Rate ( $\times 100\%$ )	0.803	0.887
F-value ( $\times 100\%$ )	0.788	0.861

## D.4 まとめ

本研究では、樁の種子の基礎的なデータを収集し、形状を特徴量とした AI 画像認識手段を構築した。また、一定の認識精度を有する学習モデルを生成することができた。これにより、工芸品など用途選別が可能になるものと考えられる。また、参考文献<sup>[132]</sup>によると、種子重量と油の含有量には相関があり、種子の種類で層別することで、直接の重量計測なしにおおよその油含有量が推定できる可能性がある。非接触で複数個同時計測に拡張できれば、一個ずつ重量測定する手間が省け、有効である。しかし、現状において、形状分類のみに留まるため、油品質確保のための選別などは今後の課題となる。表面状態や色味など様々な物性や特徴量を複合的に認識することで、用途を広げることができるものと考ええる。