

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.