

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02352

研究課題名（和文）土と剛体の相互作用を考慮した制御技術の構築と農業分野への応用展開

研究課題名（英文）Construction of control technology considering the interaction between soil and rigid body and its application in agriculture

研究代表者

千田 有一（Chida, Yuichi）

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00345753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、農作業の自動化を念頭に、土中で運動する剛体と土の相互作用を考慮し、効率的な運動制御を実現するための方法の構築を目指した。これは、申請者らが開発したホウレンソウ自動収穫装置の中核をなす基礎技術である。具体的には、土中を進行する根切り刃の経路追従制御を対象に、設定経路と土の反力の関係の明確化、反力を低減化させる経路生成方法の提案、実験装置による評価実験による検証、および自動収穫装置実機による揺動抑制制御の実験検証を行った。これらの結果により、農業機械において土と剛体運動の相互作用を伴う場合の自動制御技術の構築に資する成果を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農業分野における自動制御技術の応用は、当該分野の技術の発展に寄与するものである。これまで、このような境界領域の課題に対するアプローチは非常に少ない状況であった。その一因は、土の条件が様々に変化すると共に、剛体運動時の土の動作解析が極めて難しいという背景があった。これに対して、本研究はこの問題に正面からアプローチした。具体的には、土中における剛体運動の自動制御の高性能化を目的として、土と剛体の相互作用の解析、より適切な運動経路の生成やその考え方などを明確化した。これらの成果は、今後の農業分野における制御技術応用の基礎となり得る。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to construct a method to achieve efficient motion control by considering the interaction between rigid bodies moving in the soil and the soil with the automation of agricultural work in mind. Specifically, we clarified the relationship between the set path and soil reaction force, proposed a path generation method to reduce the reaction force, conducted an evaluation experiment using experimental equipment, and conducted an experimental verification of the oscillation suppression control using an actual automatic harvester. They are the core technologies of the automatic spinach harvesting system developed by the applicants. These results contribute to the development of automatic control technology for agricultural machinery involving the interaction of soil and rigid body motion.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 運動解析 個別要素法 農業機械

## 1. 研究開始当初の背景

制御工学は、産業応用において重要な貢献を果たしているものの、農業分野など異分野への応用に関しては必ずしも十分ではない。例えば、農業用自動収穫装置では、トラクターやコンバインなどの一部の製品については十分な技術が構築されているものの、それ以外の作物、特に軟弱野菜とよばれるホウレンソウや小松菜などについては、機械による自動収穫の普及は十分ではない。一方、高齢化に伴う農業従事者の減少の観点からは、軽労化は社会課題となっており、高性能な自動収穫技術へのニーズは非常に高い。さらに、自動収穫技術の向上のためのブレークスルー技術として、制御工学の活用への期待も大きい。これに対して、農業機械の自動化においては、既存技術の単なる応用では実現できない技術課題が多く残されている。例えば、ホウレンソウなどの柔らかい野菜の場合、人手による収穫でも葉や茎を傷つける場合が多い。しかし、既存の自動収穫装置では把持や挟み込みによって地上から作物を回収する原理であるため、かなりの確率で作物を傷める。これを解決するためには、新しい原理に基づく自動収穫技術を構築する必要が有る。例えば、これらの野菜では、収穫するためには土の中で根を切断する必要が有ることから、剛体である根切り刃を土中進行させる。しかし、土と剛体の相互作用についての挙動解析は必ずしも容易ではなく、性能向上は試行錯誤に頼っている。そのため、土中で剛体を精度良く動作させる場合には、土と剛体の相互作用を解析し、その挙動を十分に把握することが必要となる。さらにその上で正確な運動制御技術を実現できれば、画期的な性能をもたらすブレークスルー技術と成り得る。

## 2. 研究の目的

これまでのホウレンソウ自動収穫装置の開発検討によって、柔らかい野菜の自動収穫技術に関して多くの知見が得られた。その結果、対象物を把持せず、挟み込まず、受動的にハンドリングすることで作物を傷めない自動収穫方法を見出した。これは、既存の原理とは全く異なる画期的な方法であり、特許を取得している。その実現原理は非常に簡単であるものの、土中を進行させる根切り刃の正確な位置と経路の制御が求められる。しかし、これまでは目標経路の設定など、多くの経験的知見と試行錯誤に頼っており、学術的に不明確な点が多かった。そこで、土と剛体の力学的な相互作用を明確化し、土に作用する機構の運動制御の基礎技術の確立を目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 土と剛体の相互作用の評価が可能な解析モデル構築

開発したホウレンソウ自動収穫装置では、剛体である根切り刃を土中進行させて根を切断すると共に上部に搬送するための補助的役割を果たしている。その際の土による作用を解析するために、DEMを用いた解析を行う。その際、土の挙動を反映したモデルパラメータ設定が重要である。

### (2) 評価用実験装置を用いた実験による解析モデルの検証

実圃場における自動収穫装置の挙動は、圃場条件のばらつき等によって細かな点における再現性に乏しく、結果の評価が難しい場合が多い。そのため、実験室環境下において、土と剛体の相互作用を検証できる実験装置を構築することで、再現性を伴った実験の実施が可能となり、その性能も明確化できる。そのため、実機における根切り刃部分とその挙動を模擬した実験装置を設計製作する。

### (3) 自動収穫装置プロトタイプ試験装置を用いた圃場実験による検証

(1)あるいは(2)で得られた知見を自動収穫装置に反映させ、実機での検証実験を実施することで実応用における性能向上の検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 土と剛体の相互作用の評価が可能な解析モデル構築

剛体の土中における挙動を解析するため、Particleworks®を導入した。それを用いて、DEM機能によって剛体運動に伴う土の挙動をシミュレーション解析して土

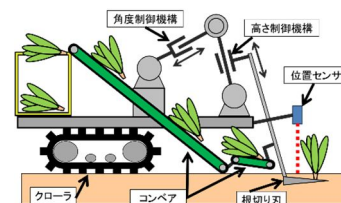


図1 ホウレンソウ自動収穫装置構成図

剛体平板である根切り刃を地表面下一定深さで土中進行させ、根を切断した後にコンベアで上部に搬送する。根切り刃の深さは地表面位置センサによるフィードバック制御を用いる。また、根切り刃の進行はクローラによる推進力を活用している。

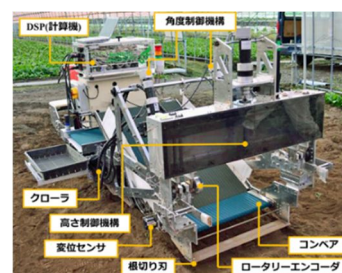


図2 ホウレンソウ自動収穫装置

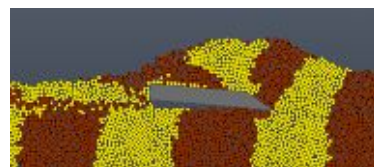


図3 自動収穫の様子

からの反力の影響を考察すると共に自動収穫に有利となる経路を考察した。その結果、文献[1]で得られた経路が効果的であることを解析的に示すことが出来た。その結果は文献[2]において研究発表を行っている。図4にDEMによる解析結果の例を示す。

### (2) 評価用実験装置の設計製作と土による反力の計測

自動収穫装置を用いた実圃場での実験では、圃場状態等の変動要因が大きい。そのため、計測結果に基づいた評価が非常に難しく、土からの反力等も評価が困難であった。そのため、実験室環境において評価用実験装置を設計製作し、それによって剛体運動に伴う土の反力の計測を容易とする環境を整えた。開発した実験装置を図5に示す。さらに、図5の実験装置を用いて計測した土の反力を図6に示す。開発した装置は、自動収穫装置の根切り刃部分の構造を再現しており、土の状態を整えることで再現性の良い実験が可能となっている。この装置を活用し、これまで自動収穫に適していると考えられた幾つかの経路による経路追従制御実験を行って発生する土の反力を歪ゲージで計測した。その結果、土からの反力を最も受ける経路条件が明確化され、これまで自動収穫に適していると考えられてきた文献[1]による経路設定が有効であることが示された。その結果は文献[3]として研究発表を行った。さらには、その経路を発展させることによってさらに改良させた経路生成方法の提案に繋がった(文献[4])。



(a) 平行移動型の経路



(b) 提案経路：(a)より土の圧縮や盛り上がりが小さい

図4 DEMによる解析結果

### (3) 自動収穫装置のピッチ角揺動の発生と経理補正による改善

実圃場での自動収穫装置による収穫時には、根切り刃が受ける土からの反力や地面の凹凸によって車両本体がピッチ角方向に揺動する問題が発生した。この揺動は、根切り刃を土中鉛直方向に侵入させるという自動収穫装置特有の機構に起因しており、鉛直下向きに根切り刃を運動させることによって土からの反力を受け、揺動の発生に繋がっていると考えられる。さらに、車両が凹凸のある地表面を走行することによって発生する場合もある。この影響を低減化させるためには、ピッチ角揺動の発生を車両本体に搭載した傾斜センサでセンシングし、その情報に基づいて根切り刃経路の補正を行うことが効果的である。ただし、開発中の自動収穫装置は根切り刃の位置と姿勢の決定に必要な十分な自由度を持っておらず、完全な補正が不可能であった。そのため、最小二乗法の考え方によるリアルタイムでの近似最適化によって経路の補正方法を提案した。その方法によれば、土からの反力等による影響を低減しつつ揺動を抑える補正が可能である。その効果は、実機実験によって検証した。さらに、その過程において、これまで自動収穫装置に搭載していた制御器の性能が不十分であった点も顕在化したことから、H 制御に基づいた制御性能の向上を図り、実機に搭載してその性能を実験検証した。これらの結果の結果についても、学会発表を行った。

### <文献>

- [1] 山口達也, 千田有一, 藤澤彰宏: 軟弱野菜自動収穫装置における根切り刃の目標経路設定方法と実験検証, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.845, pp.18, 2016
- [2] 藤澤彰宏, 千田有一: ホウレンソウ自動収穫装置における土の移動を考慮した根切り刃の経路設計, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.850, pp.1-16, 2017
- [3] Takuya Fukumoto, Syouta Yanagisawa, Yuichi Chida: Experimental evaluation of reaction force from soil caused by root-cut blade motion of an automatic spinach harvester, Proceedings of SICE Annual Conference 2020, pp.1940-1945, 2020
- [4] Naoto Takayama, Tatsuya Yamaguchi, Akihiro Fujisawa, Tomokazu Kamijo, Koki Nakajima, Yoshifumi Seki, Haruki Hayashi, Yuichi Chida: Improved Path Planning of the Blade for an Automatic Spinach Harvester, IFAC Papers on line 53-2, pp.15816-15823, 2020

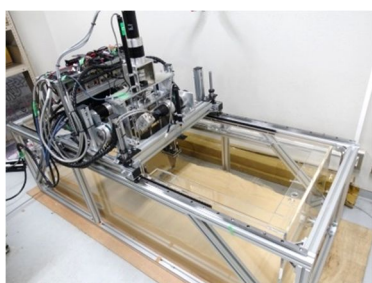
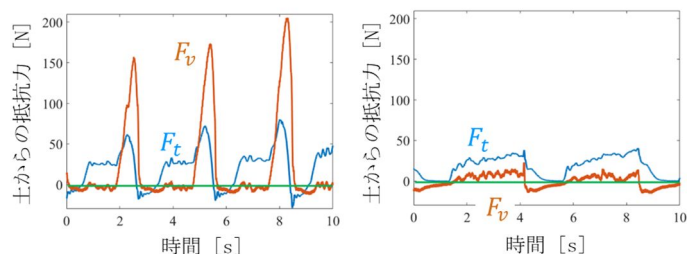


図5 製作した実験装置



(a) 従来経路：反力が大きい (b) 提案経路：反力が抑制

図6 土の反力の計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Naoto Takayama, Tatsuya Yamaguchi, Akihiro Fujisawa, Tomokazu Kamijo, Koki Nakajima, Yoshifumi Seki, Haruki Hayashi, Yuichi Chida	4. 巻 53
2. 論文標題 Improved Path Planning of the Blade for an Automatic Spinach Harvester	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC Papers on line	6. 最初と最後の頁 15816-15823
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Fukumoto, Yuichi Chida and Masaya Tanemura	4. 巻 -
2. 論文標題 Improved tracking performance by H-infinity control for an automatic spinach harvester	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IFAC Papers on line	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 藤原 大佑、岩片 洋人、飯塚 浩二郎	4. 巻 65
2. 論文標題 ホウレンソウ自動収穫装置における根切り刃 - 土壌間の相互作用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 495-498
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤澤 彰宏, 千田 有一	4. 巻 83-850
2. 論文標題 ホウレンソウ自動収穫装置における土の移動を考慮した根切り刃の経路設計	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.16-00472	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 畠山 貴充, 平野 幸助, 中村 雄太, 藤澤 彰宏, 土屋 貴司, 山口 達也, 千田 有一, 吉村 達也	4. 巻 83-851
2. 論文標題 高さと角度の2自由度機構を有する軟弱野菜自動収穫装置の制御(第1報, 根切り刃のアーム長制御)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.16-00531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山口達也, 千田有一, 藤澤彰宏	4. 巻 83-845
2. 論文標題 軟弱野菜自動収穫装置における根切り刃の目標経路設定方法と実験検証	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.16-00102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akihiro Fujisawa and Yuichi Chida	4. 巻 744-1
2. 論文標題 Optimization of an installation angle of a root-cutting blade for an automatic spinach harvester	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/744/1/012135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また, その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計39件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 前垣誉吉, 柳澤曙太, 千田有一, 成澤慶宜
2. 発表標題 ハウレンソウ自動収穫装置におけるピッチ角揺動を抑制した根切り刃経路の生成
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩片洋人, 飯塚浩二郎
2. 発表標題 ハウレンソウ自動収穫機用根切り刃に着目した軟弱地盤中運動に関する研究
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩片洋人, 飯塚浩二郎, 藤原大佑, 千田有一
2. 発表標題 地盤中を移動するハウレンソウ自動収穫機用根切り刃に関する研究
3. 学会等名 第59回学生員卒業研究発表会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成澤慶宜, 柳澤曙太, 高山直人, 千田有一
2. 発表標題 軟弱野菜自動収穫装置における根切り刃の経路進行に伴う反力の評価
3. 学会等名 第62回 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関 圭文, 千田有一
2. 発表標題 ハウレンソウ自動収穫装置のピッチ角揺動に伴う経路変動の補正
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関 圭文, 千田有一
2. 発表標題 ホウレンソウ自動収穫装置のピッチ角揺動に伴う経路変動の補正方法の提案と検証
3. 学会等名 計測自動制御学会第6回制御部門マルチシンポジウム(MSCS2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島弘喜, 千田有一
2. 発表標題 ホウレンソウ自動収穫装置におけるアーム長目標値設定について
3. 学会等名 農業食料工学会関東支部第53回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高山直人, 千田有一
2. 発表標題 ホウレンソウ自動収穫装置の根切り刃経路設定による収穫性能の比較
3. 学会等名 第76回農業食料工学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 千田有一
2. 発表標題 計測制御工学を活用した野菜自動収穫技術の構築
3. 学会等名 2017年度農業食料工学会関東支部 信州大学食農産業イノベーション研究センター合同シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 千田有一
2. 発表標題 計測制御工学による農業収穫用ソリューション技術の開発
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高山直人, 藤澤彰宏, 上條友和, 中島弘喜, 関圭文, 林晴貴, 上原和彦, 祢津栄治, 千田有一, 大峽慎二, 天白久司
2. 発表標題 ハウレンソウ自動収穫装置の根切り刃経路設定について
3. 学会等名 第59回自動制御連合講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Akihiro Fujisawa and Yuichi Chida
2. 発表標題 Optimization of an installation angle of a root-cutting blade for an automatic spinach harvester
3. 学会等名 the 13th International Conference on Motion and Vibration Control(MoViC2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉野 正人  (Yoshino Masato)  (00324228)	信州大学・学術研究院工学系・教授    (13601)	



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	飯塚 浩二郎  (Iizuka Kojiro)  (10453672)	芝浦工業大学・システム理工学部・教授    (32619)	
研究分担者	種村 昌也  (Tanemura Masaya)  (10846885)	信州大学・学術研究院工学系・助教    (13601)	
研究分担者	西村 秀和  (Nishimura Hidekazu)  (70228229)	慶應義塾大学・システムデザイン・マネジメント研究科（日吉）・教授    (32612)	
研究分担者	成澤 慶宜  (Narusawa Yshinori)  (10804685)	信州大学・工学部・研究員    (13601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関