タマネギ収穫機の自動収穫・収納のためのトラクタの自動並走*

小野山博之[†]・菅谷 柊斗[‡]・青山 裕也[‡]・藤田 大地[‡]・
深尾 隆則[§]・村上 則幸[¶]

Autonomous Parallel Travelling of a Robot Tractor for Automatic Harvesting and Unloading of an Onion Harvester*

Hiroyuki ONOYAMA[†], Shuto SUGAYA[‡], Hiroya AOYAMA[‡], Daichi FUJITA[‡],
Takanori FUKAO[§] and Noriyuki MURAKAMI[¶]

This paper proposes an autonomous parallel travelling system for an onion harvester and a tractor. Path following control via sliding mode control is applied to each vehicle. The velocity of the tractor is also controlled using the velocity and position of the onion harvester to maintain their relative position. As the result of experiments, the lateral, longitudinal and orientation errors between the tractor and the onion harvester were less than 0.07 m, 0.11 m and 2°, respectively. It was sufficient for the actual onion harvesting.

1. 緒言

農林水産省の統計 [1,2] によると、日本人の食生活の洋風化・外部化により、日本の野菜の消費量は年々減少傾向にある反面、サラダやカット野菜といった簡便野菜の一人あたりの年間購入金額は増加傾向にある。このような理由から加工・業務用野菜の需要は割合として増加傾向にある。その中でもキャベツやタマネギなどはとくに需要が高い。しかし、これらに代表される露地野菜の栽培はわが国の主食である水稲栽培と比べ、機械化・効

率化が遅れており、単位栽培面積あたりに要する労力が多い。そのうえ、日本の農業においては就業者の減少・高齢化による労働力の低下が著しく、露地野菜栽培のための労働力不足や農業生産力の低下などの深刻な問題が生じている。

このような背景から農林水産省のプロジェクトである革新的技術開発・緊急展開事業（うち人工知能未来農業創造プロジェクト）の課題のひとつである本プロジェクトでは、露地野菜栽培において最も労働力を必要とする収穫から出荷にかけての作業を自動で行うシステムの構築を目指し、その一環としてタマネギ自動収穫機の開発を行っている [3,4]。

タマネギの収穫作業を効率化するうえでネックとなっているのが、収穫用コンテナの入れ替えである。これはタマネギで満杯となったコンテナを空のコンテナと入れ替える作業であるが、コンテナ入れ替えに時間がかかるうえ、その間に収穫作業を中断することになるため、時間的効率を下げる原因となっている。本論文ではトラクタにけん引されたコンテナにタマネギを収納しながら収穫できるようタマネギ収穫機とトラクタの自動並走を行う手法を提案する。

タマネギ収穫機とトラクタは既存の製品に自動走行できるように改造を施した車両を用いた。野菜の収穫では精密な操作が求められるため、自動化を行ううえで高精度な自己位置同定が必要となる。高精度な位置測定が可能であり、農業用ロボットの自動化に利用されている RTK-GNSS [5,6] を用いた。RTK-GNSS をそれぞれ

* 原稿受付 2020年7月29日

* 第64回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表 (2020年5月)

[†] 立命館大学 総合科学技術研究機構 Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University; 1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu city, Shiga 525-8577, JAPAN

[‡] 立命館大学 大学院 理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University; 1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu city, Shiga 525-8577, JAPAN

[§] 東京大学 大学院 情報理工学系研究科 Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

[¶] 北海道農業研究センター芽室研究拠点 NARO Hokkaido Agricultural Research Center Memuro Upland Farming Research Division; 9-4 Shinseiminami, Memuro, Kasai, Hokkaido 082-0081, JAPAN

Key Words: autonomous parallel travelling, tractor, onion picker, path following control, sliding mode control.

2基搭載し、位置および方位情報を得た。位置情報を基にした参照経路を生成し、その経路に追従した操舵制御を行うことで、自動並走の実現を目指す。経路追従手法には、自動車や農業機械の自動走行で実績のある経路追従制御 [7,8] を基にした制御手法を用いる。

本論文では、RTK-GNSS から得た車両の位置情報を基に生成した経路への追従制御（操舵制御）の実装手法と、その有効性の検証を目的として行った実機実験の結果について述べる。

2. 自動並走システム

地面の泥濘や凹凸などといった走行環境から受ける外乱や、車両のモデル化誤差などを考慮することで、精度が向上する可能性があると言及されていることから [3], 外乱にロバストであるスライディングモード制御を用いた。トラクタとタマネギ収穫機はそれぞれの生成経路に対してスライディングモード制御による追従制御を行う。タマネギ収穫機の経路追従制御とトラクタのタマネギ収穫機と並走するための経路追従・車間距離制御について述べる。

2.1 経路追従制御法

経路追従制御は仮想的に設けられた参照車両が走行する参照経路に実車両を追従させる制御である。実車両の状態を $q = [x, y, \theta]^T$, 参照車両の状態を $q_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ とすると、運動学モデルはそれぞれ (1) 式および (2) 式のようになる。Kanayama らの追従制御法 [9] を基に、参照車両から実車両をみたときの相対誤差を用いて経路追従制御を行う。Fig. 1 に誤差の取り方を示す。 e_1 , e_2 , e_3 はそれぞれ縦偏差、横偏差および廻頭角偏差で、それぞれ進行方向、左方向、左回りを正とする。

Fig. 1 Definition of path following error

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 v , ω , v_r , ω_r は、それぞれ実車両と参照車両の速度および角速度である。これらの相対誤差は以下の

ようになる。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 0 \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \theta - \theta_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

これを時間微分すると次式を得る。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos e_3 - v_r + e_2 \omega_r \\ v \sin e_3 - e_1 \omega_r \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

ω_r は曲率 ρ を用いて $\omega_r = \rho v_r$ と書けるので、制御入力 v に任意の速度を与え、参照車両の速度と角速度を以下のように設定する。

$$v_r = \frac{v \cos e_3}{1 - e_2 \rho} \quad (5)$$

$$\omega_r = \rho \frac{v \cos e_3}{1 - e_2 \rho} \quad (6)$$

このとき $\dot{e}_1 = 0$ であり、参照車両の初期値は自由に決めることができるので、 (v_r, ω_r) の初期値を (v, ω) の初期値に合わせると $e_1(t=0) = 0$ となって $e_1 = 0$ を得る。よって (4) 式は次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ v \sin e_3 \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$v_r = v \cos e_3 + e_2 \omega_r \quad (8)$$

2.2 スライディングモード制御系の設計

スライディングモード制御は制御入力をあらかじめ設定した面の上下で切り換え、状態をその切換面に拘束したまま平衡点に滑らせる制御であり、外乱に対してロバストであることが知られている。 $\xi = \sin e_3$ と状態変換を行い、時間微分する。

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \dot{e}_3 \cos e_3 \\ &= (\omega - \omega_r) \sqrt{1 - \xi^2} \end{aligned} \quad (9)$$

状態変換後のモデルは以下のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_2 \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \xi \\ (\omega - \omega_r) \sqrt{1 - \xi^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(10) 式においてリアプノフ関数候補 V_1 を以下のように定義する。

$$V_1 = \frac{1}{2} e_2^2 \quad (11)$$

時間に関して微分をすると

$$\dot{V}_1 = e_2 v \xi \quad (12)$$

ここで ξ を仮想入力とし

$$\xi = -K_s e_2 \quad (13)$$

とする. ここで, K_s は正の定数である. このとき, 速度 v は正の数なので

$$\dot{V}_1 = -K_s v e_2^2 \leq 0 \quad (14)$$

となり, e_2 が 0 に収束する. しかし, ξ は状態量であるため, 任意ではない. そこで理想的な仮想入力との差

$$s = \xi + K_s e_2 \quad (15)$$

をとり, $s=0$ を切換面とするスライディングモード制御を行う. 正定なりアプノフ関数 V_s を次のようにとる.

$$V_s = \frac{1}{2} s^2 \quad (16)$$

時間に関して微分すると

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= s \dot{s} \\ &= s(K_s v \xi - \omega_r \sqrt{1-\xi^2} + \omega \sqrt{1-\xi^2}) \end{aligned} \quad (17)$$

ここで入力 ω を

$$\omega = \omega_{eq} + \omega_l \quad (18)$$

とおく. ただし

$$\omega_{eq} = \omega_r - \frac{K_s v \xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (19)$$

$$\omega_l = -\frac{\eta \operatorname{sgn}(s)}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (20)$$

とおくことで次式が成立する.

$$\dot{V}_s \leq -\eta |s| \quad (21)$$

上式は以下のように表すことができる.

$$\frac{dV_s}{dt} \leq -\eta \sqrt{2V_s} \quad (22)$$

$$\frac{1}{\sqrt{V_s}} \frac{dV_s}{dt} \leq -\sqrt{2}\eta \quad (23)$$

時間積分すると以下の式が得られる.

$$2\sqrt{V_s} \leq 2\sqrt{V_s(t=0)} - \sqrt{2}\eta t \quad (24)$$

以上より有限時間で $\sqrt{V_s}=0$, つまり切換面 $s=0$ に到達することが保証される [10]. このとき, 切換面 $s=0$ で (15) 式に代入すると以下が成立する.

$$\dot{e}_2 = -v K_s e_2 \quad (25)$$

上記の式より e_2 が有界であることが示される. さらに切換面と e_2 が有界であるため, (15) 式から ξ も有界であることがわかる. ω_l は単純切換入力であり, 切換面 s の付近でスイッチング入力を加えるため, チャタリングが生じてしまう [11]. これにより, モデルとして無視している高周波なダイナミクスを励起することとなる. そこで, 次のような連続化を行い, チャタリングの発生を防ぐことができる. ここで δ は小さい正定数である.

$$\omega_l = -\eta \frac{s}{(|s|+\delta)\sqrt{1-\xi^2}} \quad (26)$$

この連続化を行った場合, 切換面の付近で入力が連続される境界層とよばれる領域ができる. 境界層の範囲外では通常のスイッチング入力と同じなので, 連続化を行った場合も同様に入力に関するロバスト性がある. 境界層の範囲内ではほぼ切換面近くに拘束することができるため, 理想的なスライディングモード入力が達成される. 実際の入力は角速度ではなく操舵角を与えることから, 車両の幾何学的関係から速度, 角速度および前輪操舵角 ϕ の関係は前後輪の距離 L を用いて次式で表される.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{L}{v} \omega \quad (27)$$

2.3 速度制御

トラクタはタマネギ収穫機と Fig. 2 のように目標とする間隔を保持しながら並走を行うために速度制御を行う. 次式に示すように, 制御入力にはタマネギ収穫機と速度 v_h , トラクタの速度 v_t としてそれらの速度偏差およびタマネギ収穫機との縦偏差 e_{1th} をフィードバックする PD 制御を用いる. u はトラクタへの速度指令値である. タマネギ収穫機への速度指令値としては一定速度 (0.3 m/s) を与えた.

$$u = v_h - K_p e_{1th} - K_d (v_t - v_h) \quad (28)$$

ここで K_p, K_d は正定数である.

Fig. 2 Parallel travelling

2.4 位置情報の遅延補正

トラクタの自動並走は, 収穫機の位置, 速度情報を参照して行っている. 収穫機側の情報を無線通信 (UDP 通信) によってトラクタ側に伝達しているが, データ処理や通信などにより位置情報に遅延が生ずる場合がある. 位置情報に遅延が生じてしまうと縦偏差 e_1 が増大してしまうため, 補正を行う必要がある. そこで RTK-GNSS から得られるタイムスタンプを用いることで補正を行う.

位置情報の取得時間のずれを τ とすると, タマネギ収穫機との縦偏差 e_{1th} は以下ようになる.

$$\begin{aligned} e_{1th} &= (x_t(t+\tau) - x_h(t) - x_{dist}) \cos(\theta_t - \theta_h) \\ &\quad + (y_t(t+\tau) - y_h(t) - y_{dist}) \sin(\theta_t - \theta_h) \end{aligned} \quad (29)$$

ここで $x_t(t+\tau)$, $y_t(t+\tau)$ は時刻 $(t+\tau)$ のときのトラク

タの自己位置, $x_h(t)$, $y_h(t)$ は時刻 t のときのタマネギ収穫機の自己位置, θ_t , θ_h はトラクタとタマネギ収穫機の方角, x_{dist} , y_{dist} は収穫機とトラクタの目標間隔である. 上記の式では τ だけ位置情報に誤差が生じる. そのためタマネギ収穫機の x , y 軸の速度 v_{x_h} , v_{y_h} を用いることで, 以下の式のように補正を行う.

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{1th} = & (x_t(t+\tau) - x_h(t) - v_{x_h}\tau - x_{dist})\cos(\theta_t - \theta_h) \\ & + (y_t(t+\tau) - y_h(t) - v_{y_h}\tau - y_{dist})\sin(\theta_t - \theta_h) \end{aligned} \quad (30)$$

これにより通信遅延による位置情報の誤差を解消する. 位置情報の遅延補正を行っていない e_1 と補正を行った e_1 を下図に示す. 補正を行っていない e_1 ではピークが表れているが, これは制御指令を送る同一周期内で, トラクタの位置情報が更新されかつタマネギ収穫機の位置情報が送られてこないために生じる. 一方, 補正を行った方ではそのようなピークは見られず, 遅延補正がうまくいっていることがわかる.

Fig. 3 Longitudinal distance error with correction and without correction

2.5 経路設計

タマネギ自動収穫は, 収穫機がタマネギの収穫作業を行い, 収穫されたタマネギを収穫機側に取り付けられたコンベアを介してトラクタが牽引するコンテナに収納する.

自動収穫を行う際は畝間の移動が必要となるが, トラクタはコンテナを牽引しているため, 切返し走行が困難である. そのため, Fig. 4 のように外側の畝から渦巻状に収穫を行う必要がある. 旋回を行う枕地では並走する

Fig. 4 Image of travelling path

必要がないため, 本研究では直線部の並走について述べる. 参照経路は Fig. 5 に示すように座標点を一定間隔で配置することで生成する. RTK-GNSS によって取得した位置座標点の最近傍点を目標点としており, 点の間隔を 1 cm として参照経路を生成・追従制御を行った.

Fig. 5 Error calculation

2.6 並走経路

タマネギの収穫作業はほとんどが直線状に行われるため, 収穫機の経路は直線状に生成する. 経路はタマネギ収穫機とトラクタで別々に用意し, それぞれに対して経路追従を行う. トラクタの並走経路は Fig. 6 に示すように, 収穫機の経路を目標間隔分移動したものとしている.

Fig. 6 Parallel travelling path

3. 実機実験

2節で述べた自動並走システムの実装と精度検証のために行った実機実験について述べる. 実験は北海道河東郡鹿追町にあるタマネギ畑 (Fig. 7) にて検証を行った.

Fig. 7 Experimental field

3.1 実験装置

本システムにおいて実際に使用した機器について説明する. トラクタはヤンマー製のエコトラ EG105 (Fig. 8, Table 1) を改造した車両を使用した. 前輪が車輪, 後輪

がクローラのセミクローラタイプのトラクタである。外部からの指令による制御が可能であり、CAN (Control Area Network) を介して制御用 PC と車両のコントローラの通信を行う。また本実験では、タマネギを収納するコンテナを運ぶトレーラ (Fig. 8, Table 2) をトラクタに牽引させる。車両の位置情報、方位情報を取得するセンサとして RTK-GNSS/Compass (長田電気製, SB70) を取り付けている。2 機取り付けすることで、センサの位置関係より方位情報の算出が可能となっている。RTK-GNSS/Compass から得られる位置情報、方位情報、速度情報を基に操舵制御、速度制御を行う。また、本実験で並走対象となるタマネギ収穫機は訓子府機械工業株式会社製のオニオンピッカー KTP-1200 (Fig. 9) を改造した車両である。右側にタマネギを送るコンベアが装着されており、これにより収穫したタマネギをトラクタが牽引するコンテナに収納する。

Fig. 8 Tractor and trailer

Table 1 Specification of tractor

Base Size	Length	4260 [mm]
	Width	1805 [mm]
	Height	2705 [mm]
Mass		3840 [kg]
Wheel Base		2.4 [m]
Minumum Turning Radius		3.9 [m]

Table 2 Specification of trailer

Base Size	Length	4900 [mm]
	Width	2600 [mm]
	Height	1900 [mm]
Mass		1560 [kg]
Wheel Base		3.1 [m]
Connector Length		2.4 [m]

Fig. 9 Onion harvester

Fig. 10 Autonomous parallel travelling

Table 3 Control parameters

K_s	0.12	K_p	0.6
δ	0.08	K_d	0.3
η	0.03	-	-

3.2 タマネギ収穫機との並走実験結果

GNSS/Compass の情報をタイムスタンプから補正を行い、操舵制御にスライディングモード制御、速度制御に PD 制御を用いてタマネギ収穫機との並走を行った。Fig. 10 に自動並走の様子を示す。収穫機を 0.3m/s、制御ゲインを Table 3 に示す値に設定し、実験を行った。タマネギ収穫機およびトラクタ間の縦偏差、横偏差、廻頭角偏差の時間変化を Fig. 12, Fig. 13 および Fig. 14 に示す。実験結果より、縦偏差は $\pm 0.11\text{m}$ 以内、横偏差は $\pm 0.07\text{m}$ 以内、角度偏差は ± 2 度以内の走行誤差となった。シュータとコンテナの関係から縦・横方向に $\pm 0.15\text{m}$ 以上の余裕があり、実際にタマネギの自動収穫・収納を行いながらの実験であったが、取りこぼしもなく、自動収穫を行ううえで問題のない精度であった。

Fig. 11 Trajectories of the tractor and the onion harvester

Fig. 12 Longitudinal error between the tractor and the onion harvester

Fig. 13 Lateral error between the tractor and the onion harvester

Fig. 14 Orientation error between the tractor and the onion harvester

4. 結言

本論文では、タマネギ収穫の効率化のためにタマネギ収穫機とトラクタが並走する方法を提案した。収穫速度を0.3m/sで実験を行った結果、縦偏差 $\pm 0.11\text{m}$ 以内、横

偏差 $\pm 0.07\text{m}$ 以内、そして角度偏差は ± 2 度以内の走行誤差となり、位置関係をおよそ保ったまま並走できることを確認した。

謝 辞

本研究は、農研機構生研支援センター「革新的技術開発緊急展開事業（うち人工知能未来農業創造プロジェクト）」の支援を受けて行ったものであり、厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 農林水産省：野菜の消費をめぐる状況について（2013）
- [2] 農林水産省：野菜の消費をめぐる情勢（2016）
- [3] 森田，青山，吉本，深尾，村上：タマネギ収穫機の自動操舵制御；計測自動制御学会制御部門 第5回制御部門マルチシンポジウム論文集，Su31-4（2018）
- [4] 森田，吉本，深尾，村上：タマネギ収穫機の自動操舵制御；計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会，B1-3（2019）
- [5] 水島，野口，松尾：GPSを利用した車両方位計測法；農業機械学会誌，Vol. 66，No. 4，pp. 136-144（2004）
- [6] 飯田，山田：GPSとジャイロを用いた無人コンバインによる稲収穫；農業機械学会誌，Vol. 68，No. 6，pp. 138-143（2006）
- [7] 倉鋪，深尾，大須賀，石山，竹原，今井：不整地を想定した移動ロボットのロバスト制御；日本機械学会論文集（C編），Vol. 74，No. 747，pp. 2705-2712（2008）
- [8] 吉田，杉町，深尾：トラックのPath Following 制御に基づく自動運転；日本機械学会論文集（C編），Vol. 77，No. 783，pp. 165-175（2011）
- [9] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi: A stable tracking control method for an autonomous mobile robot; *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation* (1990)
- [10] C. Edwards and S. Spurgeon: *Sliding Mode Control Theory And Applications* (Series in Systems and Control), Taylor & Francis (1998)
- [11] 野波，田：スライディングモード制御-非線形ロバスト制御の設計理論-，コロナ社（1994）

著 者 略 歴

小 野 山 博 之 (正会員)

2016年京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻博士課程修了。同年立命館大学総合科学技術研究機構助教，2019年同大学総合科学技術研究機構准教授となり現在に至る。農業情報工学および農業機械のロボット化に関する研究に従事。博士（農学）。IEEE，日本土壤肥料学会の会員。

すが やま しゅう と
菅 谷 稔 斗

2020 年立命館大学工学部卒業，同年同大学大学院理工学研究科博士前期課程に進学し，現在に至る．キャベツ収穫機およびタマネギ収穫機のロボット化に関する研究に従事．

あお やま ひろ や
青 山 裕 也

2020 年立命館大学大学院理工学研究科博士前期課程修了，修士（工学）．

ふじ た だい ち
藤 田 大 地

2020 年立命館大学大学院理工学研究科博士前期課程修了，修士（工学）．

ふか お 隆 のり
深 尾 隆 則 (正会員)

1992 年京都大学工学部航空工学科卒業，1994 年同大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了，1996 年同大学院博士後期課程中退．同年同大学院助手，2004 年神戸大学工学部助教授，2015 年立命館大学工学部教授，2020 年東京大学大学院情報理工学系研究科教授となり，現在に至る．2001～2003 年米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員，フィールドロボティクスに関する研究に従事．博士（情報学）．日本機械学会，自動車技術会，IEEE などの会員．

むら かみ のり ゆき
村 上 則 幸

1991 年東京農工大学農学研究科修士課程修了．同年農林水産省農業研究センター入所，1999 年より北海道農業試験場に勤務，2000 年より 1 年間米国 CMU ロボット工学研究所客員研究員，北海道農業研究センター水田作研究領域上席研究員を経て，2017 年より同センター茅室研究拠点大規模畑作研究領域領域長となり，現在に至る．農業用ロボットなどの研究に従事．博士（農学）．2001 年農業機械学会研究奨励賞受賞．農業機械学会，フルードパワーシステム学会，農作業学会の会員．