

株元検出に基づいたハウス内畝間追従走行システム

Inter-row center following system in greenhouses based on stem-base detection

システム工学群

機械システム制御研究室 森岡 洸丞

1. 緒言

農林水産省が公表しているデータ⁽¹⁾によると、農業従事者数の減少と高齢化が進行しており、農作業における人手不足と身体的負担が懸念されている。

この問題を解決するために、ロボットや AI などの先端技術を活用したスマート農業が提案されており、農作業の機械化及び自動化が進められている⁽²⁾。農業従事者にとって負担が大きく、作業回数が多いと考えられる作物の運搬作業における自動走行を考えると、農場の通路(畝間)の安定した走行が必要である。農場は不整地になりやすく、畝間の幅や形状が一定でないことに加え、ハウス内などでは畝間の幅が 30~60 cm と狭い。そのため、運搬ロボットには畝に乗り上げ損壊させないように、畝間中心を検出して走行する能力が求められる。

その対策として、畝の形状や輪郭を利用した畝間中心を追従する手法が提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、これらの手法では雑草や石などの自然物がノイズとなり、走行精度の安定性が左右される可能性がある。

本研究では、深層学習 YOLO による株元検出を利用し、ロボットが畝間を逸脱した際に、畝間中心を自律して追従する走行システムの確立を目的とし、実際に走行車両を試作し、ハウス内で実験を行った結果を示す。

2. 提案する手法

提案手法は、畝間を走行するロボットが目標とすべき基準として、左右の畝の中央に位置する畝間中心線を定義し、この畝間中心線に対するずれを補正しながら走行することで、畝へ乗り上げず安定した走行を可能とするものである。以下では畝間中心からのずれを、図 1 に示すように、ロボットの走行方向と畝間中心線の為す角で表される向き θ_{row} [deg] と、畝間中心線からロボット中心までの距離で表される横ずれ d_{row} [m] として表す。

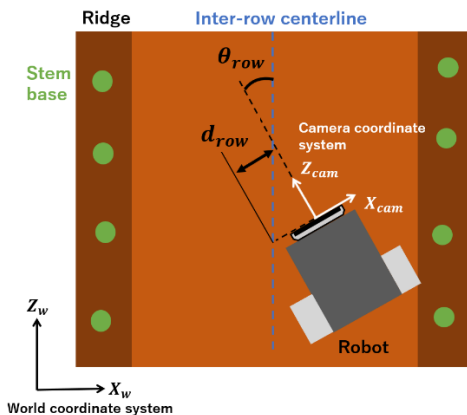


Fig. 1 Definition of robot orientation and lateral deviation

3. ロボットの向き及び横ずれの計算

両畝の場合のロボットの走行方向は「消失点」を用いて求める。消失点とは、画像上において平行な直線が遠方で一点に収束して見える点である。図 2 に示すように、畝上に存在する複数の株元を画像上で検出し、左右それぞれの畝に存在する株元群に対して RANSAC による直線近似を行う。得られた 2 本の直線の交点を消失点とする。図 3 に、消失点に基づくロボットの向き及び横ずれの幾何関係を示す。画像内に映し出される消失点の x 座標を u_{vp} [px]、画像中心の x 座標を c_x [px]、焦点距離を f_x [px] とすると、ロボットの向き θ_{row} [deg] は以下の式で表される。

$$\theta_{row} = \tan^{-1} \frac{u_{vp} - c_x}{f_x} \quad (1)$$

続いて、横ずれの計算について述べる。カメラ画像から得られる情報は画素[px]で表されるため、これを 3D[m]へ変換する必要がある。図 3 のように、カメラ座標系において、検出した株元の x 座標 u [px] とカメラの内部パラメータ、深度カメラで得た株元の奥行距離 Z [m] を用いると、 X [m] は次のように表せる。

$$X = \frac{u - c_x}{f_x} Z \quad (2)$$

f_x : 焦点距離[px] c_x : 画像中心の x 座標[px]

次に、左右の畝の株元群を Z_{cam} - X_{cam} 平面で直線近似する。左右に分けた点群 $\{(Z_i, X_i)\}$ に対し、RANSAC で

$$Z = a_L X + b_L \quad (3)$$

$$Z = a_R X + b_R \quad (4)$$

を導出する。図 3 から画像の下端中心を原点としたとき、原点から式(3)、式(4)の直線の X_{cam} 切片の midpoint までの距離を横ずれ d_{row} [m] とすると

$$d_{row} = -\frac{1}{2} \left(\frac{b_L}{a_L} + \frac{b_R}{a_R} \right) \quad (5)$$

と表される。

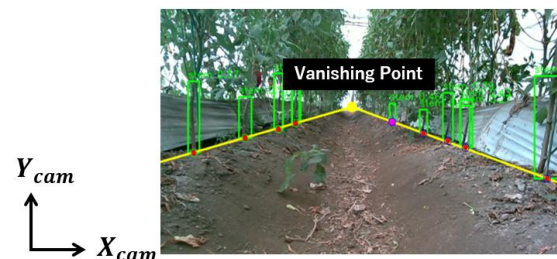


Fig. 2 Vanishing point estimation using stem base detection and line fitting

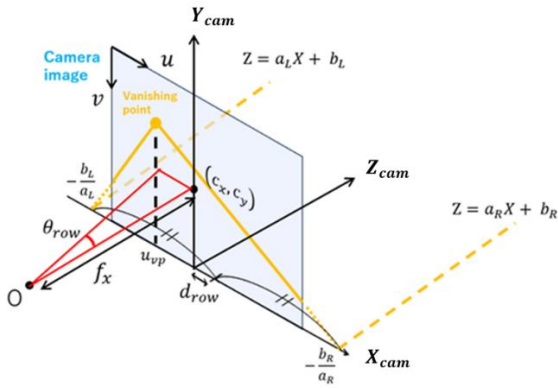


Fig. 3 Geometric relationship between robot orientation based on the vanishing point and lateral deviation

4. 提案手法を用いた実験

本実験では、図4のように、提案手法により推定した向き及び横ずれに基づいて、自律的に畝間中心を追従するように走行させて検証を行った。実験で使用したカメラは Intel RealSense D455⁽⁵⁾であり、フレームレート 30fps で画像を取得した。図5に、制御のブロック線図を示す。ロボットは並進速度 0.1m/s で走行させ、横ずれを制御する PD 制御と姿勢角のフィードバックを組み合わせた制御系を用いた。それぞれのゲインは $K_P=0.3$, $K_D=0.8$, $K_\theta=0.1$ に設定した。取得した各画像に対し、前述した提案手法を適用し、ロボットの向き及び横ずれを算出した。



Fig. 4 Robot driving experiment

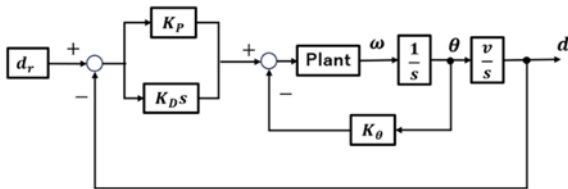


Fig. 5 Block diagram

実験では、畝間中心からのずれを修正する際の動作を確認するため、ロボットを右にずらして走行開始させた。両畝条件において取得した画像 572 枚に対し、ロボットに搭載したカメラから得られる内部情報に基づき、ロボットの向き及び横ずれを推定した。図6にロボットの向きの推定結果及び IMU による真値を、図7にロボットの横ずれの推定結果及び AprilTag による真値を示す。図6より、ロボットは振動しながら走行しているが、向きは -6.85deg から 3.25deg の範囲内に収まっている。また、図7より、畝間中心に到達した後の横ずれは最大 0.01m であった。ロボットの幅が 35.5cm であり、今回走行させた畝間の幅が 60cm であることを踏まえると、ロボットは畝に乗り上げず、畝間中心付近を維持して走

行できていることが分かる。

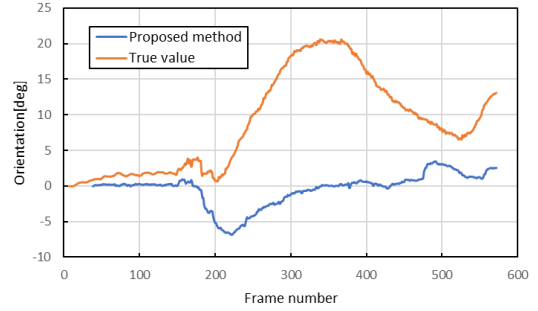


Fig. 6 Robot orientation in the dual-ridge case

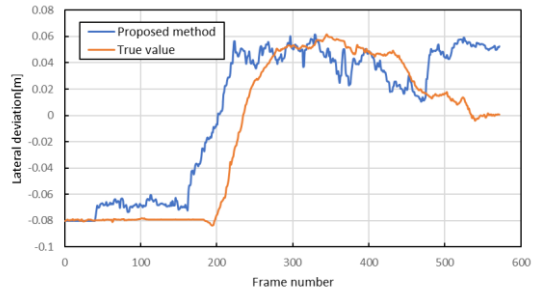


Fig. 7 Robot lateral deviation in the dual-ridge case

5. 結言

本研究では、ハウス農場における畝間中心を追従する手法を提案し、両畝の場合の走行実験を行った。今後は片畝の場合にも本手法が適用可能であるかを検証する。

謝辞

本研究は高知県が進めるプロジェクト「IoP(Internet of Plant)」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化の助成を受けております。この場をお借りして感謝申し上げます。

文献

- (1) 農林水産省 第3節 担い手の育成・確保と多様な農業者による農業生産活動
https://www.maff.go.jp/wp/wpaper/w_maff/r6/r6_h/trend/part1/chap3/c3_3_00.html
(参照日 2026年1月13日)
- (2) スマート農業をめぐる情勢について 2025年12月 農林水産省
https://www.maff.go.jp/kanbo/smart/smart_meguji.pdf
(参照日 2026年1月13日)
- (3) 萬 礼応, 「農業ロボットの GNSS と畝間認識に基づく自動走行」, 第65回自動制御連合講演会講演論文集, pp.223–226, 2022.
- (4) 藤田隼輔, 小林幸徳, 江丸貴紀, Ankit. A. Ravankar, 「圃場における自律走行を目的とした RGB-D センサによる畝のロボストな認識法および制御系の提案」, 自動制御連合講演会講演論文集(CD-ROM), 62nd, ROMBUNNO.1J2-03, 2019.
- (5) インテル® RealSense™ デプス・カメラ D455
<https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/sku/205847/intel-realsense-depth-camera-d455/specifications.html>
(参照日 2026年1月17日)