

株元検出に基づいた農作業ロボットの自律走行システムの開発

Autonomous Navigation System Based on Stem-Base Detection for Agricultural Vehicle

知能機械工学コース

機械システム制御研究室 大谷 奏太

1 緒言

日本の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の減少および高齢化が年々進んでおり、人手不足や身体的負担が懸念される。これらの課題を改善するため、作業の機械化・自動化の導入が進んでいる。本研究では単純労働であり、かつ身体的負担が大きいと考えられる運搬作業に着目し、農業用自律走行ロボットの開発を目標とする。現在、開発されている自律走行技術は、経路・動作計画などの様々な技術の組み合わせで構成されている。特に、自己位置推定はセンサ情報を用いてロボット位置を推定する基盤技術であり、SLAMや経路・動作計画を行うのに必要であることから、極めて重要な要素技術である。ハウス環境においては、屋内環境であることから、GPSが使えないことや走行通路(畝間)が狭いこと、ランドマークが少なく繰り返し構造であることから、高性能なLiDARやIMUなどを用いた推定手法やAprilTagなどの人工ランドマークを用いた推定手法⁽²⁾が提案されている。しかし、高精度なセンサは非常に高価であることや人工ランドマークの設置には、畝間の拡張や設置作業の手間がかかることから、導入コストの増大が課題となる。

以下では、安価なセンサ構成でハウス環境に適用可能な自己位置推定手法を開発し、安定した自律走行を実現することを目的として、推定精度の検証を行ったのでこれを報告する。

2 提案する自己位置推定

2.1 概要

ロボットの座標およびパラメータの定義を図1、開発する自己位置推定アルゴリズムを図2に示す。まず、RealSenseにより取得したRGB画像に対し、物体検出手法YOLO⁽³⁾で作物を検出する。次に、検出領域に基づき、図1の写真の○印に示すように各作物につき1点の株元座標を推定する。推定した株元のピクセル座標と対応したDepth画像の深度から、カメラ座標系 $(X_{cam}, Y_{cam}, Z_{cam})$ で株元位置を3次元座標 $(X_{stem,i}, Y_{stem,i}, Z_{stem,i})$ に変換する。この情報から図2に示すように株元トラッキング、畝間中心線との横ずれ推定、消失点に基づく姿勢角推定によって、ロボット位置 (X, Y, θ) を推定する。この処理は、株元が検出可能な畝間内での直進中の推定であり、回転時にはエンコーダとIMUを用いる。直進中は、図1のように推定畝間中心線を基準とするため、推定誤差の蓄積(ドリフト)を抑制した推定が可能である。そのため、ドリフトの可能性のあるエンコーダとIMUを回転時のみの使用におさえることで、比較的low価格なセンサの採用が可能となる。X位置および姿勢角 θ の推定手法については既報⁽⁴⁾に記載しているため、本稿ではY位置推定に焦点を当てて説明する。

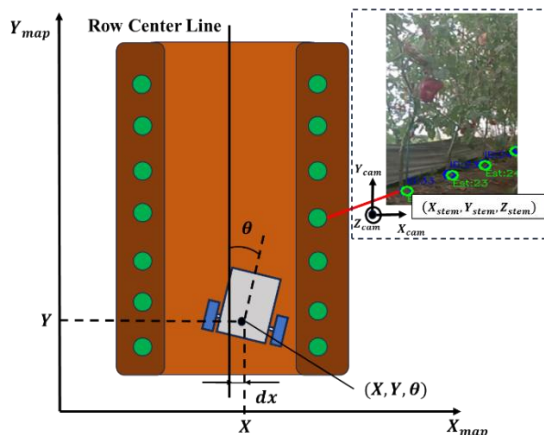


Fig.1 Definition of coordinate system and parameters

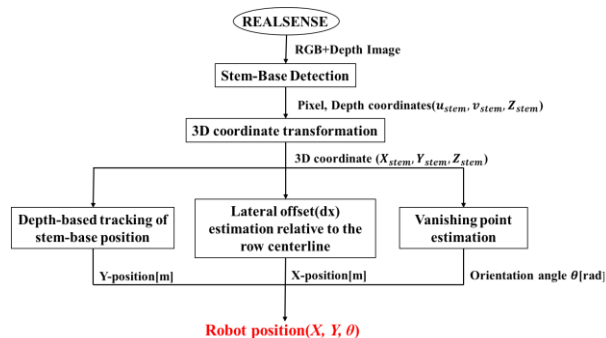


Fig.2 Overview of the self-localization method

2.2 株元トラッキングによるY位置推定

Y位置推定のフローチャートを図3に示す。時刻 t [s]のフレームにおける株元の観測位置集合 O と時刻 $t-1$ [s]のフレームからの予測位置集合 P に対し、ハンガリアン法⁽⁵⁾を用いてマッチングを行う。式(3)に示す C_{ij} は観測位置と予測位置とのユークリッド距離であり、式(4)に示す $T_{ij} \in \{0,1\}$ を割当変数として、距離の総和が最小となる対応関係を求めることで、同一株元に対して同一IDを付与する。

$$P = \{p_i\}_{i=1}^m \quad (1)$$

$$O = \{o_j\}_{j=1}^n \quad (2)$$

$$C_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} T_{ij} \\ & \text{s.t. } \sum_i T_{ij} = 1, \sum_j T_{ij} = 1, T_{ij} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (4)$$

これにより、同一 ID における 1 周期での株元座標の深度変化を算出できる。株元は地面に対して固定されているため、株元の深度変化量 ΔZ_i は、図 2 に示す Y 方向の変化量に対応する。よって、マッチングしたすべての ΔZ_i を平均し、1 周期でのロボットの Y 位置の変化量 ΔY を積算することで、時刻 t における Y 位置 $Y(t)$ を推定する。

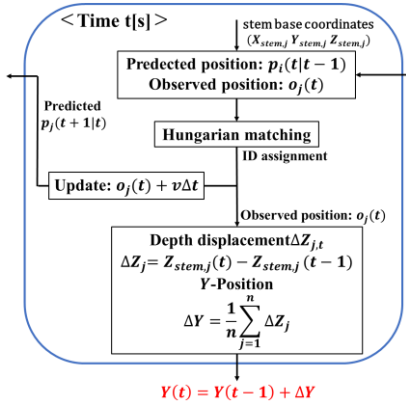


Fig.3 Flow chart of Y-position estimation

3 自己位置推定実験

3.1 実験方法

2.2 節で述べた Y 位置推定と既報⁽⁴⁾に基づく X, θ 推定を組み合わせた本自己位置推定手法の推定精度を検証するため、真値との比較を行う。実験は、図 4 に示すように、ロボットに AprilTag を取り付け、外部から、固定カメラでトラッキングをおこなう。このトラッキングデータを真値として、以下の式で評価する。

$$APE = \sqrt{(X_k - X_k^{true})^2 + (Y_k - Y_k^{true})^2} \quad (5)$$

APE はある時刻における推定値 (X_k, Y_k) と真値 (X_k^{true}, Y_k^{true}) の誤差を表す量であり、対象の畝間の幅(500~600mm)での走行に十分な精度であるか評価する。走行経路は、青点から畝間を直進後、2 列隣の畝間へ旋回、再度直進し、緑点へ向かう。APE 評価は、固定カメラが検出可能な最初の直進区間のみで行う。

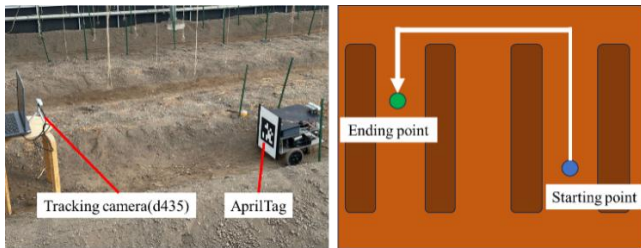


Fig.4 Overview of the experimental environment and robot trajectory using AprilTag

3.2 実験結果

実験から得られた APE および走行軌跡を図 5, 6 に示す。推定誤差は非常に小さく、走行軌跡も安定していることが確認できる。APE は最大 6.6cm と小さい値を示しているが、これは本手法における外れ値である。この外れ値を除いて評価した場合、誤差はおおよそ 1~3cm の範囲に収まっている。本実験は短区間での評価であるが、ドリフトを抑制した推定であることから、有効な手法であるといえる。

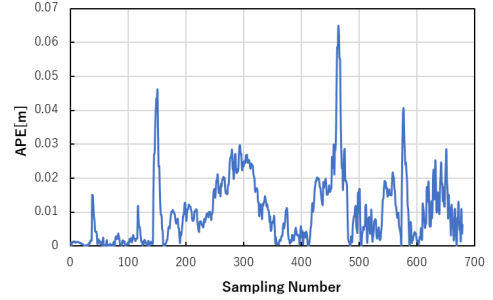


Fig.5 APE in straight-line sections

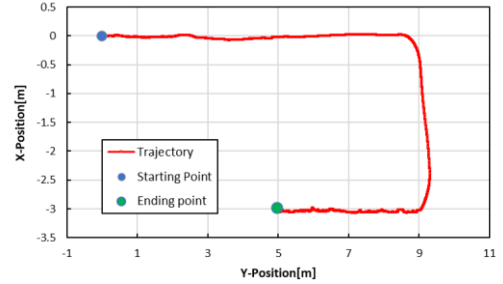


Fig.6 Estimated trajectory obtained by the proposed method

結言

本研究では株元検出に基づく自己位置推定手法を提案し、畝間での狭路走行を想定した精度検証を行った。実験結果より、本手法がハウス環境において有効な自己位置推定を実現できる可能性を示した。今後は、本自己位置推定手法による SLAM で生成した地図をもとにナビゲーションを行い、実用化を目指す。

謝辞

本研究は高知県の「IoT が導く Next 次世代型施設園芸農業への進化プロジェクト」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) 農林水産省ホームページ 基幹的農業従事者 https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r3/r3_h/trend/part1/chap1/c1_1_01.html (参照日 2025 1 月 20 日) .
- (2) W. Zhang, L. Gong, S. Huang, S. Wu, and C. Liu, "Factor graph-based high-precision visual positioning for agricultural robots with fiducial markers", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 201 (2022), p. 107295.
- (3) J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection", *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (2016), pp. 779-788.
- (4) 森岡洗丞, 大谷奏太, 岡宏一, "株元検出に基づいたハウス内畝間追従制御システムの開発", 日本機械学会中国四国学生会 第 56 回学生会卒業研究発表講演会.
- (5) R. E. Burkard, E. Cela, "Linear Assignment Problems and Extensions", *Handbook of Combinatorial Optimization*, Springer, Boston, MA (1999).