

カメラ映像による自己位置推定を用いた 精密農業のための低価格自律移動ロボットの試作と評価

角谷 和宣[†]繁田 亮[†]川原 圭博[†]浅見 徹[†][†] 東京大学 大学院情報理工学系研究科

1 はじめに

ビニルハウスなどの施設型の圃場内部で作物を安定的に栽培するためには、温度や日照の施設内のばらつきを抑える必要がある。しかし、広い圃場に多くのセンサを設置することはコストが高くなるため、各種センサを搭載したロボットが施設内を循環しながら環境情報データを取得するほうが合理的である。

我々はこれまでに市販の模型車体と Raspberry Pi のような低価格コンピュータを用いて圃場内を自律走行する移動センサの開発を行ってきた [1, 2]。本稿では、ロボットの制御の要となる、圃場内での自己位置推定手法に関する比較検討の結果を報告する。

2 精密農業のための低価格自律移動ロボット

本研究で想定するロボットは図1のように市販の模型ラジコンを改造したもので、Raspberry Pi が出力する PWM 信号によってモータの速度制御およびステアリング制御を行う。一般に、ロボットの自律走行には自己位置推定が必要不可欠である。そこで本章では、圃場におけるロボットの自己位置推定手法に求められる要件を検討し、カメラ映像を用いた位置推定手法が農業用ロボットにおいて適しているという結論を導く。

以下が圃場内を走行するロボットに求められる要件である。不整地において使用できること

従来、車両型ロボットにおいてはロータリーエンコーダとジャイロセンサを組み合わせた自己位置推定を用いることが多い。しかし、圃場のような不整地にはタイヤのスリップが生じ、正確な位置推定が難しい。したがって、地面と非接触で行う位置推定手法が適している。

導入時の金銭的コストを抑えること

本稿で提案する農業用ロボットは、一般の圃場に精密農業を導入する敷居を下げるのが目的である。そのため、導入時の金銭的コストを抑えることが必要となる。例えばレーザーレンジファインダのように、それ単体で数十万円から数百万円の出費を必要とするものは費用対効果の観点から適さない。

農作物などの障害物に対して頑強であること

電波による位置推定として、ZigBee や Wi-Fi のアクセスポイントの電波強度を用いる手法が存在するが、植物の水分による減衰が大きく、精度が低下してしまう。そこで、植物の存在に対してロバストな位置推定手法を選択する必要がある。

位置推定の精度と移動速度への要求

本稿で提案する農業用ロボットは、圃場内の環境データの空間的なばらつきを測定が目的である。それゆえ、産業用ロボットのような高精度の位置推定は不要で、多少の誤差は許容できる。温湿度、二酸化炭素濃度といった環境データが数



図1: 試作した農業用センシングロボット 図2: 斜め下向きカメラによって撮影された画像

cm オーダーで急激に変化するとは考えにくい。本研究における位置推定の許容誤差を数十 cm 程度として見積もった。

我々はこれらの要件を満たす手法として、カメラを用いた位置推定手法に着目する。カメラは地面と非接触で用いるため不整地でも使用可能で、近年は安価なウェブカメラが市販されているため導入コストも低い。更に、植物の存在に対して頑強であり、必要な位置推定精度を満たす手法を選択することで、圃場に適した自己位置推定手法であると言える。

また、導入コストを安価に抑えるため、汎用ウェブカメラを一台だけ用いて自己位置推定を行う。画像処理を用いた位置推定手法はこれまでに様々なものが提案されてきたが、本章ではその中でも単眼カメラを用いた手法の比較検討を行う。

3 単眼カメラによる位置推定手法の比較検討

3.1 マーカー認識による手法

蒲谷が提案したロボット [1] は、畝の脇に等間隔に設置された識別用マーカーをカメラで認識することで位置推定を行うおとしていた。この手法は低価格で実現可能だが、農業機械の使用時に撤去・再設置が必要であるという点で利用者の負担となるものであった。また、日光によってマーカーが退色してしまうこと、植物が成長することでマーカーが隠れてしまうことにより正常に自己位置を認識できなくなる問題があった。

3.2 SLAM

ロボティクスの分野において近年盛んに研究されている手法として SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) がある。SLAM とは、自己位置推定と環境地図作成を同時に行う手法である。元来、SLAM はレーザーによる測域センサ、エンコーダ、ジャイロセンサなどの情報をもとに構築するものであったが、近年ではカメラの動画像を入力として用いる Visual SLAM に関する研究が発展してきた。中でも、LSD-SLAM [3] は単眼カメラのみで実行でき、CPU 上でリアルタイム実行が可能であることから広く注目を集めている。

3.3 斜め下向きカメラで撮影した地表面映像

カメラが斜め下向きの風景を撮影できるようにロボットに設置すると、図2のように、圃場の地表面の様子および通路の両脇に生育する植物を含んだ画像が得られる。このカメラによって得られる地表面映像によって位置推定を行う。まず、あらかじめキャリブレーションを行い、斜めから見た画像を真上から見た画像に透視変換する行列を求めておく。ロボットの走行中、斜め下向きカメラによって地表面の画像を撮影

Prototyping of Low-cost Agricultural Autonomous Mobile Robot for Precision Agriculture using Visual-based Localization

[†]Kazunobu Sumiya, Ryo Shigeta, Yoshihiro Kawahara, and Tohru Asami

[†]Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

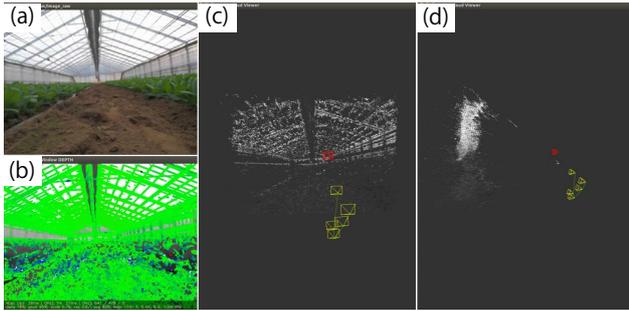


図3: LSD-SLAMの実行結果. (a):前向きカメラによる画像. (b):深度マップ. (c):点群とカメラの軌跡. (d):(c)を横から見た図.

し、そこに含まれる特徴点を上記の行列によって座標変換する。変換後の特徴点は真上から見た地表面画像における特徴点に相当するため、特徴点群の移動量をもとに画像全体の移動量を推定する。画像全体の移動量はロボットの速度であり、これを積算することで自己位置 (x, y) を推定できる。

我々は既に、真上から圃場地表面を撮影した映像によって自己位置推定を行った際の評価を行っており [2], 推定誤差の平均は 1.3% であるという結果が得られた。これは圃場に設備を加えることなく遂行できるという点で有用であるが、カメラ画像には地表面の様子しか含まれていないため、位置推定以外の情報が得られず、どのように舵取りをすべきかといった判断ができない。そこで我々は、一台のカメラのみで圃場をくまなく巡回可能な方式に改善すべく、カメラを斜め下向きに取り付けることを提案する。これによって地表面の様子と通路の両脇に生育する作物の両方がカメラ画像に含まれるようになり、地表面画像によって自己位置推定を、植物の画像によって進むべき方向の修正を行うことが可能になる。

4 実験と結果

前章で検討した単眼カメラによる位置推定手法のうち、SLAM と斜め下向きカメラによる地表面映像を用いた手法の2つについて実験と評価を行った。本実験では安価かつ幅広く入手可能なローリングシャッター方式のウェブカメラとして、ロジクール社製の C930e を採用した。

4.1 LSD-SLAM を用いた実験

茨城県小美玉市にある有限会社ユニオンファームの圃場において、LSD-SLAM [3] を用いて自己位置推定およびマップ作成の実験を行った。図 1 に示すロボットに取り付けられた前向きウェブカメラによる映像をノート PC (Ubuntu 14.04, Intel Core i7 @2.4 GHz) に記録し、ROS Indigo 上で LSD-SLAM のプログラムを実行した。圃場の畝と畝の間にある幅 1 m の通路上を、後ろから手で押して 5 m だけ前に進ませたときの実行結果画面を図 3 に示す。

正常に SLAM が遂行できれば、周囲の物体を点群としてマッピングすると同時にカメラの軌跡が推定される。しかし実験の結果、深度情報が適切に推定できず、カメラの軌跡もほとんど進んでいないようなものとなった。一般に、SLAM はカメラがグローバルシャッター方式のものであることを想定して設計されており、市販のウェブカメラで広く用いられるローリングシャッター方式では大きな誤差要因となることが知られている [4]。具体的には点群が本来の位置に比べて分散し、軌跡が歪んで推定される。今回の実験結果はこの特徴を示しており、ローリングシャッター方式のカメラを用いたことが原因であると言える。ローリングシャッター方式のカメラによる推定結果を補正する研究も存在するが、計算コストの問題からリアルタイムに処理を行うことができない [4]。以上から本研究の農業用ロボットにおいて単眼 SLAM を用いることは難しい。

表 1: 1 m の移動終了時に推定された移動量の平均値 [cm]

θ [°]	カーペット	露出した土	草が生えた土
55	100.8	97.9	97.4
65	101.1	92.5	96.4

4.2 斜め下向きカメラによる地表面映像を用いた実験

東京大学本郷キャンパスにおいて、以下の要領で実験を行った。図 1 に示すロボットに取り付けられた斜め下向きカメラの映像をノート PC (OSX 10.11.3, Intel Core i7 @2.2 GHz) で記録する。後ろから手で 1 m だけ進ませたときの映像を処理して推定移動量を計算する。カメラは真下を向いた状態から θ [°] だけ前を向かせた状態で固定されており、 $\theta = 55^\circ, 65^\circ$ の 2 種類の角度で実験を行った。今回は通路両脇の植物を視界に含めることが目的であるが、カメラを前に向ける、すなわち θ を大きくするほど植物が画像に含まれるようになる。そのため想定する通路幅によって θ の下限が決定される。4.1 節での実験において、ハウス内の通路幅で最大のものが 1 m 程度であった。通路の中心を走行した際に植物がちょうどカメラ画像に収まる角度として、 θ の下限を 55° とした。また、圃場の路面環境を想定した状況として、土が露出した路面、表面に草が生えた路面の 2 種類の路面で計測した。不整地における誤差の影響を比較するために、これらに加えて整地であるカーペットの上でも実験を行った。各状況で 5 回試行したときの推定結果の平均値を表 1 に示す。

不整地である 2 種類の路面上での結果は、整地であるカーペット上での結果より誤差が大きい。また、 $\theta = 55^\circ, 65^\circ$ の結果を比較すると、整地においては誤差がほぼ等しいが、不整地においては $\theta = 65^\circ$ の方が誤差が大きくなる。これらから、整地であればカメラの角度による影響は少ないこと、不整地では θ を大きくすると誤差が大きくなることの 2 点がわかる。後者の理由として、路面の凹凸によって車体姿勢が変化し、それに伴いカメラの角度 θ が微小に変化したときに、 θ が大きいほど路面上の点がより大きく移動して見えることが挙げられる。

5 おわりに

本稿では圃場内を自律走行する移動型センサを構成するにあたって不可欠となる、自己位置推定手法に関する比較検討を行った。今後は位置推定精度のさらなる改善を図るとともに、両脇に存在する植物や正面の壁の存在をカメラ映像から認識し、適切に方向転換を行うことで衝突を回避できるようにする。そして、最終的には環境データを計測するセンサ類をこのロボットに取り付け、これを自律走行させることで低価格移動式センシングロボットとしての完成を目指す。

本研究は、革新的技術創造促進事業 (異分野融合共同研究) 「生理生態学的分析を可能にする低コスト移動型センサと次世代農業ワークベンチの開発」の研究成果である。

参考文献

- [1] 蒲谷直樹. ロボットを活用した低コストモバイルセンシング: 空間センシング技術の農業生産活用. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 290, pp. 1–4, 2015.
- [2] 角谷和宣, 繁田亮, 川原圭博, 浅見徹, 蒲谷直樹. 低価格移動式農業用ロボットのためのウェブカメラを用いた自己位置推定手法. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 308, pp. 79–84, 2016.
- [3] J. Engel, T. Schöps, and D. Cremers. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM. In *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, September 2014.
- [4] Jae-Hak Kim, Cesar Cadena, and Ian Reid. Direct Semi-dense SLAM for Rolling Shutter Cameras. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2016.