

日本農業の未来を支える77 GHz帯レーダ技術

77GHz Radar Technology Supporting the Future of Japanese Agriculture

眞子 凌*
Ryo Manago

大橋 仲々美*
Nanami Ohashi

井上大輔*
Daisuke Inoue

山本 篤司*
Atsushi Yamamoto

〈概要〉

近年、日本の農業における深刻な就農人口減少の課題に対し、農作業の自動化・効率化が求められている。農業環境では、農薬散布時の霧や走行時に発生する砂塵が、植生や障害物のセンシングにおいて課題となっている。当社は、これまで車載向け周辺監視レーダの事業でセンシング技術を培ってきた。その技術を応用し今回77 GHz帯レーダを新たに開発した。77 GHz帯レーダを農業環境に適用して評価した検知性能や耐環境性能に加え、既存の自動走行用ソフトウェアとレーダを統合した自動走行評価について紹介する。

1. はじめに

1.1 背景と課題

近年、日本における就農人口の減少は深刻な問題となっており、農機の自動走行および農作業の自動化・効率化が課題である¹⁾。このような課題を解決するには、農作業時における植生および障害物の正確な検出が可能なセンサが求められる。しかしながら、農薬散布時の霧や農機走行時の砂塵等(図1)、農業特有の環境要因に起因するセンサの誤検知が技術的課題として挙げられる。



図1 ターゲットとした農業環境
Agricultural environment targeted.

また、農機の自動走行を実現する手段のひとつとして、移動体の自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術であるSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) が注目されている。一般的に、自己位置推定にはGNSS (Global Navigation Satellite System) が利用される。しかしながら、農業環境では樹木や建物の影響で衛星からのGNSS信号が遮られる場所が多い。センサとSLAM技術を組み合わせることで、GNSSに依存しない自己位置推定手法を確立することも重要な課題である。

1.2 農機向けの77 GHz帯レーダ

我々は、農機向けの77 GHz帯レーダを開発している²⁾。これまで当社は車載向け周辺監視レーダの事業で技術を培ってきており^{3), 4)}、その技術を農業分野に展開することで先に述べた課題の解決を目指している。ここで、レーダ (Radio Detection And Ranging) は、電波を用いて物体の位置および相対速度を検知可能なセンサデバイスである。表1に示すように、レーダはライダーやソナーなどの他のセンサと比較して、一定の透過性を有するため、雨・霧・砂など耐環境性に優れている。また、一般的に、レーダの距離分解能は使用する周波数帯域幅が広いほど高分解能となる⁵⁾。77 GHz帯のレーダは使用できる周波数帯域が4 GHz (77 ~ 81 GHz) と比較的広く、数cm単位の分解能を実現できる。

以上の特徴から、霧や砂塵など耐環境性が求められる農業環境においてレーダは有効なセンシング手段となることが期待される。また、SLAM技術との組み合わせにより、農機の自動走行用センサとしての活用も期待できる。本稿では、当社にて開発した77 GHz帯レーダの植生の検知性能、霧や砂塵に対する耐環境性能、既存の自動走行用ソフトウェアとレーダを統合した自動走行評価について紹介する。

表1 距離センサ比較
Comparison of distance sensors.

	レーダ (電波式)	ライダー (光学式)	ソナー (音波式)
距離分解能	△	○	△
検知距離	○	○	△
透過性	○	×	×
相対速度検出	○	×	×

○: 適している △: 利用可能 ×: 利用不可能

* 研究開発本部 サステナブルテクノロジー研究所

2. 開発中の77 GHz帯レーダの主要諸元

図2に開発中のレーダの外観を示す。本レーダは、変調方式としてFast-Chirp Modulationを採用し、動作周波数帯は77 GHz帯(77～81 GHz)である。また、最大検知距離はデフォルトで約20 mであるが、使用目的や環境に応じて変更することが可能である。さらに、検知角度は水平方向で $\pm 60^\circ$ 、垂直方向で $\pm 10^\circ$ の範囲をカバーする。測定周期は100 msである。



図2 開発中レーダの外観
Appearance of Radar.

3. 農業環境におけるレーダ評価

3.1 評価環境の選定

農林水産省は輸出重点品目として、りんご、ぶどう、もも、かんきつ、かき、いちごを指定している⁶⁾。これらの中でも、りんごは売上規模および生産量の観点から最も重要な品目である。そのため、今回の評価環境としてりんご園を選定した。

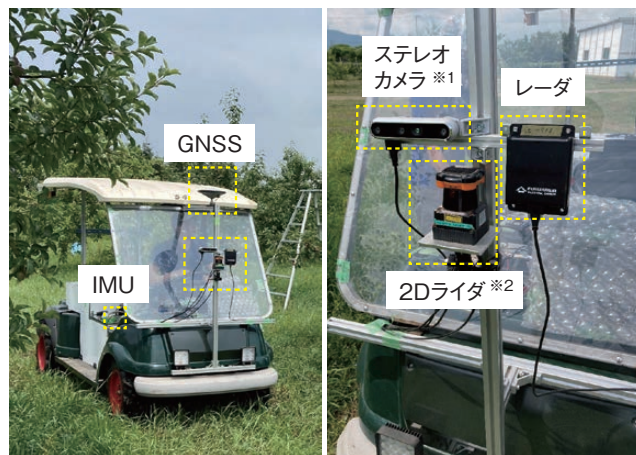
評価施設には、北海道大学の協力のもと北方生物圏フィールド科学センター余市果樹園を利用した(図3)。



図3 評価環境
Experimental environment.

3.2 評価系

図4に評価車両とセンサ、図5に評価システムの構成を示す。北海道大学が所有する評価車両に各種センサを搭載し、果樹園内での走行評価を実施した。本システムでは、GNSS(Septentrio, AsteRx SB3 CLAS)およびIMU(Vectornav, VN-100 IMU/AHRS)を用いて車両情報(位置・姿勢)を取得した。また、レーダに加えて、リファレンス用のセンサとして2Dライダ(Hokuyo, UTM-30LX)およびステレオカメラ(Intel, Realsense d455)を搭載した。なお、ライダは測定範囲0.1～10 mにおいて測距精度 ± 30 mmである⁷⁾。以上の車両情報とセンサ情報をパソコン上のRobot OS⁸⁾で統合している。



※1 Intel, Realsense d455 ※2 Hokuyo, UTM-30LX

図4 評価車両とセンサ
Test vehicle and sensors.

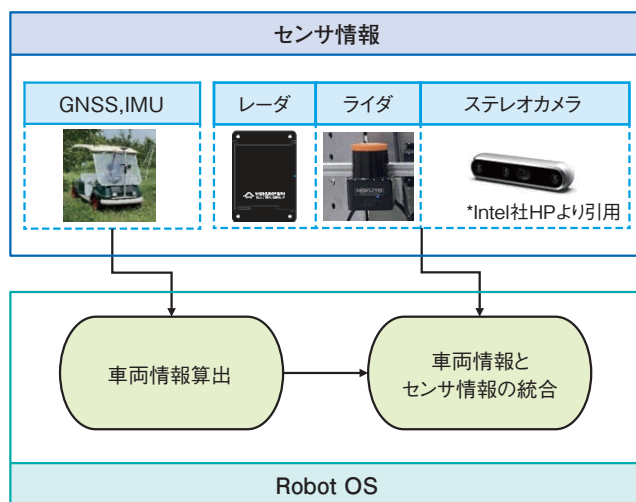


図5 評価システム
Evaluation system.

3.3 測距性能の評価

本実験では、りんご園においてレーダの測距性能を評価した。図6に示すように評価対象は植生、人とし、高精度なライダとの比較検証を行った。

図7にその結果を示す。図7中の黒色の×印の位置(水平方向, 奥行方向)=(0.00 m, 0.00 m)にライダを設置し、黒色の●印の位置(水平方向, 奥行方向)=(-0.15 m, 0.00 m)にレーダを設置している。それらの設置位置から人1～3や植生を検出した点がプロットされている。灰色の×印で示したライダの検出点と、有色の●印で示したレーダの検出点が重なっており、同等の位置に検出されていることが分かる。なお、レーダの検出点の色は反射強度を示す。また、図7中に各評価対象(植生や人)を点線で囲った枠の横にレーダの検出位置の誤差を求めた結果を示している。誤差は、各枠線内におけるレーダとライダの検出位置の平均値の差分とした。その結果、人1～3の検出位置の誤差は0.15 m～0.34 m、植生の検出位置の誤差は0.17 mであった。これらの誤差はレーダが3D検出であるのに対してライダが2D検出であることと、ライダが物体表面のみを検出するのに対し、レーダは物体表面以外の部位も検出することに起因するものと考えられる。



図6 レーダとライダーの測距性能の評価風景
Evaluation scene of distance measurement performance between Radar and LiDAR.

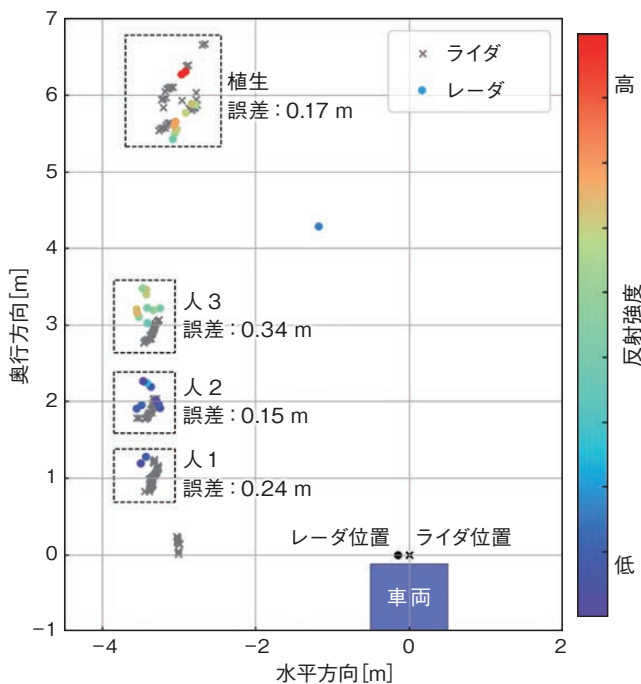


図7 レーダとライダーの測距性能の比較結果
Comparison of ranging performance between Radar and LiDAR.

3.4 3次元検知性能

果樹園では、作業車両の通行に影響を与える枝が地上から高い位置に伸びている場合がある。このような障害物の回避には3次元的な検出能力が要求される。図8は、レーダの点群結果を斜め上方から立体的に見えるように視点を変えた3次元プロットである。図8を見れば分かるように、水平方向と比較して仰俯角方向の空間分解能は劣るものの、車両上部に位置する枝の3次元検知が可能であることが確認された。この結果から、農機の進行経路判定への応用が期待できる。なお、2Dライダーでは設置高さのみでの検知に制限されるため、上方に位置する枝の検知は困難である。

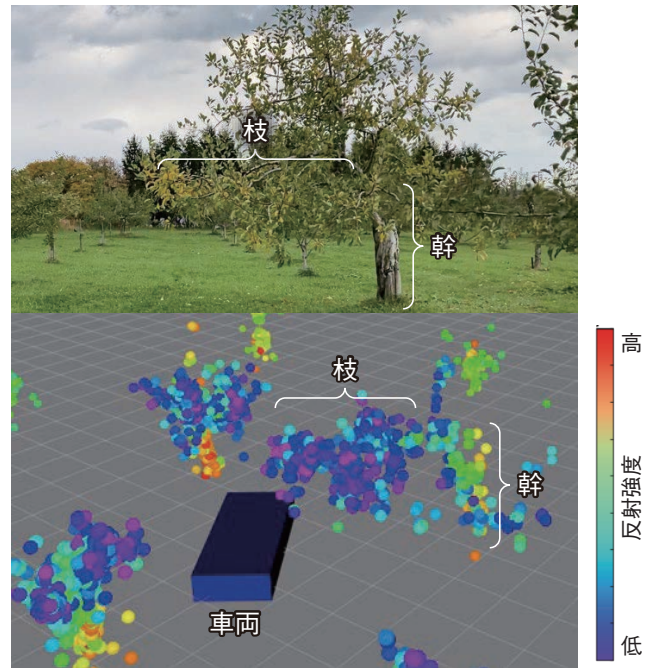


図8 レーダの3次元検知性能
3D Detection Performance of Radar.

4. 霧と砂塵に対するレーダの耐環境性能の評価

本実験では、霧(図9)と砂塵(図10)の奥にいる人をレーダとライダーで検知できるか比較評価を行った。

霧のある環境を模擬するためには、農業用の噴霧器を利用して霧を人工的に発生させた。なお使用した噴霧器(HG-KBS20L)は、最大噴射量3.1 L/min, 最大噴射力0.55 MPaである。レーダの比較用センサには2Dライダーを利用した。なお、両センサを同じ高さに設置した。砂塵環境は、ブロワを用いて砂に風を当てることで再現した。

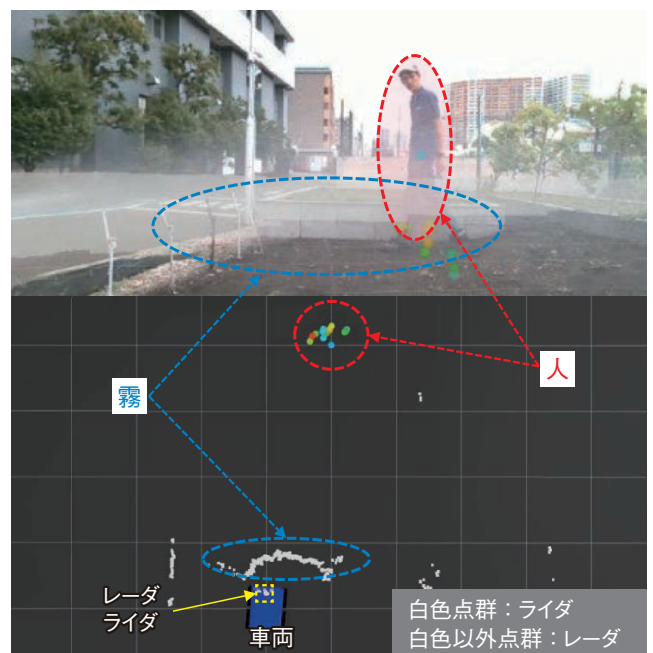


図9 霧環境におけるレーダとライダーの検知性能の比較結果
Comparison of detection performance between Radar and LiDAR in foggy condition.



図10 砂塵環境におけるレーダとライダーの検知性能の比較結果
Comparison of detection performance between Radar and LiDAR in dusty condition.

図9、図10にそれぞれ霧環境と砂塵環境におけるレーダとライダーの検知性能の比較結果を示す。白色の点群がライダー、白色以外の点群がレーダによる検知結果を示している。図9の下図を見ると、車両前方の青い点線で囲んだ霧の部分にはライダーの検知を示す白色の点群が存在するが、赤い点線で囲んだ人の位置には白色の点群が存在しない。ライダーは霧を検出した影響で、霧の奥にいる人を検知できていないことを示している。一方、レーダは霧自体は検知せず、霧の奥にいる人を検知しており一定の透過性を有することが示された。図10でも同様にライダーは砂塵を検知して人を検知できていないが、レーダは砂塵を検知せず人を検知できていることが分かる。これはレーダの波長が霧粒子や砂塵に比べて十分に長いためである。今回は模擬的な評価であったが、実際の霧や砂塵が発生する農作業環境下においてもレーダは良好なセンシングを維持できると考えている。特に、土埃の多い耕作時や収穫時の作業において、当社レーダは安定した検知性能を発揮できると考えられる。

5. 農機の自動走行に向けた取り組み

5.1 レーダSLAMの利点

SLAM技術は、農業分野における自動走行システムの実現に向けた重要な技術である。特にレーダSLAMは、従来のカメラやライダーベースのSLAMが直面していた課題を解決できる可能性がある。先に述べたように、カメラやライダーでは霧や砂塵による検知精度の低下が問題となっていたが、レーダは雨天、夜間、砂塵などの環境下でも安定した性能を発揮できる。この特性によって、レーダSLAMは耐環境性が要求される農業分野における自動走行システムの信頼性向上に貢献すること

が期待される。

今回はSLAMにおけるレーダの有効性を検証するための前段階として、ROSの既存の自動走行用ソフトウェアとレーダを統合した自動走行評価を行った結果について報告する。

5.2 樹木間の自動走行評価

自動走行を実現するためのセンサ構成を図11に示す。本実験の評価システムは、主センサとしてレーダを搭載し、周辺の障害物検知用途で利用した。自動走行制御システムには、車輪の回転数と回転方向から車両の移動量・方向を算出するオドメトリ計測機能、および経路計画と障害物回避機能を提供するROS Navigation Stack⁹⁾を利用した。本評価システムでレーダデータを基に障害物を避けながら目的地まで自動走行できるか評価した。

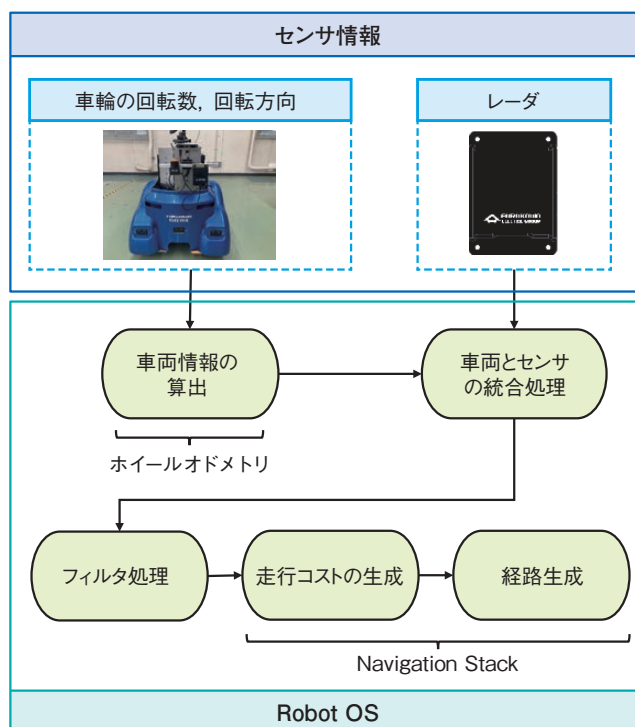


図11 自動走行を実現するためのセンサ構成
Sensor configuration for autonomous driving.

本実験では、図12の左下に示したように車両前方の左右の隅に2台のレーダを搭載して樹木間の自動走行評価を実施した。図12の点群データの色は地表面からの高さを表現している(赤色:高, 青色:低)。スタート地点から約12 mの地点をゴールとし、スタートとゴールの間には障害物となる樹木があるように設定した。ゴールに向かう過程で、レーダで検出した点群データをもとに障害物があると判定した領域を黒色で示している。この黒色の障害物の位置と車両の間を直線的に結んだ灰色の領域を走行可能な領域と判定しており、自動走行の際には灰色の領域を走行する。図12では樹木と樹木の間が狭い場所を車両が走行しており、車両が障害物に接触するリスクがある。このような障害物との接触を回避するために、車両と障害物との間に一定の距離を設定することで障害物に近づきすぎないようにしている。車両と障害物との距離は2段階設定しており、水色の領域は侵入不可エリア、紫色の領域は衝突リスクを減ら

すための安全マージンを示している。これらの領域情報と車両の大きさを考慮して狭い樹木間を走行可能か否か判断する。評価の結果、レーダが周辺の植生を適切に検知し、障害物との衝突を回避しながら目標地点まで自動で到達することに成功した。



図12 レーダを用いた自動走行評価結果
Evaluation results of autonomous driving using Radar.

6. おわりに

本稿では、当社にて開発した77 GHz帯レーダの植生の検知性能、霧や砂塵に対する耐環境性能、既存の自動走行用ソフトウェアとレーダを統合した自動走行評価について紹介した。当社レーダは、従来の2Dライダと同等の位置に検出する性能を有し、なおかつ2Dライダより優れた耐環境性能を有することを示した。さらに、既存の自動走行用ソフトウェアとレーダを統合した自動走行評価により、レーダ情報を基に植生を回避し、目標地点に自動で到達可能であることを示した。今後さらに、レーダSLAMの構成要素の一つである自己位置推定技術を開発することで、GNSS信号が届きにくい環境における運搬作業等の農作業の自動化や効率化への貢献が期待できる。

以上の点から、当社レーダが精密農業や農作業の効率化に寄与する有用なセンサであることを示した。

謝辞

多大なるご指導とご支援を賜りました北海道大学の皆様に深く感謝申し上げます。また、本開発に必要な設備の提供をしてくださった北方生物圏フィールド科学センター余市果樹園の関係者の方々にも厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 農林水産省, “スマート農業の展開について”, 2021年(オンライン), https://www.soumu.go.jp/main_content/000775128.pdf (参照日: 2024年12月11日)
- 2) 眞子凌, 山村隆介, 井上大輔, 山本篤司, 大谷栄介: “ヴィンヤードの農業散布環境を想定した77 GHz帯レーダの開発”, 農業食料工学会第82回年次大会講演要旨集, (2024), 7.
- 3) 青柳靖: “24GHz周辺監視レーダの開発”, 古河電工時報, 137 (2018), 3.
- 4) 青柳靖: “周辺監視レーダMMR2®を用いたアプリケーションの開発”, 古河電工時報, 142 (2023), 31.
- 5) Texas Instruments, “ミリ波センサの基礎”, 2017年(オンライン), <https://www.ti.com/jp/lit/pdf/jajy058> (参照日: 2024年12月16日)
- 6) 農林水産省, “農林水産物・食品の輸出促進について”, 2022年(オンライン), <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/export/meguji.pdf> (参照日: 2024年12月13日)
- 7) HOKUYO社HP, <https://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php?serial=21> (参照日: 2024年12月16日)
- 8) M. Quigley et al.: “ROS: an open-source Robot Operating System”, ICRA Workshop on Open Source Software, 2009.
- 9) ROS Wiki, “ROS Navigation Stack”, <https://wiki.ros.org/ja/navigation> (参照日: 2024年12月13日)