Jxiv
[ジェイカイブ / dʒéikaiv]

Title	Development of a Quadruped Robot System for Load-Carrying Support in Orchard Operations
Author(s)	Ryoma Kataoka, Mitsuki Aratani, Kazutoshi Hamada, and Toru Kurihara
Citation	Journal title (Repository name etc.), Volume, Issue, Pages(Article number) etc. ・ジャーナル名（刊行物・サイト名）・巻号・ページ（その他論文番号等）: Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.38, No.2, pp.543--552, 2026 ・DOI (URL) https://doi.org/10.20965/jrm.2026.p0543 Publication Date: yyyy/mm/dd ・出版日：2026 年 4 月 20 日 Publisher ・出版者：Fuji Technology Press Ltd
Declaration	This preprint is the Translated Manuscript of the above. ・本プレプリントは、上記論文の 翻訳版(Translated Manuscript) である。 All necessary permissions from the publisher have been obtained ・ジャーナル（出版者）から必要な許諾を 得ている
Notes	著者本人による翻訳

https://doi.org/10.20965/jrm.2026.p0543
翻訳版

Development Report:

果樹園作業向け四足歩行ロボットの運搬支援システムの開発

Ryoma Kataoka*, Mitsuki Aratani*, Kazutoshi Hamada, and Toru Kurihara***

*Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi Tosayamada-cho Kami City, Kochi
E-mail: {295130y@gs., 295124h@gs., kurihara.toru@}kochi-tech.ac.jp
**Kochi University
200 Monobe, Nankoku City, Kochi
E-mail: hamadaka@kochi-u.ac.jp
[Received September 21, 2025; accepted February 18, 2026]

果樹栽培において，収穫作業や摘果作業では頻繁な果実の運搬を伴うため，作業者に大きな負担がかかる．特に中山間地域では，急傾斜地や不整地での作業となるため，運搬作業の負担がさらに増大する．大型車両の使用は，土壌の圧密や樹木根系への損傷を引き起こすリスクがある一方で，手作業による運搬は多大な労力を要する．本研究では，不整地でも安定した歩行が可能な四足歩行ロボットを用いた運搬支援システムを開発した．本システムは，着脱式の収穫カゴ，電動式の廃棄用果実カゴ，および音声コマンドによる命令機能を備えており，作業効率を向上させるとともに，厳しい地形条件における持続可能な果樹栽培管理を可能にする．

Keywords: Quadruped robot, Harvesting system, Thinning system, Transport support, Fruit harvesting

1．はじめに

近年，農業分野においては，農業従事者の高齢化および後継者不足といった課題が深刻化している．果樹栽培においても同様の問題が顕在化している，特に収穫前に実施される摘果作業は，果実の品質や翌年の収穫量に直接的な影響を及ぼす重要な工程である．しかし，これらの作業は依然として手作業に大きく依存しており，労働負担の増大を招いている．

従来の果実運搬手法としては，手持ちのカゴや運搬車両の使用が一般的である．しかし，手作業による運搬は作業者に大きな身体的負担を強いるうえ，非効率であるという問題がある．一方で，運搬車両は一度に大量の果実を運搬できる利点を有するものの，園地内を繰り返し走行することによる土壌の圧密や傾斜地での不安定な走行に伴う果実の損傷といったリスクが懸念されている．

農業分野におけるロボット技術の応用に関しては，車輪型やクローラー型のロボットを用いた果樹園内の運搬支援やモニタリングに関する研究が報告されている [1–5]．これらには，LiDAR による樹幹認識を用いた自動草刈りシステム [8] や，3D LiDAR による未舗装路の認識 [10]，および UAV を用いた SLAM による果樹園全体の高精細な 3D マップ構築 [9] などが含まれる．さらに，運搬作業の効率化を目的として，RGB-D カメラにより自律的な積み込みを行うフォークリフトの研究も進められている [7]．しかし，これらのシステムの多くは平坦な地形や屋内環境での運用を前提としており，傾斜地や不整地が広がる山間部の果樹園などでの適用は限定的である．この問題に対し，電動シリンダを用いた荷台制御機構により安定走行を実現する急傾斜地向けの走行ユニットが開発され，収穫運搬作業への適応性が提案されている [6]．

四足歩行ロボットは，不整地や傾斜地でも安定した歩行が可能であり，園地の地面を損傷するリスクの低減も可能である．さらに，果実の運搬を自動化することにより，運搬中に作業者が収穫や摘果作業を継続できるため，全体の作業効率の向上が可能となる．

我々はこれまでに，四足歩行ロボットを用いた収穫および摘果作業向けの運搬支援システム，ならび園地のデータ収集システムを開発してきた．初期の研究では，ビブスを着用した作業者を追従することで，園地の環境地図を構築し，得られた地図から導出された最短経路に従って収穫した果実を一時保管場所へ自動運搬する手法を検討した [11]．当初，このシステムはノート PC と Raspberry Pi 5 で構成されていたが，システムの小型化および可搬重量の増加を目的として，のちに Jetson Orin Nano と Tier IV C1-120 を用いた構成へと刷新した．この再設計により，システムの小型化だけでなく，屋外の園地で頻繁に発生する逆光条件下における追従のロバスト性向上も実現した [12]．さらに，果樹栽培において，特に労働集約的な工程である摘果作業に着目し，姿勢制御機能を備えた電動開閉カゴを用いることで，単独の作業者による摘果果実の自動廃棄を可能とする支援システムを開発した [13]．加えて，データ駆動型の栽培管理を支援するため，LiDAR を用いて園地環境の 3 次元点群データを収集するシステムも構築した [14]．本研究は，これら一連の先行研究を基盤として，運搬，センシング，およびヒューマン・ロボット・インタラクションを統合した四足歩行ロボットシステムを構築し，実際の園地環境における実用性を評価するものである．

本研究では，収穫果実と摘果果実の両方の自律運搬を可能とする，ユズ（*Citrus junos*）果樹園向けの運搬支援システムの開発を目的とする．本稿では，システムの構成，実装，および実環境における検証結果について報告する．

2．ハードウェア構成

提案システムの外観を **Fig. 1** に，ハードウェア構成を **Fig. 2** に示す．本システムは Boston Dynamics 社製の四

R. Kataoka, M. Aratani, K. Hamada, and T. Kurihara, “Development of a Quadruped Robot System for Load-Carrying Support in Orchard Operations,” J. Robot. Mechatron., Vol.38 No.2, pp. 543-552, 2026.

足歩行ロボット Spot をベースに構築されており，運搬作業を支援するための様々な機器が搭載されている．主な処理のための計算機として自律移動や作業者追従のためのコマンド処理を行う Jetson Orin Nano が搭載されている．さらに，環境地図の作成を支援するため，背面には LiDAR を搭載した EAP2 オプションを設置し，前面には作業者の追従を行うための Tier IV カメラを取り付けた．各構成要素の詳細について以下で述べる．

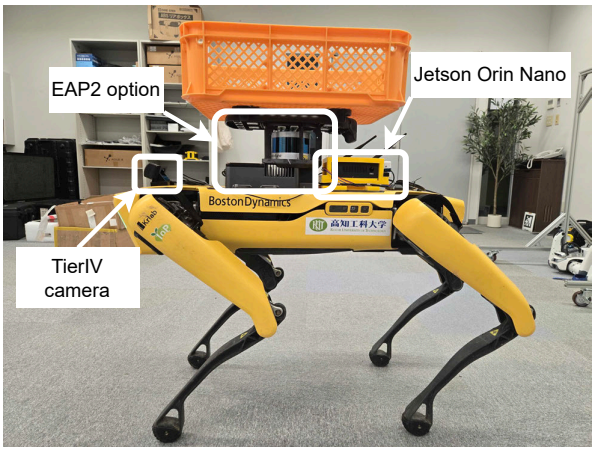


Fig. 1. Photo of the proposed system.

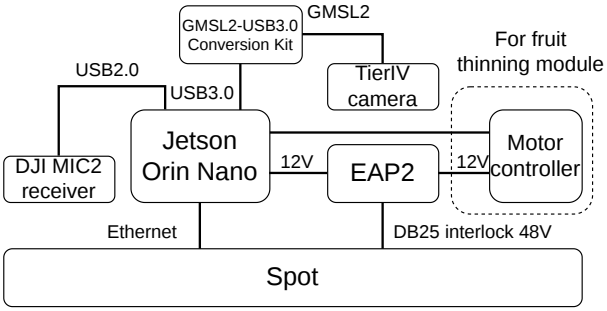


Fig. 2. Hardware configuration.

2.1. 四足歩行ロボット基盤

本システムの基盤として四足歩行ロボット Spot を採用した．Spot の主な仕様を **Table 1** に示す．Spot は不整地や傾斜地においても安定した歩行が可能であり，園地での運搬作業に適した機動性を備えている．また，機体背面には EAP2 オプションが搭載されており，EAP2 オプションには LiDAR(VLP-16, Velodyne) および Jetson Xavier NX が内蔵され，環境地図の生成や自律移動支援の支援を担う．本研究では，この基盤に様々なセンサや運搬機能を追加することで，園地での運搬支援システムを構築した．

2.2. センシングデバイス

2.2.1. Tier IV Camera

Spot には前面，背面および左右にカメラが搭載されているが，これらは足場や周辺の障害物の確認を目的として斜め下方向を向くように設計されているため離れた位置にいる作業者を十分にとらえることが困難である．さらに，本システムは屋外環境での運用を想定しているが，屋外での実験時に逆光条件下において画像にゴーストが発生し，作業者追従の精度が低下するという課題があった．さらに，作業者が横方向に移動した際にも追跡を維持するには広い視野角を持つカメラが不可欠である．そこで本研究では，車載カメラとしても採用実績のある Tier IV 社製の Tier IV C1-120 を採用した [12]．カメラは GMSL2-USB3.0 コンバータを介して Jetson Orin Nano に接続され，取得した画像は Jetson Orin Nano 上で処理される．**Fig. 3** に Tier IV C1-120 の外観を示す．また，内部パラメータは MATLAB の Computer Vision Toolbox を用いて算出した，物体検出モデルの入力サイズと一致させるため，元の画像（1920×1280 pixels）を上下からそれぞれ 100 pixels ずつクロップして 1920×1080 pixels にし，さらに 640×360 にリサイズした画像を使用した．得られた内部パラメータの結果を **Table 2** に示す．

また，カメラの設置角度に関する検討も行った．最終的に，カメラを約 24° 上向きに傾けて設置し，近距離に位置する作業者のビブス全体を画角内で確実にとらえることを可能にした．

Table 1. Specification of Spot [a].

Dimensions	W 500 × L 1100 × H 700 mm
Weight (with Battery)	33.8 kg
Max speed	1.6 m/s
Max payload	14 kg
Max slope	± 30°

Table 2. Intrinsic parameters of Tier IV C1-120.

Parameter	Symbol	Value
Focal length (pixel)	f_x, f_y	288.4604, 308.8058
Principal point (pixel)	c_x, c_y	332.5138, 183.3100
Radial distortion	k_1, k_2	-0.1391, 0.0246
Reprojection error	-	0.1058

Fig. 3. Tier IV C1-120.

2.2.2. DJI MIC2

本システムでは，音声命令による Spot へのコマンド送信を実現するために DJI 社の DJI MIC2 を採用した．Bluetooth 接続を用いた場合，他機器からの電波干渉により音声コマンドが正しく認識されない問題が生じた．そ

のため，レシーバを Jetson Orin Nano に USB 接続し，マイクから専用のワイヤレス通信で音声コマンドを送信する構成とした．本機器の仕様上の最大通信距離は 250 m であるものの，屋外環境において音声認識が正常に機能する有効通信距離は約 75 m であった．しかし，想定される園地の規模や作業範囲を考慮すると，この通信距離は実運用において十分であると判断した．

2.3. Jetson Orin Nano

Spot に内蔵されたコンピューターに加えて，上位レベルの処理を担う外部のコンピュータとして Jetson Orin Nano を搭載した [12]．Spot に内蔵されているオンボードコンピュータが移動や安定性を管理する一方で，Jetson は自律移動の命令発行，作業者追従のためのカメラ画像の処理，および作業者からの命令を処理するための音声認識の実行を担当する．さらに，収穫支援に必要な様々なセンサからのデータを統合する役割も果たす．このような構成により，Jetson は作業者の入力とロボットの自律動作を橋渡しする中心的なノードとして機能する．

Table 3 に本システムに採用した Jetson Orin Nano Development Kit の仕様を示す．実運用において，Spot の歩行時に発生する振動に起因する，Jetson Orin Nano に接続されたケーブルの瞬断が確認された．この課題を軽減するために，システムに防振機構を導入した．具体的には，**Fig. 4** に示すように，Spot の背面に取り付けたベースと Jetson Orin Nano の設置板の間に防振用のゴム球を配置し，振動を吸収する機構とした．さらに，**Fig. 5** に示すように，ケーブルクランプやクリップを用いてケーブルを固定した．これらの対策により，接続部分への振動伝達を最小限に抑え，ケーブルの瞬断を防止した．

Table 3. Specification of Jetson Orin Nano [c].

Component	Specification
CPU	6 Core Arm®Cortex®-A78AE v8.2 64 bit CPU 1.5MB L2 + 4MB L3
GPU	1024-core NVIDIA Ampere architecture GPU with 32 tensor cores
Memory	8GB 128 bit LPDDR5 102 GB/s
Storage	1TB
Size	W 95 × L 120 × H 50 mm
Weight	410g

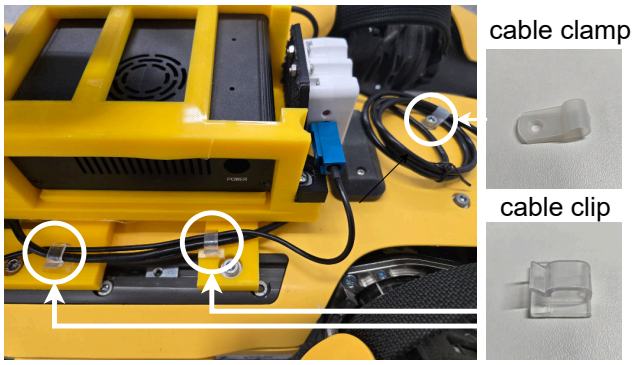


Fig. 5. Cable fixing with clamps and clips.

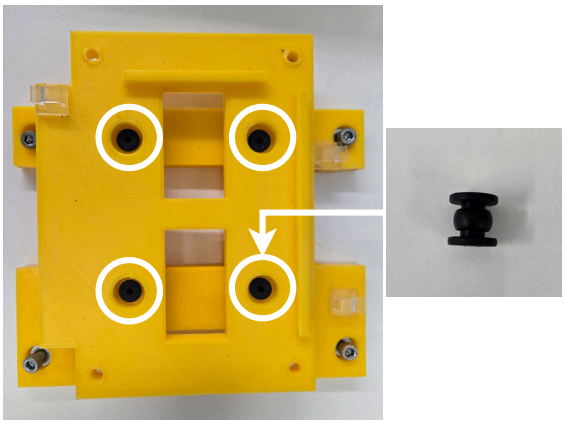


Fig. 4. Anti-vibration mounting structure for Jetson Orin Nano.

2.4. 運搬機構

2.4.1. 収穫カゴ向けの着脱機構

EAP2 オプションの上部には，収穫カゴのワンタッチ交換を可能にする着脱式アタッチメントを設置した．着脱機構には，安定した固定と容易な取り外しを両立するため，条件を満たし，かつ低コストな市販の自転車専用カゴの着脱メカニズムを採用した．Spot の可搬重量の制約により，実際の農業現場で一般的に用いられる 20 kg 容量のカゴの搭載が困難であるため，本システムでは，高さを半分に抑えたハーフサイズのカゴを採用した．図 **Fig. 6** にカゴのベースと設置の様子を示す．本機構の導入により，運搬先でのカゴの交換を迅速に行うことが可能となり，収穫作業の連続性および作業効率が向上した．

(a) Harvest basket base.

(b) Harvest basket installed in EAP2.

Fig. 6. Harvest basket.

2.4.2. 電動開閉カゴを用いた摘果果実の廃棄機構

摘果作業において生じる廃棄果実の処分には，先行研究で開発した自動開閉機構を備えた電動開閉カゴを採用した [13]．摘果果実は商品価値を持たないため，本機構の設計においては果実の丁寧な取り扱いよりも軽量化や機構の簡素化，確実な果実の排出を優先した．

Spot の最大可搬重量は約 14 kg であるが，約 4 kg は EAP2 オプションや搭載されているセンサなどによって占められる．したがって，摘果果実の運搬に利用可能な残余容量を最大化するためには，カゴ本体および駆動機構の質量を最小限に抑えることが不可欠となる．この要件を満たすために，カゴのフレームにはアルミニウム製のハニカム構造を採用し，実環境下で要求される機械的強度を維持しつつ，高い比剛性を実現する設計とした．その結果，開発したカゴの総質量は 4.2 kg に抑えられ，限られた容量の効率的な活用が可能となった．

開閉機構は小型の電動モーターによって駆動され，蓋の開閉制御は Spot に搭載された Jetson Orin Nano からの GPIO 信号を介して行われる．作業者から果実の廃棄の音声コマンドが入力されると，ロボットは事前に設定された廃棄場所に自律的に移動し，姿勢を傾けカゴの蓋を開放して内容物を排出し，元の作業位置へと戻る．このような摘果作業と廃棄作業の並行化により，単独の作業者が作業を中断することなく継続できるため，身体的負担の軽減および全体的な作業効率の向上が可能となる（**Fig. 7**）．

Fig. 7. Operation of fruit discarding.

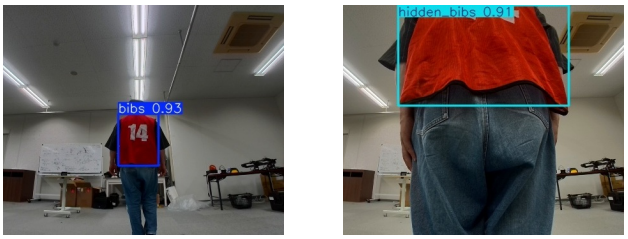
3．システム機能

3.1．作業者追従機能

本システムでは，園地に複数の作業者が混在する状況を想定している．追従する対象となる作業者は識別用のビブスを着用しており，システムはカメラ画角からビブスを検出することで作業者までの距離を推定する [11,12]．この推定情報に基づき，Spot へ自律移動コマンドが発行される．ビブスの検出には，Ultralytics 社が提供する物体検出モデルである YOLOv8n を採用した [e]．なお，今後の展望として，ビブスの背番号を認識することにより対象作業者を個別に識別し，追跡対象を柔軟に切り替える機能の実装を計画している．

3.1.1. YOLO を用いたビブス検出モデル

YOLO を用いたビブス検出モデルの学習と検証には，高知工科大学のキャンパスで撮影した 3099 枚の画像を使用した．アノテーションの際には，風などによる変形箇所は除外し，肩から裾までの変形していないビブス領域のみをラベルを付与した．また，ビブスの一部が画像のフレーム外にはみ出している場合には，誤検出を防ぐために通常の”bib” ラベルとは別の”hidden bib” としてアノテーションを行った．実際の運用時には，”bib” ラベルのみが処理される．全データセットのうち 2479 枚の画像を学習に使用し，620 枚を検証に使用した．学習，検証に用いた画像はすべて画像は 640×360pixels にリサイズし，バッチサイズ 16，1000 エポックで学習を行った．実証実験における推論時の検出フレームレートは 3.8 FPS であった．ビブスの検出例を **Fig. 8** に示す．



(a) Normal bib detection.　　(b) Cropped case.

Fig. 8. Bibs detection.

3.1.2. ビブスを用いた距離推定と追跡制御

カメラから作業者までの距離は標準的なピンホールカメラモデルを用いて推定した．作業者への相対位置は，**Section 2.2.1** でキャリブレーションしたカメラの内部パラメータを用い，画像座標系上で算出された．

ここで，実空間におけるビブスの実際の縦幅を H_{bib} [mm]，画像上で検出されたビブスの領域の縦幅を h_{bib} [pixels] したときカメラから作業者までの光軸方向の距離 Z [mm] は，Eq 1 を用いて算出される．

$$Z = f_y \frac{H_{bib}}{h_{bib}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

ここで，f_y はキャリブレーションによって得られたカメラの焦点距離を表す．さらに，画像座標系におけるビブスの中心座標 u と主点 c_x との偏差 $\Delta u = u - c_x$ を用いることで，水平方向の距離 X [mm] は式 2 によって与えられる．

$$X = \frac{Z \cdot \Delta u}{f_x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

距離算出の幾何学的な概略図を **Fig. 9** に示す．また，Spot の移動ロジックは，得られた推定値に基づき以下のように制御を行った：

- バウンディングボックスの中心が画像の左右両端から 90 pixel 以内に位置する場合，対象を画角範囲から見失うことを防ぐために，Spot は前進を行わず，その場で回転する．このときの回転角度は対象が画像中心に来るように $\tan^{-1}(X/Z)$ で算出される．

- バウンディングボックスの中心が画角の中心付近に位置し，かつ推定距離 Z が 1.5 m - 10 m の範囲内にある場合，Spot は対象に向かって回転して向きを合わせ，その後前進することで作業者に接近する．
- 推定距離 Z が 1.5 m 未満の場合，安全確保のために Spot は前進を停止する．ただし，作業者を画角内にとらえ続けるためにその場での回転動作は継続して行う．
- 推定距離 Z が 10 m を超える場合，回転および前進を含むすべての移動動作を停止する．

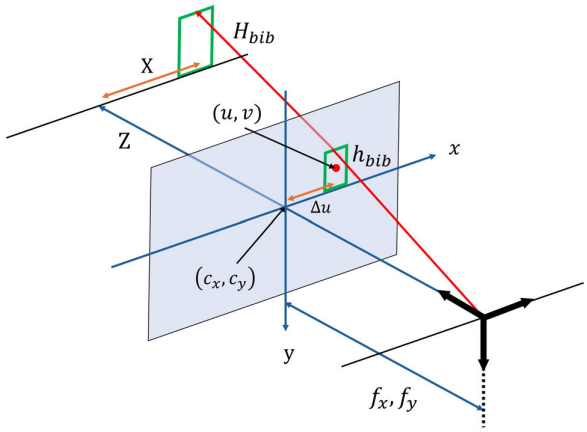


Fig. 9. Geometry of distance estimation using a pinhole camera model.

3.1.3. 環境地図に基づく自律移動

Spot は環境地図を保持し，一度歩行した経路を再現する機能を有する [11]．環境地図は，EAP2 オプションに搭載された LiDAR を用いて作成され，歩行中に自動的に生成される waypoint とそれらを接続する edge で構成される．この wayponint-edge グラフは JSON 形式で保存され，各 waypoint と edge には **Table 4** および **Table 5** に示す属性をもつ．なお，waypoint は機体座標系の原点，すなわちロボット本体の中心位置に生成される．Spot は基本的にオドメトリ情報を用いて自己位置を推定する．しかし，マップの範囲外へ移動した場合や自己位置を見失った場合，あるいは本体の再起動後などにおいては再位置推定が必要となる．この際，環境内に **Fig. 10** に示すような fiducial が設置されている場合，Spot は搭載された前後左右のカメラのいずれかでマーカーを認識し，画像上での見かけの大きさに基づいて自己位置を再推定することが可能である．生成された環境地図の例を **Fig. 11** に示す．環境地図は，前述のビブス追跡や Spot 標準のタブレットアプリケーションに備わる Autowalk 機能のいずれかを使用して作成する．実際の収穫や摘果の作業においては，運搬用のトラックや廃棄エリアなどの特定地点をあらかじめ登録しておくことが必要である．環境地図作成後，該当する地点で登録コマンドを発行することで新たな waypoint が追加され，以降はコマンドの指示によって Spot が目標地点まで自律的に移動することが可能となる．環境地図に沿って移動する際，隣接する 2 つの waypoint w_i と w_j を接続する edge の移動コストは，各座標 (x_i, y_i, z_i) および (x_j, y_j, z_j) に基づくユークリッド距離として，式 3 用いて算出される．

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

算出された移動コストに戻づき，ダイクストラ法を適用して現在位置から目的の waypoint までの最短経路を探索することで，Spot が最短経路に沿って自律的に移動することが可能となる．

Table 4. Attributes of a waypoint.

attribute	description
id	ID to uniquely identify each waypoint
snapshot_id	snapshot ID which contains sensor data
waypoint_tform_ko	waypoint creation location's Spot position and rotation
icp_variance	ICP accuracy information

Table 5. Attributes of an edge.

attribute	description
from_waypoint	waypoint ID of start point
to_waypoint	waypoint ID of end point
snapshot_id	snapshot ID which contains sensor data
from_tform_to	relative position and rotation information from start to end waypoint
cost	movement cost

Fig. 10. Fiducial.

Fig. 11. Environmental map created by Spot and visualized using rerun [f] together with the corresponding satellite imagery from Google Maps (Imagery ©2026 Airbus; Map data ©2026 Google). The green lines in the environmental map indicate the robot's walking route.

3.2. 音声を用いた命令機能

実際の園地環境においては，作業者の両手は作業でふさがっていることが多いため物理ボタンや手動による操作は，実用的ではない．この課題に対処するため，本研究では Vosk Toolkit [g] を用いた音声コマンドシステムを採用した．入力された音声データは，タイムスタンプとともにキューを用いて管理される．また，作業者同士の会話等に起因するご認識を防止するため，コマンドの発話の直前に「Spot」というウェイクワードを使用する仕組みとした．さらに，処理遅延を削減するため，ウェイクワードの音声解析時間を 0.5 秒以内に制限し，これを超える長い発話は処理をスキップする仕組みを導入した．これらの工夫により，音声入力の完了からコマンド実行までの遅延を最大 0.53 秒に抑えることができ，実運用に耐えうるリアルタイムな応答性が実現された．音声認識システム全体の処理図を **Fig. 12** に示す．

Table 6. Voice commands implemented in the system and the corresponding actions executed by the quadruped robot.

Command	Description
Spot, follow me	Start following the worker.
Spot, stop	Stop following the worker.
Spot, save location	Register the current location as a truck waypoint.
Spot, truck	Navigate to the truck waypoint.
Spot, come back	Return to the previous working position.

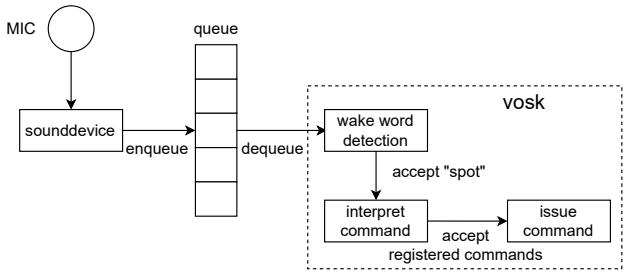


Fig. 12. Flow of the voice command recognition process.

3.3. ウェブサービスを用いた統合監視システム

本システムでは，プログラムの実行中に操作用 PC から Jetson Orin Nano へリモート接続し，コンソール出力を通じて動作状況を確認することが可能である．しかし，プログラムの進行状況やロボットの状態など複数の情報を同時に把握する上で，コンソール出力のみでは視認性や一覧性に課題が残る．そこで，本研究では Flask [h] を用いた Web ベースのモニタリングダッシュボードを構築し，システムの稼働状態を統合的に監視可能なインターフェースを実装した．本インターフェースにより，Web ブラウザ上で以下の情報を同時に確認することが可能である．

- ステータス表示によるロボットの状態の把握
- ログエリアによる受理した音声コマンドや誤認識の記録
- 追従動作中の Tier IV カメラで撮影された画像とその推論結果

これにより，従来のコンソール出力と比較してロボットの挙動や処理状況をリアルタイムで把握しやすくなり，視認性や操作性が大幅に向上した．**Fig. 13** にモニタリングダッシュボードの全体設計を示す．

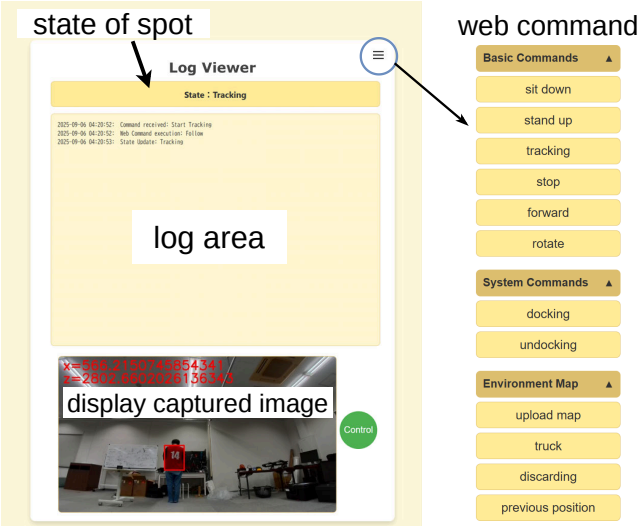


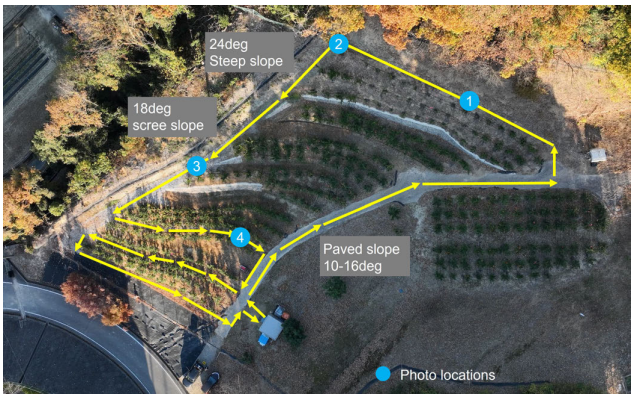
Fig. 13. Monitoring dashboard.

4. 実験

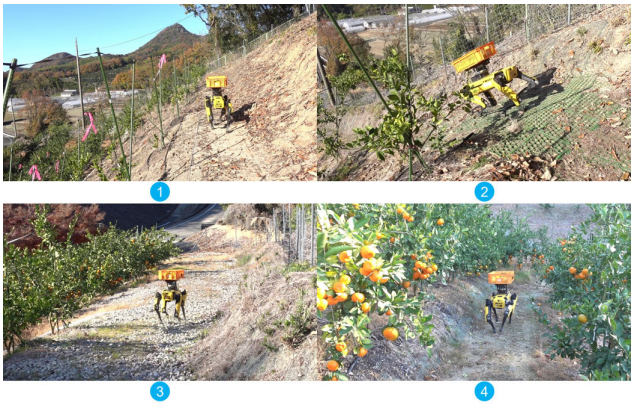
4.1. 不整地での歩行性能の実証

四足歩行ロボットが斜面や不整地でも安定して動作できることを確認するために，愛媛県農林水産研究所が運営する急傾斜モデル園地での実証実験を行った．園地には，傾斜 24° の急傾斜，傾斜 18° のガレ場，傾斜 10° - 16° の舗装された斜面，そして樹間の水平な歩道が存在する．**Fig. 14(a)** に実験に用いたモデル園地の写真を示す．

実験には Spot の Autowalk 機能を用い，約 7.5 kg の果実を搭載した状態で行った．Spot は全長約 256 m のルートを繰り返し走行し，約 5 分でコースを歩いた．この間，



(a) Experimental route in an orchard in Ehime Prefecture. The yellow line denotes the travel path and blue points (1-4) correspond to the observation points shown in (b).



(b) Photographs of the field trial site: Location 1 (orchard path), Location 2 (steep slope with a 24° incline), Location 3 (scree slope with an 18° incline), and Location 4 (roads between trees).

Fig. 14. Field experiments conducted in a public steep-slope model orchard environment.

転倒や外部からの介入は一切なく，急傾斜で不整地な園地の地形において安定した歩行性能を発揮することができた（**Fig. 14(b)**）.

4.2. 運搬方法別の振動比較

提案システムによる安定した運搬性能，および収穫された果実へのダメージを評価するために，従来のエンジン駆動のクローラー型運搬車（KCG J850A, KIORITZ），手動運搬，一輪車と比較した 4 つの運搬条件を比較した．

収穫カゴの内部に USB 加速度ロガー（DT-178A, CEM）を設置し，3 軸の加速度を 10 Hz で記録した．実験結果を **Fig. 15** に示す．

手動運搬は不整地からの機械的な衝撃を人間の身体が効果的に吸収するため，中央値の加速度は 1.1 g と最も低かった．一方，クローラー型運搬車は，地面からの振動が剛体構造を通じて直接伝わるため，中央値の加速度は 2.5 g を超え，大きな変動を示した．

Spot と一輪車はともに中央値の加速度レベルを約 1.5 g に維持した．特に Spot は従来のクローラー型運搬車と比較して振動の大幅な減少を示した．振動特性は地面の状態によって異なる可能性があるが，これらの結果は提案された四足歩行ロボットシステムが従来のエンジン駆動のクローラー型運搬車と比較して優れた果実保護性能を提供し，園地での運搬中の打撃や表面損傷のリスクを減少させることを示している．

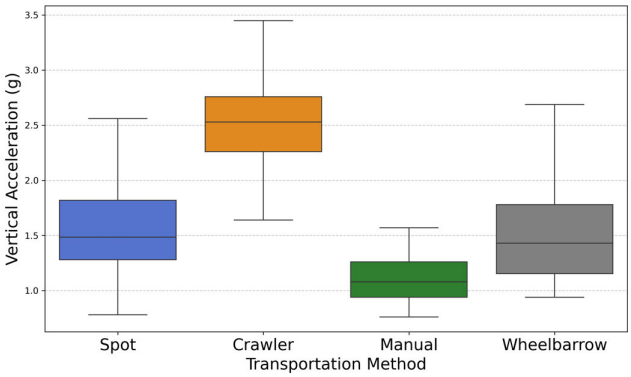


Fig. 15. A comparison of each load's vibration.

4.3. 積載量別のバッテリー消費比較に関する実験

Spot の運用持続時間と電力安定性を評価するために，積載重量がバッテリー消費に与える影響を調査した．実験は高知工科大学の平坦なキャンパスグリーンで行った．実験では，(i) カゴに荷物を積載しない条件と，(ii) 最大積載条件に相当する 10.8 kg の荷物を積載した条件の 2 つを比較した．

満充電の状態（100 %）から開始し，ロボットは平坦な地面を一定速度 1.2 m/s で連続して歩行させ，バッテリー切れにより Spot が自動的に停止するまで運転した．バッテリー残量と電圧は Jetson Orin Nano を用いてリアルタイムで記録した．実験結果を **Fig. 16** に示す．

積載がない場合は約 62 分間の連続運転が可能であったのに対し，最大積載条件では約 52 分間の運転時間となった．これらの結果は，積載重量が連続運転時間を約 10 分減少させることを示しており，園地において実用的であることを示す．

4.4. 実証実験における機能の評価

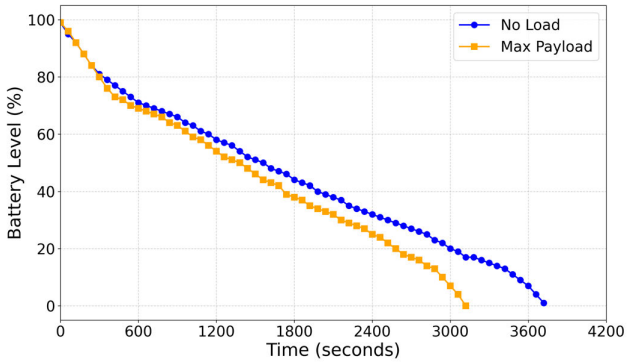
4.4.1. 作業者追従機能

実証実験を通じて，Spot は作業者を自律的に追従することができ，手動での再配置を必要とせずに連続的な収穫を可能にした．これにより，手動で操作する運搬車と比較して中断が減少し，よりスムーズな作業の実現ができた

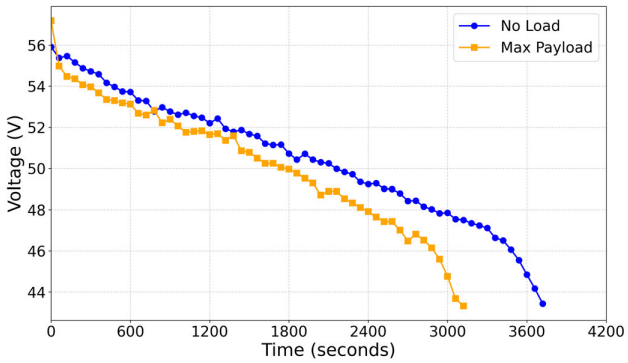
しかし，実証実験を通して追従の不安定な場面が時折見られた．具体的には，ビブスが木の幹や密集した葉に遮られたり，作業者が列の間で急な方向転換をしたりすると，ロボットが一時的に作業者を見失うことがあった．作業者が Spot の視野に再び入ると通常は追従が再度確立されるが，現在の認識戦略が視覚的な遮蔽に対して敏感であることが明らかになった．したがって，環境地図を組み込んだより堅牢な追従と回復の方法の開発が今後の課題である．

4.4.2. 音声を用いた命令機能

音声コマンドのインターフェースの実装により，作業者の両手がふさがっている場合でもロボットをハンズフ



(a) Comparison of battery charge levels over time.



(b) Comparison of battery voltage levels over time.

Fig. 16. Comparison of battery consumption by loads.

リーで操作できるようになり，全体的な操作性が大幅に向上した．開始や停止などの基本的なコマンドは実環境で正常に認識された．対象までの視界が確保されている場合，音声認識は最大 75 m の距離で可能であった．平均的なコマンド実行の遅延は，発話の開始から 0.53 秒であり，実操作に対する実用的な応答性を示している．しかし，実証実験では，作業者同士の継続的な会話がウェイクワードの検出を妨害したり，処理遅延の増加につながったりすることも明らかになった．したがって，より堅牢な音声認識方法の実装が今後の課題である．

4.4.3. 収穫カゴ向けの着脱機構

着脱可能な機構は，自転車のアタッチメント構造を応用しており，運搬車に到着した際に収穫カゴを直接交換できるようになっている．これにより，収穫された果実を別の容器に手動で移す必要がなくなった．

着脱のプロセスには平均約 15 秒かかり，専門的な工具なしで行うことができた．この機構は実証実験での繰り返しの交換中に信頼性を発揮し，園地の運搬作業に対する実用的な適合性を示した．しかし，バスケットの取り付けインターフェースの物理的な設計に実用的な制限があることが明らかになった．バスケットの底部への取り付け部分は約 3cm の厚さであり，収穫された果実で満たされたバスケットが積み重ねられると，この突起部分が下部のカゴに入っている果実へ損傷を与えるリスクがある．したがって，果実の損傷を防止するため，カゴとの連結部をより薄型化した着脱機構の開発が今後の課題である．

5．結論と今後の展望

本研究では，収穫や摘果作業の負担を軽減するための四足歩行ロボットを用いた果実運搬支援システムを開発した．このシステムは，斜面や不整地で安定して動作でき，収穫された果実や摘果された果実の効率的な運搬と処分を可能にし，地面へのダメージを防止する．さらに，着脱可能な収穫カゴ，電動開閉カゴ，音声コマンドインターフェースなど，現場での使用に適した実用的な設計機能を導入している．今後の課題として，実証実験を通じて，作業者の負担軽減や作業時間短縮の効果を定量的に評価する予定である．また，作業者の追跡や自律探索機能を強化して，さまざまなシナリオでの操作性を向上させることを目指す．さらに，システムを他の果樹種に応用し，データ収集プラットフォームと統合して，持続可能な果実生産に貢献する省力化支援システムの開発を目指す．

Acknowledgments

本研究は、内閣府地方大学・地域産業創生交付金「IoP（Internet of Plants）が導く、「Society 5.0 型農業」への進化」の助成を受けたものです。

References:

[1] Yunxiang, Y. et al. ”Bin-Dog: A Robotic Platform for Bin Management in Orchards” Robotics 2017, 6(2), 12, https://doi.org/10.3390/robotics6020012

[2] Wenju, M. et al. ”Development of a Combined Orchard Harvesting Robot Navigation System” Remote Sens. 14(3), 675, 2022, https://doi.org/10.3390/rs14030675

[3] Mortazavi, M., Cappelleri, D. J., and Ehsani, R. ”RoMu4o: A Robotic Manipulation Unit For Orchard Operations Automating Proximal Hyperspectral Leaf Sensing” arXiv:2501.10621 [cs.RO], 2025, https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.10621

[4] Zheng, Z. et al. ”Advancement in artificial intelligence for on-farm fruit sorting and transportation” Frontiers in Plant Science, 14, 1082860, 2023, https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1082860

[5] Gerdan Koc, Dilara and Vatandas, Mustafa, ”Development and Performance Analysis of an Autonomous Agricultural Vehicle for Fruit Transportation”, Journal of Field Robotics, 2025, https://doi.org/10.1002/rob.22573

[6] Sashihara, Y et al. ”Development of a Traveling Unit for Steep Slopes and Its Adaptability to Harvesting and Transporting Operations” Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers, 86(4), pp. 231-239, 2024,

[7] Iinuma, R. et al. ”Robotic Forklift for Stacking Multiple Pallets with RGB-D Cameras”, J. Robot. Mechatron., Vol.33 No.6 pp. 1265-1273, 2021, https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot003300061265/

[8] Kurita H. et al. ”Localization Method Using Camera and LiDAR and its Application to Autonomous Mowing Orchards”, J. Robot. Mechatron., Vol.34 No.4 pp. 877-886, 2022, https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot003400040877/

[9] Nishiwaki S. et al. ”Proposal of UAV-SLAM-Based 3D Point Cloud Map Generation Method for Orchard Measurements”, J. Robot. Mechatron., Vol.36 No.5 pp. 1001-1009, 2024, https://doi.org/10.20965/jrm.2024.p1001

[10] Kurashiki K, Kono K, and Fukao T, ”LiDAR Based Road Detection and Control for Agricultural Vehicles”, J. Robot. Mechatron., Vol.36 No.6 pp. 1516-1526, 2024, https://doi.org/10.20965/jrm.2024.p1516

[11] Kataoka, R. et al. ”Investigation of a Yuzu Harvesting Support System Using Human Tracking and Environmental Map by Spot” The Society of Instrument and Control Engineers SHIKOKU Chapter, FS2-17, pp.124-127, 2024

[12] Kataoka, R. et al. ”Proposal of Yuzu Harvesting Support System using Quadruped Robot Spot and Jetson” Proceedings, JSME Conference on Robotics and Mechatronics : ROBOMECH, 2P2-A03, 2025

[13] Kurihara, T. et al. "Development of an Autonomous Transportation Support System for Fruit Thinning Using the Quadruped Robot 'Spot'" Proceedings, JSME Conference on Robotics and Mechatronics : ROBOMECH, 2P1-F09, 2025

[14] Kanagawa, K. et al. "Improvement of Point Cloud Collection System in Estimating Leaf Number of Yuzu Fruit Trees Using Spot" Proceedings, JSME Conference on Robotics and Mechatronics : ROBOMECH, 2P1-F05, 2025

Supporting Online Materials:

[a] "Boston Dynamics:Spot Specifications" https://support.bostondynamics.com/s/article/Spot-Specifications-49916, [Accessed August 13, 2025]

[b] "Spot EAP2" https://bostondynamics.com/wp-content/uploads/2023/05/spot-eap-2.pdf, [Accessed August 13, 2025]

[c] "NVIDIA:NVIDIA Jetson Orin Nano Developer Kit" https://files.seeedstudio.com/wiki/Jetson-Orin-Nano-DevKit/jetson-orin-nano-developer-kit-datasheet.pdf, [Accessed August 13, 2025]

[d] "Boston Dynamics:GRAPHNAV MAP STRUCTURE " https://dev.bostondynamics.com/docs/concepts/autonomy/graphnav_map_structure.html, [Accessed August 13, 2025]

[e] "Ultralytics:YOLO Documentation" https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/, [Accessed September 7, 2025]

[f] "rerun" https://rerun.io/ [Accessed September 5, 2025]

[g] "VOSK Offline Speech Recognition API" https://alphacephei.com/vosk/ [Accessed September 20, 2025]

[h] "Flask Documentation" https://flask.palletsprojects.com/en/stable/, [Accessed August 23, 2025]

Name:
Ryoma Kataoka

Affiliation:
Kochi University of Technology

Address:
185 Miyanokuchi Tosayamada-cho Kami City, Kochi

Brief Biographical History:
RYOMA KATAOKA received Bachelor degree from Kochi University of Technology in 2025

Membership in Academic Societies:
• IPSJ

Name:
Mitsuki Aratani

Affiliation:
Kochi University of Technology

Address:
185 Miyanokuchi Tosayamada-cho Kami City, Kochi

Brief Biographical History:
MITSUKI ARATANI received Bachelor degree from Kochi University of Technology in 2025

Membership in Academic Societies:
• SICE

Name:
Kazutoshi Hamada

Affiliation:
Kochi University

Address:
200 Otsu, Monobe, Nankoku city, Kochi

Brief Biographical History:
2009- Kochi University

Main Works:
Development of Fruit Tree Cultivation Management

Membership in Academic Societies:
Japanese Society for Horticultural Science, International Society for Horticultural Science, Japanese Society of Agricultural Technology Management

Name:
Toru Kurihara

ORCID:
0000-0001-8347-0283

Affiliation:
Kochi University of Technology

Address:
185 Miyanokuchi Tosayamada-cho Kami City, Kochi

Brief Biographical History:
TORU KURIHARA received the B.E., M.E., and Ph.D. degrees in Information Science and Technology from the University of Tokyo, in 2000, 2002, and 2005, respectively. He is currently a Professor with the School of Information, Kochi University of Technology, where he also serves as Director of the Research Center for Cyber Physical Intelligence since 2025.

Membership in Academic Societies:
• SICE, IEEE, IEEJ