自律充電機能を備えた植物の生長記録自動収集システムの提案

伴 元輝[1]　小池 誠[2]　峰野 博史[1,2,3]

概要: 近年，農業施設内へセンサノードやカメラを設置し環境情報や植物の成長記録を収集する研究が注目されている．環境情報や成長記録は植物の収量予測などに重要なデータであるが，栽培規模が大きくなるにつれて，センサノードやカメラ等のデバイス設置労力や費用が増加してしまう．これらのコストの低減を図り，センサを搭載した無人自律走行車両の開発も行われているが，栽培期間中の安定した稼働実現や製造コストなど，様々な課題が存在する．本研究では，安価なラジコンカーをベースに，自律走行制御，および自律充電機能を備えた，植物の成長記録自動収集システムを提案する．本稿では提案システムの概要を述べた後，自走車両プロトタイプを用いたハウス内での走行制御，充電ステーションへの帰還制御の基礎実験結果を示す．基礎実験結果から，植物の繁茂するハウス内処理区を期待通り走行制御可能なことを確認し，充電ステーションへの帰還制御においては大学研究室内での基礎実験ではあるが，異なる複数の地点から充電ステーションに帰還できることを確認した．

キーワード: 農業，IoT，ビニールハウス，自律走行，自律充電

1. はじめに

近年，農業施設内へセンサノードやカメラを設置し環境情報や植物の成長記録を収集するシステムの研究が注目されている．センサノードやカメラ等を用いた研究では，対象処理区が大規模になるほど，施設内でデータを収集する際の施設の面積に比例してデバイスの設置量や設置労力，運用管理労力等が増大する．デバイス設置に関する労力や経費低減のために，様々なセンサを搭載したデバイスを搭載し，農業施設内を自走できるロボットを用いてこれらセンサ設置労力や経費低減を目指す研究開発が盛んである[1]．しかし，現状では自律充電機能を備えたものはなく，定期的に人手を介した充電作業もしくはバッテリー交換が必須である．

本稿で想定するような環境情報や植物の成長記録を自動化する自走デバイスについて，デバイスコスト，設置コスト，移動の自由度という観点で比較した表を 表 1 に示す．自律移動可能なデバイスには，大きく分けて車輪やキャタピラを持つ自走車両，複数のプロペラを搭載し空中を自在に移動可能なドローン，設置したワイヤを移動する自走式搬器[2]などが挙げられる．本稿では，風によって植物体が揺れてしまい萎れのような草姿画像の撮影が難しいドローンや，ワイヤやレールの設置にコストを要する自走式搬器ではなく，安価かつ設置コストが低く，植物体へ影響を与えず移動しやすい市販のラジコンカーを採用することとした．市販のジコンカーを車体とし， Raspberry Pi や RealSense といった IoT 向け汎用デバイスを組み合わせることで，自律充電機能を備えた植物の生長記録自動収集システムを構築できると考える．

以降，本論文の構成を述べる．まず第 2 章で関連研究を述べ，第 3 章で提案手法について説明する．第 4 章では開発した自走車両プロトタイプについて述べ，第 5 章では植物の繁茂するハウス内処理区で実施した基礎実験ならびに，大学棟内廊下にて行った充電ステーションへの帰還制御結果について述べる．最後に第 7 章で今後の課題をまとめる．

表 1 自走デバイスの比較

	自走車両（ラジコン）	ドローン	自走式搬器
デバイスコスト	低	高	高
設置コスト	低	低	高
移動の自由度	高	高	低

2. ハウス内自走車両の関連研究

2.1 接触型センサを用いた手法

接触型センサを用いた制御[3]では，走行ルートにレールを設置し，レールを車両に取り付けられている接触型センサによって検知することで，ハウス内の植物の繁茂する処理区と処理区の間といった狭い通路での走行や，画像処理に頼らない走行制御を可能としている．あらかじめ車両のルートを設置しておくことで，画像処理などの複雑な走行制御が不要となるが，事前にレールを設置する労力，走行ルートが限定されるといった課題がある．

2.2 LiDAR を用いた手法

LiDAR を用いて深度情報を取得してステアリングを制御する手法[4]では，位置特定と地図作成を同時に行う SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を用いることで，高精度な自律走行を実現している．しかし，SLAM による地図作成に時間を要すため，植物成長によってハウス内の処理区間の深度情報が変化し，ハウス内の運用エリアも複雑であると非効率であり，広域な場合に

1 静岡大学　情報学部情報科学科
2 静岡大学大学院総合科学技術研究科
3 グリーン科学技術研究所

©2021 Information Processing Society of Japan

はバッテリー駆動のシステムではバッテリー切れになってしまうという課題もある．

2.3 UWB(ultra-wideband)デバイスを用いた手法

UWB を用いた制御[5]は，ハウス内に設置したベースステーションと，自走デバイスの距離から，自走デバイスの正確な位置を多変測量によって算出することで，事前に設定した経路上を走行可能とする．しかし，ハウス内には成長する植物だけでなく，様々な農業用機材が設置されており，電波を用いた高精度な距離測定は困難である．植物は常に成長するため，通路へ葉や茎がせり出してしまうこともあり，葉や茎が事前に設定された経路上にあった場合は，自走デバイスが植物に接触してしまう可能性もある．このような事象を防ぐためには，農業従事者が植物の成長度合いだけでなくハウス内に設置した農業用機材などの障害物への配慮が必要になってしまうという課題がある．

3. 提案手法

3.1 想定するハウス環境

できるだけ農業従事者の方が特別な配慮せずとも自律走行でき，環境情報や植物の成長記録を気軽に収集できる生長記録自動収集システムが重要と考える．図 1 に，本研究で想定するシステム稼働環境を示す．様々なハウスがあるが，多少整地が行われてはいるが日々の運用によって地面のカバーが一部剥がれていたり，ホースや摘葉した葉や茎のような障害物が存在していたりする一般的な農業用ハウスを想定している．このような環境でのシステム稼働のためには，悪路や多少の障害物を乗り越えて走行できる車両の選定が必要である．加えて成長記録収集の対象は草丈が 2m 程になるトマトをまずは想定しているため，高所の画像の取得にも工夫が必要である．

3.2 システム動作概要

成長記録自動収集システム全体の構築経費を抑えるため，市販のラジコンカー，汎用制御端末，充電ステーション，データベースサーバで構成するものとする．ラジコンカーには RealSense，USB カメラ，各種モータを搭載し，それぞれ汎用制御端末に接続し制御する．汎用制御端末は，接続された各種センサ類から得られる画像や深度情報を用いて走行制御を行い，並行して環境情報や植物成長データの収集を行う．

図 2 に，成長記録自動収集システムを構成する充電ステーションおよびデータベースサーバを除いたラジコンカーベースの自走車両部分の状態遷移を示す．

以降，各状態について説明する．

(a) ビニールハウス内の悪路

(b) 通路に設置されたトマト

図 1 想定するハウス環境

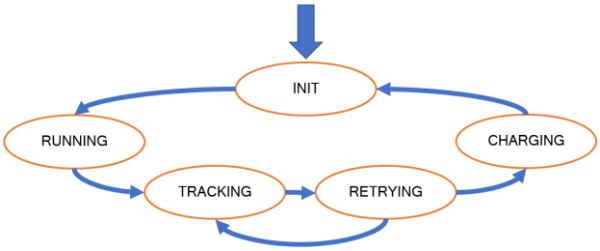


図 2 自走車両の状態遷移図

3.3 INIT

INIT 状態は，システム起動時，もしくは CHARGING 状態から遷移する状態である． システムが INIT 状態に遷移したとき，車両は充電ステーションから発車し，RUNNING 状態に遷移する．

3.4 RUNNING

RUNNING 状態では，自走車両は搭載した植物成長記録用の USB カメラで植物画像を収集しながら走行する．高所の撮影を可能とするため USB カメラは支柱にそってスライドできるようにするが，この支柱が植物に接触しないよう走行制御する必要がある．ここで通常走行時は，RealSense から得られる深度情報から左右の壁（植物体）を検出し，検出した壁から車両をより遠い方向へ向ける単純な処理で走行制御を行うこととした．植物体の検出は RealSense から取得した深度情報を走査することによって

©2021 Information Processing Society of Japan

```
while true do
    dFrame←Depth_frame // RealSens から深度情報取得
    cFrame←Color_frame // カラー画像を取得
    right←dFrame から画面右側の壁を検出
    left←dFrame から画面左側の壁を検出
    center←(left + right) / 2 // 左右の壁から最も遠い点を算出

    if dFrame 内の中央に壁がある then
        if すでに転回済み
        and cFrame 内で ArUco マーカ検知 then
            while ループを抜ける
        end if
        車両を転回する
    end if
    // ステアリングの値を-1.0 から 1.0 の値で設定
    scale←(center − dFrame.width / 2) / (dFrame.width / 2)
    ステアリングの値を scale に設定
end while
GOTO TRACKING
```

疑似コード 1　RUNNING 状態の動作

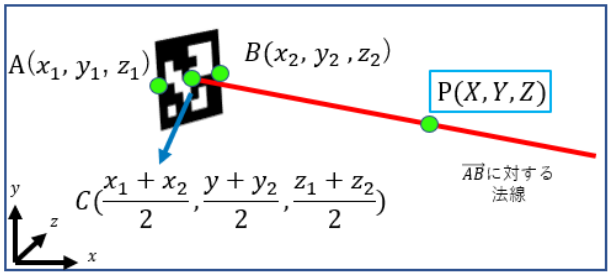


図 3 自走車両前方方向の depth 画像

行う．これまでの基礎検証により，RealSense は至近距離の深度情報を正確に計測できないことがあったため，車両正面方向の壁の検出については代表的な複数地点の深度情報を事前に設定した閾値と比較することで行う．自走車両は中央の障害物を検知すると通路の終端に到達したと判断し，180 度転回する．車両の転回後，再び通路を走行し，後述の ArUco[6][7][8]マーカを検出すると TRACKING 状態へ遷移する．疑似コード 1 に RUNNING 状態の動作を示す．

3.5 TRACKING

TRACKING 状態では，自走車両が周囲の障害物に接触しないように制御しながら，充電ステーションに取り付けられた ArUco マーカを探索する．自走車両は ArUco マーカを発見した後，ArUco マーカが設置してある充電ステーションのある方向に向かって走行し，充電ステーションで充電を行う．この時，自走車両を ArUco マーカに向かって直線的に制御すると，自走車両が充電器に対して斜めから侵入してしまい，正常に充電ステーションの上に載ることができない．そのため正常に充電ステーションの上に載るためには，自走車両を充電ステーションよりも数十 cm 手前に移動させるよう制御し，そこから ArUco マーカに向かうようなステアリング制御を行う必要がある．そこで，本稿では以下に示す簡易的なアルゴリズムによって，充電ステーションの上に載るための走行制御を実現する．

まず自走車両は，自走車両の前方に取り付けられた RealSense から，図 3 のような三次元情報付きの画像を取得する．ただし図 3 内の座標はカメラ座標系の座標である．

取得した画像内に ArUco マーカがあった場合，ArUco マーカの端の A 点，B 点から，中点 C を求め，さらにこれらの点から次の式（1）（2）を満たす点 P の座標を求める．

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{CP} = 0 \tag{1}$$

$$\|\overrightarrow{CP}\| = d\ (d\text{は定数}) \tag{2}$$

点 P は，$\overrightarrow{AB}$上の点 C からの法線上の点，つまり ArUco マーカの真正面から垂直方向に距離dだけ離れた位置の点であり，求めた点 P に向かって自走車両を走行制御することで，自走車両を ArUco マーカから距離dだけ離れた正面方向へ移動させる．自走車両は ArUco マーカの正面方向に移動した後，点 C に向かって走行制御し，充電ステーションの上に移動したら停止し，充電を開始する．なお本来，図 3 中の各点の座標は，RealSense で取得した画像中の座標（カメラ座標系）から，空間座標（ワールド座標系）に変換して求めなければならないが，今回のプロトタイプ自走車両では，厳密な計算は行わず，まずは前述のような近似的な値を用いることで簡易走行制御の可能性を検証する．疑似コード 2 に TRACKING 状態の動作を示す．

3.6 RETRYING & CHARGING

RETRYING 状態は，TRACKING 状態から遷移した際に自走車両が正常に充電できているかどうかを確認する．もし充電が正常に行われていない場合は，いったん自走車両を後退させ，充電ステーションから距離を取り，再び TRACKING 状態に遷移させる．

CHARGING 状態では，充電ステーションで充電を行いながら，RUNNING 状態で収集された植物の成長記録データをデータベースサーバへアップロードする．

©2021 Information Processing Society of Japan

```
while true do
    depth_frame←Depth image
    color_frame←Color image
    if  depth_frame 内の左側に壁がある then
        ステアリングを 30[%]右に
    else if  depth_frame 内の右側に壁がある then
        ステアリングを 30[%]左に
    end if
    if  color_frame 内に ArUco マーカがある then
        ArUco マーカの A, B, C 点を求める
        P ← AB・CP = 0 かつ‖CP‖ = d を満たす点
        steer_val ← (P 点の x 座標 − color_frame の中
        央の座標) / color_frame の width)
        ステアリングを steer_val[%] だけ変化させる
        if ArUco マーカが距離 d 以内にある then
            while ループを抜ける
        end if
    end if
end while
GOTO CHARGING
```

疑似コード 2　TRACKING 状態の動作

4. プロトタイプ実装

4.1 プロトタイプ自走車両

図 4 にプロトタイプ自走車両のハードウェア概要を示す．また，図 5 にプロトタイプ自走車両上に搭載したデバイス（USB カメラを除く）を示す．図 6 に市販の 1/10 スケールのオフロード汎用ラジコンカーを用いたプロトタイプ自走車両の全体像を示す．

自走車両上に，制御用の汎用制御端末として Jetson Nano，モバイルバッテリー，変圧回路，USB カメラを搭載した．

4.2 プロトタイプ充電ステーションおよびレシーバ

充電ステーションへの帰還制御の基礎実験のために，スマートフォンの無線充電に利用される Qi を用いた無線充電ステーションのプロトタイプを開発した．図 7 に薄型の Qi 充電器を 3 つ並べられるよう 3D プリンタで台座を作ったプロトタイプ充電ステーションを，図 8-(a), (b)に無接点充電に用いる Qi レシーバを自走車両の背面に設置した様子を示す．充電ステーションは，複数の無接点充電器を並べることで，自走車両の停止位置が多少ずれても大丈夫なよう冗長性を高めた．Qi レシーバ（受信機）は，自走車両の下部に取り付けた際に，無接点充電器から約 2.0mm の隙間ができるように設計し問題なく無線充電可能なことを確認した（図 9）．

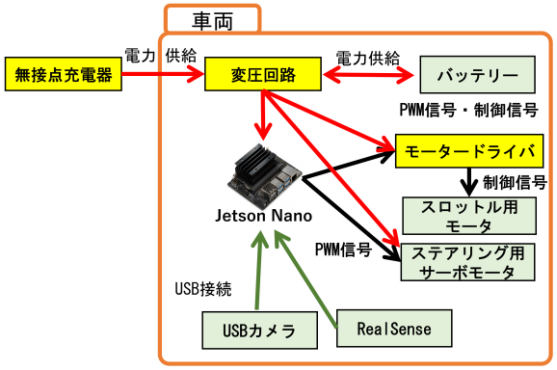


図 4 ハードウェアの概要

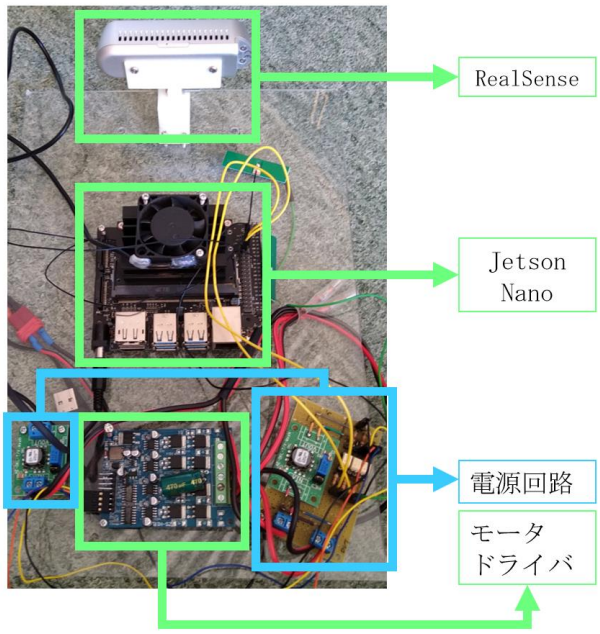


図 5 プロトタイプ自走車両上のデバイス

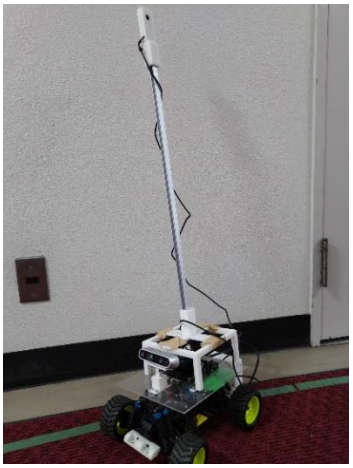
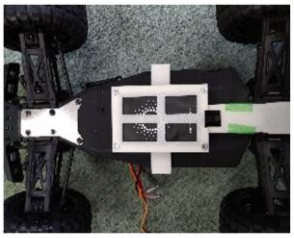


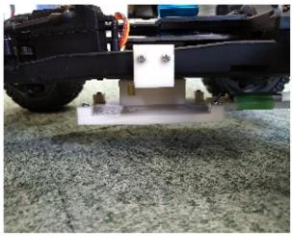
図 6　プロトタイプ自走車両外観

©2021 Information Processing Society of Japan

図 7 充電ステーションのプロトタイプ



(a) 無線充電のレシーバ
（車両下側から）



(b) 無線充電のレシーバ
（車両横側から）

図 8　無接点充電器のレシーバ

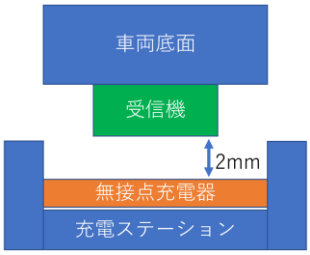


図 9 充電ステーション断面図

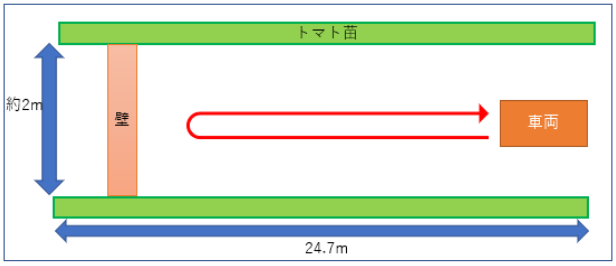


図 10　通常走行実験のハウス内様子

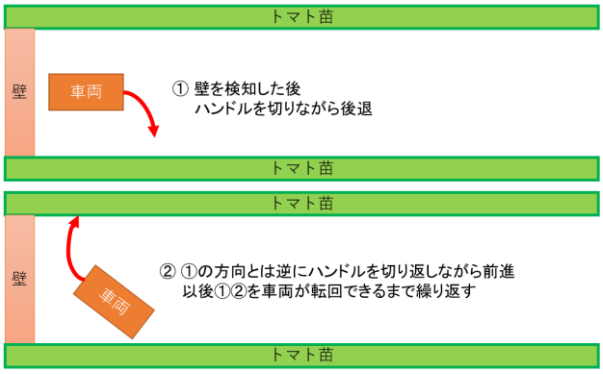


図 11 通常走行時の転回動作

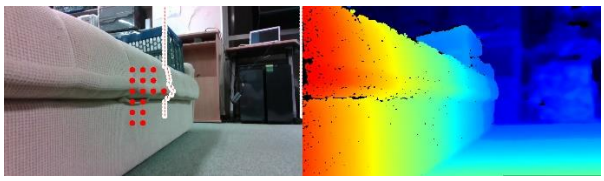


図 12　通常走行時に取得する画像

5. 基礎実験 1

5.1 通常走行実験の概要

開発したプロトタイプ自走車両を用いて，RUNNING 状態時の走行制御について基礎実験（以降，通常走行実験）を行った．

図 10 に通常走行実験を行ったハウス内環境の様子を示す．通常走行実験では，プロトタイプ自走車両をトマト栽培用の栽培ベッドが設置されているハウス内の処理区と処理区の間の通路を走行させることで，自走車両の走行制御がどのように実現できるかの検証，加えて通路の途中に通路の終端に見立てた壁を設置し，車両が壁の直前で転回した後再び通常走行に戻ることができるかの検証をした．なお本実験における自走車両の転回は**図 11** に示すように車両の前進後退とステアリング切り返しによって簡易的に行い，周囲の障害物に関しては考慮しない動作とした．また今後の動作検証のため，通常走行時に左右や正面の壁を検知する様子を動画として記録した．記録する動画の例を**図 12** に示す．

5.2 通常走行実験の結果

プロトタイプ自走車両の通常走行実験では，自走車両が通路左右の栽培ベッドを検知して緩やかに蛇行しながら走行し，処理区間の通路の終端にある壁も検知して転回し，再び通常の走行制御に戻れることを確認した．特に自走車両のタイヤより小さな小石やホースといった障害物や地面の起伏も軽々乗り越えて走行できることも確認できた．また実験時に通路にあった障害物を回避できることも確認で

©2021 Information Processing Society of Japan

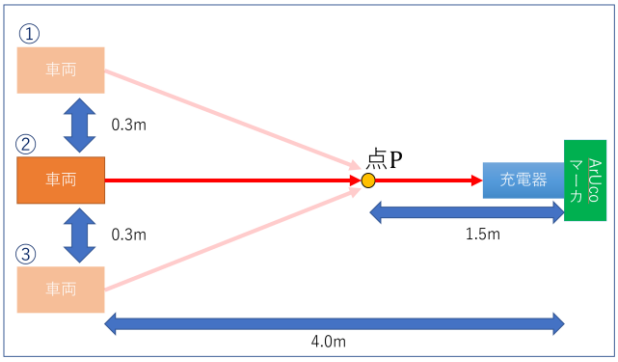


図 13 充電ステーションへの帰還実験環境図

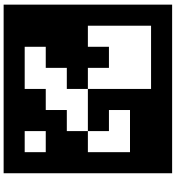
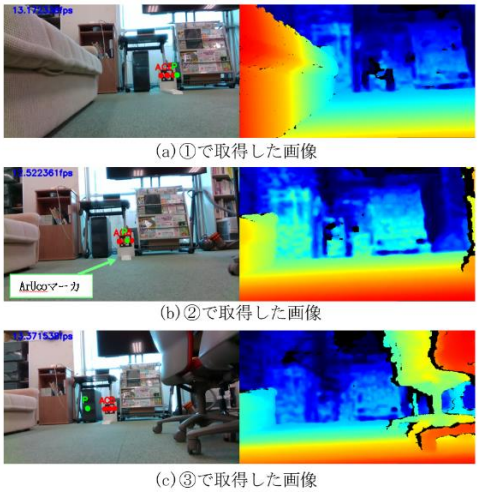


図 14 実験に用いた ArUco マーカ



(a)①で取得した画像

(b)②で取得した画像

(c)③で取得した画像

図 15 充電ステーション帰還中に取得した画像

きた．しかし車両よりも 1m ほど離れた高さのところにせり出している植物の葉や茎の真下を走行してしまっている場合もあり，将来 USB カメラを車両に搭載した際に支柱が接触してしまうことが懸念される．また走行中のステアリングの変動が大きすぎるため，USB カメラで取得した画像がぶれてしまう可能性も大きい．そのため今後はステアリングの変動を小さく抑えるアルゴリズムを検討していく予定である．

6. 基礎実験２

6.1 充電ステーション帰還実験の概要

開発したプロトタイプ自走車両を用いて， TRACKING 状態時の走行制御の基礎実験（以下，充電ステーション帰還実験）を実施した．

充電ステーション帰還実験を行った環境の概要図を**図 13** に示す．充電ステーション帰還実験では，室内に充電ステーションおよび，**図 14** に示す 15cm 四方の ArUco マーカを設置した．実験では，**図 13** 中の①，②，③の地点から自走車両を発進させ，その後ステーション上で停止できるかどうかを検証した．なお本実験では P 地点から ArUco マーカまでの距離を 1.5m とし，加えて本研究の想定するシステムの稼働環境は，植物が左右に設置された通路であることから，車両が走行する方向は一方向のみとした．本実験においても，走行時のカラー画像と深度画像を記録し，ArUco マーカ上の A, B, C 点および P 点をカラー画像上に描画し，検証しやすいようにした．

6.2 充電ステーション帰還実験の結果

充電ステーションへの帰還実験では**図 13** 中のいずれの異なる地点からの走行でも充電ステーションに帰還できたことを確認できた．しかし，**図 15** (a)(b)(c)に示されるように，ArUco マーカの各点 A, B, C 点から算出した P 点は，充電ステーションに近い点となってしまっていた．その結果，レシーバのマウントが，充電ステーションに接触してしまうことがあったため，今後は P 地点の設定方法の改良や，レシーバのマウント形状の工夫を検討していく予定である．

7. おわりに

本稿では，自律充電機能を備えた，植物の生長記録自動収集システムを提案し，プロトタイプ自走車両を開発した．実際のハウス環境下で自走車両の走行制御について基礎実験し，実現可能性の検証並びに改良点の抽出を行った．さらに大学研究室内ではあるが，ArUco マーカを用いた自走車両の充電ステーションへの帰還に関する基礎実験によって，システムが停止することなく周期的に稼働できる可能性の検証も行うことができた．

今後は実際に農業現場でのシステム稼働を想定し，長期間の運用ができるかどうかの検証および，ハウス全体でのシステム稼働を目指して，走行制御アルゴリズムを検討していく予定である．

謝辞

本研究の一部は，JST 創発的研究支援事業（JPMJFR201B）の支援を受けたものである．また実験環境を提供していただいた（株）Happy Quality の宮地様，サンファーム中山（株）の玉井様に深い感謝の意を表する．

参考文献

[1] FARBOT™, https://smart.ginzafarm.co.jp/farbot/ （参照日 2021 年 7 月 20 日）

[2] 永井芳郎，and 小林洋司．〝自走式搬器の普及経緯と作

©2021 Information Processing Society of Japan

業システムに関する一考察.″ 森林利用学会誌 13.1, pp.19-30, (1998)

[3] Ota, Tomohiko, et al. Development of small automatic guided vehicle by contact detection to hydroponics cultivation system. Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ 53.1, pp.31-40, (2019)

[4] Jon Eivind Stranden: Autonomous driving of a small-scale electric truck model with dynamic wireless charging, Master thesis, Institutt for teknisk kybernetikk, (2019).

[5] Yao, Lijian, et al. Wireless positioning and path tracking for a mobile platform in greenhouse. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 14.1, pp.216-223, (2021).

[6] ArUco: a minimal library for Augmented Reality applications based on OpenCV, https://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26 (参照日 2021年 7月15日)

[7] Francisco J.Romero-Ramirez, et al.: Speeded up detection of squared fiducial markers, Image and Vision Computing, vol 76, pp.38-47, (2018).

[8] S. Garrido-Jurado, et al.: Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming, Pattern Recognition:51, pp.481-491, (2016).

©2021 Information Processing Society of Japan