レーザレンジファインダによる自己位置同定と 逆最適制御を用いた果樹園UGVの巡回走行

倉 鋪 圭 太^{*1} 深 尾 隆 則^{*1} 永 田 純 平^{*1}
石 山 健 二^{*2} 神 谷 剛 志^{*2} 村 上 則 幸^{*3}

Orchard Traveling UGV Using a Laser Range Finder based Localization and Inverse Optimal Control

Keita Kurashiki^{*1}, Takanori Fukao^{*1}, Junpei Nagata^{*1},
Kenji Ishiyama^{*2}, Tsuyoshi Kamiya^{*2} and Noriyuki Murakami^{*3}

Nowadays, automation techniques for agriculture are being urgent tasks. In this paper, an Unmanned Ground Vehicle (UGV) in orchard is proposed as a base platform for monitoring trees, pesticide spraying, harvesting and so on. The control system is composed by a localization method in an orchard using 2D laser range finder and a map of trees, a robust control law based on nonlinear control theory, and a path regeneration algorithm to guide the vehicle smoothly to the target path. Experimental results in an orchard using a by-wire vehicle to which the control algorithm is applied are reported.

Key Words: Autonomous Vehicle, Orchard, Laser Range Finder (LRF), Inverse Optimal Control, Path Following, Extended Kalman Filter (EKF), Particle Filter

1. は じ め に

果樹は管理や収穫作業の負担が大きい上に、防除や高所作業での作業者の安全確保も問題であることから、それらの作業用ロボットが海外で活発に研究されている[1]~[4]。国内においても、リンゴ等の果樹は高品質で海外でも高い評価を受けているものの、農作業従事者の高齢化や減少が進む中[5]、生産力と品質の維持・向上のために果樹園用ロボットの開発が急務である。

本論文では、果樹園における果樹の管理（情報収集）や農薬の散布、収穫などを行うロボットシステムのプラットフォームとなる果樹園UGV（Unmanned Ground Vehicle）を提案する。果樹園内は一般的に樹間が狭く、防除や収穫等の作業において作業機は果実を傷つけたり枝葉に衝突しないで走行することが必須の要件となっている。そのため農作業用UGVが目標経路に追従して走行するための、高精度な自己位置同定とロボスタな制御が重要な課題となっている。例えば、本論文で実験を実施した

果樹園では、走行経路の幅は、車両幅プラス1[m]程度であり、経路誤差は±0.5[m]程度以内に抑えられなければならない。

車両位置同定の課題に関しては、これまで提案されたUGVの多くは高精度なリアルタイムキネマティックGPS（RTK-GPS）や慣性計測装置（IMU）を搭載したシステムを採用している[6][7]。しかし、RTK-GPSは地上に基地局を設置しなければならない上、高精度な測位を行うためには常に四つ以上のGPS衛星が捕捉されている必要があり、さらに安定してこれを行うには七つ以上の衛星を捕捉していることが望ましいとされているため[8]、山間部や果樹園などの遮蔽物が存在する場所では信頼性が大きく低下してしまう。また、RTK-GPSやIMUは非常に高価であるため、農業用UGVに用いるのは現実的ではない。

一方、GPSを利用しない制御システムも多数提案されている[1]。文献[9]や[10]では画像に基づく制御システムを提案している。画像に基づく制御システムはコスト面で優れているが、これらの方法はカラーベースのシンプルな方法に基づいており、木の影などの光の影響に対して敏感であるという欠点がある。

GPSを使用しないもう一つの方法として、レーザレンジファインダ（以下、LRFと略す）に基づく車両の制御手法も研究されている[3][4]。Barawidら[3]はココナッツ園を想定した車両の制御法として、1基のLRFで検出された木の並びをハフ変換により直線近似し、それに追従する制御法を提案している。しかし、ココナッツの木を想定しているために、一般の果樹園で

原 2010 年 12 月 20 日

^{*1}神戸大学

^{*2}ヤマハ発動機（株）

^{*3}北海道農業研究センター

^{*1}Kobe University

^{*2}Yamaha Motor Co., Ltd.

^{*3}National Agricultural Research Center for Hokkaido Region

■ 本論文は有用性で評価されました。

木を検出する際に大きな問題となる垂れ下がった枝葉の影響が考慮されていない。また、LRF の検出範囲を狭くすることにより誤検出を防止している点や、制御誤差に対して線形な非常にシンプルな制御則を用いており、センシング・制御双方の面から目標状態近傍での利用に限られ、果樹園での利用にはロバスト性の面から問題があると考えられる。また、Singh ら [4] は車両前部に取り付けられた 2 基の LRF を用い、果樹園内に設置したマーカを検出することで車両の自己位置同定を行っている。

本論文で提案する計測手法は文献 [4] のものと類似しているが、本論文で提案するシステムは 1 基の二次元 LRF を用いて果樹園内の木を検出し、事前に取得した木のマップとのマッチングにより自己位置同定を行う。果樹園においては、路面の凹凸による車両のピッチングにより垂れ下がった木の枝や路面が LRF によって検出されてしまうため、これらが自己位置同定に悪影響を与えるのを防ぐため、拡張カルマンフィルタ（以下、EKF と略記する）[11] あるいはパーティクルフィルタ [12] を用いて車両の状態を推定する。

また、農耕地における高精度かつロバストな車両の制御という課題に対して、本研究では非線形制御理論から設計したロバストな制御則と、目標経路へなめらかに収束する経路生成法を組み合わせ、外乱に対してロバストな経路追従制御を行う。この制御則は筆者らが以前車輪型移動ロボットに対して設計した制御則 [13] を前輪操舵車両の path-following 制御に拡張したものであり、車両のホイールベースのモデル化誤差など、入出力間の不確かさに対するロバスト性が理論的に保証されるという非常に大きな利点がある。また、path-following の形式に拡張されたことにより、車両の進行速度と旋回角速度を分離して制御することが可能となる。さらに、路面外乱やセンサノイズにより制御誤差が増大した際に車両の過敏な反応を抑制するため、文献 [14] で提案したクロソイド曲線を用いた経路再生成アルゴリズムを組み合わせ用いている。

これらの自己位置同定・車両制御アルゴリズムをパイワイヤ車両に適用し、枝葉の垂れ下がりや、土壌の凹凸がある環境下での自己位置同定性能と制御性能を評価し、その有効性を検証する。

本論文の構成は以下のとおりである。続く第 2 章では LRF、木の事前マップ、EKF またはパーティクルフィルタを用いた果樹園における UGV の自己位置同定法について述べ、第 3 章では経路追従制御のための制御則を設計する。そして第 4 章にて UGV を用いた果樹園における実験結果を示し、5 章で結言を述べる。

2. LRF に基づく自己位置同定法

本章では、二次元 LRF に基づく自己位置同定法について述べる。本論文で提案する手法は、果樹園に立ち並ぶ木を検出し、事前に取得した木のマップとのマッチングを行うことで、人工的なマーカなどを必要とせず自己位置同定を行う。この木のマップは、木の幹を点とみなし、それらの x, y 座標（絶対座標系）を木の ID とともにリスト化した簡易なものである。季節変化に伴う枝葉の茂りなどを考慮すると、本実験環境では点群イメージによる詳細マップよりこちらのほうが実用的と考えられる。

また、センサノイズなどの影響を低減するため、EKF またはパーティクルフィルタを用いた二つの方法を提案し、車両の自

Fig. 1 Laser data

Fig. 2 Grouped objects and predicted trees

己位置および旋回角の推定を行う。

2.1 三角測量と EKF を用いた自己位置同定法

本節では、二次元 LRF により得られた測域情報と木の事前マップに基づく三角測量および EKF を用いた自己位置同定の手順について述べる。

2.1.1 木のマップを用いた三角測量

ある未知の点から既知の二点までの距離と方位を用いることで、三角測量により未知の点の二次元座標を算出することができる。

以下に LRF を用いた三角測量のアルゴリズムの流れを示す。

- (1) LRF から物体までの距離と方位の組 (r_l, θ_l) を得る。Fig. 1 が実際に果樹園で取得したデータの一例である。 r_l が極端に小さいものは車両の一部が検出されているか、またはその方位に物体が検出されていないことを示す。
- (2) Fig. 1 から分かるように、異なる物体が検出された部分では r_l が大きく変化している。そこで、方向に対する物体への距離の勾配 $dr_l/d\theta_l$ についての閾値処理を行うことで、点群をグループ化する。グループ化された物体を直交座標系に変換してプロットすると、Fig. 2 の四角い点のようになる。なお、Fig. 2 中の三角形は車両の位置と姿勢（上向き）を示している。
- (3) すべてのオブジェクトに対して以下の処理を行う。
 - (a) オブジェクトの二次元平面上の重心位置を求め、前回の自己位置同定結果とマップからの木の予想位置を算出し、検出された物体と比較する。Fig. 2 中の丸い点が木の予測位置を示している。
 - (b) 予想位置と最も近い木の距離が閾値内であれば、その木の ID をオブジェクトに割り当てる。
 - (c) 木の予想位置との誤差や木との相対距離 δd に基づき、以

Fig. 3 Model of front steering vehicle

下の式により木の信頼度 c_{obj} を計算する.

$$c_{obj} = \frac{1}{\delta d + 0.01} \quad (1)$$

これは、 δd が小さいほどその物体が木の幹である可能性が高いことを意味する.

- (d) すでに同じ ID を持つオブジェクトがあるか調べ、あれば信頼度の低い方を削除する.
- (4) 木が 2 本以上発見されれば、すべての 2 本の木の組み合わせに対して以下の処理を行う.
 - (a) 車両と 2 本の木を結んでできる三角形についての幾何条件から、三角測量を行う.
 - (b) (3c) で求めた 2 本の木の信頼度のうち低いほうの値を二乗し、三角測量の信頼度とする.
- (5) 三角測量の結果を信頼度で重み付けして重ね合わせを行う.

2.1.2 拡張カルマンフィルタ

三角測量により算出された車両の位置は木の枝や mismatching により多くのノイズを含んでいる可能性があり、そのままでは車両の制御に適用できない. そこで、本研究では三角測量での自己位置同定の結果に対して EKF を適用する.

カルマンフィルタはガウス型白色雑音のある系の状態を推定する方法としてよく知られたフィルタリングアルゴリズムであり、後に述べるパーティクルフィルタと比べ計算負荷が小さく、その結果制御系全体の更新周期への影響が少ないというメリットがある. Fig. 3 に示される前輪操舵車両のプロセスモデルは、前輪操舵車両の運動学モデルに対してプロセスノイズ ν_d を付加したものであり、次式で表される.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} + \nu_d \quad (2)$$

ここで、 (x, y, θ) は車両の位置および姿勢、 v は車両の進行速度、 ω は旋回角速度である.

また、計測モデルとしては、車両の状態が三角測量の結果にノイズが含まれているとした以下の式を用いる.

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \nu_n. \quad (3)$$

ここで、 (x_m, y_m, θ_m) は三角測量から計算された車両の状態であり、 ν_n は観測ノイズを表す.

Fig. 4 Diagram of particle filter

三角測量が行われたとき、システムのモデル (2)、(3) に基づき、標準的な拡張カルマンフィルタのアルゴリズム [11] により車両の状態の推定値の更新が行われる.

2.2 パーティクルフィルタを用いた自己位置同定法

三角測量と EKF を用いた方法では、車両の初期状態の不確かさが大きい場合や、木の捕捉数が少なく三角測量の結果のばらつきが大きくなった際に正しく推定ができない場合がある.

そこで、パーティクルフィルタ [12] とマップマッチングを組み合わせで自己位置および姿勢角を推定する. パーティクルフィルタは対象システムの状態変数の確率分布を多数のパーティクル集合で近似し推定するものであり、パーティクルを状態空間に散布することにより初期推定値の不確かさなどに対して高いロバスト性をもつという長所がある. 一方、EKF と比較すると計算負荷が大きく、またシステムの不確かさが小さい場合には推定精度が劣る場合がある. パーティクルとは状態変数を仮置きしたものであり、それぞれがシステムのとりうる状態を表している.

時刻 t でのパーティクル集合内で i 番めの要素 x^i を次のように定義する.

$$x_t^i = [x_i, y_i, \theta_i]^T \quad (4)$$

ベクトル要素はそれぞれ絶対座標系での車両の状態 $[x, y, \theta]^T$ のとりうる値を示している. 実装手順を以下に示す. また、この手順を図式化したものを Fig. 4 に示す.

- (1) 初期パーティクル集合を生成する. 以降は (2)~(5) を繰り返す.
- (2) オドメトリ情報 (車速、操舵角) を用いて各パーティクルを移動させる (予測ステップ).
- (3) マップマッチングにより、各パーティクルの尤度 $p(r_{it}|x_t^i)$ を計算する. r_{it} は時刻 t での LRF による観測値である. パーティクルの尤度の計算手順は以下のとおりである.
 - (a) EKF における三角測量の手順 (2) と同様に、LRF によって検出された物体をグループ化する.
 - (b) パーティクルの状態と木のマップに基づき木の予測位置を算出する. この操作は三角測量の手順 (3a) と類似しているが、EKF は前回の車両状態の推定値を用いるのに対して、パーティクルフィルタではそれぞれのパーティクルの状態に対して木の予測位置を求める点で異なっている.

- (c) 三角測量の手順 (3c) と同様にそれぞれの木の信頼度を求める。
- (d) マップに含まれるすべての木に対して信頼度の総和を取り尤度とする。ただし、前回推定値との差が大きなパーティクルに対して、その差に応じた補正をかける。
- (4) パーティクルを選択する。このとき、尤度の高いものは複数回重複して選ばれ、低いものは切り捨てられるように確率的な選択方法を用いる。
- (5) 選択されたパーティクル集合に対して、乱数によるノイズを付加し、新たな集合を生成する。

3. 果樹園 UGV の制御系設計

本章では、前輪操舵車両に対する制御則の設計を行う。筆者らは文献 [13] にて車輪型移動ロボットに対する逆最適トラッキング制御則を提案したが、本論文ではこれを path-following [15] の形式に拡張する。その結果、設計された制御則はモデルの不確かさに対するロバスト性を持つとともに、進行速度と前輪操舵角を分離して制御することが可能となる。

3.1 逆最適制御

ある状態 $x \in R^n$ をもつ以下のアフィンシステムを考える。

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (5)$$

ここで、 $u \in m$ は制御入力であり、 $f(x) \in R^n, g(x) \in R^{n \times m}$ である。

最適制御とは、システム (5) に対して、以下の条件を満足する制御入力 $u(x) \in R^m$ を設計する問題である。

- (i) $u(x)$ は系を目標状態に漸近収束させる。
- (ii) $u(x)$ は次の評価関数 J を最小化する。

$$J = \int_0^\infty (l(x) + u^T R(x)u) dt \quad (l(x) \geq 0, R(x) > 0) \quad (6)$$

しかし、この問題を解くには Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式を解く必要があり、これは一般に困難である。

これに対し、逆最適制御問題とは次のように表される [16] [17]。

- (i) まず、安定化フィードバック則を設計する。
- (ii) その後、評価関数 (6) に対して最適であることが示される。

この最適性によって、求められたコントローラは sector margin $(1/2, \infty)$ と呼ばれる入出力間の不確かさに対するロバスト性を持ち [17]、車輪型移動ロボットの場合は車輪の滑りに対するロバスト性と解釈できる [13]。

逆最適制御では、以下の Control Lyapunov Function (以下、CLF と略す) に基づいて制御則が設計される。

定義 1 (Control Lyapunov Function)

すべての $x \neq 0$ に対して次の関係を満足する、滑らかで正定かつ放射状に非有界な関数 $V(x)$ はシステム (5) に対する control Lyapunov function と呼ばれる。

$$L_g V(x) = 0 \Rightarrow L_f V(x) < 0 \quad (7)$$

ここで、 $L_g V(x), L_f V(x)$ は Lie 微分 $g(\partial/\partial x)V(x), f(\partial/\partial x)V(x)$ である。 □

このとき、次の定理が成り立つ [16]。

定理 1 (CLF に基づく逆最適制御)

$a(x), b(x), p(x)$ を次式で定義する。

$$a(x) = L_f V(x) \quad (8)$$

$$b(x) = L_g V(x) \quad (9)$$

$$p(x) = \begin{cases} c_0 + \frac{a + \sqrt{a^2 + (b^T b)^2}}{b^T b} & (b \neq 0) \\ c_0 & (b = 0) \end{cases} \quad (10)$$

ここで c_0 は正定数である。このとき、Sontag の形式による次の入力

$$u = -p(x)b(x) \quad (11)$$

は、システムを漸近安定化し、かつ次の評価関数を最小化する。

$$J = \int_0^\infty \left(\frac{1}{2} p(x) b^T(x) b(x) + \frac{1}{2p(x)} u^T u \right) dt \quad (12)$$

□

3.2 前輪操舵車両の path-following

本節では、前輪操舵車両に対して逆最適制御による path-following [15] のための制御則の設計を行う。

制御則の設計モデルには、式 (2) で表されるモデルからノイズを無視した以下の式を用いる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\omega = \frac{v}{L} \tan \phi \quad (14)$$

ここで、 ϕ は前輪舵角であり、 L はホイールベースである。

制御則の設計モデルにおいては車輪の滑りなどの外乱を考慮しないが、本論文で用いる逆最適制御は先に述べた sector margin により L のモデル化誤差に対するロバスト性を持ち、これは式 (14) から操舵角と旋回角速度の間の不確かさととらえられるため、車輪の滑りなどの影響に対してロバストである [14]。

Path-following の形式では、**Fig. 5** に示すように望ましい経路上を走行する仮想的な参照車両を考え、この車両との横方向と姿勢の誤差を小さくするよう実際の車両を制御する。本研究では文献 [15] で定義されているものと異なり、相対誤差を参照車両からみた座標系で定義する。このようにすることで参照車

Fig. 5 Reference vehicle

両の進行速度が実車両の進行速度の関数となり、実車両の速度制御を操舵制御と分離して行うことが可能となるというメリットが生まれる。参照車両の運動学モデルは実車両と同様に以下の形で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで、 (x_r, y_r, θ_r) は参照車両の位置・姿勢であり、 v_r, ω_r は参照車両の速度、角速度である。

車両間の相対誤差を以下のように定義する。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 0 \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \theta - \theta_r \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで、 (e_1, e_2, e_3) は実車両と参照車両の位置・姿勢の相対誤差である。このとき、相対誤差の時間変化は以下のように計算できる。

$$\dot{e}_1 = v \cos e_3 - v_r + e_2 \omega_r \quad (17)$$

$$\dot{e}_2 = v \sin e_3 - e_1 \omega_r \quad (18)$$

$$\dot{e}_3 = \omega - \omega_r \quad (19)$$

Path-following では、参照車両の速度は $e_1 = 0$ となるように以下のように計算される。

$$v_r = \frac{v \cos e_3}{1 - \rho e_2} \quad (20)$$

ここで ρ は参照ロボットの旋回の曲率である。 $\rho = 1/e_2$ のとき v_r は定義できないが、そのような状態に近づいた際には、参照経路を再生成し、その経路上を参照ロボットに再スタートさせることによりこの状態は回避できる。参照経路の再生成については、3.3 節にて述べる。

制御則を導出するため、以下のような変数変換を行う。

$$h(z) = \frac{z}{1 + z^2} \quad (21)$$

$$h'(z) = \frac{dh}{dz} \quad (22)$$

$$\tilde{e}_3 = e_3 + h(e_2 v) \quad (23)$$

この結果、誤差方程式 (16) は式 (5) のようにアフィン系の標準形として以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_2 \\ \tilde{e}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v)) \\ -\omega_r + h'(e_2 v) \{v^2 \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v)) + e_2 \dot{v}\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \\ &\equiv f + g\omega \end{aligned} \quad (24)$$

次式の V を CLF の候補に選ぶ。

$$V(e_2, \tilde{e}_3) = \frac{1}{2} k_2 e_2^2 + \frac{1}{2} k_3 \tilde{e}_3^2 \quad (25)$$

ここで、 k_2, k_3 は任意の正の定数である。このとき、 V の Lie 微分は以下のように計算される。

Fig. 6 Reference path regeneration

$$L_g V = k_3 \tilde{e}_3 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} L_f V &= k_2 e_2 v \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v)) \\ &\quad + k_3 \tilde{e}_3 \{-\omega_r + h'(e_2 v) \{v^2 \sin(\tilde{e}_3 - h(e_2 v)) + e_2 \dot{v}\}\} \end{aligned} \quad (27)$$

式 (26), (27) より、 $L_g V = 0$ ならば以下が成り立つ。

$$L_f V = -k_2 e_2 v \sin(h(e_2 v)) \quad (28)$$

h の定義に注意すると、 V は CLF の条件 (7) を満足することが分かる。したがって、式 (11) によって与えられる入力 ω により相対誤差 $e_2, \tilde{e}_3$ および e_3 は 0 に収束することが保証される。さらに、この制御則のロバスト性は sector margin $(1/2, \infty)$ により保証され、車輪の滑りなどのモデル化誤差に対してロバスト性が期待される。

3.3 経路修正アルゴリズム

時々刻々のフィードバック制御では、外乱によって誤差が大きくなった場合に非常に大きな入力が発生する可能性があり、それが車両の挙動に好ましくない影響を与える可能性がある。また、参照車両との相対誤差の増大は式 (20) により決定される v_r を有界とする上でも問題となる。

これらの問題を解決するため、参照車両との相対誤差が増大した際に Fig. 6 に示すようにクロソイド曲線をつなぎ合わせて参照経路を再生成し、参照車両を新たな参照経路から再スタートさせるという手法をとる。車輪型移動ロボットの制御には目標経路との横方向の誤差と姿勢誤差の収束性にトレードオフがあることが知られているが、このように目標経路へ向かう過渡的な経路を生成することによりこのトレードオフが回避され、過渡特性の改善と収束性の向上を両立することが可能となる。

これについては文献 [14] に述べた手法を用いるため、詳細は省略する。

4. UGV による実験

4.1 実験条件

実験に用いた UGV (Fig. 7) は商用品であるバギー車をベースに、操舵、スロットル、ブレーキ、変速の操作を物理的機構を介さずに電氣的に行えるようバイワイヤ化したものであり、これによりソフトウェアによる自由な制御が可能となっている。また、車両の四隅の非常停止用プッシュスイッチや、制御とは独

Fig. 7 UGV

Fig. 8 Block diagram of UGV system

Fig. 9 Experimental field

立に遠隔で非常停止を行うことができるなど、安全面での改造も施されている。制御信号や車内状態の伝達など制御用 PC と車両のコントローラの通信は、自動車などで使用されている車内通信プロトコルである Control Area Network (CAN) を通じて 20 [Hz] で行われる。車両には二次元レーザレンジファインダと検証データ取得用の 1 周波 RTK-GPS が備え付けられている。レーザレンジファインダの検出範囲は 30 [m]、視野角は 270 [deg] であり、解像度は 0.25 [deg]、スキャン速度は 40 [Hz] である。また、GPS の測位精度は 0.2 [m] であり、リフレッシュレートは 10 [Hz] である。この実験において車両の速度制御は目標値に対して PI 制御を用いて行った。Fig. 8 に UGV のシステム構成をブロック線図で表現したものを示す。

実験環境は Fig. 9 に示す北海道農業研究センター内の果樹園である。この実験においては対応する木のマップは簡単のため手作業で計測し作成しているが、より大規模な果樹園にも対応するため、実験で得たデータを基に LRF によるマップの自動生成法を現在開発中である。木はほぼ等間隔で植えられているが、路面の凹凸や垂れ下がった果樹の枝葉により、LRF のデータから確実に木を抽出するのは非常に困難となっている。

車両は $(x, y) = (-3, 3)$ [m] 付近から出発し、列を替えながら果樹園内を巡回走行する。目標経路は、一列目については木の列から 3 [m] の位置を走行するよう設定し、二列目以降は左

Fig. 10 Trajectory of UGV using extended Kalman filter

Fig. 11 Trajectory of UGV using particle filter

右の木の列の間を走行するものとした。また、パーティクルフィルタのパーティクル数は 300 とした。

4.2 自己位置同定法

Fig. 10, 11 にそれぞれ EKF, パーティクルフィルタを用いて指令速度 1.5 [m/s] で自律走行を行った結果を示す。なお、これらの図は推定された車両の軌跡と、GPS により計測された軌跡を示している。図中で GPS による車両軌跡が乱れている箇所が見られるが、これは果樹園内では GPS 衛星を常に捕捉することが困難であるためである。これらの図から、直線部分の木の捕捉数が十分な場合においては EKF を用いた場合のほうが直進性が高く、良好な結果を示していることが分かる。旋回部分では検出できる木が少なくなることに加え、地面の傾斜により垂れ下がった木の枝なども検出されるため、EKF による推定結果には大きな誤差が発生しているが、パーティクルフィルタの場合そのような影響が小さく抑えられ、ロバスト性の高さが表れている。なお、1 列目前半で推定軌跡が乱れているのは地面の大きな窪みで車両が傾いたためである。また、このような推定誤差が発生しても、経路再生成アルゴリズムとロバストな制御則を組み合わせることにより、計測の乱れが制御に与える影響を緩和し、安定した巡回走行を実現している。

Table 1 は各フィルタの結果を比較したものである。なお、表中の Velocity は指令速度を示しており、推定誤差は GPS 軌跡に対する推定軌跡の y 軸方向誤差標準偏差、制御誤差は目標経路に対する GPS 軌跡の y 軸方向誤差標準偏差である。この結果から、どちらのフィルタを用いた場合も果樹園内の自律走行を達成したが、パーティクルフィルタを用いた場合のほうが

Table 1 Comparison of error

	Velocity[m/s]	Estimation error[m]	Control error [m]
EKF	1.0	0.19	0.13
	1.5	0.21	0.17
	2.0	0.22	0.23
Particle filter	1.0	0.15	0.09
	1.5	0.17	0.21
	2.0	0.19	0.30

推定誤差が小さいことが分かる。しかしながら、パーティクルフィルタは計算負荷が大きく、アップデートレートがEKFと比較して低いため、車両の速度が高い場合に制御誤差が増大する場合もあった。なお、2.0 [m/s] における直線走行部分のGPS経路の横方向の最大誤差は、どちらの場合においても0.5 [m]以下に抑えられており、本研究の要求仕様を満たすものであった。

これらの結果から、高速かつ木の検出状態の良好な直線走行の部分ではEKFが適しており、低速だがセンシングの条件が厳しい旋回時はパーティクルフィルタを用いるのが有効であると考えられる。

4.3 パーティクルフィルタの初期位置の不確かさに対するロバスト性評価

マップマッチングに基づく自己位置同定法は、木のマップを車両座標系に変換してLRFのデータとの整合性を評価するため、車両の初期位置についての事前情報を必要とする。実用化に際しては、初期条件として車両の正確な位置を計測する、あるいはある位置に車両を正確に設置するというのは望ましくないため、初期状態の不確かさに対するロバスト性が求められる。

パーティクルフィルタは状態空間に車両状態の候補であるパーティクルをばらまくため、不確かな初期状態から車両の真の状態を探索することが可能である。ただし、木が整然と並んでいる場合、多数の局所解が存在するため、木の間隔よりは狭い範囲で車両の位置が分かっていることが車両の状態推定値が誤った局所解へ収束しないための理論的な限界となっている。

このパーティクルフィルタのロバスト性を検証するため、車両に一定の初期情報 $[x, y, \theta]^T = [-2, -3, 0]^T$ を与えた上で様々な初期状態から車両をスタートさせるという実験を行った。

Fig. 12 にこの実験結果を示す。“Success”とは初期状態のずれを修正しその後の巡回走行に成功したことを示し、“Failure”は自己位置の推定値が一行分ずれるなど、真値でない局所解へ収束してしまったことを示す。しかしながら、失敗したものは理論的に真値に収束可能な限界位置の境界付近あるいは外側となっており、境界付近を含めた理論的な限界の範囲内であれば90%以上の確率で成功という結果を得た。車両に初期姿勢角の誤差が $\pi/2$ [rad] ほどずれている場合においても車両の推定位置が真値に収束し、高いロバスト性を示している。

4.4 制御則の従来法との比較

本節では、3章にて構築した制御アルゴリズムと従来法であるKanayamaの方法[18]を用いて果樹園の自律走行実験を行い、性能の比較を行う。Kanayamaの方法をpath-followingの形式に修正したものは、制御則は以下の式で表される。

$$\omega = \omega_r + v_r k_2 e_2 + k_3 \sin e_3 \quad (29)$$

ここで、 k_2 、 k_3 は正数ゲインであり、この実験では $k_2 = 0.5$ 、

Fig. 12 Experimental result with ambiguous initial condition **Fig. 13** Comparison of robustness of proposed method and Kanayama's method

$k_3 = 1.0$ とした。また、逆最適制御のゲインは $c = 2.0$ 、 $k_2 = 0.5$ 、 $k_3 = 0.2$ とした。これらの値は、モデルが誤差のない状態において目標経路に追従できるよう設定した値である。

車両のホイールベース L の真値は 1.35 [m] であるが、この実験では制御則のロバスト性を比較するため、 $L = 2.0$ という誤った値を与えて実験を行った。

この実験によるGPSの軌跡を**Fig. 13**に示す。Kanayamaらの方法の結果では、モデル化誤差の影響を受け激しく蛇行し、また旋回時に非常に大回りになっており、途中で経路から逸脱している。一方、本研究で構築した逆最適制御による制御の結果ではその影響を小さく抑え、安定した走行により予定経路を完走した。

5. おわりに

本論文では、果樹園における高価な機器を利用しない自律走行車両のベースプラットフォームの確立を目的とし、二次元レーザレンジファインダを用いて拡張カルマンフィルタあるいはパーティクルフィルタに基づく二通りの自己位置同定方法、外乱に対してロバストな制御則と滑らかに目標経路へ復帰する経路生成法からなる制御アルゴリズムを構築した。そして、実際の果樹園においてUGVを用いた検証実験を行い、センシングが不安定かつ路面外乱の激しい環境下での自己位置同定性能と制御性能を評価し、有用性を示した。自己位置同定の面では、EKFを

用いた自己位置同定法は木の検出数が豊富な場合で精度が高く、パーティクルフィルタを用いた場合は初期誤差やセンサノイズが大きな場合に高いロバスト性を示したため、そのような使い分けが有効であると考えられる。また、制御面においては、路面外乱や自己位置推定の乱れの影響が小さく抑えられ、安定した巡回走行を達成した。目標経路との横方向の最大誤差は 0.5 [m] 以下であり、果樹園内での要求精度を満足するものであった。

参 考 文 献

- [1] M. Li, K. Imou, K. Wakabayashi and S. Yokoyama: "Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance," International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol.2, no.3, pp.1-16, 2009.
- [2] A. (T.) Stentz, C. Dima, C. Wellington, H. Herman and D. Stager: "A system for semi-autonomous tractor operations," Autonomous Robots, vol.13, no.1, pp.87-103, Jul. 2002.
- [3] O.C. Barawid Jr., R.F. Teimourlor, 野口, 石井: "果樹園作業のための自動走行システム (第 1 報): レーザスキャナを用いたシステムのココナッツ園への適用", 農業機械学会誌, vol.70, no.6, pp.76-84, 2008.
- [4] S. Singh and T. Baugher et. al.: "Automation for specialty crops: A comprehensive strategy, current results, and future goals," 4th IFAC International Workshop on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems (2009 IFAC Bio-Robotics IV Workshop), 2009.
- [5] 農林水産省: 2010 年世界農林業センサ結果の概要, 2010.
- [6] C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot and M. Berducot: "Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations," Journal of Field Robotics, vol.26, no.6-7, pp.504-518, 2009.
- [7] Y. Nagasaka, H. Saito, K. Tamaki, M. Seki, K. Kobayashi and K. Taniwaki: "An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit," Journal of Field Robotics, vol.26, no.6-7, pp.537-548, 2009.
- [8] 久保信明, 安田明生: "移動体 RTK における準天頂衛星の効果について", 第 52 回宇宙科学技術連合講演会, 2007.
- [9] J.M. Ortiz and M. Olivares: "A vision based navigation system for an agricultural field robot," IEEE 3rd Latin American Robotics Symposium (LARS), pp.106-114, 2006.
- [10] L. de Oliveira Neris, V.O. Roda and O. Trindade: "A method for agricultural machine guidance on row crops based on the vanishing point," IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), pp.1-6, 2007.
- [11] G. Welch and G. Bishop: An introduction to the Kalman filter, Technical report, University of North Carolina, 2006.
- [12] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox: Probabilistic Robotics. The MIT Press, 2005.
- [13] T. Fukao: "Inverse optimal tracking control of a nonholonomic mobile robot," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '04), vol.2, pp.1475-1480, 2004.
- [14] 倉鋪, 深尾, 大須賀, 石山, 竹原, 今井: "不整地を想定した移動ロボットのロバスト制御", 日本機械学会論文集 C 編, vol.74, no.747, pp.2705-2712, 2008.
- [15] C. Samson: "Path following and time-varying feedback stabilization of a wheeled mobile robot," International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'92), 1992.
- [16] E.D. Sontag: Mathematical Control Theory. Springer, 1998.
- [17] R. Sepulchre and M. Jancovic: Constructive Nonlinear Control. Springer, 1996.
- [18] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi: "A stable tracking control method for a non-holonomic mobile robot," Proceedings IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'91), 1991.

倉鋪圭太 (Keita Kurashiki)

2007 年神戸大学工学部機械工学科卒業。2008 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。同年同大学大学院博士後期課程に進学。2010 年より日本学術振興会特別研究員 (DC2)。車両などの移動ロボットの自律化に関する研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

永田純平 (Junpei Nagata)

2009 年神戸大学工学部機械工学科卒業。車両などの移動ロボットの画像に基づく制御に関する研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

神谷剛志 (Tsuyoshi Kamiya)

1979 年中央大学理工学部電気電子工学科卒業。同年日本特殊陶業 (株) 入社。1986 年星野楽器 (株) 入社。1987 年ヤマハ発動機 (株) 入社。車載電子制御システム開発を経て現在に至る。自動車技術会正会員。

深尾隆則 (Takanori Fukao)

1992 年京都大学工学部航空工学科卒業。1994 年同大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了。1996 年同大学大学院博士後期課程中退。同年助手となり、同大学大学院情報科学研究科助手を経て、2004 年神戸大学工学部機械工学科助教授。2007 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻准教授。この間、2001-2003 年米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員。非線形制御とその応用などに関する研究に従事。博士 (情報学)。システム制御情報学会、日本機械学会、自動車技術会、情報処理学会、IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

石山健二 (Kenji Ishiyama)

1998 年名古屋大学工学部機械工学科卒業。2000 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。現在ヤマハ発動機 (株) でロボットの制御システムの研究開発に従事。計測自動制御学会会員。

村上則幸 (Noriyuki Murakami)

1991 年東京農工大学農学研究科修士課程修了。同年農林水産省農業研究センター入所。1999 年より北海道農業試験場に勤務。現在北海道農業研究センター水田作研究領域 上席研究員。2000 年より 1 年間米国 CMU ロボット工学研究所客員研究員。農業用ロボットなどの研究に従事。2001 年農業機械学会研究奨励賞。農業機械学会、フルードパワーシステム学会、農業学会会員、博士 (農学)。(日本ロボット学会正会員)