

画像による無人車の不整地自律走行技術と果樹農業への活用提案

Image-based autonomous navigation technology for unmanned vehicles on uneven ground and a proposal for use in orchard operations

石山 健二 吉田 睦 深尾 隆則 村上 則幸

要旨

車輪が路面から受ける外乱が大きく、草や樹木の枝葉などが車両周囲状況の安定した計測を阻む不整地において、実用的な無人車の自律走行技術は確立されていない。我々は果樹園での農作業支援を想定し、比較的安価でシンプルな構成により、厳しい不整地環境に対応した技術を開発し実機検証してきた。

本稿では上記取り組みの1つである、全方位カメラ画像による無人車の直接制御方法について提案する。また応用例として調査用カメラを搭載した無人車システムと果実検出手法について紹介する。

Abstract

As of yet, there is no established technology for practical, autonomous navigation of an unmanned vehicle through rough terrain where external disturbances like slopes, slippage and uneven ground in particular greatly affect the tires, and elements like overgrown weeds and tree branches/leaves make it difficult to obtain constantly reliable detection of conditions around the vehicle. With intent to support agricultural work in orchards, we have developed and performed verification tests of an autonomous navigation technology in a system that has a simple structure, is comparatively inexpensive and capable of operation in severe uneven ground conditions.

As one part of the pursuit described above, in this report, we propose a method for direct control (steering) of an unmanned vehicle based on images from an omnidirectional camera. As an example of practical use, we introduce the autonomous navigation system for an unmanned vehicle with a surveillance camera and a method for detecting the fruit of trees.

1 はじめに

農業従事者の減少、高齢化、耕作放棄地の拡大といった問題を抱える中、我が国の果物の品質や生産性を維持する手段の1つとして、無人車を活用した作業支援が挙げられる。

我々は作業の性質に応じて下記2つの手法を提案した^[1]。いずれもコストや果樹の枝葉といった遮蔽物の影響を考慮し、無人車の制御で一般的なRTK-GPSや慣性計測装置(IMU)、方位センサを用いず、比較的安価なカメラまたは2次元レーザレンジファインダ(以下、LRF)のみを用いる。

【手法1】運搬支援や薬剤噴霧、施肥など、直線的な移動を伴う作業を想定し、櫛形経路(図1)を比較的高速(最大5m/s)で走行する。速度が高いのである程度離れた木の情報が必要であり、事前マップとLRFを用いて自車両の位置と向きを推定し制御する。また速度が高くなるほど路面から受ける外乱の影響も増大するので、それに対応した制御手法を採用する。

詳細^[2,3,4,5,6]は割愛するが、取組みの一部を図2~5に紹介する。図2は下草や枝葉が茂る果樹園での自律走行の様子を、図3,4はそれぞれ、このような厳しい環境で自己位置推定し、

高速走行およびジグザグ走行した結果を示す。図5は線形ロバスト制御^[4]を適用し、厳しい凹凸環境で経路追従している様子である。

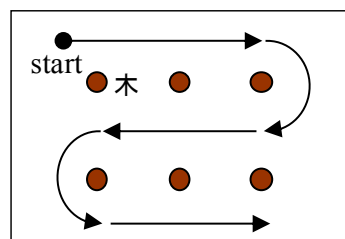


図1 手法1による走行経路



図2 下草や枝葉が茂る果樹園で樹幹との位置関係を認識し自律走行(最大5m/s)

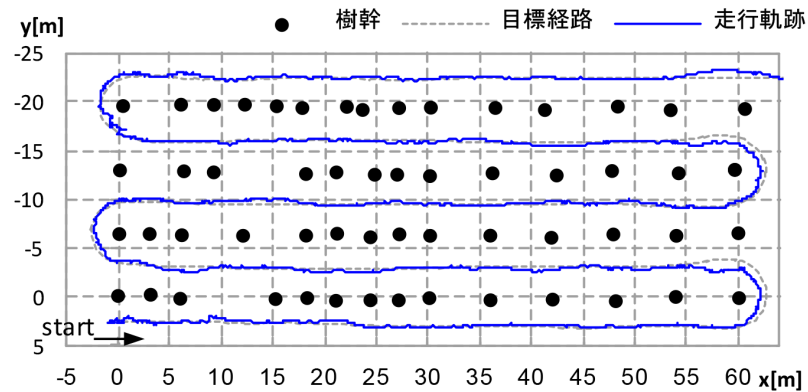


図3 図2の果樹園楕円経路で5m/s 自律走行
(軌跡は樹幹マップと LRF を用いた推定値。一部ぎざぎざしているが実際は滑らかに走行)

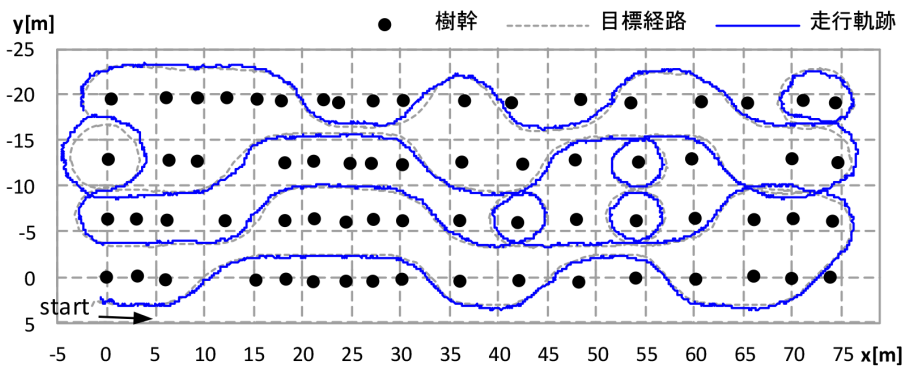


図4 図2の果樹園ジグザグ経路で2m/s 自律走行
(軌跡は樹幹マップと LRF を用いた推定値)



図5 左右輪で位相が異なる深さ15cmの
凹凸路面で経路追従実験 (最大3.5m/s)

【手法2】生育調査や薬剤スポット散布などを想定し、円旋回を中心とした経路(図6)を低速(1m/s前後)で走行する。果樹に対し直接的かつ高精度に作業を行いたいの、位置情報を介さず画像上で直接制御を行う“Image-based 制御”を採用した。2～3章で手法の詳細と実験結果を、4章で果実検出カメラと組み合わせた応用例を紹介する。

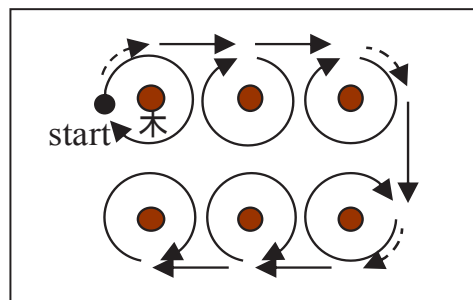
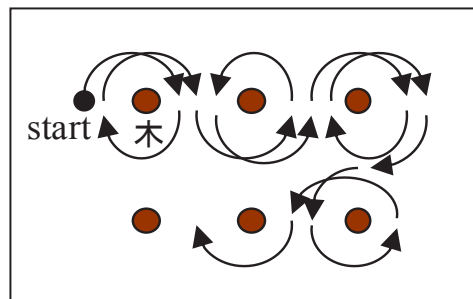


図6 手法2による走行経路

2 Image-based制御

Image-based制御は位置情報を介さず、画像内の対象物の見え方が目標状態になるよう直接制御する手法である。位置を取得する際に生じる誤差の影響を受け難く、対象物に対して直接作業を行いたい場合に適している。

本研究では作業対象の木を中心に旋回し、木から木に移り渡りながら巡回走行する。車両の動作を決定する際、対象の木だけでなく周辺の木も見必要があるため、それらが視野から外れないよう、表1に示す全方位カメラをその光軸が鉛直上向きになるよう搭載した(図7,8)。全方位画像を用いて、ある木を中心に旋回する場合の概念を図9に示す。



図7 無人車に搭載した全方位カメラ
(左図の番号は表1に対応)

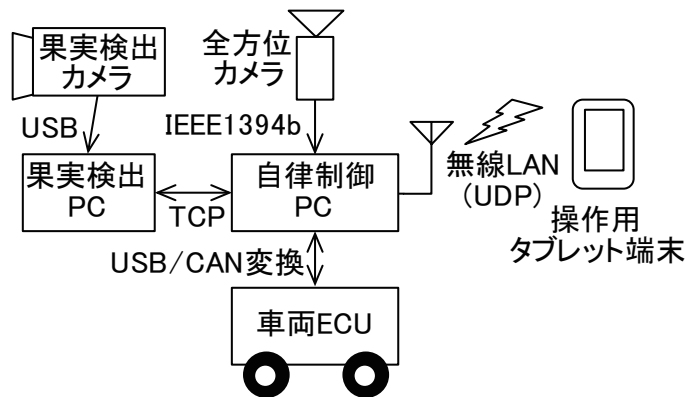


図8 無人車の構成

表1 全方位カメラの構成

構成品	メーカー	型式と主な仕様
①全方位ミラー	(株)映蔵	Hyper70：ミラー径 70mm
②レンズ	富士フイルム(株)	フジノン HF12.5SA-1
③カメラ	Point Grey Research, Inc.	Grasshopper GRAS-50S5C-C カラー, 500 万画素, 15FPS

1. 画像上で直接制御



2. その結果、車両が目標軌道上を走行する。

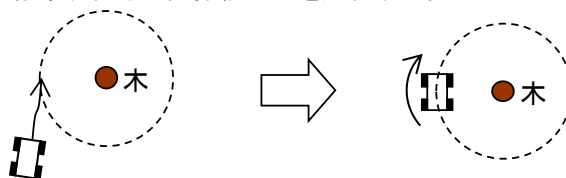


図9 Image-based 制御の概念

2-1. 制御器の導出

図10に示す前輪操舵型の車両モデルを考える。車両が平面内を移動し横滑りがないと仮定すると運動学モデルは式(1)で表される。以下、車両モデルに関する記号の意味を表2に示す。

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

ここで、

$$\omega = \frac{v}{L} \tan \phi \quad (2)$$

である。

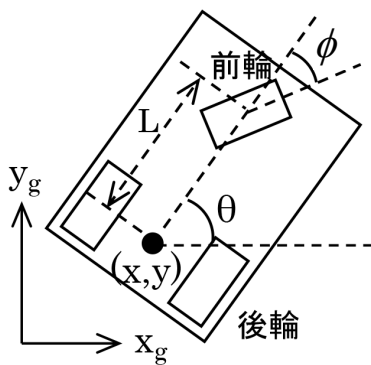


図10 車両モデル(前輪を集約し1輪で表現)

表2 本文中の記号(車両モデル)

記号	意味
x, y	グローバル座標系 $O_g - x_g y_g$ における車両後輪軸中心座標
θ	x_g に対する車両の向き
ω	車両角速度
v	車両進行方向速度
ϕ	操舵角
L	ホイールベース

我々は地面に固定された目標点 $P_t(x_r, y_r)$ を中心に車両を一定半径で円旋回させたい。そこで車両後輪軸中心と P_t を結ぶ線分に直交し、 P_t を通る仮想的な直線Aを導入すると、この状態は車両座標系 $O_v - x_v y_v$ から見て、直線Aを x_v 軸と平行かつ原点との距離を一定に保つことと同じである(図11)。以下、車両と直線Aの関係を表す記号の意味を表3に示す。

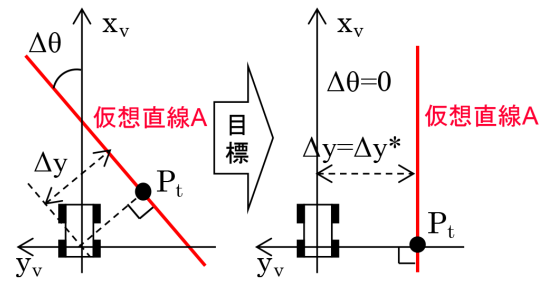


図11 旋回時、車両座標系から見た仮想直線

表3 本文中の記号(車両と直線Aの関係)

記号	意味
x_r, y_r	グローバル座標系 $O_g - x_g y_g$ における目標点 P_t の座標
X_t, Y_t	全方位画像座標系 $O - XY$ における目標点 P_t の座標
$\Delta x, \Delta y$	それぞれ車両中心と直線Aとの前後方向、横方向誤差
$\Delta \theta$	x_v 軸と直線Aのなす角
θ_r	直線Aとグローバル座標系の x_g 軸とのなす角
ω_r	直線Aの角速度
Δy^*	目標旋回半径
h	カメラの地上高にあたるパラメータ

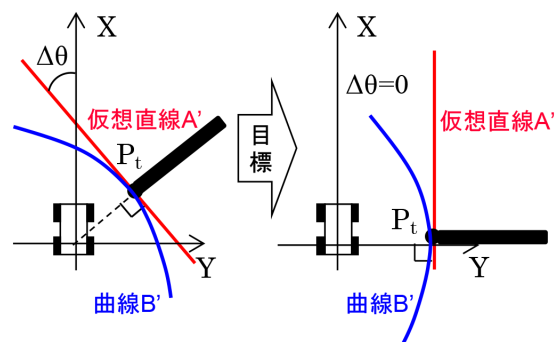


図12 旋回時、全方位画像座標系から見た仮想直線

次に車両座標系での目標を全方位画像座標系での目標に置換えることを考える。全方位画像座標系 $O-XY$ から見て、地面上の直線は次の二次方程式で表される^[7]。

$$B_0X^2 + B_1Y^2 + 2B_2XY + 2B_3X + 2B_4Y + 1 = 0 \quad (3)$$

ここで $B_i(i=0,\dots,4)$ はカメラパラメータを含む係数である。直線 A が全方位カメラにより画像平面上に投影される曲線を B' とする。曲線 B' は式(3)の二次曲線で表される。また画像座標系での目標点 $P_i(X_i, Y_i)$ における曲線 B' の接線を直線 A' とする。全方位カメラの性質により、車両座標系での直線 A と画像座標系での直線 A' の傾きは一致する。つまり画像座標系から見た目標は、直線 A' を画像座標系の X 軸と平行かつ原点との距離を一定に保つことになる(図12)。

次に状態方程式の導出について考える。車両と直線 A との間に以下の幾何学関係が成立つ。

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x - x_r) \cos \theta_r + (y - y_r) \sin \theta_r \\ \Delta y &= -(x - x_r) \sin \theta_r + (y - y_r) \cos \theta_r \\ \Delta \theta &= \theta - \theta_r \end{aligned} \quad (4)$$

ここで車両は P_i から見て常に直線 A と垂直な方向にあるので、 $\Delta x=0$ である。一方、 B_3, B_4 は次式で表される^[7]。

$$B_3 = -(h \cdot \sin \Delta \theta) / \Delta y \quad (5)$$

$$B_4 = -(h \cdot \cos \Delta \theta) / \Delta y \quad (6)$$

式(5)(6)より次式が成立つ。

$$\Delta y = h / \sqrt{B_3^2 + B_4^2} \quad (7)$$

$$\Delta \theta = \tan^{-1} (B_3 / B_4) \quad (8)$$

画像平面上の直線 A' は P_i を通ることと式(8)より、次式で表される。

$$Y = -\frac{B_3}{B_4}(X - X_i) + Y_i \quad (9)$$

この傾きと式(3)による曲線 B' 上の P_i における接線の傾き $\left. \frac{dY}{dX} \right|_{X=X_i, Y=Y_i}$ が一致するので、 B_3, B_4 は次のように画像から得られる X_i, Y_i を用いて表すことができる。

$$B_3 = -\frac{X_i}{2(X_i^2 + Y_i^2)} \quad (10)$$

$$B_4 = -\frac{Y_i}{2(X_i^2 + Y_i^2)} \quad (11)$$

最終的な状態方程式は、式(4)を用いて式(5)(6)を時間微分することにより次式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \frac{v}{h} \begin{bmatrix} B_3^2 - B_4^2 \\ 2B_3B_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_4 \\ -B_3 \end{bmatrix} \omega \quad (12)$$

画像座標系での制御目標は、車両座標系での目標 $\Delta \theta \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow \Delta y^*$ と式(5)(6)を用いて、次のように置き換えられる。

$$B_3 \rightarrow 0, B_4 \rightarrow B_4^* = -h / \Delta y^* \quad (13)$$

次に式(13)の目標状態を達成する制御入力をリヤプノフ関数に基づいて決定するが、その関数の候補として次式を与える。

$$V = \frac{1}{2} B_3^2 + \frac{1}{2} (B_4 - B_4^*)^2 \quad (14)$$

これを時間に関して微分すると

$$\dot{V} = \frac{v}{h} B_3 (B_3^2 + B_4^2 - 2B_4B_4^*) + B_3B_4^* \omega \quad (15)$$

ここで $\dot{V} \leq 0$ となるよう制御入力 ω を次式で与える。

$$\omega = -\frac{1}{B_4^*} \left\{ k B_3 + \frac{v}{h} (B_3^2 + B_4^2 - 2B_4B_4^*) \right\} \quad (16)$$

この時

$$\dot{V} = -k B_3^2 \leq 0 \quad (17)$$

である。ここで k は任意の正数でありチューニングパラメータである。これに式(10)(11)より求まる B_3, B_4 および式(2)を合わせ、車両ECUに与える指示操舵角が決まる。

念のため、式(16)で与えられる制御入力により安定性が保証されることを確認する。 V が有界かつ $\dot{V}$ が一様連続なので、Barbalat's lemma^[8]より $\dot{V} \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となり、式(17)より、 $B_3 \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となる。したがって式(16)より、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega = -\frac{v}{hB_4^*} (B_4^2 - 2B_4B_4^*) \quad (18)$$

となる。 $\dot{B}_3 \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となることと、式(12)、(18)から、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{B}_3 = -\frac{v}{h} B_4^2 \left(1 - \frac{B_4}{B_4^*} \right) = 0 \quad (19)$$

$B_4 \neq 0$ なので、式(19)より $B_4 \rightarrow B_4^* (t \rightarrow \infty)$ となり、 B_3, B_4 がそれぞれ目標値に収束することが保証される。

なお式(13)の目標状態になっている場合の制御入力は式(16)より、 B_4^*/h となるが、操舵特性のばらつきや路面滑り等により、実際に必要な入力と一致しない場合がある。そこで一定の補正係数を乗じるか、適応制御を導入^[9]するなど対応している。

2-2. Image-based 制御を用いる際の巡回手順

無人車はその真横を通過する木をカウントしながら、巡回走行のための次の動作を決定する。例えばある木を中心に巡回する場合、巡回中心木と反対側にある4近傍の木をカウントする。所定のカウンタ数に達したら目標を次の木へ移し、巡回方向を逆に切替えるだけであり、巡回のための上記制御則のみを用いて巡回走行を実現できる(図13)。この手法は樹木がある程度整った格子状に並んでいることが前提であるが、事前に木の正確な位置を計測する必要がないというメリットがある。

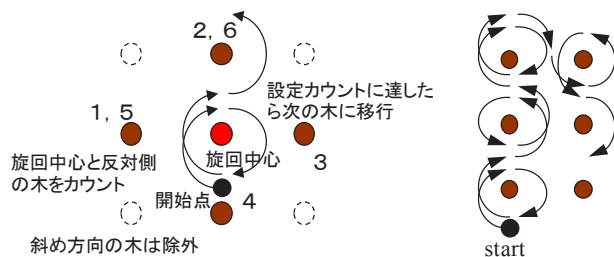


図13 Image-based 制御による巡回手順

2-3. 全方位カメラによる木の検出

時間帯や天候によるコントラストの変化に対して安定的に木を検出するため、果樹園環境中に少ない赤色のシートをマークとして木の根元に巻きつける(図14左)。RGB情報(赤緑青)のRの比率に基づいてマークを抽出、さらにラベリングによって面積を求め、遠方のマークやマーク以外のノイズを除去する(図14右)。

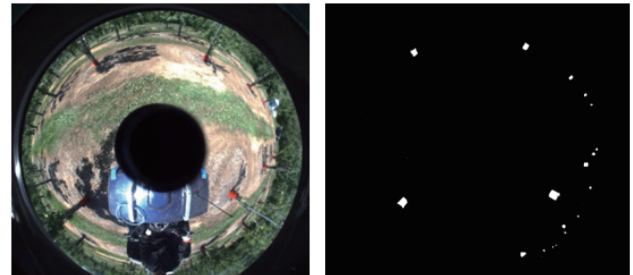


図14 全方位カメラによる木(赤マーカ)の検出

3 果樹園での自律走行実験

前章の手法による果樹園(図15)での走行軌跡を図16に示す。目標巡回半径は2.5m、設定車速は1m/sである。参照データとして1周波RTK-GPS(20cm精度)を用いた。また画像上の状態量 B_3, B_4 から計算した横偏差 Δy を図17に示す。図16,17中の数字はスタートから順に数えた切返し地点の番号である。切返し地点の誤差がピーキーになっているがプログラム上の問題で無視して構わない。

誤差は概ね20cm以内で、参照軌跡から分かる通り9回目の切返し地点まではきれいな円を描いて安定走行している。画像など情報収集を行うには十分な精度といえる。それ以降で軌跡が乱れている原因として、低速で切返しを繰り返したことによる操舵モータの過熱等が考えられる。

なお、現在はスライディングモード制御や適応制御を導入し、路面凹凸や車両特性の変動への対応力を高めている^[9]。またカメラの代りにLRFによる点群を真上から見た仮想的な画像に対して上記手法を適用^[10]することでマークを用いず、高精度かつ障害物回避^[11](図18~21)を含む自由度の高い自律走行を実現している。



図 15 実験を行った北海道農業研究センターの果樹園（洋梨）

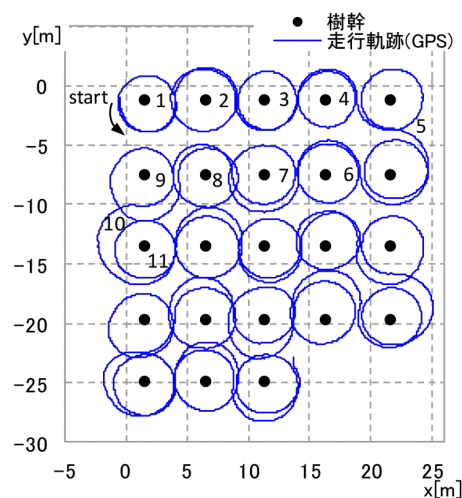


図 16 Image-based 制御による
果樹園走行軌跡

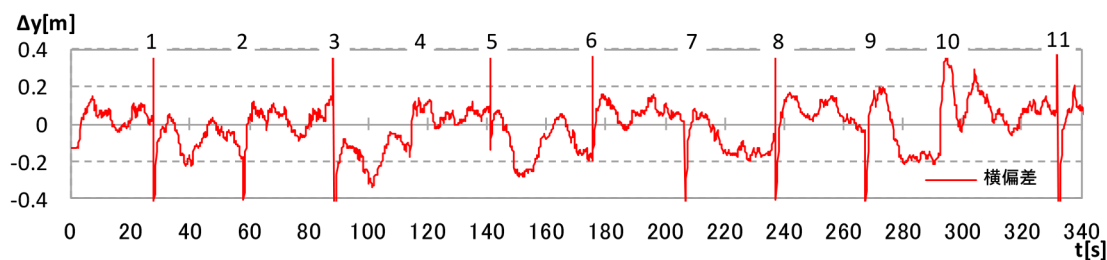


図 17 果樹園走行時の横偏差
(画像上の状態量 B_3, B_4 から計算)

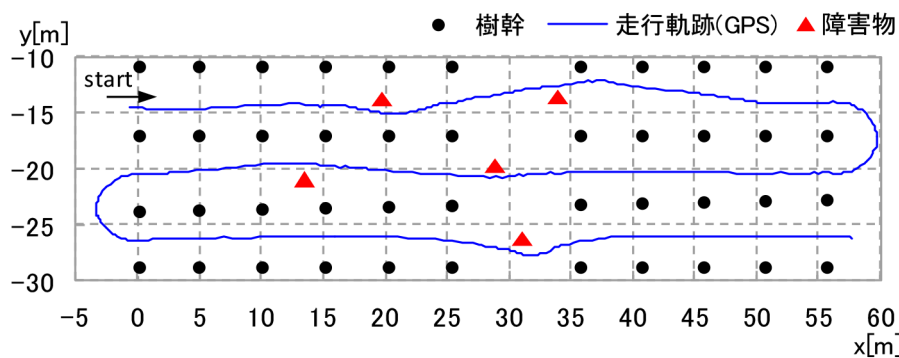


図 18 櫛形経路で障害物回避
(3.5m/s. レーザ点群 Image-based 制御)



図 19 櫛形経路で障害物回避

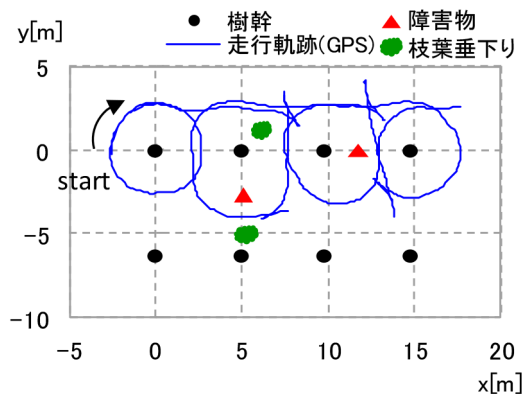


図 20 巡回経路で後退を含む障害物回避
(枝葉垂下りによる誤回避含む。
レーザ点群 Image-based 制御)



図 21 後退による障害物回避
(注：図 20 に対応する写真ではない)

4 カメラ画像による果実検出

無人車が自動巡回しながら収穫対象の果実を検出し、着果数や状態を把握できれば、栽培管理や出荷計画策定、保険調査などに役立つと期待される。無人車に搭載可能な調査カメラの画像による果実検出手法と実験結果について述べる。

4-1. 画像処理の手法

北海道農業研究センターで栽培されている洋梨を検出対象とする。サンプル中には果実と葉が同系色の品種が多く、色による識別が困難なため、形状的な特徴に着目した認識手法を採用した。また洋梨は近赤外(NIR)域で果実部の反射率が葉など他の部分と比較して高い。そこでNIR画像に対して下記2段階の処理を行うことで、着果位置や葉との重なりなどにより、形状がばらついている画像からの検出精度向上を目指した。これら処理の概略を図22に示す。

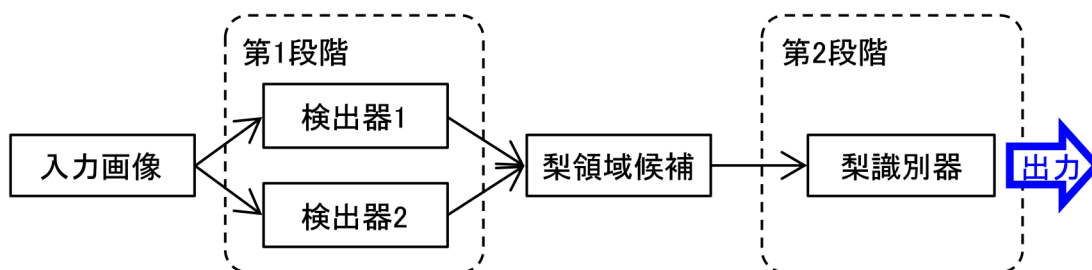


図 22 果実検出処理の概略

【第1段階】Haar-like 特徴量^[12,13]により果実の候補領域を特定する。Haar-like 特徴量は近接する矩形領域間の明暗差を表すもので、顔検出によく用いられる。今回は、1つの学習モデルで検出できなかった果実の画像を新たな教師画像群として別モデルを生成し、最終的な出力はこれら2つのモデルで検出した領域とする。

【第2段階】第1段階で検出された梨の候補領域に対して、HOG(Histograms of Oriented Gradients)特徴量^[14,15]とSVM(Support Vector Machine)^[16]を用いた識別をおこなう。HOG 特徴は局所的な勾配方向ヒストグラムにより対象物の形状を大まかに表すもので、人の全身像など、よりクラス内変動の大きい対象の検出によく用いられる。また学習用の非梨画像には、前段のHaar-like による検出器が誤検出するものを与える。

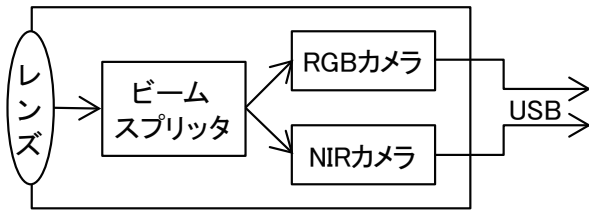


図 23 果実検出用 RGB-NIR カメラ



図 24 果実検出用カメラを搭載した無人車

4-2. 果実検出実験と結果

実験には図23,24に示すRGB-NIR カメラを用いた。これは画角78度のレンズにより至近距離から果樹全体を撮影でき、カラーおよび近赤外画像を同時に取得できる。学習用に梨画像、非梨画像それぞれ2000枚、評価用に教師画像以外の1803個の梨が含まれる画像を用いた結果、最終的な検出数は1069つまりトータルでの再現率は6割であった。識別結果の例を図25に示す。

引き続き調査と検討が必要であるが、本手法は色情報に依存しないので、今後改善が進めば梨だけでなく広く果実全般への応用が期待できる。

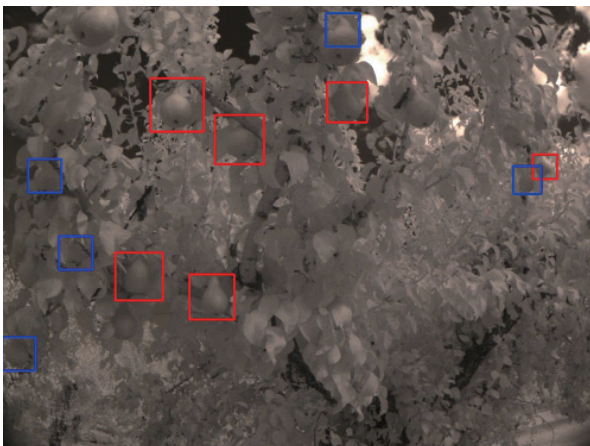


図 25 梨領域候補に対する識別結果の例
(赤：梨と識別、青：非梨と識別)

4-3. 無人車との連動システム

今回の評価用画像は全て人手により撮影したが、果実検出用PCは車両制御用PCとLAN 接続され(図8)、車両の動と連動してシャッターを切ることでもある。例えば図26のように木の周囲を巡回しながら90度毎に正確に停車し撮影することができる。停車する理由は凹凸による振動でぶれるのを防ぐためである。

今後無人車から撮影した画像でも評価し、生育状況の把握や収穫のために広く果樹園で活用できるよう改善したい。

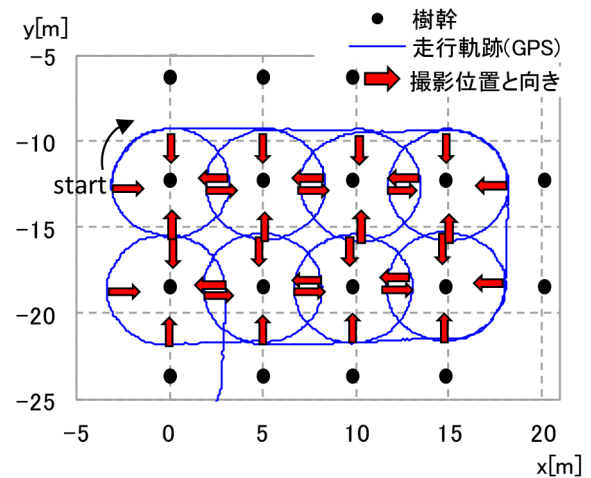


図 26 果実検出カメラ撮影位置の例
(レーザ点群 Image-based 制御による実走行軌跡を示すが、この時果実検出カメラ非搭載)

5 おわりに

比較的安価な構成で不整地の路面外乱や計測の不確かさ、車両特性の変動に対応した自律走行技術を開発してきた。今回紹介した手法を含め実環境で評価し、作業タイプや走行環境に応じたような手段を取るべきか知見が得られている。さらに果実検出といった応用実験と合せて、管理や作業支援への活用可能性を示した。

課題として、今回紹介した無人車は当社製大型バギー車をベースとしており、必ずしも農業用途に適しているとは言えない。当社では様々なタイプの車両をラインアップしており、将来的に目的に応じた無人車システムを提案していきたい。また農業用無人ヘリとのプロトコルやUI(ユーザインターフェース)の共通化、情報システムの整備など通じて当社無人ビークルのさらなる発展を目指す。

■謝辞

本共同研究において多大なご協力を頂いた神戸大学大学院の深尾隆則准教授、同研究室学生の皆様、北海道農業研究センターの村上則幸上席研究員、他関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

■参考文献

- [1] 深尾, 石山, 青木, 村上, 果樹園UGV, 第55回自動制御連合講演会 (2012)
- [2] 石山, 神谷, 深尾, 倉舗, パーティクルフィルタによる自己位置同定とロバスト制御を組合せた果樹園におけるUGV巡回走行, ヤマハ発動機技報, No.46 (2010), <http://global.yamaha-motor.com/jp/profile/craftsmanship/technical/publish/no46/pdf/gr04.pdf>
- [3] 倉舗, 深尾, 永田, 石山, 神谷, 村上, 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, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.4, pp.428-435 (2012)
- [4] 加藤, 深尾, 青木, 石山, 村上, UGVのゲインスケジュールド H_{∞} 制御による不整地での経路追従, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2012)
- [5] 吉本, 深尾, 青木, 石山, 村上, ゲインスケジュールド H_{∞} 制御によるUGVの速度制御, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2012)
- [6] 開田, 深尾, 石山, 神谷, 村上, Path Following手法による牽引車両の後退制御, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2012)
- [7] H. H. Abdelkader, Y. Mezouar and P. Martinet, Image-Based Control of Mobile Robot with Central Catadioptric Cameras, Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3353-3358 (2005)
- [8] J.-J. E. Slotine and W. Li, Applied nonlinear control, Prentice hall (1991)
- [9] 開田, 永田, 倉舗, 深尾, 石山, 神谷, 村上, 果樹園における全方位カメラ画像に基づく適応スライディングモード制御, 日本機械学会論文集C編, Vol.78, No.789, pp.546-558 (2012)
- [10] 開田, 倉舗, 深尾, 石山, 神谷, 村上, 果樹園UGVのレーザレンジファインダを用いた巡回制御系の一設計法, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2011)
- [11] 深尾, 石山, 青木, 村上, 果樹園UGVの実用化に向けて,

第57回システム制御情報学会研究発表講演会 (2013)

- [12] Viola, P., Jones, J. M., Robust Real-Time Face Detection, International Journal of Computer Vision, 57(2), pp.137-154 (2004)
- [13] Lienhart, R., Maydt, J., An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection, Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Image Processing, Vol.1, pp.900-903 (2002)
- [14] Dalal, N., Triggs, B., Histograms of Oriented Gradients for Human Detection, Proc. of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.886-893, (2005)
- [15] 藤吉 弘亘, 動画像理解技術基礎講座, <http://www.vision.cs.chubu.ac.jp/VU/pdf/VU6-FeatureExtraction.pdf>
- [16] Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin, A Practical Guide to Support Vector Classification, http://www.cs.sun.ac.za/~kroon/courses/machine_learning/lecture9/guide.pdf

■著者



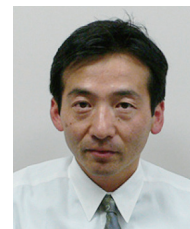
石山 健二
Kenji Ishiyama
事業開発本部
UMS事業推進部
開発部



吉田 睦
Makoto Yoshida
技術本部
研究開発統括部
イノベーション研究部



深尾 隆則
Takanori Fukao
神戸大学大学院
工学研究科
機械工学専攻



村上 則幸
Noriyuki Murakami
北海道農業研究センター
水田作研究領域