果樹園 UGV の全方位カメラの画像に基づく制御

永田 純平^{*1} 開田 宏介^{*1} 倉鋪 圭太^{*1} 深尾 隆則^{*1}
石山 健二^{*2} 神谷 剛志^{*2} 村上 則幸^{*3}

Image-based Control of a UGV in an Orchard using a Central Catadioptric Camera

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

Recently the necessity of autonomous or highly functional agricultural equipments is increasing because of decrease and aging of labors for farming. The development of autonomous vehicles in an orchard is required as one of the equipments because an orchard is usually on a hill or mountain where it is very tough for farmers to work. In this research, a new design method of an unmanned ground vehicle (UGV) in an orchard is proposed by using image-based control with a central catadioptric camera. A central catadioptric camera is very effective to keep target objects in the camera field of view because of its wide area view. The effectiveness of our proposed method is confirmed by experimental results in an orchard.

Key Words: Autonomous Vehicle, Orchard, Central Catadioptric Camera, Image-based Control

1. はじめに

我が国の農業を取り巻く状況は深刻である。農業従事者の減少と高齢化が顕著であり、効率的な農業生産システムの確立が求められている。そのため、農業の自動化・省力化を目的とした自律型農作業車両に関する研究が盛んに行われている [1]。本論文では、果樹園内の巡回を目的とした自律走行車両の全方位カメラの画像に基づく制御系設計法を提案する。

果樹園での農作業の自動化に関しては、農薬散布や果樹の収穫などが報告されている [2]~[4]。また、本研究グループの先の研究では、レーザレンジファインダを用いた果樹園 UGV (Unmanned Ground Vehicle) として、果樹を検出して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い、非線形制御理論に基づくロバストな制御により木の列に沿って走行する方法を提案している [5]。一方、本論文では、全方位カメラにより木を検出し、画像に基づく制御によって、一本の木の周りを旋回することを繰り返して木から木へと移っていくことにより

果樹園内を巡回するというまったく新しいシステムを提案する。

カメラを用いた制御手法は、カメラの画像から車両の位置・姿勢を算出し、それに基づいて制御を行う Position-based 制御と、車両の位置・姿勢を陽に取り扱わず、画像平面上に定義した状態量を用いて車両を制御する Image-based 制御とに分けられる。このうち画像に基づく制御では、画像から位置への変換を行わず、カメラのキャリブレーションエラーに対するロバスト性が高いという特徴がある [6]。

本論文では、走行時に目標となる木がカメラの視野から外れないように全方位カメラを用いる。これまでに全方位カメラを用いた画像に基づく制御が提案されている [7] [8] が、これらの方法では、制御に用いる状態量を求めるのに実際に走行面上の直線や曲線を必要としているのに対し、本提案手法では走行軌道は円軌道に限られるが、仮想的な直線や曲線を設定することにより、走行面上の点のみを用いて制御を行っている。

以上のような手法を用い、パイワイヤ化された車両を用いた果樹園での実験により本提案手法の有効性を示す。第 2 章で車両とカメラのモデルについて述べ、第 3 章で制御手法について述べる。そして、第 4 章で果樹の検出カウントの方法、第 5 章で UGV を用いた実験について述べ、最後に第 6 章でまとめを述べる。

2. 車両モデルとカメラモデル

本章では、車両とカメラのモデルおよび全方位カメラによる直線の射影方程式について述べる。

原稿受付 2011 年 4 月 9 日

^{*1}神戸大学大学院工学研究科

^{*2}ヤマハ発動機

^{*3}農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター

^{*1}Graduate School of Engineering, 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。

Fig. 1 Model of front-steering vehicle

2.1 車両モデル

車両の運動学モデルとしては、Fig. 1 に示す前輪操舵型のモデルを用いる [9]。以下では、車両は平面内を運動するものとし、ロール・ピッチ運動は考慮しない。ここで、ワールド座標系 $O_w-x_wy_w$ における車両後輪軸中心の座標を $[x, y]^T$ 、前輪軸中心の座標を $[x_1, y_1]^T$ 、 x_w 軸に対する車両の角度（反時計回りを正とする）を θ 、車両の進行方向速度を v 、操舵角を ϕ 、ホイールベースを L とする。前後輪が横滑りしないという仮定をおくと、次の二つの速度拘束を得る。

$$\begin{cases} \dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \\ \dot{x}_1 \sin (\theta + \phi) - \dot{y}_1 \cos (\theta + \phi) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

また、進行方向速度 v に関して次の関係が成り立つ。

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta = v \quad (2)$$

一方、幾何学的な関係から次式が成り立つ。

$$\begin{cases} x_1 = x + L \cos \theta \\ y_1 = y + L \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

式 (1)、(3) から x_1, y_1 を消去し、式 (2) を用いると次の関係を得る。

$$\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \phi \quad (4)$$

以上より、車両の角速度を ω とすると、運動学モデルは次式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、

$$\omega = \frac{v}{L} \tan \phi \quad (6)$$

である。

2.2 全方位カメラのモデル

本論文で扱う全方位カメラは、Fig. 2 のようにカメラの光軸と双曲面ミラーの対称軸が一致するように両者を組み合わせたものである。カメラの光学中心を C 、ミラーの焦点を M とし、それらを原点とする座標系をそれぞれ $\mathcal{F}_c, \mathcal{F}_m$ とする。このとき、ある点の $\mathcal{F}_m$ における座標 $P_m = [x_m, y_m, z_m]^T$ と、画

Fig. 2 Projection of a 3D line

像座標 $\bar{X} = [X, Y, 1]^T$ との関係は次式で表される [7]。

$$\bar{X} = K f(P_m) \quad (7)$$

ここで、

$$f(P_m) = \begin{bmatrix} \frac{x_m}{z_m + \xi \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}} \\ \frac{y_m}{z_m + \xi \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

であり、 K は校正行列、 ξ は双曲面ミラーの内部パラメータである。本論文では、 K は単位行列とし、 P_m と $\bar{X}$ との関係は

$$\bar{X} = f(P_m) \quad (9)$$

で表されるものとする。

2.3 直線の射影方程式

三次元空間上の直線が全方位カメラによってどのように画像平面に射影されるのかを述べる。双曲面ミラーの座標系 $\mathcal{F}_m$ において点 P と単位ベクトル $u = [u_x, u_y, u_z]^T$ によって直線を表すものとする (Fig. 2)。 $n = \overrightarrow{MP} \times u = [n_x, n_y, n_z]^T$ という双曲面ミラーの焦点と直線を含む平面の法線ベクトルを定義すると、次の座標系 $\mathcal{F}_m$ における直線の画像座標系での関係式が求まる [7]。

$$\bar{X}^T \Omega \bar{X} = 0 \quad (10)$$

ここで、 Ω は次式で表される。

$$\Omega = \begin{bmatrix} n_x^2 (1 - \xi^2) - n_z^2 \xi^2 & n_x n_y (1 - \xi^2) & n_x n_z \\ n_x n_y (1 - \xi^2) & n_y^2 (1 - \xi^2) - n_z^2 \xi^2 & n_y n_z \\ n_x n_z & n_y n_z & n_z^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式 (10) の関係式から、次の二次方程式が定義される。

$$A_0 X^2 + A_1 Y^2 + 2A_2 XY + 2A_3 X + 2A_4 Y + A_5 = 0 \quad (12)$$

ただし, s をスケールファクタとして,

$$\begin{cases} A_0 = s(n_x^2(1-\xi^2) - n_z^2\xi^2) \\ A_1 = s(n_y^2(1-\xi^2) - n_z^2\xi^2) \\ A_2 = sn_xn_y(1-\xi^2) \\ A_3 = sn_xn_z \\ A_4 = sn_y n_z \\ A_5 = sn_z^2 \end{cases} \quad (13)$$

である. すなわち, 全方位カメラの場合, 直線の方程式は画像座標系では二次方程式で表されるようになる. ここで, 式 (12) の両辺を A_5 で除して, 次のような二次方程式の形に標準化する.

$$B_0X^2 + B_1Y^2 + 2B_2XY + 2B_3X + 2B_4Y + 1 = 0 \quad (14)$$

ただし, $B_i = A_i/A_5$ ($i = 0, \dots, 4$) である. $n_z = 0$ となる場合, 三次元空間上の直線が画像平面に射影された線が画像の中心を通る. このとき, 全方位カメラの場合には線が見えなくなってしまうため, 以下では $n_z \neq 0$ を仮定する [7].

3. 全方位カメラの画像に基づく車両の制御

本章では, 問題設定と制御則の導出および画像上のパラメータの算出について述べる.

3.1 問題設定と制御則の導出

制御目的は, 車両が地面上に固定された目標点を中心とする一定半径の円軌道上を走行することである. 本研究グループの先の研究では, 全方位カメラを用いた直線および曲線追従制御 [8] を提案しているが, この方法では三次元空間内の線が画像平面に投影された二次曲線と, 画像座標の横軸との交点における接線を求め (Fig. 3), それを縦軸と平行かつ一定距離にするような制御を行っている. 本論文が対象とする環境で画像から得られる情報は, 目標円軌道の中心点の画像上の座標のみであり, 上述の方法で接線を求めることはできない. そこで, 円軌道のみになるが, 全方位カメラの画像に基づく制御による新しい設計法を提案する.

まず, Fig. 4 に示すように, 車両の後輪軸中心から地面に下ろした垂線と地面との交点を原点とし, 車両の前向きに x_v 軸, 左向きに y_v 軸をとるような車両座標系 $O-x_vy_v$ を考える. た

だし, 地面は平面であるとし, x_wy_w 平面と x_vy_v 平面は同一平面上にある. 地面上に固定されている目標点を P_t とし, ワールド座標系 $O_w-x_wy_w$ における座標を $[x_r, y_r]^T$ とする. 以下では, すべての運動はこの平面上で起こっているものとする.

点 P_t を通り, 点 O と点 P_t を結ぶ線分に直交する仮想的な直線を導入する. このとき, 目標状態すなわち目標点 P_t を中心とする一定半径の円軌道上を走行することは, 車両座標系 $O-x_vy_v$ において, この仮想的な直線を x_v 軸に平行に, かつ原点との距離を一定に保つこととなる. この仮想的な直線を直線 A とする. 直線 A が全方位カメラにより画像平面上に投影された曲線を B' とする. ここで, 曲線 B' は式 (14) で表される二次曲線であるとする. さらに, 画像座標系での P_t の射影点 (X_t, Y_t) における曲線 B' の接線を直線 A' とする. このとき, 全方位カメラの性質より, 車両座標系における直線 A と画像座標系における直線 A' の方向は一致する (Fig. 5, 6). こ

Fig. 4 Virtual Line and relative errors

Fig. 5 Virtual line on vehicle coordinate frame

Fig. 3 Projected line and its tangent line

Fig. 6 Virtual line and curve on image coordinate frame

これらのことから、画像座標系での目標状態は直線 A' を画像座標系の X 軸に平行に、かつ原点との距離を一定に保つこととなる。

ここで、現在の直線と目標直線との前後方向、横方向、角度方向の相対誤差をそれぞれ Δx , Δy , $\Delta\theta$ とする。 Δy , $\Delta\theta$ は Fig. 4 のようにとる。仮想的な直線 A とワールド座標系の x_w 軸との角度を θ_r 、直線の回転速度を ω_r とすると、各相対誤差について以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}\Delta x &= (x - x_r) \cos \theta_r + (y - y_r) \sin \theta_r \\ \Delta y &= -(x - x_r) \sin \theta_r + (y - y_r) \cos \theta_r \\ \Delta\theta &= \theta - \theta_r\end{aligned}\quad (15)$$

また、この時間微分は以下となる。

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \Delta x &= v \cos \Delta\theta - v_r + \Delta y \omega_r \\ \frac{d}{dt} \Delta y &= -\Delta x \omega_r + v \sin \Delta\theta \\ \frac{d}{dt} \Delta\theta &= \omega - \omega_r\end{aligned}\quad (16)$$

ここで、

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{x}_r &= v_r \cos \theta_r \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{y}_r &= v_r \sin \theta_r\end{aligned}\quad (17)$$

という関係を用いており、 v は車両の速度、 v_r は目標点の速度である。

ところで、目標点はワールド座標系に固定されているため $v_r = 0$ である。また、目標点から見て常に直線と垂直な方向に車両がある、すなわち前後方向の相対誤差 $\Delta x = 0$ および時間微分 $d/dt \Delta x = 0$ となるために、式 (16) より w_r は次式のように定まる。

$$\omega_r = -\frac{v \cos \Delta\theta}{\Delta y}\quad (18)$$

一方、前章で示した u , n , B_3 , B_4 は以下のように表される [7]。

$$\begin{aligned}u &= \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta \\ \sin \Delta\theta \\ 0 \end{bmatrix} \\ n &= \begin{bmatrix} h \sin \Delta\theta \\ h \cos \Delta\theta \\ -\Delta y \end{bmatrix} \\ B_3 &= -\frac{h \sin \Delta\theta}{\Delta y} \\ B_4 &= -\frac{h \cos \Delta\theta}{\Delta y}\end{aligned}\quad (19)$$

ここで、 h はカメラの地上からの高さに相当するパラメータである。式 (19) の第 3 式、第 4 式より次式が成り立つ。

$$\Delta y = \frac{h}{\sqrt{B_3^2 + B_4^2}}\quad (20)$$

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{B_3}{B_4}\quad (21)$$

また、式 (19) の B_3 , B_4 を時間に関して微分すると式 (16) より次の状態方程式が導かれる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v}{h} B_3^2 - B_4 \omega_r \\ \frac{v}{h} B_3 B_4 + B_3 \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_4 \\ -B_3 \end{bmatrix} \omega\quad (22)$$

ここで、式 (18), (19) より、

$$\omega_r = \frac{v}{h} B_4\quad (23)$$

となり、状態方程式は最終的に次式となる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \frac{v}{h} \begin{bmatrix} B_3^2 - B_4^2 \\ 2B_3 B_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_4 \\ -B_3 \end{bmatrix} \omega\quad (24)$$

ここで、望ましい旋回半径を Δy^* とすると、先の目標状態に関する議論より制御目標は、

$$\begin{aligned}\Delta\theta &\rightarrow 0 \\ \Delta y &\rightarrow \Delta y^*\end{aligned}\quad (25)$$

であるから、式 (19) より画像平面上の目標は次のようになる。

$$\begin{aligned}B_3 &\rightarrow 0 \\ B_4 &\rightarrow B_4^* = -\frac{h}{\Delta y^*}\end{aligned}\quad (26)$$

定理 1 システム (22) に対して制御入力

$$\omega = -\frac{1}{B_4^*} \left(k B_3 + \frac{v}{h} (B_3^2 + B_4^2 - 2B_4 B_4^*) \right)\quad (27)$$

を選ぶと、 $B_3 \rightarrow 0$, $B_4 \rightarrow B_4^* (t \rightarrow \infty)$ が達成される。

証明 リアプノフ関数の候補として次式を考える。

$$V = \frac{1}{2} B_3^2 + \frac{1}{2} (B_4 - B_4^*)^2\quad (28)$$

これを時間に関して微分すると、

$$\dot{V} = \frac{v}{h} B_3 (B_3^2 + B_4^2 - 2B_4 B_4^*) + B_3 B_4^* \omega\quad (29)$$

となる。ここで、制御入力として式 (27) を選ぶと式 (29) は、

$$\dot{V} = -k B_3^2 \leq 0\quad (30)$$

となる。ここで、 k は任意の正数ゲインである。 $\dot{V}$ が有界かつ $\dot{V}$ が一様連続であることから、Barbalat's lemma [10] より $\dot{V} \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となり、式 (30) より、 $B_3 \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となる。したがって、式 (27) より、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega = -\frac{v}{h B_4^*} (B_4^2 - 2B_4 B_4^*)\quad (31)$$

となる。 $B_3 \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$, $\dot{B}_3 \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となることと、式 (24), (31) から、

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{B}_3 &= -\frac{v}{h} B_4^2 + B_4 \left(-\frac{v}{h B_4^*} (B_4^2 - 2B_4 B_4^*) \right) \\ &= \frac{v}{h} B_4^2 \left(1 - \frac{B_4}{B_4^*} \right) = 0\end{aligned}\quad (32)$$

定義より $B_4 \neq 0$ であるから、式 (32) 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。なお、 B_3 , B_4 が有界であることから、式 (20) より $\Delta y = 0$ とならない。□

3.2 画像上のパラメータの算出

画像平面上での直線 A' の方程式は、傾きと点 (X_t, Y_t) を通ることを考慮すると、式 (21) より次式で表される。

$$Y = -\frac{B_3}{B_4}(X - X_t) + Y_t \quad (33)$$

一方で、曲線 B' の (X_t, Y_t) における接線の傾きは、式 (14) より、

$$\left. \frac{dY}{dX} \right|_{X=X_t, Y=Y_t} = -\frac{B_0X_t + B_2Y_t + B_3}{B_2X_t + B_1Y_t + B_4} \quad (34)$$

と求まるが、これが式 (33) の直線の傾きと一致する。すなわち、

$$\left. \frac{dY}{dX} \right|_{X=X_t, Y=Y_t} = -\frac{B_3}{B_4} \quad (35)$$

となる必要がある。

ここで、システム (22) の状態変数 B_3, B_4 を画像上の情報のみで求めたいが、式 (34), (35) などの拘束条件から分かることは、 $B_0 \sim B_2$ のパラメータ、つまり全方位カメラの内部パラメータが既知でないと求めることができない。そこで、内部パラメータを知ることなく、制御目的が達成可能な B_3, B_4 の算出法を考案する。

式 (34), (35) を満足するものとして、以下の関係を仮定する。

$$\begin{cases} B_0X_t + B_2Y_t = 0 \\ B_2X_t + B_1Y_t = 0 \end{cases} \quad (36)$$

また、点 (X_t, Y_t) は二次曲線 B' 上の点であるから次式が成り立つ。

$$B_0X_t^2 + B_1Y_t^2 + 2B_2X_tY_t + 2B_3X_t + 2B_4Y_t + 1 = 0 \quad (37)$$

式 (36), (37) より B_0, B_1 を消去すると次式が導かれる。

$$2B_3X_t + 2B_4Y_t + 1 = 0 \quad (38)$$

ここで、画像座標系の原点と目標点 (X_t, Y_t) を結ぶ直線の傾きより、

$$\frac{B_3}{B_4} = \frac{X_t}{Y_t} \quad (39)$$

という関係があることが分かる。したがって、式 (38), (39) より、

$$\begin{aligned} B_3 &= -\frac{X_t}{2(X_t^2 + Y_t^2)} \\ B_4 &= -\frac{Y_t}{2(X_t^2 + Y_t^2)} \end{aligned} \quad (40)$$

となり、画像から得た X_t, Y_t から B_3, B_4 を求めることができる。

ただし、式 (40) は式 (36) の仮定により得られたので、この B_3, B_4 を式 (20), (21) に代入した際、 $\Delta\theta$ は正しい値となるが、 Δy は実際の値とは異なる。しかし、 Δy^* は式 (26) の B_4^* として画像から望ましい値として設定するため、つまり、UGV を望ましい位置に設置して望ましい B_4^* を求めるため、制御目的の $B_3 \rightarrow 0, B_4 \rightarrow B_4^*$ が達成されると、 Δy は望ましい Δy^* に収束する。このようにカメラの内部パラメータを求めることなく、画像上の情報のみで制御目標を達成することが可能となる。

4. 木の検出・カウントアルゴリズム

今回のタスクの概要は次のとおりである。まず全方位カメラによって木を検出し、その情報を利用して、前章で述べた木の周りを目標半径で旋回する制御を行う。そして、旋回中心となっている木の周りの木をカウントすることで、目標の位置で旋回方向を逆方向に切り替え、次の木に移行する。これを繰り返すことで木の周りを旋回しながら木から木へと移っていく (Fig. 7)。この方法を選択した理由は、旋回を組み合わせることにより、単一の制御則のみを用いて木の周りを回りながら果樹園内を巡回できるためである。以下では、目標物の検出方法とカウント方法について説明する。

4.1 木の検出

実験は Fig. 8 に示す果樹園で行う。果樹園の環境中に少ないと思われる赤色のマーカーを木の根元に設置することで、色情報に基づく検出で木の根元の画像座標を得ることとした。画像の各ピクセルに対して、式 (41) に示す判定式により、RGB 値に基づく閾値処理を行い二値画像を得る。

$$\begin{aligned} R &> a_g G \\ R &> a_b B \end{aligned} \quad (41)$$

ここで、 R, G, B はそれぞれ RGB 表色系における各ピクセルの Red (赤), Green (緑), Blue (青) の値であり、 $0 \leq R \leq 255$,

Fig. 7 Traveling path

Fig. 8 Experimental environment

Fig. 9 Image processing with color information
(upper: original image, lower: processed image)

$0 \leq G \leq 255$, $0 \leq B \leq 255$ である。また, a_g と a_b は比率を表す定数で, 値はどちらも 1.3 と設定した。

閾値処理を行った結果の一例を **Fig. 9** に示す。得られた二値画像に対してラベリングを行い, ラベリングされた各マーカの重心座標を木の画像座標とした。そして, 画像上の検出領域 (**Fig. 10** の扇形領域) 内にある木のうち最も画像中心に近いものを旋回中心とした。

4.2 木のカウンタ

本節では, 木のカウンタの方法について述べる。以下の条件を順番にチェックし, 二つとも満たせばカウンタするものとした。

- (1) 旋回中心の木の逆方向に検出された木が, 画像上に指定した矩形領域内にあるかどうかを調べる。例えば **Fig. 10** において, 実線で示した扇形領域で旋回中心の木を検出しており, この場合破線で示した矩形領域内に木が検出されているかを調べる。 **Fig. 10** の上の図は木がカウンタ領域に入る直前の状態, 下の図はカウンタ領域に入った状態を示している。
- (2) ECU (Electronic Control Unit; 電子制御ユニット) から得られる車速情報を用いて計算した前回のカウンタ時からの推定走行距離が, カウンタ間隔 (90° , 180° , 270°) に応じて決定した値を超えているかを調べる。すなわち, 次の木をカウンタしてもよい位置まで進んでいるかを調べる。2 番目の条件の値は, 目標半径 (2.5 [m]) を基準にした一周の距離から決定している。なお, 旋回方向の切り替えについては, 木のおおよその配置図と走行経路が予め与えられていれば, おおのこの木について何回目のカウンタで次の木に移ればよいか

Fig. 10 Region of count and control on image
(upper: the tree is out of the region of count,
lower: the tree is in the region of count)

が分かるため, そのカウンタ数を設定しておく。この方法では木が格子状に並んでいることが前提となっているが, 部分的に木がない箇所があってもそこを避けるような経路を設定することで走行することが可能である。

5. 果樹園での制御実験

本章では, 前章までで述べたアルゴリズムを車両に実装して北海道農業研究センターの果樹園で行った実験について述べる。

5.1 実験条件

実験には **Fig. 11** に示す制駆動や操舵がバイワイヤ化された UGV を用いた。車両前部に搭載した全方位カメラによって得られた画像上の状態量をもとに, 制御用 PC (IEI 製 Intel Core2 Duo 搭載, メモリ 2 [GB]) で制御入力を計算して式 (6) により操舵角に変換し, CAN を介して車両に速度・操舵角指令を送ることで制御を行う。全方位カメラは, 最大解像度が $2,448 \times 2,048$ の高解像度カメラ (Point Grey Reserch 製 IEEE1394 接続) に双曲面ミラー (映蔵製) を取り付けて周囲をアクリル円筒で覆って保護している。

なお, 画像処理および制御の合計処理速度は $8 \sim 9$ [Hz] であり, 処理時間の大部分は画像処理が占めている。目標半径 $\Delta y^* = 2.5$ [m], 速度 $v = 1$ [m/s], 制御ゲイン $K = 0.3$ とし, ホイールベースは $L = 1.35$ [m] であり, 果樹園内の **Fig. 12** に示す経路を走行した。

Fig. 11 UGV

Fig. 12 Tree map and traveling path

Fig. 13 Original vehicle model

5.2 カメラ位置の補正

ここまでの議論では、Fig. 13 に示すように、全方位カメラと車両の後輪軸中心が一致していると仮定していた。しかし、実際に実験で用いる車両では、カメラは前部に搭載されており、後輪軸の前方 1.8[m] の位置にあるため、Fig. 14 に示すように、後輪軸中心からとカメラ中心からとでは木の見える位置に誤差が生じる。この誤差は、三次元上の線に基づく直線追従や曲線追従 [11] ではほとんど無視できる。しかし本研究では、一つの点から仮想的な直線を求めているため、この誤差により画像上

Fig. 14 Real vehicle model

Fig. 15 Desired state on vehicle coordinate frame

Fig. 16 Desired state on image coordinate frame

の目標状態が正しくなくなり制御できない。そこで、Fig. 14 の関係を考慮して、新しい目標状態を考える。Fig. 15 は車両座標系での、Fig. 16 は画像座標系での目標状態を示している。

以下では、実際にカメラ画像から得られる値に“'”をつけて表すものとする。カメラと後輪軸中心の距離を d とすると、論文 [7] における画像上のパラメータの定義から、次のように拡張できる。

$$\begin{aligned} B'_3 &= -\frac{h \sin(\Delta\theta + \alpha^*)}{\Delta y + d \sin \Delta\theta} \\ B'_4 &= -\frac{h \cos(\Delta\theta + \alpha^*)}{\Delta y + d \sin \Delta\theta} \end{aligned} \quad (42)$$

ここで、 α^* は目標状態にあるときの、カメラ中心から考えた仮想的な直線と車両のなす角である。 B'_3 、 B'_4 がカメラ画像より求まり、式 (19) の第 3 式、第 4 式、式 (42) より Δy 、 $\Delta\theta$ を消去して、後輪軸中心にカメラがあると仮定したときの B_3 、 B_4 を、 B'_3 、 B'_4 を用いて仮想的に求めることができる。

Fig. 17 Vehicle trajectory measured by GPS

Fig. 18 Estimated lateral error

Fig. 19 Estimated orientation error

$$B_3 = -\frac{h \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{B'_3}{B'_4} \right) - \alpha^* \right)}{\frac{h}{\sqrt{B_3'^2 + B_4'^2}} - d \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{B'_3}{B'_4} \right) - \alpha^* \right)} \quad (43)$$

$$B_4 = -\frac{h \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{B'_3}{B'_4} \right) - \alpha^* \right)}{\frac{h}{\sqrt{B_3'^2 + B_4'^2}} - d \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{B'_3}{B'_4} \right) - \alpha^* \right)}$$

これらを式 (27) に代入すれば制御入力が決まる。

5.3 実験結果

GPS による車両位置の測定値を Fig. 17 に示す。ここで、Fig. 17 において $x = -2.5$ [m], $y = 0$ [m] 付近の線の先端が制御開始地点であり、一本目の木を左旋回するところから始まっている。画像から式 (20), (21) を用いて推算した誤差 $\Delta y - \Delta y^*$ および角度 $\Delta \theta$ の推移を Fig. 18, 19 に、GPS の測定値から

Fig. 20 Lateral error measured by GPS

Fig. 21 State variable B_3 Fig. 22 State variable error $B_4 - B_4^*$

Fig. 23 Control input (angular velocity)

計算した誤差 $\Delta y - \Delta y^*$ を Fig. 20 に、状態変数 B_3 , $B_4 - B_4^*$ の推移を Fig. 21, 22 に、制御入力の推移を Fig. 23 にそれぞれ示す。なお、Fig. 18~23 は、制御開始から 3 本目の木を旋回し終わるまでの部分を示している。

Fig. 18, 19 の値は画像から全方位カメラのモデルに基づいて推算した値であり、位置に基づく制御ではこの値を使って制御することになる。一方、本提案手法の画像に基づく制御ではこの値を使わずに Fig. 21, 22 に示される画像上の値を直接利用

している。なお、これらのグラフで一瞬大きな値になっている部分は、旋回方向切替時に誤って 1, 2 フレームの間、遠くの木を検出していることによるものであるが、フィルタ処理により制御性能に大きな影響を与えないようにしている。Fig. 18 は検証用に取得した GPS データから算出した Fig. 20 に比べて変動が大きいことが分かる。また、キャリブレーションの精度によってはさらに大きな誤差を含む可能性もある。本提案手法では、切替直後に軌道が膨らんだ場合でも、その後目標経路に復帰しており、全体を通して見ると目標半径である 2.5 [m] をほぼ維持できている。

なお、木の検出に関して前述の検出法を用いれば、マーカ利用時には天候などの環境変化に対して現状で確実性が高い。マーカを用いない自然環境での検出も試みているが、検出失敗のタイミングによっては木のカウントを間違えることがあるという状況であり、今後確実性の向上を行っていく。

さらに、車両の先頭部分に取り付けた一つのレーザレンジファインダのみを用いて旋回することも試みているが [5] [12], スキャン範囲の問題から木の非常に近くを旋回する必要がある。これらに対して、今回の実験結果から全方位カメラではより安定した旋回が可能であると言える。

6. おわりに

本論文では、全方位カメラの画像に基づく制御系設計法を提案し、UGV に実装して実験を行った。その結果、果樹園内の巡回に成功し、本提案手法が十分な性能を有することを確認した。現在、自然環境での木の検出を精度良く行う手法も開発中であるが、マーカを用いることも現実性があり、両方の可能性を今後検討していく。

参考文献

- [1] 近藤直, 門田充司, 野口伸: 農業ロボット (II) 機構と事例, コロナ社, 2006.
- [2] A. Stentz, C. Dima, C. Wellington, H. Herman and D. Stager: "A system for semi-autonomous tractor operations," *Autonomous Robots*, vol.13, no.1, pp.87-104, 2002.
- [3] J. Baeten, K. Donné, S. Boedrij, W. Beckers and E. Claesen: "Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester," *FSR* 2007, pp.531-539, 2007.
- [4] S. Singh, M. Bergerman, J. Cannons, B. Grocholsky, B. Hamner, G. Holguin, L. Hull, V. Jones, G. Kantor, H. Koselka, et al.: "Comprehensive Automation for Specialty Crops: Year 1 results and lessons learned," *Intelligent Service Robotics*, pp.1-18, 2010.
- [5] 倉鋪圭太, 永田純平, 深尾隆則, 石山健二, 神谷剛志, 村上則幸: "レーザレンジファインダを用いた果樹園 UGV", 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD, 2010.
- [6] S. Hutchinson, G. Hager and P. Corke: "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.12, no.5, pp.651-670, 1996.
- [7] H.H. Abdelkader, Y. Mezouar and P. Martinet: "Image-based control of mobile robot with central catadioptric cameras," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3353-3358, 2005.
- [8] 平松敏史, 倉鋪圭太, 深尾隆則: "全方位カメラを用いた移動ロボットの画像に基づく任意曲線追従制御", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.76, no.764, pp.900-907, 2010.
- [9] 美多勉: 非線形制御入門 劣駆動ロボットの技能制御論, 昭晃堂, 2000.
- [10] J.-J.E. Slotine and W. Li: *Applied nonlinear control*. Prentice hall, 1991.
- [11] 平松敏史, 倉鋪圭太, 深尾隆則: "全方位カメラを用いた移動ロボットの画像に基づく軌道追従制御", 第 9 回計測自動制御学会制御部門大会, 2009.
- [12] 倉鋪圭太, 深尾隆則, 石山健二, 神谷剛志, 村上則幸: "パーティクルフィルタによる自己位置推定と逆最適制御を用いた果樹園 UGV の巡回走行", 第 11 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, 2010.

永田純平 (Junpei Nagata)

2009 年神戸大学工学部機械工学科卒業。2011 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。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)

開田宏介 (Kosuke Kaida)

2011 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自律化に関する研究に従事。同年、同大学大学院博士前期課程に進学。

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)

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。

神谷剛志 (Tsuyoshi Kamiya)

1979 年中央大学理工学部電気電子工学科，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。

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生産支援システム研究北海道サブチーム長，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，農作業学会会員，博士（農学）。（日本ロボット学会正会員）