コーナキューブ列による移動体の位置・方位計測 — 曲線路における計測法*

津村 俊弘**・大久保博志**・小松 信雄**

Measurement of the Position and Heading of a Vehicle Using Corner Cubes on a Road Side — A Method for a Curved Course*

Toshihiro TSUMURA**, Hiroshi OKUBO** and Nobuo KOMATSU**

This paper proposes a method for measuring the position and heading of a vehicle moving on a curved course. The method uses laser fan beam transmitters and photo detectors mounted on the vehicle and an array of corner cubes on the course side as retro-reflecting targets. The laser beams have different direction angles and offset distances with each other and, therefore, return to the vehicle at different time according to the position and heading of the vehicle. The on-board computer calculates the position and heading from the time data that indicate the instants of detecting the reflections from the target corner cubes. The measured data are used for correcting the dead reckoning system.

1. はじめに

近年、建設用車両や各種移動作業機械の自動化の必要性は高くなっている。また、工場内の無人搬送車や、建築土木分野における作業車の自動誘導技術の確立は重要な課題である。

これに対し、自動車¹⁾や無人搬送車²⁾を自動誘導する研究や特殊移動機械の走行制御³⁾の研究が各種行われているが、誘導制御に必要な位置計測方法については実用的な物が少なく、高精度な方法は、構成が複雑でコストがかかり、安価な方法は誘導に必要な精度が得られにくいという問題がある。走行コースが定まっていれば、光学テープや電磁誘導線のようなガイドパスを敷設、埋設する事により容易に自動走行が実現される。しかし無軌道の場合の自動誘導は、正確な位置計測が困難であるため実用化が遅れている。

一般に、無軌道の場合の位置計測の方法は、推測航法と言われる速度位置変化などをセンサにより計測し、その値を累積し位置を推定する方法と、絶対的な基準による補正方法を組み合わせて用いるのが実用的である。な

ぜなければ、推測航法は、外部設備を用いず連続的な計測が行えるという利点がある反面、誤差の累積が避けられないという欠点があり、累積誤差を絶対的な基準によって補正する必要がある⁴⁾。

著者らはすでに推測航法の補正、または単独での位置計測方法として、移動体上にレーザ発射装置と光センサを組み合わせた装置を搭載し、直線走行コースの片側に沿って配設されたコーナキューブからの反射レーザの受光時間を、移動にしたがって計測することにより移動体の位置方位を計測する方法を提案した⁵⁾。

移動体上のレーザ発射装置は、扇状のレーザ光を発射し、基準点の再帰反射器からの反射光を光センサによって検出する。再帰反射器としては、例えばコーナキューブを用いる。コーナキューブは走行路の片側に並べられ、移動体の走行にともないこれらを順次検出することにより、移動体の位置を計測する。

しかし、参考文献 5) の方法は、高速道路上の車両の位置計測を想定し、移動体の移動を直線のみに限定しているため、建設車両のように比較的低速でカーブの多いコースを走行する場合には適用が難しい。

したがって、本論文では、移動体が円弧上を走行する場合について、すでに提案した計算方法を拡張する事によって、適応可能な移動体の種類を広げる。

本論文では、まず計測原理と計算方法について述べ、

* 原稿受付 1994 年 1 月 31 日

** 大阪府立大学 工学部 University of Osaka Prefecture ;
1-1 Gakuenmachi, Sakai city, Osaka 593, JAPAN

Key Words : vehicle, position measurement, laser, corner cube, car navigation.

次にシミュレーションの結果を示し、本方式の有効性を確認する。さらに試作を行った計測装置の構成を示し、実験結果について述べる。

2. 計測の原理

移動体上のレーザと地上におかれたコーナキューブの幾何学的関係から計測方法が導かれる。Fig. 1 に示すように、絶対座標系 $\{o; x, y\}$ 、移動体の初期座標系 $\{o_I; {}^I x, {}^I y\}$ および、移動体座標系 $\{o_V; {}^V x, {}^V y\}$ をとり、各座標の x 軸からの角度を、各々 ϕ , ${}^I \phi$, ${}^V \phi$ とする。コーナキューブにレーザが入光する条件は、次式のように表わされる¹⁾。

Fig. 1 Coordinate systems

$$f_{Lhi}(\mathbf{x}_{hi}; \mathbf{x}_I, \phi_I) = 0 \quad (1)$$

ただし、

$$f_{Lhi}(\mathbf{x}_{hi}; \mathbf{x}_I, \phi_I) = \mathbf{a}_h^T [{}^I \mathbf{R}_{Vhi}^{-1} \{ \mathbf{R}_I^{-1} (\mathbf{x}_{hi} - \mathbf{x}_I) - {}^I \mathbf{x}_{Vhi} \} - {}^V \mathbf{x}_{Lh}] \quad (2)$$

$\mathbf{x}_{hi}$: 時刻 t_{hi} におけるレーザ B_h 上の任意の点の位置ベクトル

${}^I \mathbf{x}_{Vhi}$: 時刻 t_{hi} における o_I 座標上での移動体位置ベクトル (${}^I x_{Vhi}$, ${}^I y_{Vhi}$)^T

$\mathbf{x}_I$: 初期位置座標ベクトル (x_I , y_I)^T

$\mathbf{a}_h$: レーザ B_h の発射方向に直角な方向ベクトル

${}^I \mathbf{R}_{Vhi}$: ${}^I \phi_{Vhi}$ による回転ベクトル

${}^I \phi_{Vhi}$: 時刻 t_{hi} における o_I 座標上での移動体方位角

$\mathbf{R}_I$: ϕ_I による回転マトリックス

ϕ_I : 初期方位角

${}^V \mathbf{x}_{Lh}$: 移動体座標で表わした、レーザ B_h 上のある点のベクトル

t_{hi} : レーザ B_h がコーナキューブ C_i に入射する時刻

である。なお、左肩の添え字は、表現座標系を示し、添

え字 T は転置を表わす。また、コーナキューブの設置されている基準点 C_i が次式を満たすとする。

$$f_{Ci}(\mathbf{x}) = 0 \quad (3)$$

したがって、(1) 式と (3) 式をまとめると、

$$f_{hi}(\mathbf{x}_{hi}; \mathbf{x}_I, \phi_I) = 0 \quad (4)$$

ただし、

$$f_{hi}(\mathbf{x}_{hi}; \mathbf{x}_I, \phi_I) = \begin{bmatrix} f_{Lhi}(\mathbf{x}_{hi}; \mathbf{x}_I, \phi_I) \\ f_{Ci}(\mathbf{x}_{hi}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。そこで、 ${}^I \mathbf{x}_{Vhi}$, ${}^I \phi_{Vhi}$, $f_{Ci}(\mathbf{x})$ に含まれる未知パラメータを $\mathbf{p}$ として、レーザ B_h ($h = 0, 1, \dots, m$)、コーナキューブ C_i ($i = 0, 1, \dots, n$) に対して、次の連立方程式が得られる。

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_I, \phi_I, \mathbf{p}, \mathbf{x}_{00}, \dots, \mathbf{x}_{mn}) = 0 \quad (6)$$

ただし、

$$\mathbf{F} = [f_{00}, f_{10}, \dots, f_{mn}]^T \quad (7)$$

である。

(6) 式は一般には解けないが、移動体の走行方法について仮定を設けることにより、解を求める事ができ、 $\mathbf{x}_I$, ϕ_I が計算できる。

また、 o_I 座標上での移動体の位置座標 ${}^I \mathbf{x}_V$ と方位角 ${}^I \phi_V$ から、絶対座標での位置 $\mathbf{x}_V$ および方位角 ϕ_V が、次式によって求められる。

$$\mathbf{x}_V = \mathbf{x}_I + \mathbf{R}_I {}^I \mathbf{x}_V \quad (8a)$$

$$\phi_V = \phi_I + {}^I \phi_V \quad (8b)$$

3. 計測方法

3.1 コーナキューブ設置間隔を利用しない計測方法

Fig. 2 に本方式を自動車に適用したシステムの概略を示す。ただし、平坦な道を円弧軌跡を描きながら走行する車両を想定し、次のような仮定を設ける。

Fig. 2 Illustration of the proposed method

- 仮定1 移動体の運動は2次元平面上である。
 仮定2 移動体の運動方位と進行方向は一致する。
 仮定3 近接する2個のコナキューブに対し計測を行う。
 仮定4 移動体の走行軌跡は円弧である。
 仮定5 移動体の走行速度は一定未知である。
 仮定6 コナキューブを検知する時刻が計測可能。

移動体上には、レーザ投受光機を3組取り付け、レーザ投受光機はレーザファンビームを放射する投光器と戻ってきた光を検出する受光器を組み合わせたものである。また走行コースの片側には、列状にコナキューブなどの再帰反射性の基準器を設置する。移動体がコースに沿って走行するのに従ってコナキューブを検出し、その時の時刻データから、位置および方位を計測する。また各レーザ B_0, B_1, B_2 はそれぞれ、代表点からの距離が a_0, a_1, a_2 、進行方位に対する発射角度が $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ であるとする。このときの、レーザと移動体およびコナキューブの位置関係を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 Location of laser beams and corner cubes

コナキューブ列は走行コースの左側に C_0, C_1 と並んでいるとする。車体の代表点を O_v とし、地上固定座標 $\{O; x, y\}$ 、移動体座標 $\{O_v; x_v, y_v\}$ および走行方位 ϕ_v は Fig. 3 に示したように定める。また、移動体の進行方向は、車体の代表軸 $O_v x_v$ と一致するものとする。さらに、レーザビーム B_h が、コナキューブ C_i に入光するときの時刻を t_{hi} とし、移動体が走行するに従い t_{hi} を順に計測する。

3.1.1 計算アルゴリズムの導出

ある時刻 t_{hi} での移動体の位置を初期位置座標系で表わした位置 ${}^I x_{vhi}$ 、および方位 ${}^I \phi_{vhi}$ による回転行列は次式のようになる。

$${}^I x_{vhi} = ({}^I x_{vhi}, {}^I y_{vhi})^T \quad (9)$$

$${}^I R_{vhi} = \begin{bmatrix} \cos {}^I \phi_{vhi} & -\sin {}^I \phi_{vhi} \\ \sin {}^I \phi_{vhi} & \cos {}^I \phi_{vhi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

移動体の初期位置 x_I および、初期方位 ϕ_I による回転行列は次式のようになる。

$$x_I = (x_I, y_I)^T \quad (11)$$

$$R_I = \begin{bmatrix} \cos \phi_I & -\sin \phi_I \\ \sin \phi_I & \cos \phi_I \end{bmatrix} \quad (12)$$

移動体の位置 (x, y) 、方位 ϕ が初期位置座標系でどのように表わされるかを求める。まず、移動体は Fig. 4 に示すように、回転中心を (x_r, y_r) として速度 v 、曲率 κ で移動していると仮定する。この運動は次式で表わされる。

Fig. 4 Vehicular motion on a circular course

$$\dot{x}_v = v \cos \phi_v \quad (13a)$$

$$\dot{y}_v = v \sin \phi_v \quad (13b)$$

$$\dot{\phi}_v = v \kappa \quad (13c)$$

l を走行距離として (13a) (13b) (13c) 式を書き直すと、

$$\dot{x}_v = \dot{l} \cos \phi_v \quad (14a)$$

$$\dot{y}_v = \dot{l} \sin \phi_v \quad (14b)$$

$$\dot{\phi}_v = \dot{l} \kappa \quad (14c)$$

となり、 $t=0$ での x_v, y_v, ϕ_v の値を x_I, y_I, ϕ_I とし、曲率 κ を一定とする。まず方位角は (14c) 式より、

$$\phi_v = \kappa l + \phi_I \quad (15)$$

となる。また位置は、

$$\begin{aligned} x_v &= \int_0^l \dot{l} \cos (\kappa l + \phi_I) d\tau \\ &= x_I + \frac{2}{\kappa} \sin \frac{\kappa l}{2} \cos \left(\frac{\kappa l}{2} + \phi_I \right) \end{aligned} \quad (16a)$$

$$\begin{aligned} y_v &= \int_0^l \dot{l} \sin (\kappa l + \phi_I) d\tau \\ &= y_I + \frac{2}{\kappa} \sin \frac{\kappa l}{2} \sin \left(\frac{\kappa l}{2} + \phi_I \right) \end{aligned} \quad (16b)$$

となる。したがって時刻 t_{hi} での移動体の位置ベクトルを $\mathbf{x}_{vhi}$ とすると、移動体の位置方位を初期位置座標系で表わした ${}^I\mathbf{x}_{vhi}$, ${}^I\phi_{vhi}$ は、(8a), (8b), (16a), (16b) 式より、

$${}^I\mathbf{x}_{vhi} = \mathbf{R}_I^{-1}(\mathbf{x}_{vhi} - \mathbf{x}_I) = \frac{1}{\kappa} \begin{pmatrix} \sin \kappa l_{hi} \\ 1 - \cos \kappa l_{hi} \end{pmatrix} \quad (17a)$$

$${}^I\phi_{vhi} = \phi_{vhi} - \phi_I = \kappa l_{hi} \quad (17b)$$

となる。

Fig. 3 に示されるような移動体上 (${}^V\mathbf{x}_{Lh}$, ${}^V\mathbf{y}_{Lh}$) の点から、 ${}^V\mathbf{x}$ 軸に対して α_h で発射されるレーザ直線の式は、移動体座標系で次式のように表わされる。

$$(-\sin \alpha_h \quad \cos \alpha_h) \begin{pmatrix} {}^Vx - {}^Vx_{Lh} \\ {}^Vy - {}^Vy_{Lh} \end{pmatrix} = 0 \quad (18)$$

したがって、(2) 式における ${}^V\mathbf{x}_{Lh}$, α_h は、

$${}^V\mathbf{x}_{Lh} = ({}^Vx_{Lh}, {}^Vy_{Lh})^T \quad (19a)$$

$$\alpha_h = (-\sin \alpha_h, \cos \alpha_h)^T \quad (19b)$$

となる。以上から (2) 式は次式のように書き直される。

$$\begin{aligned} f_{Lhi}(\mathbf{x}_{hi}; \mathbf{x}_I, \phi_I) &= (-\sin \alpha_h \quad \cos \alpha_h) \\ &\times \left[\begin{pmatrix} \cos \kappa l_{hi} & -\sin \kappa l_{hi} \\ \sin \kappa l_{hi} & \cos \kappa l_{hi} \end{pmatrix}^{-1} \right. \\ &\times \left[\begin{pmatrix} \cos \phi_I & -\sin \phi_I \\ \sin \phi_I & \cos \phi_I \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{hi} - x_I \\ y_{hi} - y_I \end{pmatrix} \right. \\ &\left. \left. - \begin{bmatrix} \frac{1}{\kappa} \sin \kappa l_{hi} \\ \frac{1}{\kappa} (1 - \cos \kappa l_{hi}) \end{bmatrix} \right] \right] - \begin{pmatrix} {}^Vx_{Lh} \\ {}^Vy_{Lh} \end{pmatrix} \quad (20) \end{aligned}$$

ここで、二つのコーナキューブは、 $\mathbf{x}$ 軸と平行な直線上に配置されているものとする。さらに、コーナキューブ C_i の位置ベクトルを $\mathbf{x}_{Ci} = (x_{Ci}, y_{Ci})^T$ と表わし、一点が既知の点 (x_{c0}, y_{c0}) にあり、もう一点は未知のコーナキューブ間隔 L_C によって、 $(x_{c0} + L_C, y_{c0})$ と表わされるとする。つまり、(3) 式は

$$f_{c0}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{c0} = 0 \quad (21a)$$

$$f_{c1}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{c1} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{c0} - (L_C, 0)^T = 0 \quad (21b)$$

となる。したがって、各レーザがコーナキューブを照射するとき、 $\mathbf{x}_{h0} = \mathbf{x}_{c0}$, $\mathbf{x}_{h1} = \mathbf{x}_{c0} + (L_C, 0)^T$ が成り立つので、これを (20) 式に代入する。コーナキューブ C_0, C_1 に対するレーザ B_0, B_1, B_2 による計測から (4) 式が 6 式得られる。六つの未知数からなるベクトル $\mathbf{q} = (x_I, y_I, \phi_I, \kappa, v, L_C)^T$ を定義すると、得られる六つの式は、

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = 0 \quad (22)$$

と表わされ、これを、 $\mathbf{q}$ について解く事になる。そこで $\mathbf{F}(\mathbf{q})$ を $\mathbf{q}_0$ まわりで展開して、

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) \approx \mathbf{F}(\mathbf{q}_0) + \mathbf{J} \Delta \mathbf{q} = 0 \quad (23)$$

と近似する。ただし $\mathbf{J}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{J} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{q}} \right|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} \quad (24)$$

すると、 $\det \mathbf{J} \neq 0$ の場合、

$$\mathbf{q}^{(N+1)} = \mathbf{q}^{(N)} - \lambda \mathbf{J}^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{q}^{(N)}) \quad (25)$$

の繰返し計算を行い、 $\mathbf{q}^{(N)}$ が収束すればその収束値を $\mathbf{q}$ とする。ただし、 λ ($0 < \lambda \leq 1$) は繰返し計算が収束するように選ぶ。

3.1.2 繰返し計算における初期値

繰返し計算における初期値 $\mathbf{q}^{(0)}$ は、十分に真の値に近く選ぶ必要がある。もし大きく異なるとき、計算の収束時間が長くなる場合や収束しない場合がある。そこで、まず直線走行を仮定して計算を行い、得られた値を円弧軌跡走行に対する繰返し計算の初期値として用いる。

直線走行と仮定したとき、(17a), (17b) 式において、 $\kappa = 0$ とする事により、

$${}^I\mathbf{x}_{vhi} = \begin{pmatrix} l_{hi} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26a)$$

$${}^I\phi_{vhi} = 0 \quad (26b)$$

となる。また、(19a) 式の値は、レーザが移動体のどの位置から発射されているかを表わすので、これをレーザと移動体上の座標軸 ${}^V\mathbf{x}$ の交点 $(a_h, 0)$ で表現し、

$${}^V\mathbf{x}_{Lh} = \begin{pmatrix} {}^Vx_{Lh} \\ {}^Vy_{Lh} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_h \\ 0 \end{pmatrix} \quad (27a)$$

と置いても一般性を失わない。さらに、

$$\begin{pmatrix} u_i \\ w_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_I & -\sin \phi_I \\ \sin \phi_I & \cos \phi_I \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{Ci} - x_I \\ y_{Ci} - y_I \end{pmatrix} \quad (27b)$$

$$l_{hi} = vt_{hi} \quad (27c)$$

とおくと、(20) 式は

$$\begin{aligned} f_{Lhi}(\mathbf{x}; \mathbf{x}_I, \phi_I) &= (-\sin \alpha_h \quad \cos \alpha_h) \\ &\times \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} u_i \\ w_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} vt_{hi} \\ 0 \end{pmatrix} \right\} - \begin{pmatrix} a_h \\ 0 \end{pmatrix} \right] \\ &= -(u_i - vt_{hi} - a_h) \sin \alpha_h + w_i \cos \alpha_h = 0 \quad (28) \end{aligned}$$

となる。これを書き直すと、

$$vt_{hi} - u_i + w_i \cot \alpha_h + a_h = 0 \quad (29)$$

となる。よって、 $h = 0, 1, 2; i = 0, 1$ に対して、

$$vt_{00} - u_0 + a_0 - w_0 \cot \alpha_0 = 0 \quad (30a)$$

$$vt_{10} - u_0 + a_1 - w_0 \cot \alpha_1 = 0 \quad (30b)$$

$$vt_{20} - u_0 + a_2 - w_0 \cot \alpha_2 = 0 \quad (30c)$$

$$vt_{01} - u_1 + a_0 - w_1 \cot \alpha_0 = 0 \quad (30d)$$

$$vt_{11} - u_1 + a_1 - w_1 \cot \alpha_1 = 0 \quad (30e)$$

$$vt_{21} - u_1 + a_2 - w_1 \cot \alpha_2 = 0 \quad (30f)$$

が得られる。これらの式では、未知数が v, u_0, u_1, w_0, w_1 の五つであるので、最小自乗解を求めることが出来るが、 $\kappa = 0$ としたときの近似解を求めるのが目的であるので、簡単に前三つの式と後三つの式で速度 v を分けて解を求める。つまり、(30a), (30b), (30c) 式を満たす v を v_0 とし、(30d), (30e), (30f) 式を満たす v を v_1 とすると、

$$\begin{pmatrix} w_0 \\ v_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cot \alpha_0 + \cot \alpha_1 & t_{10} - t_{00} \\ -\cot \alpha_1 + \cot \alpha_2 & t_{20} - t_{10} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} a_0 - a_1 \\ a_1 - a_2 \end{pmatrix} \quad (31a)$$

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cot \alpha_0 + \cot \alpha_1 & t_{11} - t_{01} \\ -\cot \alpha_1 + \cot \alpha_2 & t_{21} - t_{11} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} a_0 - a_1 \\ a_1 - a_2 \end{pmatrix} \quad (31b)$$

$$u_0 = v_0 t_{00} + a_0 - w_0 \cot \alpha_0 \quad (31c)$$

$$u_1 = v_1 t_{01} + a_0 - w_1 \cot \alpha_0 \quad (31d)$$

より、 $w_0, w_1, v_0, v_1, u_0, u_1$ が求められる。また速度 v としては、 v_0, v_1 どちらを用いても良いが、(31a), (31b) 式それぞれに対する整合性を考慮し、次式のように v を v_0 と v_1 の平均として、

$$v = \frac{v_0 + v_1}{2} \quad (32)$$

より求める。次に (27b) 式より次式が得られる。

$$w_1 - w_0 = (x_{c1} - x_{c0}) \sin \phi_I + (y_{c1} - y_{c0}) \cos \phi_I \quad (33a)$$

$$u_1 - u_0 = (x_{c1} - x_{c0}) \cos \phi_I - (y_{c1} - y_{c0}) \sin \phi_I \quad (33b)$$

これを $\sin \phi_I, \cos \phi_I$ について解く。

$$\begin{pmatrix} \sin \phi_I \\ \cos \phi_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{c1} - x_{c0} & y_{c1} - y_{c0} \\ -(y_{c1} - y_{c0}) & x_{c1} - x_{c0} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_1 - w_0 \\ u_1 - u_0 \end{pmatrix} \quad (34)$$

したがって、(21b) 式を用いて、

$$\begin{aligned} \phi_I &= \tan^{-1} \frac{(x_{c1} - x_{c0})(w_1 - w_0) - (y_{c1} - y_{c0})(u_1 - u_0)}{(y_{c1} - y_{c0})(w_1 - w_0) + (x_{c1} - x_{c0})(u_1 - u_0)} \\ &= \tan^{-1} \frac{w_1 - w_0}{u_1 - u_0} \end{aligned} \quad (35)$$

また、(27b) 式より

$$x_I = x_{c0} - u_0 \cos \phi_I + w_0 \sin \phi_I \quad (36a)$$

$$y_I = y_{c0} - u_0 \sin \phi_I - w_0 \cos \phi_I \quad (36b)$$

となる。つまり、(31a)~(31d) 式を計算し u_0, u_1, w_0, w_1 を求め、これらの値を (35), (36a), (36b) 式に代入すれば x_I, y_I, ϕ_I が求められる。これを円弧軌跡走行の繰り返し計算の初期値として用いる。また、曲率半径の値は、ステアリング角度などから近似値を求めるものとする。

3.2 コーナキューブの設置間隔を利用する計測方法

3.1.1 および 3.1.2 で述べた計測方法では、移動体の回転中心と各コーナキューブ間の距離が等しい場合、つまり二つのコーナキューブを結ぶ直線の垂直二等分線（以下簡単にコーナキューブ中心線と呼ぶ）上に、移動体の回転中心がある場合には計測が出来ない。この場合、Fig. 5 に示すように各レーザの幾何学的形状は、それぞれのコーナキューブにおいて同じとなる。つまり、計測される時間の間隔は、

$$t_{10} - t_{00} = t_{11} - t_{01} \quad (37a)$$

$$t_{20} - t_{10} = t_{21} - t_{11} \quad (37b)$$

となり、(22) 式の六つの式が独立でなくなる。したがってコーナキューブを設置する際、コーナキューブ中心線が移動体の回転中心を通らないようにする必要がある。

Fig. 5 A singular case for the center of rotation

ただし、情報の量を増やす事によりこの問題を回避できる。たとえば、

- コーナキューブの設置間隔

または、

- 移動体の速度

が既知とすると、この場合未知数の数が少なくなり、五つとなる。そこで、未知数の組を同様にベクトル q で表わし、それらをまとめると (22) 式と同様の式が得られる。ただし、この場合 (25) 式に相当する式は最小自乗解を用いて、

$$q^{(N+1)} = q^{(N)} - \lambda (J^T J)^{-1} J^T F(q^{(N)}) \quad (38)$$

(ただし、 $\det(J^T J) \neq 0, 0 < \lambda \leq 1$)

となる。

4. シミュレーション

以上述べた各方法の有効性を確認するために行ったシミュレーションについて述べる。シミュレーションは後に述べる実験に合わせて、模型自動車の諸元を用いている。ただし、シミュレーションは、幾何学的な計算のみであるため、スケールを変換する事により一般的な自動車に対するシミュレーション結果を得ることができる。

まず、レーザの幾何学的諸元は、

$$\alpha_0 = 176 \text{ mm}, \quad \alpha_0 = 51 \text{ deg}$$

$$\alpha_1 = 175 \text{ mm}, \quad \alpha_1 = 88 \text{ deg}$$

$$\alpha_2 = 58 \text{ mm}, \quad \alpha_2 = 90 \text{ deg}$$

としている。また、コーナキューブの位置を $C_0: (0, 0)$, $C_1: (0, -1.0 \text{ m})$, 移動体の速度を 0.5 m/s とする。以下でいう初期値 x_I, y_I, ϕ_I はレーザが最初にコーナキューブに入射する時点の位置方位とする。

4.1 コーナキューブの設置間隔を利用しない計測方法

コーナキューブ設置間隔が未知の場合の計測方法を一定曲率 κ で走行する移動体に適用したシステムの位置計測誤差を求めた。時間計測に標準偏差 σ_t の正規誤差を与えてその影響を調べた。各シミュレーションは、それぞれ 100 回の計測シミュレーションを行い、誤差の標準偏差を求めた。なお、計算が収束しない場合での計算結果は除いている。

Fig. 6 は、 $x_r = 1.2 \text{ m}$, $y_r = -1.0 \text{ m}$, $\kappa = 1.0 \text{ m}^{-1}$ とし、時間計測の誤差の標準偏差を $\sigma_t = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ ms}$ と変化させた場合の初期値 x_I, y_I, ϕ_I の推定誤差の標準偏差である。この図より、計測誤差の標準偏差は、時間計測誤差の標準偏差にほぼ比例することが分かる。

また例として、回転中心 $(1.2 \text{ m}, -1.0 \text{ m})$ での正しい

Fig. 6 Standard deviation of estimation errors versus σ_t

Fig. 7 Estimated trajectories (simulation: unknown L_C)

Fig. 8 Standard deviation of estimation errors versus κ

走行軌跡および、時間計測誤差によって誤差を生じている円弧軌跡の計測結果を Fig. 7 に示す。

Fig. 8 は、 $x_r = 1.2 \text{ m}$, $y_r = -1.0 \text{ m}$, $\sigma_t = 2 \text{ ms}$ とし、曲率を $\kappa = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 \text{ m}^{-1}$ と変化させた場合の初期値 x_I, y_I, ϕ_I の推定誤差の標準偏差である。この図より、曲率の小さい方が誤差のばらつきが大きくなることが分かる。

Fig. 9 は、 $y_r = -1.0 \text{ m}$, $\kappa = 1.0 \text{ m}^{-1}$, $\sigma_t = 2 \text{ ms}$ とし、回転中心の x 座標を $x_r = 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 \text{ m}$ と変化させた場合の初期値 x_I, y_I, ϕ_I の推定誤差の標準偏差である。この図より、 x_r の大きい方が誤差のばらつきが大きくなることが分かる。なお、 $x_r = 2.0 \text{ m}$ では、誤差によって、計算が収束しない場合がある。

Fig. 10 は、 $x_r = 1.2 \text{ m}$, $\kappa = 1.0 \text{ m}^{-1}$, $\sigma_t = 2 \text{ ms}$ とし、初期値の y 座標を $y_r = -1.0, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0 \text{ m}$ と変化させた場合の初期値 x_I, y_I, ϕ_I の推定誤差の標準偏差である。この図より、回転中心がコーナキューブ中心線 ($y_r = -0.5 \text{ m}$) に近くなるにつれて、誤

Fig. 9 Standard deviation of estimation error versus x_r Fig. 10 Standard deviation of estimation errors versus y_r

差のばらつきが大きくなることが分かる。なお、 $y_r = -0.4, -0.6$ m では $\det \mathbf{J} = 0$ となって計算が収束しない場合がある。

4.2 コーナキューブ設置間隔を利用する計測方法

コーナキューブ設置間隔を利用することにより、移動体の回転中心がコーナキューブ中心線上にある場合にも、(38) 式を用いて推定値を得ることができる。

Fig. 11 は、移動体の回転中心を $(1.5 \text{ m}, -1.0 \text{ m})$ 、移動軌跡の曲率 $\kappa = 1.0 \text{ m}^{-1}$ 、時間計測誤差を $\Delta t = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ ms}$ と変化させ、さらに移動体の回転中心の y 座標を $y_r = -1.5, -1.3, \dots, 0.5 \text{ m}$ と変化させた場合の誤差を表す。各々 10 回のシミュレーションで得られた誤差の絶対値の最大値を用いて評価を行った。各計測値 x_i, y_i, ϕ_i に対して、真値を $x_{it}, y_{it}, \phi_{it}$ とすると、最大値 $\text{Max} |\Delta x|, \text{Max} |\Delta y|, \text{Max} |\Delta \phi|$ は誤差の絶対値 $|x_i - x_{it}|, |y_i - y_{it}|, |\phi_i - \phi_{it}|$ の最大値となる。コーナキューブ中心線 ($y_r = -0.5 \text{ m}$) 上に移動体の回転中心がある場合でも計算が発散しない事が分かる。また、その場合のシミュレーションで得られた軌跡の例を Fig. 12 に示す。

(a) $\text{Max} |\Delta x|$ (b) $\text{Max} |\Delta y|$ (c) $\text{Max} |\Delta \phi|$ Fig. 11 Estimation errors $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi$ versus y_r Fig. 12 Estimated trajectories
(simulation : L_C known)

5. 実験

5.1 試作装置

本方式による計測の有効性を確認するため、計測装置

を試作し実験を行った。

5.1.1 レーザ投受光装置

試作したレーザ投受光装置の投光装置は、赤外レーザダイオードを用いた。出力は5 mW、波長は $\lambda = 780$ nmである。Fig. 13 に示す様に半導体レーザから出た光は、コリメータレンズによって平行になり、円筒レンズで上下に広げられる。

光を扇状に広げることによりコーナキューブの設置高さに余裕を持たせることができ、移動体の上下動やローリングによる影響を少なくしている。レーザ受光装置は、シリコンフォトダイオードを用いている。外乱光の影響を少なくするため遮光フードおよび光フィルタを組み合わせ用いている。コーナキューブ検出距離は、約10 mである。

Fig. 13 Laser transceiver

5.1.2 時間計測装置

各レーザ投受光装置からの受光信号は、波形形成されTTLレベルのパルス信号になる。時間計測は、各パルスが入ったときのカウンタの値を読みとることによって行う。実験で用いたカウンタ用パルス発信器の周期は、0.021 ms である。読みとりはCPUが正確に行い、計算に必要なデータが揃えば、位置方位を計算する。時間計測部のブロック線図をFig. 14 に示す。

また、受光信号の一例は、Fig. 15 に示すようになる。図中の $t_{00}, \dots, t_{21}$ を計測することで位置方位が求められる。

5.1.3 移動体

移動体としては、市販小型電動模型自動車（ホイールベース：250 mm、トレッド：185 mm）を用いた（Fig. 16 参照）。また、レーザ投受光機の幾何学的諸元は、

$$\alpha_0 = 202 \text{ mm}, \quad \alpha_0 = 43 \text{ deg}$$

$$\alpha_1 = 161 \text{ mm}, \quad \alpha_1 = 90 \text{ deg}$$

$$\alpha_2 = 55 \text{ mm}, \quad \alpha_2 = 90 \text{ deg}$$

とした。これらの値は、移動体の構造上許される範囲で、

Fig. 14 Block diagram of the measurement system

Fig. 15 Output signal of photo diode

Fig. 16 Model vehicle

α_2 と α_1 の差をできるだけ大きくとり、また α_1, α_2 を 90 deg に、 α_0 を 45 deg にできるだけ近かった結果である。

5.2 計測実験

コーナキューブは間隔 $L_C = 1.0$ m で設置した。また、本方式による計測誤差を正しく求めるため、移動体を一定の回転半径 ($r = 0.98$ m) で円弧軌跡を描かせて実験を行った。これは、回転アームを移動体に取り付けて (Fig. 17 参照) 実現している。

Fig. 17 Setup schematic of the rotating system

Fig. 18 Estimated trajectories
(experiment : L_C unknown)

$x_r = 1.5$ m, $v = 0.5$ m/s とし, y_r を変化させて ((a) $y_r = -1.0$ m, (b) $y_r = -0.5$ m, (c) $y_r = 0.0$ m) 計測

Fig. 19 Estimated trajectories
(experiment : L_C known)

を行った. コーナキューブ間隔を未知として計算した場合の結果を Fig. 18 に示す.

Fig. 18 (a) では, 移動体の軌跡を十分正確に計測できている. Fig. 18 (b) では, ほとんど計測不可能となっている. Fig. 18 (c) では, 10 回の計測中 9 回までは計測できているが, 一つの例では, 誤った計測となっている. この結果は, シミュレーションで得られた Fig. 10 にはほぼ一致する. ただし, Fig. 18 (c) の場合においても計測不能となっていることから, 実験においてシミュレーションで与えた誤差よりも大きな誤差が生じている可能性がある.

つぎに, 同じ計測データを用いて, コーナキューブ設置間隔を既知データとして利用する方法を用いた場合の誤差を調べた. Fig. 19 より, どの場合においても計算が収束していることがわかる. また Fig. 19 (c) から, コーナキューブ設置間隔を未知とした場合には計算が収束しにくい回転中心位置の場合でも, 計算可能であることがわかる.

6. おわりに

本報告では、曲線上を走行する移動体の位置方位計測方法を提案し、シミュレーションおよび実験により提案システムの有効性を確認した。移動体にレーザ投受光機を設置するだけで、円弧上を走行する移動体の位置・方位が計測でき、移動体の誘導および推測航法による自動誘導の位置方位補正の手段として有効である。特に本方式は、コーナキューブの設置間隔も未知パラメータとして計算するので、その間隔を任意にできるという利点がある。また、固有情報を持つコーナキューブを利用すると、絶対位置情報を得る事もできる。

本方式の応用例として、自動車専用道路などにおいて、片側のガードレールにコーナキューブを取り付け、それらを自動車に取り付けたレーザ投受光装置で順次計測することにより、自動運転を行う事が挙げられる。さらに、工場、ビル、オフィス内の無人搬送システムや、空港内での航空機や各種自動車のための援助装置等にも有効である。

参 考 文 献

- 1) V. Graefe: Dynamic Vision Systems for Autonomous Mobile Robots; Proc. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS '89, pp. 12~23 (1989)
- 2) 渡辺, 二宮, 本郷, 山本, 丹下, 杉本, 荒川: 自律無人車の屋外走行方法; 第4回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp. 375~376 (1986)
- 3) 北嶋, 川上, 三隅, 原田, 大友: 光ならいセンサを用いた石油貯蔵槽の底板検査装置の開発; 第33回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 95~96 (1989)
- 4) 渡辺, 油田: 灯台とデッドレコニングを用いた移動体のポジショニング; 第7回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp. 41~44 (1988)
- 5) 津村, 小松: 列状に配設された基準コーナキューブによる移動体の位置・方位計測; システム/制御/情報, Vol. 6, No. 4, pp. 180~188 (1993)