

Team Kondara

小川 耕太郎 (防衛大学校) 原口 大輔 (防衛大学校)
f07005@nda.ac.jp

1. はじめに

本校情報工学科ロボット工学研究室ではこれまで公道でのロボットカーの走行の実現を目指しライントレースロボットを使用していた自動運転高速化の研究を行ってきた⁽¹⁾。米国防総省国防高等研究事業局が開催する『Grand Challenge』で見られるように既存の環境を使用した競技形式では問題点の分析力と統合技術力が問われ実用化の促進に貢献している。そこで本研究室は昨年度、GPS ロボットカー学生コンテストに出場し、RTK-GPS 受信機を使用したロボットカーにより好成績を収めた⁽²⁾。RTK-GPS 受信機は精度が高い反面高価であり、固定局との通信のため行動範囲に限られる等の問題点がある。また、今大会においては競技規則の改定により RTK-GPS の使用が事実上不可能となった。

そこで今回は、小型の受信機を用いた単独測位によって誘導を行う。しかし受信機の精度は 15m であり、単体では競技に要求される精度が得られない。通常は内界センサとの組み合わせにより誘導の精度を高める方策がとられ、本研究室でも非線形オブザーバによるオドメトリとの複合誘導を用いる。今大会は路面が平坦でありタイヤの滑りが発生しにくい状況にあるためオドメトリの精度向上が GPS 受信機の精度を補う上で効果的である。そこで二つの距離計を後輪の外側に配置することでオドメトリの精度を向上させたロボットカーを開発した。

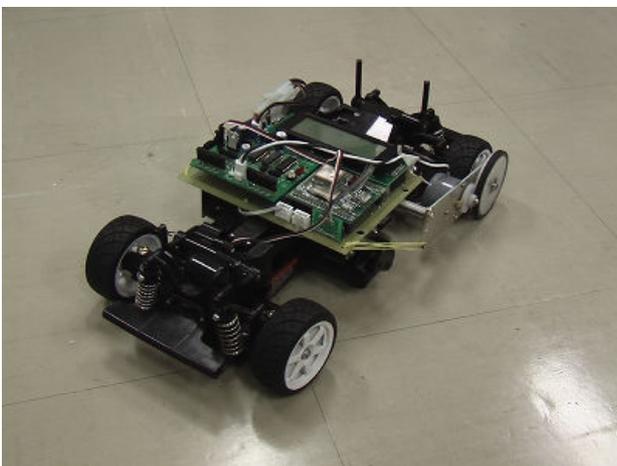


Fig.1 Overview of GPS robot car

2. 車両概要

Fig.1 には、作成したロボットカーの外観を、Fig.2 には、構造概要を示す。シャーシは TL-01 (タミヤ製) を使用しており、後輪 2 輪駆動前輪操舵方式で、操舵用にはサーボモータを使用している。その他の諸元は Table 1 に示す。本体中心部に GPS 受信機及び制御装置を設置している。GPS 受信機は携帯機器向き受信機 GH-81 (古野電気製) を用いており、水平 15m、垂直 22m の精度で毎秒 1 回更新される。制御装置は Fig. 3 に示すようにワンチップマイコン SH2/7144 (ルネサステクノロジ製) を中心に構成されている。GPS 受信機とはシリアル接続によって通信を行う。距離計はゴムタイヤに覆われた車輪の後輪の外側に配置し、その回転を 2 段の歯車機構により増速してロータリーエンコーダに伝達している。エンコーダのパルスはマイコンの位相計数モードの機能によりカウントされ、0.05mm の分解能を得ている。左右の角速度の差から姿勢の変化を直接得ることができる。走行制御はマイコンから PWM 信号を出力し、モータドライブ回路 M-S8 (日立インターメディアックス製) を介して DC モータを駆動している。

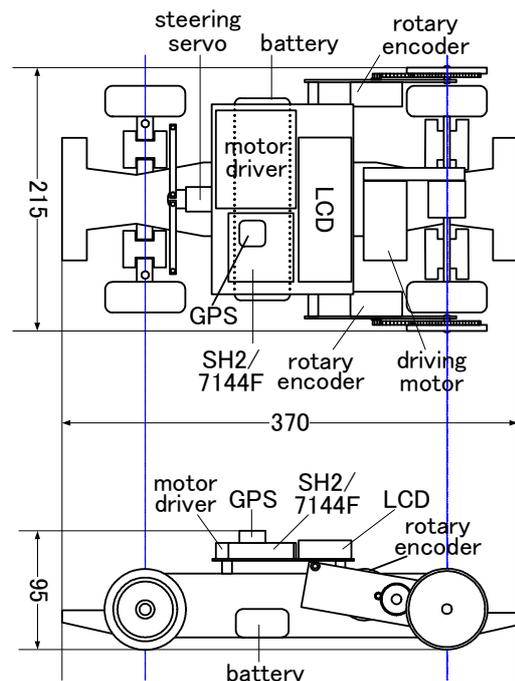


Fig. 2 Schematic diagram of GPS robot car

Table 1 Specification

全長	370mm
全高	110mm
全幅	220mm
ホイールベース	260mm
トレッド	155mm
車両重量	1.76kg
電源	8.4V-1700mAh SCR ニカドバッテリー
旋回半径	499mm

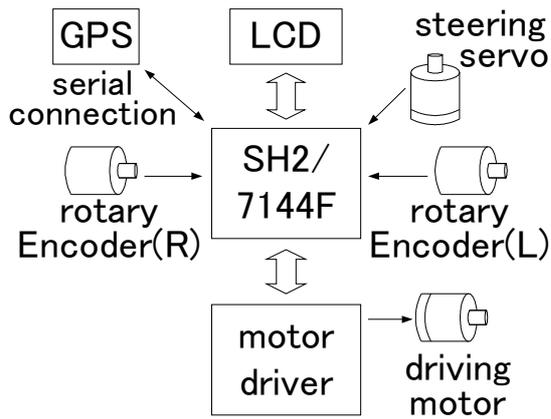


Fig. 3 Control system

3. 誘導制御

本コンテストでは初期位置や姿勢に因らず、与えられた任意の座標に向けて、操舵系の安定を保ちながらなるべく短い距離で到達することが求められる。操舵制御には、これまでに高速軌道誘導において有効であることが示されている SSM⁽¹⁾の考え方を応用する。

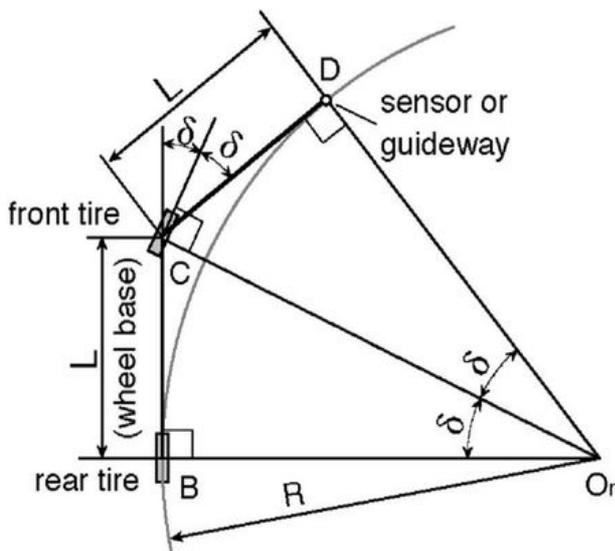


Fig. 4 Schematic representation of SSM

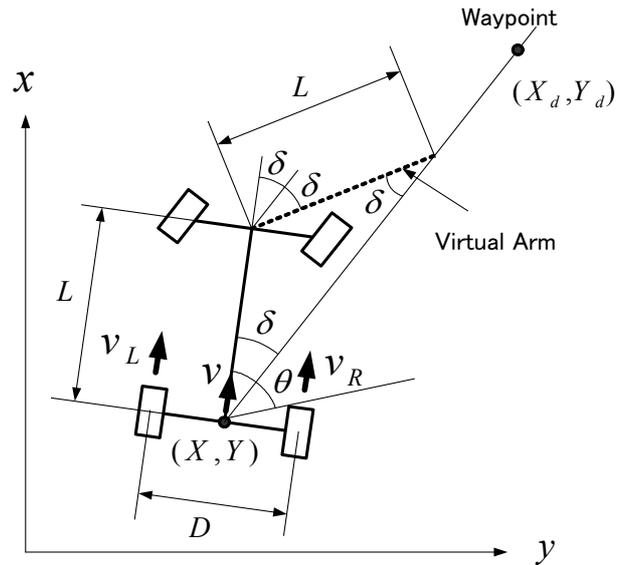


Fig. 5 Application of SSM to waypoint tracking

3-1 操舵制御

SSM は、車両前部のアーム先端が軌道上を追従するような制御を行うとともに、アームの振り角と前輪の操舵角が 2:1 を維持するように連動させることで、軌道追従が達成されるものである(Fig. 4)。

アーム先端が軌道上から外れない限り任意の速度で直線走行時の安定性が失われないことが示されている⁽¹⁾。従来の SSM では、目標軌道が予め描かれていることを想定しているが、ここではこの考えを応用し、Fig.5 に示すように車両後輪軸中心 (X, Y) とウェイポイント (X_d, Y_d) を結ぶ直線を目標軌道と見なし、SSM と同様の幾何学的な関係を再現する。結果として操舵角 δ がヨー角 θ に対して

$$\delta = \theta - \tan^{-1} \left(\frac{Y_d - Y}{X_d - X} \right) \quad (1)$$

を満たすようにすればよいことがわかる。ウェイポイントに接近すると \tan^{-1} の値が増大して発散しやすくなるので、ある程度の距離以下まで接近したら操舵角を中立位に保持することで特異点を回避する。(1) による計算結果が操舵角の限界角を越えている場合は飽和処理を行う。これにより、進行方向から見て後方にあるウェイポイントに対しては限界角を保持したまま定常円旋回によって進路を変更することになる。

3-2 速度制御

車両の速度 v は距離計の計測値に基づいた速度フィードバックによって制御されている。Fig. 6 にこの制御系を示す。 v_d を目標速度とした比例積分制御を行うことにより、走行抵抗などの影響が補償され、

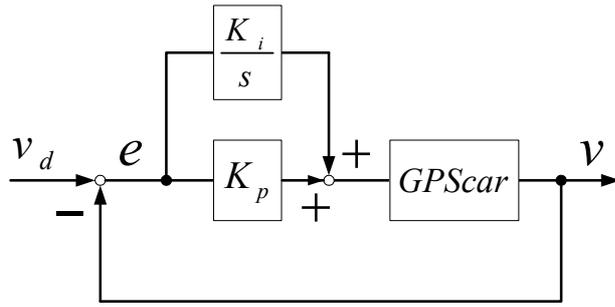


Fig. 6 Block diagram for velocity control

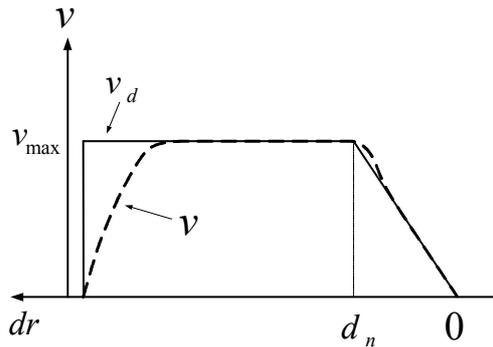


Fig. 7 Desired velocity v_d as a function of remaining distance d_r up to the waypoint and response of v

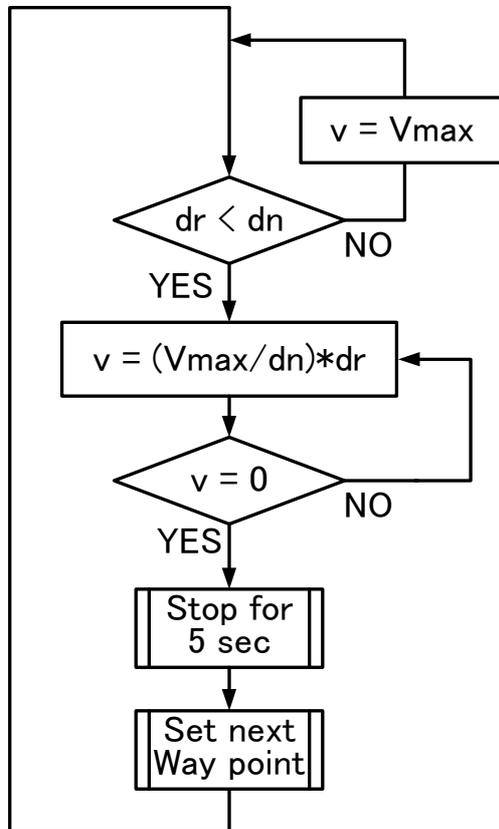


Fig. 8 Flow chart of velocity control

速度の定常偏差は 0 となる. 発進・減速・停止は Fig.7 に示すように目標速度 v_d を変化させることで行う. 発進は時間短縮のため目標値は最高速度 v_{\max} をステップ入力により与える. 速度は 1 次遅れの応答となる. 減速は Waypoint からの距離 d_r がある値 d_n 以下の時に(2)に従って徐々に減速させる.

$$v_d = \frac{v_{\max}}{d_n} d_r \quad (2)$$

この式により d_r が 0 になった時点で v_d が 0 になり停止する. 速度が 0 になると同時にタイマーのカウントを開始し, 5 秒間経過した後に次の Waypoint を設定する. 以上の処理の流れを Fig. 8 に示す.

4. 自己位置姿勢推定

4.1 時間軸変換に基づく非線形オブザーバ

タイヤによる滑りが無視できるとき, 車両の運動学モデルは

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \frac{v_R - v_L}{D} \end{bmatrix} \quad (3)$$

で表される. ここで D はトレッド, v_R, v_L はそれぞれ右と左の距離計の速度, v は車速

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (4)$$

である. このような非線形性を含むモデルに対しては拡張カルマンフィルタや無香カルマンフィルタが用いられる例が多いが, ここでは収束領域を広げるために厳密な線形化によるオブザーバ⁽³⁾⁽⁴⁾を利用する. 座標変換

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan \theta \\ Y \end{bmatrix} \quad (5)$$

および時間軸変換と入力変換

$$\tau = X, \quad \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ \frac{v_R - v_L}{D \cos^3 \theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

を施すと,

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mu_2 \quad (7)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \mu_1 \quad (8)$$

が得られる. ここで GPS 出力 Y_G が観測出力として利用できるものとするならば, オブザーバは

$$\frac{dz}{d\tau} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mu_2 + K(Y_G - [0 \ 1]z) \quad (9)$$

として記述される. ただし

$$z = \begin{bmatrix} \tan \theta \\ Y \end{bmatrix} \quad (10)$$

である. ゲイン行列 K の設計には従来の線形オブザーバの設計法が適用でき, ここでは自乗推定誤差を最小とするカルマンフィルタと同様の手法を適用した. GPS 受信機では GPS 座標の分散値を取得することができるため, 受信状況に応じてゲインの切り替えを行う.

4.2 距離計のオフセットの同時推定

運動学モデル (3) においては, 左右の距離計に使用している車輪の直径が厳密に等しいことが前提となっているが, 実際の系では

- 左右輪直径の誤差
- 車輪直径の設計値と実効値の誤差
- 車軸の狂い
- トレッドの設計値と実効値の誤差

等が累積する誤差の原因として挙げられている⁽⁴⁾. 車輪径の誤差 ε を考慮すると(2) の一部は以下のようになる.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v_R - (1 + \varepsilon)v_L}{D} \quad (11)$$

GPS による観測出力を併用すればこのオフセットを同時に推定すること可能である. また (9) では X についての推定が行われないが, GPS 出力 X_G が得られていることから, 改めて

$$\tilde{z} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \\ \varepsilon \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \end{bmatrix} \quad (12)$$

としてこれらの全ての値を推定する.

$$\frac{d\tilde{z}}{d\tau} = A\tilde{z} + B\mu_2 + K(y - C\tilde{z}) \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

4.3 特異点の回避

座標変換(5) は $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ の範囲でしか有効でない. そのため, 平面座標系を 45° 回転させた座標系を合計 8 個用意しておき, Fig. 9 に示すように車体の方向が常に 2 つの座標系の x 軸に挟まれるような状態で同時に推定し, θ がある範囲を越えたところで一方の座標系を切替る処理を行う.

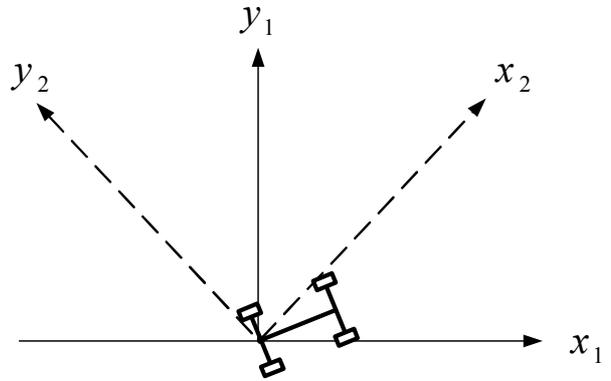


Fig. 9 Two coordinates simultaneously used for observer

5. まとめ

本稿ではオドメトリの性能を向上させることで単独測位 GPS の精度を補う方策により新たに開発したロボットカーについて述べた. 障害物回避については今後検討する必要がある.

参考文献

- (1) 滝田: “SSM を用いた軌道誘導車両の高速化”, 日本機械学会論文集 C 編, 65, 630, pp. 662-629, 1999
- (2) 伊達, 滝田: “RTK-GPS を用いた小型ロボット車両の高精度誘導”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会論文集, No.3D16, 2005
- (3) 三平, 古田: “時間軸の線形化を用いたシステムの線形化”, 計測自動制御学会論文集, 22, 10, pp. 1030-1036, 1986
- (4) Borenstein, Feng: “Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots”, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 12, No. 6, 1996