

# 移動可能領域を考慮した知的駐車制御システム

呉涛 澁谷長史 安信誠二 (筑波大学)

## An intellectual parking control system in the limited space for four-wheel car

\*Tao Wu, Takeshi Shibuya and Seji Yasunobu (University of Tsukuba)

**Abstract**— In this paper, the movement characteristic of four-wheel car is analyzed, based on which the target sequence method is proposed. Then, an intellectual parking control system in the limited space for four-wheel car is built with the target sequence method. In the system, according to the environment some target sequence candidates are created by a target sequence generator, and the predictive fuzzy controller is used to decide the best one considering the dynamic distance to the obstacle and the time to be spent. At last, through some simulations, it is proved that the system is effective.

**Key Words:** Four-wheel car, Target sequence, Obstacle, Predictive fuzzy controller

### 1 はじめに

日本では平成 22 年 6 月末現在の自動車保有車両数は 7 千万を超え<sup>1)</sup>、交通・運輸の手段として重要な役割を果たしている。しかし、四輪車は非ホロノミック動特性を持つため、非熟練者にとって、運転するのが難しい。さらに、障害物などによって、移動可能領域に制限がある場合には、より困難になる (Fig.1)。

そこで、本稿では、車両運転の未熟者への支援する知的駐車制御システムの実現を目指す。

知的駐車問題についての研究は多く行われている、文献<sup>2)</sup>では状態評価ファジィ推論と予見ファジィ制御の組み合わせ方法が提案されている。文献<sup>4)</sup>では円周族を追従した経路生成方法が提案されている。しかし、これらの研究では、障害物が存在しない綺麗な駐車環境が前提となっている。

本稿では、障害物によって、移動可能領域制限がある駐車場環境に、四輪車の運動特性を踏まえ、目標序列という方法を提案する。提案手法では四輪車を最小旋回半径で回らせ、経路上のいくつかの目標状態点を設定しておき、順番に到達することによって、駐車を実現する。

本稿の第 2 節では、制御対象モデルについて説明する。第 3, 4 節では、制御対象モデルの運動分析と目標序列の設計を行う。第 5 節では、システムを構築する。第 6 節では、シミュレーション結果を示す。

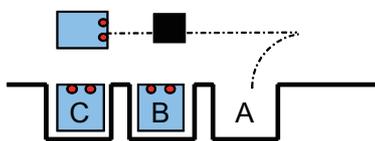


Fig. 1: Garage putting problem

### 2 制御対象モデル

本稿では、四輪車の主要な運動特性に注目し、Fig.2 のような比較的簡単な前輪操舵の四輪車 (以下「車両」と省略する) を制御対象モデルとして用いる。駐車場の環境において、車両の速度は遠心力の発生を無視できる十分遅い速度で運動すると仮定する。すなわち、旋回において各車輪は滑りせずに路面と点接触し

て、単純に転がっているとすると、各車輪は車体に取り付けられており、円旋回するには車輪それぞれの回転中心軸の延長線上に旋回中心を持たねばならない。後輪の回転中心軸は一本の車軸上にあるから、この延長線と前の内輪、外輪のそれぞれの回転中心軸の延長線が一点で交わる必要がある。この交点が旋回中心である。また、車両の左右後輪中間点を車両現在位置とし、操舵角を左右前輪操舵角の平均とする、運動学モデルは次のように与えられる。

$$\frac{dx}{dt} = v \cos \phi \cos \theta \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \cos \phi \sin \theta \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{L} \sin \phi \quad (3)$$

$$\phi \approx \frac{\phi_L + \phi_R}{2} \quad (4)$$

ここで、 $(x, y)$  は車両現在位置、 $\theta$  は車両方向角、 $\phi$  は近似操舵角、 $\phi_L$  は左前輪操舵角、 $\phi_R$  は右前輪操舵角、 $L$  は前輪中心と後輪中心との距離、 $v$  は速度である。また、車両の旋回半径  $R$  は式 (5) となる。

$$R = \frac{L}{\tan \phi} \quad (5)$$

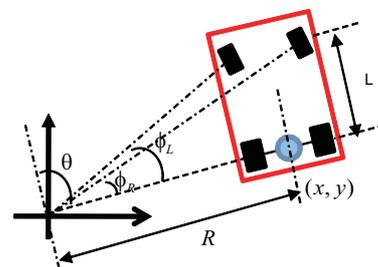


Fig. 2: Four-wheel car model

移動可能領域制限がある場所において、車両の移動するためには、姿勢調整 (車両方向調整) が重要である。姿勢調整を行うにあたっては、移動する空間がもっとも小さくなるように、最大操舵角で旋回する。また、駐車場の環境では、車両の速度が十分遅い、一定速度と仮定しても構わない。ここでは、車両速度が瞬間変

化することができるかと仮定している．すなわち，車両の操舵角は「0」，「最大操舵角左回り」，「最大操舵角で右回り」の三種と仮定している．速度は「定低速直前進」，「定低速直後進」，「停車」の三種と仮定している（Table 1）．

Steering	Velocity
0	Low-Fixed Velocity Forward
Max-Steering Left	Low-Fixed Velocity Backward
Max-Steering Right	Stop

車両の操舵角と速度の操作方法に基づいて，車両の運動方式は「直前進」，「直後進」，「左回り前進」，「左回り後進」，「右回り前進」，「右回り後進」，「停車」の七種類がある．ここで，前（後）進は定低速となり，左（右）回りは最小半径となっている（Fig.3）．

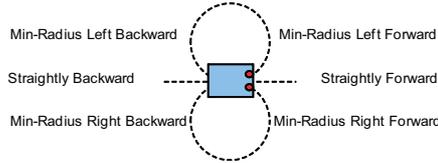


Fig. 3: Movement of four-wheel car model

また，以下の記述をしやすいするために，「状態点」という用語を定義しておく．状態点とは，車両の X - Y 座標値  $(x[m], y[m])$  と方向角  $(\theta[rad])$  からなるベクトルである（式（6））．

$$\text{状態点} : (x, y, \theta) \quad (6)$$

### 3 運動分析

本節では，まず移動可能領域制限がない環境（OPEN 環境）における運動分析を行う．次に，OPEN 環境の分析をもとにして，移動可能領域制限がある環境（CLOSE 環境）における運動分析を行う．その前に，初期状態点を S 点と定義し，S 点を通過する直線を L1 と定義しておく．目的状態点を E 点と定義し，E 点を通過する直線を L2 と定義しておく．

#### 3.1 移動可能領域制限がない環境における運動分析

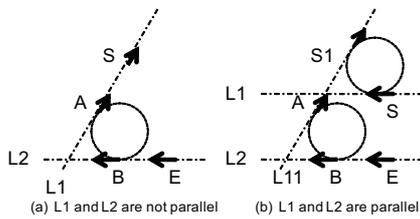


Fig. 4: Movement analysis

(a) 直線 L1 と直線 L2 は平行ではない場合 L1 と L2 の共通に接する最小円（最小旋回半径円）が存在する．そこで，L1 上の接点を A とすると，状態点 S から状態点 A へ直接移動することができる（S → A）；一方，L2 上の接点を B とすると，状態点 B から状態点 E へ直接移動することができる（B → E）．それに，A と B は同一円周上に存在するので，状態点 A から状態点 B へ直接移動することができる（A → B）．すなわち，S → A → B → E の経路（寄せ 姿勢調整 到達）を経由

すれば，初期状態点 S から目的状態点 E まで移動することができる．

(b) 直線 L1 と直線 L2 は平行である場合 S と同一円周上に，S との方向角差が 180 度以外の状態点 S1 を見つけ，S1 を通過する直線 L11 は直線 L2 と平行ではないことがわかる．そこで，S1 から見ると，(a) の場合になっている．すなわち，S → S1 → A → B → E の経路（姿勢調整 寄せ 姿勢調整 到達）を経由すれば，初期状態点 S から目的状態点 E まで移動することができる．

状態点 A  $(x_A, y_A, \theta_A)$  と状態点 B  $(x_B, y_B, \theta_B)$  の計算式はつぎのように与えられる．

$$x_A = \frac{x_o + y_o \tan \theta_S + x_S \tan^2 \theta_S - y_S \tan \theta_S}{\tan^2 \theta_S + 1} \quad (7)$$

$$y_A = \frac{x_o \tan \theta_S + y_o \tan^2 \theta_S + y_S - x_S \tan \theta_S}{\tan^2 \theta_S + 1} \quad (8)$$

$$\theta_A = \theta_S \quad (9)$$

$$x_B = \frac{x_o + y_o \tan \theta_E + x_E \tan^2 \theta_E - y_E \tan \theta_E}{\tan^2 \theta_E + 1} \quad (10)$$

$$y_B = \frac{x_o \tan \theta_E + y_o \tan^2 \theta_E + y_E - x_E \tan \theta_E}{\tan^2 \theta_E + 1} \quad (11)$$

$$\theta_B = \theta_E \quad (12)$$

ここで， $(x_S, y_S, \theta_S)$  は状態点 S， $(x_E, y_E, \theta_E)$  は状態点 E， $(x_o, y_o)$  は L1 と L2 の共通に接する最小円の円心である．

(a) と (b) の分析をまとめて見ると，次の結論が得られる．OPEN 環境に，目的状態点を含めて，最低四つの状態点をさえを経由すれば，車両は任意初期状態点 S から，任意目的状態点 E に移動することが可能である．その四つの状態点を目標状態点 (Target State Point) と定義しておく．それで，4 点目標状態点テーブル (F-TSP テーブル) を Table 2 のように定義する．

Table 2: F-TSP table

TSP1	Posture adjusting TSP for start
TSP2	Approaching TSP
TSP3	Posture adjusting TSP for arrival
TSP4	Arrival TSP

#### 3.2 移動可能領域制限がある環境における運動分析

移動可能領域制限がある環境においても，S から E までの経路上，障害物が存在しない場合には，OPEN 環境のための手法を用いて，E 点に到達することができる．このことは「E 点に到達する」という一つの目的を達成するための手法として捉えることができる．一方，経路上に障害物が存在する場合には，この目的に加えて「障害物を回避する」という多目的問題として捉えることができる．3.1 節の F-TSP テーブルを用いる方法では，この多目的問題を解決することができないため，複数の F-TSP テーブルを用いる．このとき，4 節で詳しく述べる各 F-TSP テーブル間の連続性を考慮する．

### 4 目標序列の設計

障害物を回避完了状態点を目的状態点とすれば，障害物回避 F-TSP テーブル (Table 3) を作成することができる．一方，駐車終了状態点を目的状態点とすれば，車庫入れ F-TSP テーブル (Table 4) を作成することができる．その上，障害物回避と車庫入れを繋がって考えて見ると，障害物回避の TSP3 と車庫入れの TSP1

を同じ状態点にし、障害物回避の TSP4 と車庫入れの TSP2 を同じ状態点にすれば、6 点目標状態点テーブル (S-TSP テーブル) (Table 5) を作成することができる。さらに、S-TSP テーブルにある隣接な TSP をセットにすれば、目標序列テーブル (Table 6) を作成することができる。

Table 3: Obstacle avoidance F-TSP table

TSP1	Obstacle avoidance posture adjusting
TSP2	Obstacle avoidance
TSP3	Posture adjusting
TSP4	Obstacle avoidance over

Table 4: Garage putting F-TSP table

TSP1	Garage approaching posture adjusting
TSP2	Garage approaching
TSP3	Garage putting posture adjusting
TSP4	Garage putting

Table 5: S-TSP table

TSP1	Obstacle avoidance posture adjusting
TSP2	Obstacle avoidance
TSP3	Garage approaching posture adjusting
TSP4	Garage approaching
TSP5	Garage putting posture adjusting
TSP6	Garage putting

Table 6: Target sequence table

Target Sequence 1	TSP1, TSP2
Target Sequence 2	TSP2, TSP3
Target Sequence 3	TSP3, TSP4
Target Sequence 4	TSP4, TSP5
Target Sequence 5	TSP5, TSP6
Target Sequence 6	TSP6, TSP6

## 5 システム設計

目標序列テーブルに基づき、システムの構築を行う。基本的な制御方策は、車両状況によって、後に述べるような S-TSP テーブル生成器を用いて、S-TSP テーブル候補を生成しておく。つぎに、適当な評価ツールを利用して、評価値最大の S-TSP テーブルを決定する。それで、決定された S-TSP テーブルに基づいて、目標序列テーブルを作成する。さらに、作成した目標序列テーブルに従って、自動走行制御を行う。本システムは「状況監視部」、「目標序列決定部」、「自動走行部」三つの部分に構成されている。システム構成図を図 5 に示す。

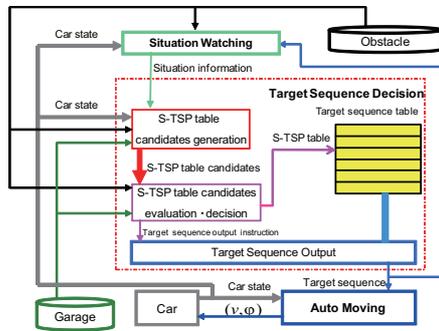


Fig. 5: System configuration

### 5.1 状況監視部

状況監視部は車両の現在状態点、障害物位置、目標序列を見て、車両の状況を出す。状況定義を Table 7 に示

す。状況遷移図を Fig.6 に示す。状況遷移条件を Table 8 に示す。

Table 7: Situation definition

0	Start, moving into parking lot
1	Danger, collision with obstacle
2	Moving, moving towards current TSP
3	Arrival, arriving at current TSP

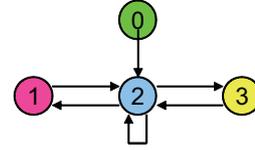


Fig. 6: Situation shift

Table 8: Situation shift condition

0	2	Target sequence table initialization over
2	1	Collision with obstacle before arrival at current TSP
1	2	No collision with obstacle before arrival at current TSP
2	2	Car state is not current target state and no collision with obstacle before arrival at current TSP
2	3	Car state is current TSP
3	2	Car state is not current TSP

### 5.2 目標序列決定部

S-TSP テーブル候補生成 基本的には、障害物の形状と車両の運動特性をともに考慮して、S-TSP テーブル候補を設計する。ここでは、ブロック形状の障害物に対して設計する。TSP1 は、車両の現在状態点の方向角との差分は「-90度 90度」の範囲内とし、100 個の異なる角度を取得することによって、決定する。TSP2 は、TSP1 を通過して、障害物の正面所在線との交点にする。TSP3 は、TSP2 と同一円周上にあり、方向角が 0 である点にする。TSP4 は、TSP3 と同一直線上にあり、TSP6 との水平距離が最小半径である点にする。TSP5 は、TSP4 と同一円周上にあり、TSP6 と同一直線上にある点にする。TSP6 は、駐車状態点にする。

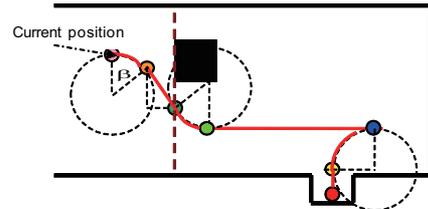


Fig. 7: TSP table candidates generation

S-TSP テーブル候補評価・決定 予見ファジィ制御器を用いて [ 障害物との距離 ] と [ 駐車所要時間 ] を評価指標として、S-TSP テーブル候補を評価する。高い評価を得られた S-TSP テーブルによって、目標序列テーブルを作成する。

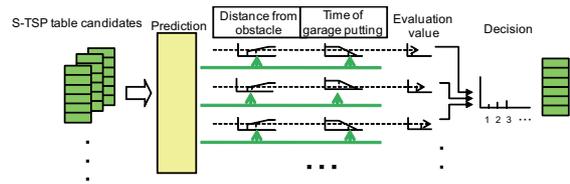


Fig. 8: Evaluation · Decision

### 5.3 自動走行部

車両の現在状態点と目標序列を見て、操舵角や、速度を決定する。本稿では、速度が瞬間変化可能の低速と仮定しており、低速前進、低速後進、停車の一つを出力する。操舵角は最大操舵角で左へ、最大操舵角で右へ、0の一つを出力する。

## 6 シミュレーション

### 6.1 実験環境

車両の前後輪距離は1.5[m]、幅は1[m]である、最大操舵角は左右45[deg]である。障害物は1[m]×1[m]のブロックである。駐車場幅は12[m]である。車庫(駐車状態点)を(0,0,1.57)とする。入り口(初期状態点)を(-20,8,θ)とする。ただし、 $\theta \in [-0.52, 0.52]$ である。

### 6.2 Case1: 障害物が存在しない場合

車両の初期状態点は(-20,8,0)である。障害物が存在しないことによって、S-TSPテーブルのTSP1とTSP2とTSP3を重ねさせて、駐車できる。S-TSPテーブルをTable 9に示す。車両はS-TSPテーブルのTSPを順番に到達して、駐車することができた。車両運動軌跡をFig.9に示す。

Table 9: S-TSP table

TSP1	(-5.5,8,0)
TSP2	(-5.5,8,0)
TSP3	(-5.5,8,0)
TSP4	(1.5,8,0)
TSP5	(0,6.5,1.57)
TSP6	(0,0,1.57)

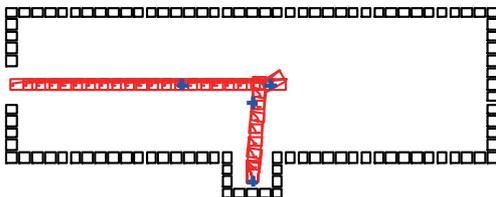


Fig. 9: Movement track of case1

### 6.3 Case2: 一つの障害物がある場合

車両の初期状態点は(-20,8,0)であり、障害物の一つ(-10,9)のところにある。車両は障害物を回避できるようなS-TSPテーブルを作成して、駐車できる。S-TSPテーブルをTable 10に示す。車両はS-TSPテーブルのTSPを順番に到達して、駐車することができた。車両運動軌跡をFig.10に示す。

Table 10: S-TSP table

TSP1	(-17.81,7.83,-0.47)
TSP2	(-11.5,4.61,-0.47)
TSP3	(-10.81,4.45,0)
TSP4	(1.5,4.45,0)
TSP5	(0,2.95,1.57)
TSP6	(0,0,1.57)

### 6.4 Case3: 複数の障害物がある場合

車両の初期状態点は(-20,8,0.52)であり、障害物は二つ(-10,9)と(-4,5)のところにある。車両はS-TSPテーブルを更新することによって、複数の障害物を回避して、駐車できる。車両は一番目の障害物を回避した

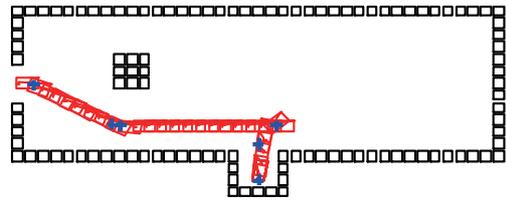
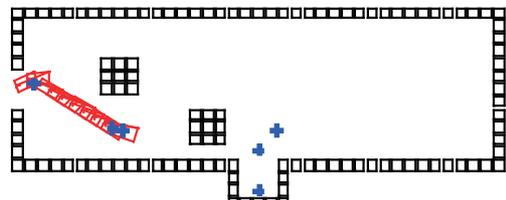


Fig. 10: Movement track of case2

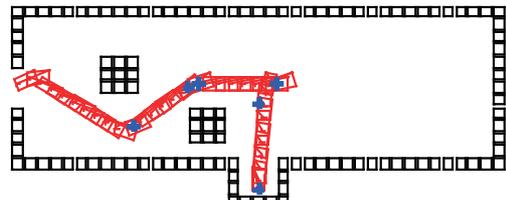
後、次の障害物を発見したことによって、S-TSPテーブルを更新し、目標序列テーブルを更新して、駐車している。更新前後S-TSPテーブルをTable 11に示す。車両運動軌跡をFig.11(a)(b)に示す。

Table 11: S-TSP table

	Before update	After update
TSP1	(-17.77,8.36,-0.5)	(-9.91,4.95,0.59)
TSP2	(-11.5,4.69,-0.5)	(-5.5,7.97,0.59)
TSP3	(-10.77,4.7,0)	(-4.65,8.23,0)
TSP4	(1.5,4.7,0)	(1.5,8.23,0)
TSP5	(0,3.2,1.57)	(0,6.73,1.57)
TSP6	(0,0,1.57)	(0,0,1.57)



(a) Before TSP table updated



(b) The whole track

Fig. 11: Movement track of case3

## 7 おわりに

目標序列を用いて、移動可能領域を考慮した知的駐車制御システムを構築して、シミュレーションを実施し、システムの有効性を検証した。目標状態点テーブル候補の生成方法と評価方法はモジュール化することが可能であり、汎用性がよい。本稿では、車両の速度は瞬間変化可能な定低速と仮定しているが、今後は速度変化可能な四輪車を制御対象として、システムの改善が課題である。

### 参考文献

- 1) 警察庁：自動車保有車両数統計, <http://www.mlit.go.jp/common/000124118.pdf>
- 2) 武藤 裕美, 安信 誠二: 福祉車両の走行支援情報提供システムの提案, 17th Fuzzy System Symposium, 245/248, (2001)
- 3) 常盤 仁志, 安信 誠二: ファジィ目標を用いた四輪車の駐車制御, 第33回ファジィワークショップ, 36/37, (2009)
- 4) ダオ ミン クアン, 劉 康志, 大形 明弘: 4輪車自動駐車システムの開発 - 理論と実験 -, 計測自動制御学会論文集 Vol.40, No.12, 1211/1219, (2004)