

# Fuzzy Logic based Systems for Autonomous Parking – Part I: An Integrated Multi-functional System

Yu Wang and Xiaoxi Zhu

概要- 本論文では、多機能を備えたインテリジェントな自律駐車システムを紹介する。統合システムは、ファジィベースのオンボードシステムとコントロールセンターという2つのサブシステムから構成される。現在のほとんどの自動駐車実験とは異なり、このFBOSは、2つの異なる駐車モードの下で、車のスロット検出と駐車の実行することを可能にする。コントロールセンターが促進し、エラーの可能性を減らすためにリアルタイムのモニタリングも実現する。

キーワード- 自律駐車、インテリジェントシステム、ファジィコントローラ、並列駐車、垂直駐車

## I. INTRODUCTION

過去10年間、駐車場の難易度が上がるにつれて、副作用が急増している。駐車場を探すのは時間がかかる。そのほか、駐車の間でも傷や凹凸が生じることが多い。信頼性の高い自律走行モジュールが、問題を解決するために望まれている。自律駐車に成功させるための主な課題は、姿勢の安定化、操舵角の制御、経路計画などである。これらの問題を解決するために、様々な制御理論が提案されている。非ホロノミックシステムにおいて姿勢安定化を達成するためには、連続時間変化フィードバックと不変多様体技術が有効であることが証明されている([1][2])。以下の作品([3]~[4])は、無人搬送車の操舵角を安定化させる他の方法を示している。経路計画戦略も[5]-[6]でモデル化されている。近年、オートパーキングにおけるファジィ論理制御が注目されている。ファジィ論理に基づくコントローラは、人間の推論を模倣し、駐車プロセスの不確実性を扱う上で、他のコントローラよりも本質的に優れている([7]-[11])。

自律駐車に関する過去の研究のほとんどは、焦点が狭い。自動駐車車両は、駐車枠の前に正しく配置されれば、単に空きスペースに移動するだけである。駐車場に適したスロットを見つけることは、まだ人間の観察に依存しており、完全に信頼できるものではない。本論文では、スロット検出と駐車の実行を実現するインテリジェントな自律駐車システムを提案する。システムはファジィ論理制御に基づいている。姿勢安定化、操舵角制御、駐車意思決定の問題に取り組むために、3つのファジィ論理コントローラを設計し、実装した。実験による制御ルールのパラメータチューニングにより、安定した性能が得られる。

筆頭著者はイェール大学、yu.wang@aya.yale.edu、筆頭著者は現在Googleに勤務している。

地方では大規模な駐車場が多い。このような場所に駐車することは、環境の汎用性が低いため、より簡単で安全である。しかし、空のスロットを見つけるのは時間がかかる。インテリジェントな自律駐車システムは、このような環境下での駐車を実行できるように設計されている。車の所有者は、単に車から入り口で退出し、出口でフェッチすることができる。空のスロットを探す、駐車する、移動するなどの中間プロセスは、制御センターの助けを借りて、車が処理する。

このようなインテリジェントなシステムは、実生活への応用において大きな可能性を秘めている。大企業はこのシステムを導入することで、ピーク時の駐車にかかる無駄な時間を削減することができる。ショッピングセンターは、混雑を避けるために駐車場を作ることができる。近隣地域は、公共インフラの一部としてこのシステムを統合することもできる。

## II. システムの機能性

インテリジェントな自律駐車システムは、商業化に向けて大きな可能性を秘めた統合多機能システムである。ファジィベースオンボードシステム(FBOS)とコントロールセンターの2つのサブシステムから構成される。制御センターには、駐車場の地上局と、制御室内のPC上のグラフィック・ユーザー・インターフェース(GUI)の2つのパートがある。地上局はリアルタイムの二重RF通信を通じて直接車と通信する。GUIはRS232シリアルポートケーブルで地上局に接続されている。GUIの主な目的は、駐車場の状態や駐車場のプロセスを監視することである。また、テキストメッセージを通じて自動車所有者とコミュニケーションをとるための追加機能もサポートしている。

本システムは、人手を介さずに自律駐車を実現することができる。車が入り口まで走行したら、オーナーは車から自動駐車モードに切り替えることができる。まず、すべてのものを受信すると、要求信号を駐車して、制御センターの制御部にオフィサーを送信する。センターは駐車場を確認し、異常が検出されない場合は許可を与える。自動駐車の間、車が現在の状態を送り返す(駐車場や駐車場などを探索)。この情報は、グラフィック・ユーザー・インターフェースに表示される。車はゆっくりと壁に沿って走行し、利用可能な駐車枠を探す。適切なスペースが検出されると、制御センターは場所と対応する駐車モード(すなわち、平行駐車または垂直駐車)について知らされる。車が駐車して正しく配置された時点で、終了信号がコントロールセンターの通知に送られる。

textメッセージ Car owner then, receives 車はスリープモードに切り替わり、RF通信を除くすべての機能が無効になっている。ドライバーが巨大な駐車場を歩いて車を取ってきたくない場合、SMS経由で制御センターに休暇要求を送り返すことができる。顧客からの要望があった場合、コントロールセンターは地上局経由で車に転送する。車は離脱モードに切り替え、出口まで運転する。

安全性が第一の関心事であるため、システムは予期せぬ中断を処理できるように設計されている。障害物回避はFBOSによって制御される。車内のリアルタイムRF通信により、混雑状態にある車などの公園が、事故や異常、火災を報告することができる。situWorkersがコントロールルームの駐車場を監視すると、それに応じて反応する。

### III. ファジィベースのオンボードシステム

#### A. Overview

この自律駐車システムの主要な構成要素は、ファジィ・ベース・オンボード・システム(FBOS)である。FBOSは、無人運転、駐車場検出、並列/垂直駐車、リアルタイム通信など、さまざまな機能を実現する統合システムである。FBOSは、マイクロプロセッサ、ファジィ論理コントローラ、センサ、RF通信モジュールから構成される。

モード FBOSを搭載した車両は、以下のように動作が異なる。

modes defined as follows:

- 1) Searching: actively search for a suitable parking slot
- 2) Parking: complete parallel/vertical parking
- 3) Sleep: idle state, waiting for commands
- 4) Leaving: automatically drive to the exit

車とコントロールセンター間の二重リアルタイム通信チャンネルが維持される。現在の行動モードと車の位置は連続的に更新される。緊急時、車はコントロールセンターにアラームを送り、指示を待つ。

#### B. センサーの配置

車の動きは1つの平面に限定されるため、センサーに十分な赤外線は、どの自律的な駐車を測定するかを容易にする。linear 近接センサは送信機と受信機から構成される距離赤外線である。送信機は赤外線を発し、反射した障害物に遭遇したときに跳ね返る。光から電圧レシーバーレベルへ。したがって、出力電圧の大きさは、検出された距離の逆数に比例する。正確な式はキャリブレーションから得ることができる。

姿勢安定化、環境モニタリング、経路検出など、様々な作業を容易にするために6つのセンサーが使用されている。6つのセンサーは、前中央、後中央、前左、後左、前右、後右(FC、BC、FL、BL、FR、BRと表示)に配置されている。の2つのセンサーは

右側には、駐車場を行進しながら姿勢を安定させるために使用される。左側のセンサーは駐車場の大きさを検出する。フロントセンサーとバックセンサーは障害物回避に役立つ。

#### C. ファジィ論理コントローラ

1965年にZadehによって初めて紹介されたファジィ論理は、人間の推論と似ているため、大きな関心を集めている。2つの状態(TRUEとFALSE)しか持たないブール論理とは異なり、ファジィ集合は極端なケース(0と1)の間にいくつかの真理値を持つことができる。ファジィ論理に基づくコントローラは、不確実性と不正確性を扱うことに優れているため、従来のコントローラを凌駕している。

アウトカムファジィから生成される各コントローラールールは、3つの制御ステージ、値のうちの特定のものから構成される。入力ステージ、決定ステージ、出力ステージ。ファジィ化とも呼ばれる入力段階では、単一値の入力が言語変数にマッピングされる。言語変数とは、あらかじめ定義された決定論的メンバーシップ数学関数を持つファジィ集合である。従来の関係性は、ルールの入力と出力をコントロールする。ファジィコントローラ(推論)における意思決定は、通常、デファジィ化に基づいて行われるが、IF-THENはルールを組み合わせたものである。提案するFBOSでは、ファジィ論理コントローラを用いて、姿勢の安定化とステアリング、およびスロット検出における意思決定を実現することが可能である。

1) 姿勢の安定化: 姿勢の安定化は、自律駐車において極めて重要である。衝突を回避し、駐車スロットサイズの正確な計測を保証する。車は前輪を操ることで壁追従挙動を示す。これは、センサーFRとBRからのリアルタイム測定値に基づいて、ファジィ論理コントローラによって制御されます(図1)。

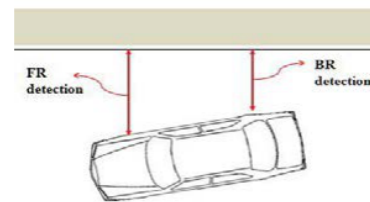


図1. 姿勢の安定化

ファジィ論理コントローラは2つの入力を受け取る:

$$X_d = \begin{cases} FR - LIMIT & \text{if moving forward} \\ BR - LIMIT & \text{if moving backward} \end{cases}$$
$$X_e = \begin{cases} FR - BR & \text{if moving forward} \\ BR - FR & \text{if moving backward} \end{cases}$$

これらの入力は、いずれも以下のメンバーシップ関数に基づいてファジィ化される。ユニバーサルセットは、正の大きな(PL)、正の小さな(PS)、ゼロ(ZO)の5つのパーティションに分割される。

TABLE I  
ポーズ安定化のためのIF-THENルール

$X_e \backslash X_d$	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	NL	NL	NS	NS	ZO
NS	NL	NS	NS	ZO	PS
ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
PS	NS	ZO	PS	PS	PL
PL	ZO	PS	PS	PL	PL

負の小さい(NS)、負の大きい(NL)。ファジィ論理コントローラの出力は、前輪の操舵角 $\phi$ であり、これはステアリングクリスプセットとして定義される。ステアリング正前面方向。を出力し、右は正の大きな(PL)、正の小さな(PS)、ゼロ(ZO)、負の小さな(NS)、負の大きな(NL)の5つのセットに分けられる。入力と出力のメンバーシップ関数を図2に示す。

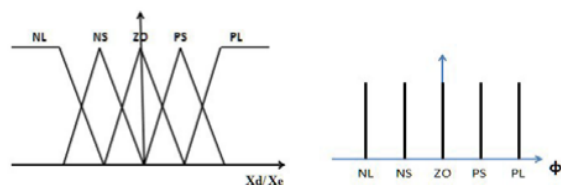


図2. 姿勢安定化における入出力のメンバーシップ関数

$X_d$ と $X_e$ の両方が正の大きさであれば、車は壁から遠く離れており、距離はまだ増加している。したがって、前輪を右(正方向)に操舵して修正することが望ましい。ファジーIF-THENルールは言語形式で次のように記述できる:

IF  $X_d$  is PL and  $X_e$  is PL, THEN  $\phi$  is PL  
 IF  $X_d$  is PL and  $X_e$  is PS, THEN  $\phi$  is PL  
 IF  $X_d$  is PL and  $X_e$  is ZO, THEN  $\phi$  is PS

.....

IF  $X_d$  is NL and  $X_e$  is NL, THEN  $\phi$  is NL

The complete IF-THEN rules are summarized in Table I.

Posture stabilization can be maintained via the designed control rules. Even if the initial car position is not parallel with the wall, it can automatically adjust itself.

2) ステアリング制御: モーションコントロールにおける重要な問題の一つは、車を一定の角度で操舵することである。この特徴は、自動車が90度回転するはずの垂直駐車において特に重要である。そのために、ファジーベースのPIDコントローラを実装する。制御図を Fig.3 に示す。

回転角 $\phi$ を記録するために、ArduIMUはFBOSに統合される。ArduIMUはArduino互換プロセッサと組み合わせた慣性計測ユニットである。姿勢ヘディング基準システム(AHRS)コードを実行し、ジャイロスコープからの角速度測定に基づいて基準点に対する角度値を計算する。

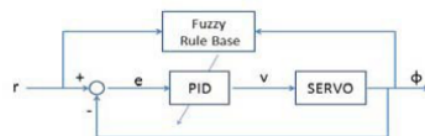


図3. 制御図

旋回開始前に電流角をゼロにクリアしてください。設定点 $r$ は、90度/-90度の望ましい旋回である。出力は電流角 $\phi$ である。設定点と電流角の差は誤差角 $e$ である。(図4)

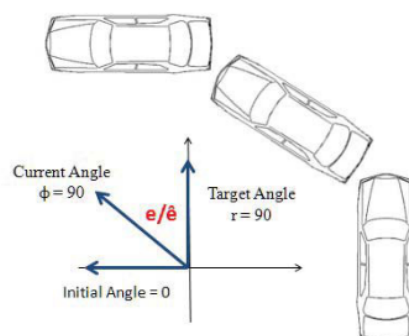


Fig. 4. Angle Control

PID コントローラへの入力は、誤差角と誤差の変化  $e/\dot{e}$ 、すなわち ArduIMU からの角速度である。出力はDCサーボのステアリング角を制御するための電圧信号である。入力と出力の両方が、以下のファジー集合にマッピングされる: 正の大きな(PL)、正の小さな(PS)、ゼロ(ZO)、負の小さな(NS)、負の大きな(NL)。メンバーシップ関数を図5に示す。ファジーIF-THENルールは表IIにまとめられている。

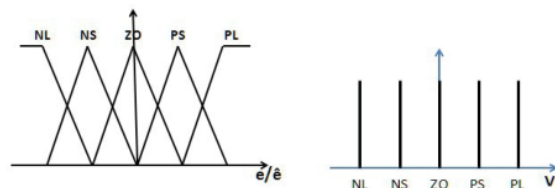


図5. 角度制御における入出力のメンバーシップ関数

3) 駐車場の検出: 駐車場は、すべての駐車場が駐車場の左側にあるように設計されている。特定のスロットが占有されている場合、センサーFLの測定値は小さな値でなければならない。スロットが空の場合、センサーFLは大きな測定値を報告する。したがって、スロットが空かどうかは簡単に判断できる。

駐車場の形態を決定する際には、駐車場の幅と長さの両方を考慮する必要がある。

TABLE II

テリング制御のためのIF-THENルール

$\delta \backslash e$	NL	NS	ZO	PS	PL
PL	ZO	PS	PL	PL	PL
PS	NS	ZO	PS	PL	PL
ZO	NL	NS	ZO	PS	PL
NS	NL	NL	NS	ZO	PS
NL	NL	NL	NL	NS	ZO

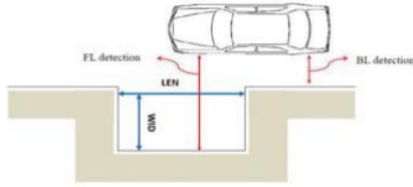


Fig. 6. Slot Detection

センサーFLの測定に対応する駐車場スロットの幅(WID)を、小さなオフセットで調整したもの(図6)。ただし、長さは以下の方法で計算する。回転エンコーダは、2つの前輪を結ぶ車軸に固定され、車輪の回転数をカウントする。センサーFLの測定が小さいものから大きいものに切り替えるたびに、ロータリーエンコーダーはゼロにクリアされる。測定値が大きいものから小さいものに切り替えるとすぐに、ロータリーエンコーダーの値が読み出される。したがって、空スロットの長さは、 $LEN = 2 \times \pi \times \text{直径} \times \text{カウンタ}$ で与えられる。ファジィ論理コントローラへの2つの入力、スロット寸法WIDとLENであり、3つのファジィ集合のいずれかにマッピングすることができる: 並列駐車に適している(PS)、垂直駐車に適している(VS)、駐車に適していない(NA)。出力は、次のステップの行動nを示す離散集合、すなわち、並列駐車(P)、垂直駐車(V)、および継続検索(C)である。メンバーシップ関数を図7に示す。

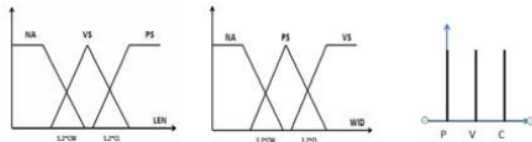


図7. 駐車場決定における入力と出力のメンバーシップ関数

IF-THENルールを表IIIにまとめる。

#### D. Parking

空スロットの長さから、パラレルパーキングとパーティカルパーキングの2つのパーキングモードが可能である。並列駐車の手順は以下の通りです(図8):

- 1) Adjust initial position

TABLE III

マーケティング決定のためのIF-THENルール

$WID \backslash LEN$	NA	VS	PS
NA	C	C	C
PS	C	C	P
VS	C	V	V

- 2) 左ステアリングして後方へ移動する
- 3) 右ステアリングして後方へ移動する
- 4) スロット内部でのポストパーキング調整

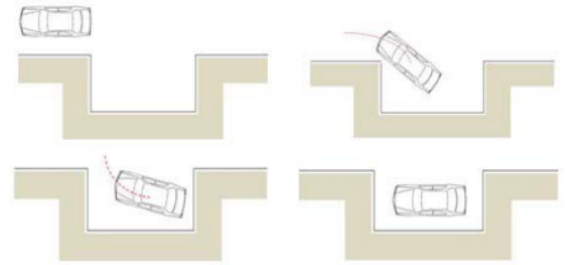


図8. 並列パーキング

- 垂直駐車の手順は以下の通りである(図9):
- 1) 初期位置の調整
  - 2) バックトラックターン 90度
  - 3) Move backward straightly



図9. 垂直パーキング

#### E. 緊急時の取り扱い

障害物回避はFBOSによって処理される。障害物が検出されると、車は直ちに停止し、クリアされると、移動を再開する。タイマーは車が止まるとカウントを開始する。ある制限時間外に車が移動を再開しない場合、混雑を示す信号がコントロールセンターに送られる。FBOSにはモーションセンサーも搭載されている。モーションセンサーは異常な揺れを検出することができ、カークラッシュを示す信号が送り返される。渋滞や衝突の場合、車はコントロールセンターからの指示を待つ。警報が解除された場合、「再開」コマンドが送信される。それ以外の場合、「手動」コマンドは、自動駐車モードを終了し、手動制御を待つように指示する。



#### IV. CONTROL CENTER DESIGN

##### A. Overview

もうひとつのサブシステムであるコントロールセンターは、駐車場の全体的な状態や駐車場の状況を注意深く監視するように設計されている。

コントロールセンターは、駐車場にあるグランドステーションと、コントロールルームにあるグラフィックユーザーインターフェースの2つの部分から構成されている。リアルタイムデュプレックス通信チャンネルが確立されている。インテリジェントカーと地上局の間で、RF信号を介して情報が交換される。車の状態は地上局に報告され、GUIに転送され、制御室からのコマンドは地上局から車に送られる。地上局とGUI間の連携は、RS232ポートを用いたケーブル接続で確立されている。SMSを介して自動車所有者と通信する追加機能を、Bluetooth Technologyを使用してGUIに実装する。図10は、サブシステム間の通信チャンネルを示したものである。



図10. サブシステム間の通信

##### B. 機能と実現

1) RFを介した自動車とのリアルタイム通信: 地上局と自動車には、RF信号の送受信モジュール、すなわち小型のUHF無線モジュールが搭載されている。これらのモジュールは、最大300mの簡単なテレメトリリンクを確立し、最大128KB/sの速度でデータを送信できる。ワイヤレス通信は、様々なノイズのために比較的高いエラー率に悩まされる。したがって、信頼性の高いデータ伝送を保証するために暗号化を設計し、実装する。各情報パッケージは、アドレスバイト、データバイト、チェックバイトの3バイトで構成される。同じアドレスバイトを持つホストのみが検証できる。データバイトにアクセスする。チェックバイトは、さらに

verification.

2) RS232シリアルポート伝送: 制御室内の地上局とPC間のデータ伝送はケーブル接続で実現。地上局におけるデータ伝送と受信は、ユニバーサル同期・非同期受信機送信機(USART)モジュールによって実現される。RS232シリアル通信規格に従い、2つの端末間で非同期フルデュプレックス伝送を確立する。PCシリアルポートは、MAX233チップの助けを借りて、RS232ケーブルを介して地上局のマイクロプロセッサに接続される。負荷を最小化し、伝送を高速化するために、2つのサブシステム間で伝送されるステータスまたはコマンドは

は単一のアルファベットとして符号化される(例:Sを送信すると、車が検索モードであることを示す)。

3) Bluetooth通信: Bluetooth技術を使用して、PCとGSMモデム間のリンクを確立する。GSMモデムは、テキストをメッセージとして自動車所有者に情報を転送する。送信される情報は、CarID、車の位置、その他の関連情報を含む連結文字列である。この機能はC#プログラムを使ってGUIに統合される。GSMモデムを制御するために使用される特定のライブラリは、ATコマンドとしても知られるHayesコマンドセットである。情報漏洩を防ぐため、暗号化を実装している。

#### V. 実装と実験

#### RESULTS

設計したインテリジェントな自律駐車システムが実現可能であることを実証するために、自動車プロトタイプ(図11)と模型駐車場を製作し、テストを行った。システムは1:14のスケールで作られている。プロトタイプは長さ220mm、幅180mm、高さ160mmである。駐車場(図12)の寸法は3m×2.5mである。駐車場モデルは、並列駐車場と垂直駐車場の2つの行から構成されている。地上局は駐車場の中央に位置していた。ファジィ・ベース・オンボード・システム(FBOS)は、以下のコンポーネントで実装された: PIC 16F877 16ビットマイクロコントローラ、ArduIMU、シャープ赤外線距離センサ(GP2D120XJ00F)、DCモータとL293Eモータドライバ、DCサーボユニット、R5-434-5 RF送受信モジュールペア、ロータリーエンコーダ、モーションセンサ。地上局のコントローラは、PIC 16F877 16ビットマイクロコントローラ、R5-434-5 RF送受信モジュールペア、RS232シリアルポート、MAX233CPP RS232ドライバ、16ビットLCDバックライト、メンブレン型キーパッド、ブザー、LEDライトを使用して実装した。



Fig. 11. Intelligent Car Model



Fig. 12. Car park

実験では、自動運転、スロット検出、並列駐車、垂直駐車、緊急ハンドリングの各機能をテストした。

異なるサブシステム間の通信もテストされる。すべての試験において、液晶がスクリーンを受け取ったステーションの反射地面とPC端末の自動車GUIがテストされた。図13はポストパーキング期間中のGUIを示したものである。左上のダイアログボックスを使用して、Bluetoothとシリアルポート接続を設定する。左下は車の位置を表示している。残りは、監視のための駐車場の概要である。



図13. 車の駐車状況

実験映像から以下の画像を抽出する。図14は、並列駐車の手手順を示したものである。Fig. 15は、垂直駐車実験に成功したことを示している。これらの実験から、FBOSは様々な状況において適切な駐車モードを選択するのに頑健であることが証明された。



Fig. 14. Parallel parking



Fig. 15. Vertical parking

駐車場で障害物が検出された場合、車は停止して待機する。時間内に障害物が取り除かない場合、渋滞が報告される。渋滞の位置はリアルタイムRF通信でコントロールセンターに送り返され、GUIに反映される。図16は、渋滞時のカーパーク状態とGUI応答を示している。

## VI. 結論と今後の課題

本論文では、インテリジェントな自律駐車システムを提案する。本システムは、FuzzyBased Onboard System (FBOS)と制御センターの2つのサブシステムから構成される。



Fig. 16. Congestion mode

FBOSはスロット検出と自律駐車を制御し、赤外線センサーやArduIMUのような他のコンポーネントによって促進される。FBOSは、障害物回避、制御センターとの通信など、その他の支援機能を管理する。地上局とGUIからなる制御センターは、リアルタイム監視を目的として設計されている。RF信号、シリアルポート、Bluetoothを介した通信チャネルを確立し、タスクを実現する。

今後の改良は、ステアリング角制御に焦点を当てるべきである。DCサーボは、前輪のステアリング角度を制御するために使用される。サーボは、デューティサイクルがステアリング角を決定する電圧パルスから電力を引き出す。理想的には、ステアリング角は任意の値として設定できる。しかし、摩擦などのノイズにより、微調整は禁止されている。初期実装では、ステアリング角は2つの値、すなわち小と大に制限される。ステアリング角制御のための他の方法とコンポーネントは、今後検討されるべきである。性能を向上させるためには、ステアリング角度を正確に制御することが不可欠である。

## REFERENCES

- [1] C. Samson, Time-varying feedback stabilization of nonholonomic car-like mobile robots, *Int. J. of Robotics Research*, 1993
- [2] F. Lizarralde and J T. Wen, Feedback stabilization of nonholonomic systems in the presence of obstacles, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1996, pp.2683-2687
- [3] A. Tayebi, M. Tadjine and A. Rachid, invariant manifold approach for the stabilization of nonholonomic systems in chained form: Application to a Car-like mobile robot, *Proc. 36th IEEE Conf. on Decision and Control*, 1997, pp.4038-4043
- [4] R M. Murray and S S. Sastry, Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids[J], *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1993, vol.38, no.5, pp.700-716
- [5] Z X. Li and T D. Bui, Robot path planning using fluid model, *J. Intell. Robot. Syst.*, 1998, vol.21, no.1, pp.29-50
- [6] R. Glasius, A. Komoda, and S C A M Gielen, Population coding in a neural net for trajectory formation, *Netw. Comput. Neural Syst.*, 1994, vol.5, no.4, pp.549-563
- [7] K Y. Lian, C S. Chin, and T S. Chiang, Parallel parking a car-like robot using fuzzy gain scheduling, in *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, 1999, vol. 2, pp. 1686-1691.
- [8] Tzuu-Hseng S. Li, Ying-Chieh Yeh, Jyun-Da Wu, Ming-Ying Hsiao, and Chih-Yang Chen, Multifunctional Intelligent Autonomous Parking Controllers for Carlike Mobile Robots, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 5, 1687-1699
- [9] Wang, Yu, and Xiaoxi Zhu. "Hybrid fuzzy logic controller for optimized autonomous parking." *2013 American Control Conference*. IEEE, 2013.
- [10] Wang, Yu. "Design of Triple-Level Multiple Models Fuzzy Logic Controller for Adaptive Speed Control with Unknown External Disturbances." *IFAC Proceedings Volumes* 47.3 (2014): 6326-6331.
- [11] Wang, Yu, and Xiaoxi Zhu. "A robust design of hybrid fuzzy controller with fuzzy decision tree for autonomous intelligent parking system." *2014 American Control Conference*. IEEE, 2014.