

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。自律駐車を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と、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容易にす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る。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。

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

Yu Wang and Xiaoxi Zhu

Abstract— This paper presents an intelligent autonomous parking system with multi-functions. The integrated system consists of two sub-systems, namely the Fuzzy-Based Onboard System and control center. Unlike most current auto-parking experiments, this FBOS enables the car to perform both slot detection and parking under two different parking modes. Facilitated by the control center, real-time monitoring is also achieved to reduce chances of error.

Keywords—Autonomous parking, Intelligent system, Fuzzy controller, Parallel parking, Vertical parking

I. INTRODUCTION

The past decade has seen a sharp increase in the number of vehicles. One of the side effects is the growing difficulty of parking. Searching for parking space is time-consuming. Besides, scratches and bumps often occur in parking process. A reliable autonomous-parking module is desired to resolve the trouble. Key issues in successful autonomous parking include posture stabilization, steering angle control and path planning. Various control theories have been proposed to address these issues. Continuous time-varying feedback and invariant manifold techniques are proved effective in achieving posture stabilization in nonholonomic systems([1]-[2]). The following works ([3]-[4]) present other methods to stabilize steering angle for unmanned vehicles. Path planning strategies have also been modelled in [5]-[6]. Recently, fuzzy logic control in auto-parking has received increasing attention. Controllers based on fuzzy logic, mimicking human reasoning, are inherently superiors than other controllers in handling uncertainties in the parking process([7]-[11]).

Most of the past researches on autonomous parking have a narrow focus. The auto-parking vehicles simply move into the empty space once it is placed properly in front of a parking slot. It is still dependent on human observation to find a suitable slot for parking, which cannot be completely trustworthy. In this paper, an intelligent autonomous parking system which achieves both slot detection and parking is proposed. The system is based on fuzzy logic control. Three fuzzy logic controllers are designed and implemented to tackle the issues of posture stabilization, steering angle control and parking decision-making. Parameter tuning of control rules through experiments yields stable performance.

The first author is with Yale University, yu.wang@aya.yale.edu, the second author is working at Google now.

Large car parks are common in rural areas. Parking in such places is easier and safer due to less environmental versatility. However, it is time-consuming to find an empty slot. The intelligent autonomous parking system is designed to facilitate parking in this setting. Car owners can simply leave their car at the entrance and fetch it at the exit. The intermediate process, like searching for an empty slot, parking, and moving out are handled by the car, with aid of the control center.

Such an intelligent system has great potential in real-life application. Large companies can implement this system to reduce wasted time on parking during peak hours. Shopping centers can built such a car park to avoid congestions. Neighbourhood can also integrate this system as part of their public infrastructure.

II. SYSTEM FUNCTIONALITY

The intelligent autonomous parking system is an integrated multi-functional system with great potential for commercialization. It consists of two sub-systems, the Fuzzy-Based Onboard System (FBOS) and control center. The control center contains two parts, the ground station which is located within the car park and the Graphic User Interface (GUI) on PC in the control room. Ground station communicates with the car directly through real-time duplex RF communication. GUI is connected to the ground station through RS232 serial port cable. The main purpose of GUI is to monitor the car park condition and parking process. It also supports the additional feature to communicate with car owners through text messages.

The system is able to accomplish autonomous parking without human intervention. Once a car is driven to the entrance, the owner can switch the car to auto-parking mode. First of all, a parking request is sent to the control center. Upon receiving the request signal, officer in the control center will check the car park and grant permission if no abnormalities detected. In the process of auto-parking, the car keeps sending back its current status, (i.e. searching for parking slot, parking, etc). This information is shown on the Graphic User Interface. The car slowly drives along the wall and searches for available parking slot. Once a suitable space is detected, the control center will be informed about the location and the corresponding parking mode (i.e. parallel parking or vertical parking). An end signal is sent to Control

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)。

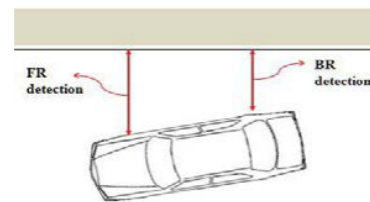


図1. 姿勢の安定化

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(Z0)の5つのパーティションに分割される。

Center once the car is properly parked. Car owner receives notification about car location via text message then. The car switches to sleep mode, with all functions disabled, except for RF communication. If the driver does not want to walk through the huge car park to fetch his car, he can send a leave request back to the control center via SMS. Upon receiving customer request, control center will forward it to the car via ground station. The car switches to leaving mode, and drives itself to the exit.

Since safety is the primary concern, the system is designed such that it is able to handle unexpected interruptions. Obstacle avoidance is controlled by FBOS. Real-time RF communication enables the car to report any abnormal situations in the car park, such as congestion, crash, and fires. Workers monitoring the car park in the control room will respond accordingly.

III. FUZZY BASED ONBOARD SYSTEM

A. Overview

The key component of this autonomous parking system is the Fuzzy Based Onboard System (FBOS). The FBOS is an integrated system which enables the car to perform different functions like unmanned driving, parking slot detection, parallel/vertical parking and real-time communication. FBOS consists of the following components: microprocessor, fuzzy logic controller, sensors and RF communication module.

The car equipped with the FBOS has different action 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

A duplex real-time communication channel between car and the control center is maintained. The current action mode and position of the car is updated continuously. In case of emergencies, car sends alarms to the control center and wait for instructions.

B. Sensor Arrangement

Since movements of the car are confined in one flat plane, infra-red sensors which measures linear distance are sufficient to facilitate autonomous parking. The infra-red proximity sensor consists of a transmitter and a receiver. The transmitter emits infra-red light, which bounces back when it encounters obstacles. The receiver converts the magnitude of the reflected light to voltage levels. Therefore, the voltage output is proportional to the reciprocal of detected distance. An accurate expression can be obtained from calibration.

Six sensors are used to facilitate various tasks such as posture stabilization, environment monitoring, path detection etc. The six sensors are placed at front center, back center, front left, back left, front right and back right (labelled as FC, BC, FL, BL, FR and BR). The two sensors on the

right side are used to maintain posture stabilization while marching down the car park. Sensors on the left side detect size of parking slots. The front and back sensors help avoid obstacles.

C. Fuzzy Logic Controller

First introduced by Zadeh in 1965, fuzzy logic has aroused great interest due to its similarity to human reasoning. Unlike Boolean logic which has only two states (TRUE and FALSE), fuzzy sets can have several truth values between extreme cases (0 and 1). Controllers based on fuzzy logic outperforms conventional controllers due to its superiority in handling uncertainties and imprecision.

A typical fuzzy controller consists of three stages, input stage, decision stage and output stage. In the input stage, also known as fuzzification, single-value input is mapped to a linguistic variable. A linguistic variable is a fuzzy set with pre-defined membership function. Conventional control rules define deterministic mathematical relationships between inputs and outputs. Decision making in fuzzy controller (i.e. inference), however, is based on IF-THEN rules. The output stage, usually called defuzzification, combines possible outcomes from each rule to generate a specific control value. In the proposed FBOS, fuzzy logic controller is used to achieve posture stabilization and steering, as well as decision making in slot detection.

1) *Posture Stabilization*: Posture stabilization is crucial in autonomous parking. It helps avoid collisions and ensures accurate measurement of the parking slot size. Car exhibits a wall-following behavior by steering front wheels. This is controlled by fuzzy logic controller, based on real-time measurements from sensors FR and BR (Fig.1).

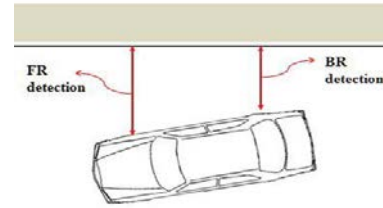


Fig. 1. Posture Stabilization

The fuzzy logic controller takes in two inputs:

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

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

Both of these inputs are fuzzified based on the following membership function. The universal set is divided into five partitions: positive large (PL), positive small (PS), zero (ZO),

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 ϕ 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。

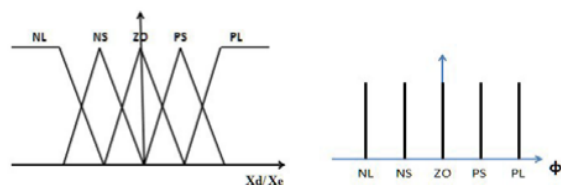


図2. 姿勢安定化における入出力のメンバーシップ関数

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。ファジィ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 ϕ is PL
 IF X_d is PL and X_e is PS, THEN ϕ is PL
 IF X_d is PL and X_e is ZO, THEN ϕ is PS

.....

IF X_d is NL and X_e is NL, THEN ϕ 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、ファジィベースのPIDコントローラを実装する。制御図を Fig.3 に示す。

回転角 ϕ 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。

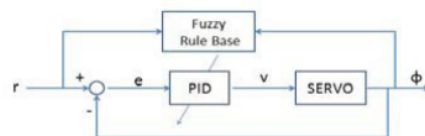


図3. 制御図

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 ϕ である。設定点と電流角の差は誤差角 e である。(図4)

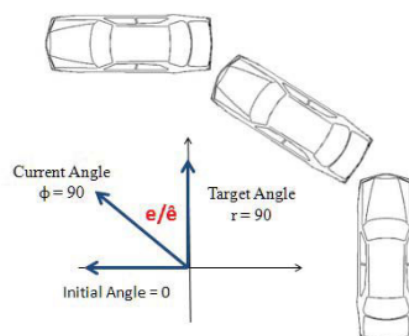


Fig. 4. Angle Control

PID コントローラへの入力、誤差角と誤差の変化 e と \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、以下のファジィ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。ファジィIF-THENルールは表IIにまとめられている。

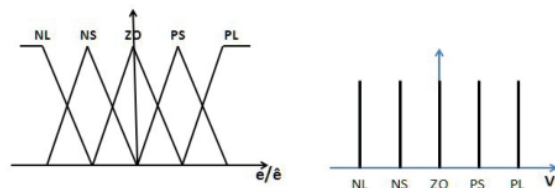


図5. 角度制御における入出力のメンバーシップ関数

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 I
IF-THEN RULES FOR POSTURE STABILISATION

$X_e \backslash X_d$	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

negative small (NS), and negative large (NL). The output of fuzzy logic controller is the steering angle of front wheels, ϕ , which is a crisp set. Steering front wheels to the right is defined as steering in the positive direction. The output is also divided into five sets, namely positive large (PL), positive small (PS), zero (ZO), negative small (NS) and negative large (NL). The membership functions of input and output are given in Fig.2.

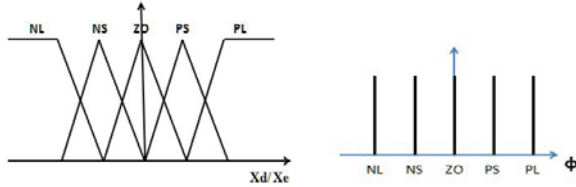


Fig. 2. Membership Function for input,output in Posture Stabilization

If both X_d and X_e are positive large, the car is far away from the wall and the distance is still increasing. Therefore, it is desirable to steer the front wheel to the right (positive direction) to make a correction. The fuzzy IF-THEN rules can be stated in the linguistic form as:

IF X_d is PL and X_e is PL, THEN ϕ is PL

IF X_d is PL and X_e is PS, THEN ϕ is PL

IF X_d is PL and X_e is ZO, THEN ϕ is PS

.....

IF X_d is NL and X_e is NL, THEN ϕ 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) *Steering control*: One critical issue in motion control is to steer the car by a fixed angle. This feature is especially important in vertical parking, where car should turn by 90 degrees. To achieve this, a fuzzy-based PID controller is implemented. The control diagram is illustrated in Fig.3.

To record the turning angle ϕ , ArduIMU is integrated in the FBOS. ArduIMU is an Inertial Measure Unit combined with Arduino-compatible processor. It runs the Attitude Heading Reference System (AHRS) code to calculate angle value with respect to a reference point based on angular velocity measurement from gyroscope.

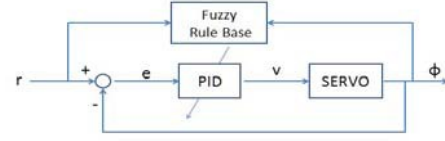


Fig. 3. Control Diagram

Before turning starts, the current angle is cleared to zero. The set point r is the desired turning of 90/-90 degrees. The output is the current angle ϕ . The difference between set point and current angle is the error angle e . (Fig.4)

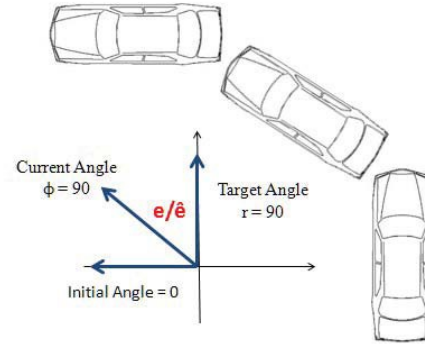


Fig. 4. Angle Control

Inputs to the PID controller is the error angle and the change of error \dot{e} , i.e. angular velocity from ArduIMU. The output is a voltage signal to control the steering angle of DC servo. Both inputs and output are mapped to the following fuzzy sets: positive large (PL), positive small (PS), zero (ZO), negative small (NS) and negative large (NL). Membership functions are given in Fig.5. The fuzzy IF-THEN rules are summarized in Table II.

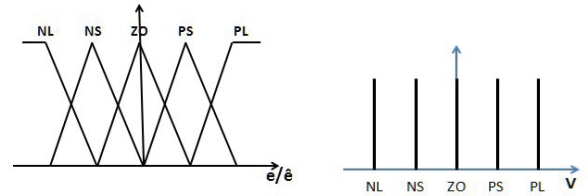


Fig. 5. Membership Function for input,output in Angle Control

3) *Parking slot detection*: The car park is designed such that all parking slots are on the left side of the parking lane. If a particular slot is occupied, the measurement of sensor FL must be a small value. If a slot is empty, sensor FL reports a large measurement. Therefore, whether a slot is empty can be easily determined.

Both width and length of the parking slot should be considered while making a decision on parking mode. The

TABLE II

テリング制御のためのIF-THENルール

δ \ 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

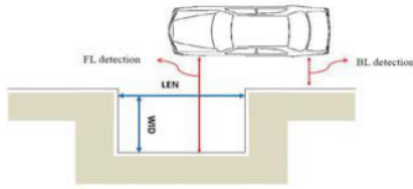


Fig. 6. Slot Detection

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。

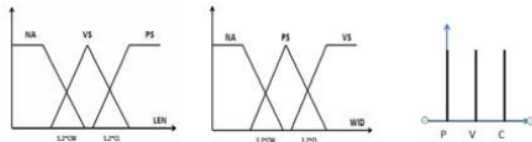


図7. 駐車場決定における入力と出力のメンバーシップ関数

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 \ LEN	NA	VS	PS
NA	C	C	C
PS	C	C	P
VS	C	V	V

- 2) 左ヘステアリングして後方へ移動する
- 3) 右ヘ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

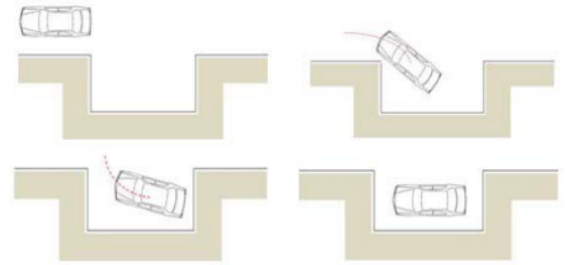


図8. 並列パーキング

- 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。

TABLE II
IF-THEN RULES FOR STEERING CONTROL

$\delta \backslash e$	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

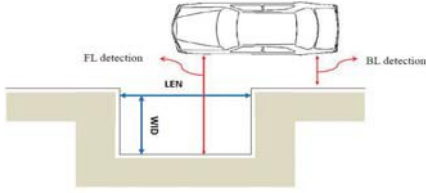


Fig. 6. Slot Detection

width of parking slot (WID) corresponding to the measurement of sensor FL, adjusted by a small offset (illustrated in Fig.6). The length, however, is calculated using the following method. A rotary encoder is fixed on the axle connecting two front wheels to count number of wheel rotations. Whenever the measurement of sensor FL switches from small to large, the rotary encoder is cleared to zero. As soon as the measurement switches from large to small, value in rotary encoder is read out. Therefore, the length of the empty slot is given by $LEN = 2 \times \pi \times \text{diameter} \times \text{counter}$

Two inputs to the fuzzy logic controller are the slot dimensions WID and LEN that can be mapped to any one of the three fuzzy sets: suitable for parallel parking (PS), suitable for vertical parking (VS), and not suitable for parking (NA). Outputs are discrete sets indicating the next step action, namely parallel parking (P), vertical parking (V), and continue searching (C). The membership functions are shown in Fig.7.

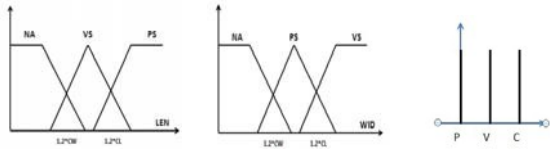


Fig. 7. Membership Function for inputs,output in Parking Decision

The IF-THEN rules are summarized in Table III.

D. Parking

Based on the length and width of the empty slot, two parking modes are possible: parallel parking and vertical parking. The steps for parallel parking are as follows (Fig.8):

- 1) Adjust initial position

TABLE III
IF-THEN RULES FOR PARKING DECISION

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

- 2) Steer to the left and move backward
- 3) Steer right and move backward
- 4) Post-parking adjustment inside the slot

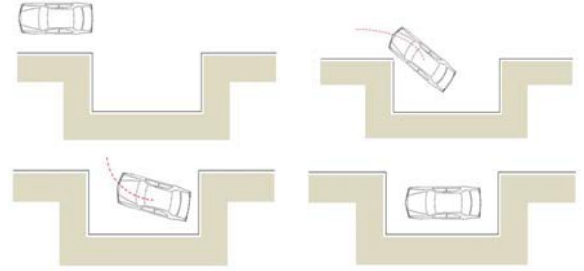


Fig. 8. Parallel Parking

The steps for vertical parking are as follows (Fig.9):

- 1) Adjust initial position
- 2) Backtracking turn 90 degrees
- 3) Move backward straightly



Fig. 9. Vertical Parking

E. Emergency Handling

Obstacle-avoidance is handled by FBOS. Car stops immediately whenever an obstacle is detected and resumes moving if it is cleared. A timer starts counting when car stops. If the car does not resume moving after a certain time limit, a signal indicating congestion will be sent to the control center. The FBOS also contains a motion sensor. Motion sensor can detect abnormal shaking and a signal indicating car-crash will be sent back. In case of congestion or crash, car waits for instructions from control center. If the alarm is cleared, a 'resume' command will be sent. Otherwise, a 'manual' command informs the car to exit auto-parking mode and wait for manual control.

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

IV. CONTROL CENTER DESIGN

A. Overview

The other sub-system, control center, is designed to closely monitor the overall condition of the car park and the status of a parking process.

The control center consists of two parts, the ground station located in the car park and the Graphic User Interface in the control room. Real-time duplex communication channels are established. Information is exchanged between intelligent car and ground station via RF signal. Car status is reported to the ground station and forwarded to the GUI, while command from control room is sent to car by ground station. Linkage between ground station and GUI is established via cable connection using RS232 ports. An additional feature, communicates with car owners via SMS, is implemented in GUI using Bluetooth Technology. Fig.10 illustrates the communication channels between sub-systems.



Fig. 10. Communication between Subsystems

B. Functions and Realisation

1) *Real-time communication with car via RF*: Ground station and the car are equipped with RF signal transmitter and receiver modules, i.e. miniature UHF radio modules. These modules can establish a simple telemetry link up to 300 meters, and transmit data at a speed of up to 128KB/s. Wireless communication suffers a relatively high error rate due to various noises. Therefore, encryption is designed and implemented to ensure reliable data transmission. Each information packet consists of three bytes: address byte, data byte and check byte. Only host with the same address byte can access the data byte. Check byte is designed for further verification.

2) *RS232 serial port transmission*: Data transmission between ground station and PC in control room is achieved via cable connection. Data transmission and receipt in ground station is realized by universal synchronous-asynchronous receiver transmitter (USART) module. Asynchronous full duplex transmission is established between the two terminals, following RS232 serial communication standard. The PC serial port is connected with the microprocessor in ground station through a RS232 cable with the help of MAX233 chip. To minimize load and speed up transmission, status or command transmitted between the two sub-systems is

encoded as a single alphabet (e.g. sending S indicating the car is in searching mode).

3) *Bluetooth communication*: Bluetooth technology is used to establish links between PC and GSM modem. GSM modem forwards the information to car owner as text messages. The information transmitted is a concatenated string containing the CarID, car location and other relevant information. This feature is integrated in GUI using C# programs. The particular library used to control GSM modem is Hayes command set, also known as AT commands. To prevent information leakage, encryption is implemented.

V. IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

To demonstrate that the designed intelligent autonomous parking system is feasible, a car prototype (Fig.11) and a model car park were constructed for test. The system is built on a scale of 1:14. The prototype is 220mm in length, 180mm in width, and 160mm in height. Dimensions of the car park (Fig.12) is 3m \times 2.5m. Car park model consisted of two rows, one for parallel parking and the other for vertical parking. The ground station was located in the middle of the car park. The Fuzzy-Based Onboard System (FBOS) was implemented with the following components: PIC 16F877 16-bit microcontroller, ArduIMU, Sharp infra-red distance sensors (GP2D120XJ00F), DC motor with L293E motor driver, DC servo unit, R5-434-5 RF transmitter/receiver module pair, rotary encoder and motion sensor. The controller in ground station was implemented using PIC 16F877 16-bits microcontroller, R5-434-5 RF transmitter/receiver module pair, RS232 serial port with MAX233CPP RS232 driver, 16-bits LCD with backlight, membrane-type Keypad, buzzer and LED light.



Fig. 11. Intelligent Car Model

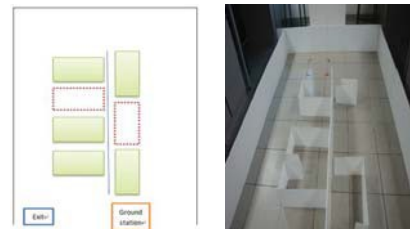


Fig. 12. Car park

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.

The experiments tested the following functions: auto-driving, slots detection, parallel parking, vertical parking, and emergency handling.

Communication between different sub-systems are also tested. During the test, the ground station received the car status and all data was reflected on the LCD screen and GUI in PC terminal. Fig.13 illustrates the GUI during post-parking period. The upper left dialogue box is used to set up Bluetooth and serial port connection. Lower left part displays car location. The rest is an overview of the car park for surveillance.

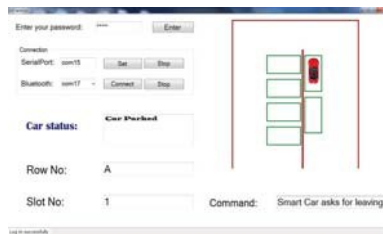


Fig. 13. Car parked status

The following images are extracted from the experiment video. Fig.14 demonstrated the whole procedure of parallel parking. Fig.15 demonstrated a successful vertical parking experiment. These experiments proved that the FBOS was robust to select the appropriate parking mode in different situations.

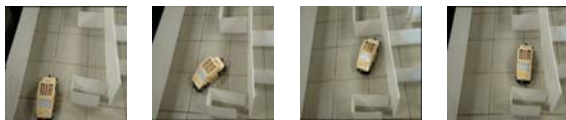


Fig. 14. Parallel parking



Fig. 15. Vertical parking

If an obstacle is detected in the parking process, the car stops and waits. Congestion is reported if obstacle is not removed in time. Location of congestion is sent back to control center through real-time RF communication and reflected on GUI. Fig.16 illustrates the car-park condition and GUI response in a congestion.

VI. CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

In this paper, an intelligent autonomous parking system is proposed. The system consists of two sub-systems, Fuzzy-Based Onboard System (FBOS) and the control center. FBOS



Fig. 16. Congestion mode

controls slot detection and autonomous parking, facilitated by other components like infra-red sensors and ArduIMU. The FBOS manages other supporting functions such as obstacle avoidance, communication with control center etc. The control center, consisting of ground station and GUI is designed for the purpose of real time monitoring. Communication channels through RF signal, serial port and Bluetooth are established to achieve the task.

Future improvements should be focused on steering angle control. DC servo is used to control the steering angle of the front wheels. The servo draws power from voltage pulses whose duty cycle determines the steering angle. Ideally, the steering angle can be set as any value. However, fine tuning is prohibited by frictional forces and other noises. In the initial implementation, steering angle is limited to two values, i.e. small and large. Other possible methods and components for steering angle control should be explored in the future. An accurately controlled steering angle is essential to improve the performance.

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, pp4038-4043
- [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.