

ファジィ制御を用いた四輪自動車の知的駐車制御

筑波大学 構造工学系 安信誠二 *村井泰仁

1. はじめに

四輪自動車の運転操作は，その動特性を理解した運転者（熟練者）の知識によって実行される。この熟練者の経験・知識に基づく知的駐車制御の実現を目指すため，制御コントローラとして予見ファジィ制御方式に基づく階層型ファジィコントローラ[1][2]を用いた知的駐車制御システムを提案する。定位置制御のコンピュータシミュレーションおよび1/10スケールの模型自動車の走行実験を行うと共に，また車庫入れのシミュレーションを行い，提案した知的駐車制御システムの駐車制御に対する有効性を評価する。

2. 四輪自動車の動特性

前輪操舵の四輪自動車が，遠心力の発生を無視できるような低速度で旋回を行う場合，各車輪は横滑りせずに路面と点接触して転がっていると考えることができる。このとき，車輪それぞれの回転中心軸の延長上に旋回中心Oがあり，これを中心に車体は円旋回運動をする（図1）。

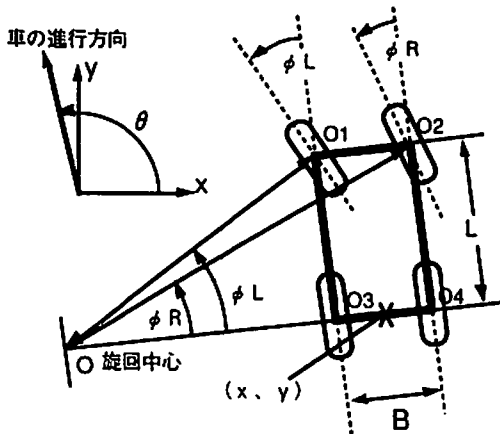


図1 四輪自動車の円旋回運動

車両が円旋回運動をするとき，その運動方程式は式(1)のようになる[3]。ただし， (x, y) ：後二輪の中間の絶対座標（以下自動車の位置と呼ぶ）， θ ： x 軸と自動車の進行方向とのなす角度（以下車体の方向と呼ぶ）， ϕ ：左右の前輪操舵角 ϕ_L と ϕ_R の平均（以下自動車の舵角と呼ぶ）， L ：ホイールベース， B ：トレッド幅， v ：前輪の平均速度（以下自動車の速度と呼ぶ），とする。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v \cos \varphi \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} &= v \cos \varphi \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{v}{L} \sin \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

3. 熟練者の知的駐車戦略

熟練者は四輪自動車の動特性を大まかに理解しているとはいえ，実際に式(1)の方程式を解きながら運転しているわけではない。彼はT字路やクランクなど，いろいろな場所を運転したときに，「行き先と，今の自動車の状態，周囲の状況などがだいたい～ならば，ハンドル操作とアクセル操作を～にする」などの経験則（知識）を習得している。この知識を用いて，うまく目的に駐車させている。熟練者が駐車時に考える戦略は，次の戦略(1)～(5)のように記述できる。

戦略(1)：最終的にどこにたどり着きたいのかという最終目標を決定

戦略(2)：周囲の状況，自動車の現在状態を把握

戦略(3)：自動車の現在状態と最終目標との関係から適切な途中目標を設定

戦略(4)：途中目標と自動車の現在状態，そして自動車の動特性から，途中目標に到達することを目的として，現在の実行すべきハンドル操作とアクセル操作を決定

戦略(5)：目標に達しているかどうかを判断（達していれば戦略(2)を，達していなければ戦略(4)を実行）

このように，戦略(2)と(5)から「制御状況の監視」，戦略(3)から「途中目標の設定」，戦略(4)から「ハンドル操作の決定」，と大きく3つの階層的な役割を考慮することができる。

4. 知的駐車制御システムの開発

3章で示した熟練者の経験・知識に基づく知的駐車制御の実現を目指すため，制御コントローラとして予見ファジィ制御方式[1]に基づく階層型ファジィコントローラを用いた知的駐車制御システムを開発する。この階層型ファジィコントローラは，図2のように(1)状況監視部，(2)目標設定部，(3)ハンドル操作部からなる。それぞれの階層に対し制御状況の監視，目標設定，ハンドル操作（目的評価）の3つの役割を分担させる。

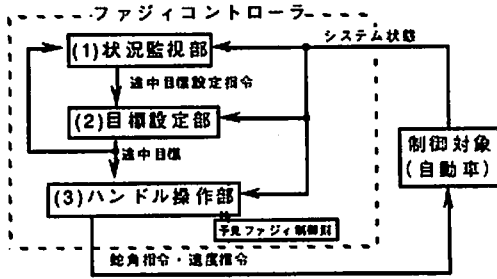


図2 三階層ファジィコントローラ

(1) 状況監視部

目標設定部では、設定された途中目標に向かって進みつつあるかを常に監視する。達していない場合は現在の途中目標を維持する。達しているか、または自動車が停止していれば、次の途中目標を設定する指令を目標設定部へ与える。

(2) 目標設定部

四輪自動車の最小旋回半径Rを考慮すると、現在の自動車の状態(位置・向き)と最終目標(0.0, 0.0, 90.0)との関係から到達すべき途中目標(位置・向き)と進行方向(前進または後進)を計算で決定することができる。その決定は「自動車の現在位置が～で、方向が～ならば、途中目標を～にし、前進(または後進)する」というルールをもとに実行する。以下、具体的な途中目標の決定法を述べる。

【途中目標決定法】

次の8つのルールから、途中目標と進行方向を決定する。このとき、自動車の動きはx座標を表すxと、車体が最終目標の方向($\theta=90^\circ$)との誤差e、の2つを考慮し、図3のようなx-e領域を考える。また、ここでは $x \geq 0$ の場合を示すが、 $x \leq 0$ のときは図3をe軸に関して対称的に考えればよい。

ルール1：現在、x座標が小さく、方向が内側を向いているならば、図4の幾何学的関係から、ハンドルを左と右に最大に切って(0.0, y, 90.0) (ただしyは任意の値)に達するように式(2)を用いて途中目標(x1, y1, e1)を決定し、前進指令を出す(図3で(1)の領域)。

ルール2：現在、x座標が小さく、方向が外側を向いているならば、図4の幾何学的関係から、ハンドルを左と右に最大に切って(0.0, y, 90.0)に達するように式(2)を用いて途中目標(x1, y1, e1)を決定し、後進指令を出す(図3で(2)の領域)。

ルール3：現在、方向が大きく内側を向いているならば、ハンドルを右に最大に切り(x, y, 180.0)に達するように途中目標を決定し、後進指令を出す(図3で(3)の領域)。

ルール4：現在、方向が大きく外側を向いているな

らば、ハンドルを左に最大に切って(x, y, 180.0)に達するように途中目標を決定し、後進指令を出す(図3で(4)の領域)。

ルール5：現在、x座標が非常に大きく、方向が内側を向いているならば、ハンドルを左に最大に切り(R, y, 180.0)に達するように途中目標を決定し、前進指令を出す(図3で(5)の領域)。

ルール6：現在、x座標が大きく、方向が約90°内側を向いているならば、ハンドルをまっすぐにし(R, y, 90.0)に達するように途中目標を決定し、前進指令を出す(図3で(6)の領域)。

ルール7：現在、y座標が大きく、方向が約90°外側を向いているならば、ハンドルをまっすぐにし(R, y, -90.0)に達するように途中目標を決定し、後進指令を出す(図3で(7)の領域)。

ルール8：現在、y座標が非常に小さく、方向が正面を向いているならば、最終目標へ前進(後進)指令を出す(図3で(8)の領域)。

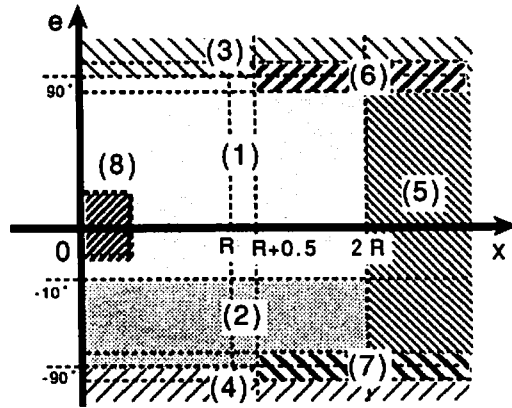


図3 x座標-方向誤差(x-e)

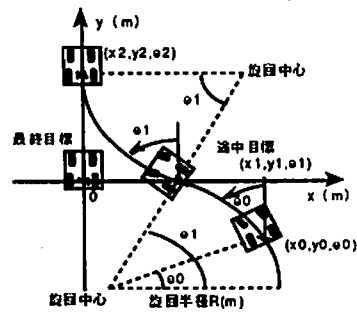


図4 途中目標の計算法

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{1 - \cos(\epsilon_0)}{2} \cdot R + \frac{x_0}{2} \\
 y_1 &= y_0 + R \left(\sin(\epsilon_1) - \sin(\epsilon_0) \right) \\
 \epsilon_1 &= \cos^{-1} \left(\frac{1 + \cos(\epsilon_0)}{2} - \frac{x_0}{2R} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

(3) ハンドル操作部

予見ファジィ制御により、現在最も適切なハンドル操作（舵角指令）を決定する。まず現在状態から目標設定部で設定された途中目標に到達するまでの時間 t を求め、実行可能な舵角候補に対して、それぞれ t の時間実行させたときの制御結果、 d_p （目標位置と現在位置との距離）と $d\theta$ （目標位置と現在位置での θ の差）を式(1)を使った数値積分で予見する。そして、これらの目的値を Good や very Good のメンバシップ関数を用いたファジィ集合を用いて評価する。この評価が一番高い舵角指令を制御指令 ϕ_{out} とする（図5）。

予見ファジィ制御のルール形式を次に示す。
 IF ($\phi = \phi_i \rightarrow d_p$ is very Good, $d\theta$ is very Good)

THEN ($\phi = \phi_i$) ($i=1, n$)

また、舵角候補に対して、自動車が障害物に衝突しそうならば指令候補から除外する。どの舵角を実行しても車体が障害物に衝突しそうならば自動車を一旦停止させ、状況監視部で新たな途中目標の設定を指令することになる。

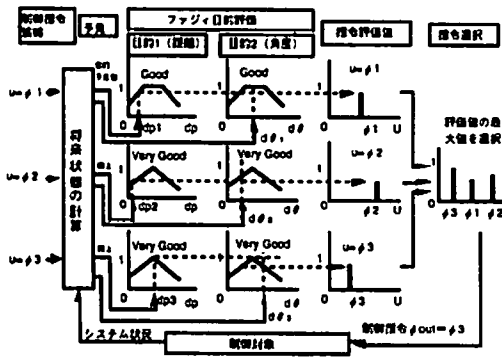


図5 出力舵角の推論過程

5. 定位置制御における性能の評価

5.1 シミュレーション

周囲に障害物が存在しない駐車場で駐車を想定した定位置制御を行い、開発した知的駐車制御システムの性能を評価する。駐車場を x - y 平面で考え、最終目標を $(x, y) = (0, 0)(m)$ 、 $\theta = 90^\circ$ とし、初期状態が $(x, y) = (4, -12)$ 、 $\theta = 90^\circ$ とした縦列駐車と、 $(x, y) = (4, 0)$ 、 $\theta = 90^\circ$ とした横移動のシミュレーションを行った。3秒おきに描いた自動車の走行軌跡

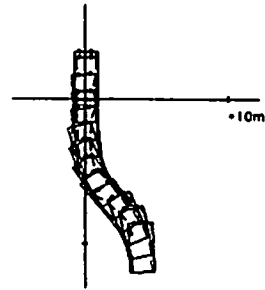


図6 シミュレーション結果（縦列駐車）

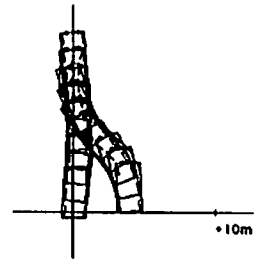


図7 シミュレーション結果（横移動）

を図6、図7に示す。走行結果より、縦列駐車、横移動のどちらもルールに従って途中目標を決定し、自律走行しながら、熟練者が駐車させるような動きにより、うまく最終目標付近に到達できた。このほか、様々な場所からの定位置制御もうまく実行できる。

5.2 模型自動車走行実験

1/10スケールの模型自動車へ搭載したシングルボード・コンピュータを用いたファジィコントローラを使って、その走行状況を確認する。図8に模型自動車走行システムの概略を示す。駆動系、センサ部、そしてCPUボードと大きく分けられる。CPUにV25(8MHz)を使用し、提案したファジィ制御方式をC言語により記述し組み込む。車体の絶対角度 θ はセンサ部の磁気方位センサにより得られる。後二輪にそれぞれ取り付けられたロータリーエ

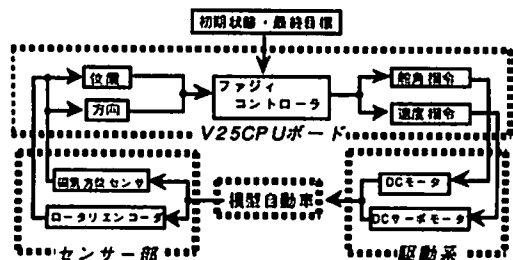


図8 模型自動車走行システムの概略

ンコードにより、車体の速度、現在位置を計測する。位置と方向はファジィコントローラへ入力され、求めた舵角指令 ϕ_{out} と速度指令 V_{out} は、前輪に接続された操舵用のサーボモータ、走行用の DCモータにそれぞれ伝達される。

図6、図7に示したシミュレーションと同じ条件の下で、縦列駐車と横移動の走行を行った結果を図9、図10に示す。模型自動車でも、シミュレーションと同様に熟練者が駐車させるような動きをしながら、うまく最終目標付近に停止した。提案したファジィコントローラを、実システムにも適用し、その有効性を実証した。

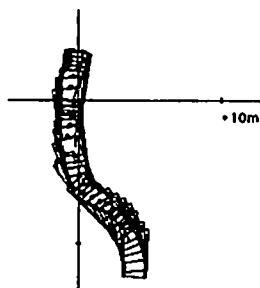


図9 模型自動車の走行状況（縦列駐車）

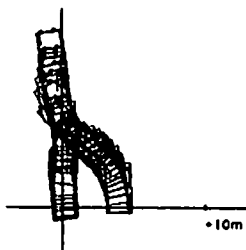


図10 模型自動車の走行状況（横移動）

6. 車庫入れのシミュレーションによる性能の評価

障害物を考慮した駐車制御の一例として、開発したシステムを、車庫入れに適用する。コントローラは、最終目標（位置・方向）を予め知っているが、車庫の形状と車庫前の道幅は知らず、自ら作成した地形マップを基に自律走行する。地形マップは、自動車の四隅に取り付けられた超音波センサ距離計で壁までの距離を測定しながら作成すると想定した。

図11、図12に自動車を3秒おきに描いた車庫入れの結果を示す。車庫の前の道幅を6mと5mと変え、シミュレーションを行った。図中の○印は走行中にセンサによって認識された障害物で、その並びが走行完了までに作成された地形マップを表す。周囲の地形をほとんど把握しながら、いずれの条件

下でも、壁に衝突することなく原点付近に駐車できた。また、道幅が6mの場合は車庫の前方の壁との干渉がないのに対して、道幅が5mの場合は壁の干渉を受け、車庫に入るのに切り返しを行っている。これにより、同一ルールで周囲の状況に柔軟に対応した駐車制御が実現できることを確認した。

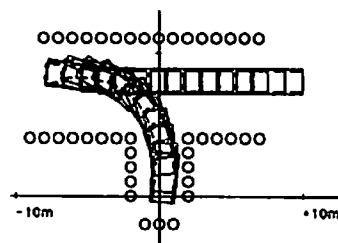


図11 車庫入れのシミュレーション結果（道幅6m）

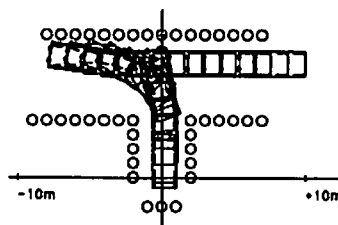


図12 車庫入れのシミュレーション結果（道幅5m）

7. おわりに

本論文では、ファジィ制御に基づく階層型ファジィコントローラを提案し、熟練者の知的駐車戦略を組み込んだ知的駐車制御システムを開発した。この制御システムを用いて定位置制御に対してシミュレーションを行い、四輪自動車の自律駐車が可能となることを示し、1/10スケールの模型自動車で、その動きを確認した。さらに、車庫入れのシミュレーションを行った結果、車庫前の道幅や初期状態が変わっても、同一知識で周囲の状況に柔軟に対応した自律駐車が実現できた。これらの結果より、提案した階層型ファジィコントローラを用いた四輪自動車の知的駐車制御システムの有効性を実証した。

参考文献

- [1] 安信, "ファジィ工学", 昭晃堂(1991)
- [2] 村井, 安信, "予見ファジィ制御による自動車の駐車制御", 第19回知能システムシンポジウム資料, 57/60(1994)
- [3] 高野, "自律移動ロボットの機構と移動制御技術", 日本ロボット学会誌5巻5号, 52/58(1987)