ファジー規則とポテンシャル場を用いた パスプランニングシステム

非会員 蒔 田 裕 二 (慶応義塾大)

正 員 萩 原 将 文 (慶応義塾大)

A Path Planning System Using Fuzzy Rules and a Potential Field

Yuji Makita, Non-member, Masafumi Hagiwara, Member (Keio University)

This paper proposes a path planning system using fuzzy rules and a potential field. As an example, we took the problem of backing up a truck to a loading dock which Nguyen and Widrow originally used. We propose a new hybrid method of fuzzy control rules and a potential field for a vehicle navigation and control in the presence of obstacles. This technique has the following merits: (1) As long as we have the map information, we can control a truck to the goal point. (2) We can consider the operator's technique because of using fuzzy logic for a vehicle control. (3) The control method is very simple. The system can successfully back a truck up to the goal point by the following two ideas: (1) a potential field that peaks at the surface of obstacles and contains no spurious local minima. (2) use of simple fuzzy rules whose number is much less than those used by Kong and Kosko.

キーワード: ファジー制御, パスプランニング, ポテンシャル場, 障害物回避

1. はじめに

近年, 自律自動車や自律走行ロボットへの需要増加に伴って, これらの自動走行に関する研究が重要になっている⁽¹⁾。

Nguyen ら⁽²⁾は, トラックの後退による指定場所への駐車のための制御にニューラルネットワーク (NN) を用い, 非線形状態フィードバック制御に対する NN の有効性を示した。しかしながら, NN による制御では学習に時間がかかるうえに収束しないことがあるという欠点があった。

Kong ら⁽³⁾は, ファジー制御を用いることで, これらの問題を解消することを試みた。彼らのシステムは IF-THEN 文による制御規則の集まり (ファジー連想記憶: FAM) から構成されており, ハンドル角をファジー推論によって求めるというものである。ただし, このシステムで駐車場に障害物が存在する場合には, 特に規則数の面で制御は非常に難しくなると考えられる。

ロボット制御の分野で用いられているパスプランニングや障害物回避のための方法^{(4)~(6)}では, まず最初にポテンシャル場を計算し, 次に最急降下法のような線形計画法を用いて経路を作成していた。しかしながら, 線形計画法を用いた方法では操作者の技能や技術を考慮することは困難

である。もしそれらを利用するために NN を用いようとするれば, さきに述べた長い学習時間や収束性の問題がある。

そこで本論文では, パスプランニングのためのシステムとして, ファジー制御規則とポテンシャル場という組合せによる新しいシステムを提案する⁽⁷⁾。提案方式の特徴として以下のことが挙げられる。

(1) 事前情報としては地図情報のみでよい。制御のためのトレーニングデータは不要である。

(2) 制御にファジー規則を用いているので, 操作者の技能や技術を考慮することができる。従って, 規則の調整によってシステムの性能の改善が容易である。

(3) 制御原理が非常に単純である。障害物を回避するための特別な規則は不要であり, 用いた規則の前件部入力の一つでよい。一方, Kong らのシステム⁽³⁾は障害物を考慮していないのにもかかわらず, 前件部入力は二つであるうえ, 障害物回避を行えない。加えて彼らのシステムでは, 前件部入力の数を減らすために駐車場所への距離 (y 座標) を無視することによって, 前件部を簡易化している。

提案システムでは, まず Plumer⁽⁸⁾のテクニックによりポテンシャル場を計算し, 制御の段階においてファジー制御規則を用いてトラックの移動を行う。ポテンシャル場を

用いることで前件部の変数を減らし、制御規則が複雑になるのを防ぐ。これにより、簡単なシステムで地図情報のみを与えるだけで目標点まで進路調整して進んでいくということが可能になる。

本論文では、まず第2章でポテンシャル場の構築法を簡単に説明し、第3章で提案する制御アルゴリズムについて述べる。第4章では計算機シミュレーションによってその有効性を示し、第5章では更に高度な問題に対しての応用について述べる。

2. 極小値をもたないポテンシャル場の構築

ポテンシャル場からの情報は、ファジー制御規則の削減に役立てることができる。方程式が簡単で収束も早いという点から、本研究では Plumer⁽⁸⁾のポテンシャル場を用いた。

本章では簡単にそのテクニックを説明する。テクニックの要点は、配置の計算を二つの層で構成するところにある。一つは中間の“障壁ポテンシャル場”を計算し、もう一つは要求の“ナビゲーションポテンシャル場”を計算する。“障壁ポテンシャル場”によって障害物の部分のポテンシャルが高くなり、“ナビゲーションポテンシャル場”によって、目標点に向かった勾配が形成される。

〈2・1〉 障壁ポテンシャル場の作成 まず、目標点の配置を無視した障壁ポテンシャル場 $\Phi_{i,j}^B$ は、以下の緩和方程式により計算される。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{i,j}^B(t=0) &= \text{any value} \\ \Phi_{i,j}^B(k+1) &= \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha^{\sqrt{2}} \Phi_{i\pm 1, j\pm 1}^B(k) \\ \alpha \Phi_{i\pm 1, j}^B(k) \\ \alpha \Phi_{i, j\pm 1}^B(k) \end{array} \right\} \quad \text{for } n_{i,j} \notin O \\ \Phi_{i,j}^B(k+1) &= \Phi_{\max}^B \quad \text{for } n_{i,j} \in O \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $n_{i,j}$ ：個々の格子点もしくは区画、 O ：障害物を横切る格子区画の集まり、 α ：幾何学的割合、 $\Phi_{\max}^B$ ：最大障壁高さ、 $\Phi_{i,j}^B$ ：格子点 $n_{i,j}$ におけるポテンシャル場の高さ

〈2・2〉 ナビゲーションポテンシャル場の作成 一度 $\Phi_{i,j}^B$ が定常状態に達すれば、目標点の配置を考慮したナビゲーションポテンシャル場 $\Phi_{i,j}^P$ は以下の緩和方程式を用いて計算される。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{i,j}^P(t=0) &= \text{any value} \\ \Phi_{i,j}^P(k+1) &= \min \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{2}(1 + \Phi_{i,j}^B + \Phi_{i\pm 1, j\pm 1}^P(k)) \\ (1 + \Phi_{i,j}^B + \Phi_{i\pm 1, j}^P(k)) \\ (1 + \Phi_{i,j}^B + \Phi_{i, j\pm 1}^P(k)) \end{array} \right\} \quad \text{for } n_{i,j} \notin O, G \\ \Phi_{i,j}^P(k+1) &= \Phi_{\max}^P \quad \text{for } n_{i,j} \in O \\ \Phi_{i,j}^P(k+1) &= 0 \quad \text{for } n_{i,j} \in G \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 G ：目標点
求められたナビゲーションポテンシャル場 $\Phi_{i,j}^P$ を、最終的に $\Phi_{i,j}$ とする。ポテンシャル場 $\Phi_{i,j}$ は目標点に向かっ

図 1 (a) 駐車場に T 字型障害物を配置した例、
(b) T 字型障害物に対応するポテンシャル場
Fig.1. (a) T-shaped-obstacle in a parking lot,
(b) its potential field.

て減少し、障害物の近くでは急に高くなり、また一つの極小点も含まない⁽⁸⁾。

〈2・3〉 ポテンシャル場の作成例 図1は障害物のある空間でのポテンシャル場の例を示している。この例では平面 $[0, 100] \times [0, 100]$ 、目標点を $(50, 100)$ とした空間において T 字型障害物を配置したときのポテンシャル場を示している。

3. ポテンシャル場に従ったファジー制御

本章は、前章で述べられたポテンシャル場とファジー制御規則を用いてトラックを目標点に導くための方法について論じる。文献(8)ではニューラルネットワークを用いて制御を行っている。従って学習に時間がかかる、ローカルミニマムによる収束性の問題、知識の利用ができない、などといった問題点があった。これに対し、ファジー制御規則を用いれば人間の知識の表現および組み込みが可能である。今回提案するシステムでは、このように知識をファジー制御規則として表現し、制御を行うことによって、これらの問題点を解決している。

〈3・1〉 制御対象のトラック 図2は制御対象のトラックを表している。Nguyen-Widrow のニューラルトラ

図 2 シミュレーション対象のトラック
および駐車場
Fig. 2. Diagram of simulated truck and a loading dock.

ϕ_v, θ	
NB	Negative Big
NM	Negative Midium
NS	Negative Small
ZE	Zero
PS	Positive Small
PM	Positive Midium
PB	Positive Big

(a)

(b)

ϕ_v	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
θ	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM

(c)

図 3 (a) ファジー変数 ϕ_v および θ のファジー
集合値, (b) ϕ_v および θ のメンバシップ関数,
(c) ファジー制御規則
Fig. 3. (a) Fuzzy set values of the fuzzy vari-
ables ϕ_v and θ , (b) Fuzzy membership functions
of ϕ_v and θ , (c) Fuzzy control rules.

ック⁽²⁾の場合と同様に、トラック最後部の中央の座標を (x, y) 、前輪の切り角を θ 、図上でのトラックと横軸との角度を ϕ とした。トラックは三つの状態変数 ϕ, x および y で、その位置を決定できる。

また、トラックの角度 ϕ は -90° から 270° 、ハンドルの切り角 θ は -30° から 30° までの値に制限されている。 ϕ はトラック後部が x 軸正方向を向いたときが 0 であり、反時計回りに増加する。また θ はハンドルを右に切ったときが正であり、図 2 の場合、 θ は正である。

〈3・2〉 提案制御アルゴリズム 作成したポテンシャル場は、障害物の位置で最も高く、目標点で最も低くなっている。従って、ポテンシャルが低くなるように移動していけばよい。提案システムでの移動のアルゴリズムは、次のように表される。

(1) 現在位置から等距離 r の点でのポテンシャルを計算し、最も小さいポテンシャルを与えたときの角度を“目標角” ϕ_d とする。

(2) 目標角と現在のトラックの角度との差を求める。これを ϕ_v とする。

$$\phi_v = \phi - \phi_d \dots \dots \dots (3)$$

(3) ファジー推論によって ϕ_v の値に対応したハンドルの切り角 θ を求める。図 3 に推論に用いたファジー変数、ファジー制御規則表およびメンバシップ関数を示した。

(4) 次式によってトラックの位置の更新を行う。

$$x' = x + r \cos(\phi') \dots \dots \dots (4)$$

$$y' = y + r \sin(\phi') \dots \dots \dots (5)$$

$$\phi' = \phi + \theta \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 r ：後退における移動距離および目標角を決める際の距離

ファジー推論に用いた規則は次のような形式となっている。

図 4 位置 (x, y) におけるポテンシャルの計算
Fig. 4. Calculation of a potential at a position (x, y) .

IF $\phi_v=NS$ THEN $\theta=PS$

これらの規則は、 ϕ_v の値に対応した七つの規則からなる IF-THEN 型の規則である。また、同じくファジー推論に用いたメンバシップ関数は、“制御目標との差が小さいところでは細かく、差が大きいところでは大まかに制御する” という考えに基づいて作成した。ハンドル角 θ は重心法⁽⁹⁾によって求めている。

任意の位置 (x, y) でのポテンシャル $\Phi_{x,y}$ は、その点を囲む四つの格子点 $(i, j), (i+1, j), (i, j+1), (i+1, j+1)$ におけるポテンシャル $\Phi_{i,j}, \Phi_{i+1,j}, \Phi_{i,j+1}, \Phi_{i+1,j+1}$ から補間して求めることができる。こうすることにより、ポテンシャル場作成の際の計算量を大きく低減できる。ここでは各格子点との間にできる長方形の面積に応じて、点 (x, y) を挟んで対称の位置にある格子点のポテンシャルに重み付けをするという方法をとっている (図 4)⁽¹⁰⁾。 δ は各格子区画の幅を表している。

$$\begin{aligned}\Phi_{x,y} = & \Phi_{i,j}(\delta(i+1)-x)(\delta(j+1)-y) \\ & + \Phi_{i+1,j}(x-\delta i)(\delta(j+1)-y) \\ & + \Phi_{i,j+1}(\delta(i+1)-x)(y-\delta j) \\ & + \Phi_{i+1,j+1}(x-\delta i)(y-\delta j) \cdots \cdots (7)\end{aligned}$$

この補間方式には格子点内のポテンシャルに極小点を生じないという利点がある。従って、前章でのポテンシャル場のもつ好ましい性質を失うことなく制御のために用いることが可能である。

4. シミュレーション

まず実験用の駐車場を 400 (20×20) 個の格子区画に分割した。その空間は平面 $[0, 100] \times [0, 100]$ で、441 (21×21) 個の格子点を取り、目標点座標は (50, 100) とした。次に障害物の配置を行い、ポテンシャル場を作成した。目標角を決める際の分解能は 10° とし、提案システムを用いて 5×12 の大きさの図 2 のトラックの制御を行った。後退における移動距離 r は 3.0 とした。文献 (8) ではニューラルネットワークの構造に不明確な点がある。一方、文献 (3) ではファジー制御規則を用いて制御を行っているの

で、本論文では文献 (3) のシステムを比較対象とした。図 5 は、障害物がない空間の場合の初期位置 $(x, y, \phi) = (30, 35, -30)$ からの Kong らのシステムおよび提案システムの制御結果を示している。両者の軌跡はよく似たものになっている。しかし、提案システムではわずか 7 個のファジー制御規則を用いているのに対し、Kong らのシステムでは 35 個もの制御規則を用いている。

また図 6 は、駐車場の中心に障害物を置いた場合の初期位置 $(x, y, \phi) = (50, 20, 0)$ からの Kong らのシステムおよび提案システムの制御結果を示している。提案システムによって制御されたトラックは首尾良く障害物を回避しながら目標点に達しているといえる。これに対し、Kong らのシステムでは障害物を回避することができずに衝突してしまっている。

図 7 は迷路状に障害物を配置した空間での制御結果であ

図 5 障害物がない場合の (a) Kong らのシステムによるトラック軌跡、(b) 提案型システムによるトラック軌跡、初期位置 $(x, y, \phi) = (30, 35, -30)$ Fig.5. Sample trajectory of (a) Kong, et al.'s system and (b) the proposed system from the initial position $(x, y, \phi) = (30, 35, -30)$ (no obstacle in the parking lot).

る。提案システムによって制御されたトラックは、このように障害物が比較的複雑に配置された場合でも、衝突することなく首尾良く目標点に達することができていることがわかる。

5. 移動障害物の回避問題への応用

前章では、障害物が固定されている場合の障害物回避問題を扱った。提案システムはファジー制御規則を用いているので、新たなルールの付加によって更に高度なパスプラ

(a)

(b)

図 6 障害物がある場合の (a) Kong らのシステムによるトラック軌跡, (b) 提案型システムによるトラック軌跡, 初期位置 $(x, y, \phi) = (50, 20, 0)$

Fig. 6. Sample trajectory of (a) Kong, et al.'s system and (b) the proposed system from the initial position $(x, y, \phi) = (50, 20, 0)$ (one obstacle in the parking lot).

ンニングが可能になる。ここではその例として、移動障害物を回避しながらトラックを指定場所へ駐車させるという問題を扱う。

提案システムを障害物が移動する場合での制御に応用するため、移動障害物の回避のための速度制御およびハンドル角の制御を考慮して、新たにファジー制御規則を作成した。ここでは、障害物のトラックに対しての相対位置と相対速度で、障害物がトラックに“向かってくる”か“向かってこない”かを判断し、それに基づいて回避動作を行う。以下にその考え方を示す。

(a)

(b)

図 7 迷路状の障害物を配置した場合の (a) Kong らのシステムによるトラック軌跡, (b) 提案型システムによるトラック軌跡

Fig. 7. Sample trajectory of (a) Kong, et al.'s system and (b) the proposed system in the parking lot like a maze.

(i) トラックの現在位置を原点とし、トラックの進行方向を Y 軸に、それと垂直な方向に X 軸をとる。

(ii) 障害物のトラックに対する相対位置および相対速度を、この X, Y 軸の成分に分けて求める。それぞれ、 (l_x, l_y) および (v_x, v_y) とする。

(iii) このとき、障害物がトラックに“向かってくる”という条件は、 X 軸方向および Y 軸方向ともに近づいてくるとのことである。すなわち、

「 l_x と v_x の符号が異なり、かつ l_y と v_y の符号が異なる」

図 8 (a)各ファジー変数のファジー集合値、
(b)各ファジー変数のメンバシップ関数、
(c)ファジー制御規則

Fig.8. (a) Fuzzy set values of the fuzzy variables, (b) Fuzzy membership functions of the fuzzy variables, (c) Fuzzy control rules.

ことが回避の必要な条件であり、これを満たさないときは回避のための制御を行わないことにする。

(iv) 回避が必要な場合、Y 軸方向に近づく度合でハンドル角を制御し、X 軸方向に近づく度合でトラックの速度を制御する。

図 8 に、以上の考えをもとに作成したファジー変数、ファジー制御規則表およびメンバシップ関数を示す。ポテンシャル場は障害物の移動のたびに逐次更新し、そのうえで新しく追加した制御規則を用いてファジー制御を行う。障害物の動きが不規則なときはそのたびに更新を行うが、直線運動や円運動のようにある程度動きが予測できるものについては、その更新回数を減らすことができる。回避の必要がないと判断されたときにはこのような更新の必要はなく、この場合はポテンシャル場を下っていくための制御規則だけで制御する。

図 9 移動する障害物に対しての提案型システムによるトラック軌跡

Fig.9. Sample trajectory of the proposed system with the presence of a moving obstacle.

図 9 には障害物が移動する場合のシミュレーション結果を示す。提案システムによって制御されたトラックが、移動する障害物を回避して目標点に達していることがわかる。

6. ま と め

本研究では、ファジー規則とポテンシャル場を用いた簡単なパスプランニングシステムを提案した。提案システムの有効性を確かめるため、従来型である Kong らのシステムと比較してシミュレーションを行った。提案システムの利点として、以下のことが挙げられる。

- (1) 提案システムは、パスプランニングのためには地図情報だけがあればよい。制御器の学習を必要としない。
- (2) 制御にファジー規則を用いたことで、操作者の技能や技術つまり規則としての知識を考慮することができる。
- (3) 制御原理が非常に単純である。提案システムは、移動障害物回避の場合でも制御に複雑な規則を必要としない。

提案システムは非常に単純なので、容易に同様の問題や更に複雑な問題に対応させることができる。今後の課題としては、メンバシップ関数やファジー制御規則の最適化や、多くの移動障害物が存在する場合でのパスプランニングなどがある。

日ごろ御指導いただく中川正雄教授に感謝いたします。また、本研究に取り組むにあたって貴重な助言を下された中川・萩原研究室の方々に感謝致します。

(平成 6 年 5 月 25 日受付、同 6 年 12 月 19 日再受付)

文 献

- (1) 登尾啓史:「ロボットのパスプランニングアルゴリズムの最近の動向」, Computrol, No. 34, 47 (平3)
- (2) D. Nguyen & B. Widrow: "The truck backer-upper: An example of self-learning in neural networks", in Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks (IJCNN-89), Vol. 2, p. 357
- (3) S.-G. Kong & B. Kosko: "Adaptive fuzzy systems for backing up a truck-and-trailer", *IEEE Trans. Neural Networks*, 3, 211 (1992)
- (4) J. Barraquand, B. Langlois & J.C. Latombe: "Numerical potential field techniques for robot path planning", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 22, 224 (1992)
- (5) Y. K. Hwang & N. Ahuja: "A potential field approach to path planning", *IEEE Trans. Robotics Automat.*, 8, 23 (1992)
- (6) R. Volpe & P. Khosla: "Manipulator control with superquadratic artificial potential functions: Theory and experiments", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 20, 1423 (1990)
- (7) Y. Makita, M. Hagiwara & M. Nakagawa: "A simple path planning system using fuzzy rules and a potential field", in IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE-94), p. 994 (1994)
- (8) E. S. Plumer: "Neural network structure for navigation using potential fields", Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks (IJCNN-92), Vol. 1, p. 327
- (9) 菅野道夫: ファジィ制御 (昭63) 日刊工業新聞社
- (10) 佐藤圭祐: 「極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画」, ロボット学誌, 11, 702 (平5)

蒔 田 裕 二 (非会員) 1970年4月12日生。1994年慶応義塾大学理工学部電気工学科卒業。現在、同大学大学院修士課程2年在学。ファジーシステムの研究に従事。

萩 原 将 文 (正員) 1959年10月29日生。1987年慶応義塾大学大学院博士課程修了。現在、同大学助教授。1991年より2年間、アメリカStanford大学訪問研究員。ニューラルネットワーク、ファジーシステムの研究に従事。工学博士。1986年丹羽記念賞, 1987年電子情報通信学会学術奨励賞, 1990年IEEE論文賞受賞。