

時空ファジィ推論の提案と交差点の右折操作への応用

A proposal of space-time fuzzy inference, and application to right turn operation at a crossing

○ 渡邊 嵩孔, 安信 誠二
○ Takayoshi Watanabe, Seiji Yasunobu
筑波大学大学院 システム情報工学研究科

University of Tsukuba, Graduate School of System Information Engineering

Abstract: Human beings are living in the dynamic environment where the surrounding situation is changing every moment. In this environment, when they determine action depending on the surrounding situation, we use the knowledge in consideration of the change of state of space and time. There is right turn operation at a crossing as an example using this knowledge. At a crossing, the crossing person of an oncoming car or a pedestrian crossing from whom the surrounding situation changes with time, and human beings recognize these motions immediately and determine right turn operation. Thus there are many operation beginners' accidents and many drivers who are not good at performing right turn operation. Therefore the purpose is that I propose space-time fuzzy inference in order to include knowledge including the change of state of space and time in a computer, it applies to right turn operation at a crossing. In this paper, it explains details of the proposed space-time fuzzy inference, and the effectiveness is evaluated by the experiment.

1 はじめに

人間は、周囲の状況が時々刻々変化している動的環境の中で生活している。この環境の中で行動を決定するとき、周囲の状況の状況に応じて決定している。動的環境の例として交差点での右折操作がある。周囲の状況が時間と共に変化する対向車や横断歩道の横断者が存在し、これらの動きを即時に認識し右折操作を決定する。そのため、運転初心者の事故が多く、右折操作を苦手とする運転者が多い。

そこで本研究では、人間が動的環境で行動決定するとき用いる知識をコンピューターに組み込むための時空ファジィ推論を提案し、交差点の右折を想定したシミュレーションにより有効性を検証する。

2 動的環境での行動決定知識

本研究における動的環境での行動決定知識について述べる。人間が動的環境で行動を決定するとき、周囲の状況の現在の状態だけでなく、将来状態、現在状態と将来状態に至るまでの時間変化の程度の違いも考慮している。このように人間は時間と空間の状態変化を含む知識に基づいて行動を決定している。

3 時空ファジィ推論

本章では、前章で述べた時間と空間の状態変化を含む知識をコンピューターに組み込むための時間と空間の

ファジィ集合を用いた時空ファジィ推論について提案する。

3.1 ファジィ推論

ファジィ推論は、人が主観的に持っているあいまいさ「もし～ならば、～である」の知識を If-Then ルールで記述し、ファジィ集合に基づいて推論入力を与え推論結果を得ようとする方式である [1].

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{21} \text{ then } y \text{ is } B_1$$

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_{12} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ then } y \text{ is } B_2$$

等のルール群に対して、推論入力、

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_{1'} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2'}$$

を与えることにより、推論結果、

$$y \text{ is } B'$$

を得ることができる。これらの推論を行った結果は、ファジィ集合であり、推論結果を非ファジィ化することで代表値となる数値や要素を求める。

3.2 状態推移ファジィ集合

状態推移ファジィ集合とは、ファジィ集合に時間軸を加えたファジィ集合であり、ファジィ集合が時間ともどのように変化するかを示す。この状態推移ファジィ

表 1: 簡易状態推移ファジィ集合のパラメータ

変数名	説明
R	状態量の全体の集合
P	最大予測時間
μ_{x_0}	状態量 x が 0 秒時のメンバーシップ関数のメンバーシップ値
μ_{x_p}	状態量 x が p 秒時のメンバーシップ関数のメンバーシップ値
μ_{p_0}	予測する時間 p が 0 秒時の時間推移のメンバーシップ関数のメンバーシップ値
μ_{p_P}	予測する時間 p が P 秒時の時間推移のメンバーシップ関数のメンバーシップ値
\oplus	限界和演算 (上限を 1 として加算する)

集合を用いることで運転熟練者が考える時間と空間を考慮した時間変化を含む主観をコンピュータで取り扱うことができる [2]. しかし, 状態推移ファジィ集合を用いて主観を記述することは難しく, 情報量が多いため, 多くの計算時間がかかってしまう問題点がある.

3.3 簡易状態推移ファジィ集合

第 3.2 節で述べた問題点を解決するために簡易状態推移ファジィ集合が提案されている. この簡易状態推移ファジィ集合は, 0 秒の状態のファジィ集合, P 秒の状態のファジィ集合, それぞれの状態の推移を示す四つのファジィ集合から構成され, 時空間で簡単に処理することができる. 簡易状態推移ファジィ集合 \tilde{X}'_{fn} は以下の式 (1) で定義できる [3]. 簡易状態推移ファジィ集合のパラメータの説明を表 1 に示す.

$$\tilde{X}'_{fn}(x, p) = \int_{R \times (0, P)} \{ [\mu_{x_0}(x) \wedge \mu_{p_0}(p)] \oplus [\mu_{x_p}(x) \wedge \mu_{p_P}(p)] \} / (x, p) \quad (1)$$

$$x \in R, p \in (0, P)$$

簡易状態推移ファジィ集合の例として「自車両と動的障害物の距離が近いから急に遠い」を挙げる. この主観をコンピュータに組み込むために図 1 に示す四つのファジィ集合を用いる. 図 1 の (a) は「0 秒時の距離が近い」というメンバーシップ関数, (b) は「 P 秒時の距離が遠い」というメンバーシップ関数を示す. ここで, 最大予測時間 P を 6 とする. また, (c) は, (a), (b) の

状態の推移を表したメンバーシップ関数であり, 1 秒から 2 秒位に急に変化することを表している. この 4 つのファジィ集合と式 (1) を用いることで簡易状態推移ファジィ集合を表現することができる (図 2). この図は評価値が高い部分を赤く表示している. 動的障害物の距離を x , 近いを *near*, 遠いを *far*, 1 秒から 2 秒位に急に変化するを *suddenly*_{1.5} とすると, 「動的障害物の距離が近いから急に遠い」は, 以下に定式化できる.

$$x \text{ is } near \text{ suddenly}_{1.5} \text{ far} \quad (2)$$

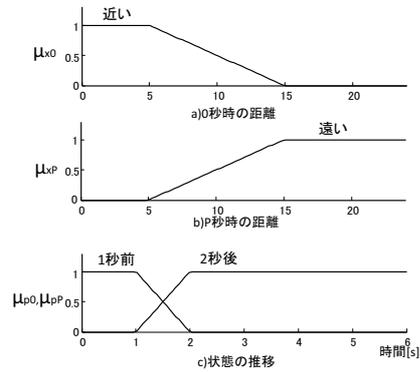


図 1: 「動的障害物の距離が近いから急に遠い」を表す 4 つのファジィ集合

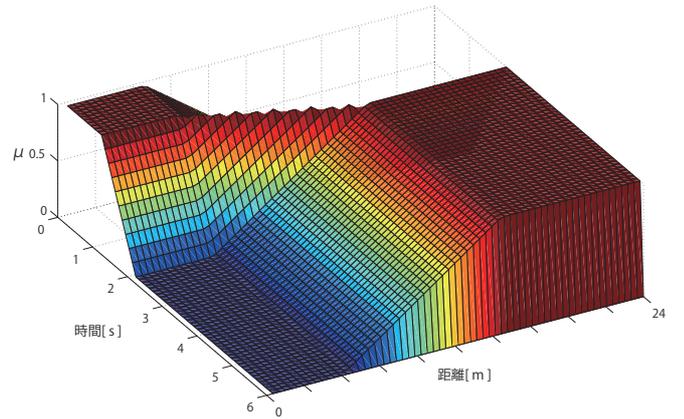


図 2: 「動的障害物の距離が近いから急に遠い」を表す簡易状態推移ファジィ集合

3.4 時空ファジィ推論

時空ファジィ推論とは, 簡易状態推移ファジィ集合を用いた If-then ルールの集まりに対して, 最大予測時間

P までの時間に対する物理量を入力とし、それぞれの時間に対する評価値を算出する。これらの評価値の中で最も低い評価値を推論結果として出力する。

4 運転熟練者の右折操作

本章では、運転熟練者が動的障害物（対向車）を考慮し、目的地まで向かう際にどのように右折操作を行っているかについて以下の4つの節に分けて考察する [4]。

4.1 状態の監視

運転熟練者は、自車両が現在どのような車両状態にあるのかを常に監視している。自車両の監視だけでなく動的障害物が現在どのような状態にあるのかも監視している。また、設定した現在の通過目標を通過したかどうか監視しており、到達していれば次の通過目標を考える。

4.2 状態の予測

運転熟練者は、2.1節で述べた状態の監視だけでなく、所定時間後の将来状態とその状態に至るまでの時間変化を考慮して運転している。例えば、「動的障害物が遠いからゆっくり近い」や、「動的障害物が遠いから急に近い」などの時間変化の程度の違いを把握している。

4.3 目標の設定

運転熟練者は、動的障害物（対向車）を考慮し、目的地へ向かう場合、目的地へ向かう目標と、目的地へ行けない場合の安全な場所である退避目標の二つの目標を考える。

4.4 運転操作の決定

運転熟練者は、目的地へ向かう操作と退避目標に向かう操作を行った際に将来どのような状態になるのかを予測し、「自車両と動的障害物の相対距離の時間変化」に対する主観と「できるだけ目的地に近い」という2つの主観をどの程度満足するか評価し、評価の高い操作を決定している。

5 システムの構成

図3に示す動的障害物（対向車）を考慮し、目的地に向かう自動運転システムを構築した(図4)。

5.1 状態監視部

状態監視部では、現在の自車両のデータ（位置、操舵角、速度）と現在の動的障害物のデータ（位置、速度）から自車両と動的障害物との相対距離を求め状態予測部へ出力する。また、目的地に到達したか、通過地点に通過したかかを判断する。通過地点を通過した場合、目標設定部へ目標設定指令を出力する。

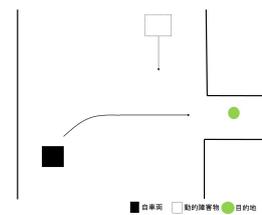


図 3: 想定する環境

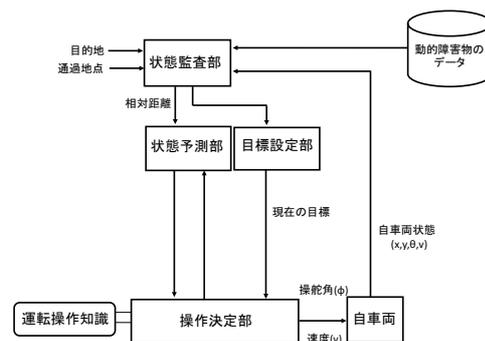


図 4: システム構成図

5.2 目標設定部

状況監視部から出力された指示より、目的地へ向かう通過地点 (TT_1)、退避目標 (TT_2) を設定する。

5.3 状態予測部

状態予測部では、状態監視部から出力された自車両と動的障害物の相対距離とそれぞれの速度を用いて、自車両が TT_1 と TT_2 へ向かう操作をしたときの動的障害物との相対距離を最大予測時間まで求める。また、自車両と目的地までの距離を最大予測時間先まで予測する。

5.3.1 通過地点

通過地点を ST とすると ST は、 x 座標 (STx)、 y 座標 (STy)、車両の向き (STt)、車両の速度 (STv) の4つの要素を持つ。

$$ST = [STx, STy, STt, STv]$$

5.3.2 目的地へ向かう通過地点・退避目標

目的地へ向かう通過地点、退避目標を TT_1, TT_2 とすると、これらは通過地点の四つの要素に目的への優位度 E を加えて設定する。 E は、0 から 1.0 の値とする。 TT_1 は以下のように設定する。

$$TT_1 = [TTx_1, TTy_1, TTt_1, TTv_1, E_1]$$

TT_1 は、次の通過地点 ST_{new} となる。これは目的地到達に対して設定するため、目的への優位度 E は $E_1=1.0$

とした。

次に、 TT_2 は、以下のように設定する。

$$TT_2 = [TTx_2, TTy_2, TTt_2, TTv_2, E_2]$$

この TT_2 は、 TT_1 へ行くことができない場合に向かうことができる安全な場所として設定する。この目標は一つ前の通過地点 ST_{old} とし、 TT_1 よりも優位度が低いため、 $E_2 < E_1$ となるように優位度 E_2 を設定する。ここでは、 $E_2=0.1$ とした。

5.4 操作決定部

操作決定部の一連の流れを図 5 に示す。操作の

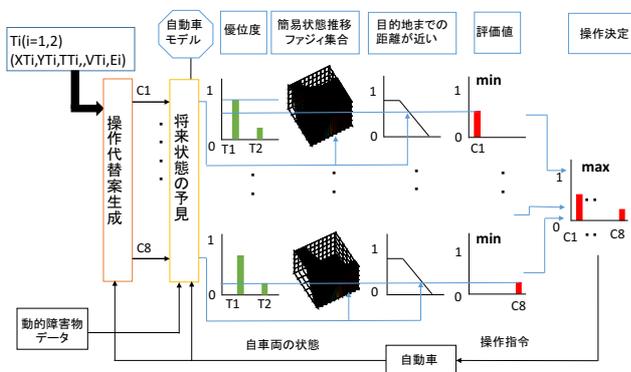


図 5: 操作決定部

決定は、 TT_1 に向かう操作案 $C_1 \sim C_4$ 、 TT_2 に向かう操作案 $C_5 \sim C_8$ の中から操作を決定する。この操作案 $C_1 \sim C_8$ は以下で述べるファジィ制御則が 8 つあるため 8 つとしているが、 TT_1 に向かう操作案 $C_1 \sim C_4$ は、 $C_1=C_2=C_3=C_4$ であり、 TT_2 に向かう操作案 $C_5 \sim C_8$ は、 $C_5=C_6=C_7=C_8$ である。まず、 $C_1 \sim C_8$ の操作を行った際の将来状態を 1 秒ごとに最大 6 秒まで操舵角を決定し予見する。もし、予見した際に障害物までの距離がある一定の値より小さくなった場合は、予見を終了し、そのときの状態を将来状態とする。状態予測部から出力された自車両と動的障害物の時間と相対距離の関係を用いた「簡易状態推移ファジィ集合の時空ファジィ推論結果」、将来の「自車両と目的地との距離」、「優位度」をファジィ多目的評価し、ファジィ制御則全てに対して行い評価値を求める。それらの中で評価値の高い操作を決定する。簡易状態推移ファジィ集合に用いた「動的障害物との距離が近い」、「動的障害物との距離が遠い」メンバーシップ関数は図 6,7、「自車両と目的地の距離が近い」メンバーシップ関数を図 8 に示す。

5.4.1 ファジィ制御則

操作決定部は、以下の 8 つのファジィ制御則を用いた。

R_1 : GO TT_1 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が近いからゆっくり遠い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_1 : GO TT_1 *If* x is near slow₃ far and y is Near

R_2 : GO TT_1 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が遠いからゆっくり近い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_2 : GO TT_1 *If* x is far slow₃ near and y is Near

R_3 : GO TT_1 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が遠いからずっと遠い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_3 : GO TT_1 *If* x is far always far and y is Near

R_4 : GO TT_1 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が近いから急に遠い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_4 : GO TT_1 *If* x is near suddenly_{1.5} far and y is Near

R_5 : GO TT_2 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が近いからゆっくり遠い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_5 : GO TT_2 *If* x is near slow₃ far and y is Near

R_6 : GO TT_2 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が遠いからゆっくり近い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_6 : GO TT_2 *If* x is far slow₃ near and y is Near

R_7 : GO TT_2 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が遠いからずっと遠い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_7 : GO TT_2 *If* x is far always far and y is Near

R_8 : GO TT_2 に向かう *If* 自車両と動的障害物の距離が近いから急に遠い *かつ* 自車両と目的地との距離が近い

r_8 : GO TT_2 *If* x is near suddenly_{1.5} far and y is Near

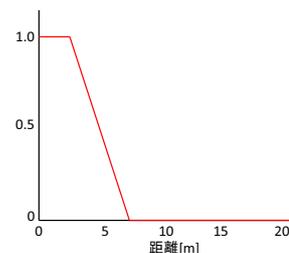


図 6: 「動的障害物の距離が近い」メンバーシップ関数

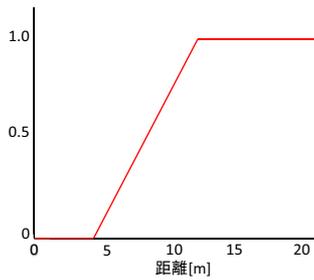


図 7: 「動的障害物の距離が遠い」メンバーシップ関数

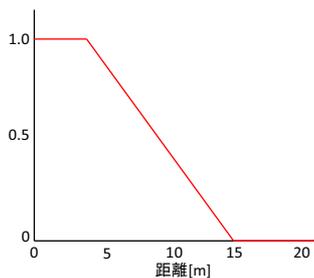


図 8: 「自車両と目的地の距離が近い」メンバーシップ関数

6 シミュレーション

6.1 環境と条件

シミュレーションで想定する環境を図 9 に示す. 初期状態を (x, y, θ) とすると, 自車両の初期状態を $(-2, -7, \frac{\pi}{2})$, 動的障害物の初期状態を $(2, 20, -\frac{\pi}{2})$ と設定し, 自車両の速度を 1.0 [m/s], 動的障害物の速度を 3.0 [m/s] とした. また, 図 9 の丸は通過地点を表し, $(-2, -6, \frac{\pi}{2}, 1), (4, 1, 0, 1), (9, 1, 0, 1)$ の三つを設定した.

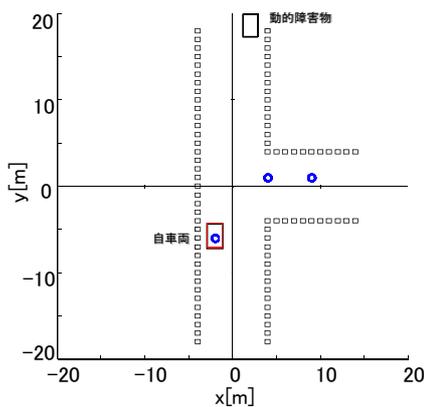


図 9: 想定する環境

6.2 結果と考察

0~3s(図 10) では, 第 4 章で述べた制御則 r_3, r_7 が評価値 0 以上となり, 制御則 r_3 が評価値が高い. つまり,

「動的障害物との距離が遠いからずっと遠い」の評価値が高く, TT_1 に向かう操作を決定している.

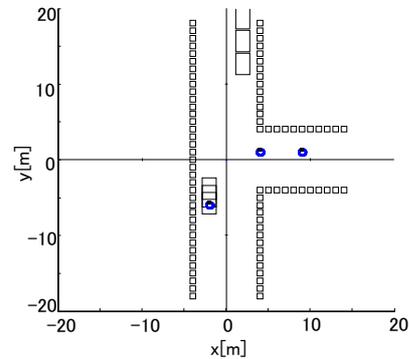


図 10: 0~3[s] の自車両と動的障害物の軌跡

3~5.7s(図 11) では, 制御則 r_7 が評価値 0 以上となり, システムは退避目標 TT_2 に向かう操作を決定している.

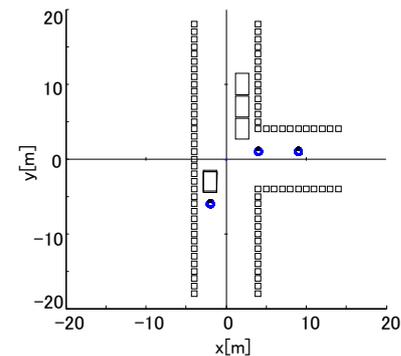


図 11: 3~5.7[s] の自車両と動的障害物の軌跡

5.7~7s(図 12) では, 制御則 $r_1, r_3, r_4, r_5, r_7, r_8$ が評価値 0 以上となり, 制御則 r_1 が評価値が高い. つまり, 「動的障害物との距離が近いからゆっくり遠い」の評価値が高く, TT_1 に向かう操作を決定している.

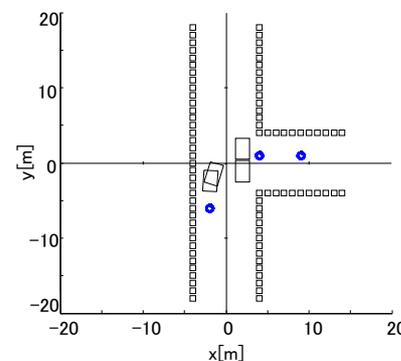


図 12: 5.7~7[s] の自車両と動的障害物の軌跡

7~19s(図 13) では, 制御則 r_1, r_4, r_5, r_8 が評価値 0 以

上となり, 制御則 r_4 が評価値が高い. つまり, 「動的障害物との距離が近いから急に遠い」の評価値が高く, TT_1 に向かう操作を決定している.

[4] 渡邊嵩孔, 安信誠二: 「時空ファジィ推論を用いた動的障害物の回避」, 第 40 回ファジィ・ワークショップ, pp.73-76, 2014

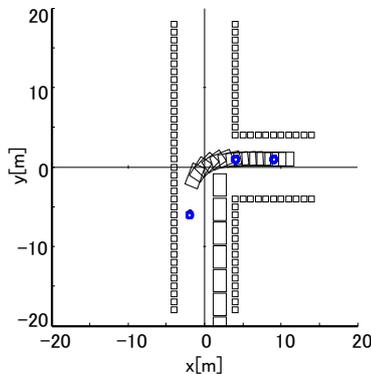


図 13: 7~19[s] の自車両と動的障害物の軌跡

このシミュレーションの結果より, 定式化した運転熟練者の右折操作を行う際に考える時間と空間の状態変化を考慮した知識がコンピュータに組み込んでいることがわかる.

7 おわりに

本研究では, 人間が動的環境で行動決定する際に用いる時間と空間の状態変化を含む知識をコンピュータに組み込むための時空ファジィ推論を提案した. 交差点の右折操作を想定したシミュレーションの結果, 運転熟練者の動的障害物を考慮した右折操作が実現できており, 時空ファジィ推論の有効性を示した.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24500272 の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] 安信誠二, 「ファジィ工学」, 昭晃堂, 1991.
- [2] Seiji YASUNOBU, Mitsuru KOKUHUDA, "Intelligent Operation Support Method based on Time Change Fuzzy Sets", IFSA, pp.657-662, 2009
- [3] Xiang Liu, Takeshi Shibuya, Seiji Yasunobu, "Space-time Support System using Simplified Time-Change Fuzzy Set", IFSA, pp.1502-1507, 2013

連絡先

〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学大学院 システム情報工学研究科
知的制御システム研究室 渡邊嵩孔
E-mail: watanabe@fz.iit.tsukuba.ac.jp