遺伝的アルゴリズムによる車両運動制御に関する研究* (第2報, 制動を伴う操舵による緊急回避)

永井正夫*¹, 音田 稔*², 片桐正大*³

Vehicle Motion Control Using Genetic Algorithm (2nd Report, Emergency Avoidance by Steering and Braking)

Masao NAGAI, Minoru ONDA and Tadahiro KATAGIRI

The reduction of traffic accidents has become an increasingly important issue during recent years as the advance of the automobile society, and thorough investigation of the behavior of drivers, especially in emergent situations, such as in the case of suddenly encountering an obstacle during driving has been regarded key in coping with this issue. Assuming an emergent situation of obstacle avoidance, taking full consideration of the nonlinearity of tires, we study the behavior of the drive under the critical condition using genetic algorithms (GAs). Computer simulations are carried out, which indicate that 1) the genetic algorithm is a very successful means of determining the driver's behavior under the defined emergent situation; 2) the initial distance at which the driver starts the avoiding operation greatly influences the driver's performance; 3) the changing patterns of the steering gain G_h and preview time T_p obtained by GAs agree very well with the general empirical knowledge on driver behavior under emergent situations.

Key Words: Vehicle Dynamics, Obstacle Avoidance, Genetic Algorithm, Intelligent Vehicle System, Advanced Safety Vehicle

1. 序 論

交通事故による死者が我が国において年間1万人を越える現状が続く中で、安全性向上のためのさまざまな対策がなされている。例えばABSやアクティブサスペンションといった車両制御技術の開発・実用化、またエアバック等の実用化により、車両自身の運動性能や安全性能は著しく向上してきていると言える。しかしそれを運転している人間のドライビングテクニックは必ずしも向上しているとは限らない。特に高速道路における障害物などに対する緊急回避においては、車両の操縦性・安定性とくにその限界性能とともに、緊急事態における人間の操縦動作は事故を引き起こすか否かに直接結び付くものと考えられる。

近年、人間の操作ミスをできるだけ防ぐための車両の知能化や車両の自動運転に関する研究が注目されてきている。これらの研究は人間の運転の助けになり、将来的に事故を減少させることに貢献すると考えられる。本研究では、車両の運転において単なる経路追従

ではなく、突然目の前に障害物が現れたときのような人間がパニック状態に陥りやすいと考えられる場面を想定し、緊急制動あるいはハンドル舵角による緊急回避をシミュレーションすることを目的とする。

遺伝的アルゴリズム⁽²⁾⁽³⁾は、遺伝子情報を用いた生物の進化の過程を数学的に記述した最適化手法であり、近年注目を集めてきている。Grefenstetteら⁽⁴⁾はGAを用いて、戦闘機が追尾してくるミサイルを回避するための戦略を獲得し、柴田ら⁽⁵⁾は移動ロボットの最適経路をGAで導き出している。これらの例に見られるようにGAは幅広い探索空間を持つ複雑な組合せ問題を解決するための強力な手法であり、現在工学的応用についてもさまざまな研究が行われている。

本研究ではドライバモデルのゲインおよび前方注視時間を可変とし、またブレーキ操作を考慮に入れ、ブレーキを踏む強さと踏む時間も可変とし、GAを用いてこれらの変数の最適な値をコントローラに学習させた。

第1報では制動動作を考慮せずに緊急回避時の基本的な特性について報告したが、今回は制動動作を考慮に入れて、障害物を発見した距離によって回避特性がどのように変化するかを検討する。

* 原稿受付 1995年11月6日。

*¹ 正員, 東京農工大学工学部 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

*² 東京農工大学工学部。

*³ 東京農工大学大学院。

2. 車両モデル

車両モデルとして、図1に示す平面3自由度モデルとした。このモデルは、四つのタイヤがそれぞれ発生する制動力 F_x および横力 F_y により車体重心点に生じる力およびモーメントを考慮したものである。またタイヤの限界性能を考慮するため非線形なタイヤモデルであるマジックフォーミュラ⁽⁶⁾を用いた。車両の運動方程式を式(1)・(3)に示す。

$$m(\dot{u} - v\gamma) = \sum F_x \dots\dots\dots (1)$$

$$m(\dot{v} + u\gamma) = \sum F_y \dots\dots\dots (2)$$

$$I_z \dot{\gamma} = l_f(F_{yfr} + F_{yfl}) - l_r(F_{yrr} + F_{yrl}) \\ + \frac{l_f}{2}(F_{xfr} - F_{xfl}) + \frac{l_r}{2}(F_{xrr} - F_{xrl}) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

m : 車両質量

I_z : 車両のヨー慣性モーメント

u : 車両の前進速度

v : 車両重心点の横速度

γ : 車両のヨー角速度

F_{xij}, F_{yij} : タイヤの制動力, 横力

l_f, l_r : 前後輪軸と車両重心点との距離

t_f, t_r : 前輪と後輪のトレッド

である。

また、大きな横加速度や前後加速度を伴う車両の運動を考える際、各タイヤに発生する力はそれにかかる垂直荷重に大きく依存する。そこで本研究では路面から高さ h の重心点に加わる前後加速度、横加速度による影響を考慮する。各タイヤにかかる垂直荷重を式(4)・(7)に示す。

$$F_{zfr} = m(g l_f / 2l - h \dot{u} / 2l + h R_f \dot{v} / t_f) \dots\dots\dots (4)$$

$$F_{zfl} = m(g l_f / 2l - h \dot{u} / 2l - h R_f \dot{v} / t_f) \dots\dots\dots (5)$$

$$F_{zrr} = m(g l_r / 2l + h \dot{u} / 2l + h R_r \dot{v} / t_r) \dots\dots\dots (6)$$

$$F_{zrl} = m(g l_r / 2l + h \dot{u} / 2l - h R_r \dot{v} / t_r) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

Fig.1 Three degree of freedom vehicle model

g : 重力加速度

l : ホイルベース

R_f, R_r : 前後支持系のロール剛性配分 ($R_f + R_r = 1$) である。

なお操舵角 δ_d に対する車両の応答に関しては、二輪車モデルに基づいており、文献(7)・(9)を参照されたい。

3. ドライバの制御モデル

車両の運動を制御するために、本研究では式(8)・(9)に示すドライバの制御モデルを用いた。

$$\delta_d = \frac{1 + T_2 S}{1 + T_1 S} G_h y_e \dots\dots\dots (8)$$

$$y_e = y_d - (y + V T_p \theta) \dots\dots\dots (9)$$

式(9)の意味は、車両の現在の横変位 y とヨー角 θ より、車速 V で予見時間 T_p 秒後に進む位置を注視(予測)して目標コース y_d との偏差 y_e を検知することに相当する(前方注視モデル)。式(8)は偏差に対するハンドル舵角の伝達関数であり、この形式はMcRuer⁽¹⁰⁾により人間の手動制御をモデル化したものである。

本研究では、このドライバモデルのゲイン G_h および前方注視時間 T_p が緊急回避時には一定ではなく変化するものとする。車両を含めた制御系の概要図を図2に示す。図2の図中で x_r は障害物と自車両との相対距離を意味し(図4参照)、この量を基にしてドライバのパラメータが変化するものとする。そのアルゴリズムに関して以下に記述する。なお、図2では B_s, B_t はそれぞれブレーキを踏む強さと時間を表す、今回の第2報ではこのドライバモデルのゲイン G_h および前方注視時間 T_p を変化させながら、ブレーキ操作(B_s と B_t を変化させること)を加え、緊急回避の実現をめざす。

4. 緊急回避の条件設定

本研究では高速道路などの一般に車両が高速で走行している際の緊急回避を想定して図3に示す条件でシミュレーションを行った。これは車両が速度 27.8 m/s

Fig.2 Block diagram of the vehicle control system

(100 km/h)で走行中に車両の前方に突然障害物を発見したという想定である。直線コースを走行中の車両は障害物を発見すると前述のドライバモデル制御によりハンドル舵角が制御されて、4 m 右にある隣の車線に目標コース(y_d)をとるものとする。ただし、今回の第2報では障害物回避に際して必要に応じてブレーキ操作を加えるものとする。この緊急回避行動において、式(10)の評価関数が最小になることを条件として設定する。

$$Payoff = \int [a(y_d - y)^2 + bT_w^2 + c\delta^2 + d\dot{v}^2 + e\dot{u}^2] dt \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 a, b, c, d, e は正符号の重み係数、 $y_d - y$ は目標コースからの横偏差、 T_w はタイヤ稼働率、 $\dot{v}, \dot{u}$ はそれぞれ車両の横加速度と前後加速度、である。なお、タイヤの稼働率とはタイヤに発生している横力・前後力の合力(発生摩擦力)をそのタイヤにかかっている垂直荷重に路面の摩擦係数 μ をかけた値で除したものであり、これを評価することによってタイヤの安全マージンを評価することができる。

この評価関数は、過度の操舵、制動操作をせず、タイヤの安全マージンを確保し、車両の応答も過度にならない範囲で回避を行わせることを意味する。

図4は、車両と障害物との相対距離 x_r 、相対角度

Table 1 Ranges of increments of variables

	X_r [m]	$a_1 = a_2 = a$	$b_1 = b_2 = b$	B_s (slip rate)	B_t [sec]
Range	25 - 29 30 - 50	0.01 - 0.1 0.1 - 1.0 1.0 - 10.0	0 - 3	0 - 10 (0.01 - 0.1)	0 - 2
Increment	1 5	0.01 0.1 1.0	0.1	1 (0.01)	0.1

Fig. 3 Simulation conditions for obstacle avoidance

Fig. 4 Geometric relationship between the vehicle and the obstacle

θ_r および自車両の位置関係を示す。5章の遺伝的アルゴリズムにより、これらの走行状況によりドライバのパラメータ G_h, T_p およびブレーキ操作に関するパラメータ B_s, B_t が変化する様子を調べる。

5. 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム(GA)は、解集団のそれぞれの解に評価を与え次の世代に残る個体(Individual)を選択し、ある確率に従い選ばれた解に交さ、突然変異を施すことにより解集団の質を向上させ最適解を得ることを目指すものである。

本研究で用いたGAは、入出力のルールを一つの遺伝子(Gene)、ルールセットを個体として扱う、いわゆるピッツアプローチを基礎とするものである(1-3)。各変数の遺伝子へのコーディングおよび遺伝的操作について以下に示す。

5.1 遺伝子へのコーディング 第1報で得られたゲインと前方注視時間の特性がシグモイド関数で近似できるという結果を利用し、障害物を発見した距離に応じたこれらのシグモイド関数の最適なパラメータの値をGAを用いて学習する。ここで、ゲインの関数を式(11)、前方注視時間の関数を式(12)とする。

Fig. 5 Relationship among gene, individual and population

Fig. 6 General description of genetic algorithm

Fig. 7 Vehicle trajectories during the obstacle avoidance

Fig. 8 Responses of the vehicle under different initial conditions

Fig. 9 Tire working ratios during the avoidance under different initial conditions

$$G_s(t) = \left(-\frac{4.0}{1 + \exp\left(-\frac{t - b_1}{a_1}\right)} + 5.0 \right)^* 0.025 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$T_p(t) = \left(-\frac{4.0}{1 + \exp\left(-\frac{t - b_2}{a_2}\right)} + 1.0 \right)^* 0.5 \quad \dots\dots\dots (12)$$

(a) Steering gain G_s vs. initial distance and time (b) Preview time T_p vs. initial distance and time (c) Braking strength B_s vs. initial distance and time

Fig. 10 Influences of initial distance on driver characteristics during the emergency avoidance

ここで、 a_1 、 a_2 は関数の傾き、 b_1 、 b_2 は時間軸方向のオフセットを決める係数である。本研究では、ゲインと前方注視時間が同じように変化すると仮定し、 $a_1 = a_2 = a$ 、 $b_1 = b_2 = b$ とする。

ブレーキ操作については、上述したように本研究ではブレーキを踏む強さ B_s と踏む時間 B_t で表す。ブレーキの強さは具体的に制動スリップ比で表す。

ここで、車両と障害物との距離 x_r に対するドライバモデルの操舵ゲインと前方注視時間の変化を左右するシグモイド関数の傾き a とオフセット b 、そしてブレーキの強さ B_s とブレーキする時間 B_t の組合せをルールとし、これを遺伝子(Gene)とみなす。それぞれの変数の値の範囲および刻みを表1に示す。それぞれの変数の範囲をそれぞれの刻みで分割し、整数値として遺伝子へコーディングする。これら遺伝子を複数集めたルールセットを個体(Individual)とし、ルールセットの集合を集団(Population)とする。これらの関係を図5に示す。一集団の個数は100とする。

5・2 遺伝的操作 図5に示す遺伝子の集合である個体が、求めようとする図2のドライバモデルコントローラ(ブレーキ操作を含む)となる。このコントローラの学習に際しては、式(10)を最小とすること、すなわち式(13)に示す適応度(Fitness)を最大とすることを目標とする。図6に最適解を求めるアルゴリズムの概略図を示す。

$$\text{Fitness}(i) = 1/\text{Payoff}(i) \quad \dots\dots\dots (13)$$

まず各遺伝子(Gene)には一様乱数により数値を割り当てる(初期化)。次に操作(Selection)としては、各個体が次世代に残る確率をいわゆるルーレット選択により求め、適応度の高い個体を次世代の個体として残すものとする(エリート保存戦略)。

ただし各世代において、適応度の平均値をとり、その平均値以下の適応度を持つ個体に関しては他の個体に比べて選択確率が小さくなるものとする。

次の遺伝子間の交差(Crossover)は、ルール単位でランダムに割り当てる交差を用い、交差率は40%とする。突然変異(Mutation)は遺伝子中の五つの変数のいずれかを、刻み一つ変化させる程度のわずかな変化を与えるものとし、突然変異率は1%とする。

このように各個体の適応度が大きくなるまで、選択、交差、突然変異を繰返し、図3の緊急回避が成功するまでシミュレーションする。

6. 結果・考察

図7(a)、(b)、(c)に障害物発見距離 X_0 がそれぞれ28 m、35 m、45 m の場合の車両の走行コースを示

す。この結果から、 X_0 が短い場合には、なんとか障害物は回避できるものの目標コースに対してオーバーシュートを生じてしまっていることがわかる。また X_0 が長くなって回避に余裕がでてくると、スムーズに目標コースに収束している様子がわかる。

図8に障害物回避時の車両の応答を示す。図8(a)の車両の横変位から、障害物の発見距離が長いほど回避がなめらかに行われていることがわかる。これは、図8(b)のドライバ操舵角、図8(c)の横加速度の結果からも明らかである。つまり、障害物の発見距離が長くなるに従って、ドライバの操舵角が小さく、かつなめらかになり、回避に余裕がでてくることを意味する。横加速度も操舵パターンに応じて発見距離が長いほどピーク値が小さく、変動も穏やかになっていることがわかる。図8(d)には障害物回避時の減速度を示す。安全な回避を確保するために、障害物の発見距離が短いときに、短時間の間にブレーキをかけ、発見距離が長くなるに従ってブレーキ操作が必要でなくなっていることがわかる。図8(e)、(f)にはそれぞれドライバの操舵ゲインと前方注視時間の変化の様子を示す。ドライバが障害物を発見した時点で大きな操舵ゲインと小さな前方注視時間で車両を操作し、障害物回避の成功とともにゲインが小さくなり、前方注視時間が長くなっていることがわかる。また、障害物の発見距離が長いほどゲインと前方注視時間が早く一定値に収束することがわかる。

図9に上記三つの条件下で障害物回避を行う場合の各タイヤの稼働率を示す。図9から明らかなように、障害物の発見距離が長いほど、タイヤの稼働率が小さく抑えられていることがわかる。つまり、コントローラの学習に式(11)のような評価関数を導入することによってタイヤの安全マージンを確保しながら回避に成功することができる。

次に、GA学習により得られた障害物回避におけるドライバモデル特性を図10(a)、(b)、(c)に示す。これらの図はそれぞれ回避時の人間の操舵ゲイン G_h 、前方注視時間 T_p 、ブレーキ操作を表している。 G_h と T_p のグラフより、ドライバモデルが障害物を短い距離で発見したとき、回避の初期に近く(障害物付近)を見ながら大きなゲインで、回避した後は徐々に遠くを見ながら小さなゲインで運転していることがわかる。一方、回避に余裕のある距離で障害物を発見したときには、ゲインと前方注視時間がすぐある一定値に収束し、ほぼ一定の低いゲインと大きい前方注視時間で車両を運転していることがわかる。

ブレーキの特性については、図10(c)を見ると、障

害物発見距離が短いときは短時間でブレーキをかけ、障害物発見距離が長いとブレーキをかけないという結果になっている。これは、緊急時には回避の初期にブレーキを短時間かけることで荷重移動を起こし、フロントタイヤの垂直荷重を増加させることにより、初期旋回性が向上し、障害物を上手く回避できるからだとも考えることもできる。また障害物発見距離が長いと荷重移動などで初期旋回性を向上させなくとも十分に回避できることが言える。

7. 結 論

本論文は高速走行時に突然障害物を発見したときの緊急回避の問題を遺伝的アルゴリズムを使って解析した。特に本論文では、障害物を発見した距離をパラメータにとり、緊急制動を考慮した操舵による回避性能について検討した。緊急制動や緊急回避についてはタイヤの限界性能が重要であるため、本論文では非線形タイヤモデルによるタイヤ稼働率の概念を評価関数に導入して最適な学習を行わせた。シミュレーションを行った結果、障害物を回避させる際の有効な知見が得られた。

(1) 障害物の発見距離が短い場合、回避は困難になるが一般的傾向として回避のための操舵ゲインが大きく、前方注視時間が短くなり、パラメータの変動も大きくなることが示された。

(2) 障害物の発見距離が短い場合には、さらに緊急制動を加えることによって操舵回避性能が向上することが示された。

(3) 発見距離が十分長い場合には、操舵のみによる回避が可能である。なお、本論文では操舵による回避を前提としているが、制動のみでも回避が可能な場合もあることはいうまでもない。

本研究では、線形理論では解決できない緊急回避時の問題をGAを用いて解析したが、このまま自動運転につながるとは考えていない。人間による緊急回避の問題と自動運転による回避との関係について、今後十分な検討がなされなければならないと考えている。

文 献

- (1) 永井正夫・Mitchke, M., 異常道路環境下の人間・自動車系の適応的挙動(第2報), 自動車技術会論文集, No. 32(1986), 119-126.
- (2) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, (1993), 産業図書.
- (3) Davis, L. 編, 遺伝子アルゴリズムハンドブック, (1994), 森北出版.
- (4) Grefenstette, J. J., Learning Sequential Decision Rules Using Simulation models and Competition, *Machine Learning*, 5 4(1990).

- (5) 柴田崇徳・福田敏男・小菅一弘・新井史人, Genetic Algorithm を用いた移動ロボットの最適制御経路計画, 機論, 58-553, C(1992), 2714-2720.
 - (6) Pacejka, H. B., A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, *SAE Paper*, No. 890087(1989).
 - (7) 永井正夫・王玉清, 前輪操舵角制御と後輪駆動力制御による大型車の安定性解析, 機論, 59-562, C(1993), 1737-1744.
 - (8) 王玉清・森本直・永井正夫, ヨーモーメント補償を用いた前輪操舵車両の運動制御(四輪操舵方式との制御効果比較), 機論, 60-571, C(1994), 912-917.
 - (9) 永井正夫・A. Moran・上田悦広, ニューラルネットワークと線形制御則を統合した四輪操舵車の制御, 機論, 61-588, C(1995), 3282-3288.
 - (10) McKuer, D., Allen, R. W., Weir, D. H. and Klein, R. H., New Results in Driving Steering Control Models, *Human Factors*, 19-4(1977).
 - (11) 永井正夫・音田稔・片桐正大, 遺伝的アルゴリズムによる車両運動制御に関する研究, 第1報, 操舵による緊急回避, 機論, 62-599, C(1996), 2648-2653.
-