

## 非厳密な評価規準をもつGAによる自転車のニューロ制御\*

山本 哲彦<sup>\*1</sup>, 吐合 隆 拓<sup>\*2</sup>, 中園 邦彦<sup>\*3</sup>  
金城 寛<sup>\*4</sup>, 玉城 史朗<sup>\*1</sup>

## Neurocontrol of Bicycle using GA with Rough Evaluations

Tetsuhiko YAMAMOTO, Takahiro HAKI-AI, Kunihiko NAKAZONO,  
Hiroshi KINJO and Shiro TAMAKI

Genetic algorithms (GAs) with rough evaluations can prompt the evolution of neural networks that are able to control unstable dynamic systems. The proposed control method exploits the advantage of GAs that time-varying evaluations can be easily incorporated. First an easy evaluation in GAs induces the appearance of neural networks with controllability. Second, an evaluation of settling time prompts the evolution of neural networks that show high performance. The method is applied to the stable control of a bicycle. Neurocontrol of the steering at direction change causes reverse response like that of a human cyclist.

**Key Words:** Neural Networks, Robot, Learning, Direct Control, Genetic Algorithms, Rough Evaluation, Bicycle, Environment Adaptation

## 1. はじめに

機構の単純な自転車は軽便な乗り物であり歴史の早期に現れてもよさそうに思われるがその発明は新しく18世紀後期から19世紀初頭である<sup>(1)</sup>。直列2輪車によって平衡を保ちながらの走行は、人類には考案しにくかったようである。初期の自転車発達は本論文の手法とアナロジーがある。

自転車らしき乗物の最初は、ド・シヴラックの「木馬(1790)」であると伝えられている。これは2つの車輪を馬の形の2枚の板ではさんだもので、舵とり機構はない。ドライスの作ったドライジーネ(1817)は最初に舵とり装置をつけたもので自転車の原点とも目える。ドライジーネに乗った人は、この単純な機構を巧みに操れば直立して走行できることを発見したに違いない。両足で地面を蹴りながらバランスをとって走る形式は、現代でも自転車の初心者には操縦技術を修得する近道である<sup>(2)</sup>。バランスを崩し足が地面に着くと「その運転ではバランスをくずす」ことが理解できる。「バランスを保ち、できるだけ長く走行する」ことを目指せば、制御可能な運動神経回路網ができあがっていく。これが本論文の手法である。

制御理論は振動の数学を利用して発達し厳密な解析・設計を与えられるまでに発展した。しかし、その理論の習熟は数学を自由に駆使する数学理解力を要し、手軽に

制御装置を構築しなくてはならない環境には不向きである。

本研究は非厳密な評価規準をもつ遺伝アルゴリズム(以下、GA)によって不安定システムである自転車を直立制御する神経回路網を進化させ、手軽に制御器を構成する方法の可能性を示すものである。本手法では、はじめ緩やかな規準を設けることで、一応目的に近い能力をもつ神経回路網が出現する。ある程度の個体数(能力のある神経回路網の数)が集ったのち、規準を厳しくすると能力の高い神経回路網が多くなる。最初から厳しい基準を与えると能力のある神経回路網の発生が遅れ、GAの世代進化で断念することになる。この手法の有効性は、倒立振子の制御により確認した<sup>(3)</sup>。

通常、運動にかかわる神経の出力が筋肉を刺激しその筋肉の力が力学系の動特性に働きかける。そこで、運転者の筋肉とハンドルおよび前輪を一種のサーボ機構と考え神経回路網と自転車の間に挿入し制御対象を現実的なものにした。自転車の走行は直立直進走行のみでなく方向転換にも応じられるものでなくてはならない。そこで直立することが確認されたら方向転換を入力し転倒しないよう制御するものとした。

## 2. 制御システムの構成とGA

制御器として4入力-10中間層-1出力(数字は各層のニューロン数)の階層型神経回路網を採用し、直接制御とする(Fig.1, 図中の記号のうち、NNは神経回路網、 $u$ は神経回路網の出力、その他はFig.6参照)。ニューロンの出力特性は原点对称のシグモイド関数、神経回路網の結合重み( $w_{ij}^k$ )の調整にGAを用いる(ここで、

\* 原稿受付 1995年10月5日。

<sup>\*1</sup> 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原1)。<sup>\*2</sup> ダイキンプラント(株) (〒103 東京都中央区日本橋本町3-5-11)。<sup>\*3</sup> 琉球大学大学院。<sup>\*4</sup> 琉球大学工学部。

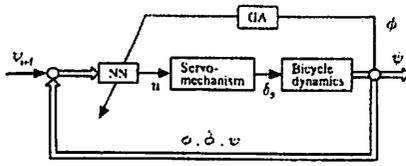


Fig.1 Control system

$i$ : 前段  $i$  番目のニューロン,  $j$ : 次段の  $j$  番目のニューロン,  $k$ : 第  $k$  層と第  $k+1$  層間の結合,  $l$ : 第  $l$  番目の個体). GAにおける交叉は,  $(w_{ij}^k)_l$  と  $(w_{ij}^k)_{l+m}$  ( $m \neq 0$ ) の間で行なわれる. すなわち, 異なる個体の対応する結合重み同志で行なう. 個体数は20個体とした. 交叉を施して新たに産れた個体をそれまでの親に加えて評価にかけ上位半数を次世代とする (Fig.2). 突然変異は2%とした.

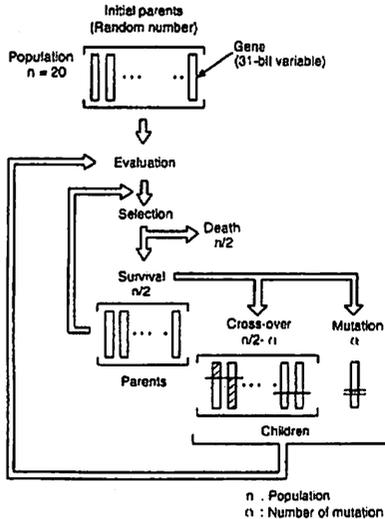


Fig.2 Genetic algorithms

評価規準は非厳密な次の2種類を用意した.

[規準 1]

自転車のような不安定動的システムを乗り物として利用するためには, 操縦によって不安定平衡状態近傍に安定制御されることが必要である. 平衡点でない初期状態の傾き角  $\phi_0$  から自由運動させれば動的システムは安定な平衡状態に向けて運動する. これに制御をかけて安定化させればよい. 制御が行なわれれば不安定平衡点から離れようとする単純な発散運動でなく平衡点近傍で動揺するであろう. 制御が成功すればそのまま平衡が保てるが失敗すれば平衡が崩れる. そこであまり厳格でない一定の限界を設け, 同一の初期値から起こった運動が

その限界値  $\Phi$  に到達する時間  $t_1$  を計る (Fig.3). この限

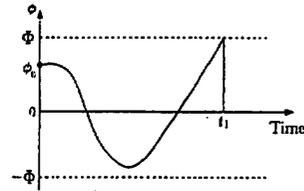


Fig.3 Evaluation 1

界値の値は厳密な意味を持たない. 次の条件を満たせばよい:

$$|\phi_0| < |\Phi| \leq \pi/2. \quad \dots (1)$$

この限界値到達時間  $t_1$  の長い順に神経回路網を上位に位置付け GA の選別にかかる.

[規準 2]

上記の規準のみでは, GA の世代が進んでも制御能力があると言うだけの神経回路網が交叉をくりかえし進化が進まないことが考えられる. そこで, 整定時間に関する規準を導入する. 整定時間は, 状態変数 (角変位) とその速度 (角速度) が同時にゼロになる瞬間  $t_2$  を持つて便宜上定義した (Fig.4).

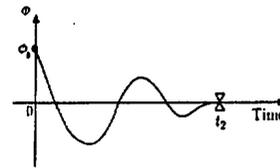


Fig.4 Evaluation 2

整定時間の短いものから上位に位置付け GA の選別にかかる. 交叉には複数個体あればよい. 整定時間のあまりに長いものは演算時間の節約のためにも交叉に用いない.

この規準を適用させる時点は, 規準 1 の適用後制御能力を持ち整定時間の計測が可能な制御をする神経回路網 (以下, 有能神経回路網) が複数個体得られるようになった時点である. または, 有能神経回路網が集団全体に充満してからでも良い. この規準の切り換えは自動で行う. この規準による進化はその後持続させる.

本研究の特徴はこの点にある. はじめから高度な能力を要求すると発生そのものが困難となり, 全く偶然に発生することを持ち受けることになる.むしろ, 「能力は低くても目的に一応合致すればよし」とする評価で発生を促し, 高い能力はその後新たな規準を設けて進化させるのが良い.

3. 自転車の運動方程式と腕・ハンドルのサーボ機構

自転車の直立は通常は速度では舵とり操作で行なわれる。高速になるとジャイロ効果も加わるが、直立安定走行の主たる原因は舵とり操作による。文献(4)にしたがって、Figs.5, 6に自転車の姿勢と変数を示す。前輪接地

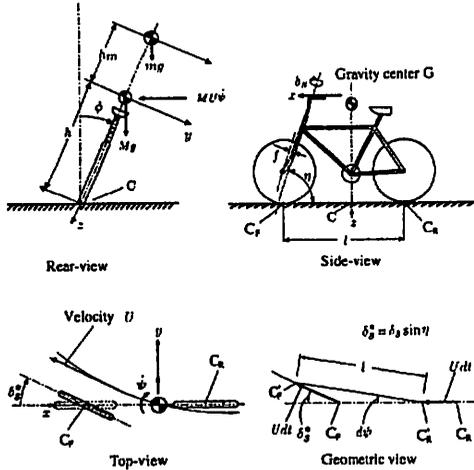


Fig.5 Dynamical and geometrical schema

Table 1 Specification of bicycle system

Symbol	Meaning	Value
$M$	Total mass (rider+bicycle)	70.0(kg)
$m$	Mass of upper half body	30.0(kg)
$\eta$	Head angle	70°
$h$	Gravity height	1.10(m)
$h_m$	Gravity height of upper half body	0.3(m)
$l$	Wheel base	1.10(m)
$U$	Velocity of bicycle	3.5(m/s)
$I_c$	Inertial moment of bicycle (with respect to C in Fig. 5)	57.8(kg·m <sup>2</sup> )
$f$	fork offset	0.05(m)

点、後輪接地点をそれぞれ  $C_f, C_r$ 、微小時間  $dt$  間に移動した接地点をそれぞれ  $C'_f, C'_r$  で示す。重力加速度  $g = 9.8(m/s^2)$  とした。運動方程式は次のように示される(4)：

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\rho} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ L_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \rho \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L_{\delta_s} & L_{\delta_m} \\ R_{\delta_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_m \end{bmatrix} \dots (2)$$

ただし、

$$\rho = \dot{\phi}, \dots (3)$$

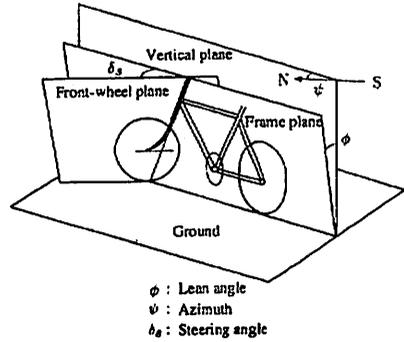


Fig.6 Steering geometry

$$L_\phi = \frac{Mgh}{I_c} (> 0), \dots (4)$$

$$L_{\delta_s} = \frac{Mh}{I_c} U^2 \sin \eta (< 0), \dots (5)$$

$$L_{\delta_m} = \frac{mg}{I_c} \left[ 1 - \frac{Mh(h+h_m)}{I_c} \right] (> 0), \dots (6)$$

$$R_{\delta_s} = \frac{U}{l} \sin \eta (> 0). \dots (7)$$

自転車および乗り手の寸法・重量は現実的な値となるよう著者の周辺の自転車の実測値と見積値を採用し (Table.1)、体重移動量  $\delta_m$  は 0 とおいた。自転車の倒れ角  $\phi$  の角速度  $\dot{\phi}$  は角変位  $\phi$  の時間差分を作って入力した。これは、倒立振子の制御に使ったものと同じ構造の 4 入力神経回路網を使ったためである。

自転車の舵とり行動は、腕の筋肉をアクチュエータとして前輪・ハンドル・両腕で構成される慣性モーメントを駆動する一種のサーボ機構 (Fig.7) になっている。神

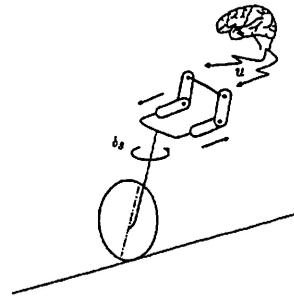


Fig.7 Steering servo-mechanism

経回路網の出力は筋肉を刺激する制御信号として筋肉に入力し、筋肉はハンドルの慣性モーメントを負荷としながらステアリング角を変化させる。その結果として自転車の状態が変化する、すなわち自転車の姿勢が変化する。

筋肉は生体であるから、その応答特性は環境や履歴に大きく影響を受ける。本来、単純にはモデル化できないが、ここでは、運動生理学の文献<sup>(5)(6)</sup>を参考にして、次の方程式で表される2次系 (Fig.8) と仮定した:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{I} \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{I} \begin{bmatrix} 0 \\ 1.0 \end{bmatrix} u, \dots (8)$$

ただし、 $\theta_1 = \delta_s$ ,  $\theta_2 = \dot{\delta}_s$ ,  $k = 1.0(\text{Nm})$ ,  $c = 1.0(\text{Nms})$  とする。Iは腕と前輪で作られるステアリングシステムの慣性モーメントで1.035(kg<sup>2</sup>)と見積もった。

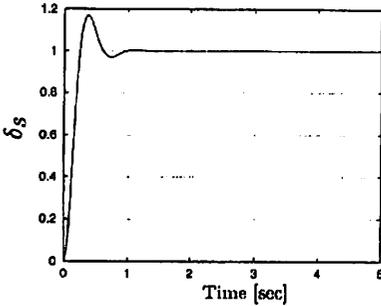


Fig.8 Step response of steering servo-mechanism

4. 進化の実験と考察

自転車の倒れ角初期値 $\phi_0 = 1.0^\circ$ 、限界値 $\Phi = 10^\circ$ と設定し、一方向(北,  $\psi_{\text{ref}} = 0^\circ$ )に定速で進行させる。最初は規準1を適用するので、倒れるものはGA処理により進化の過程で姿を消し、直立能力の有るものが現れる。直立能力のある神経回路網には方向転換 $\psi_{\text{ref}} = 20^\circ$ を入力し、この入力に対しても倒れないように規準1を適用する。この方法でGAをくりかえし、十分な個体数が現れたら規準2を適用する。ただし、本研究では整定時間による評価は直立安定直進走行( $\psi_{\text{ref}} = 0^\circ$ )のみに対し適用した。

進化の様子を Fig.9に示す。

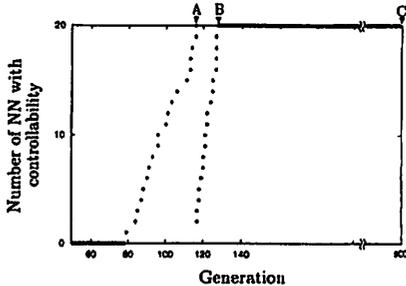


Fig.9 Evolution process

図中、記号Aの世代で有能回路網が集合全体を占める。そこで規準2を導入する。整定時間の余りに長いも

のは処理時間の短縮のため交叉から排除するので有能回路網の数は減少する。その後、GAの効果で有能回路網の数は増加し集団全体を占める。この世代を図中に記号Bで示した。その後GA処理を500世代まで進めた(記号C)。

整定時間の分布を Fig.10に示す。世代Aでは整定時

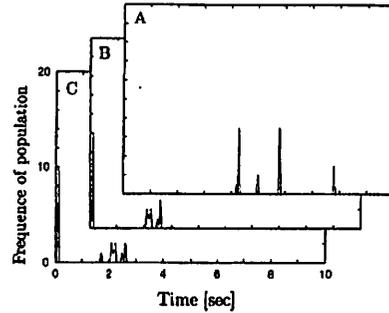


Fig.10 Distribution of settling time

間の長いものが多い状態であるが、世代Bでは世代Aで現れていない整定時間の短いものが多くなり規準2を加えた意義が現れている。その後の進化ではほとんど能力は向上せず世代Cでは世代Bの状態と変わらない。

その制御結果を Fig.11に示す。

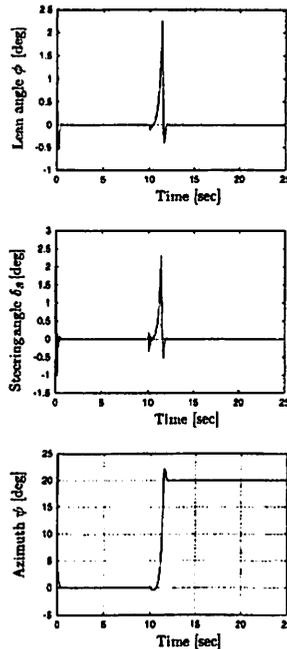


Fig.11 Control results

操舵角 $\delta_s$ に振動が見られるが自転車は直立安定し方位角変更にも応答しその後の転倒もない。方向転換に対し、現実の人間のハンドル操作には逆応答が現れる。この神経回路網による制御にも方向転換時に逆応答が現れ、人間の操作と矛盾がないことがわかる。

500世代までに現れた有能回路網を使って制御させ、その倒れ角に対する応答の詳細を観察すると Fig.12 のように 0.6s 程度で整定させていることがわかる。

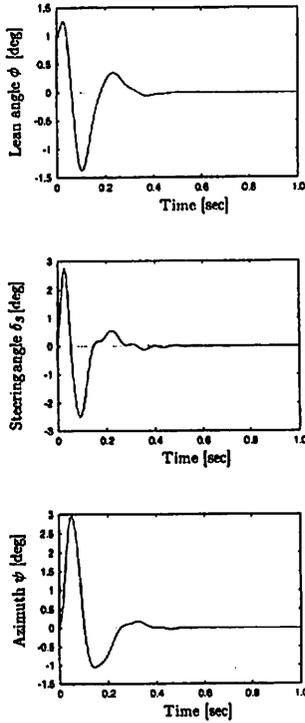


Fig.12 Response details

### 5. 有能回路網の結合重みと入出力曲面

有能回路網の結合重み  $w_{ij}^k$  の分布は Fig.13 のようになった。

小さい結合重みを 0 に置換しても制御能力に大きな影響はないと考えられる。別の表現をすれば、小さい結合重みから順に 0 に置換して行けば制御能力が劣化していく様子が観察できる。

小さい  $w_{ij}^k$  から 0 に置換していくと制御能力は次第に衰え、先ず方位角制御ができなくなった。絶対値が 0.4 以下の  $w_{ij}^k$  を 0 に置換すると直立制御能力をうしなった。

倒れ角  $\phi$  とその角速度  $\dot{\phi}$  を 0 に設定したとき、方位角  $\psi$  とその微分  $\dot{\psi}$  に対する操作量  $u$  (神経回路網の出力) の

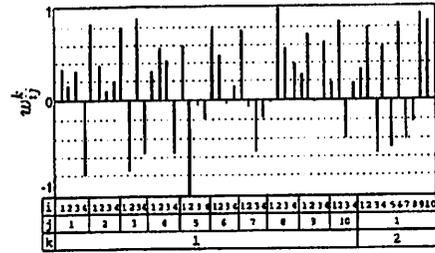


Fig.13 Distribution of connecting weights

値は Fig.14(上) に示す。その逆に方位角  $\psi$  とその微分  $\dot{\psi}$  を 0 に設定したとき、倒れ角  $\phi$  とその角速度  $\dot{\phi}$  に対する操作量  $u$  (神経回路網の出力) の値は Fig.14(下) に示す。神経回路網は 4 入力であり、制御運動中 4 入力は同時に変化する。したがって動作状態では 2 つの入力 (変数) が同時に 0 に固定されることはない。この曲面上で操作量  $u$  が動いているわけではないが、倒れ角に対する感度は方位角に比較的大きい値が出力されることは推察できる。

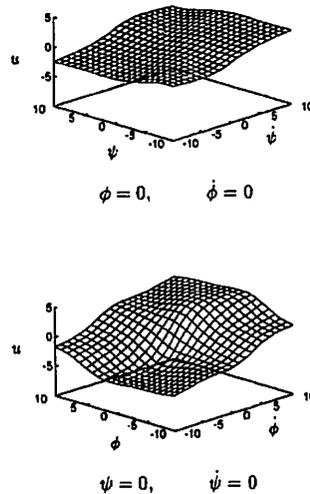


Fig.14 Output of neural network

### 6. まとめ

1. 制御対象の不安定特性を利用し、非厳密評価規準をもつ遺伝アルゴリズムによって神経回路網を環境適応させ不安定制御対象を直立安定させる非線形ゲインを自動構成する手法を示した。

2. 遺伝アルゴリズムに採用する評価規準には2種類用意した。はじめに、ゆるやかな評価規準を適用すると、低い能力であっても一応目的の能力を持つ神経回路網の発生が容易である。高い能力を要求する評価規準を選れて適用することで、すでに発生した神経回路網の能力が進化する。
3. 不安定動的システムの実例として自転車の直立運転と方向転換制御に適用しシミュレーションでその有効性を示した。方向転換にも安定に応答している。
4. 自転車の運動特性と神経回路網の間に運転者の筋肉とハンドル機構によるサーボ機構を挿入し、より現実的にした。神経回路網は高次の動システムを制御対象とすることになるが、上記の評価規準によって制御能力が得られる。
5. 神経回路網の結合重みの絶対値の小さいものから消去していく、すなわち0に置きかえていくと、まず方向制御ができなくなり、絶対値が0.4以下の結合重みをとりさると直立制御ができなくなった。直立制御に関係する結合重みは方向制御にかかわる結合重みより絶対値が大きい。
6. 自転車の倒れ角に対する神経回路網の出力は、方位角に対する出力より大きい。これは倒れ角に対しては不安定系になり、方位角に対しては不安定でも安定でもないからである。上記5の別の表現である。

### 謝辞

九州三菱電機プラントサービス株式会社 花田真一君に研究の協力を受けた。

### 文献

- (1) 下中邦彦, 世界百科事典 13, (1972), 平凡社
- (2) Richard Ballantine and Richard Grant: Richard's Ultimate Book "BICYCLE", Dorling Kindersley, 1992
- (3) 山本哲彦・花田真一・中園邦彦・金城 寛・玉城史朗, 非厳密評価規準 GA によって進化させた倒立振子のニューロ制御, 日本機械学会論文集, 61 - 591, C (1995),
- (4) 古茂田真幸, 制御工学, (1993), 朝倉書店, 53.
- (5) 真島英信・猪飼道夫, 生体の運動機構とその制御, (昭和 47-1972), 杏林書院
- (6) キネオロジー研究会, 身体運動の科学 - Human Power の研究, (昭和 49-1979), 杏林書院