

# 解剖学的構造に基づいた学習機能をもつ眼球運動システムとその特性

張 曉林 若松秀俊 (東京医科歯科大学 医学部)

## LEARNING MODEL OF EYE MOVEMENT SYSTEM BASED ON ANATOMICAL STRUCTURE

X. Zhang and H. Wakamatsu (Tokyo Medical and Dental University)

**Abstract** A learning system is proposed to explain the adaptive function of an eye movement consisting of compensatory and optokinetic reflex, and pursuit movements based on the brain anatomy and physiology. Thereby, the learning system is synthesized as an artificial neural network based on the structure and function of the biological neural network of flocculus. The role of neural paths into flocculus from stretch receptors of ocular muscles are discussed in detail from the viewpoint of system control engineering. The mathematical learning process is also shown taking into account the adaptive mechanism and the anatomical structure of vestibular nuclei. The experimental results through simulation confirm the validity of the hypothesis and the appropriateness of the inference process in connection with the proposed mathematical model.

キーワード：眼球運動システム，前庭動眼反射，視機性反射，滑動性運動，小脳片葉，前庭核，学習制御，ニューラルネットワーク。

### 1. はじめに

眼球運動制御系は種々の眼球運動を協調し、網膜の中心窩に視標の像を結ぶように適切な制御を行っている。この運動制御系では環境や自らの機能の変化に適応的に対応できるような学習機能が小脳片葉で行われていることが確認されている<sup>(1)-(4)</sup>。このような眼球運動の機序を論じるのにモデル化によるシミュレーション手法が有効であるが、これまでにその適応機能を説明できる十分な結果が得られていない。

本論文では、著者らが先に提案した前庭動眼反射，視機性反射，滑動性眼球運動を統合した眼球運動モデル<sup>(5)</sup>を基礎に、これに学習機能を与えて環境や自らの特性変化に適応できるような眼球運動制御モデルを構築し、その特性を検討する。とくに、解剖学的にも解明されてきた小脳片葉の実際の神経回路網 (biological neural network; BNN) の構造<sup>(1)</sup>に即して、生理的機能を十分に説明可能な人工神経回路網 (artificial neural network; ANN) について論ずる。

ところで、眼球運動の適応機能は小脳だけでなく、脳幹でも短期間の適応 (short-term adaptation) が行われている<sup>(6)-(10)</sup>。本論文では、この適応が前庭核で行われていると考え、これをも考慮した眼球運動制御モデルを構築し、その制御機能について論ずる。また、これらの人工神経回路網の学習アルゴリズムについても言及し、眼球運動の適応過程に

ついて検討する。

### 2. 眼球運動制御系のモデル

眼球運動は滑動性眼球運動，視機性反射，前庭動眼反射，衝動性眼球運動，輻輳性眼球運動に分類することができる。本論文では議論を単純化するために、単眼モデルを扱うので、輻輳性運動を考慮しない。また、衝動性眼球運動は比較的独立した運動なので、議論の焦点を絞るために、本論文では検討しない。

眼球を3自由度で回転運動をさせるために、内直筋・外直筋，上直筋・下直筋，上斜筋・下斜筋という3組の眼筋がある。各種の眼筋はそれぞれの制御経路をもつ。本論文では最も運動範囲の広い水平運動のみに注目するので、内直筋・外直筋の運動のみを考える。なお、両方とも基本的に同様の制御を受けているので、代表的に内直筋を考えその機能制御を一括して論じる。

なお、本論文では網膜からの信号により制御する眼球運動を視運動性眼球運動と呼び、滑動性眼球運動と視機性反射は視運動性眼球運動として統一した<sup>(5)</sup>。

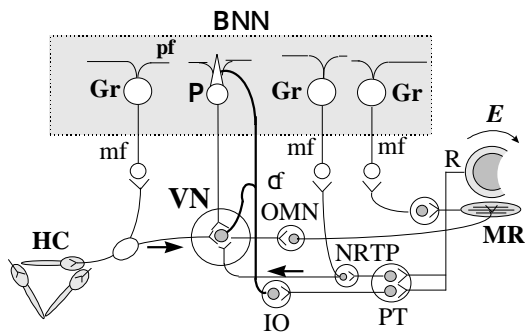


図1．眼球運動神経経路の概略

Fig.1 An outline of neural paths for eye movements.

**2.1 解剖学的眼球運動系の基本経路** 眼球運動のメカニズムを Fig.1 の模式図に従って、水平方向のみにおける眼球運動について概略説明する．同図中、眼球制御系の制御対象は眼球を動かす内直筋 (medial rectus; MR) であり、制御対象の出力は視軸の水平回転角  $E$  である．制御系の入力信号は水平半規管 (horizontal canal; HC) からの頭部の速度信号、及び、眼球の網膜 (retina; R) からの網膜誤差信号と視標の眼球に対する相対速度信号である<sup>(3)</sup>．半規管 (HC) からの信号の制御経路、すなわち、前庭動眼反射経路は半規管 (HC) 前庭核 (vestibular nucleus; VN) 動眼運動核 (oculomotor nucleus; OMN) 内直筋 (MR) という前向き経路、すなわち、フィードフォワード制御経路である．

網膜からの信号の制御経路、すなわち、滑動性眼球運動と視機性眼球運動の経路は網膜 (R) 視蓋前域 (pretectum; PT) 橋被蓋網様核 (nucleus reticularis tegmenti pontis; NRTP) 前庭核 VN 動眼運動核 OMN というフィードバック制御経路である．

以上の制御系にフィードバックループが存在するので、視標を追従するための最低限の機能を備えていると考えられる．しかし、眼筋など制御対象の生理的機能や環境などの変化があっても、適切な制御を維持するために、これらの変化に適応する機能が必要である．

**2.2 従来の研究から得られる眼球運動の学習経路**<sup>(2)(3)</sup> 眼球運動制御系の学習は小脳片葉で行っていると考えられており、実際に学習経路が存在することが知られている．従来の研究の知見をもとに、前庭動眼反射と視運動性運動の小脳を経由する学習経路を整理すると以下ようになる．

まず、前庭動眼反射の学習経路は、Fig.1 に示したように内耳の水平半規管 HC 苔状線維 (mossy fibers; mf) 小脳片葉 (flocculus; FL) の経路で生成される信号が前庭核 VN に加わる．また、視運動性眼球運動の場合も同じように、網膜 R 視蓋前域 PT 橋被蓋網様核 NRTP 苔状線維 mf 小脳片葉 FL という経路で生成される信号が前庭核 VN に加えられる．両運動とも苔状線維 mf から小脳片葉 FL に入る経路の信号の伝達量がプルキンエ細胞 (Purkinje's cell; Pc) で伝達量を調節されることによって学習が行われている．プルキンエ細胞の伝達量を制御するのは網膜誤差

信号であり、その経路は網膜 R 視蓋前域 PT 下オリブ核 (inferior olive; IO) を経由して、登上線維 (climbing fibers; cf) から前庭小脳に入る<sup>(1)(15)-(17)</sup>．

**2.3 眼筋の伸長受容器の信号伝達経路の役割** 眼球運動制御系に学習機能を付与するためには従来から用いられてきた神経経路のほかにも一つの経路が必要である．それは眼球の伸長受容器 (stretch receptor) からの眼球回転角 (すなわち、視軸の回転角) の信号を伝達する経路である．この経路も苔状線維 mf を通じて小脳片葉に入るものである<sup>(3)</sup>．その理由を以下に述べよう．

これまで、眼筋の伸長受容器からの信号は眼球運動にあまり影響を与えないと考えられており<sup>(3)</sup>、提案されてきた眼球運動モデル<sup>(2)(11)-(15)</sup> で用いられている信号は、半規管により検出した頭部速度信号と眼球の網膜から得られる網膜誤差信号のみであった．しかしながら、学習による適応的な制御を考える場合には、精確な制御入力を与えるために制御対象の逆システムを求めなければならない、それゆえ、制御対象の出力の情報が不可欠である．

視標が固定されている場合、この信号はなくても、学習するための条件を満足する．その理由は、出力信号である視軸の回転角が頭部位置と網膜誤差から求められることにある．したがって、眼筋の伸長受容器からの視軸の回転角信号がなくても学習を正確に行える<sup>(14)-(16)</sup>．

ところが、本論文のような視運動性眼球運動をも考慮する場合、視標は移動することがある．この場合制御系の出力信号である視軸の回転角は頭部位置と網膜誤差からは得られない．従って、学習制御には視軸の回転角信号を直接検出する他の経路が存在しなければならない<sup>†1</sup>．すなわち、本研究のような前庭動眼反射、視機性反射、滑動性眼球運動を含めた学習機能をもつ眼球運動モデルでは眼筋の伸長受容器からの信号経路が必要である．

**2.4 前庭核の学習機能** 登上線維は小脳片葉のみではなく、その分枝が前庭核にも連絡していることは周知の事実である<sup>(2)(3)</sup>．しかし、この登上線維の分枝の機能は未知である．ところで、神経細胞の性質から見て、同じ細胞から出発または分枝する軸索は他の神経細胞に対して、同じ機能をもつことが一般的である．また、最近の生理学的実験では、眼球運動の適応機能は小脳を通る経路のみではなく、脳幹でも短期間の適応経路の存在が確認されている<sup>(6)-(10)</sup>．

以上の理由から、本論文では登上線維が分枝し、前庭核に連絡する軸索も前庭核に適応性をもたせるための誤差信号を与えるものとする．具体的に、どのような生理学的なプロセスで学習しているかは、本論文の研究範囲を超えているので、検討しないことにするが、数学的にどのようなアルゴリズムで学習しているかの検討は可能である．

前庭核ではネットワークが存在しないとみなして、その学習は単純な信号伝達度の変化にとどまると考える．すなわち、前庭核での学習は単純でかつ線形的な適応性を示すのみである<sup>†1</sup>．また、生理学的実験事実から、この適応経

<sup>†1</sup> 前庭核では制御信号の伝達度のみ調節する．したがって、線形の制御対象

路の学習および忘却速度は、ともに小脳経由経路の学習に比べて遥かに速いと考えられる<sup>(6)</sup>。また、環境や生理の変化に対する非線形的学習や長期間にわたって保持する必要がある学習は小脳のニューラルネットワークで行われると著者らは考えている。

### 2.5 学習機能をもつ眼球運動制御系の数学モデル

前節に述べた生理学、解剖学的事実と著者らの仮説に基づいて、眼球運動の数学モデルを構成する。まず生理学的には、網膜からは二種類の信号の出力が考えられる。一つは網膜誤差信号であり、これが滑動性眼球運動の制御信号になる。もう一つの信号は眼球網膜が捉える

---

の場合でも逆システムを得られないので、精確な学習が行えない。しかし、眼球運動系の基本回路では制御対象の近似逆システムが最初から存在しているので<sup>(5)(13)</sup>、制御対象の機能が大きく変化しない限り、制御信号の伝達度のみの修正でも十分な効果を得られると考えられる。

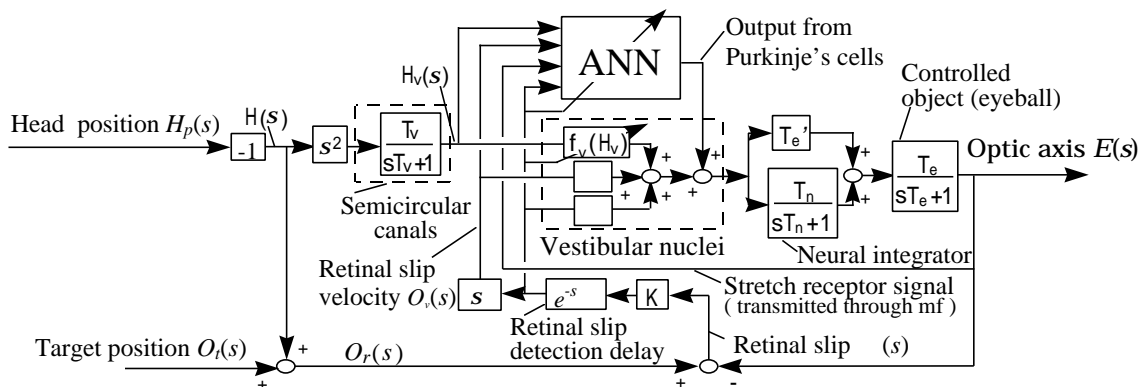


図2 眼球運動制御システムモデル

Fig.2 Block diagram of a control system of eye movements.

視標の眼球に対する相対速度信号であり、視機性反射の制御信号である<sup>(3)(5)</sup>。これらを考慮して、Fig.1 に示したように前庭動眼反射の基本経路の伝達関数を  $f_v(x)$ 、視運動性眼球運動の基本経路のゲインを  $T_v$ 、滑動性眼球運動の基本経路のゲインを  $T_n$  とする。

2.1 節で述べた制御経路の前庭核から動眼神経核までの間には不完全積分器と直達経路が存在する<sup>(12)</sup>。したがって、Fig.1 をもとに前庭反射系の制御モデルを Fig.2 のように構築することができる。 $H_p(s)$ は頭部の回転角度<sup>†2</sup>、 $O_r(s)$ は頸の中心軸に対する視標の回転角度、 $E(s)$ は視軸の位置（回転角度）である。頭部の回転角度  $H_p(s)$ 、視標の位置  $O_r(s)$ 、および視軸の位置  $E(s)$ によって決まる網膜誤差を  $O_r(s)$  で表す。前庭動眼反射の場合、頭部回転角度の符号を反転した値は視軸回転角度の目標値になるので、 $-H_p(s)$  ( $=H(s)$ ) をシステムの入力とする。また、 $K$  は環境変化係数とし、通常は1であり、2倍プリズムの装着時は2、そして逆転プリズムの場合は-1である。 $H_v(s)$ は水平半規管からの頭部回転速度の出力である。

### 3. 眼球運動系の学習アルゴリズム

#### 3.1 小脳神経回路網と ANN モデル

小脳皮質は哺乳類ではプルキンエ細胞、バスケット細胞、星状細胞、ゴルジ細胞、顆粒細胞などからなる。この部分の神経回路の構成は基本的に同じであると考えられる<sup>(2)(4)</sup>。これらのニューロンの関係を単純化して Fig.3 で示す。以下、この図に基づいて説明する。

まず、(1)小脳の求心線維、すなわち、入力経路には登上線維 (climbing fibers; cf) と苔状線維 (mossy fibers; mf) の2種類がある。(2)出力経路であるプルキンエ細胞 (Purkinje's cells; P) 1個に対し、1本の登上線維が単シナプスに結合し、興奮させる。(3)苔状線維 cf は顆粒細胞 (granule cells; Gr) で中継され、顆粒細胞 Gr の軸索が小脳皮質へ上行し、T字型に分岐して平衡線維 (parallel fibers; pf) になる。(4)平衡線維 pf はプルキンエ細胞 P、バスケット細胞 (basket cell; B)、星状細胞 (stellate cell; St)、ゴルジ細胞 (Golgi

cell; G)、と接続し興奮性の信号を送る。(5)バスケット細胞 B と星状細胞 St はプルキンエ細胞 P に接続し、これを抑制する。(6)ゴルジ細胞は顆粒

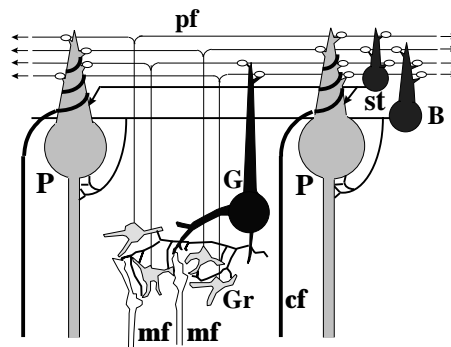
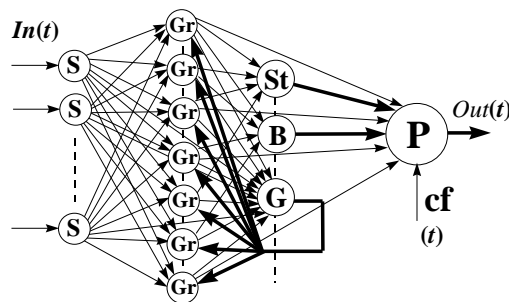
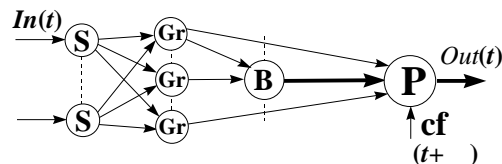


図3 小脳皮質の神経回路<sup>(2)(4)</sup>

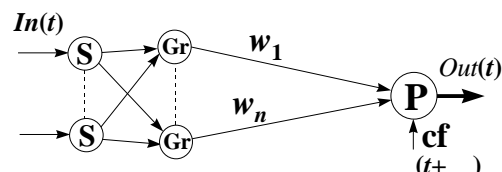
Fig.3 BNN of flocculus consisted of 6 kinds of neurons<sup>(2)(4)</sup>.



(a) 小脳の神経回路の数学モデル



(b) 図(a)のゴルジ細胞と星状細胞を? と B で等価的に置き換えた場合



(c) 興奮性と抑制性ニューロンを符号付き

†2 議論を簡単にするため、本論文では、頭部の運動は頸の中心軸回りの回転運動のみにする。

重み係数  $w$  で表した ANN モデル .

図4 . 小脳の ANN モデル

Fig.4 Neural network model of flocculus.

細胞と接続してこれを抑制する .

以上の記述に基づいて ,Fig.4(a)のようなニューラルネットワークを構成した .これは多入力1出力系であり ,苔状線維の起始細胞を  $S$  とした . 図中 ,バスケット細胞  $B$  ,星状細胞  $St$  とゴルジ細胞  $G$  を1個ずつ描いているが ,破線により同種の神経細胞が多数存在していることを示している .

星状細胞はバスケット細胞と類似の機能を果していると考えられるので一括してバスケット細胞として扱う .ゴルジ細胞  $G$  は入力信号の位相を調節していると考えられる<sup>(2)(17)</sup> .しかしながら ,ここでは議論を単純にするために ,眼球の画像信号の取り込みや信号伝達などの遅れを ,すなわち ,網膜誤差信号の遅れ を一定とする .この場合 ,時刻  $t$  の BNN の入力の制御誤差 ,すなわち網膜誤差信号は時刻  $t+$  で小脳片葉にフィードバックされる .それゆえ ,ANN ではゴルジ細胞を考慮せずに ,その代わりに学習アルゴリズムに時間遅れ要素を導入した .したがって ,Fig. 4(a)を同図(b)のように簡略化できる .

ニューロンは興奮性あるいは抑制性のどちらかの性質を示すので ,生体では正と負の入力を表すには ,興奮性と抑制性の2種のニューロンを対応させる .しかしながら ,実際の神経回路を数学モデルを用いて表す場合には ,プルキンエ細胞への入力信号に符号付き伝達係数  $w$  を導入し ,プルキンエ細胞に正と負の入力を与えるときみなすことができる Fig.4(b)は Fig.4(c)のように描き改めることができる .

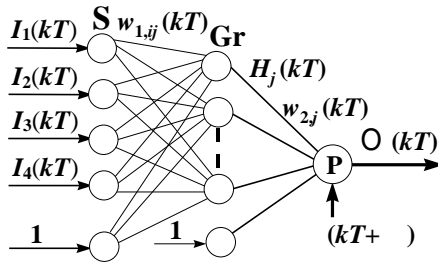


図5 . シミュレーションで用いた図4に基づく ANN モデル

Fig.5 A 4-input 1-output ANN based on the model of Fig.4.

Fig.2 で与えた ANN への入力は4つであるから ,Fig.4(c)を Fig.5 のような4入力1出力の3層 ANN に構成することができる .時刻  $kT$  の入力層の  $i$  番目のニューロンの入力を  $I_i(kT)$  , 中間層の  $j$  番目のニューロンの出力を  $H_j(kT)$  , ANN の出力を  $O(kT)$  とする . また ,時刻  $kT$  における入力層の  $i$  番目のニューロンから中間層の  $j$  番目のニューロンまでの重み係数を  $w_{1,ij}(kT)$  とし ,  $j$  番目のニューロンからプルキンエ細胞までの重み係数を  $w_{2,j}(kT)$  とする .ところで ,  $T$  を ANN の学習周期とすると時刻  $kT$  の制御誤差は 時間後に網膜誤差  $(kT+)$  として得られる .遅れ は前述のように ,ゴルジ細胞の役割を担うので ,  $(kT+)$  は時刻  $kT$  の ANN

の出力の制御誤差を表す .ただし ,この場合に  $T >$  を満足する必要がある .

したがって ,Fig.5 に示した ANN の入出力関係は次のようになる .

$$u_j(kT) = \sum_{i=1}^4 w_{1,ij}(kT) I_i(kT) \quad (1)$$

$$H_j(kT) = f_h(u_j(kT) - w_{1,5j}(kT)) \quad (2)$$

$$f_h(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

$$v(kT) = \sum_{j=1}^n w_{2,j}(kT) H_j(kT) \quad (4)$$

$$O(kT) = f_o(v(kT) - w_{2,n}(kT)) \quad (5)$$

$$f_o(x) = -\frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

ただし ,  $u_j(kT)$  は  $kT$  時刻の中間層の  $j$  番目の細胞の内部状態であり ,  $v(kT)$  は  $kT$  時刻の出力細胞の内部状態である .  $f_h(x)$  と  $f_o(x)$  はそれぞれ中間層ニューロンと出力ニューロンの伝達関数である .プルキンエ細胞は抑制性なので ,伝達関数  $f_o(x)$  は負の値とした .  $w_{1,5j}$  と  $w_{2,n}$  はそれぞれ中間層  $j$  番目ニューロンと出力ニューロンのしきい値を表す .学習は誤差逆伝播法<sup>(18)</sup>に従って ,下記の式を用いて重み係数を修正する方法によった .

$$d_o(kT) = e(kT + t) O(kT)[O(kT) - 1] \quad (7)$$

$$\Delta w_{2,j}(kT) = h d_o(kT) H_j(kT) + a \Delta w_{2,j}(kT - T) \quad (8)$$

$$w_{2,j}(kT + T) = w_{2,j}(kT) + \Delta w_{2,j}(kT) \quad (9)$$

$$d_j(kT) = d_o(kT) w_{2,j}(kT) H_j(kT)[1 - H_j(kT)] \quad (10)$$

$$\Delta w_{1,ij}(kT) = h d_j(kT) I_i(kT) + a \Delta w_{1,ij}(kT - T) \quad (11)$$

$$w_{1,ij}(kT + T) = w_{1,ij}(kT) + \Delta w_{1,ij}(kT) \quad (12)$$

ただし ,  $h$  は学習定数であり ,  $a$  は安定化定数である .

また ,従来の ANN 学習では ANN の出力と教示信号の誤差を用いて重み係数を修正する方法が一般的であるが ,本論文では BNN の実際の構造を尊重し ,網膜誤差信号を用いた .

**3.2 前庭核の学習のアルゴリズム** 前庭核にはネットワークが存在しないので ,複雑な学習は不可能であるが ,信号の伝達度を自己修正することが考えられる .すなわち ,登上線維からの網膜誤差信号を用いて Fig.2 の前庭動眼反射経路の伝達関数  $f_v(H_j)$  を修正することによって ,線形的な適応が可能であると考えられる .また ,視機性反射や滑

動性眼球運動ではフィードバック制御が行われるので、本論文ではそのゲインの学習を考慮しない。なお、以下の学習アルゴリズムは生理学的な根拠がなく、純数学的な手法で求めたものである。

まず、Fig.2 の前庭動眼反射の伝達関数  $f_v(H_v)$  を次のように与える。

$$f_v(x) = \frac{b}{1 - e^{-\mu x}} \quad (13)$$

ここでは  $b$  を定数とし、 $\mu$  は次式に従って修正する。

$$d_v(kT) = e(kT + t) f_v(H_v(kT)) [f_v(H_v(kT)) - 1] \quad (14)$$

$$m(kT + T) = fm(kT) + xd_v(kT) H_j(kT) \quad (15)$$

ただし、 $f$  は学習係数であり、 $(0 < f < 1)$  は忘却係数である。 $k$  は学習の繰り返し回数であり、 $T$  は学習の周期である。ANN の学習周期と同じように  $T > \tau$  が必要である。

#### 4. シミュレーションの結果とその検討

本シミュレーションではANNの学習係数  $f$  を0.02とし、安定化定数  $b$  を0.05とした。また、前庭核の学習係数  $\mu$  を0.05とし、忘却係数は0.98にした。中間層のユニット数は5つにした。Fig.2 の時定数  $T_v$ 、 $T_n$ 、 $T_e$  をそれぞれ16sec, 20sec, 0.2sec とした。シミュレーションの方法として、Fig.6 で示したように頭部が回転すると同時に視標も左右に正弦波の時間関数で運動するものとした。頭部が回転するときの速度を毎回同じとした。すなわち、同図の破線で示したように、時刻0~0.625 secの間は加速度  $80 \text{deg/sec}^2$  で加速し、0.625~3.125 secの間は一定速度に保ち、3.125~3.750 secの間は加速度  $-80 \text{deg/sec}^2$  で減速させ、3.750~5secの間で静止するものとした。視標の位置は同図の破線で示す正弦波  $O_a(t)$  で与えた。

初期状態では、ANN の各層の重み係数を乱数で与え、前庭核の伝達関数の係数  $\mu$  を1.5、 $b$  を0.3とした。また、視機性反射のゲインすなわち視標の速度フィードバックゲイン  $\mu$  を0.2とし、滑動性眼球運動のゲイン  $\mu$ 、すなわち網膜誤差のフィードバックゲインを0.01とした。

まず、

(1)前庭核での伝達関数の係数  $\mu$  を固定し、ANN のみで学習する。この場合の学習誤差曲線を Fig.7 に示す。Fig.7 は頭部が回転運動を一回行うときの眼球回転角の各サンプリング時刻における誤差の二乗和の軌跡である。Fig.7 の横軸は頭部の回転数である。眼球が視標を追跡する軌跡を Fig.8 で示す。破線は学習する前の視標の追跡軌跡であり、実線は頭部が200回回転した後の視標の追跡軌跡である。Fig.8 では実線が目標値、すなわち Fig.6 で示した頭部回転角と視標の和を表す曲線と完全に重なっている。このシミュレーション実験の結果より ANN のみの学習でも十分な制御精度を得られることがわかる。

(2)眼筋の伸長受容器から小脳に入る経路の必要性を示すために、本論文では ANN に入力する眼球の回転角度信号  $E$  の経路を切り、さらに、 $T_e' = 0.5 T_e$  に設定し学習を行

わせた場合のシミュレーション実験結果を Fig.9 に示す。 $T_e' = T_e$  に設定する理由は、眼球運動制御の神経回路で自然に存在する逆システム<sup>(5)(12)</sup>を崩すためである<sup>†3</sup>。この場合は ANN は制御対象の逆システムを自ら作らなければ学習は収束しない。同図の破線は回転角度信号  $E$  の経路を切断する前の学習誤差を示したものである。実線は回転角度信号  $E$  の経路を遮断した後、すなわち、眼筋の伸長受容器からの信号を利用できない場合の学習誤差である。実線で示した誤差は破線で示した誤差より大きく、振動的でしかも収束性に劣っている。したがって、眼球回転角の信号が不可欠であることがこのシミュレーションからも明らかである。

(3) ANN の前庭核への入力経路を切り、前庭核のみで学習を行う場合の誤差曲線を Fig.10 で示す。同図の実線は  $T_e' = T_e$  の場合の学習誤差曲線であり、破線は  $T_e' = 0.5 T_e$  の場合の学習誤差曲線である。同図からわかるように前庭核のみの学習では高速に収束するが最終的な制御精度が ANN より劣り、特に  $T_e' = T_e$  の場合、すなわち本来の制御系の逆システムが崩れた場合には、学習の特性がさらに悪化する。この理由は2.4節で述べたように前庭核では小脳のような神経網が存在しないので、単純でかつ線形的な適応性しか示せないからである。

(4) ANN と前庭核が同時に学習を行うとき、すなわち通常の学習を行う場合のシミュレーション結果を Fig.11 で示す。この場合、学習誤差は同図の実線で示したようになる。同図から ANN が単独で学習するときと同じように高い精

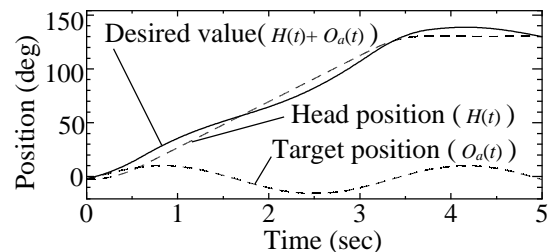


図6. 頭部位置と視標の位置から定まる制御対象(視軸)の目標値

Fig.6 Desired value given by the sum of positions of head and target.

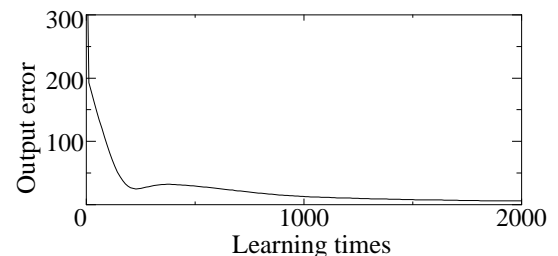


図7. ANN のみ学習する場合の学習誤差  $\sum^2(kT)$

Fig.7 Learning errors  $\sum^2(kT)$  in case of

†3 Fig.2 で示す神経積分器  $T_n / (sT_n + 1)$  と直達項  $T_e'$  が  $T_e' = T_e \ll T_n$  を満足する場合、 $T_n / (sT_n + 1) + T_e' = T_n(sT_e + 1) / (sT_n + 1)$  が成立する。このとき、制御対象の分母  $(sT_e + 1)$  を消去されるので、一種の逆システムの効果が得られる。

制御特性になる。

### 5. おわりに

本論文では眼球運動の解剖学・生理学的知見をもとにして、前庭動眼反射、視機性反射、滑動性眼球運動を統合的に記述できる適応機能を備えたモデルを提案した。

提案したモデルは、小脳片葉の解剖学的構造と生理学的機能に沿って構築した ANN モデルを含むものである。この ANN を用いたシミュレーション実験により、種々の眼球運動を説明し、モデルとその経路の妥当性を確認することができた。

また生理学的、解剖学的の事実をもとにして、従来の研究で解明できなかった眼筋の伸長受容器からの神経経路の役割と性質を制御工学の立場から論述した。すなわち、眼筋の伸長受容器から苔状線維を經由して小脳片葉に入る経路は、眼球運動制御の学習に不可欠であることを制御工学的に述べた。さらに、シミュレーション実験を用いてその必要性を確かめた。

なお、本論文では登上線維の分枝が前庭核に連絡する解剖学的事実から、脳幹の学習は前庭核で行われると考え、その学習機能のシステム全体の適応性に果たす役割を検討した。また、この前庭核のもつ適応性を実現するために、数学的な学習アルゴリズムを考案し、シミュレーション実験によりその妥当性を示した。

### 文 献

- (1) M. Ito, M. Sakurai, and P. Tongroach: Climbing fiber induced depression of both mossy fiber responsiveness and glutamate sensitivity of cerebellar Purkinje cells. *J. Physiol.* 324, 113-134 (1982).
- (2) 伊藤正男, 祖父江逸郎, 小松崎 篤, 廣瀬源二郎: “小脳の神経学”, 医学書院, 東京(1983)。
- (3) 小松崎篤, 篠田義一, 丸尾敏夫: “眼球運動の神経学”, 医学書院, 東京(1985)。
- (4) 塚原仲晃: “脳の情報処理”, 朝倉書店, 東京(1985)。
- (5) 若松秀俊・張曉林: 前庭動眼反射, 視機性反滑動性運動を統合した眼球運動制御モデル, 電気学会論文誌 C, (1997.11)。
- (6) TT. Khater, KJ. Quinn, J. Pena, JF. Baker, BW. Peterson: The latency of the cat vestibulo-ocular reflex before and after short- and long-term adaptation. *Experimental Brain Research.* 94(1):16-32, (1993).
- (7) SG. Lisberger: The neural basis for motor learning in the vestibular-ocular reflex in monkeys. *Trends Neurosci* 11:147-152, (1988).
- (8) SG. Lisberger: The neural basis for learning of simple motor skills. *Science* 242:728-735, (1988).
- (9) SG. Lisberger, Pavelko T: Brain stem neurons in modified pathways for motor learning in the primate vestibulo-ocular reflex. *Science* 242:771-773, (1988).
- (10) S. du Lac, SG. Lisberger: Eye movements and brainstem neuronal responses evoked by cerebellar and vestibular stimulation in chicks. *J Comp Physiol A.* 171(5):629-38, (1992)
- (11) D.A. Robinson: The system approach to the oculomotor system. *Vision Res.* 26(1), 91-99 (1986).
- (12) D.A. Robinson: Adaptive gain control of vestibuloocular reflex by the

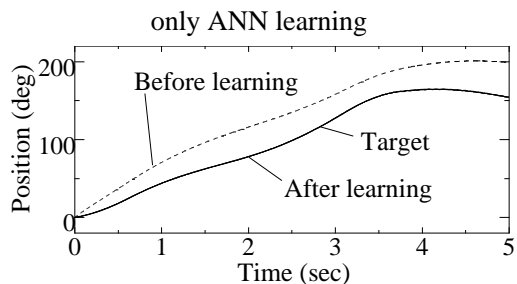


図8 学習前と学習後の視軸の軌跡  
Fig.8 Trajectory of the optic axis following up the target before and after learning.

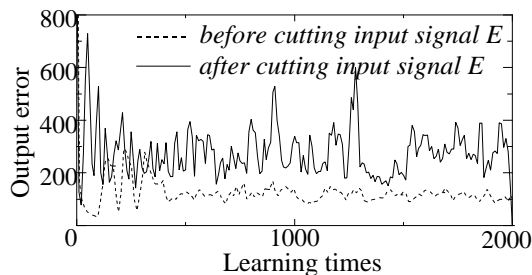


図9 伸長受容器から小脳への入力経路の遮断前後の学習誤差  
Fig.9 ANN learning errors  $\sigma^2(kT)$  before and after cutting off the stretch receptor signal E.

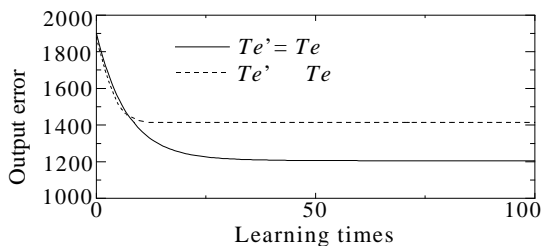


図10 前庭核のみで学習する場合の学習誤差  
Fig.10 Learning errors  $\sigma^2(kT)$  in case of only vestibular nuclei learning.

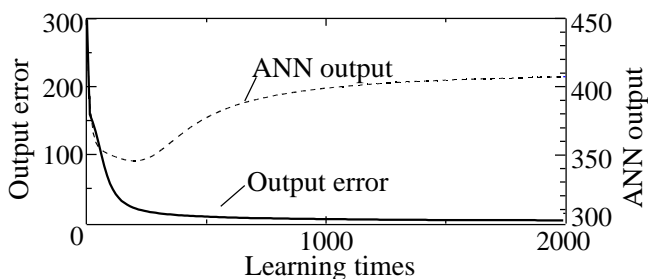


図11 小脳と前庭核が同時に学習する場合の学習誤差と小脳出力  
Fig.11 Learning errors  $\sigma^2(kT)$  and ANN output for ANN and vestibular nuclei learning model.  
度で学習でき、同時に学習速度は向上したことがわかる。さらに、同図の破線は毎回の頭部回転運動の各サンプリング時点の ANN の出力の和を表す。同図からわかるように、制御誤差が十分に小さい値になったにも拘わらず、ANN の出力が漸次増加していく。すなわち、長期間学習によって ANN の分担の比重が大きくなり、忘却しない安定した

cerebellum. *J. Neurophysiol.* 39(5), 954-968 (1976).

(13) S.C. Cannon & D.A. Robinson: Loss of the neural integrator of the oculomotor system from brain stem lesions in monkey. *J. Neurophysiol.* 57(5), 1383-1409 (1987).

(14) M. Kawato, H. Gomi: The cerebellum and VOR/OKR learning models. *Trends in Neurosciences.* 15(11):445-53(1992).

(15) H. Gomi, M. Kawato: Adaptive feedback control models of the vestibulocerebellum and spinocerebellum. *Biological Cybernetics.* 68(2), 105-14(1992).

(16) 川人光男: “脳の計算理論”, 産業図書, 東京(1996).

(17) K. Albus: A theory of cerebellar function. *Math Biosci.*, 10: 25-61, (1971).

(18) D. E., Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams: Learning Internal Representations by Back-Propagation Errors, *NATURE*, Vol.323, 533-536, Oct. (1986).

#### 著者紹介

張 曉林 (正員) 1985 年中国東北電力大学卒業 . 85 年上海電力建設局勤務. 横浜国立大学研究生を経て, 横浜国立大学大学院修士課程終了 . 89 年同大学工学部助手, 95 年同大学大学院博士課程終了 . 現在東京医科歯科大学医学部助手 (工学博士) .

若松秀俊 (正員) 昭和 47 年, 横浜国立大学大学院修士課程修了 . 同年, 東京医科歯科大学助手 . 足利工業大学助教授, 福井大学工学部教授を経て, 現在東京医科歯科大学医学部教授 . 昭和 48 年 - 昭和 50 年, ドイツ連邦共和国学術交流会 (D A A D) 給費により留学. Erlangen-Nürnberg 大学医学部客員研究員 . 平成 6 年オレゴン州立大学. 平成 7 年釜山国立大学, 平成 8 年天津大学など客員教授 (工学博士) .