

ニューラルネットワークを用いた制御法則の 自動選択による眼球運動模擬システム

正 員 若松 秀俊 (東京医科歯科大学)
非 員 桑野 彦 (富士通株式会社)
会 員 須田 治彦 (富士通株式会社)

HARDWARE CONTROL SYSTEM OF EYE MOVEMENTS BY AUTOMATIC SELECTION OF CONTROLLAWS USING NEURAL NETWORKS

Hidetoshi WAKAMATSU (Tokyo Medical and Dental University)
Moriaki KUWANO (Fukui Prefectural Office)
Haruhiko SUDA (Fujitsu Limited)

Abstract Eye movements are realized as an electromechanism by controlling its optic axis according to the movement types of an object using artificial neural network. In order to realize basic optic axis movements, by which a moving object can be caught in a central pit of retina, an oculomotor machine is developed for independent horizontal movements of a head and an eyeball. The image output from the CCD camera used as a function of eyeball is fed to the control of a servomotor instead of muscles of eyeball to realize eye movements. The mechanism of head rotation is linked through bearings to the neck of an oculomotor machine. An accelerometer is used for a function of semicircular ducts in order to predict possible displacement of a head rotation. The oculomotor machine is controlled for the realization of saccadic and smooth pursuit eye movements as autokinesis and compensatory eye movements as a reflex with improvement of their control performances and automatic selection of an appropriate control law according to the movement types of an object, applying structuralized neural network information processing system.

キーワード：眼球運動，視軸制御システム，ニューラルネットワーク

1. まえがき

生体の優れた視覚パターン認識能力は，視標と頭部の動きがあっても網膜の中心窩で視標を捉えることのできる視線調節運動によって支えられている．この調節運動は衝動性 (saccade)，滑動性 (smooth pursuit)，前庭動眼反射 (compensatory eye movement)，視運動性 (optokinetic eye movement)，輻輳性 (vergence) などの生理的眼球運動の組み合わせによるものと考えられている．⁽¹⁾ 生理学的事実の解明とともに，近年になって，制御工学的立場からこうした眼球運動が注目され，その制御機構とそこで行われている制御に関して，シミュレーションなどを用いた様々な研究がなされている．^{(2)，(3)}

本研究では，上記の生理的眼球運動のうち主要な運動である衝動性運動，滑動性運動，前庭動眼反射運動に着目して，これらの運動の工学的実現を試みる．そのために，まず基本的な眼球運動が実現できるような，単眼で水平方向の運動のみ可能な眼球運動機構を開発する．つぎに，外界の視標を与える視標運動装置とこの装置を組み合わせた視軸制御実験システムを構築して，これを複数のコンピュータで制御することによって，上記の眼球運動と視軸制御を模擬する．これらの基本的な運動と制御については，ニューラルネットワークを導入して構成した制御系によって，それぞれ独立に実現されている⁽⁷⁾．しかしながら，視標の動きと頭部の運動に応じて，この眼球運動機構に自律的で連携のとれた眼球運動を行わせる場合，その切り替えを含めて従来の制御方式の組合せだけの運動制御にはその性能に限界がある．そこで，眼球運動機構の制御系に構造化したニューラルネットワークを組み入れて，衝動性運動と滑動性運

動をより高い精度で実現するとともに，前庭動眼反射運動との連携動作を考慮した制御則の切り替えが可能な視軸の制御を試みる．

2. 視軸制御システムの概要

2.1 眼球運動機構と視標運動装置

ここでは，まず，基本的な生理的眼球運動が模擬できるような，単眼で水平方向の運動のみ可能な眼球運動機構を構築した．この機構の構成概略を図1に示す．本機構は頭部と頸部からなる．その頭部には CCDカメラを備え，眼球の撮像能力を模し，これより得られる出力画像データをもとにサーボモータでカメラの光軸を変え，眼筋の行うべき眼球運動の制御を行い，衝動性運動と滑動性運動が可能となるように設計した．また，前庭動眼反射運動を可能とするために，頭部に三半規官の機能を代替する加速度センサを取り付け，頸部にベアリングを用いて頭部全体を回転動作ができるような構造にした．これらのハードウェア機能を複数のコンピュータで制御することによって，上記の眼球運動を模した視軸制御を実現する．視標運動装置については，視標を黒色棒状とし，その認識を容易にするために，背景は白色とした．また，左右任意の速度で円運動（視標が光軸から一定のズレの範囲にあるなら，カメラからみて直線運動と見なせる）を可能とするような設計とした．この装置を前述の眼球運動機構と組み合わせると，図2に示すような視軸調節が可能な実験システムを構築した．

2.2 ハードウェア制御システム

眼球運動機構を駆動し視軸制御を行うシステムのハードウェア構成を図3に示す．このシステム

は頭部のカメラから出力された画像データを、コンピュータに取り込み2値化処理し、加速度センサの情報も含め、カメラが目的とする動作を行うようにサーボモータを駆動するものである。また、頭部全体も頸部ベアリングを介して、駆動用モータある。これらの回転動作を所望の動作に合致するように、第3節に述べる制御則により制御を行う。図3の右側、鎖線枠内のアクチュエータはパルス入力をトルクに変換し、眼球運動機構のカメラの光軸を回転させタにより回転の制御が可能である。

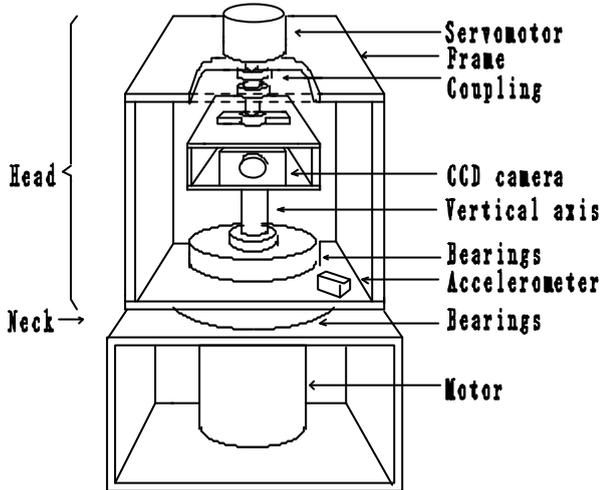


図1 眼球運動機構の概略図
Fig.1 Outline of an oculomotor machine.

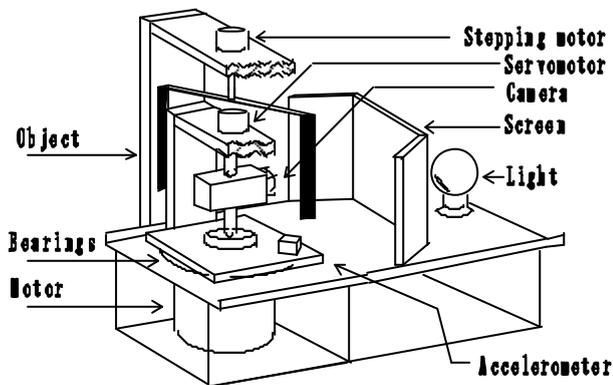


図2 視軸制御実験システム構成概略図
Fig.2 Experimental system for optic axis regulation.

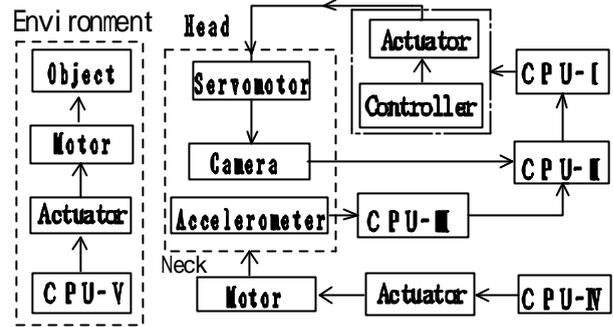


図3 ハードウェア制御システムの概略図
Fig.3 Block diagram of hardware control system.

これらの回転動作を所望の動作に合致するように、第3章に述べる制御則により制御を行う。図3の右側、鎖線枠内のアクチュエータはパルス入力をトルクに変換し、眼球運動機構のカメラの光軸を回転させるモータを駆動するものである。なお、コントローラは駆動トルクを発生させるためのパルス列を出力するパルス発生装置を内蔵したものである。この装置から得られるパルス列を

$$P=f(k(v), a(v), t(v)) \quad (1)$$

で表すものとする。ただし、 k はパルス数への変換定数、 a はサーボモータの加減速パターン、 t はパルス間隔を決める定数、 v は変位とする。パラメータ k, a, t は $k(v), a(v), t(v)$ のような v に依存する関数であり、これらの組み合わせがパルスの時系列の形式全体を表すものとした。すなわち、 $f(k(v), a(v), t(v))$ として、モータ駆動のためのパルス時系列の形式が定まる。なお、パラメータの $k(v), a(v), t(v)$ と制御器に加わる入力の補正項 P' が制御性能改善のためのニューラルネットワークによって学習的に変化する¹⁾。

3. 眼球運動機構の視軸制御

3.1 ニューラルネットワークを用いた眼球運動機構の視軸制御

本研究では、視線調節を行う眼球運動のうち、視標を見ようとして注視点を急速に変えるときに生ずる衝動性運動とゆっくりと移動する視標を追従するとき生ずる滑動性運動および内耳半規管への加速度入力刺激による頭部回転方向と逆方向への眼球運動をもたらす前庭動眼反射運動に着目する。そして、生理的にはそれらの運動が視標と頭部の運動形式にしたがって、連携した形で統一的に行われるものとする⁽¹⁾。

それぞれの独立した生理的な眼球運動の様式から、衝動性運動と前庭動眼反射運動はフィードフォワード制御、滑動性運動はフィードバック制御

*1パルス時系列の形式 $f(k(v), a(v), t(v))$ を図4、図5、図7、図9では便宜上、 $f(k, a, t, v)$ で表記した。なお、パラメータ $k(v), a(v), t(v)$ は学習後に付録1、2によって与えられる。

によるものと考えて、図2の実験装置を用いた眼球運動機構の視軸制御により、これらの眼球運動と同様の運動を工学的に実現し、一定の制御性能を得ることができる(4)、(5)、(6)。しかしながら、種々与えられた視標の移動角に対して、衝動性運動では好ましい視軸制御を常に行えるとは限らないし、滑動性運動の制御でも、視標の迅速な追跡が不可能である。同様に、前庭動眼反射運動についても、頭部に与えられた種々の加速度についてカメラの逆回転運動を常に満足できるように制御できるとは限らない。そこで本節では、より高い精度の視軸制御を行わせるために、図4に示すニューラルネットワーク(3)、(10)、(11)を併用した誤差逆伝播アルゴリズムによる学習制御を行う。ネットワークタイプは3層の階層型で、層間結合タイプは全結合型とする。なお、このニューラルネットワークは2つのパラメータ記憶部分を備えており、それぞれに関連する入力部が8ユニット、中間層が8ユニット、出力層が上下層合わせて8ユニットから成る。本眼球運動機構に対しては詳細な教師信号の作成が困難なので、ニューラルネットワーク単体ではなく、制御システムと組み合わせた形で以下のように学習制御を行う。まず、与えられた加減速パターンによる制御結果を自己評価して、以前に比べて良好であると判断すれば、これを記憶する。このとき、Memoryの記憶内容と比較してさらに良好ならば、Memoryの内容をMemoryに保持し、Memoryに新たにその結果を与えるパラメータを記憶し、これを教師信号としてニューラルネットワークの学習を行う。Memoryは種々学習した後のパラメータを記憶する部分である(付録3参照)。衝動性と滑動性運動の場合は、入力には画像データである。また、前庭動眼反射運動では頭部加速度データを入力としている。

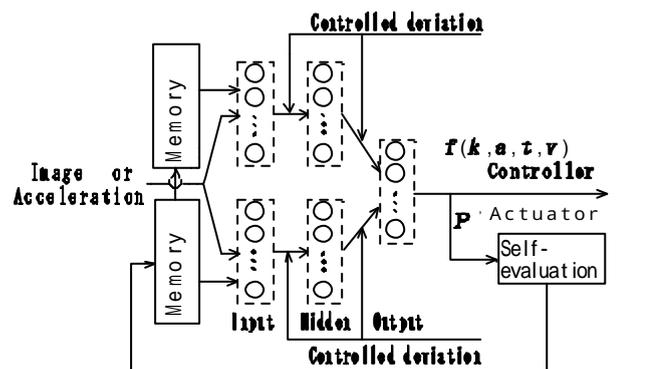


図4 制御系の性能改善のためのニューラルネットワーク

Fig.4 Neural network for improving control performance of each eye movement.

3.2 衝動性運動

図5は、衝動性運動の動作とニューラルネットワークを併用した制御系を示している。最初に点

線に位置した CCDカメラの光軸に対して、黒丸で示した所に視標の位置変化が急に生じた場合に、それを捉えるためにカメラの光軸を実線で描かれた位置まで急速に回転させる。このとき、一回の操作で位置偏差をなくすようにフィードフォワード制御を行う。したがって、制御動作中は画像の取り込みを行わない。入力したカメラからの2値化画像データを処理し、網膜誤差に相当する視標の中央と画面の中央との誤差がなくなるように位置制御を行う。実際には、静止状態の視標を種々の角度で急に变化させたときに、一回ごとに制御し、視標と光軸との位置偏差の絶対値をできるだけ小さくする。このとき、コントローラは視標の变化位置 θ_r を目標値とし、視軸の位置 θ_c をこれに到達させるために必要なパルス列を出力する。以下にアクチュエータに加えるべきパルス列を与える。

$$P_a = f(K_a, a(\theta_r), t(\theta_r)) \quad (2)$$

ただし、 K_a は一定で、 a, t が学習によって変化するパラメータである^{*1}。

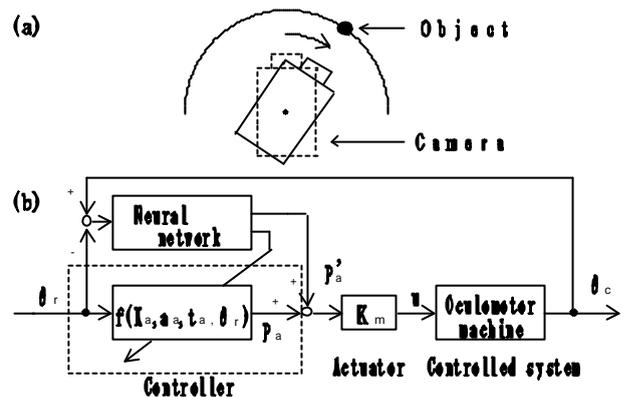


図5 衝動性運動の原理と制御系

Fig.5 Principle and control system of saccadic eye movement.

図6は視標の速度変化が23[deg/s]で、視標に1~15[deg]の位置偏差を与えたときに衝動性運動が起こるとして、カメラの光軸を制御した結果、得られた制御位置偏差である。同図からわかるように、視標とカメラの光軸との位置偏差は1[deg]以内となり、ほぼ正確に制御可能であることを確認できた。横軸は制御前に与えられた視標の位置偏差、縦軸は制御後の視軸と視標の移動角との位置偏差の絶対値を表す。学習制御により衝動性運動を模擬した結果、各々の回転角に応じて適当な加減速パターンを獲得し、制御を行うことが可能であっ

*1 図5に示した衝動性運動制御系の斜めの矢印はブロック内の小文字のパラメータ $t=t_a, a=a_a$ が学習によって変化することを示す。大文字のパラメータ $k=K_a$ は一定であることを示す。学習によるパラメータ変化と制御について付録3にその概略を述べている。以下、滑動性運動、前庭動眼反射運動についても同様に制御が行われる。

た．この加減速パターンを用いた結果¹⁾，学習なしの制御よりも，動作終了までの時間を5～10%短縮することができた．またカップリングによるサーボモータの回転終了後に起こる残留振動も減少した．しかし，制御後の位置偏差の絶対値に関しては，さほど改善が見られなかった⁽⁷⁾．

3.3 滑動性運動

図7に，滑動性運動の動作とニューラルネットワークを併用した制御系を示す．視標がある速度で1から2の位置に移動しているとき，カメラを

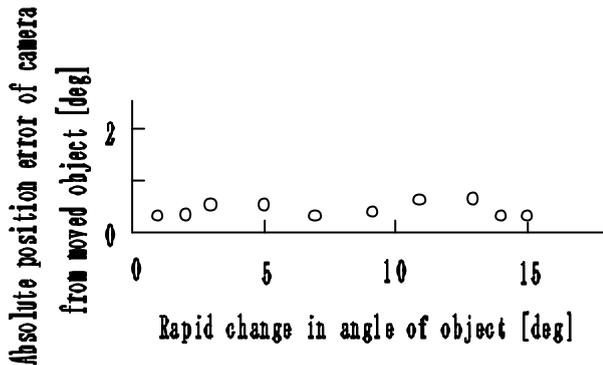


図6 衝動性運動の学習制御後の視軸と視標の絶対位置偏差
Fig.6 Absolute position error of optic axis from object according to control of saccadic eye movement.

視標の移動速度に合わせて回転させて視標に追従させるのがこの運動の特徴であり，この制御をフィードバック制御により行う．このために，動作中もサンプル時刻ごとに視標との速度偏差を測定し，回転速度を変化させて視標を追跡する．この運動時には，画像出力をもとに，視標の移動速度に合わせた制御を行う．すなわち，移動している視標の追跡の様子を視標とカメラの光軸の速度偏差で表し，できる限り短時間で偏差が収束するような制御を行う．そのためのコントローラは視標とカメラとの速度偏差を入力とし，PI制御動作に従ってパルス列を出力する．速度偏差を $e = v_o - v_c$ (v_o, v_c はそれぞれ，視標とカメラの速度を表す) とするとき，カメラの回転速度を決めるパルス間隔が t_b の値によって変化するパルス列 (K, A は一定) を

$$v_b = k_e e + k_i \int e dt \quad (3.1)$$

$$P_b = f(K_b, A, t_b, v) \quad (3.2)$$

で与え，これをアクチュエータに送る．この制御では，学習開始時にはカメラの光軸の回転が視標に対して遅れを伴っているが，視標の移動速度とカメラの回転速度を一致させるような学習が進むにつれて，制御開始からの速度偏差も減少し，視標を精度良く追跡可能になる^{(7), (8), (9)}．図8はニューラルネットワークが十分に学習を行った後の様

子で，学習前に比較して，速度偏差の最大値が 1/10 以下に改善されているだけでなく，迅速に視標を追跡できることを示している⁽⁷⁾．横軸は時間経過を表し，縦軸は制御後の視軸と視標の速度偏差を表す．

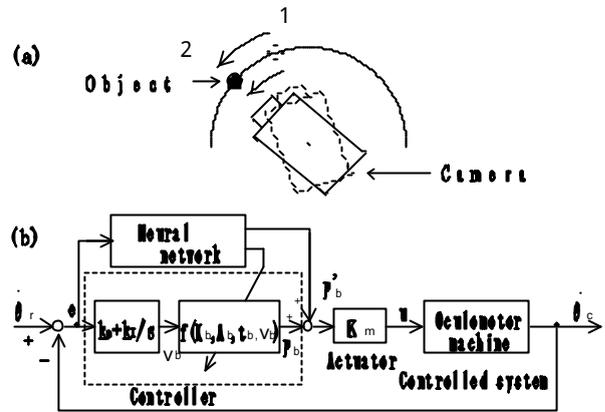


図7 滑動性運動の原理と制御系
Fig.7 Principle and control system of pursuit eye movement.

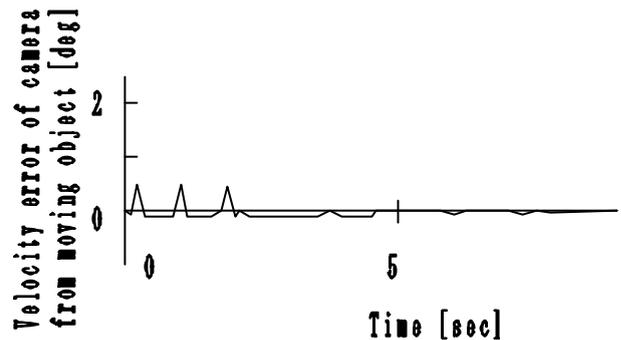


図8 滑動性運動の学習制御後の視軸と視標の速度偏差
Fig.8 Velocity error of optic axis from object according to control of pursuit eye movement.

3.4 前庭動眼反射運動

図9に，前庭動眼反射運動の動作とニューラルネットワークを併用した制御系を示す．フレーム(頭部)が1から2の位置に回転し加速度が生じた場合，加速度センサから得られたデータをもとに位置偏差を予測して，その分だけカメラの光軸を逆方向に回転させる．この場合に，加速度センサから得られたデータをサンプル時刻ごとに処理しながら，回転移動分を予測して，それに見合う分を頭部に逆方向の回転として繰り返し与える制御を行う．実際には，頭部が回転開始して静止するまでの回転角度を設定したときに，一回のフィードフォワード制御動作で，静止した視標とカメラの光軸との間の位置偏差をできるだけ小さくする．コントローラは，頭部の回転角加速度 $\ddot{\theta}$

*1 衝動性運動の制御では，サーボモータ駆動法は加減速パターンをスレーイングステップレートを超えない範囲で行わなければならないので，この範囲で適当と思われる三角状駆動を行う．学習後には四角状のなまった形になる⁽⁷⁾．

眼球運動模擬システム

から回転角を求め、パルス数が

$$P_c = f(k_n(\theta_c), A, T) \quad (4)$$

で算出されるパルス列を与える。ただし、 A, T は一定である。この場合に逆回転の与え方を含めた学習効果により、図10のような制御結果が得られた。頭部回転動作に関する情報の高速処理の制限にも拘らず、十分とはいえないまでも視標の位置をほぼ捕捉できた。横軸は静止した視標に対する頭部の最終的な回転角度を、縦軸は制御後の視軸と視標の位置偏差を表す。

4. 制御法則の自動切り替えによる運動制御

4.1 衝動性運動と滑動性運動の制御切り替え

第3節では、衝動性運動、滑動性運動、前庭動眼反射運動を独立したものとして取り扱ってきた。しかしながら、生体はこれらの運動を巧妙に組み

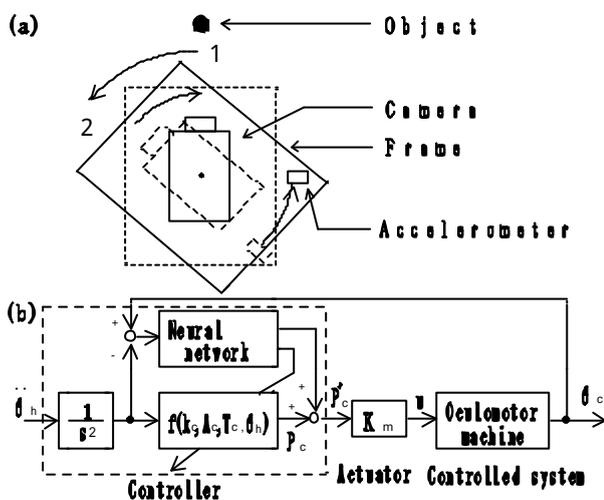


図9 前庭動眼反射運動の原理と制御系
Fig.9 Principle and control system of compensatory eye movement.

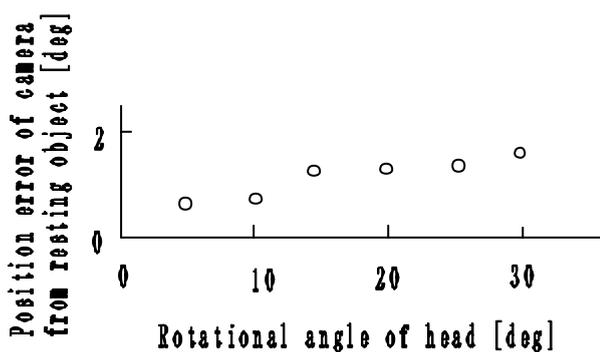


図10 前庭動眼反射運動の学習制御後の視軸と視標の位置偏差
Fig.10 Position error of optic axis from object according to control of compensatory eye movement.

合わせて視標を捉える能力を有している。以下では、これらの運動制御の相互間の切り替えが円滑に行われる統一的な眼球運動制御系が構成されるものと考え、これを模擬するシステムを構築する。

ところで、実際の随意運動でも注視点を変えるときに視標の速度が大きく、滑動性運動では追いつかない場合に、衝動性運動が誘発されると考えられているので、衝動性運動と滑動性運動の円滑な制御切り替えはかなり困難である。また、これに反射性運動が加わると制御の切り替えは一層困難になる(1)。以下では、前庭動眼反射を考慮した適応性のある制御則の切り替えを念頭に、ニューラルネットワークを用いた学習制御に基づく制御システムを構築し、衝動性運動と滑動性運動の切り替えを円滑に行い得る視軸制御システムの実現を考える。具体的には、これらの運動に対応するサーボモータの適当な加減速パターンを組み合わせを自動選択することによって視軸制御を行うシステムを構築するものである。

4.2 制御法則の選択のためのニューラルネットワーク

制御法則選択のために、複数のニューラルネットワークを結合して得られる図11に示すような構造化ニューラルネットワークモデルを考える。これは、前述したような、加減速パターン系列を発生する制御システムの機能を補助する3つのニューラルネットワークと衝動性運動と滑動性運動の切り替えを頭部加速度をパラメータとして実現するための図4に示したニューラルネットワークと同様の構造とアルゴリズムをもつニューラルネットワーク(入力層が8ユニット、中間層8ユニット、出力層2ユニット)を結合したものである。この構造化ニューラルネットワークを用いることにより、一連の加減速パターンの取り扱いが可能となり、円滑な制御切り替えも可能になる。すなわち、ニューラルネットワークで制御性能が改善された各制御系について、構造化ニューラルネットワークを用いて運動の統合が行われる。この場合に、前庭動眼反射の有無により、随意運動の判定基準が変わると考える。すなわち、加速度センサからの出力により、頭部の運動を検出しながらこれをもとにして変位を推測し、3.2,3.3節の制御機構により制御を開始する。加速度センサで加速度が検出されると予測回転角だけ偏るが、その情報が随意性眼球運動の判定機構に入り、どの随意性眼球運動を起こすのが適当かを判断する。それぞれの随意性運動は誤差逆伝播型のニューラルネットワークでの学習結果を制御器への補助入力とする前述の制御を受ける。

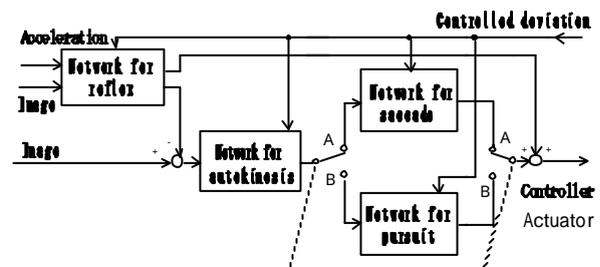


図11 構造化ニューラルネットワークの構成図
Fig.11 Structuralized neural network for selecting control laws for complex eye movements.

4.3 制御性能

視標の速度を 9[deg/s]から27[deg/s]に変化させたときに構造化ニューラルネットワークによって選択された制御法則にしたがって視軸制御を行った。図12は滑動性と衝動性の制御則が交互に自動的に切り替わったときに得られる視軸と視標の速度と位置を表したものである。図中、破線は視標の運動、実線は滑動性と衝動性運動を組み合わせた制御による視軸の運動を表している。鎖線は滑動性運動のみを制御の全過程で継続した場合の視軸の速度と位置を表したものである。この視軸制御では、運動する視標の速度変化によって引き起こされた視軸の視標からの位置偏差に応じて4回制御則が交替している。すなわち、視軸と視標の間の位置偏差が 9[deg]または視標の速度が22[deg/s]に到達したときに滑動性運動は衝動性運動に切り替わっており、追従後はもとの運動に戻っている。実線矢印は制御法則が滑動性から衝動性へ、破線矢印は衝動性から滑動性への切り替え点を示している。得られた結果は、眼球運動装置の質量と摩擦のために生理的眼球運動に比べて時間軸は長いが、基本的動作は生理的事実にほぼ合致するものである。

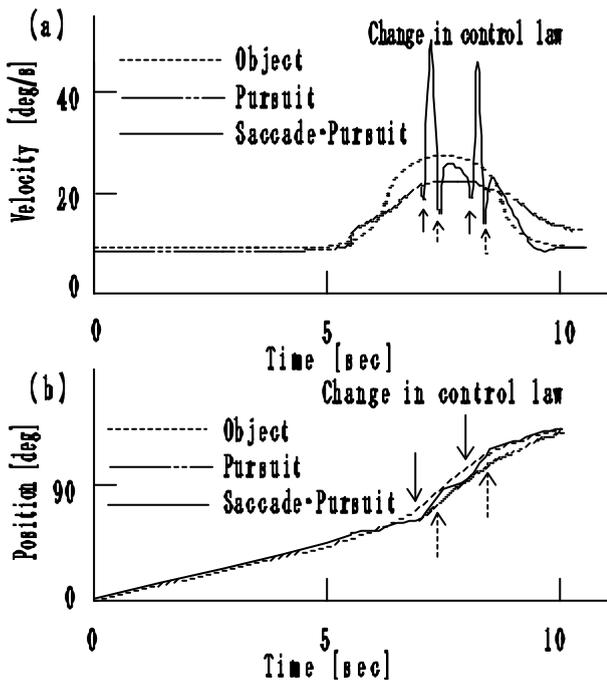


図12 制御法則の自動選択による衝動性運動と滑動性運動の連続切り替え
 Fig.12 Control performance of optic axis for velocity change of object by automatic selection of control laws.

5. あとがき

本研究では、眼球運動機構を開発し、視標の運動装置と併せて構成した視軸制御実験システムのなかで、視標と頭部の運動に依存した眼球運動機構の視軸制御を試みた。まず、衝動性運動と滑動性運動および前庭動眼反射運動を行わせるのための制御システムを各々独立に構成し、これらにニューラルネットワークを適用することによって、制御精度の向上をはかり、ほぼ生理的眼球運動に近い運動を実現することができた。つぎに、視標と頭部の動きに応じて、視軸制御を行わせる必要から、構造化ニューラルネットワークを用いた制御則の自動選択による眼球運動の統一的な制御を試みた。しかしながら、実際に制御を行った結果をみると制御の切り替えは、どのような場合でも適切に行えるとは限らず、制御精度に問題があることがわかった。前庭動眼反射を加えると一層困難になる。したがって、今後はニューラルネットワークの構造および制御アルゴリズムをさらに検討する必要がある。ところで、本研究では、CCDカメラの光軸の水平動作のみを扱ったが、水平方向と垂直方向に同時に回転が可能な眼球運動機構の開発と制御が不可欠であり、その開発を試みている(12)。

以上のように、実際の生理的眼球運動の工学的実現の道は未だ遠く、しかも任意の背景にある任意形状の視標の識別など検討すべき課題が山積している。本論文を終えるにあたって、有益なご助言を賜った福井大学電子工学科の岡崎耕三教授に心より感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 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).
- (2) 鷲沢輝芳: "サックード機構のための視覚神経回路網", 信学論, J73-D-4, pp.633-640 (1990).
- (3) 新庄広, 笠井健: "ニューラルネットワークによるサックード機構の学習", 信学技報, MBE pp.89-116(1990).
- (4) 須田治彦, 小島寛次, 若松秀俊: "眼球運動を基にした視線調節ロボットの試作", 平2北陸連大, pp.204(1990).
- (5) 須田治彦, 小島寛次, 若松秀俊: "随意性眼球運動を行う視線調節ロボットの制御", 平3電学全大, 13, pp.100 (1991).
- (6) 須田治彦, 桑野守晶, 若松秀俊, 小島寛次: "随意性眼球運動を基にした視線調節ロボットの学習制御", 平3北陸連大, pp.160 (1991).
- (7) 桑野守晶, 若松秀俊, 須田治彦: "ニューラルネットワークを用いた制御法則の自動選択による視軸制御システム", 信学技報, MBE pp.57-63(1992).
- (8) H.Wakamatsu, M.Kuwano and H.Suda: "Realization of physiological eye movements by automatic selection of control laws using artificial neural network", Proc. 3rd Int. Conf. Artif. Neural Net. pp.113-117 (1993).
- (9) 伊藤宏司, 伊藤正美: "生体とロボットにおける運動制御", 計測自動制御学会, 東京(1991).
- (10) 川人光男: "運動制御とニューラルネット", 信学誌, 73-7, pp.706-711(1990).
- (11) 北村新三, 片井修: "画像と制御", 朝倉書店, 東京 (1991).
- (12) 桑野守晶, 田楚真稔, 須田治彦, 若松秀俊: "随意性眼球運動が可能な三次元視線調節ロボットの試作", 平4電学全大, 13, pp.109(1992).
- (13) 真壁國昭: "ステッピング・モータの制御回路設計", CQ出版, 東京(1987).

付録 1 サーボモータの駆動パルス数の算出

使用したCCDカメラの視野は実測により、左右30[deg], 上下21[deg]の範囲であった。カメラ左右の最大視野角に160画素が対応するので、これより、1画素に対するカメラの視野角は30/160=0.187[deg]で与えられる。

