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)
非会員 桑野 守晶 (福井県庁)
非会員 須田 治彦 (富士通)

Hardware Control System of Eye Movements by Automatic Selection of Control Laws Using Neural Networks

Hidetoshi Wakamatsu, Member (Tokyo Medical and Dental University), Moriaki Kuwano, Non-member
(Fukui Prefectural Office), Haruhiko Suda, Non-member (Fujitsu Limited)

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 eyemovement 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とら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合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。次に、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、その切換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換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

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

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、頭部に三半規管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ずれの範囲にあるなら、カメラからみて直線運動とみなせる）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て、図2に示すような視軸調節可能な実験システムを構築した。

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.

〈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

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.

データを、コンピュータに取り込み二値化処理し、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、駆動用モータにより回転の制御が可能である。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

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

ただし、 k :パルス数への変換定数、 a :サーボモータの加減速パターン、 t :パルス間隔を決める定数、 v :変位

で表すものとする。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、これらの組合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 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に生ずる滑動性運動、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

*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。

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従って、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)~(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搬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

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.

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二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ユニットからなる。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 Iの記憶内容と比較して更に良好ならば、Memory Iの内容をMemory IIに保持し、Memory I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 II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。

〈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

図5 衝動性運動の原理と制御系
Fig. 5. Principle and control system of saccadic eye movement.

初に破線に位置した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、それをとら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、1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。従って、制御動作中は画像の取込みを行わない。入力したカメラからの二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変化させたときに、1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変化位置 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。

$$P_a = f(K_a, a_a(\theta_r), t_a(\theta_r)) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 K_a は一定で、 a_a, t_a が学習によって変化するパラメータである*2。

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

*2 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。

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.

御を行うことが可能であった。この加減速パターンを用いた結果^{*3}、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

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

る速度で1から2の位置に移動しているとき、カメラを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 $e = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_c$ ($\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_c$ 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_b, A_b は一定) を

$$v_b = k_p e + k_i \int e dt \dots\dots\dots (3 a)$$

$$P_b = f(K_b, A_b, t_b(v_b)) \dots\dots\dots (3 b)$$

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)~(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 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

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.

* 3 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ニングステップレートを越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。学習後は四角状のなまった形になる⁽⁷⁾。

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、1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 $\ddot{\theta}_h$ から回転角を求め、パルス数が

$$P_c = f(k_c(\theta_h), A_c, T_c) \dots\dots\dots (4)$$

で算出されるパルス列を与える。ただし、 A_c, T_c 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かかわらず、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。

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.

4. 制御法則の自動切換えによる運動制御

＜4・1＞ 衝動性運動と滑動性運動の制御切換え 前章では、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合わせて視標をとら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換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換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換えはいつそう困難になる⁽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換えを念頭に、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換えを円滑に行う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の組合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

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.

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三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換えを、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扱いが可能となり、円滑な制御切換えも可能になる。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搬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。

＜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従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変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

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換え
Fig.12. Control performance of optic axis for velocity change of object by automatic selection of control laws.

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換え点を示している。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。

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、制御精度の向上を図り、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。次に、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、制御の切換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

反射を加えるといっそう困難になる。従って、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更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まだ遠く、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、有益な御助言を賜った福井大学電子工学科 岡崎耕三教授に心より感謝の意を表します。

(平成 6 年 1 月 5 日受付, 同 6 年 5 月 16 日再受付)

文 献

- (1) 小松崎 篤・篠田義一・丸尾敏夫：眼球運動の神経学 (昭 60) 医学書院
- (2) 鷲沢輝芳：「サッケード機構のための視覚神経回路網」, 信学論, J73-D-II, 633 (平 2-4)
- (3) 新庄 広・笠井 健：「ニューラルネットワークによるサッケード機構の学習」, 信学技報, MBE, p. 89 (平 2)
- (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 電気学会北陸支部連大, p. 204
- (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 電気学会全大, 13, p. 100
- (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 電気学会北陸支部連大, p. 160
- (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, p. 57 (平 4)
- (8) H. Wakamatsu, M. Kuwano & H. Suda: "Realization of physiological eye movements by automatic selection of control laws using artificial neural network", Proc. 3rd Int. Conf. Artif. Neur. Net, p. 113 (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 (平 3) 計測自動制御学会
- (10) 川人光男：「運動制御とニューラルネット」, 信学誌, 73, 706 (平 2-7)
- (11) 北村新三・片井 修：画像と制御 (平 3) 朝倉書店
- (12) 桑野守晶・田埜真穂・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 電気学会全大, 13, p. 109
- (13) 真壁國昭：ステッピング・モータの制御回路設計 (昭 62) CQ 出版

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。 L を byte で表した画面内中央と視標の差とすると、サーボモータを駆動して、画面中央に視標を移動するために必要なパルス数 P_n はモータの回転分解能が 0.36 deg/pulse なので $P_n=0.187L/0.36$ である。

2. サーボモータの加減速パターン設定

眼球運動機構に、滑らかな加減速による制御を行う必要から、以下の方法でサーボモータに与えるパルス列を設定した。画像の誤差 ε より、必要なパルス数 P_s は k をパルス数への変換定数とすると、 $P_s = \varepsilon k$ で与えられる。次に、加減速時にサーボモータとカメラを支える上軸部を連結するカップリングにできるだけ負担をかけないように、加速時のパルス数を $P_{s\ up} = 0.6P_s$ 、減速時のパルス数を $P_{s\ down} = 0.4P_s$ とする。ここで、 β を加速度、 t をパルス間隔を決める定数、 g を指令パルス数 0 のときのステップレートとし、ステップレート f の直線加速の式を $f = \beta t + g$ で与える。ただし、

$$\beta = 2(f_s^2 - f_0^2) / \{[(2M-3)^2 + (f_s/f_0)^2 - 1]^{1/2} + (2M-3)\},$$
$$g = f_0 - \beta / (2f_0)$$

f_s : スルーイングのステップレート, f_0 : 起動時のステップレート, M : 起動時からのスルーイングのステップレートに達するまでのパルス数
これより、パルス間隔 Δt_m は m を出力パルスの順番とすると、

$f < f_s$ なら、

$$\Delta t_m = t_m - t_{m-1}$$
$$= 2 / \{[(g^2 + 2m\beta)^{1/2} + \{g^2 + 2(m-1)\beta\}^{1/2}]\}$$

$f > f_s$ なら、

$$\Delta t_m = 1/f_s$$

で与える⁽¹³⁾。

3. 衝動性運動制御について

視軸制御時に、モータの加速度が過大であると回転部の慣性モーメントのために構造上駆動力伝達機構にねじれが発生する。これを避けるために、視標とカメラの光軸との誤差の大きさを考慮して加減速パターンを最適にし、最短時間で誤差を修正できるようにする。このとき、一連の加減速パターンはタイムテーブルを用いて分割した軌跡を連結して与え、それを記述するパラメータは一定の評価基準を満たすように定める。パラメータの変更は勾配予測による多次元関数の極値探索法を用いる。実際の制御にあたっては、網膜誤差の画像データにより最初に与えられた制御則を用いて視軸を制御する。制御結果の評価が以前より高く良好であると判断した場合には、Memory I の記憶を Memory II に移し、新たに加減速パターンのパラメータ

を Memory I で記憶し、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。この教師信号が必ずしも最適とは限らないので、視軸制御を行いながら修正する。制御結果が良好でない場合には学習を行わず、前述の方法により加減速パターンを変更し、これをもとに制御と評価を行い、上記の操作を繰り返す。満足できる良好な加減速パターンのパラメータとニューラルネットワークの学習結果を獲得できたときに、網膜誤差の画像データは制御器とニューラルネットワーク部に入力され、ニューラルネットワークの出力と制御器からの出力の和が制御入力として用いられる。

若松 秀俊 (正員) 1972 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、福井大学教授を経て、現在、東京医科歯科大学医学部教授。1973～75 年ドイツ連邦共和国学術交流会 (DAAD) 給費により留学。Erlangen-Nürnberg 大学医学部客員研究員。工学博士。

桑野 守晶 (非会員) 1993 年 3 月福井大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、福井県庁勤務。電子情報通信学会会員。

須田 治彦 (非会員) 1992 年 3 月福井大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、富士通(株)勤務。電子情報通信学会会員。