

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

桑野 守晶^{*} 若松 秀俊^{**} 須田 治彦^{***}

^{*}福井大学工学部 〒910 福井市文京3-9-1

^{**}東京医科歯科大学医学部 〒113 東京都文京区湯島1-5-45

^{***}富士通株式会社 〒194 東京都町田市鶴間658-1

あらし

本研究はニューラルネットワークを用いて視線や頭部の動きに従って、視軸制御を伴う眼球運動をハードウェア的に実現するものである。まず、網膜中心高で移動視標を捉えるための基本的な運動を実現するために、頭部と眼球が独立に運動可能な眼球運動機構を構築する。眼球の撮像機能をCCDカメラで置き換え、これから得られる画像出力の処理結果を用いて、サーボモータを駆動し眼筋が行う眼球の運動の制御を行う。頭部回転機構は三半器官の機能としての加速度センサーを備え、頸部にベアリングを介して接続しており、頭部の回転位置の予測が可能である。この眼球運動機構に質の高い制御性能をもたらすように、ニューラルネットワーク情報処理システムを用いて学習効果を取り入れ、視標の運動形式と頭部の運動を自ら判断して、制御法則を自動的に選択し切り替えを行う。これによって随意運動の衝動性および滑動性眼球運動と、反射性運動の前庭性眼球運動を眼球運動機構によって実現する。なお、本眼球運動機構の制御によって得られる結果より、生理学的に未知の制御機構の有り得るべき姿とその機能を検討する。

和文キーワード 眼球運動, 視軸制御システム, ニューラルネットワーク

Control System of Optic Axis by Automatic Selection of Control Laws Using Neural Network

^{*}Moriaki KUWANO ^{**}Hidetoshi WAKAMATSU ^{***}Haruhiko SUDA

^{*}Faculty of Engineering, Fukui University, 3-9-1 Bunkyo Fukui, 910

^{**}Faculty of Medicine, Tokyo Med. Dent. University, 1-5-45 Yushima Bunkyo-ku Tokyo, 113

^{***}Fujitsu Limited, 658-1 Tsuruma Machida-shi Tokyo, 194

Abstract

This is a realization of eye movements in hardware with 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 movement as a reflex by automatic selection of an appropriate control law according to the movement types of an object, applying neural network information processing system. The experimental results from the control of an oculomotor machine suggests a physiological control mechanism of eye movements in an organism and its possible function.

英文 key words eye movement, control system of optic axis, neural network.

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。この視線調節運動は、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Saccade運動、Pursuit運動、前庭動眼反射運動に着目して、これらの運動をハードウェア的に実現することを試みる。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。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、眼筋による眼球位置の調節機能を実現する。つぎに、これを外界の視標運動装置と組み合わせて視軸の制御を行い、Saccade運動とPursuit運動を可能にする。また、前庭動眼反射運動を可能とするために、頭部に三半規管の代わりに加速度センサーを取り付け、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する。これらの機能を複数のコンピュータで制御することによって、連携した形で上記の眼球運動の実現をはかる。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限界がある。そこで、眼球運動機構にニューラルネットワークを用いて、Saccade運動とPursuit運動について、より高い精度の制御とそれらの切り替えを可能にし、また前庭動眼反射運動を含めた連携動作が可能な視軸制御の実現を試みる。なお、これらの眼球運動制御の試みを通して、生体中の眼球運動制御系の有り得るべき姿と機能の特徴把握

への手掛かりを探る。(4)-(7)

2. 眼球運動が可能な機構の開発

2.1 眼球運動の工学的解釈

本研究では、視線調節を行う眼球運動のうち、随意的に物を見ようとして注視点を急速に変えるときに生ずるSaccade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Pursuit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。ここで、生理的運動の形式からみて、Saccade運動はフィードフォワード制御、Pursuit運動はフィードバック制御、前庭動眼反射運動はフィードフォワード制御によるものとする。視標と頭部の運動形式にしたがって上記の制御が施され、これらの運動が実現されるものとする。そして、これらの運動制御の相互間の連携と円滑な制御の切り替えが行われて、統一的な制御系が構成されるものとする。

2.2 眼球運動機構の構造

まず、基本的な生理的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構築した。この機構の概略を図1に示す。本機構は頭部と頸部からなる。頭部の眼球の撮像機能をCCDカメラを用いて代行し、これから得られる出力画像データをもとに、サーボモータを駆動して眼筋の行う視軸制御を行い、

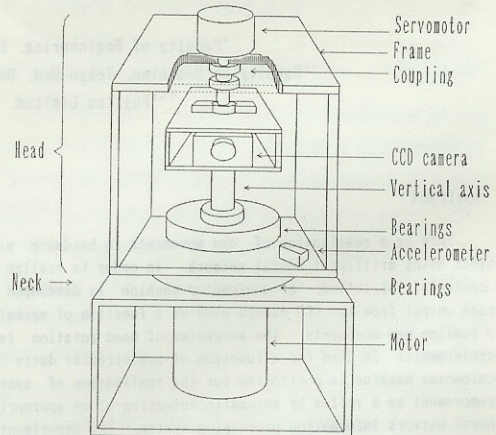


図1 眼球運動機構の概略図

Saccade運動, Pursuit運動を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実現するための加速度センサーを取り付け, 頭部にベアリングを用いて, 頭部全体が回転できるような構造を考えた. これらの機能を制御することによって, 眼球の視線調節運動を実現する. なお, CCDカメラを載せた頭部は, 軽量で回転運動に耐え得る強度とした.

2.3 視線調節システムの構成

視線調節装置については, その認識を容易にするために, 視標は黒色棒状とし, 背景は白色とした. また, 左右任意の速度で円運動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に示すような視線調節が可能なシステムを構築した.

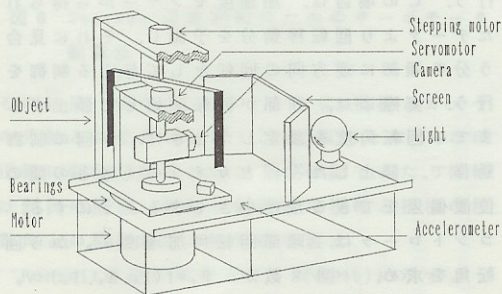


図2 視線調節システム構成概略図

この視線調節システムの中で眼球運動機構を制御する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, 加速度センサーの情報も含め, カ

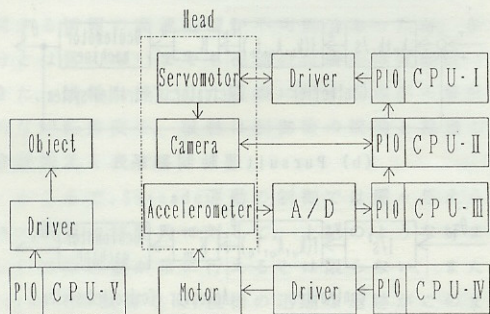


図3 制御システムの概略図

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. これらの動作を以下に述べる制御則により制御して視線調節を行った.

2.4 眼球運動機構による視軸制御動作の実現

製作した眼球運動機構を用いて, Saccade運動, Pursuit運動, 前庭動眼反射運動を工学的に実現するために図4に示す動作原理を考えた.

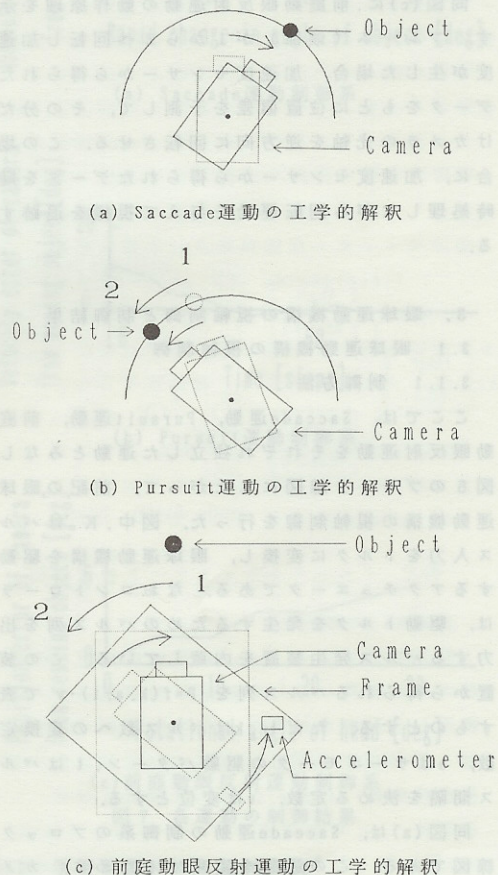


図4 視軸制御運動の工学的解釈

同図(a)は, Saccade運動の動作原理を示している. 最初に位置した CCDカメラ(点線)の光軸に対して, 視標が黒丸で示したところに急に位置変化が生じた場合に, それを捉えるため, 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。

同図(b)に、Pursuit運動の動作原理を示す。視標が1から2へある速度で移動しているとき、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、この動作の特徴である。したがって、その制御はフィードバック制御と考えるのが妥当である。このために、動作中も随時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。

同図(c)に、前庭動眼反射運動の動作原理を示す。フレーム(頭部)が1から2へ回転し加速度が生じた場合、加速度センサー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、加速度センサーから得られたデータを随時処理しながら回転運動を与えて視標を追跡する。

3. 眼球運動機構の視軸制御と制御結果

3.1 眼球運動機構の視軸制御

3.1.1 制御方法

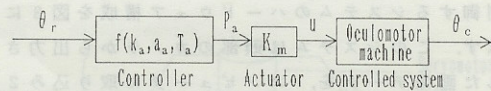
ここでは、Saccade運動、Pursuit運動、前庭動眼反射運動をそれぞれ独立した運動とみなし、図5のブロック線図にしたがって、前記の眼球運動機構の視軸制御を行った。図中、 K_m はパルス入力をトルクに変換し、眼球運動機構を駆動するアクチュエータである。なおコントローラは、駆動トルクを発生するためのパルス列を出力するパルス発生装置を内蔵している。この装置から得られるパルス列を $P=f(k, a, t) \cdot v$ で表すものとする。ただし、 k はパルス数への変換定数、 a はサーボモータの駆動パターン、 t はパルス間隔を決める定数、 v は変位とする。

同図(a)は、Saccade運動の制御系のブロック線図である。この運動を実現するために、カメラからの画像データを処理し、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変化させたときに、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、視標の変化位置 θ_r を目標値とし、これに到達させるために必要なパルス列を出力する。すなわち、アク

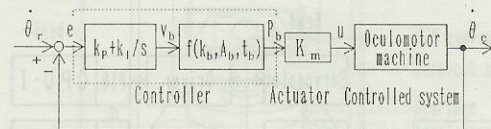
チュエータに加えるべきパルス列は、 $P_a=f(k_a, a_a, T_a) \cdot \theta_r$ (T_a は一定) で与えられる。

Pursuit運動については、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。このための制御系のブロック線図が同図(b)である。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 $e=\dot{\theta}_r-\dot{\theta}_c$ ($\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_c$ はそれぞれ、カメラと視標の速度を表す) とするとき、カメラの回転速度を与えるパルス間隔が、 t_b の値によって変化するパルス列 $P_b=f(k_b, A_b, t_b) \cdot v_b$ (A_b は一定、 $v_b=k_b \cdot e+k_i \int e dt$) で与え、これをアクチュエータに送る。

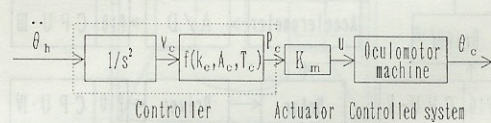
前庭動眼反射運動の制御は、同図(c)に従って行う。この場合は、加速度センサーから得られたデータより回転移動分を予測し、それに見合う分を頭部に逆方向の回転として与える制御を行う。実際には、頭部が回転開始して静止するまでの回転角度を設定したときに、一回の制御動作で、静止した視標とカメラの光軸との間の位置偏差をできるだけ小さくするようにする。コントローラは、頭部回転角加速度 $\ddot{\theta}_n$ から回転角を求め、パルス数が $P_c=f(k_c, A_c, T_c) \cdot v_c$ (A_c, T_c は一定、 $v_c=\int \int \ddot{\theta}_n dt dt$) で算出されるパルス列を与える。



(a) Saccade運動制御系



(b) Pursuit運動制御系



(c) 前庭動眼反射運動制御系

図5 視軸制御系のブロック線図

3.1.2 制御結果

Saccade運動の制御では、加減速パターンをサーボモータのスルーイ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った。例として視標の移動角が 14[deg]の場合について、カメラの視軸制御のためのサーボモータの加減速パターンを図6に示した。

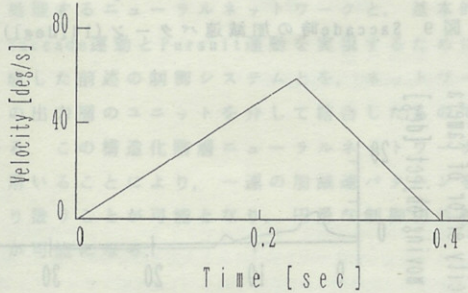


図6 Saccade運動制御のためのサーボモータ駆動法

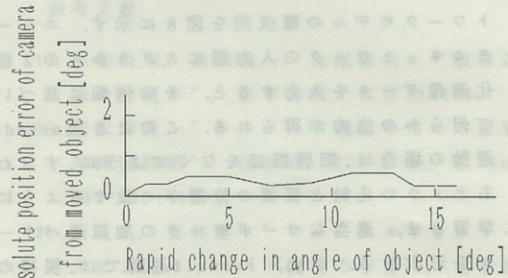
その結果、図7(a)に示すように、視標とカメラの光軸との位置偏差は1[deg]以内となり、ほぼ正確に制御可能であることが確認できた。横軸は制御の回数、縦軸は制御後の視軸と視標の移動角との位置偏差の絶対値を表す。

Pursuit運動の制御では、同図(b)に示すように、制御開始時にはカメラの光軸の回転が視標に対して遅れを生じているが、十分時間が経過すると速度偏差が減少し、視標を追跡することが可能であることを確認した。横軸は時間経過を表すステップ数、縦軸は制御後の視軸と視標の速度偏差を表す。

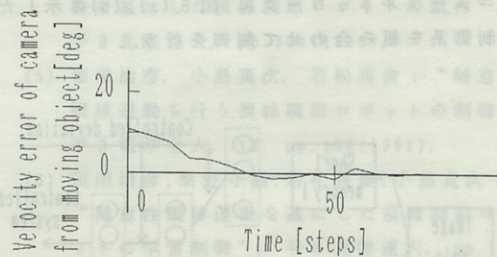
前庭動眼反射運動の制御については、同図(c)に示すような結果が得られた。頭部回転動作に関する情報の高速処理が不可能であったが、十分とは言えないまでも視標の位置をほぼ捕捉できた。横軸は静止した視標に対する頭部の最終的な回転角度を、縦軸は制御後の視軸と視標の位置偏差を表す。

ところで、Saccade運動の制御では種々与えられた視標の移動角に対して、上記のような好ましい眼球運動が常に行えるとは限らない。また、Pursuitの制御では、視標の迅速な追跡がこのままでは不可能である。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

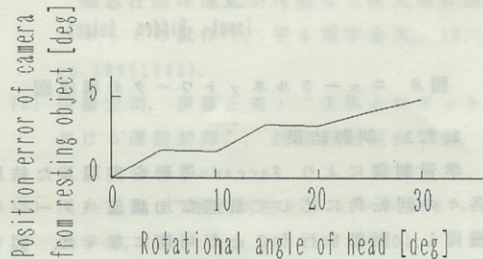
についてカメラの逆回転運動がすべて満足できるように制御できるとは限らない。そこで以下では、ニューラルネットワークを適用し、より高い精度の視軸制御を行うことを考えた。



(a) Saccade運動制御系



(b) Pursuit運動制御系



(c)前庭動眼反射運動制御系

図7 各運動の制御結果

3.2 学習制御による視軸制御

3.2.1 制御方法

3.1節で述べた制御法によって、Saccade運動、Pursuit運動ともに、一定程度の制御性能を得ることができた。本節では、より良い視線調節を行わせるために、ニューラルネットワークを適用した学習制御を行う。ここで用いる学習アルゴリズムはバックプロパゲーションとし、ネットワークタイプは階層型、階層数は3層、層間

結合タイプは全結合型とする。前述の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、前述の制御システムと合体した形で学習制御を行う。(8)(9)ここで用いた階層型ニューラルネットワークモデルの構成図を図8に示す。ニューラルネットワークの入力層にカメラからの2値化画像データを入力すると、その情報に基づいて何らかの出力が得られる。このとき、Saccade運動の場合は、網膜誤差をなくすように、すなわちカメラの光軸と視標の位置が一致するように学習させ、適当なサーボモータの加減速パターンを形成する。また、Pursuit運動では、視標の移動速度とカメラの回転速度が一致するように学習させる。(10)なお、実際には図8に示したニューラルネットワークに図5(a),(b)に示した制御系を組み合わせる制御を行う。

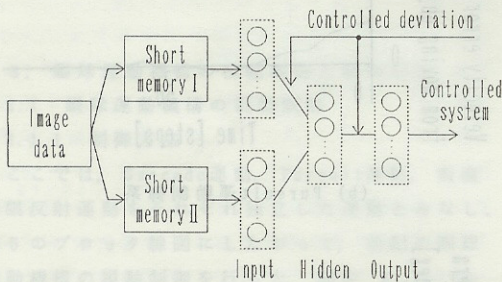


図8 ニューラルネットワークの構成図

3.2.2 制御結果

学習制御により Saccade運動を実現した結果、各々の回転角に応じて最適な加減速パターンを獲得し、制御を行うことが可能になった。図9に一例として、学習回数を1200回としたときの視標移動角 14[deg]に対する加減速パターンを示した。この加減速パターンを用いた結果、3.1節で行った制御よりも、動作終了まで時間を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、図7(a)で行った制御結果とほぼ同一のものとなった。Pursuit運動においては、図10に示すように、ニューラルネットワークが十分に学習を行った後では速度偏差も少なく、迅速に視標を追跡できることを確認した。

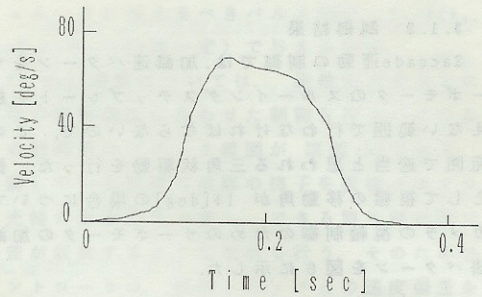
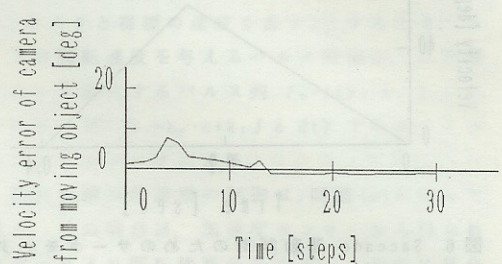
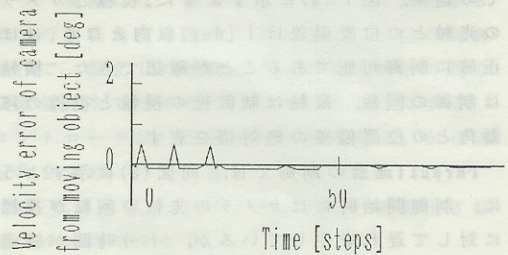


図9 Saccade時の加減速パターン(14[deg])



(a) 学習中の制御結果



(b) 学習後の制御結果

図10 Pursuit運動の制御結果

4. 制御法則の自動切り替えによる運動制御

第3節では、Saccade運動、Pursuit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複雑に組み合わせて視標を捉える能力を有している。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、Pursuit運動では追いつかない場合に、Saccade運動が誘発されると考えられているので、(11) Saccade運動とPursuit運動の微妙な制御切り替えはかなり困難である。また、これに反射運動が加わると制御の切り替えは一層困難になる。以下では、ニューラルネットワークを用いた学習制御によ

って制御モデルを構築し、その切り替えを含めて円滑な視軸制御の実現を考える。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てより視軸制御を行うものである。そのために、複数の階層型ニューラルネットワークをさらに階層的に結合して得られる構造化階層ニューラルネットワークモデルを考える。これは、加減速パターン系列を処理するニューラルネットワークと、基本的なSaccade運動とPursuit運動を実現するために構成した前述の制御システムとを、ネットワークの出力層のユニットを介して結合したものである。この構造化階層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を取り扱うことが可能となり、円滑な制御切り替えが可能になる。

5. むすび

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線調節システムのなかで、視標と頭部の運動に依存した眼球運動機構の視軸制御システムの開発を試みた。まず、Saccade運動とPursuit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た。その結果、ほぼ生理的眼球運動に近いSaccade運動とPursuit運動を実現することができた。また、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、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、どのような場合にでも適切に行えるとは限らず、種々問題があることがわかった。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。また本研究では、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る。したがって、実際の生理的眼球運動の実現には未だほど遠く、しかも任意の背景と任意の形状の視標の識別など検討すべき課題も山積している。

なお、本論文を終えるにあたって、日頃ご厚誼を賜っている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) 鷺沢輝芳: “サッケード機構のための視覚神経回路網”, 信学論, J73-D-II, 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ケード機構の学習”, 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, 田埜真稔, 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).
- (8) 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).
- (9) 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).
- (10) 北村新三, 片井修: “画像と制御”, 朝倉書店, 東京(1991).