

前庭動眼反射運動の学習モデル

若松秀俊 張 曉林
東京医科歯科大学 医学部

Learning model of compensatory eye movement
Hidetoshi WAKAMATSU, Xiaolin ZHANG
Faculty of Medicine, Tokyo Medical and Dental University

1. はじめに 網膜の中心窩に視標の像を結ぶように、頭部回転の逆方向に眼球がスムーズに動く。このような前庭動眼反射運動には環境や生体機能の変化に適応していく学習機能が生理学的・解剖学的に確認されている。しかし、これまで解剖的事実と合致する前庭動眼反射の適応性のあるモデルが提案されておらず、またその機序も十分に把握されていない。

本研究では解剖学的知見をできるだけ尊重し、生理的事実と一致する前庭動眼反射の学習モデルを提案し、その学習システムの収束条件を求める。本モデルの有効性を確かめるために、拡大プリズムと逆転プリズムを装着したときの前庭動眼反射運動の適応過程をシミュレーション実験した。

2. 反射性眼球運動のメカニズム 本研究では生理的眼球運動のうち、前庭動眼反射運動のみに着目し、その運動機能を考察する。そのために必要とする最も単純化した解剖学的経路を図1に示す。

前庭動眼反射の水平方向における反射経路は、水平半規管(HC) 前庭核(VN) 動眼神経核(OMN)という前向き経路である。これに対して、制御経路は水平半規管(HC) 苔状線維(mf) 小脳片葉(FL)であり、この経路で生成される信号が前庭核(VN)に加わる。この際、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により学習的に調節される。この伝達量を制御する視覚信号、すなわち網膜誤差信号は、網膜R 視蓋前域(PT) 下オリブ核(IO) の後帽を經由して、登上線維(cf)から小脳片葉(FL)に入る。また、眼球の伸張受容器からの信号も苔状線維(mf)を通して小脳片葉に入る。

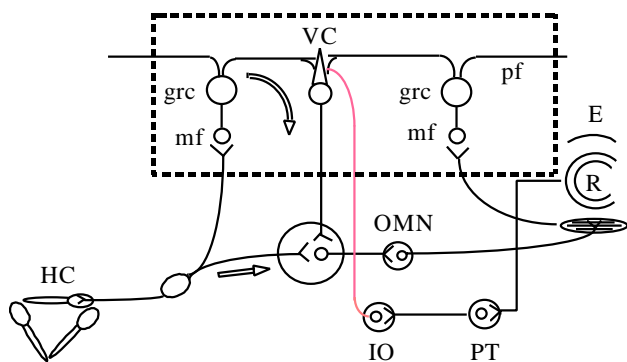


図1 前庭動眼反射経路の概略

3. 前庭動眼反射の学習モデル 本研究では D.A. Robinson によって提案された前庭動眼反射モデルとその後の新しい解剖学的知見を取り入れて、学習モデルを構築する。

水平半規管からの信号の前向きおよび制御経路のそれぞれのゲインを図1に示したように、 およびとおく。

このとき前庭動眼反射のゲイン $G_h(t)$ は、

$$G_h(t) = - \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{sT_v + 1} \right) e(s)$$

と表される。ただし、 K_m は定数であり、 $e(s)$ は変数である。また、網膜誤差は頭部の回転角度と視標の移動位置によって決まるものなので、この反射系の学習システムは図2のように構築することができる。

図2で $E_h(s)$ は頭部の回転角度、 $E_o(s)$ は頸の中心軸に対する視標の回転角度、 $E_{hv}(s)$ は水平半規管の出力、 $E(s)$ は眼球の回転角度、 $e(s)$ は網膜誤差の出力である。また、 K_m 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であり、逆転プリズムの場合は-1である。

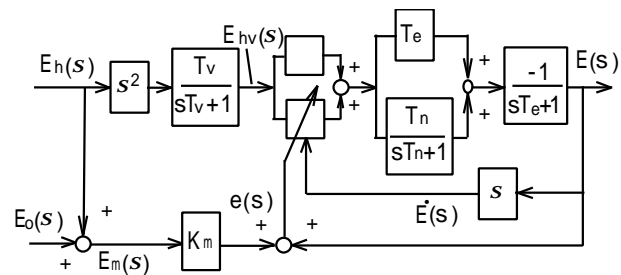


図2 前庭動眼反射の学習モデル

生理学的実験では積分器の時定数 T_v, T_n は約15secであり、前庭動眼反射による眼振を起こす前の眼球の運動時間より十分大きいので、 T_v, T_n は無限大として考えることができる。 $E_o(s) = 0$ の場合、の適切な修正則は次式で与えることができる。

$$N \mathbf{b} = N-1 \mathbf{b} + K \frac{\int_0^T e(t) dt \int_0^{N-1} \dot{E}_h(t) dt}{\int_0^T E(t) dt \int_0^{N-1} \dot{E}(t) dt} \quad (1)$$

ただし、 K は学習係数、 N は前庭動眼反射の学習の繰り返し回数であり、 T は第 $N-1$ 回目の反射運動の開始時刻から網膜誤差信号が消失する時点(すなわち、眼振を開始する時点)、あるいは頭部回転が停止する時点までの経過時間である。また、網膜誤差は

$$\int_0^T e(t) dt = (k_m - \mathbf{a}^{-N} \mathbf{b}) \int_0^T E_h(t) dt \quad (2)$$

なので、(1)、(2)式から

$$\frac{\int_0^T e(t) dt}{\int_0^T E_h(t) dt} = \left(1 - \frac{K}{(\mathbf{a} + N-1 \mathbf{b})^2} \right) \frac{\int_0^T e(t) dt}{\int_0^T E_h(t) dt} \quad (3)$$

が得られる。ここで、 K の値が十分小さい場合には学習が収束する。本モデルを用いて、拡大プリズムと逆転プリズムを装着したときの前庭動眼反射運動の適応過程をシミュレーション実験したところ所望の結果が得られた。

4. おわりに 本研究では生理的・解剖的事実をもとに前庭動眼反射の学習モデルを提案し、前庭動眼反射のシミュレーションを行った。その結果、この反射運動における適応現象を統一的に説明することができた。今後は視機能性反射運動を考慮した眼球反射運動、さらに随意性運動である滑動性および衝動性眼球運動を含めた運動を検討する予定である。

参考文献

若松・張：反射性眼球運動の適応メカニズム。計測自動制御学会，第10回生体・生理工学シンポジウム論文集，405-408 (1995)。