

眼球運動制御神経系のモデルと それに基づく視軸制御システム

東京医科歯科大学医学研究科
生体機能支援システム教授
若松秀俊

なぜ眼球運動モデルか？

- ◆ 理論生物・医学
眼球運動の統一的記述
運動特性より眼科神経性疾患の推定
- ◆ 工学システムとしての眼
人と同様の動きをする眼球と注視

眼 球 運 動

運動の統一

- 1 . 衝動性
- 2 . 滑動性
- 3 . 視機性反射
- 4 . 前庭動眼反射

共役性
+
輻輳性

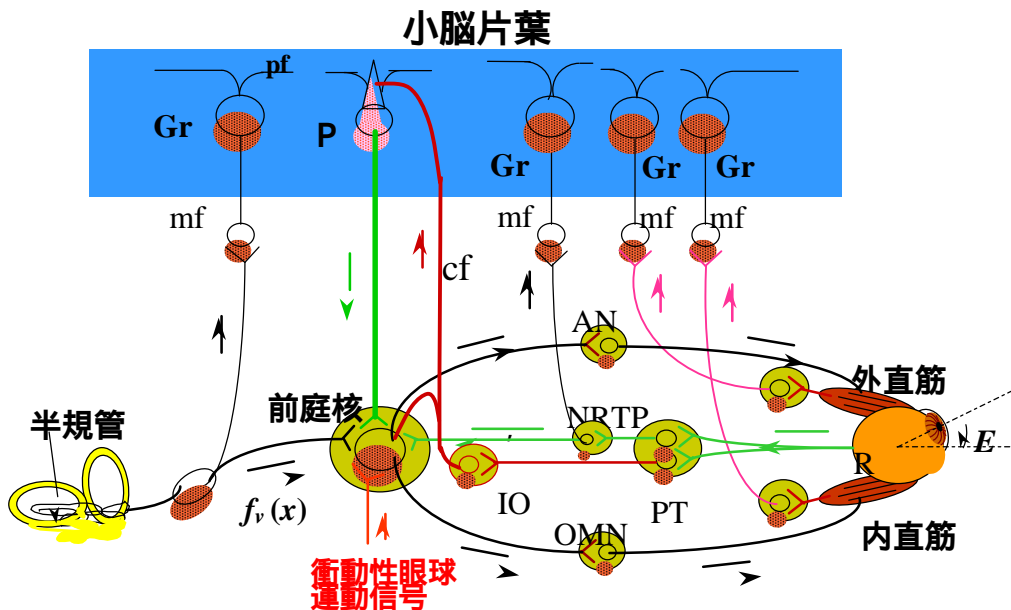
両眼運動システムの特徴

- ◆ 頭部運動の補償機能
(頭が振れても,画像がブレない)
- ◆ 複数学習システムの統合
(眼球運動システムの高速度・高精度適応の原理)
- ◆ 両眼からの視覚信号による制御
(片目を閉じても他方の眼球に連動する)
- ◆ 共役運動特性
(単一の視標のみ注視する特性)

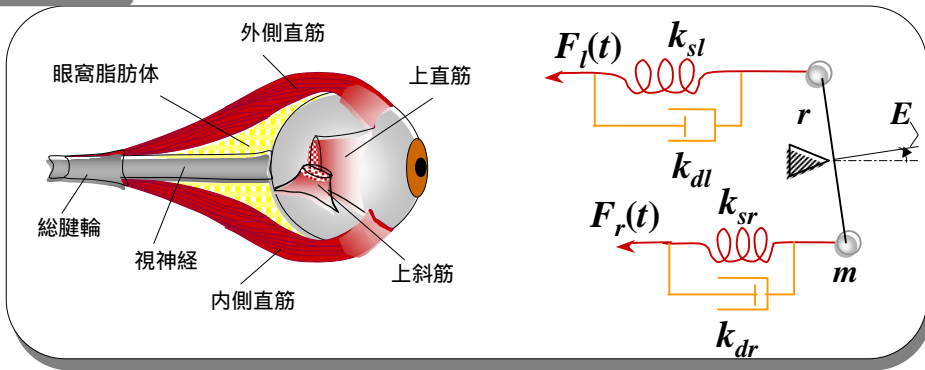
単眼モデルの運動

- ・ 前庭信号と視覚信号の協調制御
- ・ 動特性と周波数特性について

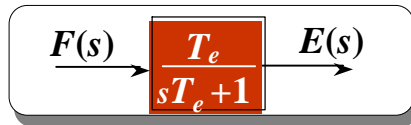
単眼神経経路



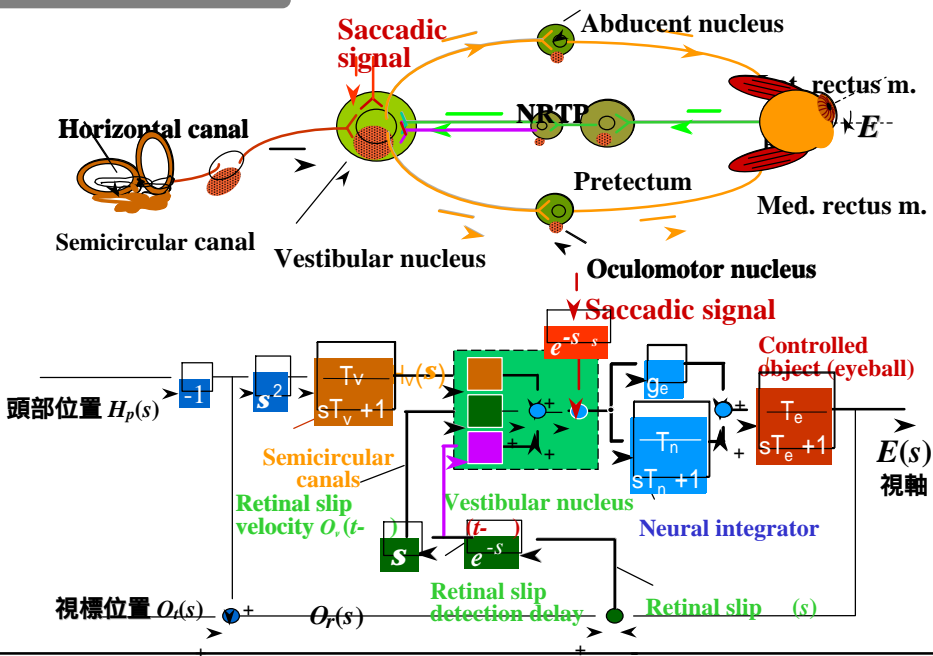
眼筋モデル



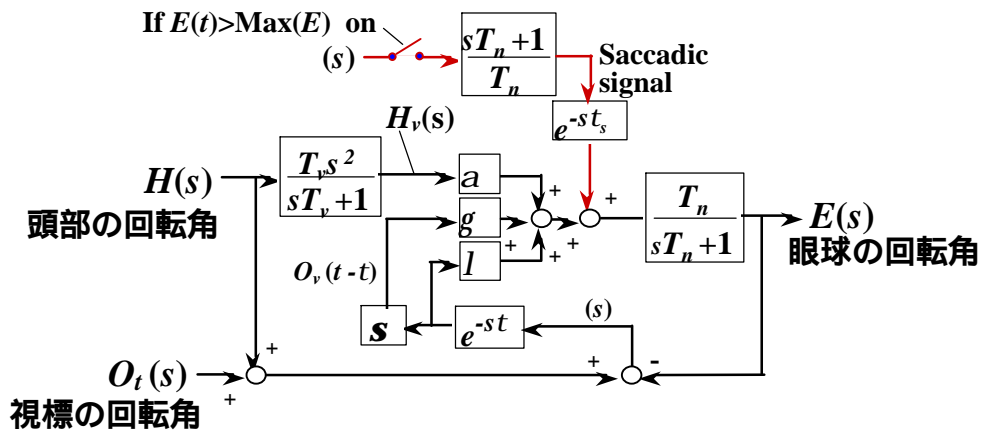
$$E(s) = \frac{F_l(s) - F_r(s)}{2mr s^2 + (k_{dl} + k_{dr})r s + (k_{sl} + k_{sr})r}$$



単眼モデルの構成



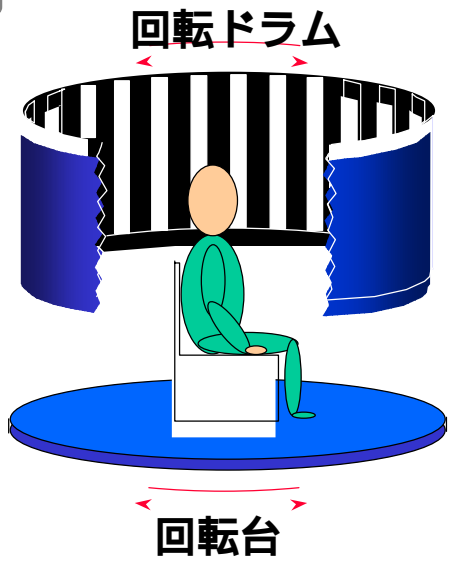
簡略化した単眼モデル



$$E(s) = \frac{T_n}{(T_n s + 1)} \frac{\dot{e} a}{\ddot{e}} \frac{T_v s^2}{T_v s + 1} H(s) + (g s + 1) e^{-s t} e(s) \ddot{u}$$

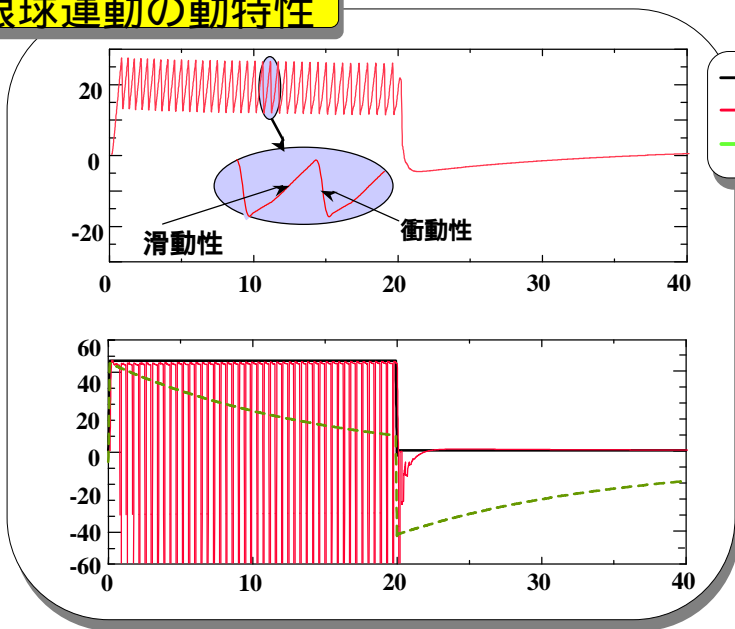
小脳を除く

生理学実験法



想定した実験の様子

眼球運動の動特性

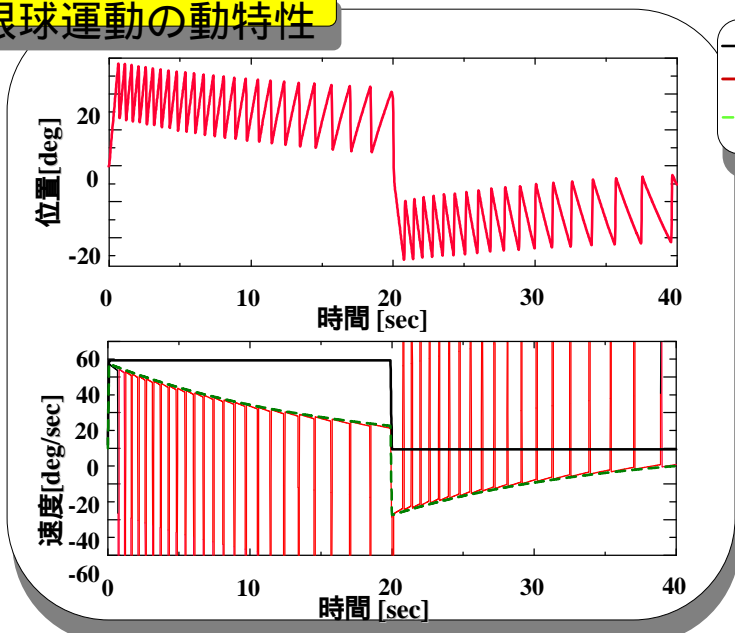


— 頭部
— 眼
- - - 半規管からの信号

VOR gain = 1
 Optokinetic reflex gain = 0.5
 Smooth pursuit gain = 0.01
 Time constant of neural integrator $T_n = 16$ sec
 Time constant of semicircular canal $T_v = 15$ sec
 Retinal slip detection delay = 0.12 sec
 Delay of saccade $s = 0.2$ sec

ドラムを固定し, 台を回転する場合

眼球運動の動特性

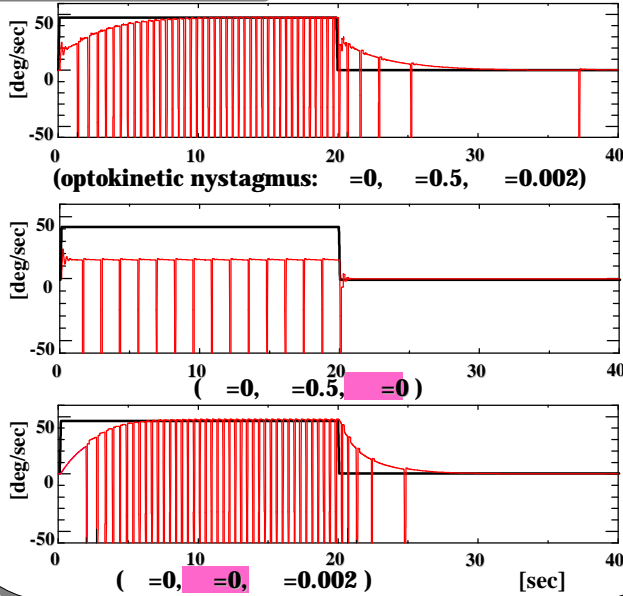


— 頭部 (台)
— 眼
- - - 半規管からの信号

VOR gain = 1
 Time constant of Neural integrator $T_n = 16$ sec
 Time constant of Semicircular canals $T_v = 15$ sec
 Retinal slip detection delay = 0.12 sec
 Delay of Saccade $s = 0.2$ sec

暗闇中で台を回転する場合

眼球運動の動特性



— 視標(ドラム)
— 眼

: VOR gain
: Optokinetic reflex gain
: Smooth pursuit gain

Time constant of Neural integrator $T_n = 16$ sec

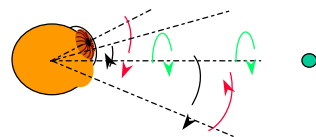
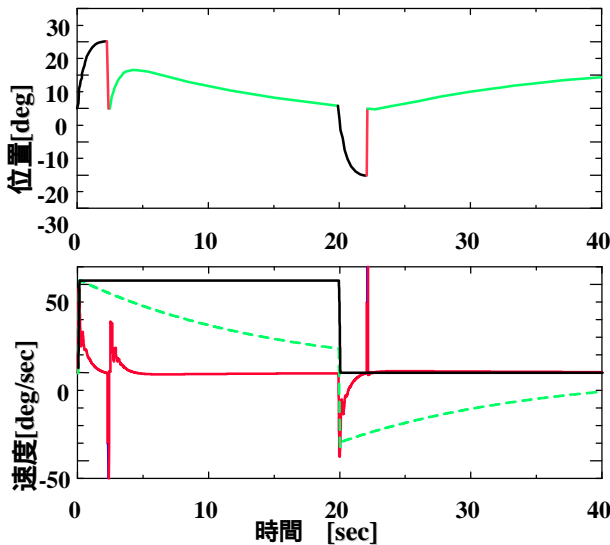
Time constant of Semicircular canals $T_v = 15$ sec

Retinal slip detection delay = 0.12 sec

Delay of Saccade $s = 0.2$ sec

台を固定し、ドラムを回転する場合

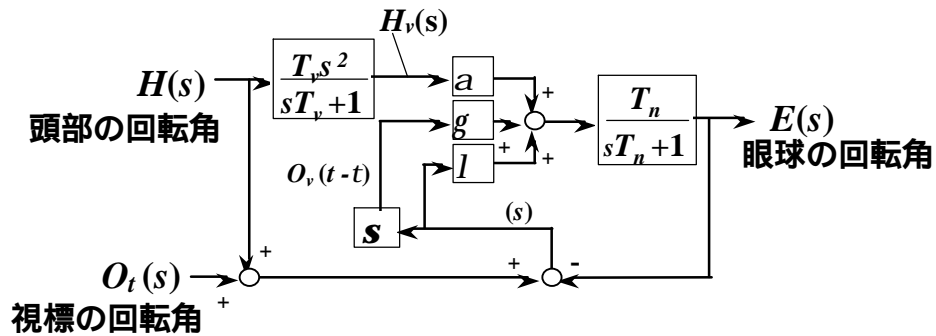
眼球運動の動特性



— 頭部
— 眼
- - - 半規管からの信号

台とドラムが同じ速度で回転する場合

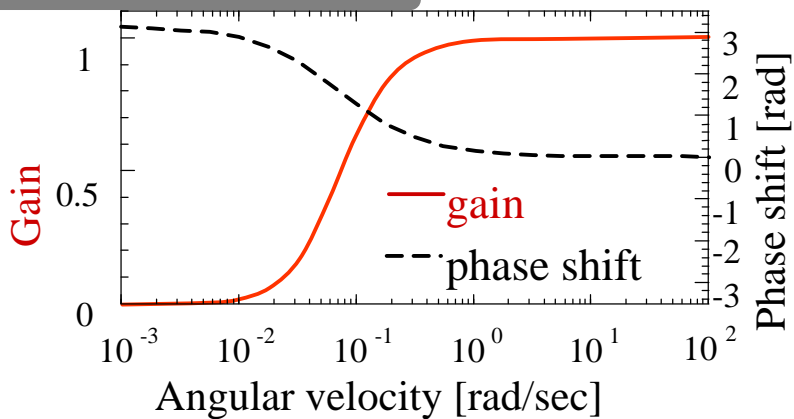
眼球運動の周波数特性



$$E(s) = \frac{T_n}{(T_n s + 1)} \left(\frac{a}{T_v s + 1} \frac{T_v s^2}{T_v s + 1} H(s) + (g s + l) e(s) \right)$$

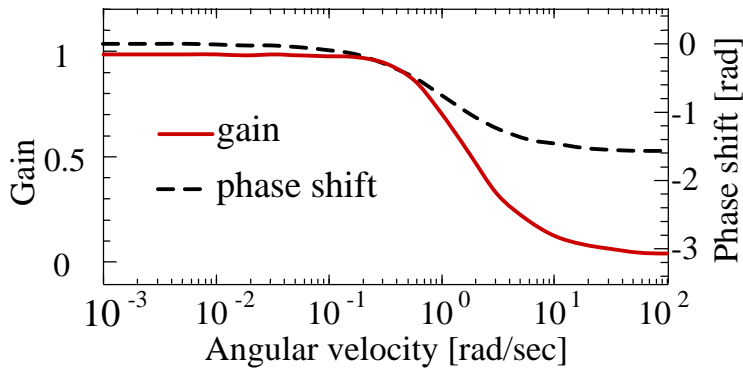
小脳を除いた衝動性眼球運動

前庭動眼反射の周波数特性



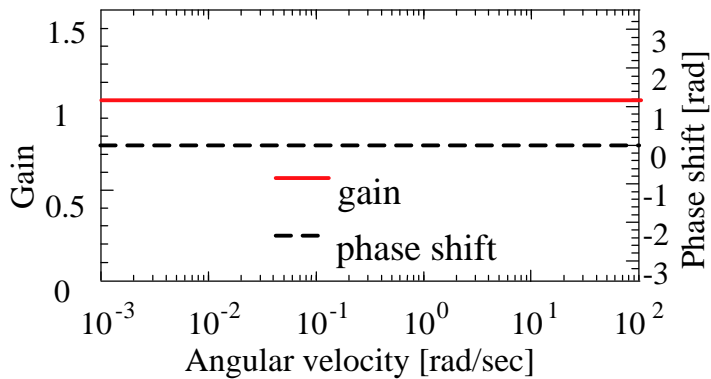
$$E(j\omega) = \frac{a\omega^2}{(1/T_v + \omega^2)(1/T_n^2 + \omega^2)} \left(\frac{a}{T_v T_n} - \frac{1}{T_v T_n} + \frac{1}{T_n} \right)$$

滑動性眼球運動の周波数特性



$$\frac{E(j\omega)}{O_t(j\omega)} = \frac{1}{(1 + 1/T_n)^2 + \omega^2} (1 + 1/T_n - j\omega)$$

眼球運動システム全体の周波数特性

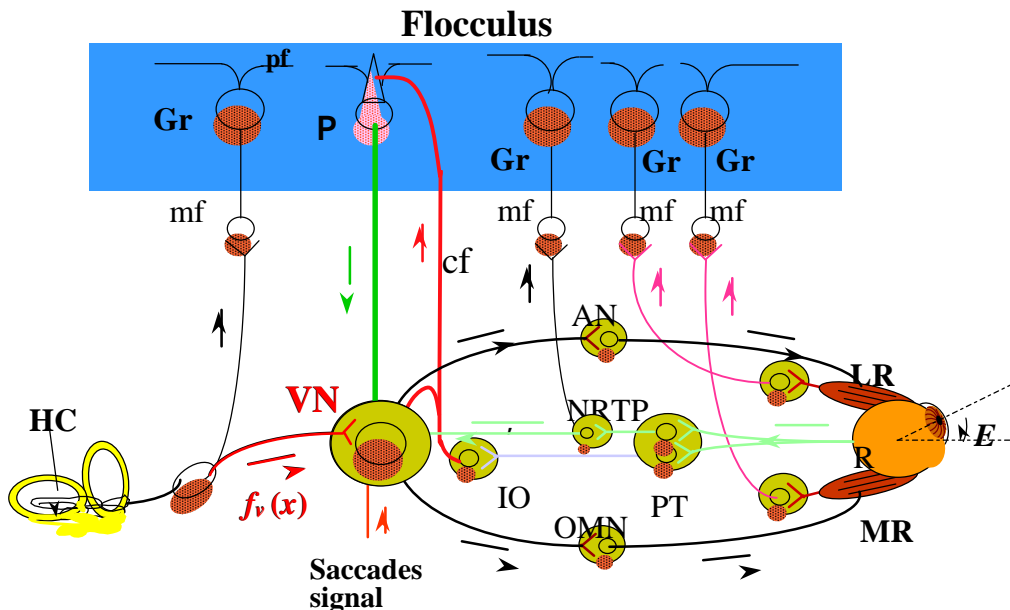


$$\frac{E(j\omega)}{H(j\omega)} = \frac{-(a + g)T_v T_n \omega^2 + [1T_v + g]T_n j\omega + 1T_n}{(T_v j\omega + 1)[(1 + g)T_n j\omega + 1T_n + 1]}$$

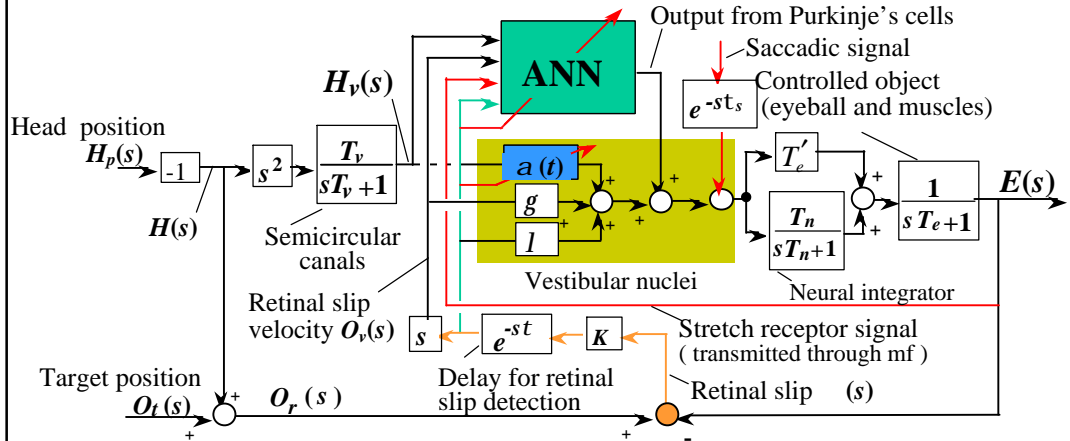
眼球運動システムの適応機能

- 複数学習システムによる
小脳と前庭核の学習システム
- 学習システムのメカニズム
- 高度な学習の条件
伸張受容器から小脳への経路

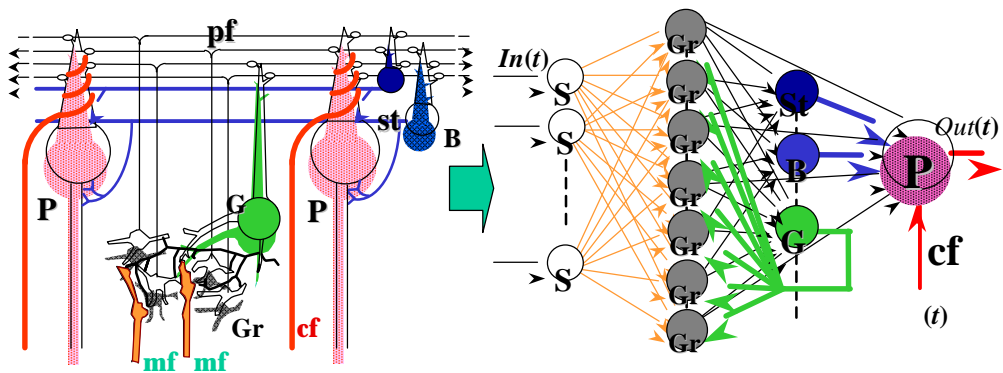
適応機能を含めた眼球運動神経システム



学習機能を含めた眼球運動神経システム



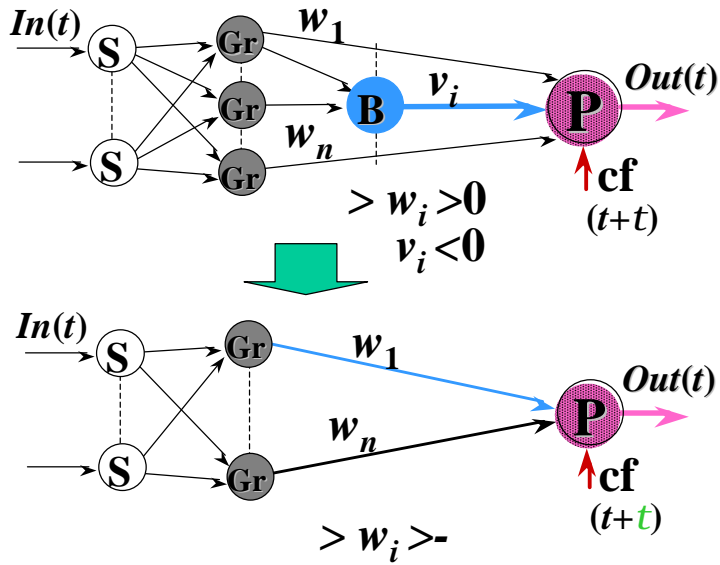
小脳の神経構造に対応する人工ニューラルネットワーク



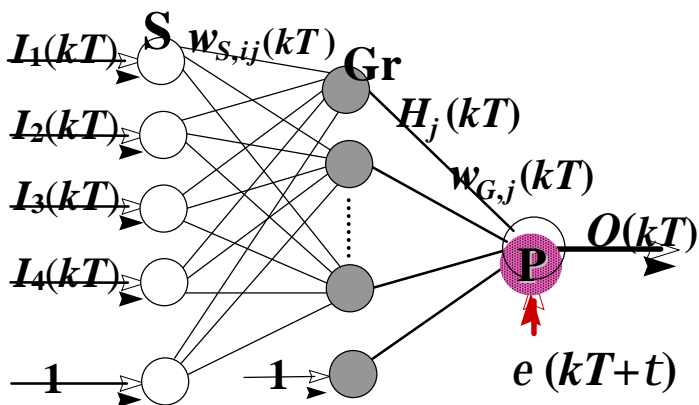
Neural network structure of flocculus

Neural network model of flocculus

小脳ニューラルネットワークの簡略化

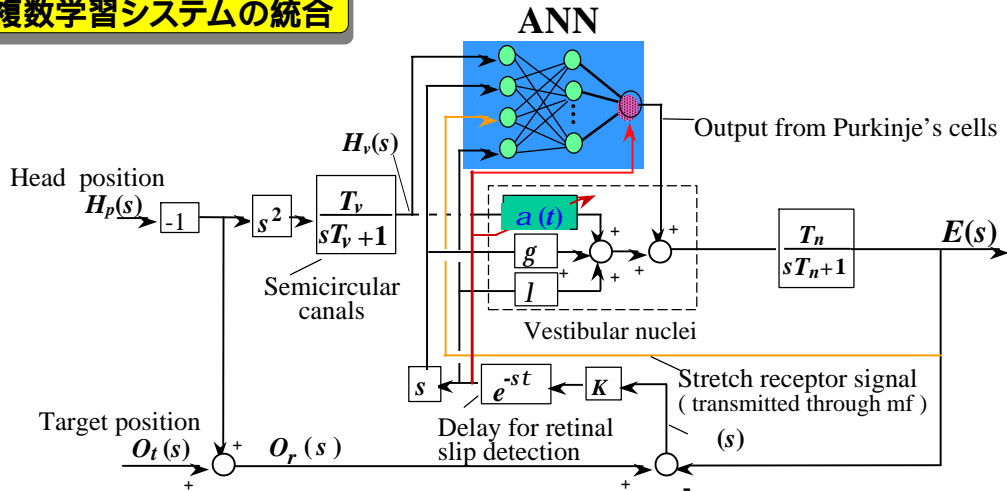


小脳ニューラルネットワークモデル



Neural network model for eye movement system

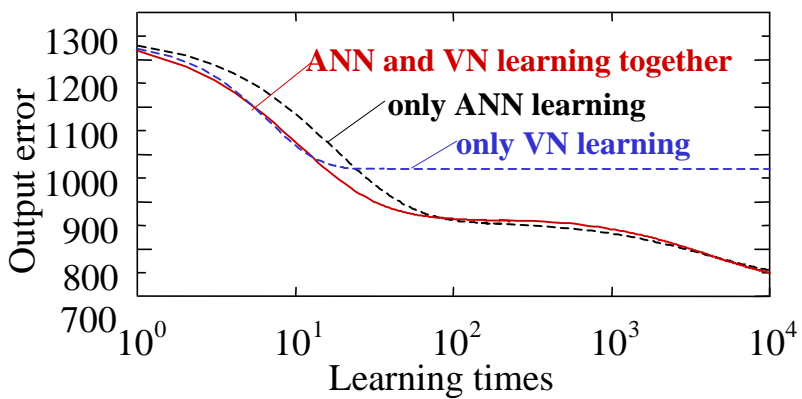
複数学習システムの統合



$$a(kT + T) = a(kT) + d(r - a(kT)) + xe(kT + t)H_v(kT + t)$$

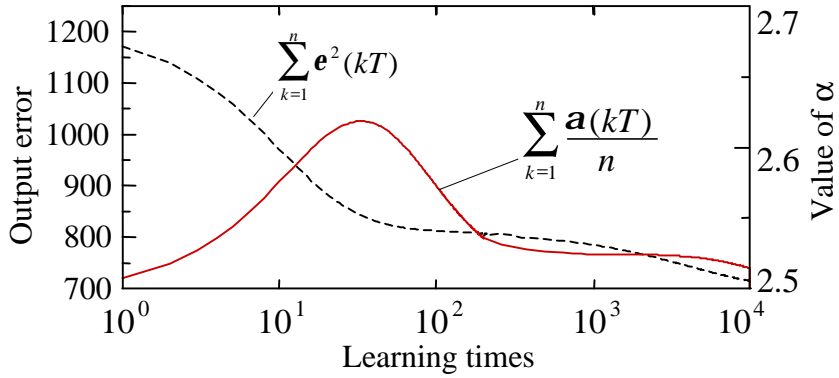
単眼運動制御システムブロック線図

複数学習システムの学習結果



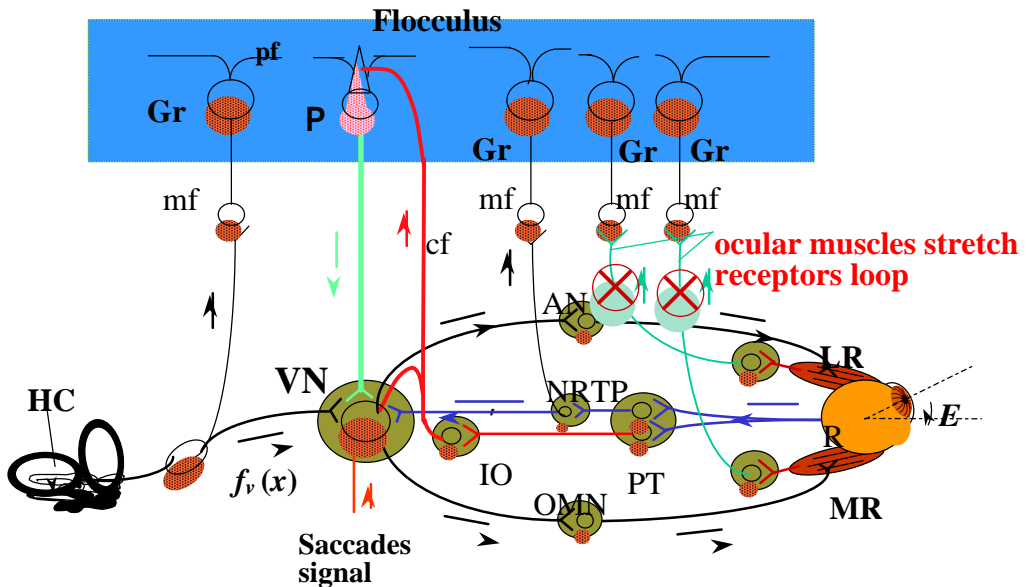
Learning errors $Se^2(kT)$ for ANN and VN learning models

前庭核学習ユニットの特性

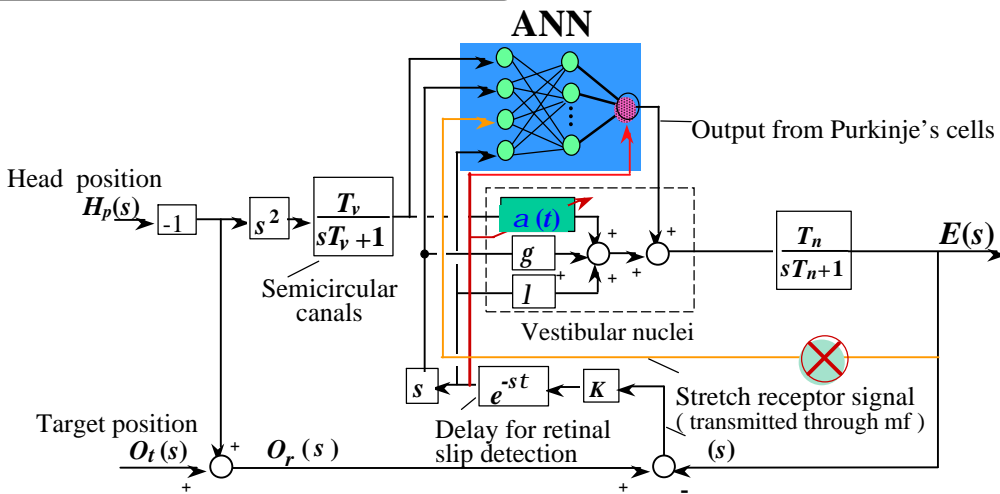


Learning errors for unified eye system learning model

眼筋伸張受容器からの信号の必要性

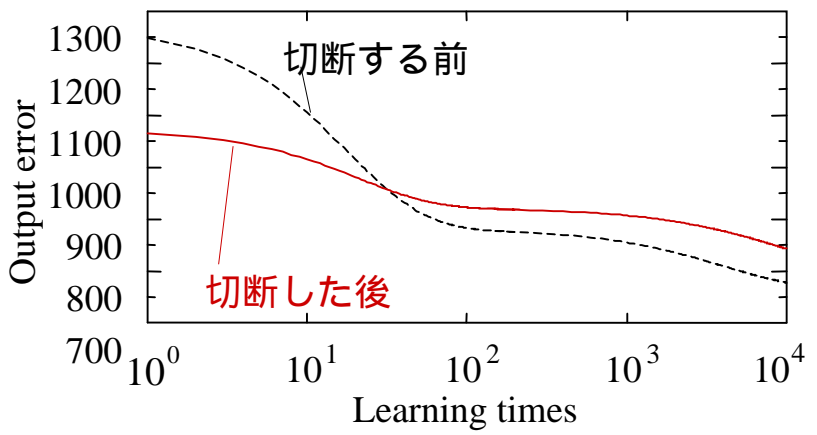


眼筋伸張受容器からの信号の必要性



$$a(kT + T) = d(r - a(kT)) + xe(kT + t)H_v(kT + t)$$

シミュレーション結果



ANN learning errors before and after cutting off the stretch receptor signal $E(t)$

結論

1. 制御の主役

高周波数領域では前庭信号
低周波数領域では視覚信号

2. 複数の学習システム.

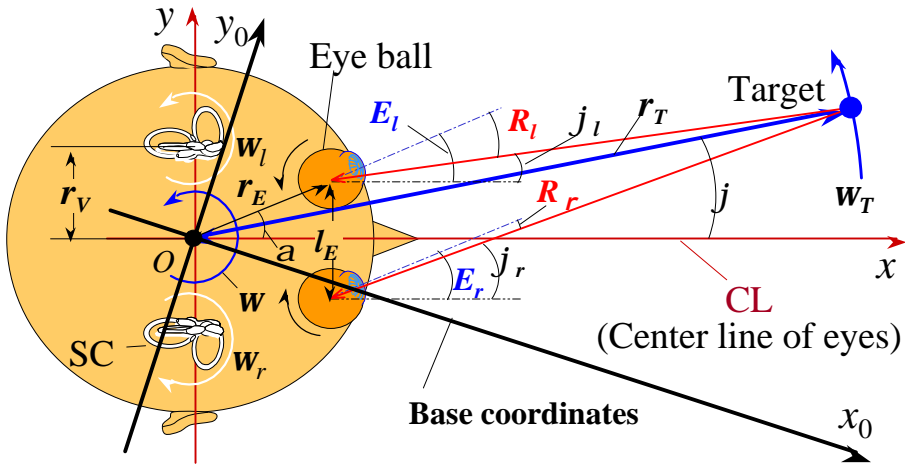
3. 制御対象の出力信号は 高精度学習に必要不可欠.

眼筋の伸長受容器から小脳片葉に入る経路

両眼眼球運動システム

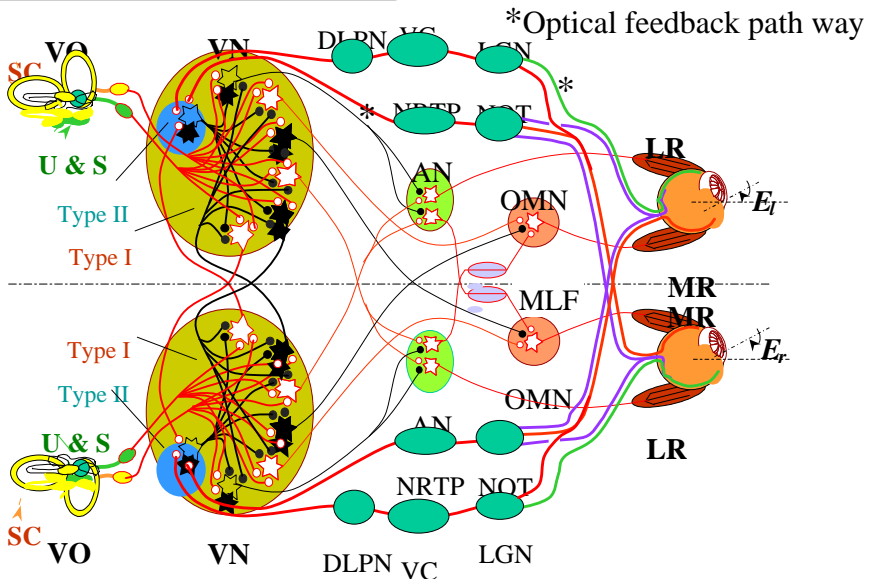
- 両眼眼球運動の基本モデル
- 両眼眼球運動モデルの解析
- 両眼視軸制御装置への応用

両眼眼球運動の基本モデル

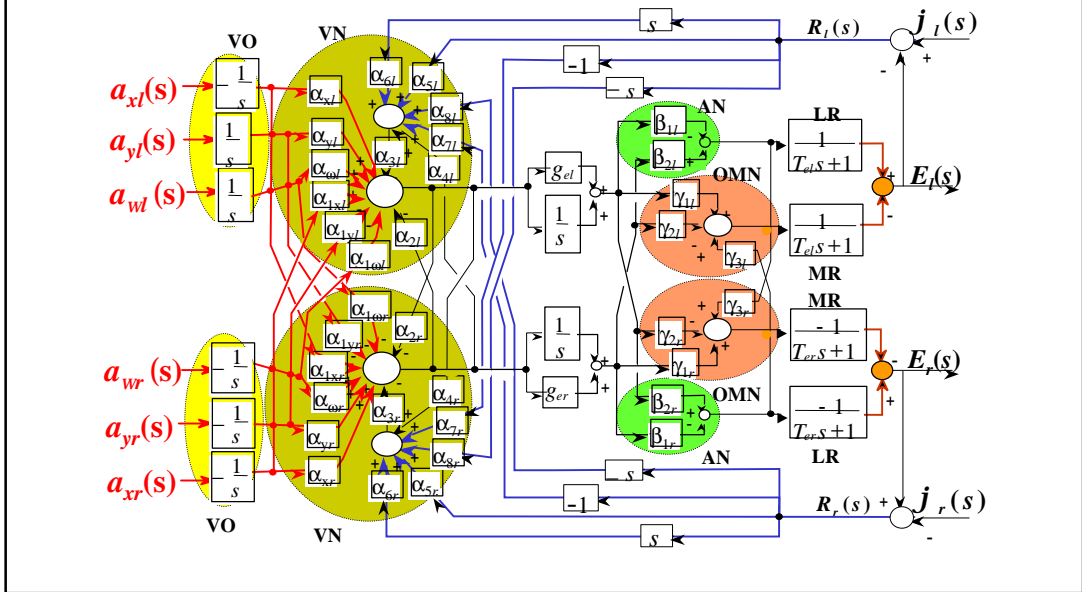


視標、頭部、眼球などの座標設定

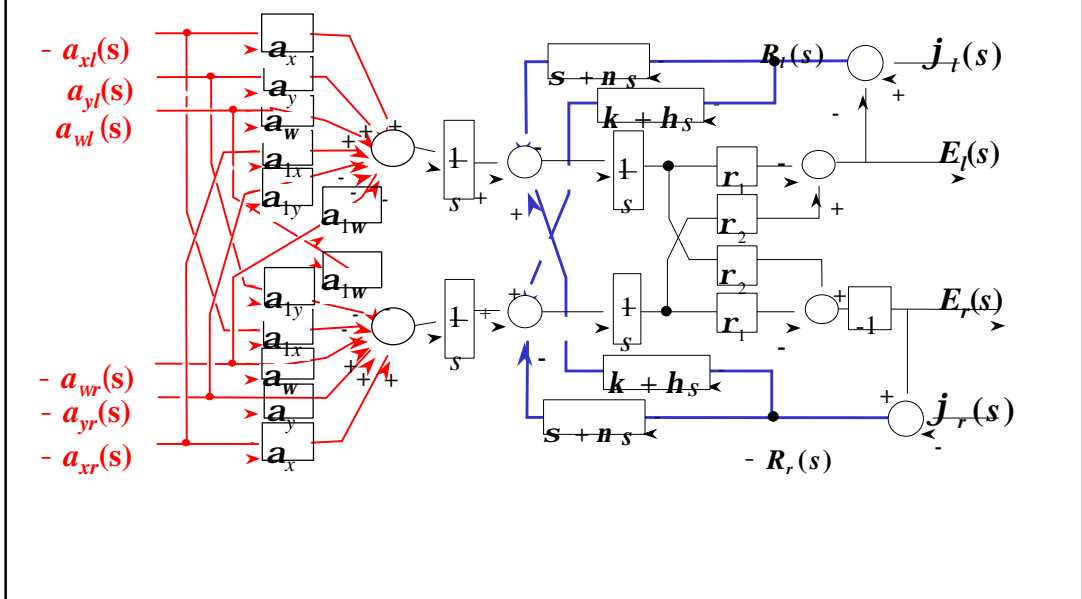
両眼眼球運動の基本モデル



両眼眼球運動の基本モデル



両眼眼球運動の簡略モデル



両眼眼球運動モデルの解析

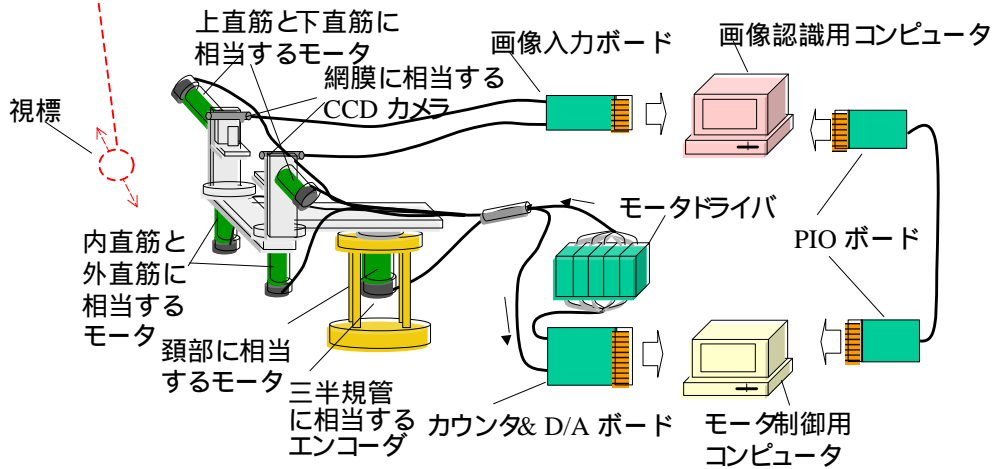
$$\begin{aligned}
 E_l(s) &= -r_1 \frac{1}{s^2} [a_w a_{wl}(s) - a_x a_{xl}(s) + a_y a_{yl}(s)] - r_1 \frac{1}{s^2} [a_{1w} a_{wr}(s) + a_{1x} a_{xr}(s) + a_{1y} a_{yr}(s)] \\
 &\quad + r_2 \frac{1}{s^2} [-a_w a_{wr}(s) - a_x a_{xr}(s) - a_y a_{yr}(s)] + r_2 \frac{1}{s^2} [-a_{1w} a_{wl}(s) + a_{1x} a_{xl}(s) - a_{1y} a_{yl}(s)] \\
 &\quad + r_1 \frac{1}{s} [(s + n s)(j_l(s) - E_l(s)) + (k + h s)(j_r(s) - E_r(s))] \\
 &\quad + r_2 \frac{1}{s} [(s + n s)(j_r(s) - E_r(s)) + (k + h s)(j_l(s) - E_l(s))] \\
 -E_r(s) &= -r_1 \frac{1}{s^2} [-a_w a_{wr}(s) - a_x a_{xr}(s) - a_y a_{yr}(s)] - r_1 \frac{1}{s^2} [-a_{1w} a_{wl}(s) + a_{1x} a_{xl}(s) - a_{1y} a_{yl}(s)] \\
 &\quad + r_2 \frac{1}{s^2} [a_w a_{wl}(s) - a_x a_{xl}(s) + a_y a_{yl}(s)] + r_2 \frac{1}{s^2} [a_{1w} a_{wr}(s) + a_{1x} a_{xr}(s) + a_{1y} a_{yr}(s)] \\
 &\quad - r_1 \frac{1}{s} [(s + n s)(j_r(s) - E_r(s)) + (k + h s)(j_l(s) - E_l(s))] \\
 &\quad - r_2 \frac{1}{s} [(s + n s)(j_l(s) - E_l(s)) + (k + h s)(j_r(s) - E_r(s))]
 \end{aligned}$$

両眼眼球運動モデルの解析

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} \dot{E}_l(s) \\ \dot{E}_r(s) \end{matrix} \dot{u} &= \frac{1}{s - k + \frac{\alpha}{\zeta} \frac{1}{r_1 - r_2} + n - h \frac{\ddot{\theta}}{\theta} s} \begin{matrix} \dot{a}_x - a_{1x} & a_y - a_{1y} \\ \dot{a}_{1x} - a_x & a_{1y} - a_y \end{matrix} \dot{u} \begin{matrix} \dot{v}_x(s) \\ \dot{v}_y(s) \end{matrix} \dot{u} \\
 &\quad - \frac{1}{s + k + \frac{\alpha}{\zeta} \frac{1}{r_1 + r_2} + n + h \frac{\ddot{\theta}}{\theta} s} \begin{matrix} 2a_w + (a_x + a_{1x})r_v & a_{1y} - a_y \\ 2a_w + (a_x + a_{1x})r_v & a_{1y} - a_y \end{matrix} \dot{u} \begin{matrix} \dot{w}(s) \\ \dot{v}_y(s) \end{matrix} \dot{u} \\
 &\quad + \frac{1}{s - k + \frac{\alpha}{\zeta} \frac{1}{r_1 - r_2} + n - h \frac{\ddot{\theta}}{\theta} s} \begin{matrix} j_l(s) - j_r(s) \\ j_r(s) - j_l(s) \end{matrix} \dot{u} \\
 &\quad + \frac{1}{s + k + \frac{\alpha}{\zeta} \frac{1}{r_1 + r_2} + n + h \frac{\ddot{\theta}}{\theta} s} \begin{matrix} j_l(s) + j_r(s) \\ j_l(s) + j_r(s) \end{matrix} \dot{u}
 \end{aligned}$$

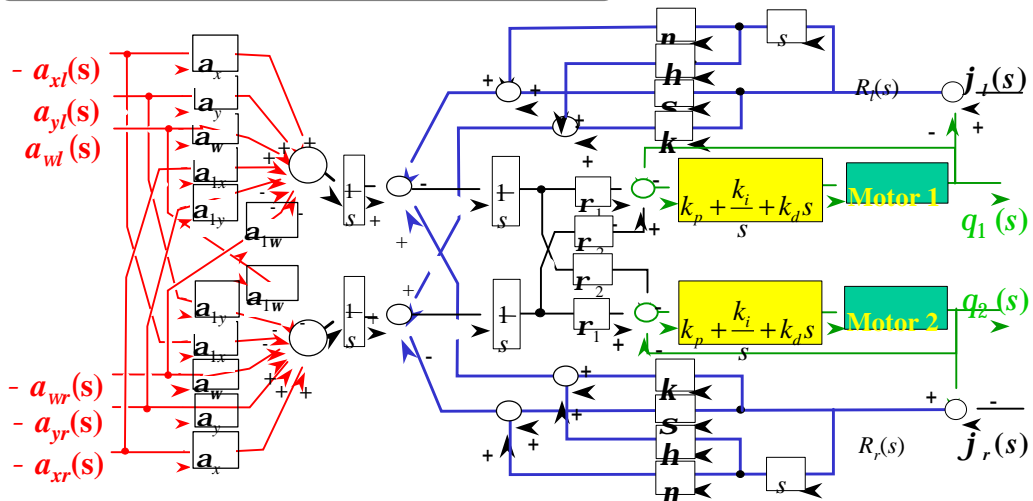
↖ 輻轉前庭動眼反射
↖ 共役前庭動眼反射
↖ 輻轉運動
↖ 共役運動

両眼視軸制御装置への応用



両眼視軸調節装置の構成

両眼視軸制御装置への応用



Block diagram of the binocular axes control system

両眼視軸制御装置への応用

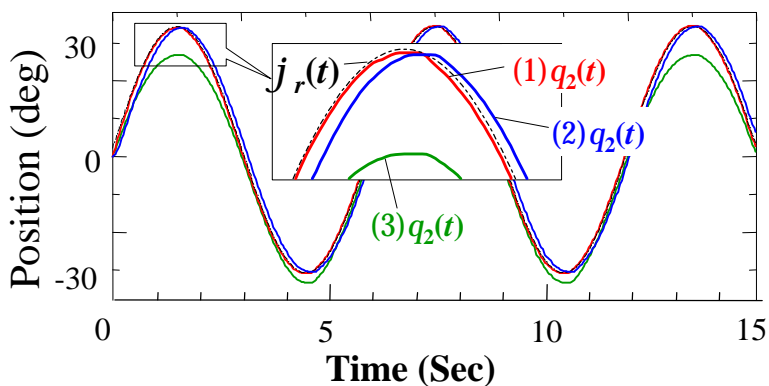


Fig.7 Response of the binocular axes control for
(1) fixed target and rotating head,
(2) fixed head and rotating target,
(3) rotating head in a dark environment

両眼視軸制御装置への応用

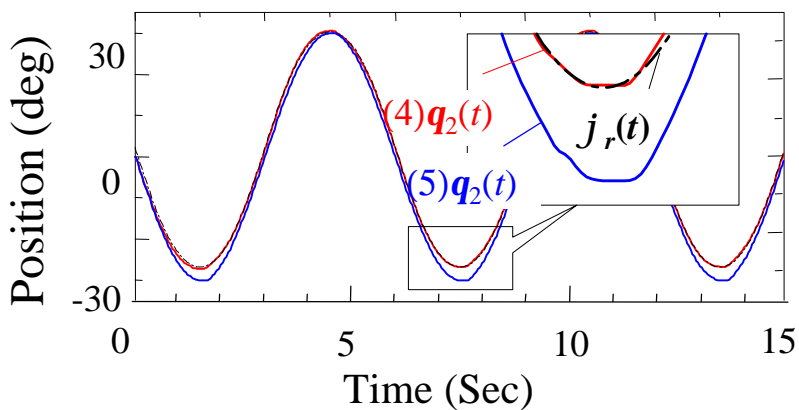


Fig.8 Response of the binocular axes control for
(4) fixed target and moving head in y-direction,
(5) moving head at y direction in dark environment.

両眼視軸制御装置への応用

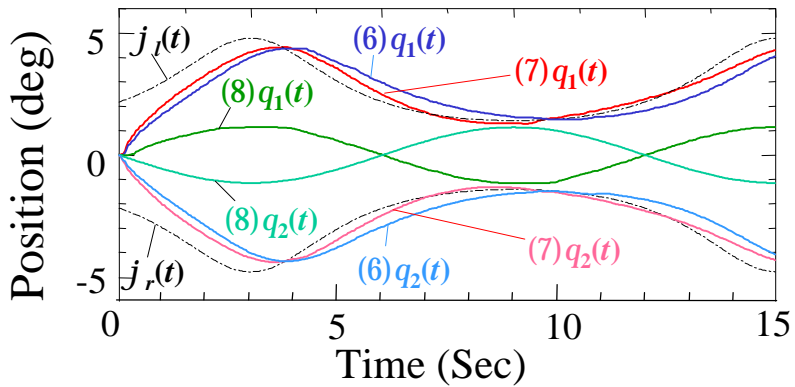
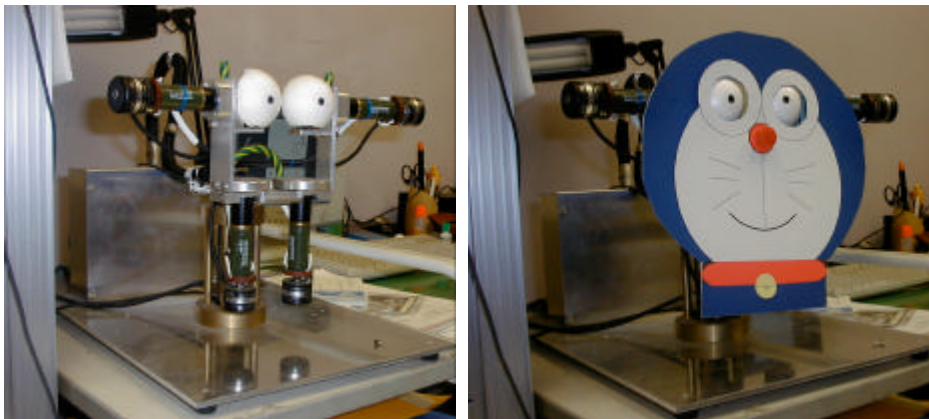


Fig.9 Response of the binocular axes control of
(6) fixed head and moving target in x-direction,
(7) fixed target and moving head in x-direction,
(8) moving head at x direction in dark environment.

両眼視軸制御装置への応用



両眼視軸制御装置

結論

1. 輻輳性と共役性眼球運動の伝達関数は異なる。
速い共役性運動，遅い輻輳性運動。
2. 両眼は1つの視標しか見れない。
両眼は連動運動する
3. 交叉経路によって遠心力の影響が除かれる。
病変でその影響が現れる。
4. 左右運動の前庭動眼反射の原理を解明。
暗闇の中では，仮想視標が存在する。
5. 前後運動の前庭動眼反射も可能である。
解剖・生理学的に制御経路が存在する。