

眼球制御系の 外部饋還루우프 構成

論 文

26~4~2

Synthesis on External Feedback Loop of Oculomotor Control System

朴 相 暎* 金 成 煥**

(Sang Hui Park, Sug Hwan Kim)

Abstract

The feedback sources of oculomotor control system consist of three types of feedback path originating from retinal image displacement, in the proprioceptive fibers of the extraocular muscles, in the efference copy within the C.N.S.

From above feedback loops, the retinal image feedback path is a main subject in this experiment.

The electrical output of eye ball motion detecting with a photo-electric matrix method is fed into galvanometer through the external feedback path, and the stability was also examined.

1. 序 論

過去 數年동안 動眼神經系는 廣範圍하게 研究되어 왔는데, 本 研究에서는 外部的으로 饋還루우프를 導入 하므로써, 眼球制御系の 機能을 밝힐 수 있게 시스템을 構成하였다.

一般的으로 眼球制御系는 單位 負饋還루우프로 이루어졌으며, 數個의 生理學的인 饋還루우프로 構成되어 있다. 그 중 網膜의 視像變位는 이 系統의 主된 饋還 루우프로써 作用한다.

이러한 理論을 實驗的으로 考察하기 위한 裝置로는 여러가지가 研究되었는데, Fender와 Nye (1961)¹⁾는 光學的인 經路의 距離를 適當히 調節하여 被實驗者의 眼球回轉이 網膜에 固定되는 視標像의 角變位만큼 일어나게하여 視像의 變位를 眼球 回轉角의 線形函數로 하여 網膜의 饋還信號를 光學的으로 얻었다.

Young과 Stark (1963)²⁾와 Robinson(1968)³⁾은 光變換器에 의해서 眼球運動을 檢知하고 眼球回轉에 比例하는 電氣的인 어나로그 信號가 視標의 調節에 使用되도록 하였다. Palmieri (1974)⁴⁾는 網膜의 饋還經路利得을 變化시킬 수 있는 光電子 裝置를 開發하였다.

本 論文의 實驗에서는 被實驗者의 眼球出力을 이미 筆者⁵⁾에 의하여 報告된 바있는 光電行列 메트릭스法으로 檢知하도록 하였으며, 여기에 外部 饋還經路를

통하여 갈바노미터로 入力시켜 饋還利得을 變化시킬 수 있게 시스템을 새로이 構成한 것을 통하여 얻어진 結果를 報告하고자 한다.

2. 眼球制御系の 饋還經路의 構成要素

2.1. 網膜의 視像變位에 의한 饋還經路

網膜의 黃斑部 中心窩(fovea)의 位置를 약간 벗어난 視像의 變位가 追跡 任務를 遂行하기 위한 單位 負饋還經路에 誤差信號로써 作用한다.

이러한 誤差信號를 抽出해내는 能力은 網膜에 대단히 制限된 領域에 存在한다. 즉 被實驗者가 中心窩로부터 몇도 떨어져서 固定狀態를 維持하려고 하는 동안에 움직이는 視標를 追跡하기는 不可能하기 때문이다.

視標가 一定한 速度로서 視軸으로 逆轉되었다면 視標 變位 方向에 反對이지만 活動性 眼球運動이 視標의 움직임과 같은 方向으로 일어나며 網膜으로부터 速度信號에 의해서 거의 發生한다. 網膜은 視野의 情報를 大腦皮質로 傳送하며 이 情報는 視角의 函數이다.

즉 眼球가 어떤 形態의 運動을 시작하면 網膜으로부터의 視野情報는 眼球運動을 制御하기 위하여 使用된다. 大腦皮質은 視角情報의 分析器로서 作用하며 分析된 視覺情報는 眼球를 원하는 位置로 움직이게 하는 命令을 내린다.

즉 眼球回轉을 誘發시키는 大腦皮質은 이를 制御하기 위하여 饋還信號로서 網膜의 速度情報가 아니라 位置情報를 使用한다.

2-2. 眼球의 回轉에 의한 饋還經路

網膜의 視像 饋還루우프가 遮斷되면 眼球의 運動은

*正會員: 延世大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博(當學會 編修委員)

**正會員: 延世大 大學院 博士課程

*接受日字: 1977年 5月 30日

多少는 安定한 狀態로 되며, 被實驗者가 正弦波의 으로 움직이는 視標를 追跡 하라고 命命받으면 應答은 入力과 거의 같은 周波數이고 有限한 振幅을 포함하며 아주 低周波에서는 드리프트(drift)가 역시 存在하고, 發振運動은 利得이 1보다 多少크며 位置 혹은 速度 饋還情報에 의해서 安定 될 수 있다.

Cooper, Daniel, Whitter (1955)⁸⁾ 등의 生理學者는 外眼筋肉의 筋紡錘로부터 速度情報와 位置情報를 單一化 시켰는데, 筋紡錘에 의해서 發生하는 가시電壓(spike potential) 週期의 逆數로 定義되는 神經 임펄스 周波數는 眼球 角變位의 瞬時值와 이 變位의 一次 微分值의 合에 比例한다고 했다. 또한 Vossius(1960)⁹⁾는 眼球運動의 軌道가 外眼筋肉 周圍의 局所의인 固有 受容器의 饋還루우프(proprioceptive feedback loop)에 의해서 調節될 수 있다고 提案하였으나, Stark(1968)는 眼球의 回轉 慣性이 外眼筋肉의 筋紡錘에 電氣的인 임펄스 發射를 誘導하여 眼球運動에 饋還要素로서

作用하는 것이라고 提案하였다.

2.3. 中樞神經系내에서의 饋還經路

이 饋還情報는 中樞神經으로부터 衝動이 末梢로 傳達되는 過程에서 일어나는 作用의 變化인 遠心模寫(efference copy)에 의해서 說明할 수 있다.

遠心模寫의 出力은 外眼筋肉의 入力이 되며, 이 信號는 大腦皮質로 傳送되어서 網膜위의 像에 움직임으로부터 發生하는 信號와 比較가 된다. 그림 1은 制御系의 모든 파라미터를 附加시킨 多重饋還經路를 說明하는 生理學的인 視覺經路의 블럭진도이다. 여기서 $G_1(s)$ 는 大腦皮質의 傳達函數이며, $G_2(s)$ 는 眼球과 外眼筋肉다이 나믹스의 傳達函數를 나타낸다.

遠心模寫에 의한 正饋還 시스템은 發振하며, 이 루우프가 不安定한 要素를 포함한다면 微分 饋還經路에 의해서 安定化 될 수 있다.

그리고 K_s 로 表示된 速度情報는 外眼筋肉의 出力으로부터 얻어지며, 大腦皮質에 負饋還情報로써 인가된다.

3. 網膜 饋還經路의 構造와 安定度 解析

3.1. 網膜 饋還經路의 構造

前述된 饋還經路中 本 論文에서 研究對象으로 한 眼球制御系는 그림 2(a)와 같이 視標에 대한 眼球位置가 網膜으로 感知되는 誤差檢出器로 單位 負饋還루우프로 이어지는 閉루우프의 制御機構이다.

여기서 中樞神經系의 制御器는 檢出된 誤差 즉 視標의 角變位와 眼球의 角變位에 크게 作用한다.

視覺系統의 單位負饋還經路는 眼球의 움직임을 抑制하고 外眼筋肉에 의한 토오크를 機械的으로 制御함으로써 開放 할 수 있다. 또한 Fleming, Vossius, Bowman & Johnson (1969)는 外眼筋肉을 痲痺시키는 자이로카인(Xylocaine)을 注入시키므로써 藥物的으로 루우프를 열었다.

本 實驗에서 使用된 方法은 工學的으로 解決해 주었다.

그림 2(b)에서 測定된 眼球位置는 갈바노메터 饋還增幅器의 利得 α 만

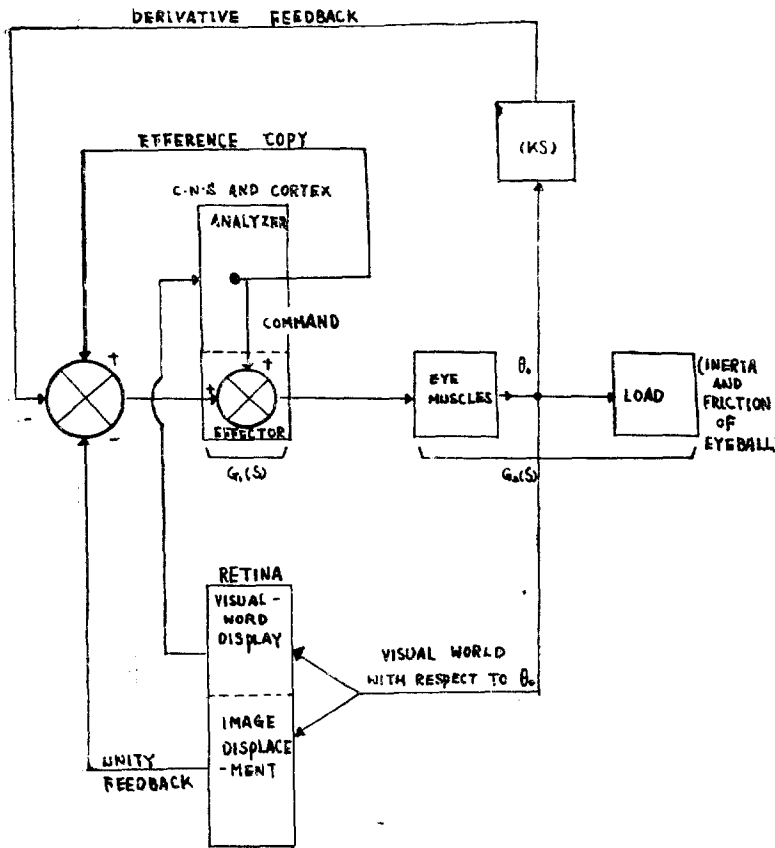


그림 1. 眼球制御系의 生理學的 多重饋還經路
Fig. 1. Block diagram of physiological multiple control loop of eye-movement

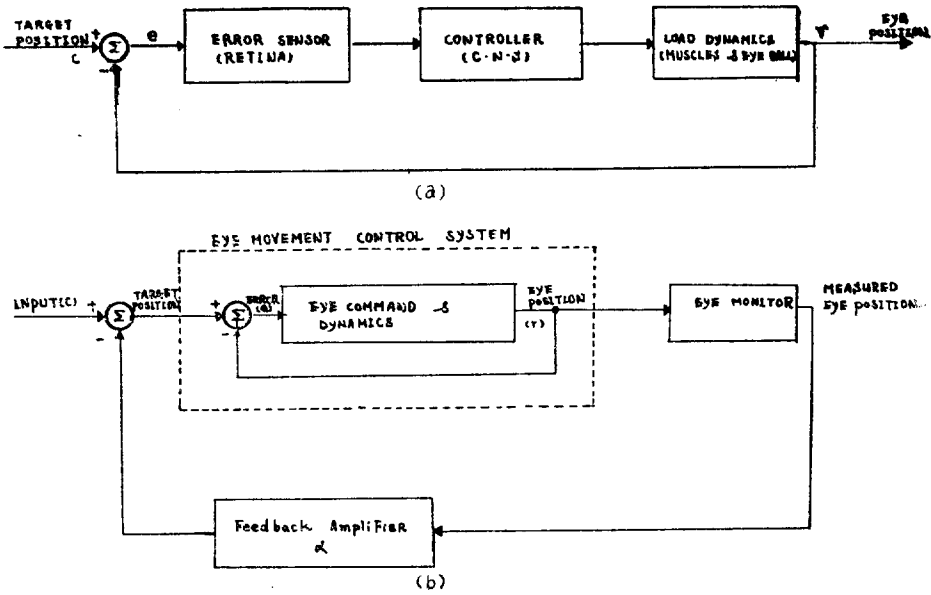
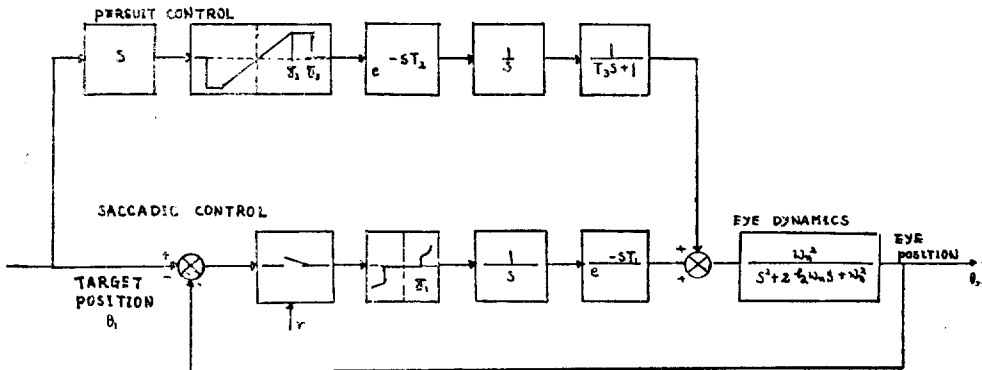


그림 2. 眼球制御系の 블럭선도

- (a) 正常的인 狀態에서의 饋還經路
- (b) 網膜饋還利得을 變化시키는 經路

Fig. 2. Eye movement control system diagram
 (a) Normal visual feedback path
 (b) Method of varying visual feedback gain



SACCADIC DELAY	$T_d = 130 \text{ MSEC}$	DEAD ZONE	$\bar{\sigma}_1 = 0.3^\circ$	$\tau = 200 - 240 \text{ MSEC}$
PURSUIT DELAY	$T_d = 134 \text{ MSEC}$	SATURATION	$\bar{\sigma}_2 = 30\%/SEC$	$\zeta = 0.7$
PURSUIT LAG	$T_s = 40 \text{ MSEC}$	CUTOFF	$\bar{\sigma}_3 = 100\%/SEC$	$\omega_n = 120 \text{ RAD/SEC}$

그림 3. 確率的 샘플 데이터 모델

Fig. 3. Stochastic sampled data model

음 增幅되어 視標의 位置를 바꾸기 위하여 入力에서 減하여진다. 이와 같이 眼球運動 Δr 은 感知된 誤差를 $(1+\alpha) \Delta r$ 로 減少시킨다. 갈바노메터 饋還增幅器의 利得 α 에 對하여 視覺系의 實效饋還利得 K 를 다음과 같이 定義할 수 있다.

$$K=1+\alpha \quad (1)$$

이와 같이 K 는 檢出된 誤差와 眼球運動간의 比가 된다.

$$K=-\frac{\Delta e}{\Delta r} \quad (2)$$

3.2. 系統의 安定度 解析

그림 3은 그림 2의 블럭선도를 基礎로 하여 Young 이 提案한 確率의 샘플메이터 모델이다. 여기서 saccadic 眼球制御系의 信號 흐름도를 나타내면 그림 4와 같다.

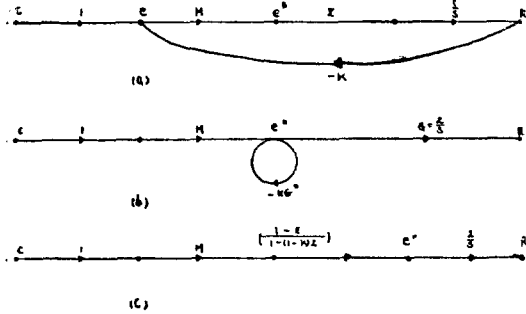


그림 4. 網膜 饋還制得을 可變시킬때 saccadic 시스템의 信號 흐름도
Fig. 4. Flow graphs of saccadic system with variable visual feedback gain

그림 4(a)의 前向經路 傳達函數는

$$G(s)=\frac{e^{-Ts}}{s}=\frac{z}{s} \quad (3)$$

이를 Z 變換 하면

$$G(z)=G(s)^*=\frac{Z}{1-Z} \quad (4)$$

網膜 饋還利得 變化에 의한 saccadic 眼球制御系의 結果的인 信號 흐름도는 그림 4(c)와 같다. 여기서 眼球位置는

$$R(s)=C(s)^*\left[\frac{1-Z}{1-(1-K)Z}\right]\frac{Z}{s} \quad (5)$$

이 된다.

可變視像 饋還狀態의 眼球制御系의 理論的인 安定度의 限界는 Z 平面에서 根軌의法에 의하여 決定될 수 있다. Z 平面에서 閉루우프 傳達函數의 極點은 루우프 利得이 $-\infty \sim +\infty$ 로 變化할 때 어떻게 移動 하는가를 檢討하므로써 시스템의 相對的인 安定度를 구할 수 있다. 이러한 眼球制御系에 있어서는 특히 $Z=exp(-s$

T)로 定義하였으므로 極點이 Z 平面의 單位 圓內에 位置하면 不安定한 系를 이루고, 單位 圓周上에 位置하면 臨界安定性を 나타내며, 單位 圓外에 位置하면 安定系를 이룬다.

安定度의 限界를 구하기 위하여 saccadic까지의 入力에 對한 誤差의 샘플傳達函數를 구하면

$$\frac{E(z)}{C(z)}=\frac{1-Z}{1-(1-K)Z} \quad (6)$$

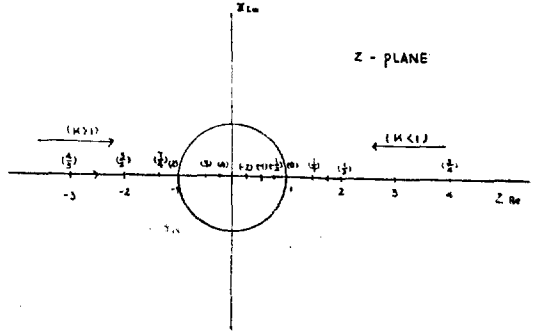


그림 5. $1-(1-K)Z$ 의 根軌跡圖
Fig. 5. Root locus of $1-(1-K)Z$

여기서 $1-(1-K)Z$ 의 根軌跡을 Z 平面에서 그리면 그림 5와 같다.

$K=1$ 일 때는 外部饋還이 없을 때로서 完全한 安定狀態를 나타내는 正常的인 追跡狀態이다.

安定度의 限界는 $0 < K < 2$ 이며, 下限値는 $\alpha = -1$ 로써 眼球는 閉루우프 狀態에서 運動하며, 上限値는 正常饋還狀態의 2배를 나타낸다.

$K < 0$ 에서 根은 單位 圓內의 正의 實數軸上에 存在하여 不安定한 正饋還狀態가 되며, $K > 2$ 에서 根은 單位 圓內의 負의 實數軸上에 存在하여 不安定한 發振狀態를 나타낸다.

4. 實驗 및 結果考察

4.1. 實驗裝置의 構成

實驗을 위하여 設計된 全體的인 시스템의 블럭선도는 그림 6과 같다.

이때 應答을 觀察하기 위해서 記錄器(Rikadenki B-24)의 速度는 20mm/sec으로 하였다. 갈바노메터 饋還增幅器 回路는 그림 7과 같이 低周波에서 낮은 임피던스(약 16.2Ω)을 갖는 갈바노메터 코일을 크로스 오버 찌그리짐이 없이 驅動시킬 수 있게 製作하였다.

이를 위하여 演算增幅器(μA741)에 電流부스터를 캐스캐이딩하여 出力電流를 얻었다.

電流부스터 內部的인 饋還回路는 다링톤接續에서 흔히

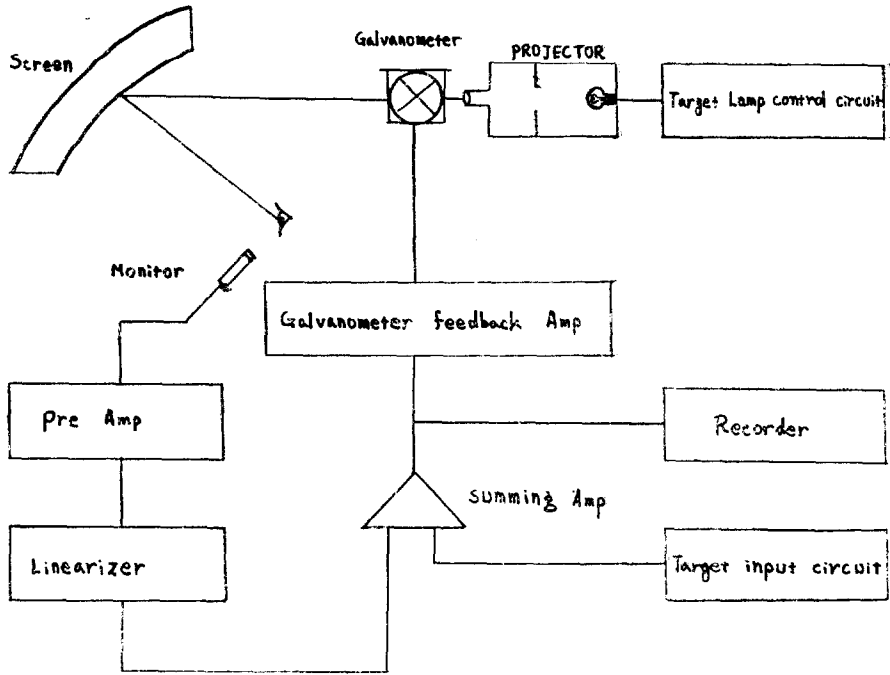


그림 6. 全體 시스템의 블럭선도
Fig. 6. Blockdiagram of experimental apparatus

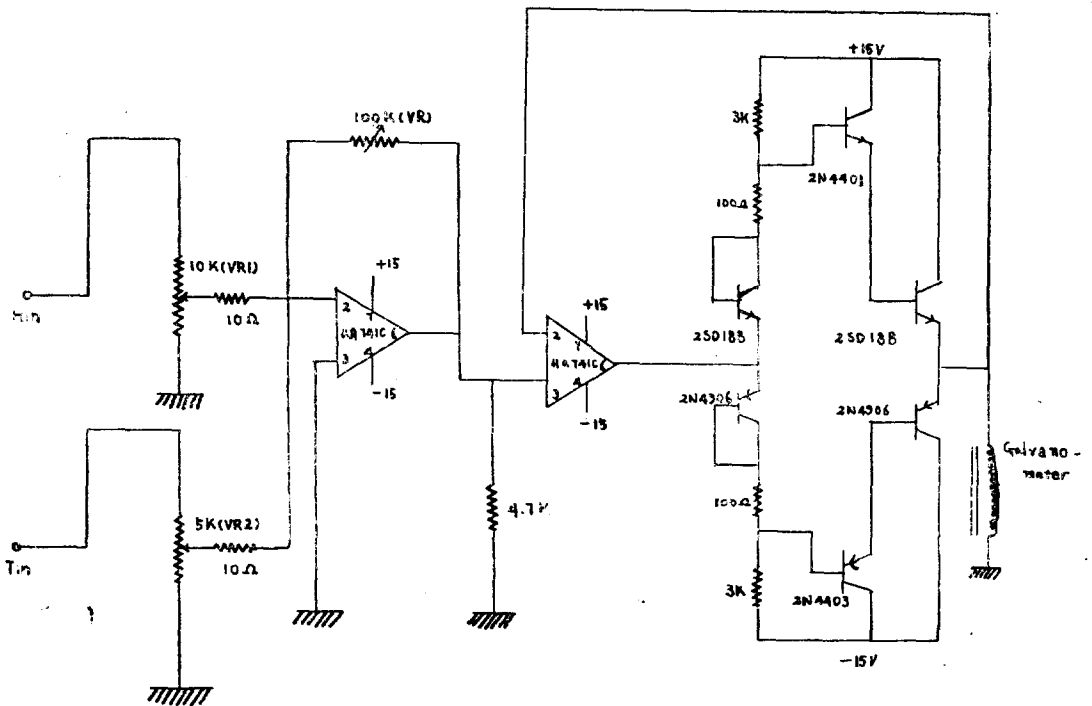


그림 7. 갈바노메터 饋還增幅器 回路
Fig. 7. Galvanometer feedback amplifier circuit

發生하는 트랜지스터의 溫度變化에 의한 影響을 減少시키므로써 增幅器 內部的 傳達函數가 부스터 트랜지스터 파라메터의 變化에 無關하도록 하였다.

本 實驗에서 使用된 眼球運動 測定方法은 電子測定法에 의하여 本研究室에서 이미 設計, 製作한 바 있는 裝置(eye tracker 1001) 中에서 增幅器 및 線形補定回路를 使用하였다.

갈바노메터는 可動코일型 D'arsonval 갈바노메터로써 最大徑束이 8,000 Gauss인 U字形 艾利코磁石의 空 隙 內에 位置한 것이다. 이는 記錄器(HP7702A)의 펜 모터로 使用되는 것인데, 펜을 없애고 그 자리에 거울(4×2.5cm)을 附着 시켰다.

入力에 對한 갈바노메터의 回轉角은 10°의 視標變位에 190mA로 調整하였다. 視標驅動은 ICNE555를 非安定 멀티바이브레이터로 動作시키고 始動動作을 實驗者가 認識하기 위하여 LED램프를 回路에 附加시켰다.

프로젝터는 光源(30V, 60W)과 스피트와 빛의 收差 렌즈(f , 12.5mm)를 使用했으며, 150cm앞에 있는 白色의 스크린 벤드(104×15.5cm)에 照射시키고 視標의 形態는 0.8×2.1cm 크기의 垂直 스트립의 밝은點을 갖도록 하였다. 그리고 視標의 밝기 調整은 thyristor (2SF 264) 點弧回路로써 하여 주었다.

4.2. 結果考察

正常的인 追跡狀態에 있어서 스텝入力에 對한 應答은 그림 8(a)와 같이 232±28.4ms의 時間遲延을 갖는 單一한 스텝의 saccadic 運動이라 할 수 있다.

實效饋還利得을 減少시키는 外部的인 正饋還이 加하여지면 應答은 그림 8(b)와 같이 入力스텝의 方向으로 繼續的인 saccadic 跳躍을 나타냈다.

각각의 스텝은 眼球가 正常的인 固定狀態에 到達하기까지 먼저의 振幅보다 작은 값으로 運動하였다.

利得이 더욱 減少하여 零에 가까워질수록 正常狀態

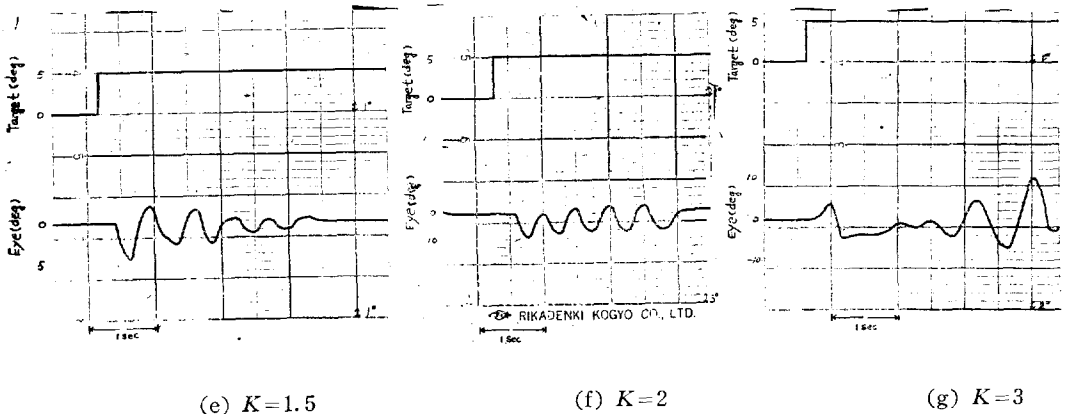
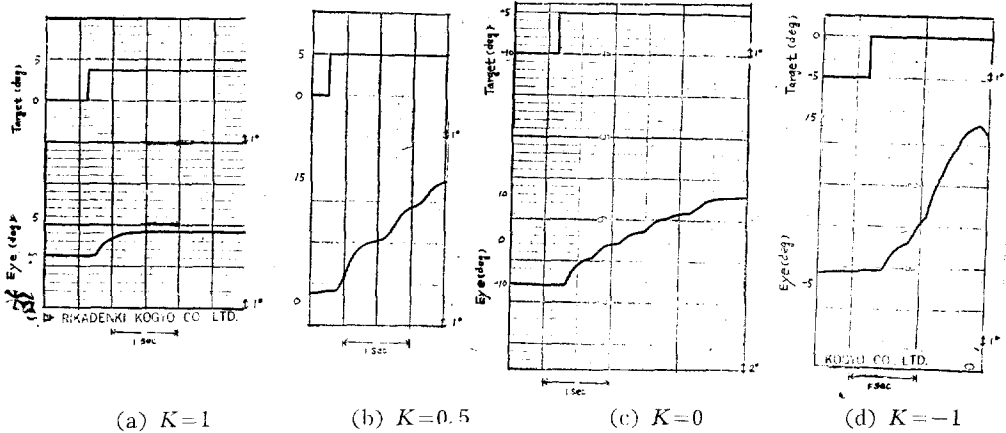


그림 8. 饋還利得 變化에 의한 스텝應答
Fig. 8. Step response under variable feedback gain

에 이르기까지는 긴 시간이 必要하므로 saccade數는 增加하게 된다.

그림 8(c)에서 $K=0$ 이면 實效饋還利得은 零으로서 스텝應答은 開루우프狀態 下에서 같은 振幅의 連續된 모양이 되었다. 그림 8(d)에서 外部正饋還이 깊숙히 加하여지면 $K<0$ 로 되어 시스템은 不安定狀態로 突入하게 되고 各各의 saccade는 먼저의 saccade보다 커졌다.

그림 8(e)에서 外部的인 負饋還信號가 加하여지면 應答은 오우버슈트를 나타내었다. $1<K<2$ 에서 應答은 眼球位置와 眼球가 收斂하려는 方向으로의 位置間에 誤差가 DZ(dead zone)보다 작아질 때까지 各各의 saccade가 먼저의 saccade보다 작은 크기로 交番의으로 發振하는 連續된 saccade 應答을 보였다.

그림 8(f)에서 利得이 $K=2$ 가 되면 應答은 入力크기와 같은 一定한 振幅을 가지며 交番의인 方向으로 連續的인 運動을 하는 것을 나타내었다.

그림 8(g)에서 利得이 $K>2$ 이면 시스템 應答은 增加하는 振幅의 交番的인 saccade에 連續이 되었다.

이러한 不安定한 應答은 갈바노메터 位置가 飽和限界에 이르거나 그밖의 歪亂信號나 어떤 다른 入力이 應答을 中斷시킬 때까지 繼續되었다.

5. 結 論

外部的인 饋還루우프를 構成하여 얻어진 結果는 다음과 같다.

(1) 實效饋還利得을 減少시키는 正饋還이 加하여지면, 正常狀態에 到達하기까지 먼저의 振幅보다 작은 값으로 運動하고 $K=0$ 이면 開루우프 狀態가 되어 連續된 階段모양의 應答을 보이며, $K<0$ 이면 시스템은 不安定狀態로 突入하여 增加된 振幅의 運動狀態를 보였다.

(2) 實效饋還利得이 $1<K<2$ 에서는 負饋還 狀態가 되며, 應答은 먼저의 saccade보다 작은 크기로 交番的으로 發振하며, $K=2$ 이면 應答은 一定한 振幅을 가지고 發振하고, $K<2$ 이면 應答은 增加하는 振幅의 交番的인 saccade에 連續이 되었다.

(3) 結局 眼球制御系의 安定限界 實效饋還利得은 $0<K<2$ 이 됨을 알 수 있었다.

또한 同一한 饋還條件下에서 實驗을 繼續하다 보면,

被實驗者가 視標變位를 미리 豫測하여 應答의 振幅 약간 減少하는 傾向이 있었다.

앞으로 本 研究를 擴張하여 本 實驗에서 遂行하지 못했던 外眼筋肉내의 固有受容器에 의한 饋還經路와 中樞神經系 내의 遠心模寫에 의한 饋還經路를 動物實驗을 實施하므로서 이러한 生理學的인 饋還經路를 糾明하여 完全한 多重우우프制御系를 밝히는 것이 앞으로의 研究課題로 생각된다.

參考文獻

1. Fender, D.H., Nye, P.W.: An Investigation of the Mechanism of Eye Movement Control. *Kybernetik* 1, 81~88 (1961)
2. Stark, L., G. Vossius, and Yoing, L.R.: Predictive Control of Eye Tracking Movements. *Trans, IRE Professional Group on Human Factors in Electronics, HFE-3*, 52~56 (1962)
3. Robinson, D.A.: The Mechanics of Human Smooth Pursuit Eye Movement. *J. Physiol*, 180, 569~591 (1965)
4. Guido Palmieri, Maria Scotto, Oliva G.A.: Image Converter Pattern Tracker for Variable Retinal Feedback Experiments. *Kybernetik* 15, 193~202 (1974)
5. 朴相禧, 南文弦: 光電모니터에 의한 眼球運動 기록法의 研究. 大韓電氣學會, 1974年, 學術發表會.
6. 朴相禧, 南文弦: 2次元 眼球運動 測定 시스템에 관한 研究, 大韓電氣學會誌, 第24卷, 第3號 (1975)
7. Rita, P.B., Collins, C.C., Hyde J.E.: The Control of Eye Movements; Academic Press, New York, 349~360 (1971)
8. Reiss, R.F.; Neurol Theory and Modeling, Stanford Univ, California. 306~324 (1964)
9. Stark, L.R.; Neurological Control Systems Studies in Bioengineering, Plenum Press, 236~295 (1968)
10. J.A. Cadzow, H.R. Martens; Discrete-Time and Computer Control Systems; Prentice-Hall. 203~242 (1970)