船舶自動操舵系의 最適調整에 關하여

李 哲 榮

On the Optimum Adjustment of the Automatic Steering System of the Ship

Lee Cheolyeong

〈目 次〉

Abstract

This paper deals with the optimum adjustment of the automatic steering system to make the system stable and get the maximum efficiency in the auto piloting of ships.

Consequently, the problem refers to the selection of the values of the auto pilot parameters, and the values vary with the conditions of ships concerned, that is, the maneuvering indicies.

In general, ships' officers have tried to set these parameters by their subjective judgements based on the track pattern of the course recorder.

Since it is rude and vague to obtain the optimum values by such a method, it is necessary to determine these by a more theoretical method.

In this paper, by means of making the use of the frequency response method, the author obtained the optimum values for several typical values of the maneuvering indicies of the ships in service, and discriminated the propriety of the system stability by adopting a simulator.

The use and method of computer for the calculation process is also suggested here to make the tedious calculation of this method practical on board for the introduction of electronic computer on merchant ships in the future.

Since this paper treated the ships under still water and air, the nonlinear factors of the auto pilot system are not covered.

1. 序 論

이 論文의 題目은 [illegible] 船舶自動操舵系의 最適調整에 [illegible]

自動操舵裝置는 1920年代에 Sperry社에 [illegible] 商品化 [illegible] 自動操舵裝置 [illegible] 船舶自動操舵系 [illegible] 保持하며 最大의 [illegible] 問題에 [illegible]

1922年에 minorsky [illegible] 自動[illegible] [illegible] 速度[illegible]方式의 代身에 [illegible]·比例[illegible]方式의 [illegible]

1949年에 Schiff [illegible] 比例[illegible]方式[illegible] 比例[illegible] Rydill [illegible] 自動操舵에 [illegible]

[illegible] Yawing, 安定[illegible]

題를 取扱, 檢討하고 있다.

1968年에 英國의 船長 Welpter[6]는 實船舶의 運航에 있어서 自動操舵機의 調整係數를 理論的으로 調整할 必要가 있음을 力說한 바가 있으나 이 問題에 對한 實質的인 硏究가 거의 없었으므로 이 論文에서는 이러한 問題를 取扱하여 自動操舵機의 比例·微分調整係數를 理論的으로 調整하는 方法을 硏究하고 그 結果를 實船에 應用하고자 한다.

船舶自動操舵系의 安定性은 船舶의 積貨狀態 및 自動操舵機의 比例·微分調整係數에 密接한 聯關性을 갖고 있다. 그러므로 주어진 積貨狀態下에서 船舶自動操舵系를 가장 安定한 狀態로 維持하게 하는 調整係數 即 最適値를 求해서 調整을 行할 必要가 있고, 同時에 效果的인 調整을 行하기 위해서는 現用自動操舵機의 設定된 調整係數의 可變範圍에 對해서 檢討를 行할 必要가 있다.

本論文에서는, 船舶의 주어진 操縱性能指數에 對해 周波數應答法을 使用하여 Nichols 線圖 또는 計算機로 最適値를 理論的으로 求하고 最適値가 存在하는 範圍는 各 船舶의 特性에 따라 다르다는 事實을 調査함으로써 現用自動操舵機의 調整係數의 調整範圍에 對한 檢討를 行했으며 또한 船舶自動操舵機의 最適値에 對한 系의 安定性與否를 Simulator로써 調査하였다.

自動操舵機에는 比例·微分調整 等의 線形要素와 天候調整, 舵角制限 等의 非線形要素가 包含되어 있으나 外亂이 없는 海上狀態下에서 小角度變針(10°以內)한다는 條件下에 船舶自動操舵系의 變針性을 取扱하므로 非線形要素는 다루지 않는다.

2. 船舶自動操舵系의 傳達函數

<序 言>

船舶이 自動操舵로 航海할 境遇에 船舶自動操舵系를 構成하는 要素로서는 自動操舵機, 操舵機, 舵 및 船舶, Compass 等이 있다.

이러한 各要素에 入力이 加해지면 要素들이 動作하여 出力이 나오게되므로 傳達函數方式을 使用하여 船舶自動操舵系를 表示하기로 한다.

〈2·1〉 船舶의 傳達函數

操舵에 依한 船舶의 運動方程式은 다음의 線形微分方程式으로 表示할 수 있다.[1][2][4][9][11]

$$T_1 \cdot T_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + (T_1 + T_2)\frac{d\theta}{dt} + \theta = T_5 \cdot \delta + T_3 \cdot T_5 \frac{d\delta}{dt} \quad \cdots\cdots (2\text{-}1)$$

(2-1)式을 Laplace 變換하면 船舶의 傳達函數, $G_3(S)$는

$$G_3(S) = \frac{\theta(S)}{\Delta(S)} = \frac{T_5(1+T_3 S)}{(1+T_1 S)(1+T_2 S)} \quad \cdots\cdots (2\text{-}2)$$

로 表示된다.

〈2·2〉 操舵機 및 Compass의 傳達函數

現在 使用되고 있는 操舵機는 大部分이 油壓式이며 自動操舵機 또는 Telemotor의 出力인 機械的變位를 入力으로 하고 舵軸의 回轉角度를 出力으로 하는 位置 Servo 機構이다. 이 境遇에 있어서 操舵角速度와 이를 驅動하는 有效流量 사이에는 다음의 關係가 成立한다.[1][1][11]

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{T_4}(\delta_a - \delta) \quad \cdots\cdots (2\text{-}3)$$

따라서 傳達函數, $G_2(S)$는

$$G_2(S) = \frac{\Delta(S)}{\Delta_a(S)} = \frac{1}{1+T_4 S} \quad \cdots\cdots (2\text{-}4)$$

로 된다.

또 Compass에 나타나는 角, θ_0은 旋回角速度 $\dot{\theta}$의 積分된 値, $\theta_0=\int_{0+}^{t}\dot{\theta}dt$로서 表示되므로 Compass의 傳達函數, $G_4(S)$는

$$G_4(S)=\frac{\theta_0(S)}{\dot{\theta}(S)}=\frac{1}{S} \quad \cdots\cdots(2\text{-}5)$$

이다.

〈2·3〉 自動操舵機의 傳達函數

最近의 自動操舵機에 採用되고 있는 比例·微分制御方式에 있어서 rate generator를 使用한 方式에서는 命令舵角, δ_a는

$$\delta_a=T_p(\theta+T_d\cdot\dot{\theta}) \quad \cdots\cdots(2\text{-}6)$$

로 주어지고 Trolley motor를 使用한 方式에서는

$$\delta_a=T_p\theta+T_d\dot{\theta} \quad \cdots\cdots(2\text{-}7)$$

로 주어지며, (2-7)式을 變形하면

$$\delta_a=T_p\cdot(\theta+T_d/T_p\cdot\dot{\theta}) \quad \cdots\cdots(2\text{-}8)$$

로 되어 (2-6)式과 그 形態가 같아지므로 (2-6)式을 그 代表되는 式으로 두어 傳達函數, $G_1(S)$를 求하면

$$G_1(S)=\frac{\Delta_a(S)}{\theta(S)}=T_p(1+T_d\cdot S) \quad \cdots\cdots(2\text{-}9)$$

로 된다.

〈2·4〉 船舶自動操舵系의 block 線圖 및 傳達函數

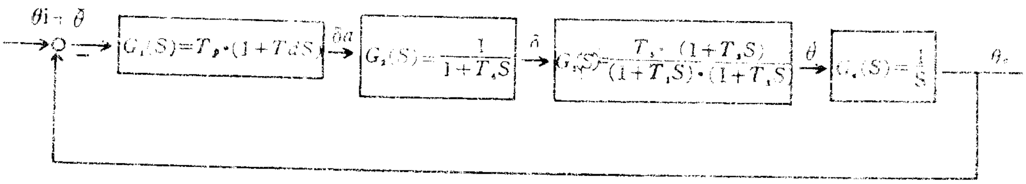
船舶自動操舵系는 以上의 各要素들이 cascade結合을 하고 있으므로 式 (2-2), (2-4), (2-5), (2-9)를 綜合하여 船舶自動操舵系를 block 線圖로 圖示하면 第1圖와 같고 船舶自動操舵系의 Open loop transfer function, $G(S)$는 式 (2-10)으로 되며

$$G(S)=\frac{T_3\cdot T_p\cdot(1+T_2S)\cdot(1+T_dS)}{S\cdot(1+T_1S)\cdot(1+T_3S)(1+T_4S)} \quad \cdots\cdots(2\text{—}10)$$

Closed loop transfer function, $C(S)$는 式(2-11)로 된다.

$$C(S)=\frac{G(S)}{1+G(S)}$$

$$=\frac{T_3\cdot T_p(1+T_2S)\cdot(1+T_dS)}{S\cdot(1+T_1S)\cdot(1+T_3S)\cdot(1+T_4S)+T_3\cdot T_p(1+T_2S)\cdot(1+T_dS)} \quad \cdots\cdots(2\text{—}11)$$



第 1 圖

船舶自動操舵系의 block 線圖

3. 最適値의 計算

〈序 言〉

船舶自動操舵系에 [illegible](希望針路)을 주었을 때의 그 動作狀態의 安定度는 船舶에서 Course recorder의 航跡을 調査함으로써 大略은 判別할 수 있으나 모든 比例 · 微分調整係數에 對해서 Course recorder의 航跡으로 일일히 그 安定度를 調査한다는 것은 容易한 일이 아니다. 따라서 理論的으로 安定度를 判別할 必要가 있으며 制御理論을 導入하면 所期의 成果를 거둘 수가 있다.

Huriwitz Stability Criterion을 使用하여 船舶自動操舵系의 安定度를 調査하고 周波數應答法의 一種인 M_P 値法을 利用하여 Nichols 線圖와 計算機에 依해 가장 安定度를 좋게하는 比例 · 微分調整係數値 即 最適値를 求하고자 한다.

〈3·1〉 安定度의 判別

制御理論에서는 制御系의 安定度를 判別하는 方法이 여러가지가 있으나 船舶自動操舵系의 境遇에 있어서는 Huriwitz Stability Criterion을 使用하면 安定度를 좋게하는 比例 · 微分調整係數의 範圍를 直觀的으로 檢討할 수 있어서 便利하다.

各種船舶의 代表的인 例로서 第1表[1]와 같은 操縱性能指數들을 가진 船舶들에 對하여 安定度를 判別하고자 한다.

第 1 表

船舶	積貨狀態	操縱性能指數			
		T_1	T_2	T_3	T_5
T_f	滿載油槽船	90	10	25	0.07
C_f	滿載貨物船	45	6	10	0.08
C_b	空船貨物船	12	2	5	0.06

多數의 實例에 依해서 調査한 結果, 電動油壓操舵機의 時定數 T_5는 1.6~1.8程度이고 이 論文의 計算에는 모두 1.6을 使用했으며 比例調整係數, T_p는 그 調整範圍가 0.8~4이다[1].

(2-11)式에서 船舶自動操舵系의 特性方程式은

$$T_1 \cdot T_2 \cdot T_4 \cdot S^4 + (T_1 \cdot T_2 + T_2 \cdot T_4 + T_1 \cdot T_4) \cdot S^3 + (T_1 + T_2 + T_4 + T_5 \cdot T_p \cdot T_3 \cdot T_d) \cdot S^2 + (1 + T_5 \cdot T_p \cdot T_3 + T_5 \cdot T_p \cdot T_d) S + T_5 \cdot T_p = 0 \quad \cdots\cdots (3-1)$$

로 되고 (3-1)式은 S에 關한 4次方程式이므로 船舶自動操舵系의 安定度를 滿足하는 條件은 Huriwitz Stability Criterion에 依해 式 (3-2), (3-3), (3-4), (3-5)로 된다.

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} h_1 & h_2 & 0 & 0 \\ h_3 & h_4 & h_5 & 0 \\ 0 & h_1 & h_2 & 0 \\ 0 & h_3 & h_4 & h_5 \end{vmatrix} > 0 \quad \cdots\cdots (3-2)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} h_1 & h_2 & 0 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ 0 & h_1 & h_2 \end{vmatrix} > 0 \quad \cdots\cdots (3-3)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \end{vmatrix} > 0 \quad \cdots\cdots (3-4)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} h_1 \end{vmatrix} > 0 \quad \cdots\cdots (3-5)$$

위의 式에서 $h_1 = (T_1 \cdot T_2 + T_4 \cdot T_2 \cdot + T_1 \cdot T_4)$

$h_2 = (1 + T_5 \cdot T_p \cdot T_3 + T_5 \cdot T_p \cdot T_d)$

$h_3 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_4$

$h_4 = (T_1 + T_2 + T_4 + T_5 \cdot T_p \cdot T_3 \cdot T_d)$

$h_5 = T_5 \cdot T_p$

이다.

式 (3-2), (3-3), (3-4), (3-5)를 使用하여 第1表의 各船舶들에 對해서 安定度를 滿足하는

[illegible] 式 (3-6)과 같다.

$\Delta_1 = 1060 > 0$

$\Delta_2 = 1781.2 \cdot T_p \cdot T_d - 2520 T_p + 106256 > 0$

$$\Delta_3 = 1060(101.6 + 103.6 T_p + 19.53 T_p \cdot T_d + 3.0625 T_p^2 \cdot T_d + 0.1225 T_p^2 \cdot T_d^2) > 0 \quad \cdots\cdots (3-6)$$

$\Delta_4 = \Delta_3 + 78652 \cdot T_f > 0$

C_f값은 式(3-7)로 된다.

$\Delta_1 = 351.6 > 0$

$\Delta_2 = 216.72 T_p \cdot T_d - 345.16 T_p + 18062.16 > 0$

$$\Delta_3 = 351.6(52.6 + 5.008 T_p \cdot T_d + 0.64 T_p^2 \cdot T_d + 0.064 T_p^2 \cdot T_d^2 + 13.952 T_p) > 0 \quad \cdots\cdots (3-7)$$

$\Delta_4 = \Delta_3 + 351.6 - 28.488 \cdot T_f > 0$

C_b값은 式(3-8)로 된다.

$\Delta_1 = 46.4 > 0$

$\Delta_2 = 11.616 T_p \cdot T_d - 11.52 T_p + 685.44 > 0$

$$\Delta_3 = 46.4(15.6 + 1.896 T_p + 1.236 T_p \cdot T_d + 0.09 T_p^2 \cdot T_d + 0.018 T_p^2 \cdot T_d^2) > 0 \quad \cdots\cdots (3-8)$$

$\Delta_4 = \Delta_3 + 46.4 - 2.784 \cdot T_f > 0$

式 (3-6), (3-7), (3-8)에서 [illegible] T_p, T_d의 未知數로 包含되어 있어서 T_f, C_f C_b 値들의 安定度를 滿足하는 範圍를 求하는 것은 T_p, T_d의 範圍를 調査함으로써 可能해진다.

自動操舵機에서는 $T_p = 0.8 \sim 4$, $T_d > 0$이므로 T_p, T_d는 同符號이고, 特히 $T_d \geq 0$의 條件에 對하여는 T_f, C_f, C_b 값 全部가 安定한 系를 形成하고 있음을 알 수 있다. 따라서 如何한 調整係數値로 調整하더라도 船舶은 安定한 系를 形成하기는 하지마는 船舶에서 自動操舵로 變針時에 가장 바람직한 것은 安定한 狀態를 維持하면서 短時間内에 希望針路로 찾아 들어갈 수 있을 程度의 充分한 安定度를 가지도록 調整係數를 정하는 것이므로 이러한 條件을 滿足하는 調整係數値 即 最適値를 求할 必要가 있다.

(3·2) M_p 値에 依한 最適値의 計算

3·2·1 Nichols 線圖에 依한 最適値의 計算

船舶의 自動操舵로 航海中 一定角度로 變針時에 充分한 安定度를 가진 때에는 그 過渡應答은 어느 程度의 Overshoot를 가진 後에 良好한 減衰性을 가져서 短時間内에 希望針路로 찾아 들어가는 過程을 나타낸다. 따라서 恒常 充分한 安定度를 가지고 빠른 時間内에 希望針路로 찾아 들어가게 하기 위해서는 이러한 條件을 滿足시키는 調整係數들을 求해서 調整을 해야 한다.

船舶自動操舵系를 充分히 安定한 狀態로 維持하도록 하는 調整係數値 即 最適値를 求하기 위해서는 [illegible] 船舶自動操舵系의 Open loop transfer function, $G(s)$의 周波數應答, $G(j\omega)$의 軌跡을 Bode 線圖에 그리고 $G(j\omega)$의 Phase margin과 Gain margin에 依하여 最適値를 求할 수도 있으나 이 方法에 依하려면 모든 調整係數들에 對해 일일이 Phase margin과 Gain margin을 求하고 그 中에서 가장 適合한 値들을 決定해서 最適値로 選擇해야 하는 難點이 있으므로 船舶自動操舵系의 設計에는 이 方法 代身에 M_p値에 의해서 最適値를 求하는 것이 매우 便利하다.

M_p 値란 系의 Closed loop transfer function, $C(s)$의 周波數應答, $C(j\omega)$의 各周波數 ω에 대한 振

對値中 最大値를 db로 表示한 것으로 特히 變針時의 船舶自動操舵系의 境遇처럼 系가 Unity feedback system인 때에는 Open loop transfer function의 周波數應答 $G(j\omega)$의 Vector軌跡을 Nichols線圖에 圖示함으로써 直接 M_p 値를 얻을 수 있는 利點이 있다.

一般的으로 M_p値는 $1.1\sim1.6(db)$ 程度이면 系는 安定하다고 할 수 있으나 充分한 安定度를 가지기 위해서는 $M_p=1.3(db)$이 가장 바람직한 値이다. 따라서 船舶自動操舵系의 各 調整係數에 對한 $G(j\omega)$의 Vector 軌跡을 Nichols線圖에 그려서 $M_p=1.3$曲線에 接하는 軌跡의 調整係數値를 읽으면 이것이 바로 最適値가 될 것이나 이렇게 하면 모든 調整係數들에 對해서 일일히 Vector 軌跡을 그려야 하므로 매우 複雜하다. 그러므로 調整係數 T_p, T_d項이 $G(j\omega)$에 미치는 영향을 調査하고 基準이 되는 Vector軌跡에서 그 영향을 考慮하여 $M_p=1.3$ 曲線에 接하는 調整係數를 찾는다면 容易하게 最適値를 求할 수 있을 것이다.

T_p와 T_d項이 $G(j\omega)$에 미치는 영향을 考察해 보면 T_p는 Phase angle에는 關係없이 Gain에만 영향을 미치고 T_d項은 主로 Phase angle에만 關係하여 Gain에 미치는 영향은 無視할 程度이다. (即 周波數, ω를 $0.01\sim0.1$, T_d를 $1\sim5$까지 變化시킨 때에 T_d項, $1+j\omega\cdot T_d$의 Gain은 $0.043\sim0.97(db)$ 程度이다)

이러한 關係를 利用하여 T_p가 $1\sim4$로 變할 때에 그 各各에 대하여 T_d를 $0\sim5$까지 變化시켜서 T_d項의 變化가 $G(j\omega)$의 Phase margin에 미치는 變化量을 Templator와 Bode線圖에 依해 求하고 T_d의 變化量으로 나누어서 T_d의 單位變化量에 對한 $G(j\omega)$의 Phase margin의 平均(位相角) 變化量을 求하면 第2表와 같다.

第2表

比例調整係數 T_p	T_f	C_f	C_b
	T_d의 單位變化量이 phase margin에 미치는 平均位相角의 變化量		
1	1.7°	2.3°	3.0°
2	2.5°	3.5°	4.4°
3	2.9°	4.3°	5.3°
4	3.2°	5.2°	5.6°

따라서 $T_p=1, 2, 3, 4$, $T_d=0$인 境遇의 $G(j\omega)$의 Vector軌跡을 Nichols線圖에 그리고 이 軌跡들을 基準으로 하여 基準 Vector 軌跡들을 $M_p=1.3$ 曲線에 接하도록 平行移動한 後 그에 相應하는 位相角變化量을 調査하고, 第2表를 使用하면 最適値의 組合을 簡單하게 求할 수 있다.

T_f, C_f, C_b船에 있어서 第1表에 例示한 積貨狀態下의 $T_p=1, 2, 3, 4$, $T_d=0$인 境遇의 Vector軌跡은 第2圖와 같다

一例로, C_f船의 $T_p=1$, $T_d=0$인 境遇에, $M_p=1.3$인 曲線에 接하도록 하는 데에 必要한 位相角의 變化量은 12.5°이고 第2表에 依하면 그 變化量에 該當하는 T_d의 値는 大略 5로서 $T_p=1$, $T_d=5$가 最適値이다.

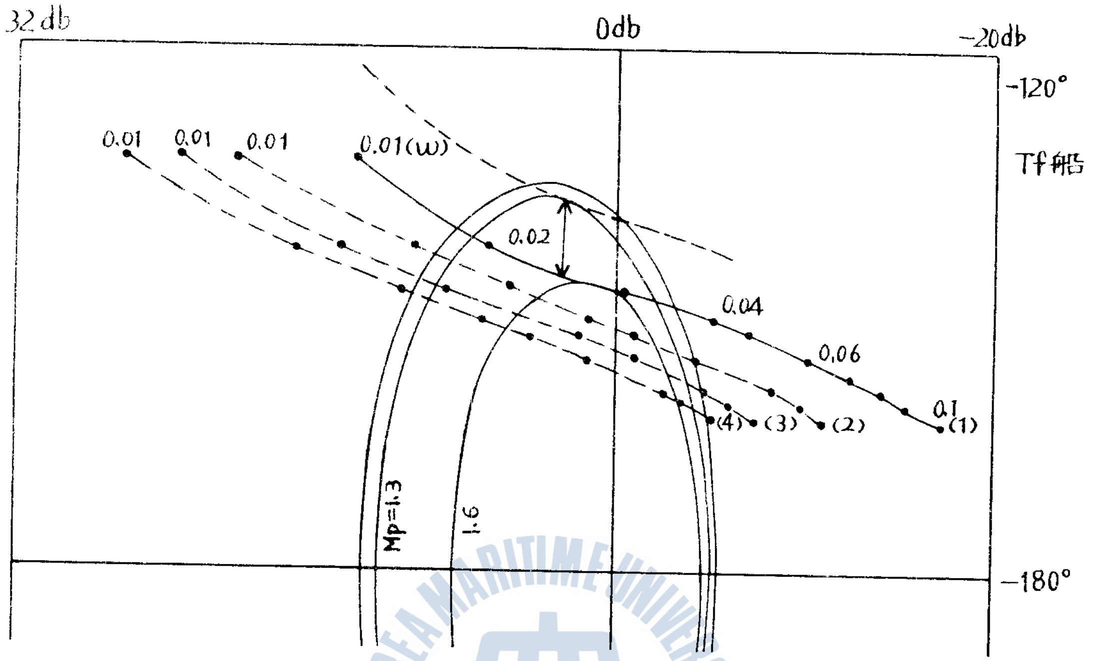
第 3 表

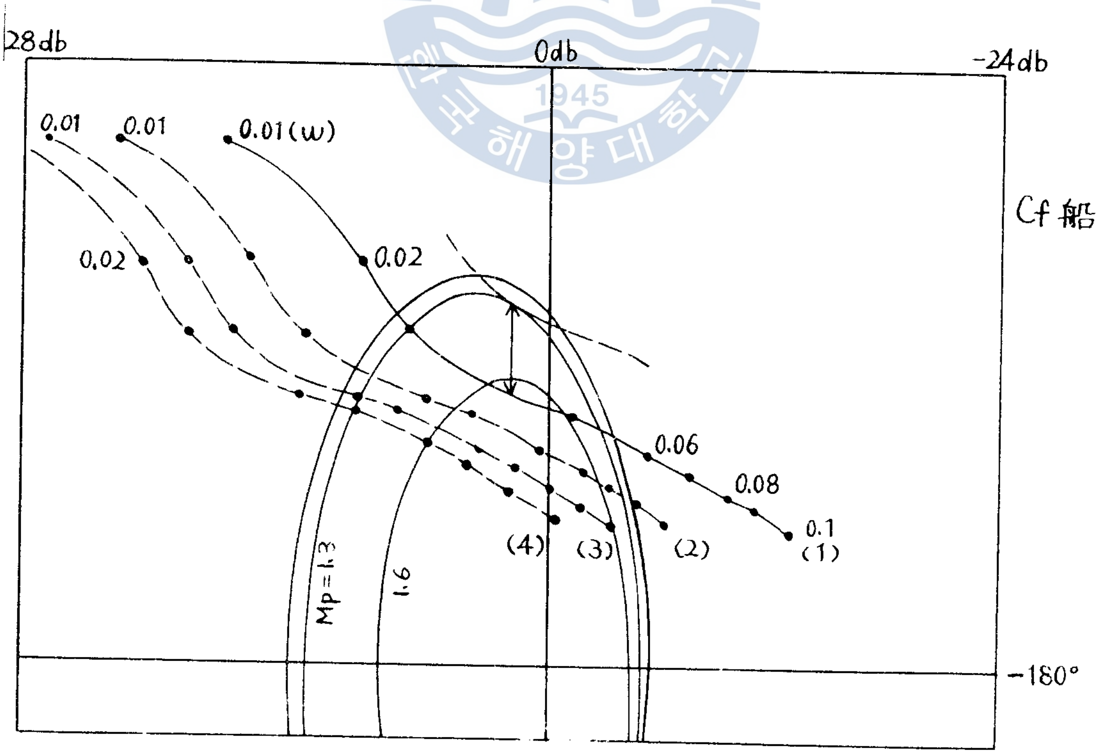
T_p	T_d		
	T_f	C_f	C_b
1	6	5	—
2	6	5	—
3	6	5	0
4	6	5	1

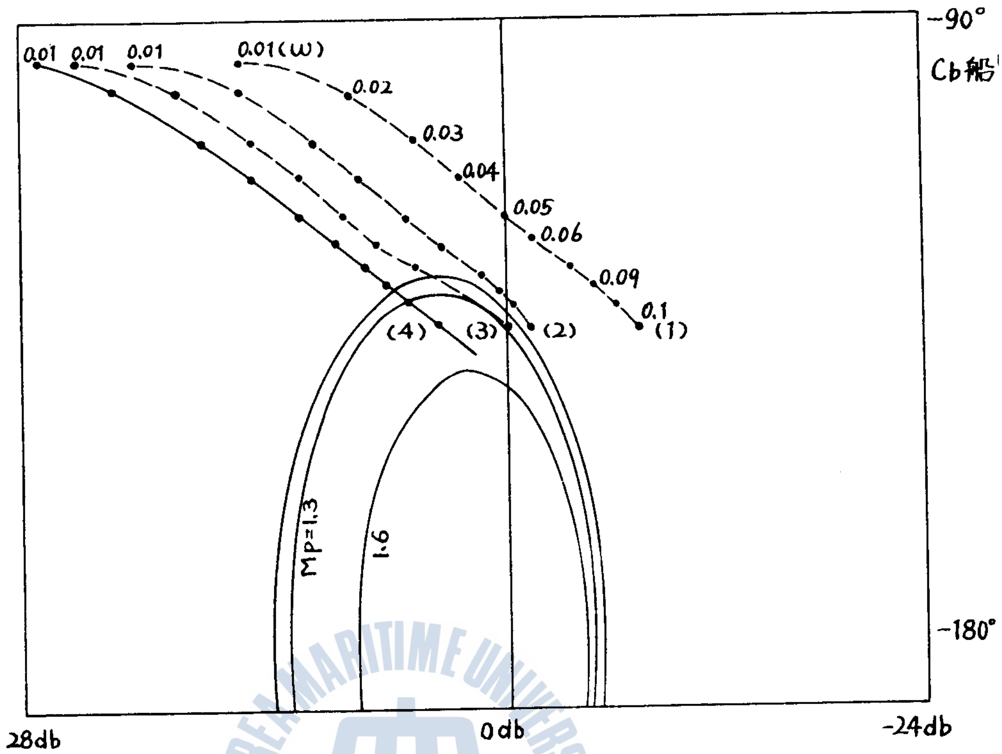
同一한 方法으로 各船舶의 最適値를 求하면 第3表와 같다. 各船舶은 第1表의 積貨狀態下에서는 第3表의 最適値中에서 適當한 것을 選擇함으로써 充分히 安定한 狀態의 變針을 할 수가 있다.

〈3·3·2〉 Digital Computer에 依한 最適値의 計算

〈3·3·1〉에서는 第1表에 주어진 積貨狀態에 對한 最適値를 Nichols線圖에서 求했으나 船舶의 積貨狀態는 恒常 一定하다고 할 수 없으며 積貨狀態가 變함에 따라 操縱性能指數들도 이에 相應해서 變하게 된다. 그러므로 積貨狀態의 變化에 따라 주어지는 새로운 操縱性能指數들을 使用하여 每 境遇


32db
0db
-20db
-120°
Tf 船
0.01
0.01
0.01
0.01(ω)
0.02
0.04
0.06
0.1
(1)
(2)
(3)
(4)
Mp=1.3
1.6
-180°


28db
0db
-24db
Cf 船
0.01
0.01
0.01(ω)
0.02
0.02
0.06
0.08
0.1
(1)
(2)
(3)
(4)
Mp=1.3
1.6
-180°



第 2 圖

$T_p=1(1)^+$, 2(2), 3(3), 4(4), $T_d=0$인 境遇의 各船舶의 Vector 軌跡

에 對한 最適值를 Nichols 線圖에서 求해야 할 것이나 이러한 計算에는 많은 時間과 努力이 必要하므로 計算機를 使用하여 M_p值의 定義에서 直接 每 境遇에 對한 M_p值를 求해서 等 $M_p=1.3$ 曲線을 그리면 쉽게 最適值의 組合을 얻을 수 있다.

船舶自動操舵系의 Closed loop transfer function의 周波數應答은 $C(j\omega)=\dfrac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)}$ 이므로, db로 표시하면

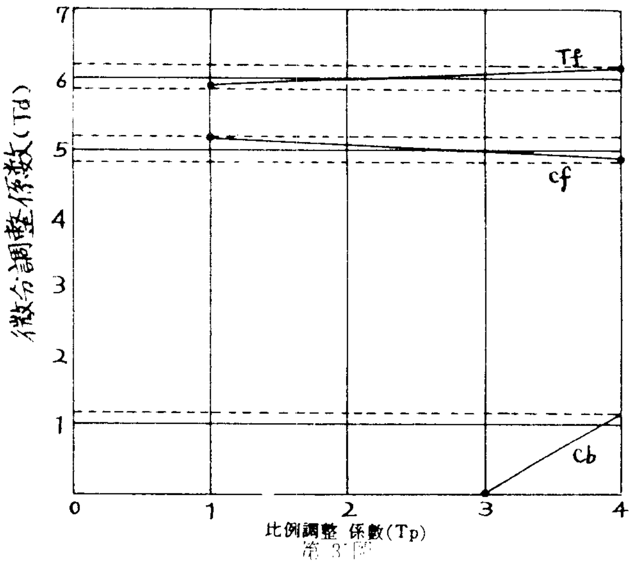
$$20\log|C(j\omega)|=20\log|G(i\omega)|-20\log|\{1+G(j\omega)\}| \quad \cdots\cdots(3-9)$$

로 되고 이것은 $T_p=1\sim4$(0.1의 간격으로 變化시킴)의 各各에 對해 $T_d=1\sim30$(0.1의 간격으로 變化시킴), $\omega=0.01\sim0.4$(0.0001의 간격으로 變化시킴)로 變化시켜서 每調整係數의 組合에 對한 M_p值를 求하도록 Programming을 하고 第1表를 data로 하여 求한 M_p值들을 整理하여 等 $M_p=1.3$ 曲線을 그리면 第3圖와 같다.

Nichols 線圖에 依해서 最適值를 求할 때에는 T_d項이 gain에 미치는 영향이 너무 작아서 이를 無視했고 또한 T_d의 變化에 對한 位相角의 變化量을 平均해서 使用했기 때문에 第3圖의 結果와는 若干의 差異가 있으나 實際로 最適調整을 行하는 데에 있어서는 T_d值를 0.1單位로 區分해서 調整을 한다는 것이 거의 不可能하므로 現用自動操舵機에 實用하는 데에는 全혀 支障이 없을 것이다.

第3圖는 $M_p=1.3$이 되는 모든 調整係數의 組合을 表示한 것이므로 簡單하게 最適值를 求할 수 있고 $M_p=1.3$을 滿足하는 T_d의 範圍(點線으로 表示)를 明確히 求할 수 있다.

+ (　　)속의 數字는 第2圖中의 (　　)속의 數字를 表示한다.



第 3 圖

等 $M_r=1.3$曲線

따라서 [illegible] 수 있는 各積貨狀態에 對해서 等 $M_r=1.3$ 曲線을 그리면 各 船舶에서 [illegible] T_f의 [illegible] 수 있으며 自動操舵機의 製作時에 參酌하면 各船舶의 特性에 맞는 T_d의 [illegible] 自動操舵機를 製作할 수 있다.

模試的인 [illegible] 可能하다면 T_p에 對해서도 同一한 理論을 適用할 수 있을 것이다.

T_f, C_f, C_b船에 있어서, 주어진 積貨狀態下에서의 等 $M_r=1.3$ 曲線을 滿足하는 微分調整係數의 [illegible] $T_p=1\sim4$에 對하여 T_f船은 5.5~6.5, C_f船은 4.5~5.5이고, C_b船은 $4\geq T_p\geq3$에서 0~1.5이다.

4. Simulator에 依한 過渡應答波形의 檢討

〈序　　言〉

船舶이 航海中 船舶自動操舵系에 變針入力(希望針路: θ_i)을 加했을 때에 나타내는 過渡應答의 [illegible]形을 檢討함으로써 系의 安定度를 調査할 수 있다.

外亂을 考慮하지 않을 때의 船舶自動操舵系의 基本方程式은

$$\theta_o(s)=\frac{G(s)}{1+G(s)}\cdot\theta_i(s)$$

$$=\frac{T\cdot T_p\cdot(1+T\,S)\cdot(1+T_d\cdot S)}{S\cdot(1+T\,S)\cdot(1+T\,S)\cdot(1+T\,S)+T\cdot T_p\cdot(1+T\,S)\cdot(1+T_d\cdot S)}\cdot\theta_i(s)$$

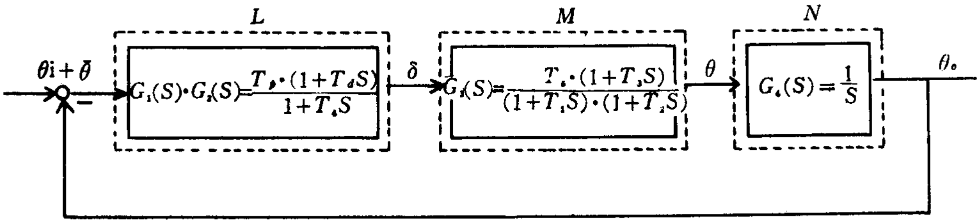
으로 된다.

[illegible] Step function이므로 $\theta_i(s)=1/S$이고, (4−1)式의 特性方程式의 根을 求함으로써 過渡應答의 波形을 解析할 수 있으나, 이러한 計算은 筆算으로는 거의 不可能하므로 analog computer를 使用하여 船舶自動操舵系의 Simulator를 만들고 이 Simulator에 의해 過渡應答波形을 檢討한다면 [illegible] 便利하다.

4.1 船舶自動操舵系의 Simulator

船舶自動操舵系의 Simulator를 便利하게 作成하기 위해서 第1圖를 若干 變形하면 第4圖와 같이 [illegible]

示할 수 있다



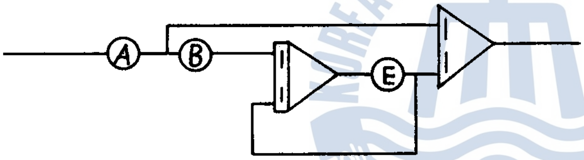
第 4 圖

船舶自動操舵系의 傳達要素들을 自動操舵機와 操舵機, 船舶, Compass의 세 部分으로 區分하여 各各 L, M, N이라 代稱하고 各 部分에 對하여 Simulation을 行하면,

L部分에서의 傳達函數는

$$G_1(S)\cdot G_2(S)=\frac{T_p(1+T_d\cdot S)}{1+T_4S}=\frac{T_p\cdot T_d}{T_4}\cdot\left(1+\frac{T_4/T_d-1}{1+T_4S}\right) \quad \cdots\cdots(4-2)$$

로 變形할 수 있고, $\frac{T_p\cdot T_d}{T_4}=A$, $(T_4/T_d-1)=B$, $1/T_4=E$라 두면 L部分의 Simulation은 第5圖로 된다.



第 5 圖

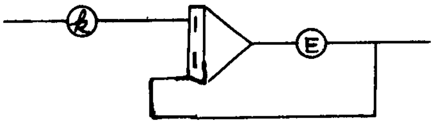
係數 B는 T_d의 値에 따라서 負의 값을 取할 수도 있으므로 이 點을 勘案하여 符號變換器를 使用해야 할 것이다.

特히 $T_d=0$이 되는 境遇에는 L部分의 傳達函數는

$$G_1(S)\cdot G_2(S)=\frac{T_p}{1+T_4S} \quad \cdots\cdots(4-3)$$

로 되어 $T_p=K$라 두면

Simulation은 第6圖로 된다.



第 6 圖

M部分에서의 傳達函數는

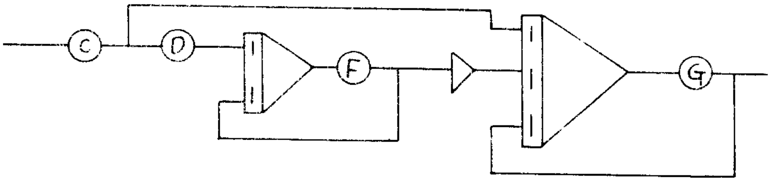
$$G_3(S)=\frac{T_5\cdot(1+T_3S)}{(1+T_1S)\ (1+T_2S)}$$

$$=\frac{T_3\cdot T_5}{T_1}\cdot\left(1+\frac{T_1/T_3-1}{1+T_1S}\right)\cdot\left(\frac{1}{1+T_2S}\right) \quad \cdots\cdots(4-4)$$

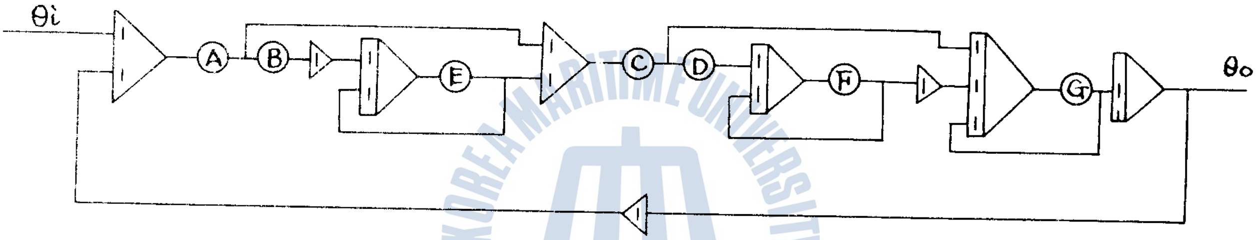
로 變形할 수 있고, $\frac{T_3\cdot T_5}{T_1}=C$, $(T_1/T_3-1)=D$, $1/T_1=F$, $1/T_2=G$라 두면 M部分의 Simulation은 第7圖로 된다.

그리고 N部分은 單純한 積分이므로 積分器를 하나 使用하면 될 것이다.

위의 Simulation을 綜合하여 T_f, C_f, C_b 船의 境遇의 係數值, A, B, C, D, E, F, G를 計算하고 이 値들에 依해서 符號變換器와 倍數值를 適當히 使用하여 一般的인 境遇의 船舶自動操舵系의 Simulator를 作成하면 第8圖와 같다.



第 7 圖



第 8 圖
船舶自動操舵系의 Simulator 結線圖

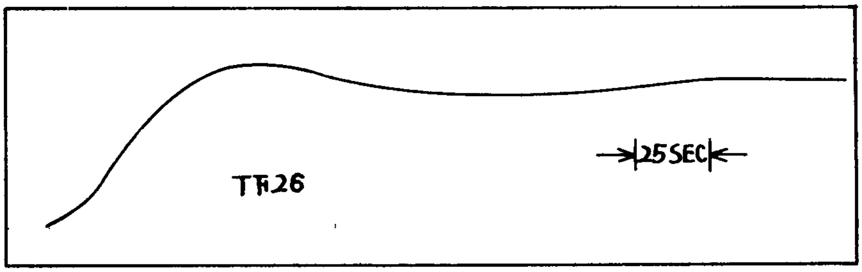
〈4·2〉 最適值에 對한 過渡應答波形의 檢討

第8圖에 圖示한 船舶自動操舵系의 Simulator를 使用하여 各 船舶의 最適值에 對한 過渡應答波形과 最適值가 아닌 調整係數에 對한 過渡應答波形을 求하여 第9圖에 보였다.

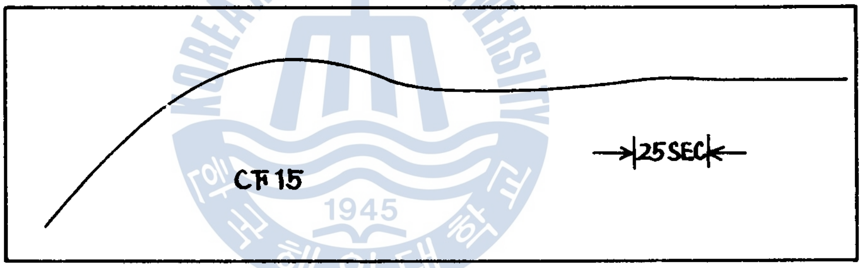
T_f船에 있어서, 最適值 $T_p=2.3$, $T_d=6$과 任意의 値 $T_d=3$, $T_d=5$인 境遇의 過渡應答波形을 比較하면 $T_p=3$, $T_d=5$인 境遇가 最適值의 境遇보다 最大 Overshoot의 量이 크고, 希望針路로 正確히 찾아 들어가는 데에 所要되는 時間이 많음을 알 수 있고, C_f船의 最適值 $T_p=1.3$, $T_d=5$. 와 任意의 値 $T_p=3$, $T_d=1$인 境遇에 있어서도 T_f船과 同一한 結論을 내릴 수 있다.

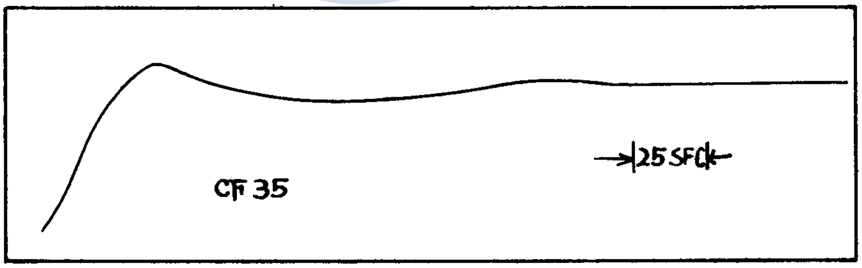
C_s船에 있어서는 最適值 $T_p=3$, $T_d=0$인 境遇는 任意의 値$T_p=2$, $T_d=0$인 境遇와 最大 Overshoot의 量은 비슷하나 減衰性이 굉장히 좋아서 훨씬 短時間內에 希望針路로 찾아 들어감을 알 수 있다.

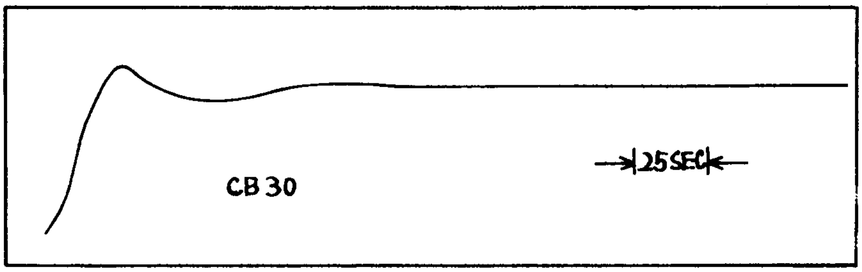
따라서 第9圖의 全波形은 모두 最大 Overshoot의 量이 入力値의 22% 以內이고 모두 安定한 波形을 보이고 있으며, 特히 最適值의 境遇에는 다른 境遇보다 短時間內에 希望針路로 固定되므로 變針時의 振動으로 起因되는 不必要한 航路의 延長을 最小限度로 줄이고 있다.

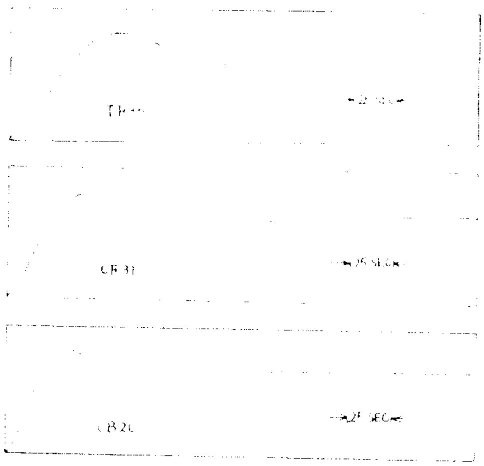

TF26
25 SEC


TF36
25 SEC


CF15
25 SEC


CF35
25 SFC


CB30
25 SEC



第 9 圖 [illegible]

5. 結　　論

[illegible] M_r [illegible] Nichols [illegible] Sperakon [illegible] 結論 [illegible] 時間 [illegible] 自動操舵 [illegible] 特性 [illegible] 實驗 [illegible] [illegible]

[illegible] 自動操舵 [illegible] $M_r = 1.3$ [illegible] 自動操舵의 [illegible] 特定 [illegible] 調整係數의 [illegible] 補償 [illegible] 特性 [illegible] 것이다.

記　號　說　明

[illegible]

δ ：實際舵角 [illegible]

δ_0 ：命令舵角 [illegible]

$\frac{d\delta}{dt}$ ：[illegible]

θ ：[illegible]

t ：[illegible]

$T_1 \cdot T_2$ ：[illegible] (time constant)

T_3 ：[illegible]

$\frac{1}{T_4}$ ：[illegible] $\delta_0 - \delta$ [illegible] $\frac{d\delta}{dt}$ [illegible]

T_6 ：[illegible] (gain)

θ_o : 實針路
θ_i : 希望針路(入力針路)
T_p : 自動操舵機의 比例調整係數
T_d : 自動操舵機의 微分調整係數
$\theta(S)=L\,[\theta(t)]$
$\Delta(S)=L\,[\delta(t)]$
$\theta_o(S)=L\,[\theta_o(t)]$
$\bar{\theta}(S)=L\,[\bar{\theta}(t)]$
$\Delta_o(S)=L\,[\delta_o(t)]$
$\bar{\theta}=\theta_i-\theta_o$
$G_1(S)$: 自動操舵機의 傳達函數
$G_2(S)$: 操舵機의 傳達函數
$G_3(S)$: 船舶의 傳達函數
$G_4(S)$: Compass의 傳達函數
$G\,(S)$: 船舶自動操舵系의 Open loop transter function
$C\,(S)$: 船舶自動操舵系의 Closed loop transfer function
$G(j\omega)$: $G(S)$의 周波數應答
$C(j\omega)$: $C(S)$의 周波數應答
$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$: Huriwitz stability criterion에서 定義되는 行列式의 記號
$A=\dfrac{T_p \cdot T_d}{T_4}$
$B=(T_4/T_d-1)$
$E=1/T_4$
$K=T_p$
$C=\dfrac{T_2 \cdot T_3}{T_1}$
$D=(T_1/T_2-1)$
$F=1/T_1$
$G=1/T_2$

參 考 文 獻

1. 野本謙作 : "自動操舵の安定性に就いて", 日本造船協會論文集 第104號, 1958.
2. 野本謙作, 田口賢士, 本田啓之輔, 平野 進 : "船の操縱性に就いて", 日本造船協會論文集 99號, 1957.
3. 前畑幸彌, 米澤弓雄 : "自動操舵の調整に關する理論的研究", 日本海技大學研究報告 第7號, 1962.
4. L. J. RYDILL: "A Linear theory for the steered motion of ships in waves", T. I. N. A., 1950.
5. I. SCHIFF and M. GIMPRICH: "Automatic steering of ships by proportional control". Trans. S. N. A. M. E.. 1949.
6. A. WELPTER: "Future requirements for autopilots at sea". Inst. of Nav., 1968.
7. THALER and BROWN: Analysis and Design of Feedback Control Systems, Mcgraw Hill Book Co., Ltd. 1960. pp. 209-229.
8. 前畑幸彌 : "自動操舵の硏究に關する最近の動向", 航海(特別號), 1968.
9. 元良誠三 : 船體運動力學, 共立出版株式會社, 1967, pp. 55—56.
10. 若山伊三雄 : アナログ計算入門, ゴロナ社, 1966, pp. 91—99.
11. 磯部孝 : サボおよび自動操縱操作, 共立出版株式會社, 1961, pp. 153—164.