ジョイスティックコントローラ装備船の離着棧操船能力—I. —ジョイスティックコントローラの構成—

遠藤 真*・小林 弘明**

Ability of Berthing Assisted by Joy Stick Controller—I. —Architecture of Joy Stick Control System—

Makoto ENDO and Hiroaki KOBAYASHI

Abstract

Joy stick controller, one of the most effective assistant in berthing, is studied from the point of view of navigator-ship collaborated operation. An architecture of joy stick control system of a ship equipped with a controllable pitch propeller, a Schilling rudder and a bow thruster is proposed and some simulation results are presented in this report.

The proposed joy stick controller is designed to remove interactions among manipulated variables, i.e. CPP pitch, bow thruster pitch and Schilling rudder angle, in order to ensure easy and safety operation. To implement this non-interaction control system, following two techniques are employed; linearization of mathematical model of maneuvering motions and decoupling by coupling controllers.

Simulation results are finally reported to show the successful operation along the idea.

1. はじめに

操船者にとって、離着棧操船が多くの負担を強いられる難しい操船であることは常識となっている。大きな横流れを伴う低速の船体運動の制御と多くの人手を要する組織的行動の統轄を、余裕の少ない環境下で、同時に実施しなくてはならないことが、離着棧操船時の操船者負担を大きなものにしてしているのである。簡便で確実な離着棧操船は、操船者負担の軽減のみならず、安全確保の点からも重要であり、特に、短い航海で出入港を繰り返す運航形態となる船舶では強く求められている。

舵、プロペラ回転数等の操作手段の複雑な組合せを意識すること無く、要求する船体運動を指令でき、人を介在せずに実行に移すことが可能となれば、前述の離着棧操船の困難さの主因を除去し、簡便で確実な離着棧操船を実現することになる。この考えに基づき、試みられているものに離着棧操船用ジョイスティックコントローラの開発がある。

ジョイスティックコントローラを用いた一人の操船者による安全で確実な離着棧操船を目指すことは、省力化の意味も併せ、離着棧操船の抱える問題の有力な解決策である。しかし、どのような機能を持てば良く、どのように使われるのか、また、どの程度の効果があるのか等のジョイスティックコントローラによる離着棧操船の基本的な解析、評価が実施されていないのが実状である。

著者等は、CPP プロペラ、バウスラストとシリングラダーを装備した船舶を対象として、ジョイスティックコントローラを用いた離着棧操船による操船者の操船能力の向上と操船負担の軽減の定量的評価を目指した調査研究を試みてゐる。これらの評価を実施する前提条件と言えるものに、ジョイスティックコントローラ自体の能力がある。著者等は、対象船舶の有する操作系によるジョイスティックコントローラ

* 正会員 富山商船高等専門学校 (〒933-02 富山県新湊市海老江練合 1-2)

** 正会員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

ラの構成とシミュレーションによる検討結果を得ることができたので、本研究の第 1 報として報告するものである。

2. 離着岸時の船舶操縦系とジョイスティックコントローラ

離着岸時の船舶操縦系の構成は図 1 に示すものである。この図に基づき、離着岸操船の特徴とジョイスティックコントローラの必要性について検討する。

一般的な操船は、主機回転数またはプロペラピッチと舵角を操作量として、前進速度と回頭角速度のみを制御するものである。離着岸操船は、横移動速度と前進速度を制御する斜航、横移動速度のみの横移動、回頭角速度のみのその場回頭等の特殊な要素操船の組合せから成る。その実現は主機回転数またはプロペラピッチと舵角を操作量とするだけでは実現できず、図 1 に示すように、バウスラスト、スターンスラスト、タグボート等の補助操船手段が必要となる。

また、制御対象である船体運動には、操作手段である操作量と要求する船体運動である制御量との間に、破線で示すような、複雑な相互干渉が存在するのである。

離着岸時の船舶操縦系は、3 種以上の操作量により 3 種制御量を制御する多入力多出力系であり、さらに、操作量と制御量との間に複雑な相互干渉が存在しており、要求される運動を実現する操作量の組合せは複雑となっている。多入力多出力系と干渉系であることによる操作量組合せの複雑さが、離着岸操船を困難なものとしている大きな要因と考えられる。

要求する船体運動に対し、運動に直結した指令に基づき、指令された運動を生み出す操作量の組合せを自動的に実現する制御系は、離着岸時の操船者の操船負担を飛躍的に軽減し、かつ、操船自体の確実さの向上にも繋がることは明らかである。ジョイスティックコントローラはこの目的のために生まれたのである。

図 1 離着岸時の船舶操縦系

3. 対象船舶

本研究では、ジョイスティックコントローラを装備する対象として、離着岸機会が比較的多く、ジョイスティックコントローラを装備した際の効果が高いと思われる内航船を取り上げた。操作量の組合せは、CPP プロペラ、バウスラストとシリングラダーの 3 種の実現可能性が高いものとした。対象船舶の操作系を図 2 に、主要目と報告内で使用する記号の説明を表 1 に示す。

4. 船体運動モデル

対象船舶の操作系で可能となる運動の調査、対象船舶のジョイスティックコントローラの構成の検討をシミュレーションにより実施するにあたり、対象船舶の操作系に対する応答及び離着岸操船時の船体運動を忠実に再現する船体運動モデルが必要となる。本節では、本報告で用いた流体力モデル²⁾の主たる要素について概説する。

4.1 船体流体力

離着岸時の船体は大きな横流れを伴う運動を生ずるので、船体流体力モデルは、低速大角度運動を表し得るものでなくてはならない。芳村のモデル¹⁾を参考に推定し、以下のモデルとした。

図 2 対象船舶の操作系

表1 対象船舶主要目と記号説明

主 要 目			
船 体			
GT	総トン数	499.0	T
L	垂線間長	66.0	m
B	幅	11.5	m
d	喫水	4.42	m
C _b	方形係数	0.688	m
MCR	連続最大出力	1400ps×207 _{RPM}	
NOR	常用出力	1190ps×176 _{RPM}	
V _s	航海速度	10.3	kt
シリングラダー			
A _R /Ld	舵面積比	1/35	
x _R /L	舵位置	-0.5	
δ	舵角	-70°~70°	
可変ピッチプロペラ			
D	プロペラ直径	3.0	m
PPa	ピッチ角	-20°~20°	
Z	翼数	3	
p	ピッチ比	0.9	
バウスラスタ			
D _s	プロペラ直径	0.9	m
T _{smax}	最大推力	3.0	ton
x _s /L	スラスタ位置	0.38	
P _s	ピッチ角	-10°~10°	
ujmax	最大噴流速度	5.0	m/s

n

プロペラ回転数

$\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{r}$
 u , v , r
 u^* , v^* , r^*

船体の前進加速度, 横方向加速度, 回頭角加速度
 船体の前進速度, 横方向速度, 回頭角速度
 前進速度, 横方向速度, 回頭角速度の指令値

X_H , Y_H , N_H
 X_R , Y_R , N_R
 L_R , D_R
 C_L , C_D
 X_P ,
 Y_S , N_S

船体に加わる力とモーメントの各軸成分
 舵に作用する力とモーメントの各軸成分
 舵により誘起される揚力と抗力
 舵の揚力, 抗力係数
 プロペラにより誘起される前進方向の力
 バウスラスタにより誘起される力とモーメントの各軸成分

ρ
 A_R

海水密度
 舵面積

$$X_H = -m_x \dot{u} + (m_y + X_{vr}) v \cdot r + \frac{1}{2} \rho L d U^2 \cdot X_H' (r=0)$$

$$Y_H = -m_y \dot{v} + (Y_r - m_x) u \cdot r + \frac{1}{2} \rho L d U^2 \cdot Y_H' (r=0) - \frac{1}{2} \rho d C_{D0} \left\{ \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} |v + C_{rY} \cdot r \cdot x| (v + C_{rY} \cdot r \cdot x) dx - L \cdot |v| \cdot v \right\}$$

$$N_H = J_{zz} \dot{r} + N_r \cdot |u| \cdot r + \frac{1}{2} \rho L d U^2 \cdot N_H' (r=0) - \frac{1}{2} \rho d C_{D0} \left\{ \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} |v + C_{rN} \cdot r \cdot x| (v + C_{rN} \cdot r \cdot x) x dx \right\}$$

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}$$

4.2 舵流体力

対象船舶に装備したシリングラダーは、操舵角範囲が±70°ある大きな横方向推力と前進方向抵抗を発生する特殊な舵である。発生する揚力、抗力が大きく、後進を含む大きな舵流入角度に対して効果があるので、直圧力モデルではなく、図3に示す揚力、抗力係数に基づくモデルを推定した。CPPのピッチ零度時の遮蔽効果^(3,4)も含む、次記するモデルとした。

$u > 0$ & $PPa > 0$

$$X_R = -D_R$$

$$Y_R = -(1 + a_H)L_R$$

$$N_R = -(x_R + a_H \cdot x_H)L_R$$

$$D_R = (C_{L(a)} \cdot \sin(\beta_R) + C_{D(a)} \cdot \sin(\beta_R)) \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2$$

$$L_R = (C_{L(a)} \cdot \cos(\beta_R) - C_{D(a)} \cdot \sin(\beta_R)) \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2$$

$$\alpha = \delta - \beta_R$$

$$\beta_R = \tan^{-1}(v_R/u_R)$$

$$v_R = -\gamma_R(v + l_r \cdot r)$$

$$u_R = \varepsilon \sqrt{\{(1 - w_p)u\}^2 + \kappa \cdot 8K_T \cdot n^2 \cdot D^2 / \kappa}$$

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

$u > 0$ & $PPa \leq 0$

$$X_R = 0$$

$$Y_R = 0$$

$$N_R = 0$$

$u < 0$

$$X_R = -D_R$$

$$Y_R = -L_R$$

$$N_R = -x_R \cdot L_R$$

$$D_R = (C_{L(a)} \cdot \sin(\beta_P) + C_{D(a)} \cdot \cos(\beta_P)) \frac{1}{2} \rho A_R U^2$$

$$L_R = (C_{L(a)} \cdot \cos(\beta_P) - C_{D(a)} \cdot \sin(\beta_P)) \frac{1}{2} \rho A_R U^2$$

$$\alpha = \delta - \beta_P$$

4.3 スラスト

スラストはピッチ角に比例する噴流速度と横推力を発生するものとした。前進速度の影響は、貴島のモデル⁽¹⁾を参考に図4の如く推定し、次のとおりとした。

$$Y_S = T_S$$

$$N_S = x_S \cdot T_S$$

$$T_S = T T_0(u/u_j) \cdot T_0$$

$$u_j = k_f \sqrt{|T_0|}$$

$$T_0 = k_s \cdot R_S$$

5. 並進運動シミュレーション

対象船舶の操作系であるCPP、シリングラダーとバウスラストにより可能な船体運動と離着岸時の要素操船との対応を考える。その場回頭は比較的容易に実現し得ることが予測されるが、横移動と斜航の並進運動はどの程度可能か、どのような操作量の組み合わせにより実現するのか、簡単には予測できない。回頭モーメントがゼロとなる釣り合い状態を、シミュレーションにより求め、図5に示す並進運動可能範囲を得た。

図中の太い実線がバウスラストピッチ 10° 、細い実線が 5° に対応するものであり、曲線の内側が並進運動可能範囲である。

図3 シリングラダーの揚力及び抗力係数

図4 スラスト推力の前進速度影響

得られた並進運動可能範囲より、斜め後方の領域への定常的な運動は実現不可能であり、並進運動の限界はスラスト推力が決定していることが明らかとなった。

これらの並進運動を実現する操作量である CPP、シリングラダーとバウスラストの量的組み合わせは、操作量と制御量との間の干渉により、極めて複雑となっている。操船者が 3 種操作量の詳細な量的組み合わせを操船時に再現することは不可能である。

並進運動シミュレーション結果からも明らかとなったが、指令量と制御量を直結させるようなジョイスティックコントローラが必要である。

6. 非干渉制御によるジョイスティックコントローラ

6.1 ジョイスティックコントローラの基本的構成

並進運動シミュレーションと対象船舶の能力等から、開発するジョイスティックコントローラの基本的構成を以下のとおり決定した。ブロック図を図 6 に示す。

- (1) 前進速度、横方向移動速度と回頭角速度の制御量と直接対応する操作指令であること。
- (2) 回頭角速度のみが信号としてのフィードバックが可能であり、前進速度と横方向移動速度は操船者を介したフィードバックである。

6.2 非干渉制御

前節 (1) の操作指令と制御量との直接対応を実現するために、著者等は、非干渉制御をジョイスティックコントローラに適用した。CPP、シリングラダーとバウスラストの 3 種操作量と前進速度、横方向速度と回頭角速度の 3 種制御量との間の干渉を除去することにより、操作指令と制御量とを直接的に対応させるのである。本節では、この非干渉制御について、図 7 を例にあげ概説する。

A と B を操作量、C と D を制御量とする系において、制御対象内に干渉が存在しなければ A の操作が D に、B が C に影響を及ぼさない。図の如き干渉項が存在すると、A の操作が D に $kad \cdot A$ 、B が C に $kbc \cdot B$ の干渉を生ずる。

非干渉制御は図の非干渉制御ブロックに示す如く、新たに強制的に加えた干渉を操作量に含めることにより、制御対象内で生ずる干渉を相殺するものである。非干渉制御ブロック内の強制干渉項は、図に示す如く、操作指令と制御量間の関係を表現する行列を対角行列にすることにより求められる。

非干渉制御は多入力多出力系には便利な制御手法であるが、制御対象内が線形であることが条件であ

図 5 並進運動可能範囲

図 6 ジョイスティックコントローラの基本的構成

る。船体運動制御への適用においては、船体運動モデルの線形化等の工夫が必要となる。

6.3 船体運動モデルの線形化

前節で述べたように、非干渉制御を適用するために、制御対象である船体運動モデルの線形化を実施した。

線形化において、横方向移動、前進運動及びその場回頭を含む広い運動範囲全てをひとつの線形式で近似することは明らかに不可能である。そこで、操作量と外力及び外力モーメントとを釣り合い点近傍で線形化させ、次に、各線形化係数に外力及び外力モーメントと制御量との非線形関係を吸収させる方法を考えた。即ち、制御量に直接的に繋がる外力及び外力モーメントと操作量との結合関係を線形化したのである。

前述の精微な船体運動モデルに基づき、船首尾方向外力 X_E 、横方向外力 Y_E 、回頭外力モーメント N_E と操作量の CPP ピッチ角 PPa 、シリングラダー角 δ 、バウスラストピッチ角 P_s とを、干渉項も含み図8のように結合した。

6.4 ジョイスティックコントローラ

次に、船体運動線形モデルに基づき、非干渉制御の非干渉コントローラの強制干渉項を求めた。前進速度 u^* 、横方向速度 v^* と回頭角速度 r^* の3種操作指令から CPP ピッチ角 PPa 、シリングラダー角 δ とバウスラストピッチ角 P_s の3種操作量への強制干渉項として、各操作指令毎に3種の計9種を考え、図9に示すものとした。

図8の船体運動線形モデルと図9の非干渉コントローラの構成から、最終的な非干渉コントローラの強制干渉項を求める処理過程を以下に記す。

$$\left. \begin{aligned} & \begin{bmatrix} Guu, Gvu, Gru \\ Guv, Gvv, Grv \\ Gur, Gvr, Grr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ r^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PPa \\ \delta \\ P_s \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} C_{PPa}, C_{X\delta} \cdot \text{sgn}(\delta), 0 \\ 0, C_{Y\delta}, C_{YPS} \\ 0, x_R \cdot C_{Y\delta}, x_S \cdot C_{YPS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PPa \\ \delta \\ P_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ N_E \end{bmatrix} \\ & [C_{PPa}, C_{X\delta} \cdot \text{sgn}(\delta)] \begin{bmatrix} Guu, Gvu, Gru \\ Guv, Gvv, Grv \\ Gur, Gvr, Grr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ r^* \end{bmatrix} = [X_E] \\ & [C_{Y\delta}, C_{YPS}] \begin{bmatrix} Guv, Gvv, Grv \\ Gur, Gvr, Grr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ r^* \end{bmatrix} = [Y_E] \\ & [x_R \cdot C_{Y\delta}, x_S \cdot C_{YPS}] \begin{bmatrix} Guv, Gvv, Grv \\ Gur, Gvr, Grr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ r^* \end{bmatrix} = [N_E] \end{aligned} \right\} \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \end{matrix}$$

非干渉制御

制御対象

$$\begin{bmatrix} kac, kbc \\ kad, kbd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kc' a, kc' b \\ kd' a, kd' b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C' \\ D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C' \\ D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}$$

図7 非干渉制御の構成例

図8 船体運動線形モデル

図9 非干渉コントローラ

$$\left. \begin{aligned}
 & [C_{PPa}, C_{X\delta} \cdot \text{sgn}(\delta)] \begin{bmatrix} Gvu, Gru \\ Gvv, Grv \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^* \\ r^* \end{bmatrix} = [0] \\
 & [C_{Y\delta}, C_{YPS}] \begin{bmatrix} Guv, Grv \\ Gur, Grr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ r^* \end{bmatrix} = [0] \\
 & [x_R \cdot C_{Y\delta}, x_S \cdot C_{YPS}] \begin{bmatrix} Guv, Gvv \\ Gur, Grv \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \end{bmatrix} = [0]
 \end{aligned} \right\} \textcircled{3}$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} Guu, Gvu, Gru \\ 0, Gvv, Grv \\ 0, Gvr, Grr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ r^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PPa \\ \delta \\ P_S \end{bmatrix} \\
 & Grv = -C_{YPS} \cdot Grr / C_{Y\delta} \\
 & Gvr = -x_R \cdot C_{Y\delta} \cdot Gvv / (x_S \cdot C_{YPS}) \\
 & Gvu = -C_{X\delta} \cdot \text{sgn}(\delta) \cdot Gvv / C_{PPa} \\
 & Gru = -C_{X\delta} \cdot \text{sgn}(\delta) \cdot Grv / C_{PPa}
 \end{aligned} \right\} \textcircled{4}$$

船体運動線形モデルと非干渉コントローラの構成より、操作指令から外力及び外力モーメントへの関係式は①式となり、各外力及び外力モーメント毎に展開したものが②式である。

非干渉の内容を X 力を例にあげ説明する。非干渉とは、 X 方向外力 X_E が前進速度指令 u^* のみに反応し、横方向速度指令 v^* と回頭角速度指令 r^* の影響を受けないことである。数式上では、②の X_E の式中の非干渉を望む操作指令 v^* 、 r^* に対し、③式が成立することである。

Y 力と N モーメントにおいても同様である。

最終的に、非干渉コントローラの強制干渉項は④式のとおりに求まる。

回頭角速度のフィードバックを加えたジョイスティックコントローラの制御則を生み出すブロック構成は、図 10 に示すものとなった。

シミュレーション及び実船への適用では、図 10 の 3 種操作量 PPa 、 δ と P_S 以降が精微な船体運動モデル及び実船となるのである。船体運動を線形化した本ジョイスティックコントローラの制御則へのシミュレーション及び実船での非線形影響は、線形モデル及び非干渉コントローラの各項を速度の関数で近似することにより吸収している。

図 10 ジョイスティックコントローラ

6.5 ジョイスティックコントロール・シミュレーション

前節までに述べたジョイスティックコントローラの能力をシミュレーションにより検証した。

6.5.1 シミュレーション結果

図 11 に並進運動、図 12 の I にその場合回頭運動、図 12 の II と III に並進及び回頭運動の軌跡を 20 秒毎にプロットしたものを示す。図 11 の I は右 90 度方向に速度 0.74m/sec の指令 ($r^*=u^*=0$ 、 $v^*=0.74$) を、図 11 の II は右 60 度方向に速度 0.68m/sec の指令 ($r^*=0$ 、 $u^*=0.34$ 、 $v^*=0.59$) を、図 12 の I はその場合回頭指令 ($u^*=v^*=0$ 、 $r^*=0.026$) を与えたものである。

図11 ジョイスティックコントロール
・シミュレーション 1

図12のⅡとⅢはジョイスティックコントローラの操作指令の組合せにより実現した船首付けと船尾付けの離岸操船結果である。具体的な操作は、船首付け離岸は右90度並進しながらの左回頭を、船尾付け離岸は右90度並進しながらの左回頭を指令したものである。

6.5.2 考 察

シミュレーション結果より、以下の考察を得た。

- ・ 総合的及び最終的な運動は指令に充分対応している。
- ・ 船首付け離岸等の複雑な操船も簡便に実現し得ている。
- ・ 本ジョイスティックコントローラは、精度と操作性共に、十分に有用と考えられる。
- ・ 並進運動時に生じた過度状態の変位は補償を加えることにより除去可能である。

図12 ジョイスティックコントロール
・シミュレーション 2

7. まとめ

以上より、次のような結論を得た。

1. CPP、シリングラダー、バウスラスト装備船のジョイスティックコントローラ操船の可能性を確認した。
2. 非干渉制御則を適用したジョイスティックコントローラの構成と能力を評価し、良好な制御結果を得た。
3. ジョイスティックコントローラ操船の評価は、シミュレータ実験等の操船者を含んだ形の調査に基づく有効性評価が必要であり、最も重要であると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 貴島勝郎、芳村康男、深澤塔一：“浅水域及び低速時における操縦特性、運動性能研究委員会第4回シンポジウム—操縦性能の予測と評価—”、日本造船学会(1987)、pp133-189
- (2) 葛西宏直、平野雅祥：“操縦性能の予測、運動性能研究委員会第4回シンポジウム—操縦性能の予測と評価—”、日本造船学会(1987)、pp191-224
- (3) 田中清隆、豊水洋一、小林弘明：“可変ピッチプロペラ装備船の操縦性能に関する研究”、日本航海学会論文集 第77号、pp175-184
- (4) 舘 清志、井上欣三、遠藤 真：“CPP 操備船のピッチゼロ時の船首振れについて—I. —ピッチゼロ時の転舵効果とその可視化—”、日本航海学会論文集 第86号、pp225-234

質 疑 応 答

織田博行(三井造船昭島研究所)：

1. 船尾での横方向の推力を調整する場合、CPP 翼角とシリングラダーの舵角のいずれを優先的に制御するのが良いかご教示願います。
2. ジョイスティック操船時のシリングラダーの舵角制御は連続的に変化する場合とある設定値をステップ的に選択する場合が考えられると思いますが、操作パターンに対する考えをご教示下さい。

遠藤 真：

1. 著者等のジョイスティックコントローラは定常状態に基づき求めたものなので、基本的には操作量間に優先度の差はなく、必要なのは操作量の量的組合せです。ただし、その組合せを定常状態シミュレーションで求めた際に、横流れ角に対しシリングラダー角が一意に決まる線形関係が強くみられました。この関係を用いれば、要求された横推力に対応する横流れ角でシリングラダー角を設定することを優先させる方が簡単に釣り合い状態の操作量の組合せが求まると思います。
2. ジョイスティックコントロール操船でどのような操作パターンとなるか、または、どのような操作パターンを提供すべきかは、本論のまとめにも述べましたが、今後のシミュレータ実験の結果を待たねばならないと思います。

著者等のジョイスティックコントローラは前進速度と横方向速度のフィードバックは操船者が実施する構成となっておりますので、アナログ的操作指令機構が必要と考えております。しかし、現在までに、著者等が実施した簡単な CRT ディスプレーシミュレータを用いた実験では、バンバン制御的な並進運動とその場回頭が良く用いられていた結果が得られてもいます。