

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2012-210941
(P2012-210941A)

(43) 公開日 平成24年11月1日(2012.11.1)

(51) Int.Cl.

(2006.01)

F 1

B 63 H 25/04

テーマコード（参考）

(21) 出願番号	特願2012-153415 (P2012-153415)
(22) 出願日	平成24年7月9日 (2012.7.9)
(62) 分割の表示	特願2007-96699 (P2007-96699) の分割
原出願日	平成19年4月2日 (2007.4.2)
(31) 優先権主張番号	特願2006-98695 (P2006-98695)
(32) 優先日	平成18年3月31日 (2006.3.31)
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)

(71) 出願人 000003388
東京計器株式会社
東京都大田区南蒲田2丁目16番46号

(74) 代理人 100097250
弁理士 石戸 久子

(74) 代理人 100103573
弁理士 山口 実一

(72) 発明者 羽根 冬希
東京都大田区南蒲田2丁目16番46号
東京計器株式会社内

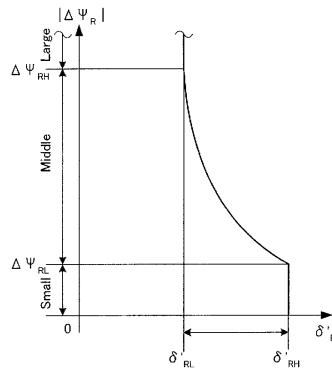
(54) 【発明の名称】船舶用自動操舵装置

(57) 【要約】

【課題】船舶の所望される変針量に対して参照針路を演算して出力する軌道演算部と、該参照針路からフィードフォワード舵角を演算して開ループ制御を行うフィードフォワード制御器と、を有する船舶用自動操舵装置において、最適な変針軌道計画を実現し、安定的、効率的な操船を可能とする。

【解決手段】軌道演算部は、参照針路を加速モード、等速モード及び減速モードに分けて出力し、加速モードにおいて、変針開始時点の旋回角加速度初期値 C_{1a} と旋回角速度 C_{2a} との初期値がゼロでない場合にその値を取り込んで参照針路を演算する。初期値をゼロとした場合の変針量 $\Delta \psi_R$ と最大舵速度 $\Delta \psi'_R$ との関係に基づき、変針量 $\Delta \psi_R$ に応じて最大舵速度 $\Delta \psi'_R$ を求める。そして、その舵速度 $\Delta \psi'_R$ を用いて初期値がある場合の各モードの参照針路の演算を行なう。

【選択図】図 4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

船舶の所望される変針量に対して参照針路を演算して出力する軌道演算部と、該参照針路からフィードフォワード舵角を演算して開ループ制御を行うフィードフォワード制御器と、を有し、前記軌道演算部は、参照針路を加速モード、等速モード及び減速モードに分けて出力し、加速モードにおいて、変針開始時点の旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} とがゼロでない場合にその値を取り込んで参照針路を演算する船舶用自動操舵装置において、

前記軌道演算部は、前記初期値 C_{1a} 、 C_{2a} をそれぞれゼロとして演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が設定された最大舵速度を超えないように各モードを決めたときの加速モードの終端時及び等速モード時における旋回角速度 r_R を演算し、 $C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ を満足する場合、または $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ を満足する場合には、加速モードにおける最大舵速度発生時点が各場合で常に同じになるように旋回角速度 r_R を修正し、該修正した旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算し、上記場合以外の場合には、修正しない旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

10

20

【請求項 2】

前記軌道演算部の旋回角速度 r_R の演算は、等速モード及び減速モードのそれぞれの時間である等速時間及び減速時間の比を一定とした条件で行い、その結果が指定旋回角速度以上の場合には指定旋回角速度とし、指定旋回角速度以下の場合にその演算結果の角速度とすることを特徴とする請求項 1 記載の船舶用自動操舵装置。

【請求項 3】

船舶の所望される変針量に対して参照針路を演算して出力する軌道演算部と、該参照針路からフィードフォワード舵角を演算して開ループ制御を行うフィードフォワード制御器と、を有し、前記軌道演算部は、参照針路を加速モード、等速モード及び減速モードに分けて出力し、加速モードにおいて、変針開始時点の旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} とがゼロでない場合にその値を取り込んで参照針路を演算する船舶用自動操舵装置において、

30

前記軌道演算部は、前記初期値 C_{1a} 、 C_{2a} をそれぞれゼロとして加速モードの終端時及び等速モード時における旋回角速度 r_R を求め、その際に、旋回角速度 r_R が指定旋回角速度 r_0 に等しいと仮定したときに、演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角が許容舵角以下の条件を満足するときに、旋回角速度 r_R を指定旋回角速度 r_0 に決定し、該条件を満足しないときに、フィードフォワード舵角と許容舵角との偏差を最も小さくする角速度を旋回角速度 r_R に決定し、決定された旋回角速度 r_R としたときのフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の最大舵速度を求め、

40

$C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ を満足する場合、または $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ を満足する場合には、加速モードにおける最大舵速度発生時点が各場合で常に同じになるように旋回角速度 r_R を修正し、該修正した旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算し、上記場合以外の場合には、修正しない旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項 4】

船舶の所望される変針量に対して参照針路を演算して出力する軌道演算部と、該参照針

50

路からフィードフォワード舵角を演算して開ループ制御を行うフィードフォワード制御器と、を有し、前記軌道演算部は、参照針路を加速モード、等速モード及び減速モードに分けて出力し、加速モードにおいて、変針開始時点の旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} がゼロでない場合にその値を取り込んで参照針路を演算する船舶用自動操舵装置において、

前記軌道演算部は、前記加速モードで前記初期値 C_{1a} 、 C_{2a} を減衰させるために必要な方位変化量が所望される変針量よりも大きい場合に、加速モードを、初期値を減衰させる減衰モードと、前記等速モードの旋回角速度 r_R に収束させる通常モードとに分けて、それぞれのモードの参照針路を演算することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項 5】

前記旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} は、変針開始時に変針中であったときの前回の変針に対して前記軌道演算部で演算を行った参照針路の 2 階微分と 1 階微分との変針開始時の値から求められることを特徴とする請求項 1 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の船舶用自動操舵装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、船舶用自動操舵装置に関し、その変針時の性能向上を行うことができる船舶用自動操舵装置に関する。

【背景技術】

【0002】

船舶用自動操舵装置は、設定針路にジャイロコンパスからの船首方位を追従させるために舵を制御する装置であり、変針時における性能向上を図ったものとして、本出願人による特許文献 1 に記載されたものが知られている。図 1 を用いて、その構成を簡単に説明する。図 1 は、船舶用自動操舵装置 12、操舵機 16 及び船体 18 を含む全体のブロック図であり、操舵機 16 と船体 18 とが制御対象 14 となる船体プラントとなる。

【0003】

船舶用自動操舵装置 12 に入力信号として設定針路即ち所望される変針量、設定値及び船首方位とが入力され、出力信号として命令舵角が出力される。

【0004】

そして、船舶用自動操舵装置は、設定針路が入力され参照針路を出力する軌道演算部と、フィードフォワード制御器と、フィードバック制御器と、第 1 及び第 2 の加算器と、を有している。

【0005】

特許文献 1 では、このフィードフォワード制御器の伝達関数は、制御対象である船体プラントの伝達関数 $P(s)$ の逆特性を有するように設定されており、具体的には、野本の 1 次モデル

【0006】

【数 1】

$$P(s) = \frac{K_s}{s(T_s s + 1)} \quad (1\text{式})$$

を用いて

【0007】

【数 2】

$$K_{FF}(s) = P(s)^{-1} = \frac{s(T_s s + 1)}{K_s} \quad (2\text{式})$$

となるように設定される。ここで、 K_s 、 T_s は船体パラメータで、それぞれ旋回力ゲインと時定数、 s はラプラス演算子である。

10

20

30

40

50

【0008】

軌道演算部は、設定針路、設定値及び船首方位を用いて参照針路を演算し、出力するものである。設定値としては、変針時の旋回角速度、フィードフォワード舵角_{FF}の最大値及びフィードフォワード舵角の角速度_{FF'}の最大値がある。また、船首方位は、変針中に新たに別の変針を実施する場合等の変針開始時に旋回角速度と旋回角加速度がゼロでない場合に、これらの値を得るために使われる。

【0009】

そして、参照針路は次のような条件を満足するように構成される。

(1) 加速モード、等速モード及び減速モードの3モードより構成され、各モード毎に時間管理される。参照針路_{R(t)}は、各モード毎に時間tを変数とする関数となる。 10

(2) 加速モードと減速モードでは、参照針路_{R(t)}の時間tに関する2階微分は2次関数となる。

(3) 等速モードでは、参照針路_{R(t)}の時間tに関する1階微分は一定であり、2階微分はゼロである。

(4) 加速モードでは、参照針路_{R(t)}は船舶の旋回角加速度C_{1a}及び旋回角速度C_{2a}の値を初期値として取り込む。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】特開平8-207894号公報

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

引用文献1では、制御対象の特性を考慮した変針軌道計画が実現可能となるという利点を有しているものの、次のような問題点が存在する。

・船体運動の変針中に新たに別の変針を実施する場合等の、変針開始時に旋回角速度と旋回角加速度がゼロでない場合に、その角加速度初期値C_{1a}と角速度初期値C_{2a}と最大旋回角速度r_Rとの関係が、C_{2a} > r_R、C_{1a} < 0またはC_{2a} < r_R、C_{1a} > 0のときに参照針路を適切に設定できない。

・角加速度初期値C_{1a}と角速度初期値C_{2a}がある場合に、その初期値を減衰させるために必要な変針量が設定される変針量より大きいと、変針時間が長くなるおそれがあり、適切に対応することができない。

・角加速度初期値C_{1a}と角速度初期値C_{2a}とを船首方位からの信号によって求めているが、船首方位からの信号はフィルタを通したとしても小さなノイズが重畠されているために、安定的な初期値を得ることが困難である。

30

【0012】

本発明は上記課題を解決して、より最適な変針軌道計画を実現し、よって、安定的、効率な操船を可能とする船舶用自動操舵装置を提供することをその目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

かかる目的を達成するために、本発明の請求項1に記載の発明は、船舶の所望される変針量に対して参照針路を演算して出力する軌道演算部と、該参照針路からフィードフォワード舵角を演算して開ループ制御を行うフィードフォワード制御器と、を有し、前記軌道演算部は、参照針路を加速モード、等速モード及び減速モードに分けて出し、加速モードにおいて、変針開始時点の旋回角加速度の初期値C_{1a}と旋回角速度の初期値C_{2a}がゼロでない場合にその値を取り込んで参照針路を演算する船舶用自動操舵装置において、前記軌道演算部は、前記初期値C_{1a}、C_{2a}をそれぞれゼロとして演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が設定された最大舵速度を超えないように各モードを決めたときの加速モードの終端時及び等速モード時における旋回角速度r_Rを演算し、C_{2a} > r_RでC_{1a} < 0を満足する場合、またはC_{2a} 40

40

50

$c_{1a} > r_R$ で $C_{1a} > 0$ を満足する場合には、加速モードにおける最大舵速度発生時点が各場合で常に同じになるように旋回角速度 r_R を修正し、該修正した旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算し、上記場合以外の場合には、修正しない旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算することを特徴とする。

【0014】

請求項 2 に記載の発明は、請求項 1 記載の前記軌道演算部の旋回角速度 r_R の演算を、等速モード及び減速モードのそれぞれの時間である等速時間及び減速時間の比を一定とした条件で行い、その結果が指定旋回角速度以上の場合には指定旋回角速度とし、指定旋回角速度以下の場合にその演算結果の角速度とすることを特徴とする。

10

【0015】

請求項 3 に記載の発明は、船舶の所望される変針量に対して参照針路を演算して出力する軌道演算部と、該参照針路からフィードフォワード舵角を演算して開ループ制御を行うフィードフォワード制御器と、を有し、前記軌道演算部は、参照針路を加速モード、等速モード及び減速モードに分けて出力し、加速モードにおいて、変針開始時点の旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} とがゼロでない場合にその値を取り込んで参照針路を演算する船舶用自動操舵装置において、

前記軌道演算部は、前記初期値 C_{1a} 、 C_{2a} をそれぞれゼロとして加速モードの終端時及び等速モード時における旋回角速度 r_R を求め、その際に、旋回角速度 r_R が指定旋回角速度 r_0 に等しいと仮定したときに、演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角が許容舵角以下の条件を満足するときに、旋回角速度 r_R を指定旋回角速度 r_0 に決定し、該条件を満足しないときに、フィードフォワード舵角と許容舵角との偏差を最も小さくする角速度を旋回角速度 r_R に決定し、決定された旋回角速度 r_R としたときのフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の最大舵速度を求め、

20

$C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ を満足する場合、または $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ を満足する場合には、加速モードにおける最大舵速度発生時点が各場合で常に同じになるように旋回角速度 r_R を修正し、該修正した旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算し、上記場合以外の場合には、修正しない旋回角速度 r_R を満足し且つ演算される参照針路に基づきフィードフォワード制御器から出力されるフィードフォワード舵角の舵速度が前記最大舵速度を超えないように各モードの参照針路を演算することを特徴とする。

30

請求項 4 に記載の発明は、船舶の所望される変針量に対して参照針路を演算して出力する軌道演算部と、該参照針路からフィードフォワード舵角を演算して開ループ制御を行うフィードフォワード制御器と、を有し、前記軌道演算部は、参照針路を加速モード、等速モード及び減速モードに分けて出力し、加速モードにおいて、変針開始時点の旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} がゼロでない場合にその値を取り込んで参照針路を演算する船舶用自動操舵装置において、

40

前記軌道演算部は、前記加速モードで前記初期値 C_{1a} 、 C_{2a} を減衰させるために必要な方位変化量が所望される変針量よりも大きい場合に、加速モードを、初期値を減衰させる減衰モードと、前記等速モードの旋回角速度 r_R に収束させる通常モードとに分けて、それぞれのモードの参照針路を演算することを特徴とする。

【0016】

請求項 5 に記載の発明は、請求項 1 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} が、変針開始時に変針中であったときの前回の変針に対して前記軌道演算部で演算を行った参照針路の 2 階微分と 1 階微分との変針開始時の値から求められることを特徴とする。

50

【発明の効果】

【0017】

請求項 1 及び 3 記載の発明によれば、 $C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ を満足する場合、または $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ を満足する場合には、 C_{2a} と r_R との差異が大きい場合とその差異が小さい場合とで、舵速度が最大になる時点が異なるという不具合を発生するので、そのような不具合を回避するために、常に舵速度が最大になる時点を一定になるようにし、その時点での舵速度が最大舵速度を超えないようにすることで、安定的、効率的、安全な操船を行なうことができる。

【0018】

請求項 2 記載の発明によれば、等速時間の比率を一定とすることで、妥当な変針時間で省エネルギーを図ることができる。等速時間の比率を一定にしない場合には、大きい旋回角速度で変針時間を短くすることも可能になるが、省エネルギーの観点から好ましくない。本発明によれば、等速時間の比率を一定とすることで、等速時間のない場合に比べて省エネルギーを図ることができる。

10

【0019】

請求項 4 記載の発明によれば、所望される変針量が小さいと、初期値を減衰するために必要な方位変化量の方が大きくなる場合があり、かかる場合でも変針量が小さいものとして参照針路の演算を行なうと、変針時間が大きくなりすぎる不具合が発生するおそれがあるが、加速モードを減衰モードと通常モードとに分けてそれぞれのモードで適切にパラメータを設定することで、適切な参照針路を演算することができる。

20

【0020】

請求項 5 記載の発明によれば、変針中の新たな変針であれば、前回の変針のために演算した参照針路を用いて、新たな変針の開始時の初期値を得ることができる。そのため、ノイズの影響を受けない初期値を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図 1】本発明の船舶用自動操舵装置と制御対象との全体のブロック図である。

30

【図 2】参照針路とフィードフォワード舵角の時間変化（但し安定船の場合）を示すグラフである。

【図 3】各モードにおける参照針路の 2 階微分と、1 階微分の時間変化を示すグラフである。

40

【図 4】舵速度と変針量の関係を表すグラフである。

【図 5】加速モードの参照針路の 2 階部分特性を表すグラフである（但し、 $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合）。

【図 6】野本の 1 次モデルに準拠した参照針路及び参照針路の 1 階微分の変針応答の時間変化を表すグラフである。

【図 7】（a）は野本の 1 次モデルのブロック図、（b）は野本の 2 次モデルのブロック図である。

【図 8】本発明で採用する船体モデルのブロック図である。

【図 9】軌道演算部で行う処理を表すフローチャートである。

50

【図 10】軌道演算部で行う参照針路の計算処理を表すフローチャートである。

【図 11】軌道演算部で行う減衰モードの計算処理を表すフローチャートである。

【図 12】本発明のシミュレーション結果であり、不安定船の大角度変針時を表す。

【図 13】本発明のシミュレーション結果であり、（A）は安定船、（B）は不安定船のそれぞれの小角度変針時を表す。

【図 14】本発明の等減速比を可変とした変形例による軌道演算部のブロック図である。

【図 15】等減速比に対する舵速度 $r' = d / dt$ 、舵角 r と変針時間 T_t の特性を表すグラフである。

【図 16】（A）は、本発明の等減速比を固定としたときのシミュレーション結果であり、（B）は本発明の等減速比を可変としたときのシミュレーション結果である。

50

【図17】船体のプロペラと舵との関係を表す模式図である。

【図18】推進力が変化したときの船首方位と方位比との関係を表すグラフである。

【図19】推進力が変化したときの伴流速度と船速との関係を示すグラフである。

【図20】本発明の増減速時のロバスト性向上を行った変形例の主要部分のブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態を説明する。

図1は、本発明の船舶用自動操舵装置12と、操舵機16及び船体18とからなる制御対象14とを含む全体のブロック図を示している。本発明の船舶用自動操舵装置12は、特許文献1と同様に、軌道演算部12-1と、フィードフォワード制御器12-2と、フィードバック制御器12-3と、第1及び第2の加算器12-4、12-5とを有している。

【0023】

軌道演算部12-1は、所望される変針量 δ 及び設定値を用いて変針条件を満足する参考針路の時間関数を演算し、順次その参考針路 R を時間の経過と共に、出力するものである。

【0024】

フィードフォワード制御器12-2は、参考針路からフィードフォワード舵角 F_F を演算するものである。フィードフォワード制御器12-2は、自動操舵系において開ループ系を構成しており、この開ループ系は船首方位を直ちに参考針路に一致させるように作動する。

【0025】

フィードバック制御器12-3は、自動操舵系において閉ループ系を構成しており、船首方位と参考針路との偏差に対してフィードバック舵角 F_B を演算するものである。変針系は、基本的には軌道演算部12-1からの参考針路と、フィードフォワード制御器12-2によるフィードフォワード制御の作動により、船首方位を参考針路に遅れなく追従させるものであり、このときに、参考針路と船首方位との間に偏差誤差 E_{RR} が生じた場合に、閉ループ系が偏差誤差 E_{RR} を減らすように動作する。しかしながら、この偏差誤差 E_{RR} はわずかであるため、本発明では、この閉ループ系については特許文献1と同様の構成とする。

【0026】

以下、軌道演算部12-1における参考針路 R 算出の基本的考え方について説明する。

【0027】

1. 基本設計

軌道演算部12-1の出力する参考針路 R は、変針条件を満足する時間関数である必要がある。変針条件としては、

針路条件：所望される変針量と、旋回角速度との針路条件

制限条件：操舵機16の特性を考慮したフィードフォワード舵角と舵速度との制限条件

初期値条件：変針直前の船体運動に起因した方位の角加速度と角速度との初期値条件が挙げられる。

【0028】

参考針路の変数と、変針条件の設定値との関係を表1に示す。

【0029】

10

20

30

40

【表1】

変針条件	参照針路の変数	設定値	達成基準
変針量	$\Delta \psi_R$	$\Delta \psi_0$	$\Delta \psi_R = \Delta \psi_0$
角速度	r_R	$r_0 (> 0)$	$ r_R _{\max} \leq r_0$
舵角	δ_{FF}	$\delta_0 (> 0)$	$ \delta_{FF} _{\max} \leq \delta_0$
舵速度	δ'_{FF}	$\delta'_0 (> 0)$	$ \delta'_{FF} _{\max} \leq \delta'_0$

10

表1において、所望される変針量 $\Delta \psi_0$ は、変針直前の針路と設定針路との変化量として与えられるものとする。角速度 r_R は、参照針路 ψ_R の1階微分値を、舵角 δ_{FF} はフィードフォワード舵角を、舵速度 δ'_{FF} は、舵角 δ_{FF} の1階微分値をそれぞれ示す。 r_0 は指定旋回角速度、 δ_0 は許容舵角、 δ'_0 は許容舵速度である。参照針路 ψ_R は、変針量 $\Delta \psi_R$ が $\Delta \psi_0$ に一致するように、そして、他の変数 r_R 、 δ_{FF} 、 δ'_{FF} の絶対値の最大値は、各々、指定旋回角速度、許容舵角、許容舵速度以下になるようとする。

【0030】

図2は、参照針路 ψ_R とフィードフォワード舵角 δ_{FF} の時間変化(但し安定船の場合)を示す。簡略化のため、変針の開始時間はゼロとし、船体運動の初期値はゼロとする。参照針路 ψ_R は、特許文献1と同様に、加速モード、等速モード、減速モードの3モードにより構成する。tは時間、 T_a 、 T_v 、 T_d は、それぞれ加速時間、等速時間、減速時間を表す。以下、添字(・)a、(・)v、(・)dはそれぞれ加速、等速、減速モードを意味する。変針系は3つのモードに加えて減速モードの後に静定モードを持つことができるが、静定モードでは変針量が一定であるために説明を省略する。

20

【0031】

参照針路は、野本の1次モデルを用いると、2階微分可能な時間関数の条件を持つ。参照針路の2階微分値はモード間の連続性を保証するためモードの終端と次のモードの開始とでゼロになる必要がある。この要件を満たす最小次元の関数は2次関数であるから、2階微分の参照針路は2次関数を用いる。

30

【0032】

1.2 参照針路の時間関数

以下、各モードにおける参照針路について説明する(図3)。

1.2.1 加速モード

参照針路の2階微分が2次関数となり、初期値に角加速度 C_{1a} と角速度 C_{2a} を持つ。加速モードは、加速モード終了時に角加速度をゼロにする。

【0033】

加速モードの参照針路の2階微分、1階微分、参照針路は、以下のように表される。

【0034】

【数4】

$$\psi''_{Ra}(t) = \frac{\alpha_a}{T_a^2} t^2 + \frac{\beta_a}{T_a} t + C_{1a} \quad (3\text{式})$$

40

【0035】

【数5】

$$\psi'_{Ra}(t) = \frac{\alpha_a}{T_a^2} \frac{t^3}{3} + \frac{\beta_a}{T_a} \frac{t^2}{2} + C_{1a}t + C_{2a} \quad (4\text{式})$$

【0036】

【数6】

$$\psi_{Ra}(t) = \frac{\alpha_a}{T_a^2} \frac{t^4}{12} + \frac{\beta_a}{T_a} \frac{t^3}{6} + C_{1a} \frac{t^2}{2} + C_{2a}t \quad (5\text{式})$$

【0037】

50

ここで、 ${}_{Ra}$ は加速モードの参照針路を、 ${}_{la}$ は加速定数をそれぞれ表す。時間範囲は、 $[0 \quad t \quad T_a]$ である。時間 T_a で角加速度はゼロとなるので、 ${}''_{Ra}(T_a) = 0$ より

【0 0 3 8】

【数 7】

$$\alpha_a = -\beta_a - C_{la} \quad (6\text{式})$$

となる。

【0 0 3 9】

角加速度と角速度の初期値である C_{1a} と C_{2a} は、 $t = 0$ のときの角加速度、角速度の値

【0 0 4 0】

【数 8】

$$C_{la} = \psi''_R(0), \quad C_{2a} = \psi'_R(0) \quad (7\text{式})$$

【0 0 4 1】

1. 2. 2 等速モード

加速モードに続く等速モードでは参照針路の角速度は一定であり、角加速度はゼロである。従って、等速モードにおける参照針路の 2 階微分、1 階微分、参照針路は、以下のように表される。

【0 0 4 2】

【数 9】

$$\psi''_{Rv}(t) = 0 \quad (8\text{式})$$

【0 0 4 3】

【数 1 0】

$$\psi'_{Rv}(t) = r_R \quad (9\text{式})$$

【0 0 4 4】

【数 1 1】

$$\psi_{Rv}(t) = r_R(t - T_a) + C_{3v} \quad (10\text{式})$$

【0 0 4 5】

ここで、 ${}_{Rv}$ は等速モードの参照針路を、 r_R は角速度をそれぞれ表す。時間範囲は、 $[T_a \quad t \quad T_a + T_v]$ である。 C_{3v} は初期値である。等速モードと加速モードとの連続性の関係 $'_{Rv}(T_a) = '_{Ra}(T_a)$ と ${}_{Rv}(T_a) = {}_{Ra}(T_a)$ とから、

【0 0 4 6】

【数 1 2】

$$r_R = \frac{T_a}{6}(\beta_a + 4C_{la}) + C_{2a} \quad (11\text{式})$$

【0 0 4 7】

【数 1 3】

$$C_{3v} = \frac{T_a^2}{12}(\beta_a + 5C_{la}) + C_{2a}T_a \quad (12\text{式})$$

を得る。

【0 0 4 8】

1. 2. 3 減速モード

参照針路はモードの終了時（終端時）にて変針量に一致し、その角速度と角加速度はモードの終了時点にてゼロになるように減衰される。したがって、減速モードの参照針路の 2 階微分、1 階微分、参照針路は、以下のように表される。

【0 0 4 9】

【数 1 4】

$$\psi''_{Rd}(t) = \frac{\beta_d}{T_d^2}(t - T_a - T_v)^2 - \frac{\beta_d}{T_d}(t - T_a - T_v) \quad (13\text{式})$$

【0 0 5 0】

10

20

30

40

50

【数15】

$$\psi'_{Rd}(t) = \frac{\beta_d}{T_d^2} \frac{(t-T_a-T_v)^3}{3} - \frac{\beta_d}{T_d} \frac{(t-T_a-T_v)^2}{2} + C_{2d} \quad (14\text{式})$$

【0051】

【数16】

$$\psi_{Rd}(t) = \frac{\beta_d}{T_d^2} \frac{(t-T_a-T_v)^4}{12} - \frac{\beta_d}{T_d} \frac{(t-T_a-T_v)^3}{6} + C_{2d}(t-T_a-T_v) + C_{3d} \quad (15\text{式})$$

【0052】

ここで、 ψ_{Rd} は減速モードの参照針路を、 β_d は減速定数をそれぞれ表す。時間範囲は $[T_a + T_v \leq t \leq T_a + T_v + T_d]$ である。 C_{2d} 、 C_{3d} は初期値である。減速モードと等速モードとの連続性の関係 $\psi'_{Rd}(T_a + T_v) = \psi'_{Rv}(T_a + T_v)$ と $\psi_{Rd}(T_a + T_v) = \psi_{Rv}(T_a + T_v)$ とから、

【0053】

【数17】

$$C_{2d} = r_R \quad (16\text{式})$$

【0054】

【数18】

$$C_{3d} = r_R T_v + C_{3v} \quad (17\text{式})$$

を得る。さらに、終端時間 $t = T_a + T_v + T_d$ で角速度 $\psi'_{Rv}(t)$ をゼロにするために、

【0055】

【数19】

$$r_R = \frac{1}{6} \beta_d T_d \quad (18\text{式})$$

を得る。

【0056】

1.3 舵角と舵速度との最大値

フィードフォワード制御器 12-2 では、参照針路 R からフィードフォワード舵角 δ_{FF} を出力する。舵角 δ_{FF} は、参照針路 R を入力した船体モデル P の逆数とする。ここで、船体モデル P は、(1式)を使用することとすると、フィードフォワード舵角 δ_{FF} は次から求まる。

【0057】

【数20】

$$\delta_{FF}(t) = \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left(\psi''_R(t) + \frac{1}{T_{sn}} \psi'_R(t) \right) \quad (19\text{式})$$

【0058】

ここで、 K_{sn} と T_{sn} は船体モデルのノミナル値で旋回力ゲイン、時定数を表す。 $K_{sn} > 0$ 、 $T_{sn} > 0$ は安定船、 $K_{sn} < 0$ 、 $T_{sn} < 0$ は不安定船と定める。舵角 δ_{FF} は参照針路の2階微分が2次関数であるから加速と減速とのモードで極値を持つ。舵角 δ_{FF} と舵速度 $\dot{\delta}_{FF}$ とは、加速と減速の各モードの参照針路の(5式)及び(15式)を(19式)に代入すると、

【0059】

【数21】

$$\delta_{FF}(t) = \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left[a_3 \frac{t^3}{3} + a_2 \frac{t^2}{2} + a_1 t + a_0 \right] \quad (20\text{式})$$

【0060】

10

20

30

40

【数22】

$$\delta'_{FF}(t) = \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left[a_3 t^2 + a_2 t + a_1 \right] \quad (21\text{式})$$

になる。ここで、 a_3 、 a_2 、 a_1 、 a_0 はそれぞれ加速モード（添字 $(\cdot)_a$ ）と減速モード（添字 $(\cdot)_d$ ）に対して、

【0061】

【数23】

$$a_{3a} = \frac{1}{T_{sn} T_a^2} \frac{\alpha_a}{\beta_a}, \quad a_{2a} = \frac{1}{T_a} \left(\frac{2\alpha_a}{T_a} + \frac{\beta_a}{T_{sn}} \right), \quad a_{1a} = \frac{\beta_a}{T_a} + \frac{C_{1a}}{T_{sn}}, \quad a_{0a} = C_{1a} + \frac{C_{2a}}{T_{sn}} \quad (22\text{式})$$

【0062】

【数24】

$$a_{3d} = \frac{1}{T_{sn} T_d^2} \frac{\beta_d}{\beta_d}, \quad a_{2d} = \frac{1}{T_d} \left(\frac{2\beta_d}{T_d} - \frac{\beta_d}{T_{sn}} \right), \quad a_{1d} = -\frac{\beta_d}{T_d}, \quad a_{0d} = \frac{C_{2d}}{T_{sn}} \quad (23\text{式})$$

になる。尚、時間 t は、加速モードで $[0 \quad t \quad T_a]$ 、減速モードで $[0 \quad t \quad T_d]$ とする。

【0063】

1.3.1 最大舵角

舵角の最大値または最小値は舵速度をゼロにする極値で生じるから（21式）よりその時間は、

【0064】

【数25】

$$t_{\delta_{FF}} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_3 a_1}}{2a_3} > 0 \quad (24\text{式})$$

で与えられる。ここで、分子の \pm の極性は $+$ が安定船に、 $-$ が不安定船に対応する。舵角の最大値または最小値は時間 t_{FF} を（20式）に代入することで求まる。最大舵角 δ_R （以降、これを舵角と呼ぶ）は舵角 δ_{FF} の絶対値の最大値

【0065】

【数26】

$$\delta_R = |\delta_{FF}|_{max} > 0 \quad (25\text{式})$$

で定める。

【0066】

1.3.2 最大舵速度

舵速度の導関数は1次関数となり、図2に示したように、舵速度の最大値または最小値は加速と減速とのモードのそれぞれの開始または終端の時間で生じる。舵速度は、加速モードで初期値 C_{1a} のため開始と終端とで異なり、減速モードでは開始と終端とで同一となる。舵速度の最大値と最小値は（21式）～（23式）から

【0067】

【数27】

$$\delta'_{FFa}(0) = \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left(\frac{\beta_a}{T_a} + \frac{C_{1a}}{T_{sn}} \right), \quad \delta'_{FFa}(T_a) = -\frac{T_{sn}}{K_{sn}} \frac{\beta_a + 2C_{1a}}{T_a} \quad (26\text{式})$$

【0068】

【数28】

$$\delta'_{FFd}(0) = -\delta'_{FFd}(T_d) = -\frac{T_{sn}}{K_{sn}} \frac{\beta_d}{T_d} \quad (27\text{式})$$

になる。最大舵速度（以降これを舵速度と呼ぶ） $'_R$ は舵速度 $'_{FF}$ の絶対値の最大値

【0069】

【数29】

$$\delta'_R = |\delta'_{FF}|_{max} > 0 \quad (28\text{式})$$

で定める。

【0070】

2. 初期値をゼロとした最適設計

以上の関係式に基づき、変針条件を満足する参照針路を求める。そのために、まずは船体運動の初期値である角加速度 C_{1a} と角速度 C_{2a} はゼロとして設計パラメータを定めて諸変数の関係式を求める。簡単化のため変針量 δ_0 は正とする。これにより加速と減速とのモードで時間 $T_a = T_d$ 、定数 $\beta_a = \beta_d$ 、変針量 $\delta_a = \delta_d$ になる。

【0071】

従って、加速時間 T_a 、加速定数 β_a 及び角速度 r_R （ $= T_a \beta_a / 6$ ）を決定すれば参照針路を求めることができる。これらを求めるための設計パラメータとして、舵速度と、等速時間 T_v と減速時間 T_d との比率である等減速比とする。等減速比は評価関数を導入して固定値とする。さらに、初期値をゼロとした場合の最大舵速度と変針量との関係を求め、該最大舵速度を変針量に応じた変数とする。

【0072】

2.1 参照針路の関係式

等速時間 T_v と減速時間 T_d との比率を等減速比 R_{vd} とする。即ち、

【0073】

【数30】

$$T_v = R_{vd} T_d \quad (29\text{式})$$

とする。尚ここで、減速時間 T_d を用いている理由は、減速モードが初期値 C_{1a} 、 C_{2a} に無関係であるからである。加速時間 T_a と加速定数 β_a と、舵速度 $'_R$ との関係は、(26式)を用いて、

【0074】

【数31】

$$\delta'_R \frac{K_{sn}}{T_{sn}} = \frac{\beta_a}{T_a} = C_R \quad (30\text{式})$$

となる。ここで、 C_R は $'_R$ 、 K_{sn} 、 T_{sn} を舵定数と呼ぶ。変針量 δ_R と変針時間 T_t とは、(5式)、(11式)等から

【0075】

【数32】

$$\Delta\psi_R = r_R T_a (1 + R_{vd}) = \frac{\beta_a T_a^2 (1 + R_{vd})}{6} = \frac{C_R T_a^3 (1 + R_{vd})}{6} \quad (31\text{式})$$

【0076】

【数33】

$$T_t = T_a (2 + R_{vd}) \quad (32\text{式})$$

になる。

【0077】

2.2 舵角の関係式

舵角は(19式)で示され、参照針路の1階微分と2階微分の和であるから、舵角の極値は2階微分の極値を1階微分の影響分だけずらした位置にある。

【0078】

加速モードの終端時間または減速モードの開始時間で参照針路の2階微分はゼロになる

10

20

30

40

50

から、舵角の成分はその 1 階微分値、即ち角速度 r_R (条件 $r_R > 0$ より $r_R > 0$) になる。即ち、安定船では、

【 0 0 7 9 】

【 数 3 4 】

$$\delta_{FFa}(t)|_{t=T_a} = \frac{r_R}{K_{sn}} > 0 \quad (33\text{式})$$

となり、不安定船では、

【 0 0 8 0 】

【 数 3 5 】

$$\delta_{FFd}(t)|_{t=0} = \frac{r_R}{K_{sn}} < 0 \quad (34\text{式})$$

【 0 0 8 1 】

となる。舵角の極性は安定船 ($K_{sn} > 0$) で正に、不安定船 ($K_{sn} < 0$) で負になる。よって、舵角の絶対値の最大値は 1 階微分値の影響により安定船では角速度成分を加算する加速モードで最大舵角として生じ、不安定船では角速度成分を減算する減速モードで最小舵角として生じる。以下、安定船と不安定船のそれぞれの舵角の最大値を求める。

【 0 0 8 2 】

2.2.1 安定船の場合

極値をとる時間を (24式) より求める。 $T_{sn} > T_a$ として Taylor 展開の 2 次までを用いると、

【 0 0 8 3 】

【 数 3 6 】

$$-\frac{a_{2a}}{2a_{3a}} = -T_{sn} - \frac{T_a \beta_a}{2\alpha_a} = -T_{sn} + \frac{T_a}{2} \quad (35\text{式})$$

【 0 0 8 4 】

【 数 3 7 】

$$\sqrt{\frac{a_{2a}^2 - 4a_{1a}a_{3a}}{4a_{3a}^2}} = \sqrt{T_{sn}^2 + \frac{(\beta_a + 2C_{1a})^2 T_a^2}{4\alpha_a^2}} \approx T_{sn} + \frac{T_a^2}{8T_{sn}} \quad (36\text{式})$$

になるから、極値の時間は、

【 0 0 8 5 】

【 数 3 8 】

$$t_{\delta_{FFa}} \approx \frac{T_a}{2} \left(1 + \frac{1}{4} \frac{T_a}{T_{sn}} \right) > \frac{T_a}{2}, \quad T_{sn} > 0 \quad (37\text{式})$$

になる。上記式の括弧内の第 1 項は参照針路の 2 階微分の極値時間に相当し、第 2 項は参照針路の 1 階微分の極値時間に相当する。よって、舵角の最大値は (37式) を (20式) に代入して、

【 0 0 8 6 】

【 数 3 9 】

$$\begin{aligned} \delta_{FFa\max} &= \frac{\beta_a}{4} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left[1 + \frac{1}{3} \frac{T_a}{T_{sn}} + \frac{1}{16} \left(\frac{T_a}{T_{sn}} \right)^2 - \frac{1}{384} \left(\frac{T_a}{T_{sn}} \right)^4 \right] \\ &\approx \frac{\beta_a}{4} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left[1 + \frac{1}{3} \frac{T_a}{T_{sn}} \right] \end{aligned} \quad (38\text{式})$$

になる。ここで、 $T_{sn} > T_a$ の関係により 2 乗項と 4 乗項とを省く。こうして、舵角の最大値と加速時間 T_a 、加速定数 β_a との関係を (38式) で示すような簡単な式で表すこと

10

20

30

40

50

ができるようになる。

【0 0 8 7】

2.2.2 不安定船の場合

減速モードで最小舵角を生じるのを除き、安定船の場合と同様で、極値の時間は

【0 0 8 8】

【数40】

$$t_{\delta_{FFd}} \approx -T_{sn} + \frac{T_a}{2} - \left| T_{sn} + \frac{T_a^2}{8T_{sn}} \right| = -T_{sn} + \frac{T_a}{2} - \left| T_{sn} \right| - \frac{T_a^2}{8|T_{sn}|}$$

$$= \frac{T_d}{2} \left(1 + \frac{1}{4} \frac{T_d}{T_{sn}} \right) < \frac{T_d}{2}, \quad T_{sn} < 0 \quad (39\text{式})$$

10

となる。舵角の最小値は、

【0 0 8 9】

【数41】

$$\delta_{FFd\ min} \approx -\frac{\beta_d}{4} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left[1 + \frac{1}{3} \frac{T_d}{T_{sn}} \right] + \frac{r_R}{K_{sn}}$$

$$= -\frac{\beta_d}{4} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left[1 - \frac{1}{3} \frac{T_d}{T_{sn}} \right] \quad (40\text{式})$$

20

になる。

【0 0 9 0】

2.2.3 最大舵角のまとめ

(38式)と(40式)とをまとめると、最大舵角は

【0 0 9 1】

【数42】

$$\delta_R \equiv \begin{cases} \left| \delta_{FFa\ max} \right| & \text{Stable Ship} \\ \left| \delta_{FFd\ min} \right| & \text{Unstable Ship} \end{cases} \quad (41\text{式})$$

30

になる。安定船と不安定船の船体パラメータの絶対値が同じであれば、最大舵角は同じになり、参照針路の1階微分は T_a / T_{sn} または T_d / T_{sn} で影響する、という特性が得られる。

【0 0 9 2】

2.3 等減速比の設計

設計パラメータの等減速比は、評価関数を用いて決定する。まず、(31式)等から変針量 ψ_R より等速時間 $T_v = 6 \psi_R / (\beta_a T_a) - T_a$ を得るので、変針時間 T_t は、

【0 0 9 3】

【数43】

$$T_t = 2T_a + T_v = T_a + \frac{6\Delta\psi_R}{\beta_a T_a} \quad (42\text{式})$$

40

になる。ここで、 $T_d = T_a$ 、 $\beta_a = -\beta_d$ の条件を用いている。

【0 0 9 4】

変針時間 T_t を最小にする加速時間 T_a を求めると、

【0 0 9 5】

【数44】

$$\frac{dT_t}{dT_a} = 1 - \frac{6\Delta\psi_R}{\beta_a T_a^2} = 0 \rightarrow T_a = \sqrt{\frac{6\Delta\psi_R}{\beta_a}} \quad (43\text{式})$$

50

を得る。このとき、等速時間 T_v は 0 となる。舵速度が一定の条件下で加速時間が最大になると角速度 r_R が最大になるので、変針時間を短くすれば角速度 r_R を大きくすることになる。変針動作の運動エネルギーは角速度の 2 乗に比例すると想定すると、単に変針時間を短くすることにのみ着目することは省エネルギーの観点から得策ではない。よって、変針時間を許容範囲内に設定して角速度を低くするために、変針時間と角速度とを用いた評価関数を導入し、それを最小にする等減速比を求めるところにする。

【0 0 9 6】

(31式) 及び (38式) から a を消去して T_a の 2 次方程式をつくり、その解を求めるところ、

【0 0 9 7】

【数 4 5】

$$T_a \approx \left(\frac{3}{2} \frac{\Delta \psi_R}{\delta_R} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \right)^{1/2} \frac{1}{(1+R_{vd})^{1/2}} \quad (44\text{式})$$

10

を得る。但し、

【0 0 9 8】

【数 4 6】

$$\frac{\Delta \psi_R}{24(1+R_{vd})\delta_R K_{sn} T_{sn}} \ll 1 \quad (45\text{式})$$

20

を仮定した。

【0 0 9 9】

同様に a を求め、変針時間 T_t と角速度 r_R とを求めるところ、

【0 1 0 0】

【数 4 7】

$$T_t \approx T_a (2+R_{vd}) = \left(\frac{3}{2} \frac{\Delta \psi_R}{\delta_R} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \right)^{1/2} \frac{2+R_{vd}}{(1+R_{vd})^{1/2}} \quad (46\text{式})$$

30

【0 1 0 1】

【数 4 8】

$$r_R \approx \frac{1}{6} \beta_a T_a = \left(\frac{2}{3} \Delta \psi_R \delta_R \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \right)^{1/2} \frac{1}{(1+R_{vd})^{1/2}} \quad (47\text{式})$$

になる。(46式) 及び (47式)において等減速比以外の変数は設定値であるから、変針時間 T_t と角速度 r_R は等減速比 R_{vd} の関数となる。

【0 1 0 2】

さらに、(46式) と (47式) から、等速時間をゼロ ($R_{vd} = 0$) とした変針時間とその角速度とに対する等速時間比と角速度比とを以下で定義して評価量とする。評価量は (46式) と (47式) から係数が取り除かれた形となる。

40

【0 1 0 3】

【数 4 9】

$$\bar{T}_t = \frac{T_t |_{R_{vd} \neq 0}}{T_t |_{R_{vd} = 0}} = \frac{2+R_{vd}}{2(1+R_{vd})^{1/2}} \quad (48\text{式})$$

【0 1 0 4】

【数 5 0】

$$\bar{r}_R = \frac{r_R |_{R_{vd} \neq 0}}{r_R |_{R_{vd} = 0}} = \frac{1}{(1+R_{vd})^{1/2}} \quad (49\text{式})$$

【0 1 0 5】

50

評価関数 J は、各評価量の 2 乗和とすると、

【0 1 0 6】

【数 5 1】

$$J = \bar{T}_t^2 + \lambda \bar{r}_r^2 = \frac{(2+R_{vd})^2 + 4\lambda}{4(1+R_{vd})} \rightarrow \min \quad (5 \text{ 0 式})$$

になり、この評価関数 J を最小にする等減速比 R_{vd} の値を求める。ここで、 λ は正の重みを示す。評価関数 J を R_{vd} で微分しそれをゼロとおくと、

【0 1 0 7】

【数 5 2】

10

$$\frac{dJ}{dR_{vd}} = \frac{R_{vd}^2 + 2R_{vd} - 4\lambda}{4(1+R_{vd})^2} = \frac{(R_{vd}+1+\sqrt{1+4\lambda})(R_{vd}+1-\sqrt{1+4\lambda})}{4(1+R_{vd})^2} = 0 \quad (5 \text{ 1 式})$$

になる。

【0 1 0 8】

様々な重み λ に対して、(5 1 式)を満足する等減速比 $R_{vd} (> 0)$ とそのときの評価関数 J の特性を調べると、表 2 のようになる。

【0 1 0 9】

【表 2】

20

λ	$R_{vd} > 0$	J	\bar{r}_r^2	\bar{r}_r	\bar{T}_t
1	1.24	1.62	0.45	0.67	1.08
2	2.00	2.00	0.33	0.58	1.29
2.36	2.23	2.12	0.31	0.56	1.34
3	2.61	2.30	0.28	0.53	1.42

30

重み λ が増加すれば評価関数は増加するが、変針時間の増加に対して、運動エネルギーの抑制効果が十分に期待できる範囲としては、2 . 3 . 6 の範囲、より好ましくは、 $\lambda = 2 . 3 . 6$ とするとよいことが分かる。即ち、 $R_{vd} = 2 . 6 . 1$ 、より好ましくは、 $R_{vd} = 2 . 2 . 3$ とするとよく、この等減速比 R_{vd} を基本的に固定に設定する。

【0 1 1 0】

2 . 4 舵速度の決定

次に、舵速度を決定する。舵速度 δ'_R は、(3 0 式)を変形すると

【0 1 1 1】

【数 5 3】

40

$$T_a = \frac{\beta_a T_s}{\delta'_R K_s} \quad (5 \text{ 2 式})$$

となる。(5 2 式)を(3 8 式)、(4 0 式)に代入すると、 β_a の 2 次方程式ができ、この解を求める

【0 1 1 2】

【数 5 4】

$$\beta_a = \frac{K_{sn}}{2} \left(-3\delta'_R + \sqrt{9\delta'^2_R + \frac{48\delta'_R \delta_R}{T_{sn}}} \right) \quad StableShip \quad (5 \text{ 3 式})$$

【0 1 1 3】

50

【数55】

$$\beta_d = \frac{K_{sn}}{2} \left(+ 3\delta'_R - \sqrt{9\delta'^2_R + \frac{48\delta'_R \delta_R}{T_{sn}}} \right) \quad UnstableShip \quad (54\text{式})$$

として求まる。定数 α_a が求まると、定数 T_a も (52式) から求めることができる。

【0114】

安定船と不安定船の定数の差異は α_a と α_d の計算だけなので、以下安定船を想定する。不安定船のときは便宜的に $\alpha_a = \alpha_d$ とすればよい。(30式) と (31式) とから

【0115】

【数56】

$$\Delta\psi_R = \frac{(1+R_{vd})}{6} \frac{T_{sn}^2}{K_{sn}^2} \frac{\beta_a^3}{\delta'^2_R} = \frac{(1+R_{vd})}{6} \frac{\beta_a^3}{C_R^2} \quad (55\text{式})$$

となる。

【0116】

(53式)、(54式)の α_a 、 α_d 、または T_a を (55式) に代入して消去すると、変針量 δ'_R と舵角 ψ_R 及び舵速度 $\dot{\psi}_R$ との関係式が得られる。即ち、

【0117】

【数57】

$$\Delta\psi_R = \frac{(1+R_{vd})}{48} \frac{T_{sn}^2 K_{sn}}{\delta'^2_R} \frac{1}{\delta'^2_R} \left(-3\delta'_R + \sqrt{9\delta'^2_R + \frac{48\delta'_R \delta_R}{T_{sn}}} \right)^3 \quad (56\text{式})$$

となる。

【0118】

変針時間 T_t を最短とする舵角 ψ_R の条件は、(46式) よりその上限である許容値を用いることである。

【0119】

ψ_R の範囲は、舵速度 $\dot{\psi}_R$ の可変範囲で設定することができるので、 $\dot{\psi}_R$ の範囲を例えれば、

【0120】

【数58】

$$\delta'_R \equiv [\delta'_{RL}, \delta'_{RH}] = [0.5, 1.0] \times \delta'_0 \quad (57\text{式})$$

と定める。舵速度 $\dot{\psi}_R$ と変針量 δ'_R との関係を図4に示す。

【0121】

変針量 δ_{RL} は $\dot{\psi}_R$ の上限値 $\dot{\psi}_{RH}$ を用いた値で、変針量 δ_{RH} は $\dot{\psi}_R$ の下限値 $\dot{\psi}_{RL}$ を用いた値である。変針量 $|\delta'_R|$ は、 $\dot{\psi}_{RL}$ 、 $\dot{\psi}_{RH}$ により3つの変針領域Small、Middle、Largeに分けられる。Middleは舵速度が変化する領域で、SmallとLargeは、舵速度がそれぞれ上限値 $\dot{\psi}_{RH}$ と下限値 $\dot{\psi}_{RL}$ とで一定の領域とする。

【0122】

変針量 δ_{RL} 、 δ_{RH} は、(56式) 等を用いて、 $\dot{\psi}_R = \dot{\psi}_{RH}$ のときの δ'_R を δ'_{RH} 、 $\dot{\psi}_R = \dot{\psi}_{RL}$ のときの δ'_R を δ'_{RL} として求めることができる。即ち、

【0123】

【数59】

$$\Delta\psi_{RL} = \Delta\psi_R |_{\delta'_{RH}}, \quad \Delta\psi_{RH} = \Delta\psi_R |_{\delta'_{RL}} \quad (58\text{式})$$

になる。

【0124】

また、Middleの舵速度は、(53式) または (54式) を (56式) に代入して $\dot{\psi}_R^{1/2}$ 10

³の二次方程式を解くと、

【0 1 2 5】

【数6 0】

$$\delta' R = \frac{1}{8} \left[\frac{C_\delta}{3K_{sn}} + \sqrt{\left(\frac{C_\delta}{3K_{sn}} \right)^2 + \frac{16\delta R}{C_\delta} \frac{K_{sn}}{T_{sn}}} \right]^3 \quad (59\text{式})$$

を得る。ここで - が安定船の場合に + が不安定船に対応し、

【0 1 2 6】

【数6 1】

$$C_\psi = \frac{6\Delta\psi_R}{I + R_{vd}} \quad C_\delta = C_\psi^{1/3} \left(\frac{K_{sn}}{T_{sn}} \right)^{2/3} \quad (60\text{式})$$

であり、変針量 R から対応する舵速度 r_R を求めることができる。

【0 1 2 7】

この結果、変針量の該当する変針領域は決定され、その領域から使用する最大舵速度 r'_R を決定する。

【0 1 2 8】

2.5 指定旋回角速度

角速度 r_R は、(11式)または(31式)より、 T_a と a を消去すると、

【0 1 2 9】

【数6 2】

$$r_R = \left(\frac{6\Delta\psi_R}{I + R_{vd}} \right)^{2/3} \frac{C_R^{1/3}}{6} \quad (61\text{式})$$

で求まる。

【0 1 3 0】

この求められた角速度 r_R を用いて、最大舵角 R を(41)式を用いて求め、最大舵角 R と許容舵角 θ_0 (表1参照)とを比較し、最大舵角 R が許容舵角 θ_0 よりも大きい場合には、許容舵角 $R = \theta_0$ を満足するような r_R を求め、さらに求めた r_R と指定旋回角速度 r_0 (表1参照)との大小関係を調べる。そして、求められた角速度 r_R が指定旋回角速度 r_0 以上の場合に、 $r_R = \text{sign}(r_R) r_0$ としてこれを基準角速度とする。角速度 r_0 以下の場合には r_R をそのまま基準角速度とする。前者の場合、角速度が変わるために、等減速比 $R_{vd} = 2, 2, 3$ の条件を満足しない。そのため、等速時間を調節することで変針条件を満足させる。等速モードの変針量 R_v と等速時間 T_v は

【0 1 3 1】

【数6 3】

$$\Delta\psi_{Rv} = \Delta\psi_{R0} - \Delta\psi_{Ra} - \Delta\psi_{Rd} \quad (62\text{式})$$

【0 1 3 2】

【数6 4】

$$T_v = \frac{\Delta\psi_{Rv}}{r_R} \quad (63\text{式})$$

になる。

【0 1 3 3】

3. 初期値を考慮した設計

次に、船体運動の初期値 C_{1a} と C_{2a} を考慮した場合について説明する。初期値は加速モ

10

20

30

40

50

ードにのみ組み込まれる。1回の加速モードの終端で角加速度の初期値 C_{1a} はゼロになるが、角速度の初期値 C_{2a} は参考針路の基準角速度 r_R に収束できない場合がある。1回の加速モードで対応できる初期値 C_{2a} の大きさは舵角制限により限定されるからである。そこで、加速モードを複数回組み合わせることによって、初期値の大きさの影響を排除する。

【0134】

初期値をゼロにして求めた基準角速度 r_R を用い、加速モードの終端で角速度が r_R になるように、且つ、舵速度が C_{1a} 、 C_{2a} をゼロとして変針量から決定した舵速度 r'_R を超えることのないように加速時間 T_a と加速定数 a を設定する。しかしながら、初期値 C_{2a} と r_R の大小関係及び初期値 C_{1a} の正負関係の組み合わせによっては、上記基準角速度 r_R を用いることが適当でない場合が生じる。この場合に、基準角速度 r_R を修正する。

10

【0135】

3.1 初期値の組み込み

まず、舵角制限を無視して初期値を含んだ加速モードの定数を求めるにする。舵速度は初期値 C_{1a} により開始または終端において異なる。両者の絶対値で大きい方を舵速度 r'_R に設定する。

【0136】

加速時間 T_a と加速定数 a とを(26式)及び(30式)の舵速度を用いて関係づけると、

【0137】

【数65】

$$\begin{cases} C_{Ra} = f \lg_a C_R - \frac{C_{Ia}}{T_{sn}}, & \beta_a = C_{Ra} T_a \quad t=0 \\ C_{Ra} = f \lg_a C_R, & \beta_a = C_{Ra} T_a - 2C_{Ia} \quad t=T_a \end{cases} \quad (64\text{式})$$

を得る。ここで、 C_{Ra} は加速モードの舵定数を、 $f \lg_a$ は極性定数をそれぞれ示し、 $t=0$ 、 $t=T_a$ は最大舵速度の発生時刻でそれぞれ開始と終端とを示す。

20

【0138】

初期値を含んだ加速モードの関係式は、(11式)の左辺の角速度 r_R に初期値をゼロにして求めた基準角速度を置けば得られる。(64式)の a を(11式)に代入すると T_a に関する2次方程式

30

【0139】

【数66】

$$\begin{cases} C_{Ra} T_a^2 + 4C_{Ia} + 6(C_{2a} - r_R) = 0 & t=0 \\ C_{Ra} T_a^2 + 2C_{Ia} + 6(C_{2a} - r_R) = 0 & t=T_a \end{cases} \quad (65\text{式})$$

を得る。 $C_{Ra} \neq 0$ から加速時間は、

【0140】

【数67】

$$T_a = \begin{cases} \frac{-2C_{Ia} \pm \sqrt{4C_{Ia}^2 - 6(C_{2a} - r_R)C_{Ra}}}{C_{Ra}} & t=0 \\ \frac{-C_{Ia} \pm \sqrt{C_{Ia}^2 - 6(C_{2a} - r_R)C_{Ra}}}{C_{Ra}} & t=T_a \end{cases} \quad (66\text{式})$$

40

になり、 a は(64式)から求まる。

【0141】

3.1.1 最大舵速度の発生時刻の決定

初期値に対応して最大舵速度の発生時刻が決まれば、 T_a は(66式)から、 a は(6

50

4式)から求まる。 $C_{2a} = r_R$ の場合と $C_{2a} > r_R$ の場合に分けて最大舵速度の発生時刻を求める。

【0142】

$C_{2a} = r_R$ の場合には、 $C_{1a} > 0$ ならば $\alpha_a < 0$ になり、参照針路の角加速度 ψ_{Ra} は下向きに凸となり、 $C_{1a} < 0$ ならば $\alpha_a > 0$ になり、参照針路の角加速度 ψ_{Ra} は上向きに凸となる。このため、最大舵速度は開始時に生じる。

【0143】

$C_{2a} > r_R$ の場合、さらに両者の大小関係の差が大きい場合と小さい場合とに分ける。この場合分けは、(66式)において差が大きい場合は $(C_{2a} - r_R)$ 成分が、差が小さい場合は C_{1a} 成分がそれぞれ支配的な状態であることに相当する。

10

【0144】

まず、差が大きい場合について検討する。 $C_{2a} > r_R$ ならば、 $\alpha_a < 0$ になり参照針路の角加速度 ψ_{Ra} は下向きに凸となり、最大舵速度は $C_{1a} > 0$ ならば開始時に、 $C_{1a} < 0$ ならば終端時に生じる。同様に、 $C_{2a} < r_R$ ならば、 $\alpha_a > 0$ になり参照針路の角加速度 ψ_{Ra} は上向きに凸となり、最大舵速度は $C_{1a} > 0$ ならば終端時に、 $C_{1a} < 0$ ならば開始時に生じる。表3にまとめる。

【0145】

【表3】

20

C_{2a} と r_R	C_{1a}	β_a	参照針路の角加速度 ψ_{Ra}	最大舵速度の時刻
$C_{2a} \gg r_R$	$C_{1a} > 0$	$\beta_a < 0$	下向きに凸	$t = 0$
$C_{2a} \gg r_R$	$C_{1a} < 0$	$\beta_a < 0$	下向きに凸	$t = T_a$
$C_{2a} \ll r_R$	$C_{1a} > 0$	$\beta_a > 0$	上向きに凸	$t = T_a$
$C_{2a} \ll r_R$	$C_{1a} < 0$	$\beta_a > 0$	上向きに凸	$t = 0$

ところが、 C_{2a} と r_R の差が小さい場合、特に、 $C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ 及び $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合は、上記表3とは異なり、以下で説明するように、最大舵速度の発生時刻が終端時ではなく開始時に起こり、最大舵速度の発生時刻が異なり、 C_{2a} と r_R の大小関係で発生時刻を一義的に決定することができなくなる。そのため、それらの場合には角速度 r_R に修正量を加えて差が大きい場合に変更することで、その条件から回避する必要がある。

30

【0146】

3.1.2 角速度修正量について

$C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ の場合及び $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合について、終端時 $t = T_a$ について調べる。 $|C_{2a} - r_R| > 0$ で両者の差が小さいとき、(66式)の $t = T_a$ は、

【0147】

【数68】

$$T_a \approx \frac{-C_{Ia} + |C_{Ia}| \sqrt{1 + \frac{\Delta r}{2C_{Ia}^2}}}{C_{Ra}} = \frac{\Delta r}{2C_{Ra}C_{Ia}} > 0 \quad (67\text{式})$$

40

となり、加速時間 T_a は差に比例して微小になる。ここで、 $r = -6(C_{2a} - r_R)$ とおく。但し、 $C_{1a} < 0$ のときに r の係数を-にしている。このとき、(64式)の α_a は T_a 成分よりも C_{1a} 成分が支配的になる。即ち、

【0148】

【数 6 9】

$$\beta_a = -2C_{Ia} + \varepsilon \quad (6.8\text{式})$$

になる。ここで、 $= C_{Ra} T_a$ としている。上式を(3式)に代入し、(6式)を用いると、

【0 1 4 9】

【数 7 0】

$$\psi''_{Ra}(t) = \frac{C_{Ia} - \varepsilon}{T_a^2} t^2 + \frac{-2C_{Ia} + \varepsilon}{T_a} t + C_{Ia} \quad (6.9\text{式})$$

10

になり、(6.9式)を微分すると

【0 1 5 0】

【数 7 1】

$$\psi'''_{Ra}(t) = 2 \frac{C_{Ia} - \varepsilon}{T_a^2} t + \frac{-2C_{Ia} + \varepsilon}{T_a} \quad (7.0\text{式})$$

になる。

【0 1 5 1】

舵速度は、(1.9式)より

【0 1 5 2】

【数 7 2】

$$\delta'_{FF}(t) = \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left(\psi'''_{Ra}(t) + \frac{1}{T_{sn}} \psi''_{Ra}(t) \right) \quad (7.1\text{式})$$

20

で与えられる。開始及び終端時刻での $''_{Ra}$ 、 $'''_{Ra}$ は、

【0 1 5 3】

【数 7 3】

$$\psi''_{Ra}(t) = \begin{cases} C_{Ia} & t=0 \\ 0 & t=T_a \end{cases}, \quad \psi'''_{Ra}(t) = \begin{cases} \frac{-2C_{Ia} + \varepsilon}{T_a} & t=0 \\ -\frac{\varepsilon}{T_a} & t=T_a \end{cases} \quad (7.2\text{式})$$

30

になるから、舵速度の大小関係は絶対値をとって開始及び終端時刻とで比較をすると(| $a + b| - |a| + |b|)|)、$

【0 1 5 4】

【数 7 4】

$$\begin{aligned} \left| \frac{-2C_{Ia} + \varepsilon}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right|_{t=0} - \left| \frac{\varepsilon}{T_a} \right|_{t=T_a} &\leq \left| \frac{-2C_{Ia}}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right|_{t=0} + \frac{|\varepsilon|}{T_a} \Big|_{t=0} - \frac{|\varepsilon|}{T_a} \Big|_{t=T_a} \\ &= \left| \frac{-2C_{Ia}}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right|_{t=0} > 0 \end{aligned} \quad (7.3\text{式})$$

40

になる。但し、ここで、 $T_a / T_{sn} < 2$ とする。よって、 $C_{2a} - r_R$ の差が小さいときには、最大舵速度は $t = T_a$ ではなく、 $t = 0$ で生じて、表3と矛盾が生じることが分かる。

【0 1 5 5】

そこで、 $t = 0$ での舵速度を $t = T_a$ と同じにする条件を求める。その場合、時刻 $t = 0$ と T_a とで、 $''_{Ra}(t)$ は同じになる。差が小さいときの $''_{Ra}(t)$ の係数 a は、 $a = C_{1a} -$ 、差が大きいときの $''_{Ra}(t)$ の係数 a は、 $a = -C_{Ra} T_a + C_{1a}$ となり、極性が逆になっている。つまり、差の大きさにより a がゼロになる場合を生じることになる。 a がゼロのとき、つまり、 $a = -C_{1a}$ のとき、 $''_{Ra}$ は時間に無関係になる

50

ので、舵速度への関与は一定となる。即ち、

【0 1 5 6】

【数7 5】

$$\psi''_{Ra}(t) = \frac{\beta_a}{T_a} t + C_{Ia} \quad , \quad \psi'''_{Ra}(t) = \frac{\beta_a}{T_a} \quad (74\text{式})$$

となり、舵速度に比例する $\psi'_{Ra} + (1/T_{sn})\psi''_{Ra}$ は、

【0 1 5 7】

【数7 6】

$$\begin{aligned} \frac{\beta_a}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} &= -\frac{C_{Ia}}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} & t = 0 \\ \frac{\beta_a}{T_a} + \frac{\beta_a + C_{Ia}}{T_{sn}} &= -\frac{C_{Ia}}{T_a} & t = T_a \end{aligned} \quad (75\text{式})$$

となる。 ψ'_{Ra} による ψ''_{Ra} の様子を図5に示す(但し、 $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合)。

【0 1 5 8】

$\psi'_{Ra} = -C_{1a}$ となるときの舵速度の大小関係を調べると、

【0 1 5 9】

【数7 7】

$$\left| \frac{-C_{Ia}}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right|_{t=0} - \left| \frac{+C_{Ia}}{T_a} \right|_{t=T_a} \begin{cases} < 0 & T_{sn} > 0 \\ > 0 & T_{sn} < 0 \end{cases} \quad (76\text{式})$$

になり、(73式)に比べ差の大きさは小さくなる。しかし、最大舵速度の時刻は T_{sn} 項の影響を受けるため、安定船の場合、 $t = T_a$ で最大となり、 $C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ 、及び $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合の条件を満足するが、不安定船の場合には、 $t = 0$ で最大となり、条件を満足できない。以下各々の場合を説明する。

【0 1 6 0】

3.1.2.1 安定船の場合

安定船の場合、(76式)において T_{sn} 項により舵速度は $t = T_a$ で最大となる。

(i) $C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ の場合

$\psi'_{Ra} = -C_{1a}$ になるように設定すればよいので、この不等式を(64式)を用いて変形すると、

$$\frac{\psi'_{Ra}}{C_{Ra}} = T_a - 2C_{1a} - C_{1a}$$

となる。

【0 1 6 1】

$C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ であり $C_{Ra} < 0$ であるから、

$T_a < C_{1a} / C_{Ra}$ であり、(66式)から

【0 1 6 2】

【数7 8】

$$T_a = \frac{-C_{Ia} + \sqrt{C_{Ia}^2 - 6(C_{2a} - r_R)C_{Ra}}}{C_{Ra}} \geq \frac{C_{Ia}}{C_{Ra}} > 0 \quad (77\text{式})$$

となる。2乗して極性に注意して整理すると、

【0 1 6 3】

【数7 9】

$$C_{2a} - r_R \geq -\frac{C_{Ia}^2}{2C_{Ra}} > 0$$

10

20

30

40

50

【 0 1 6 4 】

【数 7 9 a】

$$C_{2a} - r_R \geq r_C \quad r_C = -\frac{C_{Ia}^2}{2C_{Ra}} \quad (78\text{式})$$

となる。

【 0 1 6 5 】

(ii) $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合a - C_{1a} になるように設定すればよい。同様にこの不等式を変形すると、

$$\frac{a}{C_{Ra} T_a} = C_{Ra} T_a - 2 C_{1a} - C_{1a}$$

となり、

 $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ であり $C_{Ra} > 0$ であるから、

$$T_a < C_{1a} / C_{Ra}$$

【 0 1 6 6 】

【数 8 0】

$$T_a = \frac{-C_{Ia} + \sqrt{C_{Ia}^2 - 6(C_{2a} - r_R)C_{Ra}}}{C_{Ra}} \geq \frac{C_{Ia}}{C_{Ra}} > 0 \quad (79\text{式})$$

10

20

となる。2乗して極性に注意して整理すると、

【 0 1 6 7 】

【数 8 1】

$$C_{2a} - r_R \leq -\frac{C_{Ia}^2}{2C_{Ra}} < 0$$

【 0 1 6 8 】

【数 8 1 a】

$$C_{2a} - r_R \leq r_C \quad (80\text{式})$$

となる。

30

【 0 1 6 9 】

3.1.2.2 不安定船の場合

不安定船の場合、(76式)において $T_{sn} < 0$ より舵速度の最大値は $t = T_a$ でなく $t = 0$ で生じるので、 $t = 0$ での舵速度を $t = T_a$ での舵速度以下に設定すればよい。(i) $C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ の場合

(26式)、(64式)から

【 0 1 7 0 】

【数 8 2】

$$\frac{T_s}{K_s} \left(\frac{\beta_a}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right) \leq -\frac{T_s}{K_s} \frac{\beta_a + 2C_{Ia}}{T_a} = -f \lg_a \delta'_R \quad (81\text{式})$$

40

が得られる。さらに、

【 0 1 7 1 】

【数 8 3】

$$\left(\frac{\beta_a}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right) \leq -f \lg_a C_R$$

$$\frac{\beta_a}{T_a} \leq -f \lg_a C_R - \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \equiv C_{Rx} \quad (82\text{式})$$

$$\beta_a \leq C_{Rx} T_a$$

50

を得る。これを、(64式)の $t = T_a$ の T_a に代入すると、

【0172】

【数84】

$$\beta_a = C_{Ra}T_a - 2C_{Ia} \leq C_{Rx}T_a$$

$$(C_{Ra} - C_{Rx})T_a \leq 2C_{Ia} \quad (83\text{式})$$

になる。ここで、

【0173】

【数85】

$$C_{Ra} - C_{Rx} = flag_a C_R - \left(-flag_a C_R - \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right) = 2flag_a C_R + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \quad (84\text{式})$$

である。(83式)及び(84式)から T_a を取り出して、それを(66式)に代入すると、

【0174】

【数86】

$$T_a = \frac{-C_{Ia} \pm \sqrt{C_{Ia}^2 - 6(C_{2a} - r_R)C_{Ra}}}{C_{Ra}} \geq \frac{2C_{Ia}}{C_{Ra} - C_{Rx}} \quad (85\text{式})$$

となる。さらにこれを極性に注意して整理すると、

【0175】

【数87】

$$C_{2a} - r_R \geq r_C \quad (86\text{式})$$

【0176】

【数88】

$$r_C = -\frac{2}{3} \frac{(2C_{Ra} - C_{Rx})C_{Ia}^2}{(C_{Ra} - C_{Rx})^2} \quad (87\text{式})$$

として求まる。

【0177】

(ii) $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合

(i)と同様に(26式)、(64式)から

【0178】

【数89】

$$\frac{T_s}{K_s} \left(\frac{\beta_a}{T_a} + \frac{C_{Ia}}{T_{sn}} \right) \geq -\frac{T_s}{K_s} \frac{\beta_a + 2C_{Ia}}{T_a} = -flag_a \delta'_R \quad (88\text{式})$$

が得られる。そして、同様の計算を行なうと、

【0179】

【数90】

$$T_a = \frac{-C_{Ia} \pm \sqrt{C_{Ia}^2 - 6(C_{2a} - r_R)C_{Ra}}}{C_{Ra}} \leq \frac{2C_{Ia}}{C_{Ra} - C_{Rx}} \quad (89\text{式})$$

【0180】

【数91】

$$C_{2a} - r_R \leq r_C \quad (90\text{式})$$

を得る。

10

20

30

40

50

【0 1 8 1】

3.1.2.3 角速度修正量のまとめ

(78式)、(80式)、(86式)、(89式)において r_c は角速度修正量を示し、 C_{Ra} の極性と逆である。この結果、これら式を満足するときに最大舵速度は終端時間で生じ、その設定値になるが、満足しないとき角速度 r_R を修正量 r_c と初期値 C_{2a} を用いて

【0 1 8 2】

【数92】

$$r_R = C_{2a} - r_c, \quad \text{if } |C_{2a} - r_R| < |r_c| \quad (91\text{式})$$

に置き換えることによって、安定船不安定船の双方で時刻 $t = 0$ と $t = T_a$ の舵速度の大きさは等しく、その最大舵速度とすることができる。

【0 1 8 3】

以上の関係をまとめると次の表になる。

【0 1 8 4】

【表4】

船体の初期値		β_a の符号	最大舵速度の時刻	
$C_{2a} = r_R$	$C_{1a} = 0$	—	—	
	$C_{1a} > 0$	—1	$t = 0$	
	$C_{1a} < 0$	+1	$t = 0$	
$C_{2a} > r_R$	$C_{1a} = 0$	—1	$t = 0$	$t = T_a$ 可
	$C_{1a} > 0$	—1	$t = 0$	
	$C_{1a} < 0$	—1	$t = T_a$	(91式)の修正
$C_{2a} < r_R$	$C_{1a} = 0$	+1	$t = 0$	$t = T_a$ 可
	$C_{1a} > 0$	+1	$t = T_a$	(91式)の修正
	$C_{1a} < 0$	+1	$t = 0$	

10

20

30

【0 1 8 5】

3.2 初期値を含んだ舵角の導出

最大舵角は初期値による増加分でその許容値を超える場合を生じる。そのため初期値を含んだ舵角の式を求める。(35式)、(36式)に(64式)を代入して、初期値 C_{1a} の1次項までで近似すると、

【0 1 8 6】

【数93】

$$\begin{aligned} t_p &\approx \frac{T_a}{2} \left[\frac{\beta_a}{\beta_a + C_{1a}} + \frac{T_a}{4T_{sn}} \frac{(\beta_a + 2C_{1a})^2}{(\beta_a + C_{1a})^2} \right] \\ &\approx \frac{T_a}{2} \left(1 + \frac{T_a}{4T_{sn}} \right) + \frac{C_{1a}}{f \lg_a C_R} \left(-\frac{1}{2} + \frac{T_a}{4T_{sn}} \right) \end{aligned} \quad (92\text{式})$$

40

になる。(92式)は安定船不安定船の双方に対応する。舵角の極値である最大舵角は a に依存するため、最大舵速度の発生時間毎に求める。

【0 1 8 7】

3.2.1 最大舵速度が開始時間で生じる場合

舵角と加速時間との関係式は、極値時間 t_p を(64式)の $t = 0$ の a と舵角の式である(20式)に代入して C_{1a} の1次項までで近似すると、

50

【 0 1 8 8 】

【数 9 4】

$$\delta_R \approx \frac{f \lg_a}{4} \delta'_R T_a \left[1 + \frac{1}{3} \frac{T_a}{T_{sn}} + \frac{1}{16} \left(\frac{T_a}{T_{sn}} \right)^2 \right] + \frac{C_{1a}}{K_{sn}} \left\{ \frac{3}{4} T_{sn} + \frac{T_a}{4} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{48} \frac{T_a}{T_{sn}} - \frac{1}{16} \left(\frac{T_a}{T_{sn}} \right)^2 \right] \right\} + \frac{C_{2a}}{K_{sn}} \quad (9.3\text{式})$$

【 0 1 8 9 】

として得られる。(40式)では T_a の2次式を用いたが、ここでは3次式まで用いている。その理由は、 C_{1a} の T_a の3次係数が2次係数と比べ十分に小さくならず省略できないためである。(93式)から舵角は加速時間 T_a と初期値 C_{1a} 、 C_{2a} とを用いて算出できる。算出した舵角の絶対値が設定値である許容舵角を超えた場合、舵角の絶対値は加速時間を変更することによって許容舵角に一致させる。即ち、(93式)で舵角 δ_R を設定値である許容舵角 δ_0 に置き換えると、 T_a の3次方程式は、

【 0 1 9 0 】

【数 9 5】

$$\frac{T_a^3}{64T_{sn}^2} \left(f \lg_a \delta'_R - \frac{C_{1a}}{K_{sn}} \right) + \frac{T_a^2}{12T_{sn}} \left(f \lg_a \delta'_R - \frac{C_{1a}}{16K_{sn}} \right) + \frac{T_a}{4} \left(f \lg_a \delta'_R + \frac{C_{1a}}{3K_{sn}} \right) + \frac{3}{4} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} C_{1a} + \frac{1}{K_{sn}} C_{2a} - f \lg_a \delta_0 = 0 \quad (9.4\text{式})$$

になり、 T_a は求まる。 T_a より δ_a が求まり、角速度 r_R は(11式)より求まる。

【 0 1 9 1 】

3.2.2 最大舵速度が終端時間で生じる場合

舵角と加速時間の関係式は、極値時間 t_p を $t = T_a$ の δ_a と舵角の式である(64式)に代入して C_{1a} の1次項までで近似すると、

【 0 1 9 2 】

【数 9 6】

$$\delta_R \approx \frac{f \lg_a}{4} \delta'_R T_a \left[1 + \frac{1}{3} \frac{T_a}{T_{sn}} + \frac{1}{16} \left(\frac{T_a}{T_{sn}} \right)^2 \right] + \frac{C_{1a}}{K_{sn}} \left[\frac{1}{4} T_{sn} + \frac{T_a}{2} \left(\frac{1}{3} + \frac{3}{32} \frac{T_a}{T_{sn}} \right) \right] + \frac{C_{2a}}{K_{sn}} \quad (9.5\text{式})$$

【 0 1 9 3 】

として得られる。同様に、算出した舵角の絶対値が許容舵角を超えた場合、舵角の絶対値は加速時間を変更することによって許容舵角に一致させる。即ち、(95式)で舵角 δ_R を許容舵角 δ_0 に置き換えると、 T_a の3次方程式は、

【 0 1 9 4 】

【数 9 7】

$$\frac{T_a^3}{64T_{sn}^2} f \lg_a \delta'_R + \frac{T_a^2}{12T_{sn}} \left(\frac{f \lg_a \delta'_R}{12} + \frac{3C_{1a}}{64K_{sn}} \right) + T_a \left(\frac{f \lg_a \delta'_R}{4} + \frac{C_{1a}}{6K_{sn}} \right) + \frac{1}{4} \frac{T_{sn}}{K_{sn}} C_{1a} + \frac{1}{K_{sn}} C_{2a} - f \lg_a \delta_0 = 0 \quad (9.6\text{式})$$

になり、 T_a は求まり、また、 T_a より δ_a が求まり、角速度 r_R は(11式)より求まる。

【 0 1 9 5 】

4. 小角度対応

10

20

30

40

50

船体運動の初期値がゼロでない $C_{1a} \neq 0, C_{2a} \neq 0$ において、参照針路は初期値を減衰して、変針量に一致するように構成される。このときに、変針量が小さいと、旋回角速度が小さく設定されることになる。ところが、初期値を減衰させるために必要である方位変化量が変針量よりも大きいときには、小さい旋回角速度で旋回するために、変針時間がかかってしまう、という問題がある。この状態を小角度と呼ぶ。

【0196】

この対応として、方位変化量が変針量より大きいと判断した場合、小角度対応として加速モードを減衰モードと通常モードとに分けて、減衰モードで初期値を減衰した後、次の通常モードでその間の方位変化と変針量との和を改めて変針量に置き換えて、加速モードの参照針路を求めるようにする。

10

【0197】

減衰モードを発生させるか否かの判定の具体的な計算は、まず、初期値に起因した方位変化量 i_{ini} を求める。初期値に起因した方位変化量 i_{ini} は、加速時間 T_a と加速定数 a_a とを求める (5式)、(6式) から

【0198】

【数98】

$$\psi_{ini} = \frac{T_a^2}{12} (\beta_a + 5C_{1a}) + C_{2a}T_a \quad (97\text{式})$$

で得られる。次いで、この方位変化量 i_{ini} と変針量とを比較して、小角度対応するかどうかを決定する。

20

【0199】

5. 船体モデルの修正

以上の説明においては、フィードフォワード制御器 12-2 の伝達関数を、船体プラントの伝達関数 $P(s)$ の逆特性を有すると仮定して、具体的には、特許文献 1 で示すものと同じ (式 1) を用いて解析している。

【0200】

しかしながら、特許文献 1 の (式 1) の野本の 1 次モデルを用いた船舶用自動操舵装置では、実船において変針後にオーバーシュートを生じる場合がある。オーバーシュートの原因是、実際の船体特性と制御系の船体モデルとの差異が無視できないことに起因すると考えられる。従って、適切な船体モデルを特定する必要がある。

30

【0201】

図 6 は、参照針路及び参照針路の 1 階微分の変針応答の時間変化を表しており、参照針路 R に対する船首方位の偏差誤差は、変針状態において無視できる程小さく、静定状態の開始時において偏差誤差はほぼゼロで、その後、オーバーシュートを生じ、再びゼロに収斂している。参照角速度 d_R / dt に対する旋回角速度 d / dt の偏差誤差は、変針状態の終端時において加速モードで一致し、等速モードで誤差を生じ、減速モードでゼロに戻らず誤差を持ち、静定状態において開始時の誤差 (初期値) がゼロに収斂する。よって、静定状態の方位のオーバーシュート発生は、角速度初期値に起因していると考えられる。

40

【0202】

まず、モデルとして野本の 1 次モデルと 2 次モデルとを考える。

野本の 2 次モデルは、

【0203】

【数99】

$$\psi(s) = \frac{K_s(T_{s3}s + 1)}{s(T_{s1}s + 1)(T_{s2}s + 1)} \delta_c(s) \quad (98\text{式})$$

【0204】

として表される。ここで、 δ_c は命令舵角を、 K_s 、 T_{s1} 、 T_{s2} 、 T_{s3} は船体パラメータで旋回力ゲイン、3つの時定数を示す。船体パラメータの極性は $T_{s2} > 0$ 、 $T_{s3} > 0$ で、安

50

定船では $K_s > 0$ 、 $T_{s1} > 0$ 、不安定性では $K_s < 0$ 、 $T_{s1} < 0$ である。時定数の大小関係は、 $|T_{s1}| > T_{s3} > T_{s2}$ となる。野本の 1 次モデルと 2 次モデルのそれぞれのブロック図を図 7 (a)、(b) にそれぞれ示す。同図で (0) 、 $'(0)$ 、 $'_1(0)$ 、 $'_2(0)$ は初期値を、 $r = d / dt$ を示す。

【0205】

静定状態は、フィードバック制御器 12-3 による閉ループ応答になる。

【0206】

【数100】

$$\delta_c = (K_D s + K_P) (\psi_R(s) - \psi(s)) \quad (99\text{式})$$

【0207】

ここで、 K_P 、 K_D はフィードバックゲインでそれぞれ比例ゲインと微分ゲインを示す。静定状態の初期条件は、

【0208】

【数101】

$$\psi_0 = \psi(0) = \psi_{R0}, \quad \psi'(0) = \psi(t_d) \quad (100\text{式})$$

と定める。ここで、 ψ_{R0} は参照針路の変針量を示す。

【0209】

(99式)を(98式)に代入すると、

【0210】

【数102】

$$\psi(s) = \frac{K_s (T_{s3}s + 1)(K_D s + K_P) \psi_R(s) + (T_{s1}s + 1)(T_{s2}s + 1) \psi_0 + (T_{s2}s + 1) T_{s1} \psi'_{10} + (T_{s3}s + 1) T_{s2} \psi'_{20}}{s(T_{s1}s + 1)(T_{s2}s + 1) + K_s (T_{s3}s + 1)(K_D s + K_P)} \quad (101\text{式})$$

になる。但し、 $'_{10} = '_1(0)$ 、 $'_{20} = '_2(0)$ としている。上式に静定状態の初期条件を当てはめると、

【0211】

【数103】

$$\psi(s) = \frac{\psi_{R0} + (T_{s2}s + 1) T_{s1} \psi'_{10} + (T_{s3}s + 1) T_{s2} \psi'_{20}}{T_{s1} T_{s2} (s + a)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (102\text{式})$$

となる。ここで、特性多項式を実数 a 、減衰係数 ζ 及び固有周波数 ω_n で因数分解することができるとしている。

【0212】

静定状態の応答は、上式から第 1 項が一定値になり、第 2 項が時定数 T_{s1} と T_{s2} の 1 次遅れ要素によるそれぞれ $'_{10}$ 、 $'_{20}$ との初期値応答になる。両者の初期値応答の差異は、分母の特性多項式が共通であるから、分子の係数及び初期値の大きさにより決定される。差異を調べるために、次式

【0213】

【数104】

$$\psi^*(s) = \frac{(s + 1/T_c)G}{(s + a)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (103\text{式})$$

を定める。ここで、 T_c は時定数、 G はゲインを示す。上記の時間解は $0 < t < 1$ とおくと、

【0214】

【数105】

$$\frac{\psi^*(s)}{G} = -Ae^{-at} + e^{-\zeta\omega_n t} \left[\frac{-A\zeta\omega_n + B}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\left(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t\right) + A\cos\left(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t\right) \right] \quad (104\text{式})$$

になる。ここで、

【0215】

【数106】

$$A = \frac{a - 1/T_c}{a^2 - 2\zeta\omega_n a + \omega_n^2}, \quad B = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{T_c} + A\omega_n^2 \right) = \frac{(a - 2\zeta\omega_n)/T_c + \omega_n^2}{a^2 - 2\zeta\omega_n a + \omega_n^2} \quad (105\text{式})$$

10

を示す。(104式)より、応答の振幅およびピーク値はGの大きさに比例し、ピーク時間はsin項のみの場合に比べcos項の係数Aに比例して早まる。(101式)の特性方程式

【0216】

【数107】

$$s^3 + \frac{T_{s1} + T_{s2} + K_D K_s T_{s3}}{T_{s1} T_{s2}} s^2 + \frac{1 + K_s (K_D + K_P T_{s3})}{T_{s1} T_{s2}} s + \frac{K_P K_s}{T_{s1} T_{s2}} = 0 \quad (106\text{式})$$

から、実数aの近似解は時定数の大小関係 $|T_{s1}| > T_{s3} > T_{s2}$ より $|T_{s1}| > T_{s2}$ を用いると、

【0217】

【数108】

$$a = \frac{1}{T_{s1}} + \frac{1}{T_{s2}} + \frac{K_D K_s T_{s3}}{T_{s1} T_{s2}} \approx \frac{1}{T_{s2}} > \omega_n \quad (107\text{式})$$

20

になる。また、A, Bの分母は、 $a^2 - 2\zeta\omega_n a + \omega_n^2 = (a - \omega_n)^2 + \omega_n^2(1 - \zeta^2) > 0$ となる。 $'_{10}, '_{20}$ との初期値応答は、(104式)の特性により次のようになる。

【0218】

・初期値 $'_{10}$ の場合

$T_c = T_{s2}, G = '_{10}$ より $A = 0, B = 1$ に近似できる。応答は(104式)において、sin項が支配的になり、1次モデルの場合とほぼ同じになる。これにより、 $'_{10} = '_{20}$ となる。

・初期値 $'_{20}$ の場合

$T_c = T_{s3}, G = '_{20} T_{s3} / T_{s1}$ より $A > 0, B < 1$ になる。応答は初期値 $'_{10}$ の場合に比べて、ピーク値が $'_{20} < '_{10}$ を仮定して、

【0219】

【数109】

$$\frac{|\psi'_{20}| T_{s3}}{|\psi'_{10}| T_{s1}} \approx \frac{T_{s3}}{|T_{s1}|} \ll 1 \quad (108\text{式})$$

30

になるため減少し、ピーク時間が早まる。

【0220】

これにより、静定状態の初期値応答は時定数 T_{s2} に起因したものより時定数 T_{s1} に起因したものが支配的になる。よって、初期値 $'_{20}$ に対応する時定数 T_{s2} の1・BR>返Xれ要素は2次モデルの分母から省略することができる。一方で、2次モデルの分子の時定数 T_{s3} はオーバーシュートの発生抑制のために存在する必要がある。

【0221】

そこで、本発明では、船体モデルとして図8に示すように、

【0222】

40

50

【数 1 1 0】

$$\psi(s) = \frac{K_s(T_{s3}s+1)}{s(T_s s+1)} \delta_c(s) \quad (109\text{式})$$

を採用し、フィードフォワード制御器 12-2 の伝達関数は、その逆数の特性となるよう

に、

【0 2 2 3】

【数 1 1 1】

$$\delta_{FF}(s) = K_{FF} \psi_R(s) = \frac{s(T_s s+1)}{K_s(T_{s3}s+1)} \psi_R(s) \quad (110\text{式})$$

10

と設定し、時定数 T_{s3} を更なる船体パラメータとする。

【0 2 2 4】

しかしながら、軌道演算部 12-1 の構成は変更せずに、前項 1~4 で説明してきたように、1 次モデルを用いて演算を行なう。なぜならば、設定された最大舵角及び最大舵速度は、時定数 T_{s3} の存在によるローパスフィルタ効果で抑制されるため、操舵機への要求が低減される方向になるからであり、また、船体運動の初期値に対する変化はないからである。

【0 2 2 5】

6. 軌道演算部の処理

20

軌道演算部 12-1 で行なわれる処理について図 9 ないし図 11 のフローチャートに基づき説明する。

【0 2 2 6】

ステップ S 1 0 : まず、変針条件が入力される。変針条件は、所望される変針量 δ_0 、指定旋回角速度 r_0 、船体運動の初期値 C_{1a} 、 C_{2a} 、船体パラメータのノミナル値 T_{sn} 、 K_{sn} 、許容舵角 δ_0 、舵速度の上限値 $'_{RH}$ 、下限値 $'_{RL}$ などがある。

【0 2 2 7】

船体運動の初期値 C_{1a} 、 C_{2a} は、変針開始時に変針中であったときの前回の変針に対して軌道演算部で演算を行った参照針路の 2 階微分と 1 階微分との変針開始時の値から求めることとする。即ち、前回の変針時における時間 t' で次の変針の設定があったときに、初期値は、前回の変針時の参照針路の 2 階微分 $"_R(t') = C_{1a}$ と 1 階微分 $'_R(t') = C_{2a}$ とする。これにより、ノイズの影響を受けない初期値を得ることができる。

30

【0 2 2 8】

ステップ S 1 2 : 次いで、変数の設定を行なう。舵速度の制限値 $'_{RH}$ 、 $'_{RL}$ に対する図 4 に示す変針領域の設定を行う。このときには、 $'_{RL}$ 、 $'_{RH}$ は (56 式) (58 式) から求めることができる。

【0 2 2 9】

ステップ S 1 4 : 次いで、船体運動の初期値を減衰させる、即ち小角度対応を行なうか否かを判定する。具体的には、方位変化量 i_{ini} と変針量 δ_0 の比較を行なう。(97 式) から方位変化量を求める。尚、(97 式) における加速時間 T_a と加速定数 r_a は、 $r_R = 0$ 、 $'_R$ は制限値(上限値または下限値)として(66 式)及び(64 式)から求められたものを用いる。

40

【0 2 3 0】

ステップ S 2 0 : 減衰モードを実行せずに通常モードのみを行なう場合、以下で説明する参照針路の計算を行なう。

【0 2 3 1】

ステップ S 4 0 : 減衰モードを実行する場合には、以下で説明する初期値の減衰と変針量の計算を行なう。ステップ S 4 0 の後、ステップ S 2 0 の参照針路の計算を行なう。

【0 2 3 2】

次に、加速モードの通常モードの場合の参照針路の計算は、図 10 に示すフローチャー

50

トに基づき行ない、所望される変針量、設定の角速度及び初期値とから参照針路を求める。

【0233】

ステップS22：変針量 ψ_0 、角速度 r_0 及び船体運動の初期値 C_{1a} 、 C_{2a} の入力を行なう。そのため、ノイズの影響を受けない初期値を得ることができる。

【0234】

ステップS24：初期値 C_{1a} 、 C_{2a} を用いずに、変針量 ψ_R に対する舵速度 r'_R と角速度 r_R を求める。

【0235】

即ち、与えられた変針量 ψ_R に対してステップS12で設定された図4の变速領域のいずれの領域に属するかを判定し、該当する舵速度 r'_R を求める。また、旋回角速度を(61式)を用いて求める。旋回角速度が指定旋回角速度 r_0 を超えるときには角速度 $r_R = \text{sign}(\psi_R) r_0$ とする。

10

【0236】

ステップS26：加速、等速、減速の各モードの計算を行なう。各モードの定数を求める。加速モードについては、最大舵角を許容舵角以下にする条件で初期値を減衰させ、且つ終端時の旋回角速度を基準角速度 r_R に一致させるように設定する。但し、基準角速度 r_R については、表4に示した条件を判定し、 $C_{2a} > r_R$ で $C_{1a} < 0$ の場合、及び $C_{2a} < r_R$ で $C_{1a} > 0$ の場合には(91式)の修正を行う。

20

【0237】

また、加速時間 T_a と加速定数 a は、(66式)及び(64式)から求められたものを用いるが、(93式)または(95式)で求めた舵角 ψ_R が設定値である許容舵角を超える場合には、(94式)または(96式)より T_a を求め、(64式)から加速定数 a を、(11式)から角速度 r_R を求める。

【0238】

変針量 ψ_R と各モードの変針量の総和との誤差は等速時間を修正することで、打ち消す。即ち等速時間は、

【0239】

【数112】

$$\Delta\psi_{Rv}^* = \Delta\psi_0 - (\Delta\psi_{Ra} + \Delta\psi_{Rv} + \Delta\psi_{Rd}) \quad (111\text{式})$$

30

【0240】

【数113】

$$T_v = \frac{\Delta\psi_{Rv} + \Delta\psi_{Rv}^*}{r'_R} = \frac{\Delta\psi_0 - (\Delta\psi_{Ra} + \Delta\psi_{Rd})}{r'_R} \quad (112\text{式})$$

【0241】

になる。ここで、 ψ_0 、 ψ_{Ra} 、 ψ_{Rv} 、 ψ_{Rd} は変針量でそれぞれ設定値、加速、等速、減速のモードの変針量を表し、 $(\cdot)^*$ は修正値を、 T_v は等速時間を、 r'_R は角速度を表す。

【0242】

ステップS28：等速時間が負でなく、角速度が基準角速度(ステップS24で求めた角速度)になったかどうかを判定する。判定は等速時間がゼロ以上であり、且つ角速度と基準角速度との絶対値の誤差が収束値以下の場合に次のステップに進み、そうでないときに繰り返しループに戻る。

40

【0243】

ステップS30：ステップS28で判定がnoである場合、累積変針量と初期値との更新を行なう。加速モードによる方位変化を変針量に加えて、加速モードの終了時の角速度を角速度の初期値に置き換える。即ち、

【0244】

【数114】

$$\Delta\psi_0^* = \Delta\psi_0 - \sum \Delta\psi_{Ra} \quad (113\text{式})$$

50

【 0 2 4 5 】

【 数 1 1 5 】

$$C_{1a} = 0$$

(114式)

【 0 2 4 6 】

【 数 1 1 6 】

$$C_{2a} = r_R$$

(115式)

になる。ここで、 r_0 は修正変針量を、 r_{Ra} は加速モードの累積値をそれぞれ示す。

【 0 2 4 7 】

次に、減衰モードは、図 1 1 に示すフローチャートに基づき行ない、変針量を考慮しないで舵速度を制限値として初期値の絶対値をゼロに漸近させ、その過程で生じた方位変化を蓄積する。

【 0 2 4 8 】

ステップ S 4 2 : 船体運動の初期値の入力と基準角速度ゼロの設定を行なう。

ステップ S 4 4 : 加速モードの角速度終端値と変針量 (97式) との計算を行なう。

ステップ S 4 6 : 角速度終端値がゼロか否かの判定を行なう。判定は、終端値の絶対値が収束値 以下 のときに次のステップに進み、そうでないときに繰り返しループに戻る。

ステップ S 4 8 : ステップ 3 0 と同様の処理を行なう。

【 0 2 4 9 】

以上のようにして演算された参照針路は、順次、フィードフォワード制御器 1 2 - 2 に出力されて、そこで、フィードフォワード舵角 F_F が演算されて、フィードバック制御器 1 2 - 3 からのフィードバック舵角 F_B が加算器 1 2 - 5 で加算された後、操舵機 1 6 へと出力される。参照針路は、 K_{sn} 、 T_{sn} を基準に計算しているが、船体モデルは (109式) T_{s3n} を含むために、フィードフォワード制御器 1 2 - 2 における演算にあたっては、(110式) で示すように、参照針路は T_{s3n} の 1 次遅れ系を通過させた時間関数解とする。これによって、変針時のオーバーシュートを防止する。

【 0 2 5 0 】

図 1 2 及び図 1 3 は、様々な条件におけるシミュレーション結果を示している。図 1 2 は、不安定船の大角度変針時を表しており、 $r_0 = -15 \text{ deg}$ 、 $C_{1a} = 0.01 \text{ deg/s}^2$ 、 $C_{2a} = 0.3 \text{ deg/s}$ の条件で、1 回の加速モードでは基準旋回角速度に収束できないために 2 回の加速モードを組み合わせている例である。図 1 3 (A) は安定船の小角度変針時を表しており、 $r_0 = 0 \text{ deg}$ 、 $C_{1a} = 0 \text{ deg/s}^2$ 、 $C_{2a} = 0.9 \text{ deg/s}$ の条件で、2 回の減衰モードで初期値を減衰させた後、1 回の通常モードで基準角速度に収束させている例である。図 1 3 (B) は不安定船の小角度変針時を表しており、 $r_0 = 0 \text{ deg}$ 、 $C_{1a} = 0 \text{ deg/s}^2$ 、 $C_{2a} = -0.8 \text{ deg/s}$ の条件で、7 回の減衰モードで初期値を減衰させた後、1 回の通常モードで基準角速度に収束させている例である。

【 0 2 5 1 】

7. 等減速比の変形例

以上の説明では、等減速比を前掲 2.3 章で説明したように固定値で設計し、これによって、加速・等速・減速の釣合を重視している。しかしながら、この設計では、大きな変針でないと、角速度 r_R を指定旋回角速度 r_0 に一致させることができない。

【 0 2 5 2 】

そこで、等減速比を固定から可変とした変形例に基づく軌道演算部 1 2 - 1 を図 1 4 に示す。軌道演算部 1 2 - 1 は、等減速比演算部 1 2 - 1 - 1 と、参照針路演算部 1 2 - 1 - 2 とから構成し、参照針路演算部 1 2 - 1 - 2 は、図 1 の軌道演算部 1 2 - 1 と同じ作用を果たすものとする。等減速比演算部 1 2 - 1 - 1 では、変針開始時点の旋回角加速度の初期値 C_{1a} と旋回角速度の初期値 C_{2a} をゼロとして旋回角速度 r_R を求め、その際に、旋回角速度 r_R が指定旋回角速度 r_0 に等しいと仮定したときに、舵角 R が許容舵角 r_0 以下の条件を満足するときに、旋回角速度 r_R を指定旋回角速度 r_0 に決定し、該条件を満足

10

20

30

40

50

しないときに、舵角 r_R と許容舵角 r_0 との偏差を最も小さくする角速度を旋回角速度 r_R に決定し、それを新たな指定旋回角速度とする。そして、その決定された指定旋回角速度における最大舵速度 r_R' を舵速度上限値とする。

【0253】

そして、舵角 r_R が許容舵角 r_0 以下の条件を満足するかどうかを判定するときに、等減速比 R_{vd} を変化させながら、条件を満足するかを判定する。そして等減速比 R_{vd} を変化させても舵角条件を満足しない場合には、角速度 r_R を変化させて、舵角条件を満足させる角速度 r_R を見つける。等減速比演算部 12-1-1 で行う具体的な処理について以下、説明する。

【0254】

7.1 準備

ここで、今までの説明に登場し、且つ以下の説明で用いる関係式を整理する。この等減速比演算部 12-1-1 においては初期値 C_{1a} 、 C_{2a} を考慮しない関係式を使用する。

【0255】

【数117】

$$T_a = C_\psi^{1/3} C_R^{-1/3} = \frac{\Delta\psi_R}{r_R(1+R_{vd})} = \sqrt{\frac{6r_R}{C_R}} \quad (116\text{式})$$

【0256】

【数118】

$$\beta_a = C_\psi^{1/3} C_R^{2/3} = 6 \frac{r_R}{T_a} \quad (117\text{式})$$

【0257】

【数119】

$$r_R = C_\psi^{2/3} C_R^{1/3} / 6 \quad (118\text{式})$$

【0258】

【数120】

$$\delta'_R = \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \frac{\beta_a}{T_a} = \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \frac{6r_R^2}{T_a} \frac{1+R_{vd}}{\Delta\psi_R} = 6r_R^3 \frac{T_{sn}}{K_{sn}} \left(\frac{1+R_{vd}}{\Delta\psi_R} \right)^2 \quad (119\text{式})$$

20

30

【0259】

【数121】

$$\delta_R = \frac{1}{4} \delta'_R T_a \left[1 + \frac{1}{3} \frac{T_a}{T_{sn}} + \frac{1}{16} \left(\frac{T_a}{T_{sn}} \right)^2 \right] \quad (120\text{式})$$

【0260】

【数122】

$$T_t = T_a (2 + R_{vd}) = \frac{\Delta\psi_R}{r_R} \left(1 + \frac{1}{1+R_{vd}} \right) \quad (121\text{式})$$

40

であり、 C_ψ 、 C_R は、(30式)、(60式)から

【0261】

【数123】

$$C_\psi = \frac{6\Delta\psi_R}{1+R_{vd}} \quad (122\text{式})$$

【0262】

【数124】

$$C_R = \delta'_R \frac{K_{sn}}{T_{sn}} = \frac{\beta_a}{T_a} \quad (123\text{式})$$

50

である。

【0 2 6 3】

7.2 最大舵角で等減速比 $R_{vd} = 0$ が実現できる角速度

舵速度の制限がなしとして、許容舵角 ψ_0 、等減速比 $R_{vd} = 0$ で実現できる指定旋回角速度 r_0 を求める。(119式) の r_R を r_0 に、(120式) の r_R を r_0 にそれぞれ置き換えると、 R_{vd} の2次方程式

【0 2 6 4】

【数125】

$$aR_{vd}^2 + bR_{vd} + c = 0 \quad (124\text{式})$$

10

を得る。ここで、各係数は、以下の通りである。

【0 2 6 5】

【数126】

$$a = c_2, \quad b = 2c_2 - c_1, \quad c = c_2 - c_1 + \frac{1}{16c_2} \quad (125\text{式})$$

$$c_1 = \frac{\delta_0 K_{sn}}{1.5 r_0} - \frac{1}{3}, \quad c_2 = \frac{r_0 T_{sn}}{\Delta\psi_R} \quad (126\text{式})$$

【0 2 6 6】

判別式 $D = b^2 - 4ac = 0$ のとき、 r_0 は実現し、 $D < 0$ のとき、 r_0 は実現しない。 $D < 0$ になるときには、 $D = c_1^2 - 1/4 = 0$ を満足する r_0 が実現できる角速度となる。まとめると、許容舵角の下で実現できる角速度は、

【0 2 6 7】

【数127】

$$r_0 = r_0 \quad (D \geq 0) \quad (127\text{式})$$

$$r_0 = 0.8\delta_0 K_{sn} \quad (D < 0) \quad (128\text{式})$$

20

により決まる。

【0 2 6 8】

7.3 許容舵速度で等減速比 $R_{vd} = 0$ が実現できる角速度

さらに、許容舵速度 ψ_0 、最大舵角の制限なし、等減速比 $R_{vd} = 0$ で実現できる角速度 r_R を求める。 ψ_0 に対応する C_R を C_{R0} とすると、

【0 2 6 9】

【数128】

$$R_{vd\ max} = \Delta\psi_R \sqrt{\frac{C_{R0}}{6r_0^3}} - 1 \quad (129\text{式})$$

40

になる。等減速比 $R_{vd\ max}$ が より小さいときには、 r_R は実現できないので、その場合には、角速度 r_R を

【0 2 7 0】

【数129】

$$r_R = \left(\Delta \psi_R^2 \frac{C_{R0}}{6} \right)^{1/3}$$

$$R_{vd} = \varepsilon$$

のように下げる。ここで、 ε は 10^{-3} 程度の設定値とする。まとめると、

【0271】

【数130】

$$R_{vd} = R_{vd\ max}, \quad r_R = r_R \quad (R_{vd\ max} \geq \varepsilon) \quad (130\text{式})$$

$$R_{vd} = \varepsilon, \quad r_R = \left(\frac{\psi_0 C_{R0}}{6} \right)^{1/3} \quad (R_{vd\ max} < \varepsilon) \quad (131\text{式})$$

となる。

【0272】

7.4 最大舵角との比較

上記(130式)、(131式)で決めた R_{vd} 、 r_R としたときに舵角の最大値が許容舵角 θ_0 を超えていないかどうかを確認する。具体的には、(130式)、(131式)で決めた R_{vd} 、 r_R を用いて、(116)式、(117)式、(119)式から舵速度 r_R' を求める。求めた舵速度 r_R' を用いて、(120式)から舵角 θ_R を求める。求めた舵角 θ_R と許容舵角 θ_0 との比較を行い、 $\theta_R > \theta_0$ であれば、7.7の手順に進む。 $\theta_R > \theta_0$ であれば、まず、優先度の最も低い $R_{vd} > 0$ を調整して変針条件に適合させ、次いで、優先度が R_{vd} の次に低い r_R を調整して変針条件に適合させる。そのための準備として、まず、舵角 θ_R の等減速比 R_{vd} に関する特性及び角速度 r_R に関する特性をそれぞれ調べる。

【0273】

7.4.1 舵角 θ_R の等減速比 R_{vd} に関する特性

(119式)を(120式)に代入して、 r_R の R_{vd} に関する一次微分、二次微分を求める。すると、

【0274】

【数131】

$$\frac{d\delta_R}{dR_{vd}} = 1.5 \frac{r_R}{K_{sn}} \left[\frac{r_R T_{sn}}{\Delta \psi_R} - \frac{\Delta \psi_R}{16 r_R T_{sn} (1 + R_{vd})^2} \right] \quad (132\text{式})$$

【0275】

【数132】

$$\frac{d^2\delta_R}{dR_{vd}^2} = 1.5 \frac{r_R}{K_{sn}} \frac{\Delta \psi_R}{8 r_R T_{sn} (1 + R_{vd})^3} > 0 \quad (133\text{式})$$

となり、これにより、 θ_R は R_{vd} に関して下に凸関数で、極小値は、

【0276】

【数133】

$$R_{vd\ min} = \frac{\Delta \psi_R}{4 r_R T_{sn}} - 1 \quad (134\text{式})$$

のとき生じることが分かる。変針条件によって $R_{vd\ min} < 0$ になる場合が生じるが、その

10

20

30

40

50

場合は条件 $R_{vd} >$ から単調増加の関数として扱う。

【0277】

7.4.2 舵角 ψ_R の角速度 r_R に関する特性

同様に、(119式)を(120式)に代入して、 ψ_R の r_R に関する一次微分、二次微分を求める。すると、

【0278】

【数134】

$$\frac{d\delta_R}{dr_R} = \frac{1.5}{K_{sn}} \left[\frac{2r_R T_{sn}}{\Delta\psi_R} (1+R_{vd}) + \frac{1}{3} \right] > 0 \quad (135\text{式})$$

【0279】

【数135】

$$\frac{d^2\delta_R}{dr_R^2} = \frac{1.5}{K_{sn}} \frac{2T_{sn}}{\Delta\psi_R} (1+R_{vd}) > 0 \quad (136\text{式})$$

になる。これにより、 ψ_R は r_R に関して単調増加の関数であることが分かる。

【0280】

7.5 等減速比 R_{vd} の調整

前述のように、等減速比 R_{vd} が $R_{vd\min}$ のとき ψ_R は最小値となり、また、 ψ_0 になるときの $R_{vd\max}$ のときに ψ_R は最大値となる。図15は、横軸を等減速比 R_{vd} とし、縦軸を舵速度 ψ_R 、舵角 ψ_R と変針時間 T_t である。舵角 ψ_R は $R_{vd\min}$ で最小値となり、 $R_{vd\max}$ で ψ_0 となる。従って、変針時間 T_t を短くし、解を1つにするために、 R_{vd} の探索範囲は、 $[R_{vd\min}, R_{vd\max}]$ とし、この範囲で ψ_R と ψ_0 との誤差を最小にする R_{vd} を黄金分割等の任意の手法により求める。

【0281】

7.6 角速度 r_R の調整

7.5で得られた R_{vd} を用いて、7.4の手順を用いて、舵角 ψ_R を求め、舵角 ψ_R が許容舵角 ψ_0 との比較を行い、 $\psi_R < \psi_0$ であれば、7.7の手順に進む。 $\psi_R > \psi_0$ であれば、範囲 $[0, r_R]$ で、 ψ_R と ψ_0 との誤差を最小にする角速度 r_R を黄金分割等の任意の手法により求める。

【0282】

7.7

以上の手順で決定した等減速比 R_{vd} 、角速度 r_R 、舵速度 ψ_R を用い、角速度 r_R 、舵速度 ψ_R をそれぞれ変針条件の指定旋回角速度 r_0 、舵速度の上限値 r_{RH} とし、下限値 $r_{RL} = r_{RH} \times 0.5$ として、参照針路演算部12-1-2に入力する。参照針路演算部12-1-2は、前述の6.軌道演算部の処理を実行する。舵速度の上限値 r_{RH} は、許容舵速度 ψ_0 以下となる。

「6.軌道演算部の処理」におけるステップS24では、変針領域Smallになり、舵速度は r_{RH} となるため、角速度 r_R は指定旋回角速度 r_0 を実現できることになる。

図16はそのシミュレーション結果であり、図16(A)は等減速比 $R_{vd} = 2.23$ の一定とした場合、(B)は等減速比 R_{vd} を可変とした場合である。等減速比 R_{vd} を可変とすることによって、角速度 r_R を指定旋回角速度 r_0 に一致させることができる。

【0283】

8. 増減速時のロバスト性向上

プロペラと舵との位置関係は図17に示すように前後に並んでおり、プロペラによる伴流が舵回りに沿って行くようになっている。操縦性指標の旋回力ゲイン K_s は舵回りの流速に比例するので、プロペラの回転数あるいはピッチ角が変化すると旋回力ゲインも同様に変化する。一方、船体の速度は大きな時定数の一次遅れ系のためにゆっくりと変化する。そのため伴流速度と船速との応答差が生じ、船速により旋回力ゲインを修正したとしてもその効果が期待できず、変針量および角速度は図18(a)に示すように推進力変化前の設定値を保持できない、という問題を発生する。また操縦性指標の時定数は、伴流の影

響よりも船体と船速との関係によって支配される傾向をもつ。したがって増減速開始から定常船速に達するまで操縦性指標の時定数は一次遅れのゆっくりした変化になり、旋回力ゲインはそれに比べ迅速に変化する。よって旋回力ゲインのパラメータ不確かさに対する変針制御系のロバスト性の向上が課題になる。

【0284】

8.1 解決方法

船速は図17から船体に取り付けた速度計によって得られるが、伴流速度は直接に得られない。両者の時間応答は図19に示すように、伴流速度の方が船速の方より立ち上がり時間が早いことが予想される。伴流速度の定常値は圧力差から船速のそれより高い。したがって船速変化時の旋回力ゲインは既に伴流速度が定常値に近づいている状態で実施されるので、伴流速度変化による旋回力ゲインを修正することは難しい。

10

【0285】

そこで、増減速時のスラスト変化が方位偏差となって表れる現象を利用して、旋回力ゲインの変化に伴う方位誤差または角速度誤差を低減する。変針応答はフィードバックによるものでなくフィードフォワードによるものが支配的であるから、対策はフィードフォワードに対して施す。

【0286】

参照針路_Rから船首方位までの応答の方位比 ψ_R は図18(a)を参照すると図18(b)のようになる。方位比は増速時で1以上に減速時で1以下になる。

方位比つまり伝達関数は、推進力変化に対する閉ループ応答がゆっくりなので無視すると、

20

【0287】

【数136】

$$\frac{\psi}{\psi_R} = P_a K_{FF}^{-1} = \frac{K_{sa}(T_{s3a}s + 1)}{s(T_{sa}s + 1)} \frac{s(T_{sn}s + 1)}{K_{sn}(T_{s3n}s + 1)} \approx \frac{K_{sa}}{K_{sn}} \quad (137\text{式})$$

の様に旋回力ゲイン比と等価になる。ここで、添字()_aは実際値、()_nはノミナル値を表しており、また、推進力変化は、プロペラ回転数に相当し、プロペラの下流部にある舵に作用するので、操縦性指標のうち、時定数 T_{sa} 、 T_{s3a} への影響を無視し、旋回力ゲイン K_{sa} に影響すると定め、 $T_{sn} = T_{sa}$ 、 $T_{s3n} = T_{s3a}$ とする。これより $\psi = \psi_R$ するために、方位比

30

【0288】

【数137】

$$R_K = \frac{\psi_R}{\psi} = \frac{K_{sn}}{K_{sa}} \quad (138\text{式})$$

をフィードフォワード舵角 ψ_F に掛けることによって、推進力変化を起因とする方位誤差を低減する。

40

【0289】

8.2 構成

図20は、増減速時のロバスト性向上を行った変形例の構成を表すブロック図である。図示したように、フィードフォワード制御器12-2の後段に、方位比乗算器12-6を備え、さらに、方位比演算部12-7、方位比制限部12-8を備えている。

方位比乗算器12-6は、フィードフォワード制御器12-2から出力されるフィードフォワード舵角 ψ_F に方位比 R_K を乗算するものである。

【0290】

方位比演算部12-7は、方位比乗算器12-6で用いる方位比 R_K を演算するものである。(138式)を直接使用すると、方位が360度発信となり扱いにくいので、方位

50

偏差 $e = \psi_R - \psi_e$ を用いて (参照針路 ψ_R はゼロからの変針量とする)

【 0 2 9 1 】

【 数 1 3 8 】

$$\frac{\psi}{\psi_R} = 1 - \frac{\psi_e}{\psi_R} \Rightarrow R_K = 1 / \left(1 - \frac{\psi_e}{\psi_R} \right) \quad (139\text{式})$$

の関係を使用して R_K を求める。ここで R_K の初期値は 1 である。

【 0 2 9 2 】

さらに、パタメータ不確かさ、ノイズ成分などによる影響を低減するために方位比制限部 12-8 で方位比乗算器 12-6 の方位比 R_K の変更に制限を掛ける。制限は、 R_K の変更に不感帯を設けることで行う。不感帯はパタメータ不確かさなどから 10% から 30% とするとよい。例えば、不感帯を 10% とすると、初期値 $R_K = 1$ であるときに、しきい値 Slash Hold Value SHV=0.1 となり、方位比演算部 12-7 で求められた方位比 R_K が 0.9 未満、または 1.1 より超えたときに、方位比乗算器 12-6 の方位比 R_K を書き換える。

推進力変化に伴い船速も変化すると、船速修正が行われる。即ち、

【 0 2 9 3 】

【 数 1 3 9 】

$$K_{sn} = K_{sn0} \frac{V}{V_0}, \quad T_{sn} = T_{sn0} \frac{V_0}{V}, \quad T_{s3n} = T_{s3n0} \frac{V_0}{V}$$

であり、 V 、 V_0 は船速で現在値と直前値を表す。なお船速修正はノミナル値や制御ゲインを更新するもので、参照方位やフィードフォワード舵角には反映されない。変針命令時に更新されたパラメータを用いて軌道計画が構成される。つまり船速修正の効果は変針命令がないと発揮されない。

【 0 2 9 4 】

舵まわりの伴流速度は既に定常値に達しているので、船速修正が施されると $K_{sn} = K_{sa}$ になり、旋回力比は 1 になり、その結果方位比も 1 に漸近する。方位比制限部 12-8 の制限を維持すると方位比が 1 に漸近できなくなるので、方位比制限部 12-8 の作動は、変針毎に一回限りとする。

【 0 2 9 5 】

さらに方位比制限部 12-8 では、SHV の他に別の制限を加えることも可能である。変針量が小さい設定値以下のとき、SHV の制限と論理積を取って制限することも可能である。

尚、方位比の代わりに、応答性のよい角速度比を用いることも可能であるが、ノイズ成分による誤差が大きいため、方位比で修正することが望ましい。また、しきい値として、暴走対策として上限値を設定することもできる。

【 0 2 9 6 】

以上で説明した、設定針路に船首方位を追従させるように制御する船舶用自動操舵装置は、計画航路に船体位置を追従させる航路制御系の一部として使用することも可能である。

【 符号の説明 】

【 0 2 9 7 】

1 2 船舶用操舵装置

1 2 - 1 軌道演算部

1 2 - 2 フィードフォワード制御器

1 2 - 3 フィードバック制御器

r_R 旋回角速度

C_{1a} 旋回角加速度初期値

10

20

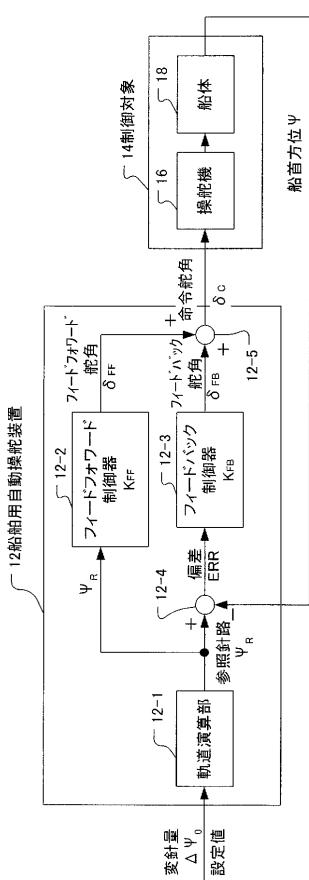
30

40

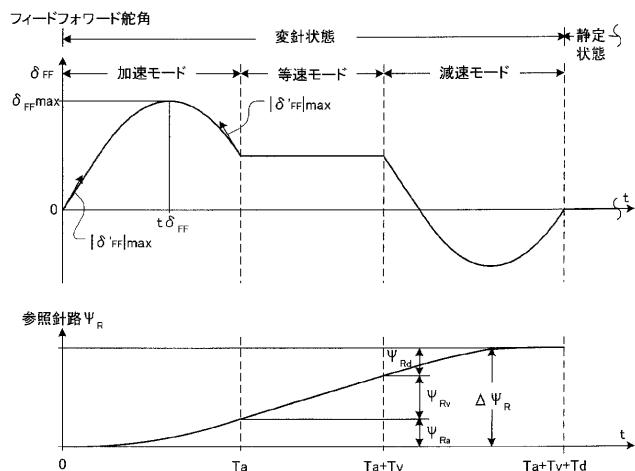
50

C_{2a} 旋回角速度初期値

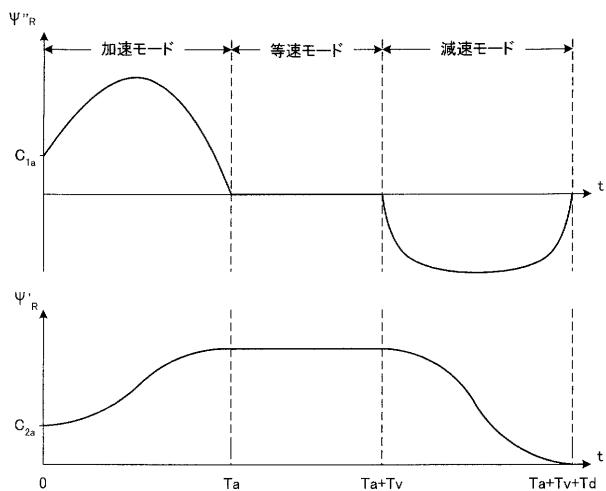
【図1】



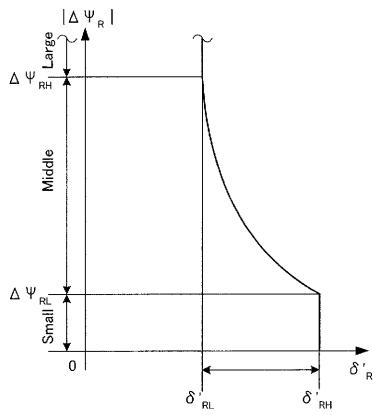
【図2】



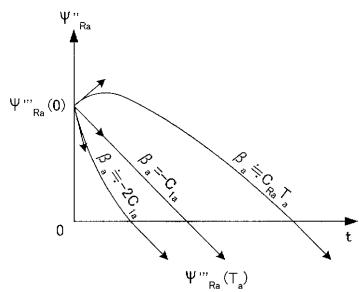
【図3】



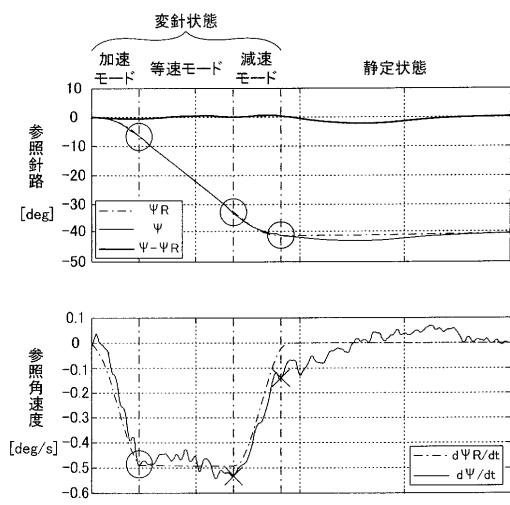
【図4】



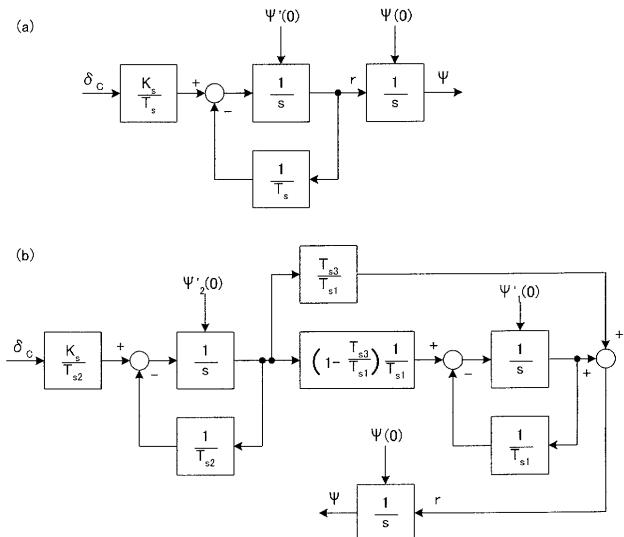
【図5】



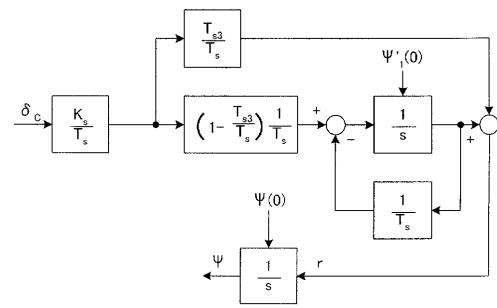
【図6】



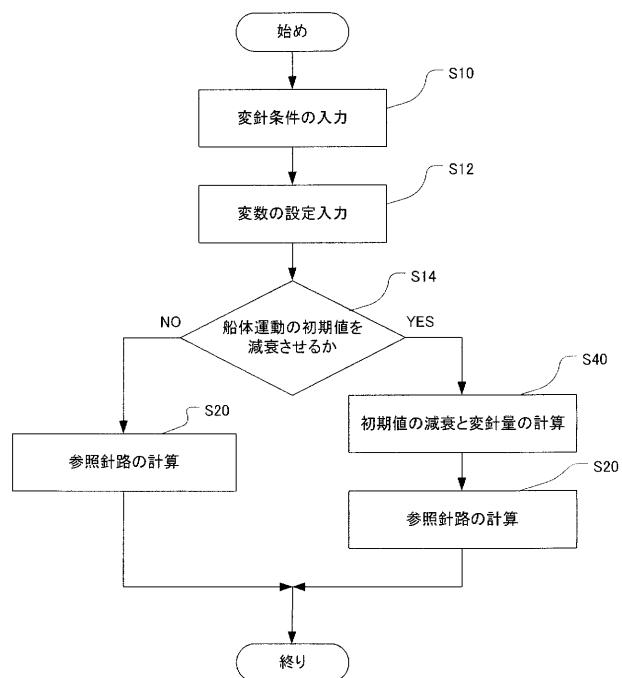
【図7】



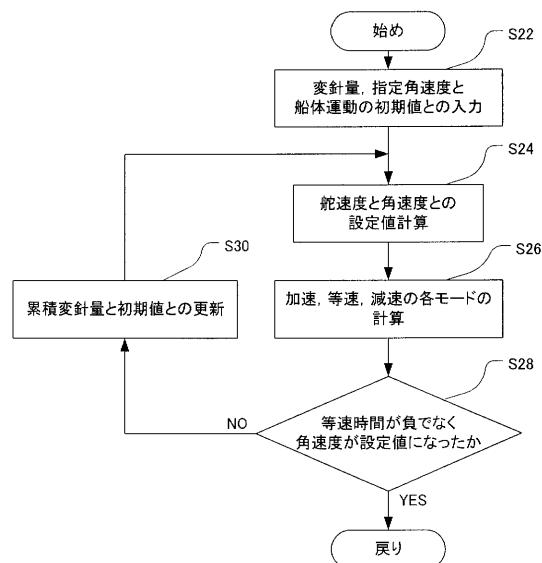
【図 8】



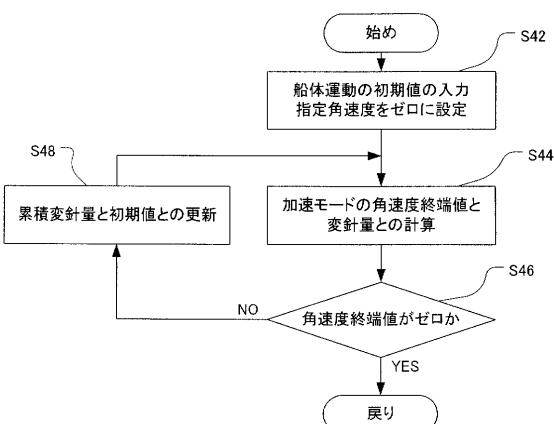
【図 9】



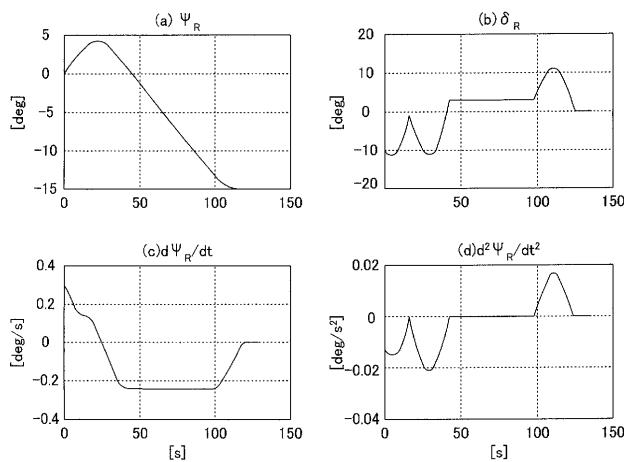
【図 10】



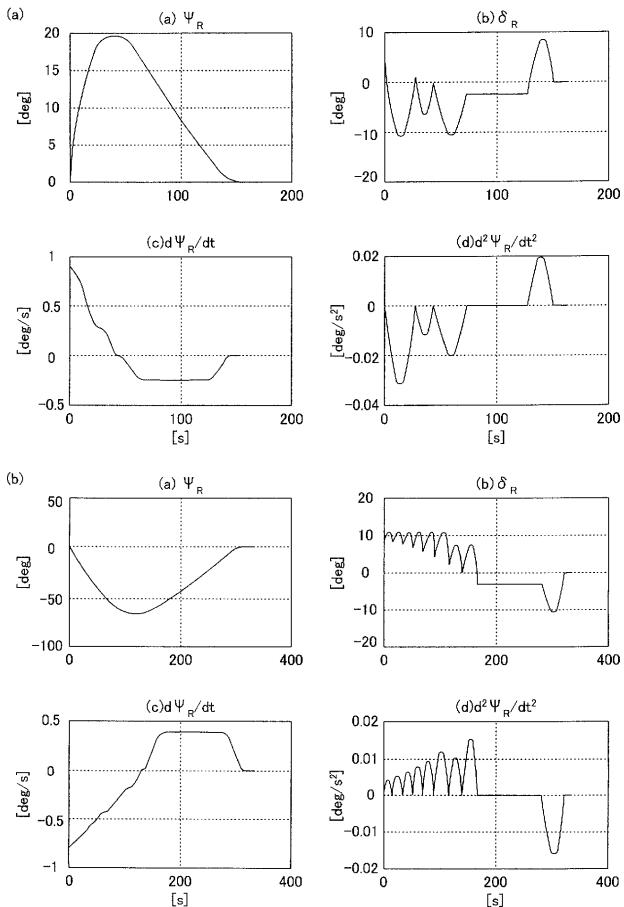
【図 11】



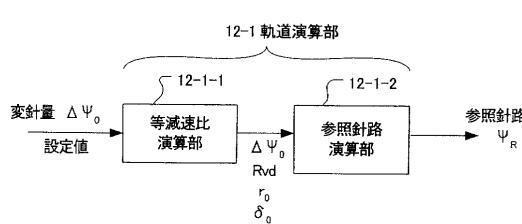
【図 1 2】



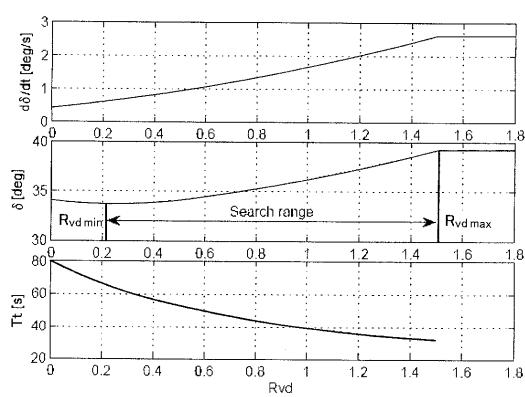
【図 1 3】



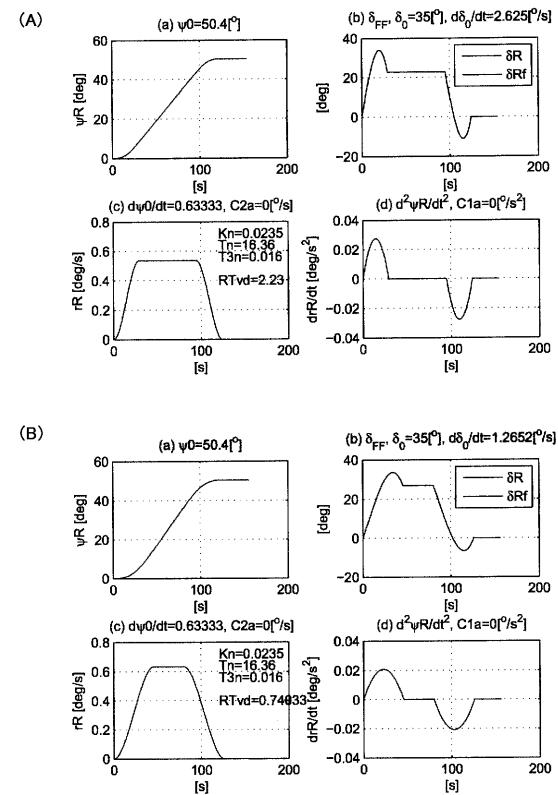
【図 1 4】



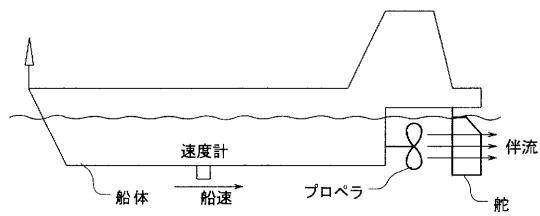
【図 1 5】



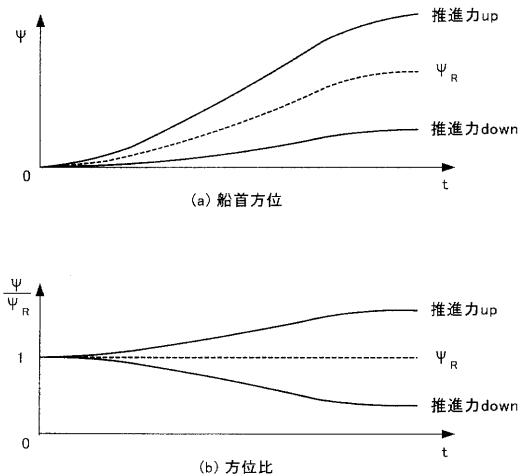
【図 1 6】



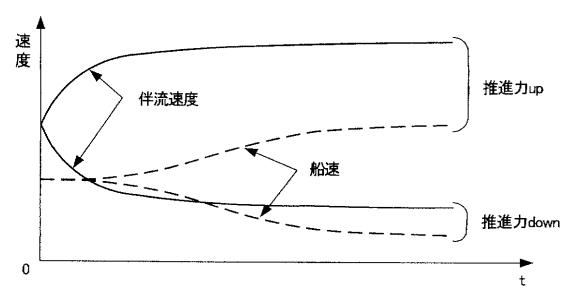
【図 1 7】



【図 1 8】



【図 1 9】



【図 2 0】

