（昭和58年11月　日本造船学会秋季講演会において講演）

ロープを用いたドッキングシステムに関する考察

正員　石　谷　　久*　山　本　章　雄*

A Study on a Docking System Using Ropes

by Hisashi Ishitani, *Member*　Akio Yamamoto

Summary

At the docking of a three-dimensional moving vehicle to a fixed base in deep water, an automatic system is indispensable to assure reliable and safe operation. In the paper, an automatic docking system using ropes is proposed for such situation, and basic concept and characteristics of the system are presented with some results of feasibility study of the system. In the system, ropes fixed to the base are connected to the vehicle by sonar trackers launched from the base, and then, the vehicle is docked to the base by the ropes controlled by a central controller in the base. Real time estimation of state variables of the vehicle, i.e. position, velocity and attitude of the vehicle, from the rope lengths, and the control of the vehicle by the ropes based on these information are essential in the system. To investigate practical feasibility of the system, especially those of real time state estimation and the vehicle control, simulation study is made using a small size mini-computer which can be installed in such underwater base. From the simulation results, it is shown that a near optimum filter can be effectively utilized to estimate the state variables of the moving vehicle, with which the vehicle can be controlled by the ropes with sufficient accuracy.

1　緒　　　言

潜水作業船等3次元空間中の移動体の固定基地へのドッキングを自動化するために，ロープを利用したシステムを提案し，その実現可能性を検討する。一般に慣性の大きな移動体を，視界が悪く潮流等の外乱の大きい環境下で接触を回避しつつ定位置へ結合するためには，高精度の位置検出と十分な制御駆動力を必要とする。宇宙空間のドッキングにおいては環境が良好で光学的位置検出が可能であるが，濁水中のドッキングにおいて利用可能な超音波による測距あるいは方位検出は精度が限定される。

従来，移動体のドッキングにおいては固定点までの相対位置，速度，姿勢を十分な精度で検出することが困難なため，十分な視界の得られる宇宙空間においては最終的には人間の目視情報に頼った手動によるドッキングが行われてきた[1]。このような状況では光学的な方位角検出を自動化することにより，ドッキングの自動化も不可能ではない。しかしながら視界が不十分な深海中でのドッキングを自動化する試みは例がなく，このような状況下では何らかの形で移動体と接触を保ち，その情報を用いた制御を行うことが必要と考えられる。

本研究ではこのような状況に対して，移動体が固定基地に接近した後に適当な手段により複数のロープで移動体と固定基地を結合し，このロープを用いて移動体の位置検出ならびにドッキングの制御を行う方式を提案し，その基本概念と特徴を示すと共に本方式の位置検出および制御方式の実用性を検討する。このためまず劣悪な環境下で移動体を望ましい軌道により目的位置へ制御するための基本的要件となる，ロープによる位置検出の方法について小型計算機で実現可能な推定手法の検討を行い，シミュレーションによりその実用性を検討した。この推定方式により移動体の状態量，即ち位置，速度，姿勢角等ドッキングの制御に必要な情報が簡単な計算によりリアルタイムで取得できることが示され，本方式の実現可能性が確認された。更にこのような状態推定量を用いて，このロープにより固定基地へドッキングさせる制御手法の一例を示し，その制御の可能性をシミュレーションにより示している。

本研究においては3次元移動体を対象としているが，船舶等2次元移動体では既に同様な概念による接岸が手動で行われており，本提案システムはその自動化にも応用可能と考えられる。

* 東京大学工学部

2 システムの基本概念

潜水作業船等の３次元移動体が固定基地にドッキングをする場合，接触事故を避けながら固定位置へ与えられた方向から低速・安定に進入する必要があり，高い精度の位置・速度等の状態推定と，強力な制御力を必要とする。本研究はジャイロ等の精密自立航法装置を持たぬ移動体を，固定基地から適当な支援を行ってドッキングを行う簡便な手法として，ロープにより移動体の状態推定，ならびに制御を行う方式を提案し，その実現可能性，ならびに実現上の問題点を検討することを目的としたものである。

システムを検討するため，以下の状況を前提とする。

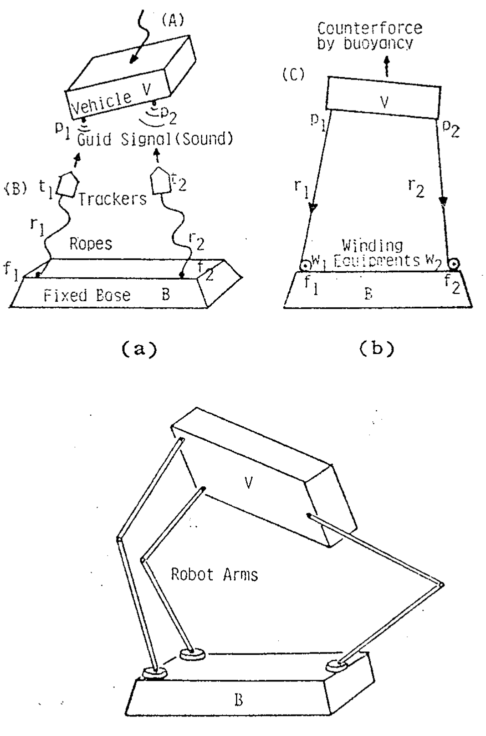
1） 固定基地Ｂは十分の大きさと電源を持ち，制御用計算機，ロープ制御機構等を装備可能なこと。

2） 移動体Ｍは適当な超音波測距，方位計測等により固定基地から 10ｍ 程度の距離まで，自力で航行可能なこと。

3） 固定基地Ｍと移動体Ｂは適当な手段により通信可能なこと。

このような前提条件のもとに，Fig. 1 に示されるような３段階のドッキングシステムを考える。

（A） 移動体自身の制御能力により固定基地に十分近くまで適当な姿勢を保ちつつ移動する[2)]。



(c)

Fig. 1 Procedure of the docking system
（a） Approach of the vehicle and rope connecting
（b） Docking control
（c） State estimation and control by robot arms

（B） 固定基地Ｂ上の特定点ｆより，移動体Ｖ上の特定点ｐへロープの先端に装備した高速で移動可能な追尾移動装置ｔを発射し，f-p 間にロープｒを結合する。このときｐからは特定の超音波誘導信号を発射し，追尾装置は指向性の強い検出装置を用いてその音源へ進行することにより，ｐの結合機構へロープ先端を結合することができる。このような結合を順次，あるいは多種の誘導信号で複数個同時に行うことにより定められた f-p 間にロープを結合する。

（C） ロープを十分な強度をもつ結合機構に連結後，固定基地側の巻取り制御装置Ｗにより移動体を望ましい軌道上で定位置まで結合させるドッキングを行う。このとき，ロープは原則としてたるみのない状態に巻取り，ロープ長により移動体の状態推定を行うと共に，張力によりその運動制御を行うことを考える。この際張力による一方向の制御では制御性が低下するので，移動体には浮力あるいは逆推進機構等を利用した反力を加え，逆方向の制御能力を持たせることが必要となる。

このような多段階のドッキングシステムを一般的な移動体のみの精密制御によるドッキング方式と比較したとき，その特徴は次のように要約される。

（１） （A）段階はいずれにおいても必要であるが，本方式ではロープを結合できる範囲内であれば，十分な安全距離を維持できるので，その要求位置精度はドッキングに必要な数 cm（案内機構を用いた場合）に対して数ｍに緩和される。15ｍ 程度のロープ結合を前提とすると，測距精度 20%（数ｍ），角度精度 15° 程度で十分である。

（２） （B）段階における追尾装置は，全体の機構，手順を複雑にし結合機構を付加する等，本方式の不利な点であるが現在の技術で十分実現可能と考えられる。利点としては，移動体本体に比べて遙かに軽い追尾装置のみを移動させるため小型の推進機構で制御能力を大幅に向上でき，外乱に対する制御力が増加する。また小型軽量の追尾装置を結合するため案内機構も小型軽量化でき，接触時の損害も軽減できる。更に軽量の追尾機構に対しては緩衝装置の効果が大きく移動体への結合においては，その姿勢，進入方向に対して高い精度を必要としない。

以上の結果，追尾装置はほぼ正面方向の任意の方向から結合点へ進入すればよく，角度検出精度も 15° 程度で十分である。また追尾機構が複数個装備できないときには，時間をかけて１個の追尾装置を往復して複数のロープを順次結合して行く

ことも可能である。

（3）（C）段階におけるドッキング制御は本方式の主要な部分であって本文において基礎的な検討を行うが，精密自立航法装置を持ち，外乱に対して十分な駆動力を持つ移動体が自力でドッキングを行う場合と比べて張力のみを利用することになるため多少複雑な制御を必要とする。その駆動力はロープ強度と巻取り駆動力から制約されるが，移動体に装備する流体中の推進装置に比べて固定基地に設置できることと小さな装置で十分な駆動力を得ることができる点は利点と考えられる。またこの段階においてはロープ長から移動体の状態推定を同時に行うことができ，適当なロープの配置をとることによりドッキングに必要な数 cm 程度の位置検出が可能である。

（4） 移動体と固定基地間の相対位置の検出機構として，ロープの代りに固定基地に3自由度以上の自在アームを設置して，これを移動体に結合させてそのアームの回転角から移動体の状態を検出することも可能である。この場合，自在アームが超音波を自動追尾できればアーム本体の制御により移動体に結合できる。このようなアームを3本用いることにより移動体の姿勢も検出可能であり注1)，ロープを用いる場合に比べて検出のアルゴリズム，検出感度は改善されるが，（B）段階に相当する移動体への結合を行うためには複雑な機構を高速で制御する必要があり，装置が大型化し制御アルゴリズムも複雑になる。更にこのアームが強力な制御能力を持てば状態検出のみではなく，移動体のドッキング操作も自動化可能でありロープに比べて制御性も改善される。その反面で高速かつ強力な自在アームを必要とし装置全体が大型かつ複雑化する。これに対してロープのみの場合は，前述のように比較的簡便な装置により強力な制御力を持つが，状態推定が複雑となり制御性も低下する。

本研究においては，制御推定方式の実現可能性を検討するために装置を簡単化できる反面で，制御アルゴリズムのより複雑なロープによるドッキング方式に限定して，基本的な検討を行う。必要に応じて状態推定には自在アームを併用し，ドッキング制御はロープを用いる等の複合システムを考慮することも有効と考えられる。

注 1） 移動体Vの位置，姿勢の自由度は6であり，これを決定する際にアームの自由度を3とすると，V上の固定点Pに結合するため自由度が失われて最低3個のアームを必要とする。このとき3点がV上に固定されることから自由度3が失われるが，残り6の自由度からVの位置，姿勢が決定できる。

3 システムの定式化

本章にシステムの基本となる移動体の運動の定式化およびリアルタイムで計算可能な状態推定方式を示し，更に簡単な制御方式の一例を示す。

3.1 動特性方程式

3.1.1 座標系

一般に移動体の運動は，移動体の任意の1点の位置・速度とその点のまわりの回転（姿勢）角・角速度を与えれば決定される。この1点として移動体の重心を選び，その運動を記述する座標として空間に固定された座標系（慣性系）(X, Y, Z) を，重心まわりの回転を記述する座標として移動体に固定された座標系（移動体系）(ξ, η, ζ) を用いる（Fig. 2(a)）。

移動体系の慣性系に対する相対位置は Fig. 2(b) に示すオイラー角で表わす。まず $\zeta(z)$ 軸まわりに角度 ψ の回転，引き続き η 軸まわりに角度 θ の回転，最後に ξ 軸まわりに角度 φ の回転を行えば移動体系と慣性系は次の関係で結ばれる。

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = T_{m1} \begin{pmatrix} X - X_x \\ Y - X_y \\ Z - X_z \end{pmatrix} \qquad (1)$$

$$T_{m1} = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\varphi\cos\theta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi & \sin\varphi\sin\theta\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi\cos\theta \\ \cos\varphi\sin\theta\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi & \cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix} \qquad (2)$$

ただし $\boldsymbol{X} = (X_x, X_y, X_z)^t$ は慣性系での重心座標である。

3.1.2 移動体の運動方程式

移動体の運動方程式は重心の並進運動と重心まわりの回転運動により記述される。すなわち

$$d\boldsymbol{X}/dt = \boldsymbol{V} \qquad (3)$$

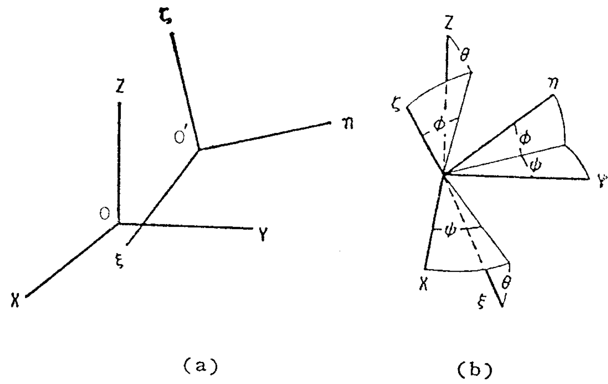


Fig. 2 Coordinate system
(a) Coordinate system
(b) Rotation of the axes

$$M\cdot d\boldsymbol{V}/dt=\sum_i \boldsymbol{T}_i(\boldsymbol{X},\boldsymbol{V},\Theta,\boldsymbol{\omega})+\boldsymbol{F}-\boldsymbol{K}(\boldsymbol{V},\Theta) \qquad (4)$$

$$d\Theta/dt=T_{m2}\boldsymbol{\omega} \qquad (5)$$

$$d\boldsymbol{L}/dt=\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{L}+\sum_i N_i(\boldsymbol{T})-\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \qquad (6)$$

ここで $\boldsymbol{X}$ は重心座標，$\boldsymbol{V}=(\dot{X}_x,\dot{X}_y,\dot{X}_z)^t$ は重心の速度，Mは移動体の質量，$\boldsymbol{T}_i$ は張力ベクトルでその絶対値を制御可能とし $\sum_i$ は制御ロープの和を表わすものとする。$\boldsymbol{F}$は移動体に作用する張力以外の外力，$\boldsymbol{K}$は抵抗力，$\Theta=(\varphi,\theta,\psi)^t$ は回転（姿勢）角，$\boldsymbol{\omega}=(\omega_\xi,\omega_\eta,\omega_\zeta)^t=(\dot{\varphi},\dot{\theta},\dot{\psi})^t$ は回転角速度，$\boldsymbol{L}$ は移動体系での各軸まわりの慣性モーメントを I_ξ,I_η,I_ζ としたとき $\boldsymbol{L}=(I_\xi\omega_\xi,I_\eta\omega_\eta,I_\zeta\omega_\zeta)^t$ で表わされるベクトルである。$\boldsymbol{N}_i$ は張力による力のモーメント，$\boldsymbol{R}$は回転運動における抵抗力とする。T_{m2} は変換行列で次のように表わされる。

$$T_{m2}=\begin{pmatrix} 1 & \sin\varphi\tan\theta & \cos\varphi\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi\sec\theta & \cos\varphi\sec\theta \end{pmatrix} \qquad (7)$$

3.2 状態推定方式

本方式ではロープ長から，リアルタイムで移動体の状態量推定を行うことを前提としており，十分な精度の状態量把握によりはじめて安定・確実な自動ドッキングが可能になる。以下にたるみのないロープ長を観測量として移動体状態量を推定する方式を定式化する。

3.2.1 拡張カルマンフィルタ

いま，システムの状態方程式，観測方程式がともに非線形で

$$\boldsymbol{x}_k=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{k-1},\boldsymbol{u}_{k-1})+\boldsymbol{w}_k \qquad (8)$$

$$\boldsymbol{y}_k=\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_k)+\boldsymbol{v}_k \qquad (9)$$

と表わされるとする。ここで $\boldsymbol{x}_k$ はn次元の状態ベクトル，$\boldsymbol{y}_k$ はm次元の観測ベクトル，$\boldsymbol{u}_k$ は制御入力，$\boldsymbol{w}_k,\boldsymbol{v}_k$ はそれぞれシステムおよび観測雑音を表わす n,m 次元ベクトルで

$$\overline{\boldsymbol{w}}_k=0,\quad \overline{\boldsymbol{w}_k\cdot\boldsymbol{w}_l{}^t}=Q\delta_{kl} \qquad (10)$$

$$\overline{\boldsymbol{v}}_k=0,\quad \overline{\boldsymbol{v}_k\cdot\boldsymbol{v}_l{}^t}=R\delta_{kl} \qquad (11)$$

と仮定する。また添字kは時刻 t_k における値を示す。このとき $\boldsymbol{x}_k$ および $\boldsymbol{y}_k$ の基準軌道（Nominal Value）をそれぞれ $\boldsymbol{x}_{0k},\boldsymbol{y}_{0k}$ とおき，

$$\boldsymbol{x}_{0k}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{0k-1},\boldsymbol{u}_{k-1}) \qquad (12)$$

$$\boldsymbol{y}_{0k}=\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{0k}) \qquad (13)$$

を用いて

$$\Delta\boldsymbol{x}_k=\boldsymbol{x}_k-\boldsymbol{x}_{0k},\quad \Delta\boldsymbol{y}_k=\boldsymbol{y}_k-\boldsymbol{y}_{0k} \qquad (14)$$

としたとき，$\Delta\boldsymbol{x}_k,\Delta\boldsymbol{y}_k$ に対する線形近似モデル

$$\Delta\boldsymbol{x}_k=\left.\frac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\boldsymbol{x}}\right|_{\boldsymbol{x}_{0k}}\Delta\boldsymbol{x}_{k-1}+\boldsymbol{w}_k \qquad (15)$$

$$\Delta\boldsymbol{y}_k=\left.\frac{\partial\boldsymbol{g}}{\partial\boldsymbol{x}}\right|_{\boldsymbol{x}_{0k}}\Delta\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{v}_k \qquad (16)$$

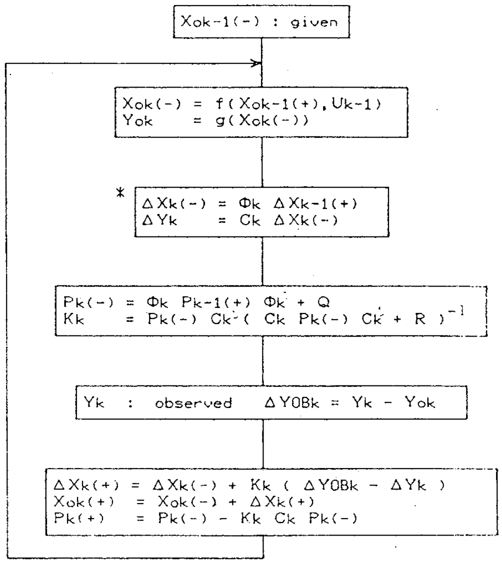


Fig. 3 Flow chart of the extended Kalman filter

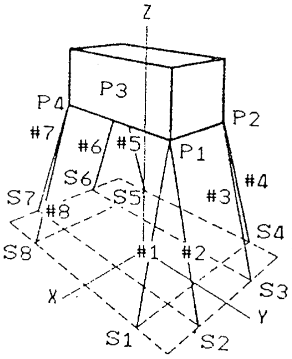


Fig. 4 The system model

を得る。ここで

$$\left.\frac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\boldsymbol{x}}\right|_{\boldsymbol{x}_{0k}}=\Phi_k,\quad \left.\frac{\partial\boldsymbol{g}}{\partial\boldsymbol{x}}\right|_{\boldsymbol{x}_{0k}}=C_k \qquad (17)$$

と書けば，拡張カルマンフィルタ[4),5)]を適用することができ Fig. 3 に示すアルゴリズムを得る。

3.2.2 システムモデルへの応用

状態推定ならびに制御則を定式化するため Fig. 4 に示されるシステムモデルを考える。このモデルは移動体の6自由度の状態推定ならびに制御性と対称性を考慮して図のような8本のロープで結合することを考え，その状態量（重心位置，速度，姿勢角，角速度）および観測量は以下のように定義される。

$$\boldsymbol{x}=(X_x,X_y,X_z,\dot{X}_x,\dot{X}_y,\dot{X}_z,\varphi,\theta,\psi,\dot{\varphi},\dot{\theta},\dot{\psi})^t \qquad (18)$$

$$\boldsymbol{y}=(l_1,l_2,\cdots,l_8)^t \qquad (19)$$

ただし l_i は i 番目のロープの長さを示す。

本システムに対して拡張カルマンフィルタを定式化する場合，非線形状態方程式（8），即ち式（1）～（7）は非常に複雑で遷移行列 Φ_k の計算時間が増大する。そこで実用的な範囲の近似により計算量を著しく減少できる以下の簡単化を行う[5)]。

いま $\Delta \boldsymbol{x}_k=\begin{pmatrix}\Delta z\\ \Delta \dot{z}\end{pmatrix}$ とおき，重心運動，回転運動各々に対して位置（または姿勢角）を Δz，速度（または角速度）を $\Delta \dot{z}$ としたとき，十分短い時間 ΔT の間の遷移が近似的に

$$\Delta \boldsymbol{x}_k \simeq \Delta \boldsymbol{x}_{k-1}+\Delta \dot{z}\cdot\Delta T \qquad (20)$$

$$\Delta \dot{z}_k=\Delta \dot{z}_{k-1},\quad \Delta T=t_k-t_{k-1} \qquad (21)$$

と表わせて，式(21) の右辺にはその遷移を無視した項の代わりにシステム雑音が加わると考えると，この遷移行列は，

$$\Phi_k=\begin{pmatrix}E & \Delta T\cdot E\\ 0 & E\end{pmatrix} \qquad (22)$$

と表わせて Φ_k を基準軌道のまわりに展開する計算が不要になる。$\Delta \boldsymbol{y}_k$ に対する観測行列 C_k は式 (17) により実際に計算を行う必要があるが，これは状態方程式を計算する過程で求める座標変換行列（式（2），（7））と類似の計算となり，計算時間は殆ど増加しない。なお本システムにおける Φ_k, C_k の誘導は付録に示す。

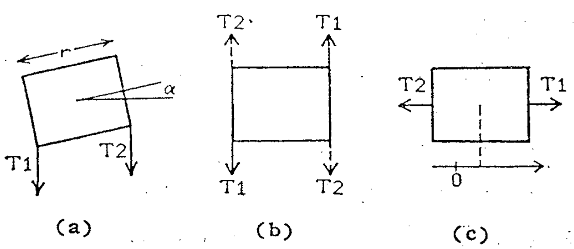
更に各ステップにおいて $\Delta \boldsymbol{x}_k$ から基準軌道を更新することにより Fig. 3 の＊印の計算ステップが不要となる。拡張カルマンフィルタにおいて基準軌道からのずれが小さい場合はあらかじめ基準軌道計算が可能であるが，本システムは非線形性が強く，リアルタイムで基準軌道を求める必要がある。この場合上記の更新は計算の負担増とはならない。基準軌道の計算は式（1）～（7）を積分する必要があり，フィルタ全体の計算時間の大部分を占めることになる。

3.3 制御の一方式

式（1）～（7）に示すように移動体の重心の並進運動，重心まわりの回転運動の各成分は互いに干渉するが，目標値からのずれが小さい場合にはほぼ独立とみることができる。したがって本文では各成分ごとに独立して制御則を求め，最後に合成して全体の制御とするが，個々の制御則は次のように分類される。

（1） X軸まわりまたはY軸まわりの制御則

Fig. 5（a）に示す1軸まわりの回転で角度 α，角速度 $\dot{\alpha}$ を0に収束させるために，以下に示す単純な比例制御則を用いる。



(a) (b) (c)

Fig. 5 Contol laws
（a） Rotation around x or y axis
（b） Rotation around z axis
（c） Deviation in the horizontal plane

$$T_1=-k_1\alpha-k_2\dot{\alpha} \qquad (23)$$

$$T_2=\ \ k_1\alpha+k_2\dot{\alpha} \qquad (24)$$

ただし，k_1, k_2 は定数で $T_i<0$ のときには $T_i=0$ とする。この軸まわりの移動体の慣性モーメントを I とすれば，移動体の1軸まわりの運動方程式は近似的に

$$\ddot{\alpha}+\frac{2k_2 r}{I}\dot{\alpha}+\frac{2k_1 r}{I}\alpha=0 \qquad (25)$$

となる。安定な制御系にするために臨界制動あるいはやや振動的にすると

$$k_2>0 \text{ かつ } k_1\geq\frac{rk_2^{\,2}}{2I} \qquad (26)$$

となり k_2 の値は収束時間の仕様により定められる。

（2） Z軸まわりの制御則

（1）と同様 Fig. 5（b）に示す T_1, T_2 で角度，角速度をパラメータとした比例制御を考える。

（3） X方向またはY方向の偏位に対する制御則

（1）と同様 Fig. 5（c）に示す T_1, T_2 で位置（偏位）と速度をパラメータにした比例制御を考える。

（4） Z方向の制御則

Z方向の安定化はロープだけでは不十分なので，移動体の浮力（一定力）等の逆推進力を利用した制御を行う。Z方向制御はドッキングにおいて最も重要であり，本来は結合位置で $\dot{z}=0$ となる最短時間制御が望ましい。しかし，この分析の目的はシステムの制御性，状態推定の可能性検討にあるので，簡単化した制御則として $\dot{z}$ を一定目標値に保つような $\dot{z}$ の比例制御を考える。不安定化を避けるためゲインに余裕を持たせ，移動体変化に応じてゲインを補正するが，結合点付近ではロープ張力のZ方向成分が減少してオフセットが残り，低速で接近することになる。Z方向制御を目的とし各成分の運動を考慮した制御則の最適化のためには，移動体形状に基づく抵抗力の考察等モデルの精緻化が必要で今後の課題となる。

4 シミュレーションによる検討

4.1 シミュレーションモデルと分析目的

前述のフィルタとロープ制御則は非線形対象系に対して線形理論を近似的に応用したものである。したがって近似手法の妥当性を検討するために，シミュレーション分析を行って応用上の問題点と実用性，リアルタイム計算の可能性等を検討した。以下にこの結果を示す。

前述のモデル（Fig. 4）において，実在の潜水船を参考として約 8×3×3(m) 程度の大型の移動体を仮定し，基地上約 10m の位置から 2.0m の結合点まで制御することを考える。移動体の諸元ならびに結合点位置座標は Table 1 に示される。流体中の抵抗については形状に関する十分な検討が必要なことと，制御上は抵抗力は安定化に寄与することから上記目的のシミュレーション

Table 1 Parameters of the system model

S1	(3.5	, 4.0	, 0.0)
S2	(1.5	, 6.0	, 0.0)
S3	(-1.5	, 6.0	, 0.0)
S4	(-3.5	, 4.0	, 0.0)
S5	(-3.5	,-4.0	, 0.0)
S6	(-1.5	,-6.0	, 0.0)
S7	(1.5	,-6.0	, 0.0)
S8	(3.5	,-4.0	, 0.0)

unit : m

Vehicle 8m × 3m × 3m
M = 72 ton
I_ξ = 438000 kgm²
I_η = 108000 kgm²
I_ζ = 438000 kgm²

においては制御上は条件の厳しい抵抗0の場合の検討を行っている。移動体重量は比重1と設定し，制御用浮力を別途付加している。また潮流等の外乱の効果を検討するため，多少の外乱項（式（8）の$\boldsymbol{w}$に相当）を付加した。

シミュレーションにおいては状態推定と制御性能を同時に検討するため，ロープ結合後一定時刻 T_1 までは制御を行わず，フィルタにより初期状態推定を行うことを考える。現実にも超音波追尾装置でロープを移動体に結合した時点では移動体の位置・姿勢は十分な精度で把握できず，一定の推定期間を必要とする。この間外力はシステム雑音のみが加わると仮定する。したがってシミュレーション結果は T_1 まではフィルタの推定状況，T_1 以降に制御性能を示している。また制御量を計算するための状態量はフィルタの性能と区別するために真値を用いているが，フィルタ出力を用いた制御については今後検討を進める予定である。

周知の如くカルマンフィルタ計算においては推定分散Pが発散する可能性がありパラメータの設定は注意を要する。特に非線形系に応用する場合に問題となるPの初期値 P_0，観測およびシステム分散行列 R, Q およびフィルタ更新間隔 ΔT の影響が大きく，線形系に対する最適値は必ずしも良好な結果を与えない。そこで Table 2 に示すような各種のパラメータにより計算を行ってその結果を比較検討した。Table 3 には移動体の初期値，フィルタの初期推定値（誤差含む），システムおよび観測雑音分散を各状態量ごとに示している。即ち初期状態は姿勢角約 6°，水平偏差 1m で基地の上方 10m，フィルタの初期推定値はこれから更に 1° および 1m ずれたものと仮定している。なおシステム雑音分散Qは1秒当りの値を示し，積分間隔に応じて雑音成分が加えられる。観測誤差は標準偏差 3cm である。

Table 2 の P_0 はこの初期推定誤差に対応した値または事前情報不足で十分大きな値1を用いたことを示す。R/R_{act} は Table 3 の実際の観測誤差分散 R_{act} とフィルタで用いたRの比を示し，1の場合理論値と一致する。また参考のため外乱 $\boldsymbol{w}=0$ の場合（ケース 221）も計算した。

ドッキング制御は前述の制御則をモデルに適用して，Table 4 に示すロープペアで行う。表は座標軸上で符号方向に制御するためのロープ番号を示し，＊項は位置制御が姿勢に及ぼす干渉の補正項を示す。比例制御の比例係数は付録に示すが，基本的には以下の概念により制御パラメータを定めている。

今適当な時間単位として秒をとり，ドッキングを 30 秒程度で完了する状況を想定する。制御系の時定数はパラメータに比例して変化するので実際の状況に応じて時間単位を 10 秒または分と考えても特性は同じで，実際の制御力や速度はこれに対応して減少する。

Table 2 Parameters of the extended Kalman filter for each cases

Filtering time interval	ΔT = 1		ΔT = 0.2	
Initial estimation interval	T1 = 30		T1 = 15	
Po / R/Ract.	Actual values	1	Actual values	1
1	Case 110	diverge	Case 210	Case 215
10	Case 120	diverge	Case 220 Case 221*	Case 225

* W = 0

Table 3 Parameters in the simulation runs

	Xo for system	Xo for filter	System noise Qii
X_x	1.0 m	1.2 m	0.0
X_y	1.0	1.2	0.0
X_z	10.0	10.2	0.0
$\dot{X}_x$	0.0 m/s	0.05 m/s	0.0001
$\dot{X}_y$	0.0	0.05	0.0001
$\dot{X}_z$	0.0	0.05	0.0001
ϕ	0.1 rad.	0.12 rad.	0.0
θ	0.1	0.12	0.0
ψ	0.1	0.12	0.0
$\dot{\phi}$	0.0 rad./s	0.002 rad./s	0.00001
$\dot{\theta}$	0.0	0.002	0.00001
$\dot{\psi}$	0.0	0.002	0.00001

Observation noise Rii = 0.001

Table 4 Actual control laws of the model

	+	−
X	#1, #8 #3, #6*	#4, #5 #2, #7*
Y	#2, #3 #5, #8*	#6, #7 #1, #4*
Z	——	bias
ϕ	#5, #8	#1, #4
θ	#2, #7	#3, #6
ψ	even	odd

上の単位において制御反力としての移動体浮力を40,000 N（上方向加速度約 5 cm/sec²）として，その2倍程度のロープ張力による制御を考えると移動体は上下方向に 5 cm/sec² の駆動力で制御される。このとき1本当りのロープ張力は最大約 10,000 N（1 ton 重），定常状態で 5,000 N となるが，その制御速度を減ずると張力も比例的に減少する。制御定数は制御に伴う振動から5秒以内に収束するように定められている。$\dot{z}$ の目標値は 40 cm/sec であるが，これを5秒程度で達成するようなゲインをとる。移動体接近につれてゲインを補正するが，$\dot{z}$ の実現値は低下すると考えられ，現実にはむしろ安全になる。最終の結合点で十分な速度を出せるかどうかが検討の対象となるので，その点における停止制御は現在考慮されていない。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーション計算において，特にフィルタ計算の実用性を確認するために以下に示す修正，検討を行っている。

（1） Pの対称性を保つため，計算誤差の影響を受けやすいPを2倍精度（16 桁）で計算する。全体の計算時間に対する影響は無視できる。

（2） 同じく計算誤差の影響を受けやすい Fig. 3 中の逆行列演算を避けるために，$\boldsymbol{v}$ の直交性を利用して独立な1次元観測が8回行われる形式をとる[7]。この処理により逆行列は逆数となり計算誤差の影響が減少する。逆行列演算が節約される反面Pの更新が8倍となるが，全体の計算時間には影響がない。

（3） Pの初期値が大きいとき，計算は困難となって発散する可能性が大きくなるのでPの初期値を $\Delta \boldsymbol{x}_0$ に対応した数値とする。また非線形性による推定観測値 $\Delta \boldsymbol{y}$（式 (14)）に誤差に基づく振動を防止するため，フィルタに用いるRは実際の誤差分散 R_{act} より大きくした場合を計算する。これは観測により状態量を修正するカルマンゲイン K (Fig. 3) を減少する効果を持つ。

（4） 非線形性および$\boldsymbol{\Phi}$の近似による推定値誤差の拡大は ΔT と共に増大するので，その影響を検討するために ΔT を変化する。なお積分間隔はフィルタおよび制御計算に影響を与えないように十分小さく（0.02 秒，制御時定数の約 1/100）とる。これは全体の計算時間にほぼ反比例するので，実用上の立場からはその上限を検討する必要があり今後の検討課題となる。

以上の計算技法によりシミュレーションを行った結果の一部は Fig. 6～9 に示される。Fig. 6～8 は状態変数の内，重心位置，姿勢角の変化とフィルタによるその推定値を示している。振動している曲線が推定値，滑らかな曲線が実際の状態量変化を示す。初期推定期間および最終定常状態における実状態量の変動はシステム雑音によるものである。Table 5 はその結果をまとめて示し，T_1（$z=10$ m）および最終状態（$z=2$ m）における実際の推定誤差の上限値を示している。前者は初期状態推定の限界値，後者は結合時の最終精度に対応する。Fig. 9 はフィルタ計算上得られる誤差分散行列の理論値P (Fig. 3) の対角成分の平方根，即ち各状態推定値の（理論的）標準偏差の変化を示している。

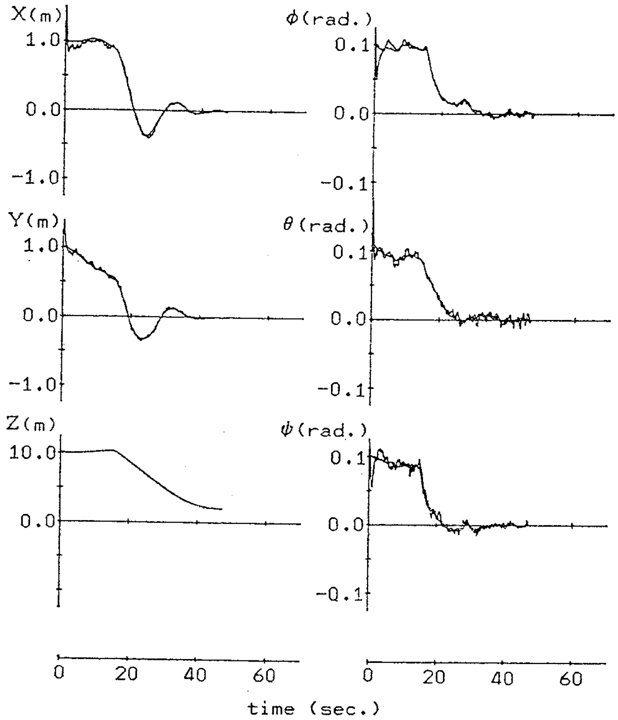


Fig. 6 State estimation by the filter (Case 220)

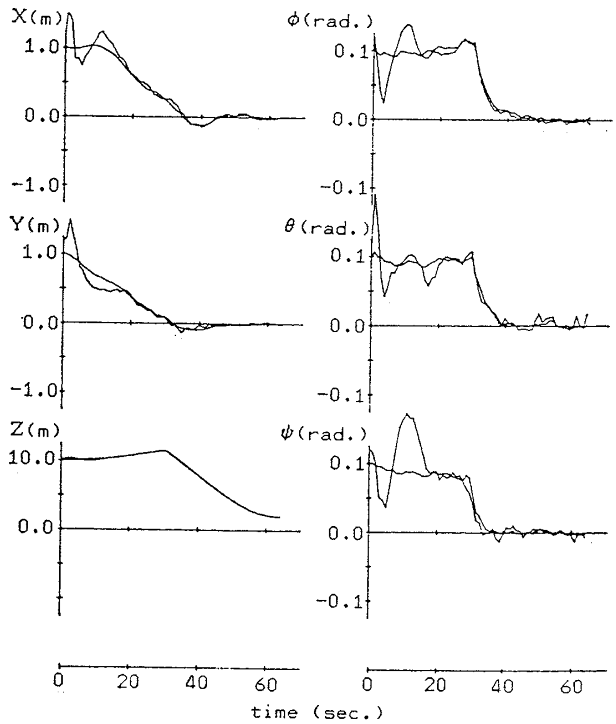


Fig. 7 State estimation by the filter (Case 120)

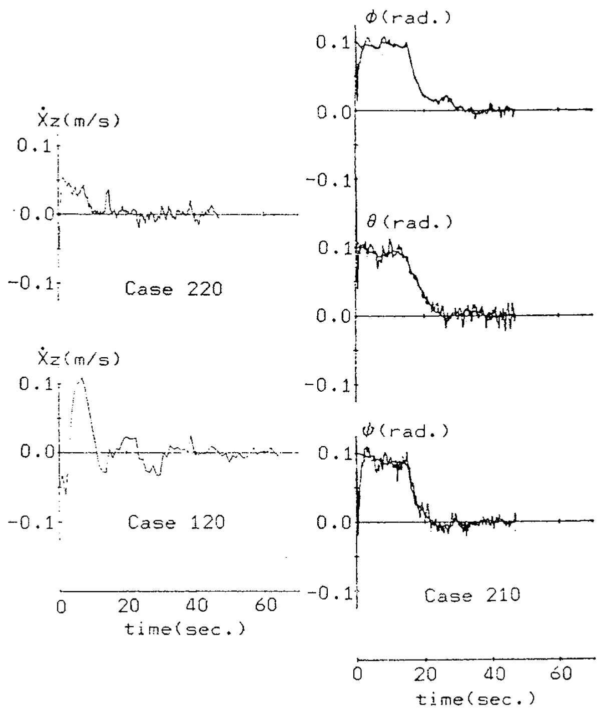


Fig. 8　State estimation by the filter ($\Delta\dot{z}$ and Case 120)

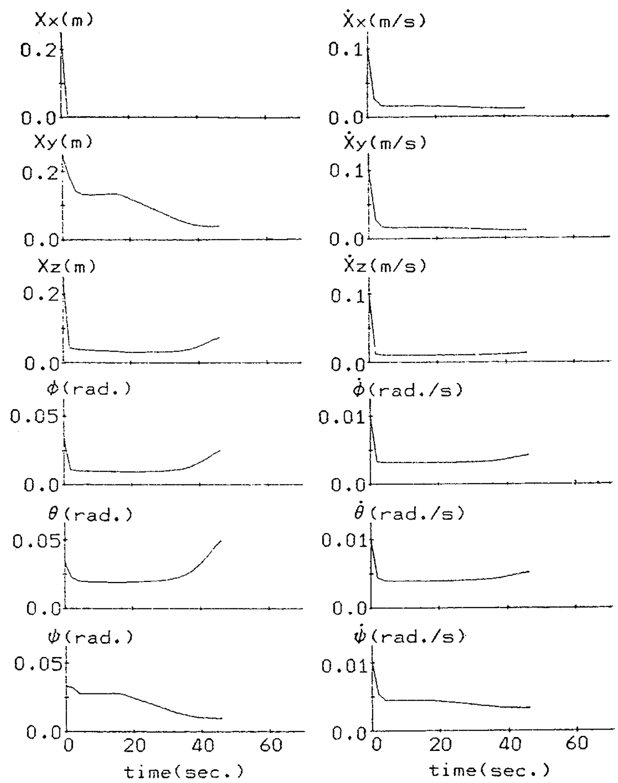


Fig. 9　Convergence of P matrix (Standard deviations $\sqrt{P_{ii}}$)

以上のシミュレーション結果より状態推定，制御性能に関して以下に要約される特性が認められる。

（1） Pは計算誤差の影響を受け，Qの存在にもかかわらずパラメータによっては正定値性が保てないので，Pの更新のみ倍精度計算が必要である。更に逆行列演算を避けるため観測を分離することによって P の正定値性，対称性は保証される。

（2） フィルタ部分のみの計算時間は U-1500 システムで1秒の積分（50 ステップ）に実時間 20 秒を必要とする。したがって時間単位を 20 倍以上とした低速制御であればミニコンにより十分計算可能である。この際制御は 10 分程度となる。積分ステップの拡大により計算時間は短縮可能と考えられる。

（3） フィルタのパラメータは計算結果に大きく影響する。一般にはPの初期値を十分大きくとればよいが，$P_0=1$ では非線形性と計算誤差のために $\Delta T=1$ の場合は発散する。$\Delta T=0.2$ の場合（ケース 215，225）10 秒以内に収束するが，T_1 における実際の推定誤差はやや大きくなる。最終精度には差がない。これは推定理論に対応する結果であるが，計算の発散はきわめて危険なので，単位系に注意して現実に則した数値を用いる必要がある。

Table 5　Results of filtering

Case		110	120	210	220	221	215	225
Accuracy of estimation at T1	Xx	0.12	0.05	0.08	0.07	0.07	0.1	0.1
	Xy	0.08	0.05	0.07	0.05	0.05	0.5	0.5
	Xz	0.05	0.05	0.025	0.015	0.01	0.05	0.05
	ϕ	0.01	0.01	0.005	0.005	0.004	0.01	0.01
	θ	0.02	0.008	0.01	0.008	0.008	0.01	0.01
	ψ	0.02	0.01	0.015	0.001	0.01	0.02	0.02
	$\dot{X}z$	0.03	0.03	0.02	0.02	0.005	0.02	0.02
Final accuracy of estimation	Xx	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	Xy	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	Xz	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
	ϕ	0.01	0.007	0.008	0.005	0.005	0.005	0.005
	θ	0.01	0.01	0.0015	0.01	0.008	0.01	0.01
	ψ	0.01	0.01	0.07	0.005	0.005	0.004	0.004
	$\dot{X}z$	0.02	0.01	0.015	0.015	0.005	0.015	0.015

unit　Xx, Xy, Xz : m　　ϕ, θ, ψ : rad.　　$\dot{X}z$: m/s

フィルタ更新間隔 ΔT は非常に影響が大きく，$\Delta T=1$ では初期状態，最終状態共 $\Delta T=0.2$ の結果に比べて推定精度が劣化する。これは観測点数が 1/5 となるため当然の結果であり，推定誤差は$\sqrt{5}$倍となる。現実にはシステム雑音のために T_1 付近では差が少ないが，推定初期には Fig. 6，7 に示されるように非常に大きな差を生じ，フィルタの発散を招くこともある。また図からも明らかなように推定誤差の周期も更新周期に対応して長くなるので，推定の遅れも拡大し制御系を不安定にする可能性がある。前述のように ΔT のある程度の短縮は計算上の負担とならないので短い方がよいが，$\Delta T=0.2$ 即ち制御時定数の約 1/10 程度で十分と考えられる。

Rは本来観測誤差分散 0.001(m^2) に等しくするのが最適であるが，ケース 220 (Fig. 6) はケース 210 (Fig. 8) よりも良好な結果を得る。Table 5 も一般に $R=10\,R_{\mathrm{act}}$ の場合に推定精度が改善されることを示す。これは前述のように線形近似ならびにΦの簡単化による誤差が加わるために観測誤差が拡大することによるとみられ，ΔT が大きいとき，その傾向は一層顕著となる。シミュレーション結果からはRを実際の数値の 10 倍程度にとれば十分なことが示される。

（4） フィルタの収束状況はP行列により示される。Fig. 9（ケース 220）の結果より $\Delta T=0.2$ の時，初期推定がほぼ3秒程度で収束することが示され，これは Fig. 6 の結果ともよく対応する。これは8本のロープ長データ 15 組程度で，12 の状態量が定常状態と同様の精度で推定可能なことを示す。これより $T_1\geq 5$ であれば初期推定は十分可能なことが示される。なおシステム雑音QのためPは0より大きい一定値に収束するが，姿勢角推定分散はzが小さくなるとやや増大する。これはロープの配置が変化して検出精度が低下することによるが，Table 5 に示す実際の推定結果では最終状態の方が精度が良い。これは $R=10\,R_{\mathrm{act}}$ を用いたことによりPが実際以上に大きく出た結果であり，実際の推定精度は最終状態で最良となることが示される。なお $\Delta T=1$ のときは $T_1\geq 20$ 程度とする必要がある。

（5） フィルタの推定精度は Table 5 にまとめて示される。最適と考えられるケース 220 において，初期推定（$z=10$ m）で水平面内 10 cm，高度（z）2 cm，姿勢角は 0.5° 程度以内の状態検出が可能である。最終状態（結合位置 $z=2$ m）では姿勢角はほぼ同様であるが，水平面内位置精度は 1 cm 程度に改善される。初期の状況ではロープ長が長く水平面内位置が決定しにくく，最終状態では改善されることによる。シミュレーションでは観測雑音を約 3 cm としているが，Rが異なるとき推定精度はほぼ$\sqrt{R}$に比例する。他方ケース 221（外乱 $\boldsymbol{w}=0$）の結果も推定精度に関しては本質的な差はなく，仮定した外乱に対しては十分追従できることが示される。

ドッキング制御で重要な $\dot{z}$，即ち接近速度に関しては Fig. 8 に推定誤差のみが拡大されて示される。ケース 220 では僅かに最終状態の推定精度が良く，ほぼ 2cm/sec 程度となる。これは目標速度の 5% の誤差で接近中は十分な精度であるが，最終的な接触時は状況によって ΔT を更に短縮したり，別途近接センサを利用する等の対応が必要となる。

（6） Fig. 6～8 の T_1 以降に制御状況が示される。T_1 までの変動は外乱によるものであるが，T_1 以降はzを除き水平面内位置，姿勢角共に5秒程度で変化して線形制御則による制御が有効なことを示す。この結果姿勢角は T_1 後 15 秒で十分小さな値に収束するが，水平面内の運動は遅い振動を示し，T_1 後 20 秒で収束している。フィルタと同じ理由で水平面内の位置制御性はzが大きいとき低下するが，十分接近した後には Fig. 4 の配置で十分に制御される。水平面内運動，姿勢変化には相互干渉がみられる結合点付近では安定となる。最終状態における制御精度は Table 3 の外乱において水平面内 4 cm，姿勢角 0.6° 程度である。外乱のない場合（ケース 221）は当然0に収束するが，$t=45$ 付近では水平面内 3 cm，姿勢角は 0.3° 程度となる。以上より与えられた条件のもとで位置 5 cm 以内，姿勢 1° 以内に制御可能なことが示され，本方式の実用的な可能性が示されたと考えられる。

（7） ドッキングで重要な接近速度制御の最適化は今後の検討課題であるが，本文に示した単純な速度制御でも $t=35$（$z\fallingdotseq 4$ m）まではほぼ目標速度で安定に接近することが確認された。以後はロープの角度が広がりオフセットが増大するため，速度は低下してくるが，$z=2$ m の最終状態でも十分に速度の安定性は保たれ，Z方向の制御性も残されている。最終状態における非線形性と結合点における停止条件を考慮した最短時間制御則を適用することにより安全，迅速なドッキングが可能になると考えられる。

なおロープ張力は初期加速時を除き，ほぼ制御用浮力に等しい力で下降させるのでこのモデルにおいては1本当り 500 kg 重程度である。初期加速時には現在の制御パラメータで約 1 ton 重であり，浮力および制御速度を低下することにより更に低減できるが，この程度の張力制御は十分実現可能である。

以上の結果より本研究で検討した，ロープによる移動体の状態推定ならびにドッキング制御は，基本的には必要とする精度を達成できること，および計算を簡単化することによりリアルタイムの制御が可能なことが確認された。

5 結　　言

ロープを用いた深海中の移動体の自動ドッキングシステムを提案した。本方式は固定基地からロープを結合後このロープを集中制御して低速・安定にドッキングを行うもので，ロープ長により移動体の状態推定を行うことにより慣性の大きな移動体を安全に制御することができる。基地から移動体に自在アームを接触させて相対位置を検出する方法も考えられるが，本文においては制御論理が複雑になる反面で装置が比較的簡単なロープを用いた方式の実現可能性を検討した。そしてその基本要件である移動体の状態推定方式およびこれに基づくドッキン

グ制御方式の定式化とシミュレーション分析を行い，以下の結果を得た。

（1） ロープ長に基づく移動体の状態推定については，拡張カルマンフィルタに適当な近似を加えることにより計算を簡単化でき，ドッキング完了までの動作が10分程度であればミニコンによりリアルタイム計算が可能である。計算精度を保つため一部の計算を倍精度とする必要がある。線形近似のためフィルタパラメータ選定には注意を要し，特に更新間隔 ΔT を十分小さく（制御時定数の 1/10 程度）とることが望ましい。

（2） フィルタの推定精度はシミュレーションの状況における結合時点（$z=2$m）で，位置 0.01m，速度 0.02m/sec，姿勢角 0.5° 以内である。ロープ位置の最適化により更に精度向上が可能であるが，ドッキングに必要な精度は得られたと考えられる。また5秒程度の初期推定期間の後，リアルタイムで有効な制御情報，特に速度・角速度情報が遅延なく取得可能なことが示された。

（3） 比較的簡単な制御則により，z の大きい位置を除き十分安定に制御できることが確認された。特に最終段階の $z\leqq 3$m では水平面内位置 0.05m，姿勢角 1° 以内に制御可能である。接近方向速度（$\dot{z}$）も安定で十分な制御性を保つことが示される。

（4） Fig. 4 の配置では初期状態で水平面内位置の制御性ならびにフィルタの検出能力が劣化するが，最終状態で改善される。これは Fig. 4 の配置によるロープ利用制御系の特色である。

ドッキングにおいては本来最終精度が重要なので，以上の結果から本方式による状態推定ならびに移動体の制御の実用性は確認されたと考えられる。またこれらの装置を移動体側に設置する方式も同様な手段により検討可能である。今後抵抗等を考慮したモデルの精緻化，積分計算間隔拡大による計算時間の短縮，ロープ配置の最適化および最適制御則導入によるドッキング速度の向上等について，より現実に則した検討を進めたい。

終りに本研究において種々御指導御教示いただいた東京大学工学部　小山健夫教授，同生産技術研究所　浦環助教授に厚く感謝の意を表わしたい。

参考文献

1) 科学技術庁／宇宙開発事業団：ランデブ／ドッキング技術の検討，共同成果報告書（昭和 54 年 3 月）.

2) J. A. Cestone, et al.: Latest Highlights in Acoustic Underwater Navigation, Navigation, Vol. 24, No. 1 (Spring 1977), pp. 7～39.

3) 秋葉，他：L-3 H-1, 2, 3 および L-4 S-1, 2 の性能計算，東京大学宇宙航空研究所報告，第3巻，第1号（B）(1967 年 3 月), pp. 173～182.

4) R. E. Kalman: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Trans. ASME(D), J. Basic Eng., Vol. 82 (1960).

5) A. H. Jazwinsky: Stochastic Process and Filtering Theory, Math. in Science and Eng., Vol. 64, Academic Press (1970).

6) 石谷，玉木：オンラインの軌道推定における Kalman Filter の応用について，東京大学宇宙航空研究所報告，第8巻，第2号（A）(1972 年 4 月), pp. 264～292.

7) H. W. Sorrenson: Kalman Filtering Techniques, Advances in Control Systems, Vol. 3, Academic Press (1966).

付　　　録

1. 状態遷移行列 Φ_k

状態遷移行列 Φ_k は状態ベクトルを

$$x_k=(X_x, X_y, X_z, \dot{X}_x, \dot{X}_y, \dot{X}_z, \varphi, \theta, \psi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^t \qquad \text{(A-1)}$$

としたとき

$$\Phi_k=\left(\begin{array}{c|c} \begin{array}{c|c} E & \Delta T\cdot E \\ \hline 0 & E \end{array} & 0 \\ \hline 0 & \begin{array}{c|c} E & \Delta T\cdot E \\ \hline 0 & E \end{array} \end{array}\right) \qquad \text{(A-2)}$$

となる。ここで E は 3×3 の単位行列である。

2. 観測行列 C_k の計算

状態ベクトルが式 (A-1) で表わされ，観測ベクトルが

$$\boldsymbol{y}=(l_1, l_2, \cdots, l_8)^t \qquad \text{(A-3)}$$

と表わされるとする。いま移動体側の i 番目のロープの取付け位置を慣性系で

$$\boldsymbol{x}_{pj}=(x_{pj}, y_{pj}, z_{pj})^t \qquad \text{(A-4)}$$

$$\left.\begin{array}{l} \text{ただし，} 1\leq i\leq 8 \\ \quad i \text{ が奇数のとき} \quad j=\dfrac{i+1}{2} \\ \quad i \text{ が偶数のとき} \quad j=\dfrac{i}{2} \end{array}\right\} \qquad \text{(A-5)}$$

とし，

$$\boldsymbol{x}_p=(\boldsymbol{x}_{p1}, \boldsymbol{x}_{p2}, \boldsymbol{x}_{p3}, \boldsymbol{x}_{p4})^t \qquad \text{(A-6)}$$

なるベクトルを考えれば

$$C_k=\left.\frac{\partial \boldsymbol{y}}{\partial \boldsymbol{x}}\right|_{x_{0k}}=\left.\frac{\partial \boldsymbol{y}}{\partial \boldsymbol{x}_p}\cdot\frac{\partial \boldsymbol{x}_p}{\partial \boldsymbol{x}}\right|_{x_{0k}} \qquad \text{(A-7)}$$

と書ける。l_i を i 番目のロープ，$\boldsymbol{x}_{si}$ を慣性系での固定基地側のロープの取付け位置，

$$\boldsymbol{x}_{si}=(x_{si}, y_{si}, z_{si})^t \quad (1\leq 8\leq i) \qquad \text{(A-8)}$$

r_i を移動体系での移動体側の i 番目のロープの取付け位置，

$$r_j=(r_{xj}, r_{yj}, r_{zj}) \quad (1\leq j\leq 4) \qquad \text{(A-9)}$$

とすれば

$$l_i=\sqrt{(\boldsymbol{x}_{pj}-\boldsymbol{x}_{si})^2} \qquad \text{(A-10)}$$

$$\boldsymbol{x}_{pj}=T_{m1}^{-1}\boldsymbol{r}_j+\boldsymbol{X} \qquad \text{(A-11)}$$

ただし，T_{m1} は式（1）に示す行列

i と j の関係は (A-5) に示す。

であるから $\partial \boldsymbol{y}/\partial \boldsymbol{x}_p, \partial \boldsymbol{x}_p/\partial \boldsymbol{x}$ は以下のようになる。

$$\frac{\partial \boldsymbol{y}}{\partial \boldsymbol{x}_p}=$$

$$
\begin{pmatrix}
\begin{matrix} a_{1x} a_{1y} a_{1z} \\ a_{2x} a_{2y} a_{2z} \end{matrix} & & & \\
& \begin{matrix} a_{3x} a_{3y} a_{3z} \\ a_{4x} a_{4y} a_{4z} \end{matrix} & 0 & \\
& & \begin{matrix} a_{5x} a_{5y} a_{5z} \\ a_{6x} a_{6y} a_{6z} \end{matrix} & \\
& 0 & & \begin{matrix} a_{7x} a_{7y} a_{7z} \\ a_{8x} a_{8y} a_{8z} \end{matrix}
\end{pmatrix} \tag{A-12}
$$

ただし，

$$
\left.\begin{aligned}
a_{ix} &= \frac{\partial l_i}{\partial x_{pj}} = \frac{1}{l_i}(x_{pj} - x_{si}) \\
a_{iy} &= \frac{\partial l_i}{\partial y_{pj}} = \frac{1}{l_i}(y_{pj} - y_{si}) \\
a_{iz} &= \frac{\partial l_i}{\partial z_{pj}} = \frac{1}{l_i}(z_{pj} - z_{si})
\end{aligned}\right\} \tag{A-13}
$$

i, j の関係は (A-5) に同じ。

$$
\frac{\partial \boldsymbol{x}_p}{\partial \boldsymbol{x}} =
\begin{pmatrix}
E & 0 & \begin{matrix} b_{1x\varphi} b_{1x\theta} b_{1x\psi} \\ b_{1y\varphi} b_{1y\theta} b_{1y\psi} \\ b_{1z\varphi} b_{1z\theta} b_{1z\psi} \end{matrix} & E \\
E & 0 & \begin{matrix} b_{2x\varphi} b_{2x\theta} b_{2x\psi} \\ b_{2y\varphi} b_{2y\theta} b_{2y\psi} \\ b_{2z\varphi} b_{2z\theta} b_{2z\psi} \end{matrix} & E \\
E & 0 & \begin{matrix} b_{3x\varphi} b_{3x\theta} b_{3x\psi} \\ b_{3y\varphi} b_{3y\theta} b_{3y\psi} \\ b_{3z\varphi} b_{3z\theta} b_{3z\psi} \end{matrix} & E \\
E & 0 & \begin{matrix} b_{4x\varphi} b_{4x\theta} b_{4x\psi} \\ b_{4y\varphi} b_{4y\theta} b_{4y\psi} \\ b_{4z\varphi} b_{4z\theta} b_{4z\psi} \end{matrix} & E
\end{pmatrix} \tag{A-14}
$$

ただし，E は 3×3 の単位行列，0 は 3×3 の零行列

$$
\begin{aligned}
b_{jx\varphi} &= \frac{\partial x_{pj}}{\partial \varphi} = r_{yj}(\cos\varphi \sin\theta \cos\psi + \sin\varphi \sin\psi) \\
&\quad + r_{zj}(-\sin\varphi \sin\theta \cos\psi + \cos\varphi \sin\psi) \\
b_{jx\theta} &= \frac{\partial x_{pj}}{\partial \theta} = r_{xj}(-\sin\theta \cos\psi) + r_{yj} \sin\varphi \cos\theta \cos\psi \\
&\quad + r_{zj} \cos\varphi \cos\theta \cos\psi \\
b_{jx\psi} &= \frac{\partial x_{pj}}{\partial \psi} = -r_{xj} \cos\theta \sin\psi + r_{yj}(-\sin\varphi \sin\theta \sin\psi \\
&\quad + \cos\varphi \cos\psi) \\
&\quad + r_{zj}(-\cos\varphi \sin\theta \sin\psi + \sin\varphi \cos\psi) \\
b_{jy\varphi} &= \frac{\partial y_{pj}}{\partial \varphi} = r_{yj}(\cos\varphi \sin\theta \sin\psi - \sin\varphi \cos\psi) \\
&\quad + r_{zj}(-\sin\varphi \sin\theta \sin\psi - \cos\varphi \cos\psi) \\
b_{jy\theta} &= \frac{\partial y_{pj}}{\partial \theta} = -r_{xj} \sin\theta \sin\psi + r_{yj} \cos\varphi \sin\theta \sin\psi \\
&\quad + r_{zj} \cos\varphi \cos\theta \sin\psi \\
b_{jy\psi} &= \frac{\partial y_{pj}}{\partial \psi} = r_{xj} \cos\theta \cos\psi + r_{yj}(\sin\varphi \sin\theta \cos\psi \\
&\quad - \cos\varphi \sin\psi) \\
&\quad + r_{zj}(\cos\varphi \sin\theta \cos\psi + \sin\varphi \sin\psi) \\
b_{jz\varphi} &= \frac{\partial z_{pj}}{\partial \varphi} = r_{yj} \cos\varphi \sin\theta - r_{zj} \sin\varphi \cos\theta \\
b_{jz\theta} &= \frac{\partial z_{pj}}{\partial \theta} = -r_{xj} \cos\theta - r_{yj} \sin\varphi \sin\theta \\
&\quad - r_{zj} \cos\varphi \sin\theta \\
b_{jz\psi} &= \frac{\partial z_{pj}}{\partial \psi} = 0
\end{aligned}
$$

$$(1 \leq j \leq 4)$$

3. 制御アルゴリズム

本システムの制御アルゴリズムの詳細を Table A.1 にあげておく。表中 gain (#i) は i 番目のロープの張力を示す。

Table A.1 Control algorithm

```
if Xx >= 0  then
    gain(#4)=7600*Xx+33120*Ẋx
    gain(#5)=gain(#4)
    gain(#2)=gain(#4)
    gain(#7)=gain(#4)
 else
    gain(#1)=-7600*Xx-33120*Ẋx
    gain(#8)=gain(#1)
    gain(#3)=gain(#1)
    gain(#6)=gain(#1)
 endif

 if Xy >= 0  then
    gain(#6)=7600*Xy+33120*Ẋy+gain(#6)
    gain(#7)=7600*Xy+33120*Ẋy+gain(#7)
    gain(#1)=7600*Xy+33120*Ẋy+gain(#1)
    gain(#4)=7600*Xy+33120*Ẋy+gain(#4)
 else
    gain(#2)=-7600*Xy-33120*Ẋy+gain(#2)
    gain(#3)=-7600*Xy-33120*Ẋy+gain(#3)
    gain(#5)=-7600*Xy-33120*Ẋy+gain(#5)
    gain(#8)=-7600*Xy-33120*Ẋy+gain(#8)
 endif

  gain(#1)=117000*φ+503700*φ̇+gain(#1)
  gain(#4)=117000*φ+503700*φ̇+gain(#4)
  gain(#5)=-117000*φ-503700*φ̇+gain(#5)
  gain(#8)=-117000*φ-503700*φ̇+gain(#8)

  gain(#3)=76250*θ+331200*θ̇+gain(#3)
  gain(#6)=76250*θ+331200*θ̇+gain(#6)
  gain(#2)=-76250*θ-331200*θ̇+gain(#2)
  gain(#7)=-76250*θ-331200*θ̇+gain(#7)

  gain(#1)=58000*ψ+252000*ψ̇+gain(#1)
  gain(#5)=58000*ψ+252000*ψ̇+gain(#5)
  gain(#4)=-58000*ψ-252000*ψ̇+gain(#4)
  gain(#8)=-58000*ψ-252000*ψ̇+gain(#8)

 total=Σgain(#i)

 if total > 40000  then goto $$$
   bias=(40000-total)/8
   gain(#i)=gain(#i)+bias

   gain(#i)=gain(#i)+10000*(0.4+Ẋz)
             *sqrt((Xz-1.5)**2+4)/(Xz-1.5)

$$$ if gain(#i) < 0  then
      gain(#i)=0
    else
      gain(#i)=gain(#i)
    endif
```