

# 画像情報に基づくホバークラフト型全方向移動体のロバスト位置姿勢制御

木 山 健\*・塩 田 真 吾\*\*・渡 辺 亮\*\*\*

## Robust Control Based on Image Information for Position and Attitude of Omnidirectional Mobile System of Hovercraft Type

Tsuyoshi KIYAMA\*, Shingo SHIOTA\*\* and Ryo WATANABE\*\*\*

This paper proposes an “omnidirectional mobile system of a hovercraft type (hovercraft)” as the foundation of robot technologies working under severe environments instead of human beings, and this paper develops a control method for positions and attitudes of the hovercraft. A real machine does not exist at the moment. Therefore, its model of a two-dimensional plane on the ground is created and basic experiments on the model are carried out. Considering future work on a tracking control of moving objects, the relative positions and attitudes of the model from landmark objects are important. In addition, it is also significant to measure the positions and attitudes with one kind of sensor for the easy repair, and then image sensors are used as their sensing devices. Problems on the control synthesis for the model are found as follows: robust stability of the closed-loop system, a relative long sampling time to process the image, an output feedback control with a low gain to save a fuel cost, and changes on the center of gravity and camera vibrations of the image sensors due to the hovering. To solve these problems, a robust stability synthesis method is proposed to restrict eigenvalues of the control system using image coordinates as direct inputs of the controller. First, the fundamental analysis condition is recast as a linear matrix inequality (LMI). Next, the synthesis condition with an output feedback control based on the analysis one is recast as an LMI with a rank constraint. The controller is designed to restrict a domain of eigenvalues of the closed-loop system nearby the origin using the synthesis condition and the linearization algorithm. Finally, the proposed method is verified through simulations and experiments.

**Key Words:** omnidirectional mobile system, stereo vision, pole assignment, LMI, linearization algorithm

### 1. はじめに

近年の科学技術の発展にともない、原子力発電所などの放射線の強い場所や、また、宇宙や深海といった未開拓地などの過酷な環境下での作業がますます必要とされてきている。このような作業を人間に代わって行なうロボット技術の基礎として、目的の位置に、状況やつぎの行動に適した姿勢に移動させる航空機や船舶などの移動体の制御技術が脚光を浴びてきている。そこで、本論文では、各種機器、物資の搬送を目的とし、摩擦の影響をほとんど受けずに全方向への移動が可能である「ホバークラフト型全方向移動体」を制御対象として提案する。そして、この移動体の位置姿勢制御方法の開発を

行なう。移動の際に摩擦の影響を受けない環境としては宇宙空間があり、本論文で開発を行なう移動体の制御方法は、宇宙空間における宇宙機<sup>1)</sup>の位置・姿勢制御に展開することが可能であり、有用である。近年、国際宇宙ステーションの建設に見られるように、世界の宇宙利用は本格的な産業利用の時代に入っている。将来的には、さらなる宇宙への活動範囲の拡大が予想され、このような状況において、宇宙ステーション内の各モジュール間などにおける各種機器や物資の搬送作業が不可欠となる。このようなタスクを達成するためには、宇宙用搬送機のニーズがあり、本研究は、より良い宇宙用搬送機のシーズを与える基礎研究とも位置づけられる。

なお、現時点では、ホバークラフト型全方向移動体(宇宙用搬送機)の実機が存在しないため、2次元平面モデルを自作し基礎実験を行なう。本論文では、この実験装置を用いて、基本的な移動および配置を実現するための制御系設計方法の開発を研究目的とする。このホバークラフトモデルには、プロペラが取り付けられたモーター駆動部がホバー用に1基、また、側面の4方向に均等に同様のモーター駆動部がスラスト用に4基配置され、これらのスラストから生じる推進力を変化させることにより、ホバークラフトモデルの位置や姿勢を制

\* 大阪大学 大学院工学研究科

\*\* 三菱重工業(株) 神戸造船所

\*\*\* 早稲田大学 大学院理工学研究科

\* Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka

\*\* Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, LTD., Hyogo

\*\*\* Graduate School of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo

(Received October 17, 2006)

御する。ただし、以下ではこのホバークラフト模型を適宜ホバークラフトと記述する。また、このホバークラフトの位置姿勢検出装置については、移動体への追従制御などの将来的な研究を考え、目標物からの相対的な位置姿勢が重要なことと、補修の容易さから 1 種類のセンサーで位置姿勢が検出可能な画像センサーを用いる。このセンサーとして、CCD カメラをホバークラフトに 2 基搭載し、ステレオ視を利用する。本研究では、このホバークラフトに対して、ホバリングによる重心の変化および移動時において重要となるカメラの振動、また、画像処理時間のため比較的長いサンプリング時間とに対処可能な制御系設計方法の開発を進める。

特に、カメラの画像情報に基づく従来の制御方法では、画像座標に最小二乗法などの非線形な計算処理を施し、移動体の位置および姿勢を求めたのちこの情報をコントローラの入力とする制御系設計が多く行われてきている。このとき、非線形な計算処理を介するため、位置および姿勢の計算精度向上は簡単ではなかった。そこで、画像センサー部分を不確かさを考慮した数式でのモデル化を行なうことで、画像座標を直接コントローラの入力にできる制御系設計方法を提案する。ホバークラフトの位置および姿勢を直接計算する必要がないため、この計算精度の誤差による制御性能劣化の軽減が期待できる。なお、このホバークラフト型全方向移動体の研究は、ホバおよびスラストを有している機器の研究であることから、前述のように摩擦のない宇宙空間での宇宙機としての基礎研究とも位置付けられることに注意していただきたい。

まず、第 2 章では本模型実験で用いる製作した実験装置について説明し、第 3 章では解決すべき問題について整理する。この制御対象に対して、第 4 章ではカメラの振動と重心の変化を考慮したホバークラフトのモデルを作成し、第 5 章では制御系設計として、ロバスト性を考慮した固有値制約コントローラを設計し、長いサンプリング時間への対処を行なう。第 6 章ではシミュレーションを行ない、設計したコントローラのホバークラフトへの適応可能性を判断し、最後に、第 7 章では設計したコントローラの本ホバークラフトに対する有効性を、実証実験を行なうことで確認する。

表記:  $n \times n$  の実行列と複素行列の集合を、それぞれ  $\mathbb{R}^n$  と  $\mathbb{C}^n$  と記す。 $n \times n$  の単位行列を  $I_n$  と記述する。行列  $M$  に対して、 $M^T$  は転置行列、 $\text{He } M := M + M^T$ 、 $\sigma_{\max}(M)$  は行列  $M$  の最大特異値を表す。対称行列  $X$  に対して、 $X > 0$  ( $X \geq 0$ ) は(準)正定行列を意味する。また、行列  $M_1, M_2$  に対して、 $M_1 \otimes M_2$  は Kronecker 積を表し、ブロック対角行列  $\text{diag}(M_1, M_2) := \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}$  を定義する。最後に、伝達関数  $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$  をつぎのように表記する。

$$G(s) =: \left( \begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right).$$

## 2. 実験装置

Fig. 1 に実験模型の概略図を示す。実験装置は、ホバークラフト模型、目標物に見立てたランドマーク、摩擦の少ない平面および制御用 PC により構成されている。実験は、模型に搭載した CCD カメラでとらえたランドマーク映像から、PC でスラスト指令電圧を計算し、摩擦の少ない平面上で模型を動かすことにより行なう。なお、ホバークラフト模型-PC 間通信の無線化により、模型の自由な移動が可能である。また、ホバークラフトおよびスラストについてはモータとプロペラで構成されている。したがって、Fig. 2 に実験装置の信号の流れを示すように、本システムはカメラからの情報でフィードバック制御を行ないモータを駆動しているシステムととらえることができる。最後に実験装置の仕様を以下に示す。

ホバークラフト模型質量	:	5	[kg]
ホバークラフト模型最大速度	:	0.1	[m/sec]
ホバークラフト模型移動範囲	:	$2 \times 1$	[m <sup>2</sup> ]
スラスト最大推力	:	$\pm 1$	[N]
サンプリング時間	:	0.067	[sec]

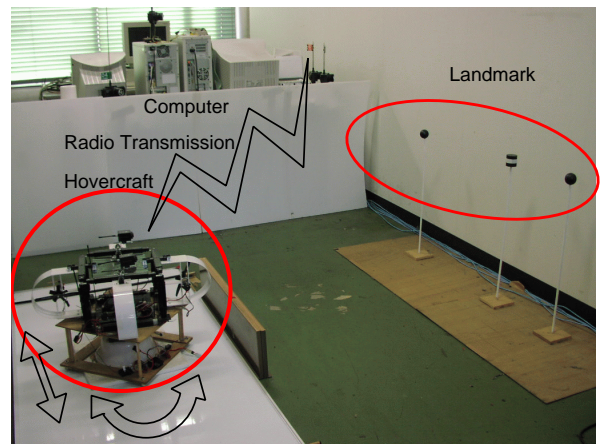


Fig. 1 Experimental system

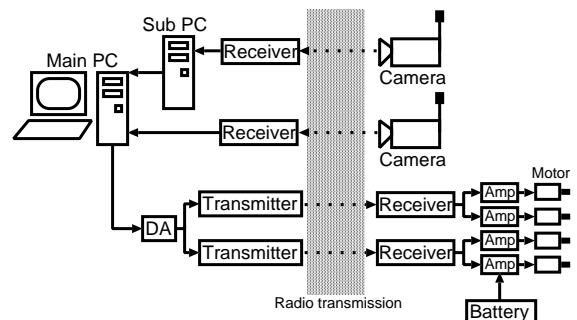


Fig. 2 Signal flow chart

### 3. 問題の記述

実用化を目指すホバークラフトは、様々な機器・物資の搭載を予定するため重心が一定ではなく、また、スラスト振動がカメラに伝わるため映像が揺れ制御性能に悪影響をおよぼすことが予想される。

このことはホバークラフト模型で再現され、重りを搭載させることで重心が変化し、モータ振動のため映像が揺らぐ。模型の位置姿勢を固定し最大推力でスラストを駆動した状態で模型に搭載したカメラで画像を受信すると、Fig. 3 に示すようにランドマークの画像上での位置（ピクセル）は時間変化してしまう。それぞれのカメラ上での変化量は小さいが、カメラおよびランドマークをそれぞれ 2 基用いて後述するステレオ視を利用した位置姿勢検出を行なうため、最終的に検出される位置姿勢は Fig. 4 に示すように大きく変化してしまう。

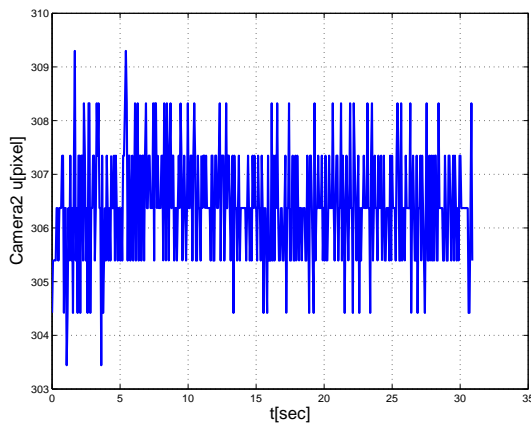


Fig. 3 Image coordinate

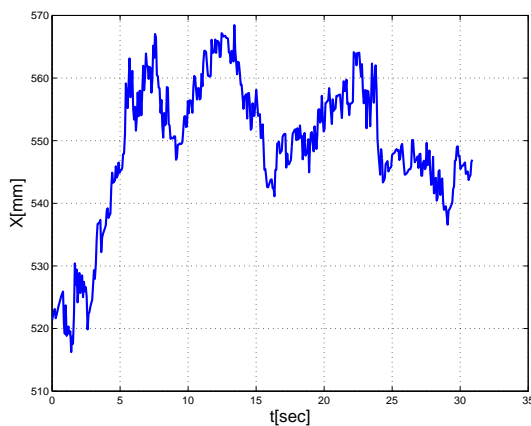


Fig. 4 Position detection

また、無線通信の制約からサンプリング時間が長くならざるをえないこと、状態方程式での状態が直接計測不可能なこ

と、さらに、ハイゲインな補償器は実装困難なことなど、本実験装置には様々な問題点がある。以上から、この実験装置に対する設計仕様は以下のように整理される。

1. 閉ループ系のロバスト安定性。
2. 長いサンプリング時間。
3. ローゲインの出力フィードバック制御。
4. 重心の変化およびカメラ画像の揺れが存在するとき、上記設計仕様 1., 2., 3. が満たされる。

すなわち、これらの課題を克服したモデリング、制御方法の開発を以下で行なう。

### 4. ホバークラフト模型のモデリング

ここでは第 3 章で述べた問題点のなかで、模型重心の変化とカメラ映像の揺れに関する問題点を考慮したホバークラフト模型の数学モデルの導出を行なう。このとき、ホバークラフト模型の力学的関係から、スラスト、ホバークラフトそしてカメラシステムと 3 つのシステムに分割して数学モデルを導出する。

#### 4.1 スラスト

本実験に用いるモータによるスラストは、入力をラジコン操作電圧  $u$ 、出力を推力  $f$  とするシステムである。1 基のスラストは同定実験により、近似的に一次遅れ特性

$$P_i(s) = \frac{\kappa_i}{\tau_i s + 1}, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

を示す。したがって、4 基のスラストの最小実現状態方程式表現は、

$$P_t \begin{cases} \dot{x}_t = -\text{diag} \left( \frac{1}{\tau_1}, \frac{1}{\tau_2}, \frac{1}{\tau_3}, \frac{1}{\tau_4} \right) x_t \\ \quad + \text{diag} \left( \frac{\kappa_1}{\tau_1}, \frac{\kappa_2}{\tau_2}, \frac{\kappa_3}{\tau_3}, \frac{\kappa_4}{\tau_4} \right) u \\ f = I_4 x_t \end{cases} \quad (2)$$

のように記述される。また、模型モデル全体の次数低減化のために、本論文ではホバークラフト模型の動きに影響が小さいスラストのパラメータ  $\tau_i, \kappa_i$  には不確かさが存在しないとし、1 つの平均的な値

$$\tau_i = 0.2, \quad \kappa_i = -0.6, \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

を用いることにする。

#### 4.2 ホバークラフト

ホバークラフトの各パラメータを Fig. 5 のように表す。本体側面に 4 基のスラストを配し、それぞれが  $f_i$  [N] ( $i = 1, \dots, 4$ ) を発生する。模型の位置座標は重心 G の位置座標  $(x, y)$  で表現することに決め、線分 AG と  $x$  軸のなす角  $\phi$  を模型の姿勢とする。また、重心 G の位置は幾何学中心 O より極座標  $(r_g, \theta_g)$  で表される。このとき、幾何学的な関係

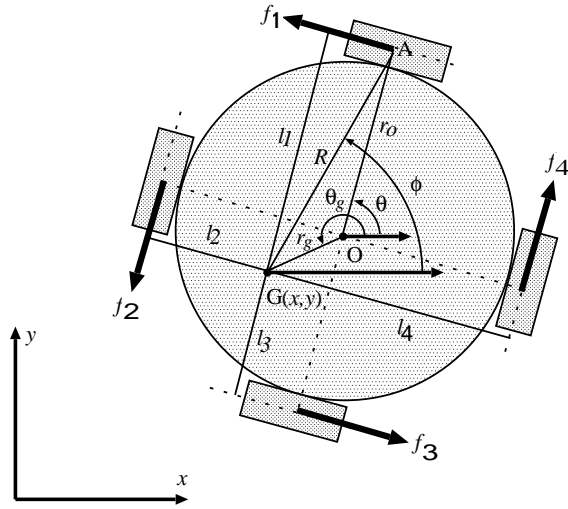


Fig. 5 Hovercraft model

$$\begin{cases} \cos \theta = \{-r_g \cos(\theta_g - \phi) + r_o \cos \phi\} / R \\ \sin \theta = \{r_g \sin(\theta_g - \phi) + r_o \sin \phi\} / R \\ R = \sqrt{r_g^2 + r_o^2 - 2r_o r_g \cos \theta_g} \\ l_1 = r_o - r_g \cos \theta_g, \quad l_2 = r_o - r_g \sin \theta_g \\ l_3 = r_o + r_g \cos \theta_g, \quad l_4 = r_o + r_g \sin \theta_g \end{cases} \quad (3)$$

が成立し、状態変数を  $x_p = [\dot{x} \ x \ \dot{y} \ y \ \dot{\phi} \ \phi]^T$ 、制御入力を  $f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T$ 、制御出力を  $y_p = [x \ y \ \phi]^T$  とすると、重心周りの状態方程式は

$$P \begin{cases} \dot{x}_p = A_p x_p + B_p f \\ y_p = C_p x_p \end{cases}, \quad (4)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$B_p = \begin{bmatrix} -\alpha & -\beta & \alpha & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta & -\alpha & -\beta & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_1/I_g & l_2/I_g & l_3/I_g & l_4/I_g \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

のようになる。ただし、 $\alpha := \{r_g \sin(\theta_g - \phi) + r_o R \sin \phi\} / (MR)$ 、 $\beta := \{-r_g \cos(\theta_g - \phi) + r_o \cos \phi\} / (MR)$  であり、また、 $M$  はホバークラフト模型の質量、 $I_g$  はホバークラフト模型の重心周りの慣性モーメントを表す。

ここで、重心の変化へ対処可能にするため、重心を表すパラメータおよび状態である  $\phi$  を含む行列  $B_p$  は不確かさを有するものとして取り扱う。ここでは、不確かさの上下限値

$$\begin{aligned} \alpha &= b_{u1} + \eta_1 |\delta_1(t)|, & \beta &= b_{u2} + \eta_2 |\delta_2(t)|, \\ l_i/I_g &= b_{ui} + \eta_{i+2} |\delta_{i+2}(t)|, & (i &= 1, 2, 3, 4), \end{aligned}$$

$$|\delta_i(t)| \leq 1, \quad \forall t \geq 0, \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

を設定し、

$$B_p = B_{c2} + B_{c1} \Delta_c D_{c12}, \quad (5)$$

$$B_{c2} = \begin{bmatrix} -b_{u1} & -b_{u2} & b_{u1} & b_{u2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{u2} & -b_{u1} & -b_{u2} & b_{u1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{u3} & b_{u4} & b_{u5} & b_{u6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{c1} = \begin{bmatrix} -\eta_1 & 0 & \eta_1 & 0 & 0 & -\eta_2 & 0 & \eta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta_1 & 0 & \eta_1 & \eta_2 & 0 & -\eta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_3 & \eta_4 & \eta_5 & \eta_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta_c := \text{diag}(\delta_1 I_4, \delta_2 I_4, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6),$$

$$D_{c12} = \begin{bmatrix} I_4 & I_4 & I_4 \end{bmatrix}^T$$

として取り扱う。なお、 $b_{u1}, \dots, b_{u6}$  および  $\eta_1, \dots, \eta_6$  の値はコントローラ設計時に数値計算により求める。したがって、ホバークラフト模型の線形分数変換 (LFT) 表現は、

$$P_c : \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ z_c \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & B_{c1} & B_{c2} \\ 0 & 0 & D_{c12} \\ C_p & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ w_c \\ f \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} w_c = \Delta_c z_c, \\ \Delta_c = \text{diag}(\delta_1 I_4, \delta_2 I_4, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6), \quad |\delta_i(t)| \leq 1 \end{cases}$$

のように導出される。

#### 4.3 画像センサー

ここでは、ホバークラフト模型の出力  $[x \ y \ \phi]^T$  からランドマークの映像である画像座標  $(u, v)$  までの数学モデルを導出する。この画像座標が、実験装置の出力であることに注意していただきたい。すなわち、次章以降では、この画像座標を入力とするコントローラの設計を行なうことになる。

まず、Fig. 6 に座標系を示す。

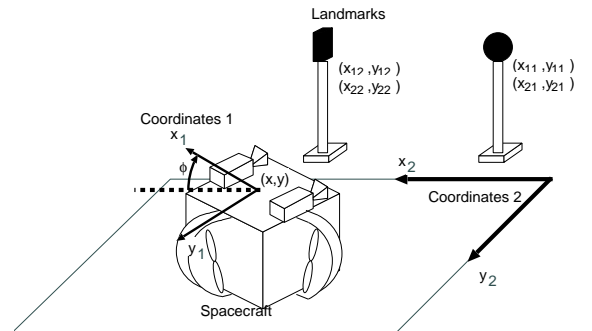


Fig. 6 Formulation of experimental coordinates

座標系 1  $(x_1, y_1)$  はホバークラフト模型の重心 (位置)  $(x, y)$

を原点とする模型上に、座標系 2 ( $x_2, y_2$ ) は平面上に設定されている。Fig. 6 より座標系 1 ( $x_1, y_1$ ) と座標系 2 ( $x_2, y_2$ ) との関係は、模型の位置・姿勢 ( $x, y, \phi$ ) を用いて、

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

のように表される。ここで、ランドマークを 2 基用いて、座標系 1 におけるそれぞれのランドマークの座標を ( $x_{11}, y_{11}$ ) と ( $x_{12}, y_{12}$ )、座標系 2 において同様に ( $x_{21}, y_{21}$ ) と ( $x_{22}, y_{22}$ ) とする。すなわち、 $x_{ij}$  と  $y_{ij}$  の添え字は、それぞれ  $i$  が座標系、 $j$  がランドマークの番号を表す。なお、ランドマークをホバークラフトの目標物と見立てていることから、( $x_{21}, y_{21}$ ) と ( $x_{22}, y_{22}$ ) は既知である。このとき、(6) 式の関係より

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{11} \\ y_{11} \\ x_{12} \\ y_{12} \end{bmatrix}}_{y_h} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & -1 & 0 & 0 & -1 \\ y_{21} & -x_{21} & 0 & 1 & -1 & 0 \\ x_{22} & y_{22} & -1 & 0 & 0 & -1 \\ y_{22} & -x_{22} & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathcal{T}} \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \\ x \cos \phi \\ x \sin \phi \\ y \cos \phi \\ y \sin \phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\cong \mathcal{T} \begin{bmatrix} 1 & \phi & x & x\phi & y & y\phi \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

を得る。(7) 式には三角関数が含まれている点および変数と変数の掛かり合わせがある点が問題を難しくしている。そこで、実験環境での視野限界のためカメラがランドマークへ常に向くことを考慮し、 $\phi \cong 0[\text{deg}]$  でのテイラー展開を用いて (8) 式に示すように近似を行なう。さらに、 $\phi$  は微小であるが変動することから、この変動範囲を不確かさ  $|\phi| \leq \phi_{\max}$  とみなすことにする。したがって、(8) 式の LFT 表現として、

$$P_h \begin{cases} z_h = D_{h12} y_p, \\ y_h = \mathcal{T} \left( D_{h21} w_h + D_{h22} y_p + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T}_{d_h} \right), \end{cases}$$

$$w_h = \Delta_h z_h = (\text{diag}(\phi, \phi) / \phi_{\max}) z_h, \quad \sigma_{\max}(\Delta_h) \leq 1,$$

$$D_{h12} = \begin{bmatrix} \phi_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & \phi_{\max} & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{h21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$D_{h22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

を得る。 $d_h$  は既知の外生入力として扱う。

つぎに、Fig. 6 と Fig. 7 より座標系 1 ( $x_1, y_1$ ) と模型座標系 ( $X, Y, Z$ ) との関係は、

$$\begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

のように表される。

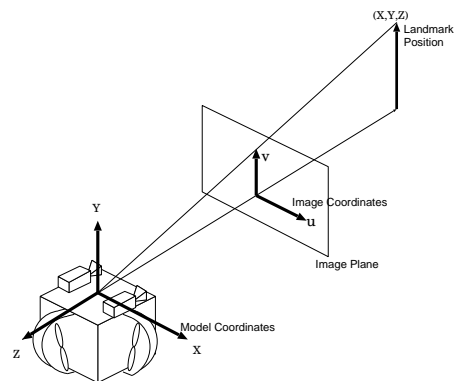


Fig. 7 Principle of stereo

したがって、模型座標系におけるランドマークの座標は、

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Z_1 \\ X_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathcal{J}} y_h \quad (10)$$

である。

最後に、Fig. 7 に示すステレオの原理より、模型座標系 ( $X, Y, Z$ ) と画像座標系 ( $u, v$ ) との関係は、

$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix}}_{\mathcal{P}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

である。ただし、 $\mathcal{P}$  は透視投影行列であり、本論文では同定実験により決定される。 $w$  は左辺のベクトルの第 3 行を 1 に規格化するように定められる変数である。ここで、ホバークラフト模型のカメラを 2 台用いて、カメラ 1 におけるそれぞれのランドマークの画像座標を ( $u_{11}, v_{11}$ ) と ( $u_{12}, v_{12}$ )、カメラ 2 において同様に ( $u_{21}, v_{21}$ ) と ( $u_{22}, v_{22}$ ) とする。すなわち、 $u_{ij}, v_{ij}, w_{ij}$  の添え字は、それぞれ  $i$  がカメラ、 $j$  がランドマークの番号を表す。これを基にカメラ映像の揺れを考慮したカメラの数式モデルを導出する。カメラの揺れ、すなわち、 $u_{ij}, v_{ij}, w_{ij}$  の変化を透視投影行列  $\mathcal{P}_i$  の不確かさとみなし、LFT 表現する。実験システムの場合、模型は 2 次元運動を行なうため、 $Y_j$  は既知となるので

$$\underbrace{\begin{bmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \\ 1 \end{bmatrix}}_{y_{sij}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -i p_{11} & i p_{13} \\ -i p_{21} & i p_{23} \\ -i p_{31} & i p_{33} \end{bmatrix}}_{\mathcal{D}_i} \begin{bmatrix} X_j \\ Z_j \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} i p_{12} Y_j + i p_{14} \\ i p_{22} Y_j + i p_{24} \\ i p_{32} Y_j + i p_{34} \end{bmatrix}}_{d_{sij}}, \quad (i, j = 1, 2) \quad (12)$$

のように変形し、 $\mathcal{D}_i$  は乗法的な不確かさを有するとして、また、 $d_{sij}$  を既知の外生入力として扱う。したがって、 $y_s =$

$[y_{s11}^T y_{s21}^T y_{s12}^T y_{s22}^T]^T$  および  $d_s = [d_{s11}^T d_{s21}^T d_{s12}^T d_{s22}^T]^T$  とすると、ステレオシステムの LFT 表現は、

$$P_s : \begin{cases} \begin{bmatrix} z_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{D} \\ D_{s21} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_s \\ y_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_s \end{bmatrix}, \\ w_s = \Delta_s z_s, \quad \sigma_{\max}(\Delta_s) \leq 1, \\ \Delta_s := \text{diag}(\Delta_{s1}, \Delta_{s2}, \Delta_{s1}, \Delta_{s2}), \\ \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^T & \mathbf{D}_2^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{D}_1^T & \mathbf{D}_2^T \end{bmatrix}^T J, \\ D_{s21} = \text{diag}({}^1D_{s21}, {}^2D_{s21}, {}^1D_{s21}, {}^2D_{s21}) \end{cases} \quad (13)$$

のようになる。

(注意 1)(8) 式について補足する。本論文では、本実験環境や遠方の母船などの目標物へ向けての制御など、視野限界のあるシステムへの対処方法を考察している。したがって、 $\phi = 0$  [deg] を代表点とする制御方法の提案を行なっている。大きな回転(角度  $\phi$  が大きい)運動については、この代表点を想定する制御に必要なだけ複数個考え、それぞれに対して求めたコントローラを切り替えて制御に用いるなどの対処方法が考えられる。詳細は今後の課題である。

#### 4.4 一般化プラント

ロバスト制御に基づく出力フィードバックコントローラを設計するために、上記の各要素を統合させた Fig. 8 に示される一般化プラント  $G$  の状態方程式表現を述べる。

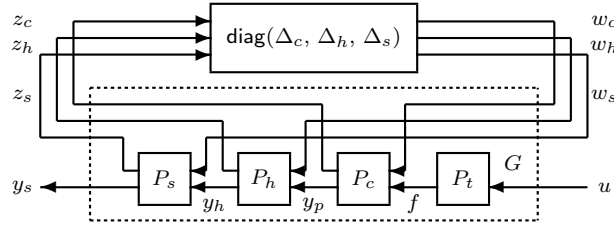


Fig. 8 Generalized plant

状態変数を  $x_g = [x_t^T x_p^T]^T$ , 不確かさからの出力を  $w_g = [w_c^T w_h^T w_s^T]^T$ , 制御入力を  $u = [u_1 u_2 u_3 u_4]^T$ , 不確かさへの入力, すなわち, 制御出力を  $z_g = [z_c^T z_h^T z_s^T]^T$ , 観測出力を  $y_s$  とすると,

$$G \begin{cases} \dot{x}_g = Ax_g + B_1 w_g + B_2 u, \\ z_g = C_1 x_g + D_{11} w_g + \begin{bmatrix} 0 & 0 & (\mathbf{D}T d_h)^T \end{bmatrix}^T, \\ y_s = C_2 x_g + D_{21} w_g + \mathbf{D}T d_h + d_s, \end{cases} \quad (14)$$

$$w_g = \Delta z_g = \text{diag}(\Delta_c, \Delta_h, \Delta_s) z_g, \quad \sigma_{\max}(\Delta) \leq 1$$

となる。ただし、 $A, \dots, D_{21}$  はつぎのように定義される。

$$A = \begin{bmatrix} A_t & 0 \\ B_{c2} & A_p \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ B_{c1} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} B_t \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} D_{c12} & 0 \\ 0 & D_{h12} C_p \\ 0 & \mathbf{D}T D_{h22} C_p \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ (\mathbf{D}T D_{h22} C_p)^T \end{bmatrix}^T, \\ D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{D}T D_{h21} & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ (\mathbf{D}T D_{h21})^T \\ D_{s21}^T \end{bmatrix}^T.$$

従来の制御方法では、画像座標  $y_s$  に最小二乗法などの非線形な計算処理を施し、ホバークラフト模型の位置および姿勢  $y_p$  を求めたのちこの情報をコントローラの入力とする制御系設計が多く行なわれてきている。このとき、非線形な計算処理を介するため、 $y_p$  の計算精度向上は簡単ではなかった。

一方、上述したように画像センサー部分を不確かさを考慮した数式でのモデル化を行なうことで、画像座標  $y_s$  を直接コントローラの入力にできる制御系設計が可能となる。ホバークラフト模型の位置および姿勢  $y_p$  を直接計算する必要がないため、この計算精度の誤差による制御制御性能劣化の軽減が期待できる。コントローラ設計ののち、シミュレーションおよび実機検証で提案方法の有効性を検証する。

なお、コントローラ設計時には、(14) 式での既知の外生入力  $\mathbf{D}T d_h$  および  $d_s$  を取り除いて一般化プラントを考えることに注意していただきたい。

## 5. 制御系の解析と設計

本章では、第 3 章で述べた設計仕様のうち、長いサンプリング時間および設計時の計算量の軽減に対処する設計方法について述べる。

本論文で扱うホバークラフトの模型システムは、

- (1) カメラの画像処理に時間を要するため、制御系のサンプリング時間が長い。
- (2) 動特性が複雑であるため、数学モデルの次数が大きい。
- (3) ホバークラフトの模型および数学モデル  $P_c$  に積分特性をもつ。

という特徴を有する。このため、制御系設計を以下の方針で行なう。

- (1) 閉ループ系の固有値の絶対値を小さく制約することで、制御入力および制御出力の急激な動きを適切に抑え、サンプリング時間が長い制御を実装可能にする。
- (2) 固有値制約の安定化のみで制御性能を考慮し、制御性能の最適化による設計時の計算量を抑える。
- (3) ホバークラフトの積分特性を利用することで、追従性能を達成する。

以上より、ロバスト性を考慮した固有値制約安定化の制御系設計を行なうことにより実装可能なコントローラ設計を行なう。

### 5.1 システムの固有値制約解析条件

本節では、システムの固有値制約解析条件を理論的に特徴づける．線形時不変 (LTI) システム

$$\dot{x} = Ax, \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (15)$$

を考える．つぎの命題は、システム (15) の固有値の一般的な存在領域を特徴づける基礎を与える．

[命題 1] <sup>2)</sup> 実行列  $A, \mathcal{L}, \mathcal{N}$  が与えられているとする． $A$  のすべての固有値が集合

$$\Omega := \{ p \in \mathbb{C} \mid \mathcal{L} + p\mathcal{N} + \bar{p}\mathcal{N}^T < 0 \} \quad (16)$$

に属するための必要十分条件は、

$$\mathcal{L} \otimes Q + \mathcal{N} \otimes (AQ) + \mathcal{N}^T \otimes (QA^T) < 0 \quad (17)$$

を満たす実行列  $Q = Q^T > 0$  が存在することである． ■

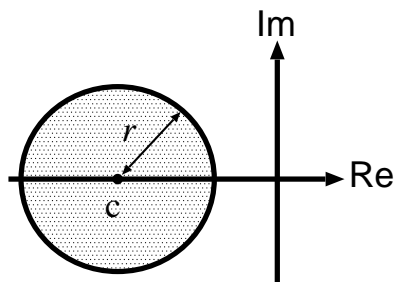


Fig. 9 Domain of eigenvalues

以下では、固有値の集合を Fig. 9 に示す斜線の領域に限定する．このとき、命題 1 を用いてつぎの系が得られる．

[系 1] 実行列  $A$  と実数スカラー  $c$  および  $r$  が与えられているとする． $A$  のすべての固有値が Fig. 9 に示す中心  $c$ 、半径  $r$  の円領域

$$\Lambda := \left\{ \lambda \in \mathbb{C} \mid \begin{pmatrix} \bar{\lambda} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & c \\ c & c^2 - r^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ 1 \end{pmatrix} > 0 \right\} \quad (18)$$

に属するための必要十分条件は、

$$\begin{bmatrix} -r^2Q & (A - cI)^T Q \\ Q(A - cI) & -Q \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

を満たす実行列  $Q = Q^T$  が存在することである． ■

### 5.2 システムのロバスト固有値制約解析条件

本節では、系 1 の解析条件を Fig. 10 の不確かさを有するフィードバック系で表されるシステムの場合に拡張する．すなわち、この不確かさを有するシステムの固有値が Fig. 9 に示す円領域に存在するための解析条件を導く．

$\mathcal{H}(s)$  は線形時不変 (LTI) システムで、

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w_g \end{bmatrix} \quad (20)$$

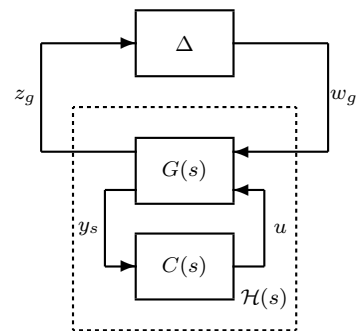


Fig. 10 Uncertain feedback system

により与えられ、 $x \in \mathbb{R}^n$ 、 $w_g \in \mathbb{R}^m$ 、 $z_g \in \mathbb{R}^m$  である．また、 $\Delta \in \mathbb{C}^{m \times m}$  は、複素行列のサブセット

$$\Delta := \left\{ \Delta = \text{diag}(\delta_1 I_{j_1}, \dots, \delta_s I_{j_s}, \Delta_1, \dots, \Delta_k) : \right. \\ \left. \delta_i \in \mathbb{C}, \Delta_i \in \mathbb{C}^{j_{s+i} \times j_{s+i}}, \sigma_{\max}(\Delta) \leq 1 \right\}, \quad (21)$$

$$m := \sum_{i=1}^{s+k} j_i$$

に属する変動行列であり、

$$w_g = \Delta z_g$$

である．

本論文では、不確かさの対処方法として定数スケーリング行列に基づき、ロバスト性を考慮した固有値制約解析条件をつぎのように理論的に特徴づける．

[補題 1]  $\mathcal{H}(s) := C(sI - A)^{-1}B + D$  と (21) 式で定義されるサブセット  $\Delta$  に属する変動行列  $\Delta$  のフィードバック結合を考える．実数スカラー  $c$  および  $r$  が与えられているとする． $S$  を  $\Delta$  と可換なスケーリング行列の集合

$$S := \left\{ \text{diag}(D_1, \dots, D_s, d_1 I_{j_{s+1}}, \dots, d_k I_{j_{s+k}}) : \right. \\ \left. D_i \in \mathbb{R}^{j_i \times j_i}, d_i \in \mathbb{R}, D_i > 0, d_i > 0 \right\} \quad (22)$$

と定義する．このとき、システムのすべての固有値が Fig. 9 に示す中心  $c$ 、半径  $r$  の円領域 (18) に属するための十分条件は、

$$\begin{bmatrix} -r^2Q & (A - cI)^T Q & 0 \\ Q(A - cI) & -Q & QB \\ 0 & B^T Q & -V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c^T & 0 & D^T \end{bmatrix}^T V \begin{bmatrix} c & 0 & D \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

を満たす実行列  $Q = Q^T$  と行列  $V \in S$  が存在することである．

(証明) システムは、 $\mathcal{A}_\Delta := A + B\Delta(I - D\Delta)^{-1}C$ 、 $\dot{x} = \mathcal{A}_\Delta x$  のように記述される．したがって、条件  $-r^2Q + (A_\Delta - cI)^T Q(A_\Delta - cI) < 0$  に一般化された Finsler の定理<sup>3)</sup> および  $D$  スケーリング行列を用いることで本補題の条件が

得られる。

### 5.3 制御系のロバスト固有値制約設計条件

本節では、つぎの設計問題を考える。

(P) 補題 1 の解析条件に基づいて、動的出力フィードバックコントローラにより達成可能なロバスト固有値制約条件を特徴づけよ。

まず、より具体的な問題設定を行ない解を与える。さらに、この解を用いてホバークラフトの制御系設計を行ない、シミュレーションと実験により設計方法の有効性を示す。

### 5.4 問題設定

つぎの状態空間実現で与えられる LTI システムを考える。

$$\begin{cases} \dot{x}_g \\ z_g \\ y_s \end{cases} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ w_g \\ u \end{bmatrix}, \quad (24) \\ w_g = \Delta z_g$$

ただし、 $x_g \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^p$ ,  $y_s \in \mathbb{R}^q$  は、それぞれ状態変数、制御入力、観測出力である。また、 $z_g \in \mathbb{R}^m$ ,  $w_g \in \mathbb{R}^m$  は、(21) 式で定義されるサブセット  $\Delta$  に属する変動行列  $\Delta$  への入出力信号である。この不確かさを有する制御対象に対して、問題 (P) では、状態変数  $x_c(t) \in \mathbb{R}^{n_c}$  を持つ出力フィードバックコントローラ

$$u = C(s)y_s := \left( \begin{array}{c|c} A_c & B_c \\ \hline C_c & D_c \end{array} \right) y_s \quad (25)$$

を考え、閉ループ系の状態変数を  $x(t) := [x'_g(t) \ x'_c(t)]' \in \mathbb{R}^n$  ( $n := n_p + n_c$ ) とする。ここで、 $C(s)$  は伝達関数である。この場合、閉ループ系は Fig. 10 により表される。このとき、ロバスト固有値制約条件を特徴づける基礎として補題 1 を用いると、問題 (P) はつぎのように記述できる。

問題 (P) (21) 式で定義される不確かさを有する制御対象 (24) が与えられているとする。ある正定行列  $Q > 0$  と  $0 < W \in S$  に対して補題 1 の条件 (23) を満たすコントローラ (25) が存在するための必要十分条件を求めよ。ここで、 $A, B, C, D$  は (20) 式を用いて得られる閉ループ系の状態方程式表現である。

まず、問題 (P) の解は以下のとおりである。

《定理 1》 実数スカラー  $c, 0 < r$  および、(21) 式で定義されるサブセット  $\Delta$  に属する変動行列  $\Delta$  の不確かさを有する制御対象 (24) が与えられているとする。また、(22) 式により  $\Delta$  と可換なスケーリング行列の集合  $S$  を定義する。このとき、補題 1 の条件 (23) を満たす必要十分条件は、

$$\text{He} \begin{bmatrix} r^2 H_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r^2 H_{21} & r^2 H_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{31} & H_{32} & H_{11} & 0 & H_{35} & 0 \\ H_{41} & H_{42} & H_{21} & H_{22} & H_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{55} & 0 \\ H_{61} & H_{62} & 0 & 0 & H_{65} & H_{66} \end{bmatrix} < 0, \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} > 0, \quad \begin{bmatrix} V & I \\ I & W \end{bmatrix} \geq 0, \quad \text{rank} \left( \begin{bmatrix} V & I \\ I & W \end{bmatrix} \right) = m \quad (27)$$

$$\begin{aligned} H_{11} &:= -X/2, & H_{21} &:= -I, \\ H_{22} &:= -Y/2, & H_{31} &:= X(A - cI) + FC_2, \\ H_{32} &:= N - cI, & H_{35} &:= XB_1 + FD_{21}, \\ H_{41} &:= (A - cI) + B_2LC_2, & H_{42} &:= (A - cI)Y + B_2K, \\ H_{45} &:= B_1 + B_2LD_{21}, & H_{55} &:= -V/2, \\ H_{61} &:= C_1 + D_{12}LC_2, & H_{62} &:= C_1Y + D_{12}K, \\ H_{65} &:= D_{11} + D_{12}LD_{21}, & H_{66} &:= -W/2 \end{aligned}$$

を満たす対称行列  $X, Y \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , 行列  $F \in \mathbb{R}^{n \times q}$ ,  $K \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $L \in \mathbb{R}^{p \times q}$ ,  $N \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $V, W \in S$  が存在することである。また、この条件が成立するとき、ロバスト固有値制約条件を達成する出力フィードバックコントローラ (25) が存在する。

(証明) Schur complement を用いることにより、補題 1 の (23) 式と等価な

$$\begin{bmatrix} -r^2 Q & (A - cI)^T Q & 0 & C^T \\ Q(A - cI) & -Q & QB & 0 \\ 0 & B^T Q & -V & D^T \\ C & 0 & D & -W \end{bmatrix} < 0, \quad (28) \\ V = W^{-1}$$

に線形変数変換<sup>5)</sup>を適用することにより、(26) 式を得る。なお、(27) 式の

$$\begin{bmatrix} V & I \\ I & W \end{bmatrix} \geq 0, \quad \text{rank} \left( \begin{bmatrix} V & I \\ I & W \end{bmatrix} \right) = m$$

と (28) 式は等価である。また同様に、補題 1 の  $Q > 0$  に線形変数変換を適用することにより、(27) 式の第 1 式を得る。

本節の最後に、コントローラの設計方法を手短かに述べる。

設計方法:

1. rank 条件付き LMI 条件を制約とするつぎの問題を線形化法<sup>6)</sup>を用いて解く。

Find  $X, Y, F, K, L, N, V, W$  subject to (26), (27).

2. コントローラの伝達関数  $C(s)$  の状態空間行列 (25) をつぎのように計算する。

$$\begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - Y^{-1} & XB_2 \\ 0 & I \end{bmatrix}^{-1}$$



$$\times \left( \begin{bmatrix} N & F \\ K & L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} XAY & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} -Y & 0 \\ C_2Y & I \end{bmatrix}^{-1}$$

### 5.5 ホバークラフトの制御系設計

ここでは、ホバークラフト模型および設計仕様の各物理パラメータの値を Table 1

Table 1 Parameters and design specification of hovercraft

項目	ノミナル値	不確かさ
$M$	5[kg]	+10[%] 以内
$I_g$	0.53[kg · m <sup>2</sup> ]	+10[%] 以内
$\phi$	0[deg]	±6[deg] 以内
$r_o$	0.16[m]	±0[m]
$r_g, \theta_g$	0[m], 0[deg]	中心 $O$ , 半径 0.01[m] の円内
$\mathcal{P}_i (i = 1, 2)$	同定値	各要素の値の ±1[%] 以内
項目	設計仕様	
固有値	複素平面で中心 (-3, 0), 半径 2.95 の円内	

のように選ぶ．このとき、ホバークラフト模型の一般化プラント(14)に対して、定理 1 に基づく上記の設計方法により、MATLAB<sup>8)</sup>を用いてコントローラ(25)を設計する．

## 6. シミュレーション

まず、ホバークラフト模型の一般化プラント(14)と前章で設計されたコントローラ(25)の閉ループ系 (Fig. 10 参照) の  $\Delta = 0$  の場合の固有値の計算を行なう．その結果を Fig. 11 に示す．Fig. 11 は複素平面であり、\* 印は閉ル

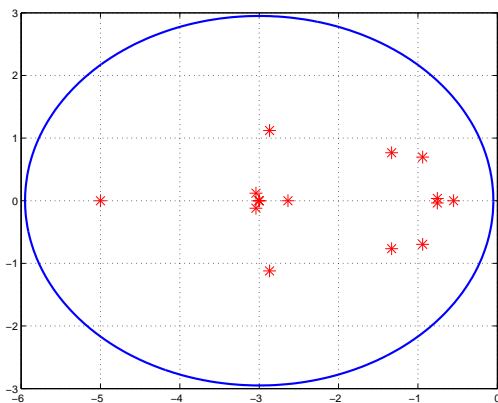


Fig. 11 Eigenvalues and design specification of closed-loop system with linear nominal model of hovercraft

プ系の固有値、円は Table 1 の設計仕様の円領域である．すべての固有値が設計仕様の円領域内に含まれ、定理 1 の有効性がわかる．

つぎに、ノミナル値と異なるホバークラフト模型の各物理パラメータの値を Table 2 に示す．

このとき、ホバークラフト模型の非線形微分方程式による数式モデルと上記の設計されたコントローラ(25)の閉ループ

Table 2 Perturbed parameters of hovercraft in simulation

質量 $M$	: 5.5[kg]
重心の位置 $(r_g, \theta_g)$	: (0.005[m], 0[deg])
透視投影行列 $\mathcal{P}_i (i = 1, 2)$	: 要素の一部の値を 1[%] 変更

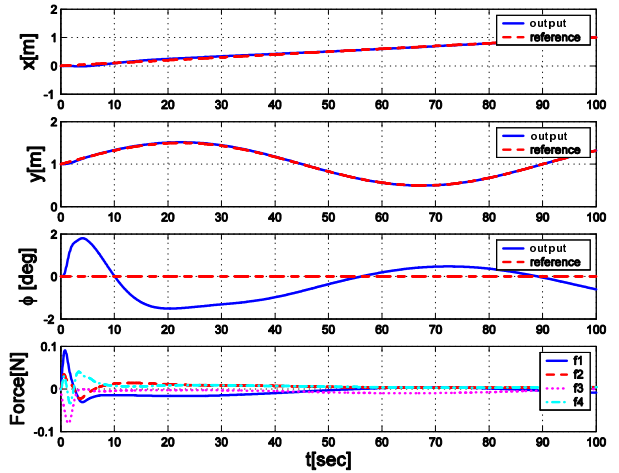


Fig. 12 Time responses of closed-loop system with nonlinear perturbed model of hovercraft in simulation

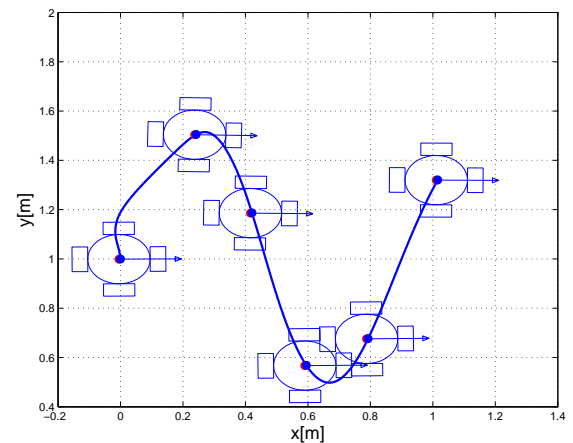


Fig. 13 Position and attitude of hovercraft motion with its nonlinear perturbed model in simulation

系の時間応答のシミュレーションを行なう．その結果を Fig. 12 と Fig. 13 に示す．Fig. 12 の  $x$  は 0[m] から 1[m] へのランプ状の、 $y$  は 0.5[m] から 1.5[m] への sin 波状の、 $\phi$  は 0[deg] の定値状の時間応答であり、既知の  $(x_{21}, y_{21})$ 、 $(x_{22}, y_{22})$ 、 $Y_1, Y_2$  および (7)、(10)、(12) 式を用いて画像座標に変換された参照入力に対してのホバークラフト模型の出力応答  $y_p$ 、なお、 $f_1 \sim f_4$  はこの制御時の各スラストの出力応答、すなわち、ホバークラフト模型への制御入力  $f$  の応答である．また、Fig. 13 はこのときのホバークラフト模型の移動の様子、すなわち、実線が軌道、点がある時刻での位置、矢印がその時刻での姿勢の向きを示している．このとき、シミュレーションでの離散化のサンプリング時間は  $T_s = 0.067[\text{sec}]$  である．この比較的長いサンプリング時間にも関わらず、Fig. 12 と Fig. 13 より、閉ループ系の位置

姿勢の良好な追従制御性能が達成されており、ホバークラフト模型に対しての提案制御系設計方法が妥当であることがわかる。

## 7. 実験

前章の良好なシミュレーション結果より、Fig. 1 の実験装置のホバークラフトの 2 次元平面模型に設計されたコントローラを実装し、位置と姿勢の制御実験を同様に行なう。ただし、ここでは姿勢を一定に保ちつつ直線の軌道に追従させる実験である。その結果を Fig. 14 に示す。

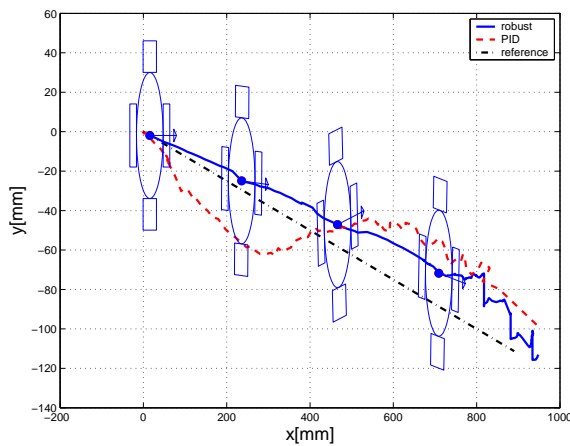


Fig. 14 Position and attitude of hovercraft motion in experiment

Fig. 14 の一点鎖線は参照軌道を、実線と点と矢印は本論文でのコントローラによるホバークラフト模型の軌道と位置と姿勢の向きを、破線は最小二乗法などの従来方法により画像座標  $y_s$  から算出された模型出力  $y_p$  を入力とする調整された PID コントローラによるホバークラフト模型の位置の軌道を示している。参照軌道へのホバークラフト模型の追従は、過渡応答時にやや偏差が見られるが最終的な目標位置に到達できており、良く追従できていることがわかる。これは、過渡状態においてスラスト推力が大きくなりカメラの振動が激しくなることや重心が変化するため、移動し始めの過渡状態において位置偏差が大きく、定常状態になり最終の目標位置へ近づくとつれて位置偏差が小さくなっていくものと考えられる。一方 PID 制御の場合、提案コントローラと比較して、過度および定常状態そして最終目標位置において位置偏差が大きく残っていることがわかる。この比較により、ホバークラフト模型の不確かさを考慮する制御系設計方法は良い効果を示すといえる。したがって、本論文での提案方法である「画像座標」および「ロバスト固有値制約コントローラ」に基づく制御方法の有効性が、制御系のサンプリング時間が長く不確かさ有する非線形系であるホバークラフト模型のシミュレーションおよび実機において実証されたといえる。

(注意 2) 実機のロバスト制御系設計では、制御性能に大

きく影響する不確かさを特定し、これ以外の不確かさを無視して設計を行なうことが一般的である。しかしながら、入出力数が多い本論文のようなホバークラフトおよび画像センサーの制御対象の場合、この特定の作業は困難である。この困難への対処として、本論文では制御対象の数式モデルを物理的に導出し、この物理パラメータにできるだけ不確かさを正確に考慮して、どの程度の制御性能が達成可能かというアプローチをとっている。このときの設計のチューニングは、制御性能を決定する閉ループ系の固有値の存在領域のみを試行錯誤的に決定することであるが、これは設計の方向性が定まったシステムティックな方法といえる。以上の結果、設計されたコントローラは十分な制御性能を達成し、本論文での提案設計方法の有効性を示している。

(注意 3) 本論文での提案設計方法の有効性を実機検証するには、ホバークラフトを広範囲に移動させる制御実験が望ましい。この実験は、実験環境構築に要する時間と費用の問題から今回は実施されていない。しかしながら、本論文の制御実験により、ホバークラフトの移動範囲が制限されているものの、シミュレーションと同様の制御性能が確認されており、提案設計方法の有効性が示されている。

## 8. おわりに

本論文では、各種機器、物資を搬送するためのホバークラフト型全方向移動体を提案し、その実現のための基礎として自作した 2 次元平面模型の基礎的な運動を実現する画像座標およびロバスト制御に基づく制御系設計方法を提案した。

ホバークラフト模型の制御系設計における課題を、閉ループ系のロバスト安定性、長いサンプリング時間、ローゲインの出力フィードバック制御、重心の変化およびカメラ画像の揺れに整理した。これらの課題を解決するために、画像座標に基づくロバスト固有値制約制御系設計を導入し、その基礎となる解析条件を LMI 条件として、この解析条件に基づく出力フィードバック制御系設計条件を rank 条件付き LMI 条件として導出した。この設計条件を用いて、固有値の存在範囲を適切に原点付近へ制約したコントローラの設計を行ない課題に対処した。そして、シミュレーションおよび実験によりその有効性を実証した。なお、これまでに調整された PID コントローラによる位置姿勢制御と比較し、提案方法は位置偏差を低減でき有効である知見を得た。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（若手研究 (B) No.16760342）による支援を受けて行なわれています。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 柳, 渡辺, 旭: ロバスト制御理論に基づく組み立て式宇宙機の位置・姿勢制御, 計測自動制御学会第 3 回 Dynamical System Theory シンポジウム資料, 231/236 (2000)
- 2) 杉江, 岩崎: システム制御情報学会システム制御情報チュートリアル講座 '99 LMI によるロバスト制御系の解析と設計 (1999)
- 3) T.Iwasaki and G.Shibata: LPV system analysis via quadratic separator for uncertain implicit systems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **46**-8, 1195/1208 (2001)
- 4) 出口光一朗: ロボットビジョンの基礎, コロナ社 (2000)

- 5) I. Masubuchi, A. Ohara and N. Suda: LMI-based controller synthesis: a unified formulations and solution, *Int. J. Robust and Nonlinear Contr.*, 669/686 (1994)
- 6) L. El Ghaoui, F. Oustry, and M. AitRami.: An LMI-based linearization algorithm for static output-feedback and related problems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1171/1176 (1997)
- 7) 河合, 東, 藤田: マニプレータダイナミクスを考慮したオブザーバ型動的視覚フィードバック制御, システム制御情報学会論文誌, 17-1, 39/47 (2004)
- 8) P. Gahinet, A. Nemirovskii, A. J. Laub and M. Chilali : LMI control toolbox, *The MathWorks Inc.* (1994)

.....

[ 著 者 紹 介 ]

木 山 健 (正会員)



2001年東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了(制御工学専攻)。東京大学大学院情報理工学系研究科特任研究員,大阪大学大学院理工学研究科研究員,同研究科特任教員,同研究科助手,同研究科特任助手などを経て,2006年同研究科招へい研究員。ロバスト制御を中心に研究に従事。2007年度システム制御情報学会学会賞論文賞受賞。システム制御情報学会などの会員。博士(工学)。

塩 田 真 吾



2004年3月大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程終了。同年4月三菱重工業(株)入社,現在に至る。

渡 辺 亮 (正会員)



1989年慶応義塾大学大学院修士課程修了。95年早稲田大学大学院博士課程修了。89年石川島播磨重工業(株)入社,98年1月大阪大学助手,同年10月同大学講師,2002年4月早稲田大学助教授(電気・情報生命工学科),現在に至る。ロバスト制御,制御理論応用などの研究に従事。97年度本会論文賞受賞。システム制御情報学会,IEEEなどの会員。博士(工学)。

.....