解 説

水中移動体の制御

Control of an Underwater Vehicle

池 田 貴 幸* *東京工業大学大学院理工学研究科

Takayuki Ikeda* *Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. は じ め に

近年、海や湖の環境調査のために、様々な潜水艦や海洋ロボット（以下では総称して水中移動体と呼ぶ）の開発が行われている [1]。このような水中移動体の中で、スクリューや舵などのアクチュエータを極力少なくしたもの、例えば、三つのスクリューを配置しただけのもの [2] が開発されている。このような水中移動体の特徴として、構造が単純なので製作やメンテナンスが容易であることや安価で導入しやすいことなどが挙げられる。また、このような水中移動体を複数台で協調させることができれば、1 台の高価で高機能な水中移動体よりも高度な作業をすばやく完了できる可能性がある（図 1：イメージ図）。しかしながら、このような水中移動体は制御されるべき一般化座標数（位置・姿勢の自由度 6）より操作できる制御入力の数が少ない劣駆動系と呼ばれるシステムなので、ノンホロノミック制御と呼ばれる手法を利用しなければならないことが知られている [3]。そのため、このような水中移動体を用いて将来的に様々なミッションを遂行するためには、ハードウェアの設計よりもソフトウェアである制御系の設計が重要性を増してくる。

本稿では、水中移動体のモデルと水中移動体の基本的な制御問題である「位置・姿勢制御」「追従制御・編隊制御」を説明するとともに、これらに関する我々の取り組み [9] [10] について紹介する。

2. 水中移動体のモデル

本章では、図 2 のような三次元空間内を移動する一般的な水中移動体のモデルを考える。位置と姿勢を定義するために基準座標系 Σ と移動座標系 Σ' をそれぞれ図 2 のように定義する。水中移動体には重力、浮力、慣性力、粘性力などの力が作用し、その運動を厳密に数式モデル化しようとするとは極めて複雑なモデルになる。しかし、

図 1 水中移動体のミッション（イメージ図）

- 浮力と重力は釣り合うように構造設計されている
- 加減速は十分小さい
- 船体は粘性抵抗が少ない流線型をしている

などを仮定すると、重力・浮力・慣性力・粘性力は相殺あるいは無視できる。そのため、基本的な運動はスクリューや舵などの制御入力のみが作用すると考えることができ、水中移動体は以下の説明のように簡単な運動学モデルで近似できる。

まず、水中移動体の位置 $p := [p_x, p_y, p_z]^T$ の時間微分と相対速度 $v' := [v_{x'}, v_{y'}, v_{z'}]^T$ の関係は

$$\dot{p} = Rv' \quad (1)$$

と表現できる。ただし、 R は回転行列である。また、姿勢の表現として Z-Y-X オイラー角表現を採用するとオイラー角 $\eta := [\gamma, \beta, \alpha]^T$ の時間微分と相対角速度 $\omega' := [\omega_{x'}, \omega_{y'}, \omega_{z'}]^T$ の関係は

$$\dot{\eta} = T^{-1}\omega' \quad (2)$$

と表現できる。ただし、

$$T := \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \beta \\ 0 & \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

である。

原稿受付 2004 年 4 月 30 日

キーワード：Underwater Vehicle, Nonholonomic Control

*〒152-0033 目黒区大岡山 2-12-1

*Meguro-ku, Tokyo

図2 水中移動体

図3 三つの固定スラスタをもつ水中移動体

v', ω' は水中移動体の実際の制御入力 u と関係があり、スクリューや舵の配置や数によってその関係が決まる。次に、図3のような水中移動体の場合についての v', ω' と制御入力 u の関係について説明する。この水中移動体の駆動方式は三井造船製の RTV に採用されている方式で、三つの固定スラスタを船体の進行軸と平行に 120 度ずつ角度をなすように配置されている単純な構造をしている [2]。特徴として宙返りや倒立状態ができて機動性が高いことが挙げられる。

図2の移動座標系 Σ' の $y'z'$ 面上の半径 r の円上に 120 度ずつ角度をなすように、 $([0, 0, r]^T, [0, -\frac{\sqrt{3}}{2}r, -\frac{r}{2}]^T, [0, \frac{\sqrt{3}}{2}r, -\frac{r}{2}]^T)$ の位置に) それぞれスクリューの軸が配置されているとする。また、スクリューが方向ベクトル $[-1, 0, 0]^T$ を正方向とするスラスト $u_i \in R (i = 1, 2, 3)$ を発生させることができると仮定する。このとき、スラスタは水中移動体に対して次のような速度 v' 、角速度 ω' が発生させることができる。

$$\begin{bmatrix} v_{x'} \\ v_{y'} \\ v_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{x'} \\ \omega_{y'} \\ \omega_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{r} & \frac{2}{r} & \frac{2}{r} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}r} & -\frac{2}{\sqrt{3}r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式から

$$v_{y'} = 0, \quad v_{z'} = 0, \quad \omega_{x'} = 0 \quad (6)$$

で劣駆動であることが確認でき、式 (1), (2) に代入することによって、この水中移動体のモデル式が導出できる。このモデル式の中には y', z' 方向には移動できないという二つのノンホロミック拘束と回転運動に関して一つのノンホロミック拘束が含まれることが確認できる。例えば、回転運動に関しての拘束を書き出すと

$$\dot{\gamma} - \dot{\alpha} \sin \beta = 0 \quad (7)$$

となる。この拘束は Frobenius の定理 [4] から積分不可能で、 $f(\eta) = 0$ のように $\dot{\eta}$ を含まないホロミック拘束にできないことが示せる。ホロミック拘束にできないということは、 η の三つの状態 α, β, γ のうち二つの状態を決めると残りの状態が決まらないことなので、三つの状態を任意の状態に制御できる可能性があるということを示している。

さて、残りの $v_{x'}, \omega_{y'}, \omega_{z'}$ とスラスタ入力 u_i の関係は

$$\begin{bmatrix} v_{x'} \\ \omega_{y'} \\ \omega_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -\frac{1}{r} & \frac{2}{r} & \frac{2}{r} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}r} & -\frac{2}{\sqrt{3}r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表現することができる。変換行列は正則であるので $v_{x'}, \omega_{y'}, \omega_{z'}$ と u_1, u_2, u_3 は 1 対 1 対応している。したがって制御問題で $v_{x'}, \omega_{y'}, \omega_{z'}$ が直接制御できるとしてもよく、以下の説明では、 $v_{x'}, \omega_{y'}, \omega_{z'}$ が直接制御できると仮定して説明をしていく。

以上で図3の場合のモデルについて説明したが、実際の水中移動体においては、 $y'z'$ 面上の円周に接するようにスラスタを 1 基追加して $\omega_{x'}$ を制御できるようにしたものが多い。そこで図3のタイプのものを [Type I]、スラスタを 1 基追加したタイプを [Type II] と呼ぶこととし、以降の章では制御の説明を行う。

3. 位置・姿勢制御

水中移動体の位置・姿勢制御は、制御入力 $v_{x'}, \omega_{y'}, \omega_{z'}$ (Type II の場合は $\omega_{x'}$ も) を使って位置 p_x, p_y, p_z 、姿勢

α, β, γ の六つの状態をすべてゼロにすることである。すなわち水中移動体の移動座標系 Σ' を空間に固定した基準座標系 Σ に一致するように制御することである。前章では水中移動体はノンホロノミック拘束を含むシステム（ノンホロノミック系）であることを説明した。このノンホロノミック系の制御系設計の難しさとして、

- 線形近似したシステムが不可制御であること
- 滑らかな連続状態フィードバックで制御できないことが知られている [5]。このことは、古典制御理論や現代制御理論の制御手法（例えばPID 制御や $u = Fx$ の状態フィードバック）だけで太刀打ちできないことを示しており、時変のフィードバック則や不連続フィードバックのクラスの制御則を設計しなければならない。さらに厄介なのは、水中移動体のモデルや採用した制御則に割り算や逆行列が含まれる場合、ゼロ割りや行列が非正則となる特異状態が存在する可能性があり、制御則を適用する場合には十分に注意する必要がある。特異状態は原因別に

(a) 姿勢表現による特異状態

(b) Chained Form などの標準系への座標変換・入力変換により特異状態

(c) フィードバック制御を行うことにより生じる特異状態に分類される。(a) について補則すると、式 (3) より $\det T = \cos \beta$ であるので、 $\cos \beta = 0$ 、すなわち、 $\beta = \frac{\pi}{2} \pm n\pi$ ($n = 0, 1, \dots$) のとき T は非正則となる。このとき η と ω' は一意に定まらず、特異状態となる。そのため、水中移動体に宙返りをさせたい場合は、姿勢表現として特異状態が生じないオイラーパラメータを使用しなければならないことが分かる。

このような困難な問題にかかわらず、水中移動体 [Type II] の位置・姿勢制御に関する研究として様々な研究がすでに行われている [6]~[8]。我々もこれまでに、可変拘束制御を用いたノンホロノミックシステムの制御方法を提案し、水中移動体 [Type II] の位置・姿勢制御に応用してきた [9]。これらの方法には一長一短があり、収束の速さや特異状態などに注意をしてどれを適用するか決定する必要がある。

参考のため、我々の可変拘束制御を用いて水中移動体 [Type II] の位置・姿勢制御のシミュレーション結果を図 4, 5 に示す。この制御方法はモデルの姿勢表現としてオイラーパラメータ e_i ($i = 1, 2, 3, 4$) を用いたもので、三つの制御則を切り替える不連続フィードバックの一方法である。この手法は、特異状態に陥らず大域的に状態をゼロに収束できるが、外乱に弱いことが分かっている。

なお、水中移動体 [Type I] の位置・姿勢制御に関する研究については、私の知る限りでは、行われていない。しかし、可制御であることを示すことができるので、将来、何らかの制御手法が提案されると思われる。

図 4 Response of the underwater vehicle

図 5 Motion of the underwater vehicle

4. 追従制御と編隊制御

水中移動体の追従制御とは、図 6 の水中移動体 Σ'_1 の先

図6 2台の水中移動体の追従制御・編隊制御

図7 実験の様子

端 P_0 を滑らかな軌道 $p(t)$ に収束させる制御のことである。軌道 $p(t)$ がすべての時刻で 0 ではなく、先端 P_0 が Σ' の原点になければ、この制御は入出力フィードバック線形化や非干渉制御を用いて簡単に実現できる。また、制御されていない状態である y', z' の回転運動は安定であることが分かっている。水中移動体 [Type II] の場合は $\omega_{x'}$ も制御できるので、すべての状態が安定とすることができる（ちなみに [Type I] の水中移動体の場合は、 x' の回転運動は安定でなく徐々にずれていく傾向があり、この問題は今後の課題である）。

水中移動体の編隊制御とは、複数の水中移動体の相対位置を仮想的なジョイントや仮想バネで結合した群を構成する制御で、図6は2台の水中移動体を P_1, P_2 の位置で球ジョイントの拘束で結合したものを例として示している。この制御も入出力フィードバック線形化や非干渉制御を用いて簡単に実現できる。

図7は文献[10]で提案した方法を用いて図6の編隊制御を行ったときの実験の様子である。そのほかに、(1) 3台の横一列の編隊制御、(2) 5台の縦一列の編隊制御、(3) 正4面体の編隊制御などもシミュレーションにより確認している。

5. おわりに

本稿では、我々のこれまでの成果を織り交ぜながら、水中移動体の制御に関する研究の現状や課題を紹介した。紙面の都合で、障害物回避の制御問題や動作計画問題などの重要な内容を紹介できなかったが、本稿がこれから水中移動体の制御系を設計しようと考えている方々のご参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] 浦環・高川真一：海中ロボット。成山堂書店，1997。
- [2] 山本：“水中テレビロボ（RTV）の新機種”，三井造船技報，1990。
- [3] 美多：非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御論—。昭晃堂，2000。
- [4] A. Isidori: Nonlinear Control Systems (2nd Ed.). Springer, 1989.
- [5] R.W. Brockett: “Asymptotic stability and feedback stabilization,” Differential Geometric Control Theory, pp.181–184, 1983.
- [6] Y. Nakamura and S. Savant: “Nonholonomic Motion Control of an Autonomous Underwater Vehicles,” IROS'91, pp.1254–1259, Osaka, Japan, Nov. 1991.
- [7] O.J. Sordalen, M. Dalsmo and O. Egeland: “An exponential convergent control law for a nonholonomic underwater vehicle,” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, Georgia, 2–7, May pp.790–795, 1993.
- [8] O. Egeland, E. Berglund and O.J. Sordalen: “Exponential Stabilization of a Nonholonomic Underwater Vehicle with Constant Desired Configuration,” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.20–25, 1994.
- [9] 池田・深谷・美多：“可変拘束制御による水中移動体の位置・姿勢制御”，計測自動制御学会論文集，vol.37, no.11, pp.1026–1033, 2001。
- [10] 池田・下田・美多：“ノンホロノミック拘束を持つ水中移動体による編隊制御”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集，2P2-1F-B1, 2003。

池田貴幸 (Takayuki Ikeda)

1972年1月25日生。2001年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士（工学）。現在、東京工業大学大学院理工学研究科助手。1999年計測自動制御学会学術奨励賞，IEEE Transactions on Fuzzy Systems Outstanding Paper Award, May, 2000などを受賞。現在、脚式ロボットの走行制御やノンホロノミック制御に関する研究に従事。計測自動制御学会，IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)