繰り返し学習制御を利用した アームを持つ水中ロボットの本体姿勢補償

○正 坂上 憲光 (東海大)

Attitude control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Using Iterative Learning Control

Norimitsu SAKAGAMI, Tokai Univ.

Abstract: This paper presents a feedforward compensation approach for underwater vehicle manipulator systems (UVMSs) in order to realize precise and fast motion control. Iterative learning control (ILC) is used for controlling an underwater manipulator in this paper. During manipulator motion, thrust forces eliminate reaction moment acting on a vehicle. Experiments were conducted using an underwater vehicle with a 1-degree of freedom (D.O.F) manipulator. In case of non-compensation, the vehicle attitude error was up to 10 deg after a control period. On the other hand, the feedforward compensation approach proposed in this paper could reduce the error down to ± 2.0 deg.

1. はじめに

一人で持ち運び可能な小型水中ロボットは、操縦や運用・メンテナンスの容易さから海・湖沼・河川・ダムなどで広く使われている。著者は、一人で持ち運べるサイズの小型水中ロボットにマニピュレータを搭載することで、水中での作業内容の拡大と効率化を目指している。マニピュレータのサイズが同じとした場合、ロボット全体が小型なほど運搬やメンテナンスも容易になる。ただしその際、マニピュレータ動作時の流体力から生じる本体への影響、浮心・重心の位置関係、操縦装置など考えなければならない問題は増える。その問題の一つの解決法として本研究では、ロボットが浮遊した状態でアームを動かす場合でも、その反力をスラスト推力によってキャンセルし、ロボット姿勢を維持する方法を提案する。

従来の小型水中ロボットのマニピュレータ作業の多くが海底や湖底に着底した状態で行なわれる場合が多いのに対して、本研究では水中ロボットが浮遊した3次元空間中でも水中作業ができるようにする事を目指している。

2. 姿勢補償の概要

本原稿で提案する補償法の概略は次の通りである。まず、水中ロボット (図1) のマニピュレータには繰り返し学習制御 [1] を適用し、その時にロボット本体に加わるトルクを計測しておく。また、あらかじめスラスト推力がロボット本体に加わることで生じるトルクを計測しておく。この2つの関係を利用して、マニピュレータ動作時にロボット本体に加わるトルクをスラスト推力によってキャンセルし、ロボット姿勢の補償を行なう。

図2に以上の流れを示す。まず、水中ロボットをトルクセンサに固定した状態で、マニピュレータにいくつかの典型的な作業時の運動パターン (Motion 1,2,...) を学習させる。この結果、マニピュレータのフィードフォワード制御入力が見られる [2]。このときトルクセンサから、ロボット本体に加わるトルクも計測しておく。これらの情報は計算機の記憶装置に保持しておく (図2の左上)。

続いて、スラスト指令電圧とスラスト推力によってロボット本体に加わるトルクの関係を求める (図2の右上)。

これら2つの関係から、マニピュレータ動作時のロボット本体に加わるトルクをキャンセルするスラスト指令電圧を計算する。この指令電圧をスラストに加えることで水中ロボット本体の姿勢補償を本稿では実現する。

Fig.1: Underwater vehicle manipulator system

3. 実験装置

図1に1自由度アームを持つ水中ロボットを示す。この水中ロボットは内部にPC104 CPU メインボード、DAボード、CNTボードを搭載し、2つのスラストおよび1自由度アームのモータを制御するために用いる。ロボットの空中重量は5[kg]であり、水中では中性浮量を保っている。アームを伸ばした時の全長は約600[mm]であり、全幅は400[mm]である。表1に、アームおよびアームに使用したモータのスペックを示す。

ロボットにはトルクを計測するためにトルクセンサが取り付けられている (このトルクセンサは姿勢補償の実験時には取り外される)。今回の実験では水槽 (1.4×2.8×0.9[m]) を用いる。

4. アームの繰り返し学習制御

まず、繰り返し学習制御によってロボットアームのフィードフォワード制御入力を得る。今回は目標運動パターン $q_d(t)$ の一つとして、運動終了時にアーム先端がロボットの正面まで移動する軌道を選んだ。

$$q_d(t) = 60 \left(\frac{6}{T^5} t^5 - \frac{15}{T^4} t^4 + \frac{10}{T^3} t^3 \right) [deg]$$

Fig.2: This figure shows the schematic of a feedforward compensation approach

Table 1: Specifications of manipulator and actuator

	Link
Link length [m]	0.14
Link diameter [m]	ϕ 0.022
Rated torque [N]	0.03
Rated revolution [rpm]	60
Resolution [Pulse/rev]	300
Reduction ratio	1:297

$$0 \leq t \leq 1.0[s] \quad (1)$$

ここで T は制御の終端時間である。軌道の時間列データは図 3 に示す。アームの初期角度 $q_d(0)$ はロボット本体の前方に真っ直ぐ伸ばした状態であり、時間の経過とともにアームの先端がロボットの正面にまで動作する。

学習制御入力への修正は

$$u_{k+1} = u_k + \Phi \Delta q_k(t) + \Psi \Delta \dot{q}_k(t) \quad (2)$$

によって与えられる。ここで k は試行回数、 u はフィードフォワード入力パターン、 Φ は学習 P ゲイン、 Ψ は学習 I ゲイン、 $\Delta q (= q_d - q)$ は角度誤差である。今回の実験では、アームのモータへの指令電圧をフィードフォワード入力パターン u とし、 $\Phi = 0.035$ 、 $\Psi = 0.0036$ を選んでいる。必要であればいくつかの運動パターンを同様に学習し、フィードフォワード制御入力を得ておく。

アームの角度の誤差ノルムを

$$\frac{1}{T} \int_0^T \Delta q^2(t) dt \quad (3)$$

と定義すると、実験ではこの誤差ノルムが試行回数が増すごとに減少し、学習終了後には 1.0[deg] 以下までになった。学習の結果得られたフィードフォワード制御入力を図 4 に示す。このとき同時に、アームの動作によってロボット本体に加わるトルクも計測し、図 5 に示す結果となった。

Fig.3: Trajectory for the manipulator

Fig.4: Feedforward control input for the manipulator

Fig.5: Moment acting on the vehicle

5. スラスト推力による本体トルクの計測

次にスラストへの指令電圧とスラスト推力によってロボット本体に発生するトルクの間係を求める。同じく図 1 の実験システムを利用する。

今回は、スラストの指令電圧と定常的なスラスト推力の間係を求め、ロボットの浮遊状態での本体姿勢補償に用いる。この結果を図 6 に示す。

今回は定常的なスラスト推力の間係を用いたが、より高精度でより動的な運動に対応するためには、動的なスラスト

Fig.8: Upper pictures show the result of the feedforward compensation approach. Lower pictures show the case of non-compensation.

タモデル（例えば[3]）などに基づく関係を、将来は利用する必要があるだろう。

6. ロボット本体の姿勢補償実験

まず、計測用に取り付けられていたトルクセンサを水中ロボット本体から取り外し、水中ロボットは自由に動くことができる状態で姿勢角の補償実験を行う。

アームは学習制御によって得られたフィードフォワード入力を用いて制御される。同時に、アーム動作からロボット本体に加えられるトルク（図5）をキャンセルできるように、スラスト指令電圧と本体へのトルクの関係（図6）を用いてスラスト指令電圧を計算する（図7）。このスラストへの指令電圧を用いてロボットの姿勢角を補償する。

上記の方法によって水中ロボット本体の姿勢を補償した場合と、姿勢補償を行わなかった場合の結果を図8に載せる。図8の上の写真が本体の姿勢補償を行なった場合であり、図8の下の写真が姿勢補償を行わなかった場合である。

今回の水中ロボットには姿勢角を計測するセンサを搭載できるスペースが無かったため、この姿勢角変化は実験時の動画を画像処理することによって求めた。この結果を図9にプロットする。

図9から、姿勢補償を行なった場合は水中ロボットの姿勢角の誤差は $\pm 2.0[\text{deg}]$ 以下に抑えられている。一方で、姿勢補償を行わなかった場合は、アーム動作終了時にロ

ボット本体の姿勢角の誤差が $10 [\text{deg}]$ までになっている。この結果から、提案する方法によってアーム動作時のロボット本体の姿勢角の補償が行なわれていることがわかる。

7. 今後の課題

今後は、多くの運動パターンや多自由度アームに対しても提案する方法が有効であるか確かめる予定である。

なお、今回の実験では定常的なスラスト推力の特性を用いたため、ロボット本体の姿勢を補償できない場合もある。今後はスラストの動特性も考えた上でのロボット本体の姿勢補償を考えていく。

今回はアームのみに繰り返し学習制御を適用したが、アームおよびロボット本体も含めた全システムとしての繰り返し学習制御の理論と実験も課題である。

Fig.6: Static Moment-Voltage (control input[V]) characteristics

Fig.7: Feedforward control input[V]

Fig.9: Angle Error $\Delta\psi$ [deg]

8. おわりに

本稿では、繰り返し学習制御を利用してアームを持つ水中ロボットの本体姿勢角の補償を試みた。ロボットが浮遊している状態でアームを動かす場合でも、その反力をスラスト推力によってキャンセルし、ロボット姿勢を維持する方法を提案した。

実験結果から、水中ロボット本体の姿勢補償を行なった場合は姿勢角の誤差が2.0[deg]以下に抑えられた。一方で、姿勢補償を行なわなかった場合には、姿勢角の誤差が10[deg]までとなった。以上の結果から、本稿で提案した方法が今回の実験条件では有効に働くことを確認した。

謝辞

本研究は、東海大学 学部等研究教育補助金（2009 年度）の助成を受け実施されたものである。

参考文献

- [1] Arimoto S (1996) Control Theory of Nonlinear Mechanical Systems: A Passivity-based and Circuit-theoretic Approach. Oxford University Press, Chapter 5, pp.157-183
- [2] Sakagami N, Inoue M, Kawamura S (2003) Theoretical and Experimental Studies on Iterative Learning Control for Underwater Robots. Int. Jour. of Offshore and Polar Engineering, vol.13, no.2, pp.120-127
- [3] Thor I. Fossen (1994) Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons Ltd, pp.93-97.