

水中ロボットにおけるフライホイール角運動量制御のための軌道計画手法

金岡 克弥*・黒岩 秀幸*・川村 貞夫*

A Trajectory Planning Method to Control the Angular Momentum of Flywheels in Underwater Robots

Katuya KANAOKA*, Hideyuki KUROIWA* and Sadao KAWAMURA*

This research aims at encapsulated driving of underwater robots. In the first place, we examine a flywheel mechanism to generate the driving torque in the water. By this mechanism, the robot can generate driving torque without using fluidic effect, which is difficult to model. Here, the total angular momentum of the robot and flywheel is not conservative by influence of fluid. This paper proposes a trajectory planning method to make flywheels get a target angular momentum and to use it for a motion control of robots. Then we verify its effect by experiment.

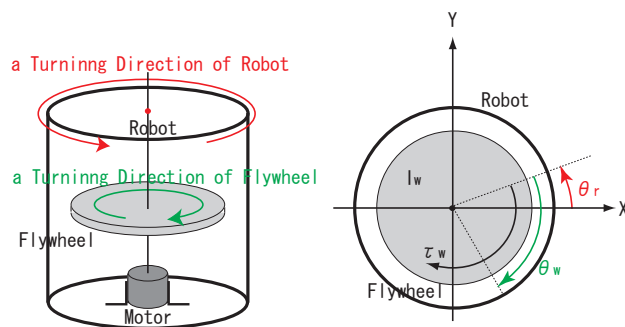


Fig. 1 robot mechanism with a flywheel

1. 緒 言

現在水中ロボットの駆動にはスラスタをはじめ、フィン、タンク注排水方式、バラストの利用など¹⁾様々なものが用いられている。その中で本研究は、水中ロボットの密閉駆動を実現するためロボット内部に設置する駆動系について考え、まずフライホイールを用いた駆動力発生機構を検討する。

本研究で用いる機構を Fig. 1 に示す。これは、ロボットに固定したモータでフライホイールを回転することにより、モータに働く反作用トルクを利用してロボットに回転運動を行わせるものでアクションホイールとも呼ばれおり、人工衛星の姿勢制御²⁾やマニピュレータの反動抑制³⁾にも使用されている。この機構は流体を介さずに直接ロボットに駆動力を与えるので、スラスタと比べて目標駆動力への速応性が高いという利点がある。

* 立命館大学大学院理工学研究科 滋賀県草津市野路東 1 - 1 - 1
* Faculty of Science and Engineering, University of Ritsumeikan, Kusatsu, Shiga

この機構を用いたロボットを水中で使用すると、ロボット本体が受ける流体の影響⁴⁾によりロボットとフライホイールの角運動量が見かけ上保存されず増減するという問題がある。しかし、ロボットを水中環境下で使用する以上、本体への流体の影響を避ける事はできない。そこで逆にこの特徴を利用し、ロボットの運動中にフライホイールに任意の角運動量を確保させ、その角運動量をロボットの他の運動へ用いることを考える。本稿ではこの1手法として、水中ロボットの姿勢とフライホイールの角運動量を制御するための目標軌道計画を提案する。そしてその有効性をシミュレーションにより確認し、考察をおこなう。

2. 目標軌道計画

時刻 t における水中ロボット本体の角運動量を L_r 、フライホイールの角運動量を L_w とすると、両者の関係は以下のようになる。

$$L_r(t) + L_w(t) = -\frac{1}{2}C_m\rho S \int_0^t \dot{\theta}_r |\dot{\theta}_r| dt \quad (1)$$

C_m, ρ, S はそれぞれ、流体抵抗係数、流体の密度、水中ロボットの回転方向の代表面積である。

上式から、水中ではロボットとフライホイールの合計角運動量がロボット本体角速度 $\dot{\theta}_r$ に依存していることがわかる。そこで、この $\dot{\theta}_r$ を制御することでフライホイールの角運動量を制御することを考える。ここでは静止状態 ($L_r(0) = 0$) のロボットが旋回し、ある目標角度 θ_d で静止する運動を考え、その際にフライホイールの角運動量もこちらの定める目標値 L_d に達する $\dot{\theta}_r$ の目標軌道計画を以下に示す。

$$\dot{\theta}_r(t) = A\omega(-\cos\omega t + 1) \quad (2)$$

ただし、

$$A = \frac{\theta_d - \theta_s}{2\pi}, \quad \omega = -\frac{8(L_d - L_s)}{3C_m \rho S (\theta_d - \theta_s) |\theta_d - \theta_s|} \pi \quad (3)$$

であり，目標到達時刻 $t_d = \frac{2\pi}{\omega}$ としている．また θ_s, L_s はそれぞれ，本体初期角度，フライホイール初期角運動量である．

次にこの軌道計画の有効性について，シミュレーションにより確認をおこなう．

3. 目標軌道シミュレーション

式(2)の目標軌道について，シミュレーションによりその有効性を確認する．本シミュレーションでは，ロボットのモデルを Fig. 1 と同じような円柱型とし，フライホイールの回転軸とロボットの重心位置を一致させている．制御対象のダイナミクスを以下に示す．

$$\{M + M_a\} \ddot{q} + c(\dot{q}) + D(\dot{q}) = \tau \quad (4)$$

$$q = \begin{bmatrix} \theta_r \\ \theta_w \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_w \end{bmatrix}, D(\dot{q}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} C_m \rho S |\dot{\theta}_r| \dot{\theta}_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M + M_a = \begin{bmatrix} I_r + \dot{I}_r + I_w & I_w \\ I_w & I_w \end{bmatrix}, c(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ C_w \dot{\theta}_w \end{bmatrix}$$

θ_r, θ_w はロボット本体とフライホイールの回転角度， I_r, I_w, \dot{I}_r はそれぞれロボット本体とフライホイールの慣性モーメント，およびロボット本体に働く付加慣性モーメント， C_w は回転粘性減衰係数， τ_w はモータへの指令トルクである．ここでは2通りのシミュレーションを行い，目標角度 θ_d は両方とも同じ値で目標角運動量 L_d に異なる値を設定した．

$\theta_s = 0.0$ [deg], $\theta_d = 20.0$ [deg], $L_s = 0.0$ [kgm²/s], $L_d = 0.2, 0.5$ [kgm²/s] とし，式(2)の軌道を実現するフィードフォワード入力を与え制御をおこなう．シミュレーション結果として，本体角度，本体角速度，本体角加速度，フライホイールの角運動量の時間変化のグラフを Fig. 2 に示す．

シミュレーション結果より， $L_d = 0.2$ と 0.5 のどちらのパターンも本体角度変化量は同じで，フライホイールの角運動量がそれぞれ異なる値に収束している．このことから式(2)の軌道を用いることでフライホイールに任意の角運動量を確保させることが可能であると考えられる．

4. 結 言

本論文では，水中ロボットの密閉駆動のため，まずフライホイールを用いた駆動力発生機構について述べた．そしてその機構の水中での特徴を活かすことで，本体姿勢とフライホイールの角運動量の両方を制御するための本体角速度の目標軌道を提案し，シミュレーションによる確認をおこなった．

この軌道を用いた角運動量制御は，必要な角運動量を確保しそれを他の運動に使用する以外にも，角運動量が飽和したフライホイールに対して本体角度変化量を少量に設定してこの軌道を用いることにより，スラストなどの補助トルクなしでほぼ静止した状態のまま角運動量を消去するといった使い方もできる．

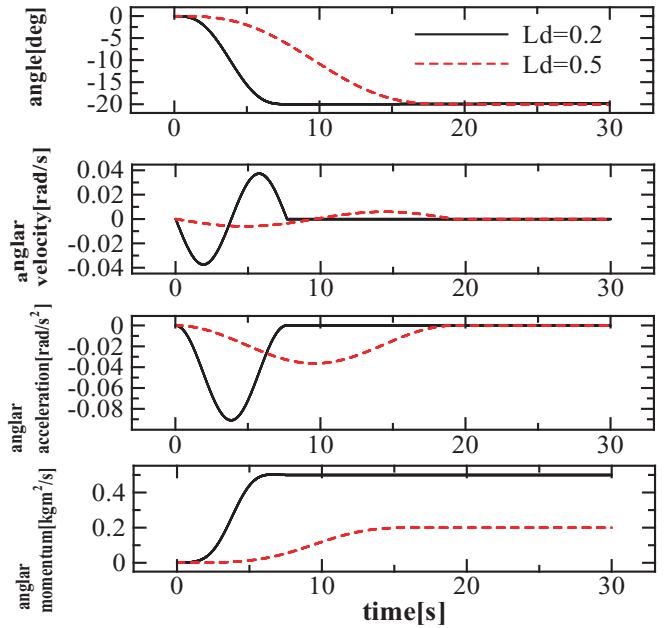


Fig. 2 simulation data

今回提案した軌道計画には，軌道式内に流体パラメータ C_m, ρ, S が含まれるため，この値が正確でないと目標軌道そのものが変化してしまうという問題点がある．そのため，実際にこの軌道計画手法を用いるにはこの流体パラメータを同定する必要がある．

今後軌道内の流体パラメータの値が実際のもものと異なっていたとしても最終的に正しい目標軌道に修正できる手法についても考えていく．

参 考 文 献

- 1) 浦環, 高川真一: 海中ロボット, 成山堂書店, 1997
- 2) 黒河治久”コントロールモーメントジャイロを用いた人工衛星の姿勢制御” システム/制御/情報第 33 巻第 4 号, pp.157-164, 1989
- 3) 小管一弘, 奥田実, 大久保秀明, 福田敏男, 新井史人”水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の制御” 日本機械学会論文集 58 巻 551 号, pp.138-145, 1992-7
- 4) 牧野光雄”流体抵抗と流線型—流体力学的にみた乗り物の形状デザイナー— 大森印刷・清水製本, 1991