

海中構造物上を効率良く移動する多関節型水中ロボット

学生員 白石 耕一郎* 正員 木村 元**

A Multi-joint Underwater Robot that can Move Efficiently on Underwater Structures
by Koichiro Shiraishi, Student Hajime Kimura, Member

Key Words: Underwater Structures, Multi-joint Underwater Robot, Fluid Drag, Regenerating Brake, Energy Consumption

1. 緒言

海中構造物の観測や保守点検のために様々な水中ロボット¹⁾が利用されている。既存の水中ロボットは、通信やエネルギー供給のためのケーブルで繋がれているため、作業範囲が大きく制限されてしまう。この問題を解決するためにケーブルを無くし、自律的に任務を行うことが可能な自律型水中ロボットが開発されている。しかし、任務途中でのエネルギー供給が困難であるため、長時間のミッションを行うことが可能なエネルギー消費の小さい水中ロボットが必要とされている。

そこで、著者らはエネルギー消費をできる限り抑えることが可能な多関節型水中ロボットの開発を目指している。このロボットは、本体が多関節構造をしており、本体の両端に構造物を掴むことが可能なエフェクタを搭載している。このエフェクタを用いて構造物を掴んで放すという動作を交互に繰り返すことで移動する。既存の水中ロボットの多くはスラスタを推進器として用いているが、一様流中での移動や定点保持を行う場合に、常にスラスタを稼働させ続ける必要があるため、多大なエネルギーを消費してしまう。しかし、本研究で提案する多関節型水中ロボットは、ロボットの本体を構造物に固定できるようにすることで、定点保持に要するエネルギーを最小限に抑えることが可能である。さらに、一様流に逆らって移動する場合でも、途中の経路と姿勢を工夫し、ロボット本体に作用する流体抗力を適切に利用することで、移動におけるエネルギー損失を抑制できる。また、関節に回生ブレーキ機構を導入することで、一様流からエネルギーを獲得しながらの移動も可能である。回生ブレーキとは、通常は駆動力として用いているモーターを発電機として作動させ、運動エネルギーを電気エネルギーに変換して回収することで制動をかける電気ブレーキの手法のひとつである。

本稿では、効率良く移動することが可能な多関節型水中ロボットの有用性を数値実験によって検証する。そして、このロボットの最適な移動動作を求めるために、多段決定問題として動作計画問題を定式化し、動的計画法を用いたアプローチを試みる。

2. 多関節型水中ロボット

2.1 多関節型水中ロボットの概要

本研究で提案する多関節型水中ロボットは Fig.1 のよ

* 九州大学大学院工学府

** 九州大学大学院工学研究院

原稿受付 (学会の方で記入します)

秋季講演会において講演 (学会の方で記入します)

©日本船舶海洋工学会

うな格子構造物上で稼働することを想定している。実際にミッションを行う場合には、橋脚のような構造物上に格子構造を設置することで、多関節型水中ロボットを用いた観測や点検を行うことができる。

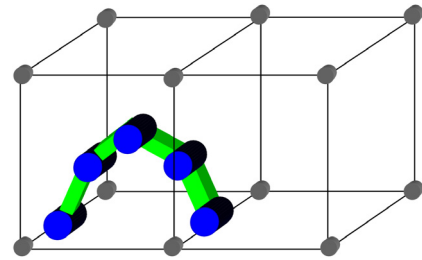


Fig.1 Multi-joint underwater robot

ロボットの本体は多関節構造をしており、各関節は制限角度の範囲内で自由に動かすことができ、姿勢を変えることで本体に作用する流体抗力を変化させることができる。ロボット本体の両端には、格子構造を掴むためのエフェクタを搭載している。この2つのエフェクタを用いて、交互に構造物を掴んで放す動作を繰り返すことで、多関節型水中ロボットは構造物上を移動する。そして、移動におけるロボットの姿勢を工夫し、作用する流体抗力を適切に利用することによって、エネルギー損失を抑えることが可能である。ロボットの移動方法の例を Fig.2 に示す。

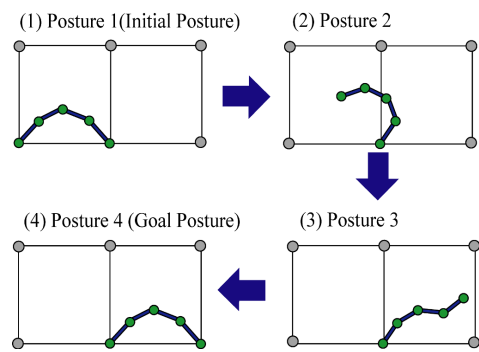


Fig.2 Movement of a multi-joint underwater robot

2.2 多関節型水中ロボットのモデル化

本研究では、2次元平面における多関節型水中ロボットの動作計画を考えるとする。実環境で用いる場合には3次元空間において動作計画を行う必要があるが、提案するロボットの姿勢は各リンクの角度によって決定されるので3次元空間への拡張は容易である。

次に多関節型水中ロボットの形状について述べる。関節と関節を繋ぐリンクの形状は円柱とし、関節はリンクと比べ十分に小さく、質点と考えられると仮定する。そして、ロボットの座標系を Fig.3 のように定める。

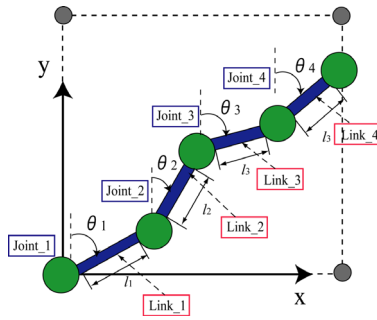


Fig.3 Configuration of a multi-joint underwater Robot

ここで、 l_i は i 番目のリンクの長さ、 θ_i は i 番目の関節の角度とする。ロボットの姿勢を表す各関節の角度をベクトル \mathbf{s} として次式のように定める。

$$\mathbf{s} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_{n-1}, \theta_n\} \quad (1)$$

また、 i 番目の関節の座標は次式で与えられる。

$$x_i = \sum_{j=1}^i l_j \sin \theta_j, \quad y_i = \sum_{j=1}^i l_j \cos \theta_j \quad (2)$$

ロボットが動き始める姿勢を初期姿勢、目標の姿勢を目標姿勢とし、初期姿勢から目標姿勢に到達するまでの動作計画をベクトル列 \mathbf{P} として次式で表現する。

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{s}_{init}, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_k, \dots, \mathbf{s}_{end}\} \quad (3)$$

\mathbf{s}_{init} は初期姿勢、 \mathbf{s}_{end} は目標姿勢、 k は姿勢遷移の遷移回数を意味している。

2.3 多関節型水中ロボット作用する流体抗力

本研究では、リンクに作用する流体抗力を求めるために次式の Morison 式²⁾を用いる。

$$f = C_d \frac{1}{2} \rho D u |u| + C_m \frac{\pi}{4} \rho D^2 \frac{du}{dt} \quad (4)$$

D は円柱の直径、 C_d は抗力係数、 C_m は質量係数、 u は流体速度、 ρ は流体密度である。ただし、本研究ではリンクは十分にゆっくりとした速度で動くとして仮定しているため、一様流によって作用する流体抗力のみを考慮する。各リンクに働く力は次のように表現される。(Fig.4 参照)

x 方向

$$F_{x,i} = F_{x,i+1} + f_i \cos \theta_i \quad (5)$$

y 方向

$$F_{y,i} = F_{y,i+1} - f_i \sin \theta_i \quad (6)$$

θ 方向

$$M_i = M_{i+1} + T_i + F_{x,i+1} l_i \cos \theta_i - F_{y,i+1} l_i \sin \theta_i \quad (7)$$

ただし、

$$f_i = \int_0^{l_i} C_d \frac{1}{2} \rho D_i u_i |u_i| dr_i, \quad T_i = \int_0^{l_i} C_d \frac{1}{2} \rho D_i u_i |u_i| r_i dr_i \quad (8)$$

とする。

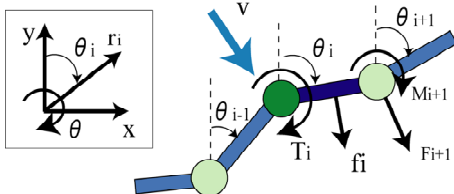


Fig.4 Forces acting on a link

3. 多関節型水中ロボットの動作計画問題

本研究では、一様流中で移動する場合に消費するエネルギーをできるだけ小さくする多関節型水中ロボットの動作計画問題を取り扱う。考慮するエネルギーは、一様流中の移動動作によって損失するエネルギー、ロボットの機械的特性に損失するエネルギー、そして、回生ブレーキによって回収することが可能な電気エネルギーである。3つのエネルギーの総和をコスト関数として定め、このコスト関数を最小とする動作計画を求める。

3.1 一様流による損失エネルギー

移動動作において流体抗力によって損失するエネルギーは、各関節にかかるモーメントとリンクの動作角度によって定まる。姿勢 \mathbf{s}_A から隣接する姿勢 \mathbf{s}_B に変化するときにかかるコストは(7)式を用いて次のように近似的に表される。

$$\text{function_1}(\theta, \theta') = \begin{cases} \int_{\theta}^{\theta'} M_i d\theta_i & \left(\int_{\theta}^{\theta'} M_i d\theta_i \geq 0 \right) \\ 0 & \left(\int_{\theta}^{\theta'} M_i d\theta_i < 0 \right) \end{cases}$$

$$\text{energy_1}(\mathbf{s}_A, \mathbf{s}_B) = \sum_{i=1}^N \text{function_1}(\theta_{s_A,i}, \theta_{s_B,i}) \quad (9)$$

N はマニピュレータのリンク数、 $\theta_{s,i}$ は姿勢 \mathbf{s} の i 番目のリンクの角度を表している。

3.2 機械的損失エネルギー

多関節型水中ロボットは流体抗力に逆らってリンクを動かす場合だけでなく、ロボットの機構における摩擦などによってもエネルギーを損失する。本研究では、この損失エネルギーは、リンクの動作角度に比例すると仮定し、次式のように表す。

$$\text{energy_2}(\mathbf{s}_A, \mathbf{s}_B) = \sum_{i=1}^N \alpha \int_{\theta_{s_A,i}}^{\theta_{s_B,i}} d\theta_i \quad (10)$$

α は機械的エネルギー損失度合を表すパラメータである。

3.3 回生ブレーキによって得られる電気エネルギー

本研究で提案する多関節型水中ロボットの関節には、回生ブレーキ機構を導入する。回生ブレーキを用いることによって、一様流から受ける流体抗力によってリンクが回転する場合の運動エネルギーを電気エネルギーとして回収することが可能である。この特長を利用することで、ロボットが一様流に逆らって移動する場合でもエネルギーを回収しながら移動することが可能になると考えられる。回生ブレーキによって得られる電気エネルギーは(7)式を用いて次式のように近似的に表される。

$$\text{function_2}(\theta, \theta') = \begin{cases} 0 & \left(\int_{\theta}^{\theta'} M_i d\theta_i \geq 0 \right) \\ \beta \int_{\theta}^{\theta'} M_i d\theta_i & \left(\int_{\theta}^{\theta'} M_i d\theta_i < 0 \right) \end{cases}$$

$$\text{energy_3}(\mathbf{s}_A, \mathbf{s}_B) = \sum_{i=1}^N \text{function_2}(\theta_{s_A,i}, \theta_{s_B,i}) \quad (11)$$

β は回生ブレーキによって得られる電気エネルギーの効率を表すパラメータである。

3.4 最適動作計画問題の定式化

姿勢 s_A から姿勢 s_B に遷移する場合に、多関節型水中ロボットにおけるエネルギー収支は(9)(10)(11)式を用いて、次式のような関数で表される。この関数を動作計画問題におけるコスト関数と定義する。コスト関数の符号は損失エネルギーを正、獲得する電気エネルギーを負とする。

$$\text{Cost}(s_A, s_B) = \sum_{i=1}^3 \text{energy}_i(s_A, s_B) \quad (12)$$

本研究では、移動動作においてエネルギー損失が最も少ない動作計画を求めようとしているので、多関節型水中ロボットの最適動作計画問題は初期姿勢から目標姿勢までのコスト関数の総和を最小化する最適化問題として次のように定式化される。

$$\text{Optimal_Planning} = \min_{P \in P_{\text{ALL}}} \sum_{j=1}^{|P|} \text{Cost}(s_j, s_{j+1}) \quad (13)$$

P_{ALL} は実行可能なすべての動作計画の集合である。そして、(13)式を満たす動作計画 P が最適動作計画となる。

4. 動作計画問題へのアプローチ

4.1 動作計画問題のモデル化

動作計画問題において Fig.5 のような状態遷移ネットワークを生成することができる。ノードが多関節型水中ロボットの姿勢、エッジの方向が姿勢遷移の方向、エッジの重みが動作計画問題におけるコスト関数を表す。これによって、本問題をグラフ探索問題として考えることができ、これまでに研究されている様々な解法を適用することができる。

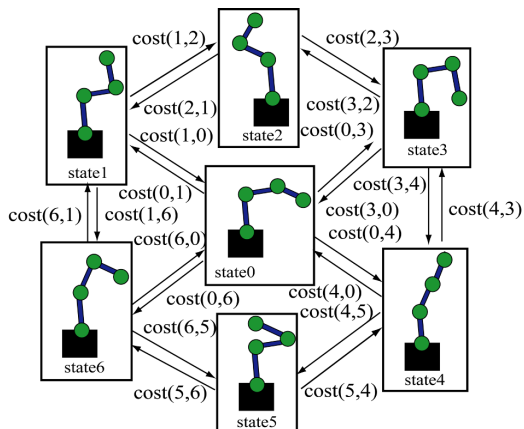


Fig.5 State transition network of a multi-joint underwater robot

4.2 多段決定問題

4.1 節で述べた状態遷移ネットワークにおいて、多関節型水中ロボットが一定の時間間隔 Δt で姿勢変化をすると仮定すると、動作計画問題を離散時間における Fig.6 のような多段決定問題³⁾として定式化することができる。まず、動作計画問題を N 段決定問題として考える。 N は総ステージ数で、目標姿勢への到達時間 T に対して、 $(N-1)\Delta t = T$ の関係が成立する。時間ステップ k における i 番目の状態を $s_{i,k}$ とし、その状態に到達するまでのコスト関数の総和を状態価値関数 $F(s_{i,k})$ とする。動作計画

問題は多段決定問題として、(14)式のような関数方程式によって表現することができる。境界条件として、初期姿勢におけるコスト関数の値は 0 であるとする。

関数方程式

$$F(s_{i,k}) = \min_{s_{j,k-1} \in S_{i,k}} \{ \text{Cost}(s_{j,k-1}, s_{i,k}) + F(s_{j,k-1}) \} \quad (14)$$

境界条件

$$F(s_0) = 0 \quad (15)$$

$S_{i,k}$ は時間ステップ k において状態 $s_{i,k}$ に遷移可能な状態の集合を表している。この関数方程式を出発時刻 $t=0$ から到達時刻 $t=T$ まで、時間ステップごとに解いていくことによって最適な移動動作を獲得することができる。また、多段決定問題は動的計画法を用いることによって、効率良く解を求めることができる。

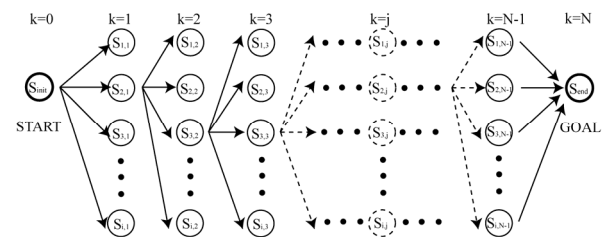


Fig.6 Multi-decision Problem

4.3 動的計画法

動的計画法は、R.Bellman によって提案された最適化問題の解法である。本研究では、動的計画法を用いて動作計画問題の最適解を求める。動的計画法による最適動作探索アルゴリズムは次の通りである。

- 1) 状態空間の格子状に分割し、時間ステップを初期化。
 - 2) 分割した状態において状態遷移ネットワークを生成する。
 - 3) 状態空間の各格子点で、時間ステップ k における最適な状態遷移と状態価値関数を探索する。
 - 4) 時間ステップを $k=k+1$ と更新し、 $k=N$ になるまで 3) の操作を繰り返す。
 - 5) 時刻 T までの状態価値関数から最適方策を決定する。
- 上記のアルゴリズムによって、最適な動作を獲得することができる。

この多段決定問題は、目標姿勢への到達時間の最小化とエネルギー損失の最小化という多目的最適化問題となるため、一意に解を求めることができない。そこで、本研究では時間ステップごとに得られるコストが負になる場合は 0 とし、最短経路問題として考えることで最適解が一意に定まるようにする。この方法で得られた解において、損失と発電を考慮したコスト関数の再計算を行う。

5. 数値実験

5.1 数値実験の設定

本研究で提案する動作計画手法を用いて、多関節型水中ロボットの移動動作探索の数値実験を行った。ロボットは格子構造の表面を移動するとし、初期姿勢と目標姿勢は Fig.7 のように設定した。ロボットの関節数は 4 とし、リンクの形状は円柱とし $l_i = 0.8$ [m]、 $D_i = 0.2$ [m]、 $C_d = 1.17$ 、 $\rho = 1.023$ 、 $|\mu| = 2.0$ [m/s]、関節の可動角度

を $\pm 90^\circ$ とする。また、状態空間を量子化するために可動角度を11分割する。そして、コスト関数におけるパラメータを $\alpha = 0.001$, $\beta = 0.1$ と設定する。計算機環境は、CPU : Core2Duo E4500 2.2GHz, Memory : 2038MB, OS : Windows, プログラム言語 : JAVA である。

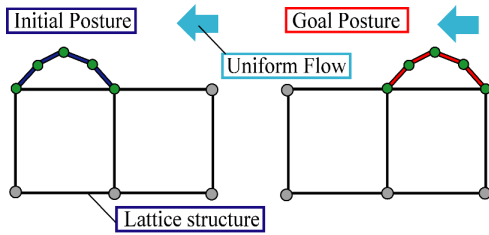


Fig.7 Numerical simulation setting

5.2 数値実験の結果

数値実験の結果を比較するために、動作角度をコスト関数とした最適動作の探索も行った。この方法は、最短時間で目標姿勢に到達する動作計画を探索していることになる。この最短時間で到達する動作の探索結果(Method 1)と流体抗力にエネルギー損失を最小にする動作の探索結果(Method 2)において実験結果の比較を行った。コスト関数と計算時間の結果を Table.1, 獲得した動作を Fig.8 から Fig.15 までに示している。Method 1 の結果を Fig.8 に、Method 2 の結果は動作が複雑であるため Fig.9 から Fig.15 の7段階に分けて示している。Table.1 より、回生ブレーキによる電気エネルギーの回収によって、移動前よりも移動後の方がエネルギーを蓄えていることが分かる。これによって、多関節型水中ロボットは一樣流に逆らって移動する場合でも、エネルギーを回収しながら効率良く移動することが可能であることが確認できる。また、この数値実験では格子構造との衝突は考慮していないが、状態遷移ネットワークの生成において障害物との衝突判定を加えることで、衝突を回避した動作の探索も可能である⁴⁾。

Table.1 Calculation Result

	Cost Function [N·m]	Calculation Time [s]
Method 1	2.8525	184
Method 2	-0.28423	590

6. 結 言

本研究では、作用する流体抗力を適切に利用し、エネルギー損失を最小にする多関節型水中ロボットを提案した。また、提案するロボットの最適動作を獲得するために動的計画法を用いた動作計画アルゴリズムを開発し、数値実験において、ロボットとアルゴリズムの有用性の検証を行った。今後の課題としては、目標姿勢への到達時間の最小化とエネルギー損失の最小化の多目的最適化問題となる動作計画問題を解くためのアプローチの検討が挙げられる。この問題の解決法のひとつとして到達時間、もしくはエネルギーを蓄えるバッテリーに制約を設ける方法を考えている。また、多関節型水中ロボットの初期姿勢は移動動作全体におけるエネルギー損失に大きく影響するので、最適な初期姿勢を検討する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は、笹川科学研究助成に基づいて実施されたことを付記し、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 浦環, 高川真一: 海中ロボット総覧, 成山堂書店, 1994.
- 2) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会: 実践 浮体の流体力学 後編 実験と解析, 成山堂書店, 2003.
- 3) 近藤次郎: オペレーションズ・リサーチの手法, 日科技連出版社, 1973
- 4) 白石耕一郎, 木村元: 流体抗力を考慮した多自由度水中マニピュレータの最適動作計画について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第5W号(2007), pp.83-86

