

# 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

学生員 白石 耕一郎\* 正員 木村 元\*\*  
正員 梶原 宏之\*\*

On Optimal Motion Planning for Multi D.O.F Underwater Manipulator Considering Fluid Drag

by Koichiro Shiraishi, *Student Member* Hajime Kimura, *Member*

Hiroyuki Kajiwara, *Member*

**Key Words:** Multi-Degree of Freedom Underwater Manipulator, Motion Planning, Dijkstra Method, Fluid Drag

## 1. 緒言

近年、地球温暖化や異常気象など深刻な環境問題が発生している。海洋は様々な環境問題に密接に関係しているため、海洋調査技術の確立は早急に進められるべき重要課題である。そこで自律的に海洋調査を行うプラットフォームとして、海中ロボットの開発が進められている。海中ロボットは海中で様々な作業を行うために水中マニピュレータを搭載しており、マニピュレータは海洋分野においても有用な手段として用いられている。

マニピュレータには多自由度マニピュレータが存在し、次のような特長を持つ。まず数多くの関節があるため自由度が高く、複数の障害物が存在する環境下においても各リンクが障害物を避け、エンドエフェクタを任意の目標位置に到達させることができる。また高い冗長性を持つので、もし1つのリンクが故障したとしても他のリンクでそのリンクの機能を補うことで、故障後も作業を続けることが可能である。さらに高い自由度を活かして、リンクを巻きつけてものを握るなどの作業も可能である。

これらの特長を利用して、筆者らは水生昆虫のゲンゴロウのような特徴を持つ水中ロボットの開発に関する研究を行っている。そのロボットの手足として多自由度水中マニピュレータを用いることで、水中を自由自在に泳ぎ、歩き回るような機能を実現させることを考えている。しかし、優れた機能を持つ多自由度水中マニピュレータを利用するためには、高自由度、巨大な状態空間、困難な流体力計算といった問題を解決する必要がある。

本研究では多自由度水中マニピュレータ(以後、マニピュレータ)の動作計画を取り扱う<sup>1)</sup>。潮流のある海中環境において、マニピュレータに働く流体抗力はエネルギー消費や本体の運動に影響すると考えられる。作用する流体抗力をコスト関数とし、障害物を回避しながらエンドエフェクタを目標位置に到達させる動作計画をマニピュレータの最適動作計画問題として取り扱う。また本問題をグラフ理論における最短経路問題として定式化し、最短経路問題の最適解導出アルゴリズムである Dijkstra 法を用いた動作計画手法を提案する。そして数値実験にお

いて、障害物を配置した水中環境でのマニピュレータの動作計画に提案手法を適用し、その有用性を検証する。

## 2. 動作計画問題の定式化

### 2.1 動作計画問題の仮定

本研究ではマニピュレータへの流体抗力の影響をできるだけ小さくし、障害物と衝突することなくエンドエフェクタを目標座標に到達させる動作計画問題を取り扱う。まず問題設定として2次元平面での動作計画を考えるとする。実際のマニピュレータに実装する場合には3次元空間において動作計画を行う必要があるが、マニピュレータ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。また各リンクの動作速度は十分に小さいと仮定する。これによりマニピュレータの動作速度に起因する流体抗力は十分に小さいと考えられるので無視することができる。

### 2.2 マニピュレータの構成

リンクの形状は円柱とする。関節はリンクと比べて十分に小さいとし、流体抗力の計算上無視できるとする。マニピュレータの座標系を Fig.1 のように定める。

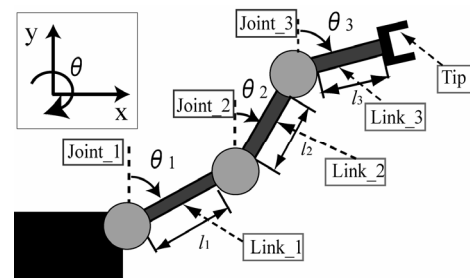


Fig.1 Manipulator Coordinates

ここで  $l_i$  は  $i$  番目のリンクの長さ、 $\theta_i$  は  $i$  番目のリンクの角度とする。マニピュレータの姿勢を表す各リンクの角度をベクトル  $S$  として次式のように定める。

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

また  $n$  番目のリンクの先端がエンドエフェクタの位置となり、その座標は次式で与えられる。

$$x_{Tip} = \sum_{i=1}^n l_i \sin \theta_i, \quad y_{Tip} = \sum_{i=1}^n l_i \cos \theta_i \quad (2)$$

\* 九州大学大学院工学部

\*\* 九州大学大学院工学研究院

他のリンクの座標も(2)式と同様に求めることができる。

### 2.3 マニピュレータの動作設定

各リンクの可動範囲は基準軸から $\theta_{MIN}$ から $\theta_{MAX}$ の範囲内とする。また各リンクは1stepで一定角度 $\pm\theta_{span}$ 動くか、もしくは動かないかの3つとする。これは角度を連続値で取り扱うと状態数が増大し、計算が困難になるのを避けるためである。リンクの動作を下図に示す。

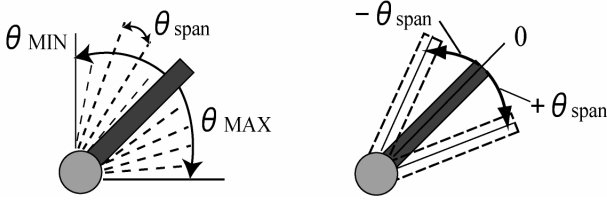


Fig.2 Movement of a Link

### 2.4 マニピュレータの姿勢変化

マニピュレータが動き始める姿勢を初期姿勢、エンドエフェクタが目標座標に到達する姿勢を終端姿勢とし、初期姿勢から終端姿勢になるまでのマニピュレータの姿勢の列をベクトル列 $\mathbf{P}$ として次式で表現する。

$$\mathbf{P} = (S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_{k-1}, S_k) \quad (3)$$

ここで $S_1$ は初期姿勢、 $S_k$ は終端姿勢、 $j$ は姿勢変化の回数を意味している。

### 2.5 多自由度水中マニピュレータ最適動作計画問題

本研究において各リンクは十分に小さい速度で動くことと仮定しているため、マニピュレータに作用する流体抗力を求めるために次式のMorison式<sup>2)</sup>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、 $\rho$ は流体の密度である。またリンクの速度は十分に小さいので、(4)式の第2項は無視する。(4)式を用いて各リンクに働く力は次のようになる。(Fig.3 参照)

$x$  方向

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

$y$  方向

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

$\theta$  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

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

とする。

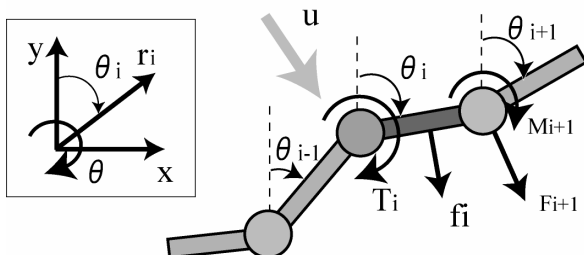


Fig.3 Force Acting on a Link

また姿勢変化において流体抗力から受けるエネルギーは、関節にかかるトルクとリンクの動作角度によって定まる。本研究では、このエネルギーをコスト関数と定める。姿勢 $S_A$ から隣接する姿勢 $S_B$ に変化するときににかかるコストは(7)式を用いて次のように近似的に表される。

$$\text{Cost}(S_A, S_B) = \sum_{i=1}^N \int_{\theta_{i,S_A}}^{\theta_{i,S_B}} M_i d\theta_i + \Delta E \quad (9)$$

ここで $N$ はマニピュレータのリンク数、 $\theta_{i,S}$ は姿勢 $S$ の $i$ 番目のリンクの角度、 $\Delta E$ はマニピュレータが流体抗力に関係なく動くだけで消費するエネルギーを表す。初期姿勢から終端姿勢になるまで、つまり動作計画の総コストは(9)式を用いて次のように定められる。

$$\text{All\_Cost}(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^{|\mathbf{P}|-1} \text{Cost}(S_i, S_{i+1}) \quad (10)$$

本研究では流体抗力の影響ができるだけ小さい動作計画を求めようとしているので、マニピュレータの最適動作計画問題は(10)式の総コスト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。

$$\text{Optimized\_Plan} = \min_{\mathbf{P} \in \mathbf{P}_{\text{All}}} \text{All\_Cost}(\mathbf{P}) \quad (11)$$

ここで $\mathbf{P}_{\text{All}}$ とは本問題において考えられる全ての動作計画の集合である。(11)式を満たす動作計画 $\mathbf{P}$ が最適動作計画となる。ただし、本研究では流体抗力によるマニピュレータの損失エネルギーを最小とすることを考え、潮流から得られる正のエネルギーは考えないとする。

## 3. 最適動作計画の探索手法

### 3.1 最短経路問題としての定式化

マニピュレータは各リンクを動かすことで姿勢を変えていく。この様子を図式化すると下図のようになる。

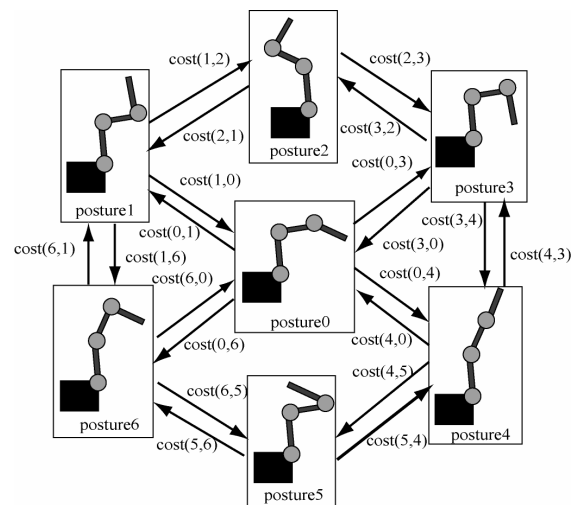


Fig.4 Posture Transition Network

Fig.4より、マニピュレータの姿勢遷移はグラフ理論におけるネットワークとして考えることができる。この場合、ネットワークの節点はマニピュレータの姿勢、枝の向きは姿勢遷移の方向、枝の長さはコスト関数を意味してい

る。従って、マニピュレータの最適動作計画問題は、グラフ理論における最短経路問題と考えることができ、総コストが最小となる動作計画がネットワークにおける最短経路となる。そして、マニピュレータの全ての姿勢の数がネットワークの節点数  $V$  となり、 $S_i$  において次に遷移可能な姿勢の数が枝の数  $E_i$  となる。各リンクの動作角度の分割数を  $M$ 、マニピュレータのリンク数を  $N$  とすると  $V = M^N$ 、 $E_i = 3^N - 1$  となる。枝の数は各リンクで可能な行動が 3 であるので全リンクの組み合わせを考えると  $3^N$  となり、全てのリンクが動かない場合を除くと  $3^N - 1$  となる。節点数と枝数はリンク数に関して指数関数的に増加していくため、本問題は大規模ネットワーク問題となる。しかし、次節で示す Dijkstra 法を用いることによって効率良く最短経路を求めることが可能である。

また最短経路問題は出発点のコスト関数の和を 0 とすると、関数方程式を用いて次のように定式化できる。

関数方程式

$$F(S_j) = \min_{1 \leq i \in E_i} \{F(S_i) + \text{cost}(S_i, S_j)\} \quad (12)$$

境界条件

$$F(S_1) = 0 \quad (13)$$

ここで  $S_i$  を姿勢遷移ネットワーク上の節点、 $S_1$  を出発点、 $S_j$  を節点  $S_i$  に隣接する点集合の 1 つ、 $F(S_i)$  を出発点  $S_1$  から節点  $S_i$  までのコスト関数の和の最小値、 $\text{cost}(S_i, S_j)$  を節点  $S_i$  から節点  $S_j$  に移動したときのコスト関数である。

### 3.2 Dijkstra 法

Dijkstra 法<sup>3)</sup>は、1959 年に E.Dijkstra によって提案された手法で、ネットワーク内のすべての節点に接続している節点とその間を結ぶ枝のコストが分かるとネットワーク全体の構成を知ることができる。その接続状態の情報を用いて目的の節点までのコストが最も小さくなるような経路を計算し、最短距離（最小コスト）と最短経路と求めることができる。ただし、全ての枝において重みの値が負の枝が存在する場合は使用することができない。

本研究では Dijkstra 法を用いて、最短経路問題として定式化した多自由度水中マニピュレータの最適動作計画問題を解く。また Dijkstra 法で節点の評価値の更新を行うときに、その姿勢で障害物と衝突していないかを調べることで障害物を回避した動作計画を探索する。

## 4. 最適動作探索

### 4.1 実験概要

提案手法の有用性を検証するために一様流が存在する水中環境下においてマニピュレータの最適動作計画の探索を行う。リンクの形状は全て同じものとし、その仕様は  $N = 5$ 、 $l_i = 0.8 [m]$ 、 $D_i = 0.2 [m]$  である。リンクの動作設定として  $\theta_{MIN} = -60^\circ$ 、 $\theta_{MAX} = 60^\circ$ 、 $\theta_{span} = 10^\circ$ 、 $M = 13$  とする。また水中環境については  $C_d = 1.17$ 、 $\rho = 1.023$ 、 $|u| = 2.0 [m/s]$  とし、マニピュレータが 1Step で消費するエネルギーを  $\Delta E = 0.00001$  とする。

また流体抗力を考慮した場合としない場合で動作計画がどのように変化するかを調べるために、エンドエフェクタが目標座標に到達するまでにリンクが動く角度の総

和を最小とする動作計画を用いる。この動作計画は姿勢遷移ネットワークにおける全ての枝の重みを 1 として Dijkstra 法を用いて解いた場合と等価であり、通常のマニピュレータの動作計画の解き方である。この手法によって得られる動作計画の流体抗力を考慮したコスト関数を算出し、提案手法によって得られた動作計画と比較した。ここで、動かす角度を考慮した場合の動作計画手法を手法 1(Method 1)とし、提案手法を手法 2(Method 2)とする。

### 4.2 一様流中における最適動作探索(Case1)

まず一様流が  $y$  軸の正方向である場合について、2 つの手法を用いて動作計画を探索した。障害物はマニピュレータの土台以外は存在しないとする。Table.1 は 2 つの手法における流体抗力を考慮したコスト関数と計算時間を示している。また Fig.5 は手法 1 による動作計画、Fig.6, Fig.7 は手法 2 による動作計画を 2 段階に分けて表示したものである。図の左上の矢印は一様流の方向、マニピュレータ付近の矢印はエンドエフェクタの移動方向、右下の灰色の丸は目標座標を表している。

Table.1 より手法 2 によって流体抗力の影響を小さくした動作計画が探索できていることが分かる。また Fig.7 より一様流による流体抗力を利用してマニピュレータが姿勢を変化させている様子が分かる。手法 2 が手法 1 と比べ計算時間が長いのは、動作角度の計算に対して流体抗力の計算が複雑であるからである。

Table.1 Calculation Result (Case1)

	Cost Function	Calculation Time [s]
Method 1	3.45213	1945
Method 2	0.00016	19945

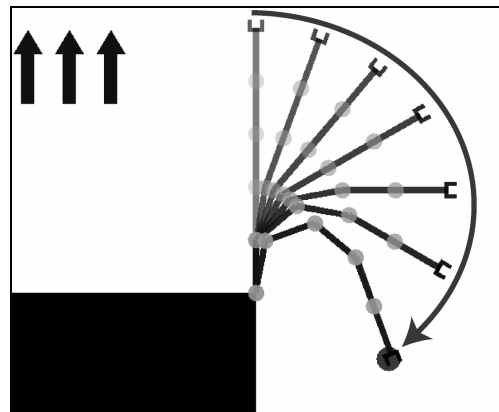


Fig.5 Motion Planning by Method 1(Case1)

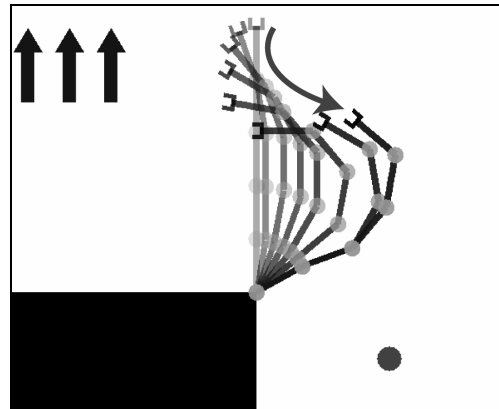


Fig.6 Motion Planning by Method 2 at Stage1 (Case1)

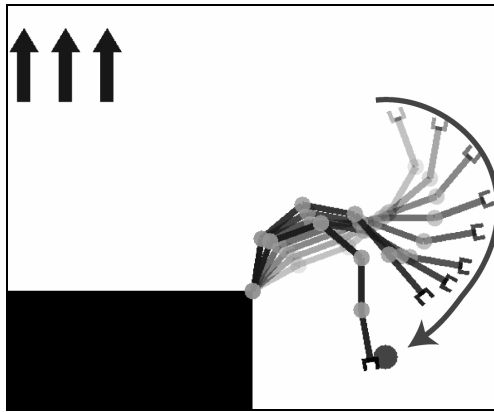


Fig.7 Motion Planning by Method 2 at Stage2 (Case1)

#### 4.3 最適動作探索(Case2)

次に障害物を回避した動作計画が探索可能であるか検証するために Fig.8 に示すような静止障害物を配置した環境において 2 つの手法を用いて動作計画の探索を行った。一様流の方向は  $x$  軸の正方向である。Fig.8, Fig.9 は手法 1 による動作計画、Fig.10, Fig.11 は手法 2 による動作計画をそれぞれ 2 段階に分けて表示したものである。

Table.2 Calculation Result (Case2)

	Cost Function	Calculation Time [s]
Method 1	3.79407	78069
Method 2	0.00016	81136

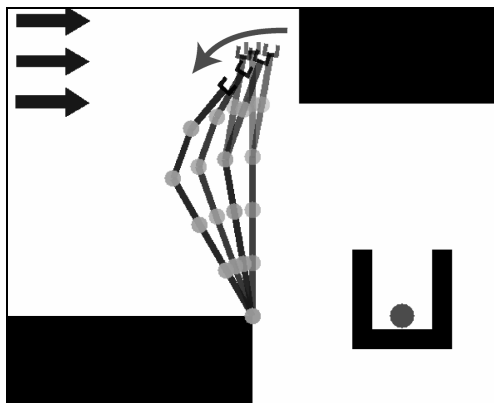


Fig.8 Motion Planning by Method 1 at Stage1 (Case2)

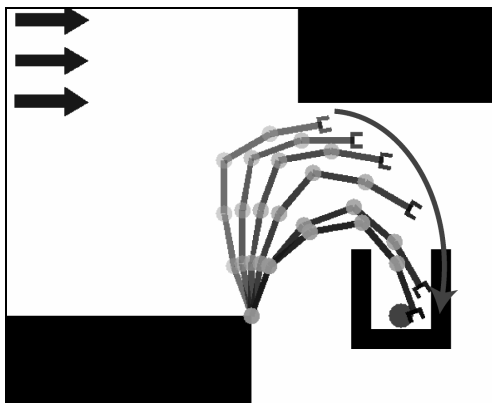


Fig.9 Motion Planning by Method 1 at Stage2 (Case2)

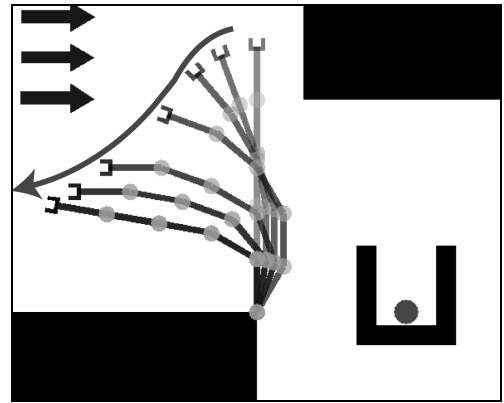


Fig.10 Motion Planning by Method 2 at Stage1 (Case2)

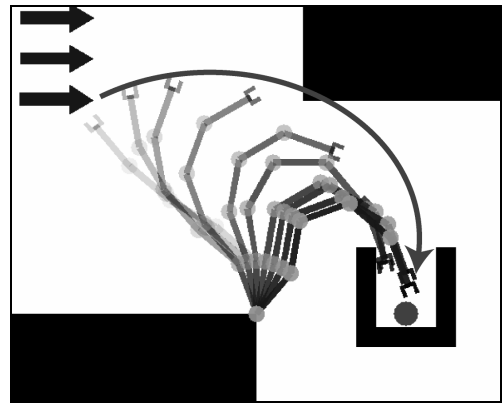


Fig.11 Motion Planning by Method 2 at Stage2 (Case2)

Table.2 より、この場合も手法 2 が手法 1 より流体抗力を考慮したコスト関数が小さい動作計画を探索できていることが分かる。そして両手法とも障害物を回避した動作計画を探索できている。また障害物との衝突判定により両手法とも計算時間が Case1 と比べ長くなっている。

#### 5. 結 言

本研究では、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問題をグラフ理論における最短経路問題として定式化し、Dijkstra 法を用いて最適動作を求める動作計画手法を提案した。そして数値実験を通して提案手法の有用性を検証した。

今後の課題として、詳細な流体抗力計算を組み込み、リンクの角度を連続値で取り扱う動作計画手法の開発を考えている。またマニピュレータのリンク数が増加すると状態数が指数関数的に増加するので、巨大な状態空間を取り扱うために関数近似手法を導入し、さらに海中環境における不確実性を考慮するために強化学習の適用することを考えている。

#### 参 考 文 献

- 1) 石橋正二郎, 清水悦郎, 伊藤正則: 海中ロボット用マニピュレータの障害物回避行動計画, 日本機械学会論文集, 69 巻 677 号, 2003, pp.180-186
- 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) Thomas H. Cormen: アルゴリズム・イントロダクション 第 2 巻, 近代科学社, 1995