海中ロボット用マニピュレータの障害物回避動作計画*

石橋 正二郎^{*1}, 清水 悦郎^{*2}, 伊藤 雅則^{*2}

Motion Planning to Avoid Obstacles for a Manipulator Equipped on an Underwater Robot

Shojiro ISHIBASHI^{*3}, Etsuro SHIMIZU and Masanori ITO^{*3} Tokyo University of Mercantile Marine, Dept. of Marine Information System Engineering,
2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

In this paper, a motion planning for a manipulator, which is equipped on an autonomous underwater vehicle (AUV), is proposed. This approach is composed of the path planning of the tip position of the manipulator and the posture planning of it. In the path planning, an objective tip position is generated using the genetic algorithm. And in the posture planning, a manipulator's posture to avoid obstacles is decided by an evaluation considering the drag force. The manipulator is able to move safely and suitably because each planning is executed repetitively. The validity of this approach was shown in an experimental environment setting a moving obstacle and a stationary obstacle.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Manipulator, Robot, Motion Planning, Underwater Robot, Genetic Algorithm, Inverse Kinematics, Collision Avoidance

1. 結 論

人類にとって大きな役割を果たす海洋は、さまざまな環境問題にも密接に関係しているため、その開発及び調査・研究技術の確立は早急に進められるべき重要課題とされている。一方、現在の海洋開発の多くは潜水士に依存しており、作業種・作業エリアに限界がある。そこで近年、潜水士に代わり作業を担う自律型海中ロボット (AUV) の開発が進められており、その一部は既に実機実験段階にある⁽¹⁾⁽²⁾。これを踏まえ我々は、高い自由度を持つマニピュレータシステムを AUV に装備させることにより、潜水士同様の実作業を行わせることを考え、その構築を目指している⁽³⁾⁽⁴⁾。

AUV では人間が介在しないため、全ての動作は自身の自律性に依存し、AUV に装備させるマニピュレータシステムにおいても、自律して動作を計画するアルゴリズム

が必要となる。そのため、このようなマニピュレータシステムを考える場合、先ずその動作計画問題に取り組まなくてはならない。

マニピュレータの動作計画問題では障害物回避を考える必要があり、その解決法としては、コンフィギュレーション空間 (以下、C 空間) を利用した手法⁽⁵⁾がよく用いられる。C 空間ではマニピュレータの姿勢が 1 点で表現されるため、障害物回避を点経路の探索問題に帰着することができる。そこでこれまでに、マニピュレータの自由度を分割したうえでセルにより分解された C 空間内の回避経路を探索する手法⁽⁶⁾や、C 空間内の障害物領域を幾何モデルによりパラメータ化する手法⁽⁷⁾、また C 空間内に安全領域となる自由曲面を生成する手法⁽⁸⁾や C 空間内の経路にポテンシャル法を適用する手法⁽⁹⁾などが提案されている。しかし C 空間の次元は、対象となるマニピュレータの関節数となるため、多リンクマニピュレータにおいて障害物領域が定義される C 空間を構築するには、非常に多くの計算と記憶領域が必要となる。そのため、多リンクマニピュレータに対する決定的な動作計画手法は確立されていない。

そこで本論文では、C 空間ではなく作業空間にてマニピュレータ先端の軌道計画とその軌道を満たしかつ障害

* 原稿受付 2002 年 5 月 15 日。

^{*1} 学生員, 東京商船大学大学院 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)。^{*2} 正員, 東京商船大学商船学部 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)。

E-mail: sisibasi@ipc.tosho-u.ac.jp

Fig. 1 Divided workspace and an obstacle domain

Fig. 2 Procedure of the path planning

物を回避するマニピュレータの姿勢計画から成る動作計画手法を提案する。本手法では、作業空間内に定義する障害物領域との干渉チェックを、各計画においてそれぞれ順次行うことで障害物を回避する動作を計画する。また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がAUV本体への運動に影響することを考え、マニピュレータが受ける流体抗力が軽減されるような動作計画を行う。最後に、移動障害物と静止障害物を設置した水中環境において、多リンクマニピュレータの障害物回避動作計画について本手法を適用し、その有効性を確認する。

2. マニピュレータの動作計画

2-1 作業空間の構築 本手法では図1に示すように、マニピュレータの作業空間をキューブにより分割することで位置の概念を有限なものとして

Fig. 3 Genotype of a chromosome

とらえ、作業空間内の位置関係を明確にする。全ての動作計画はこの作業空間にて行われ、マニピュレータ先端の軌道は、軌道計画により決定される作業空間内のキューブ位置列となる。また作業空間内に存在する障害物を、障害物を含むキューブとその周囲のキューブから成る障害物領域として定義する。マニピュレータの姿勢計画においては、定義された障害物領域とマニピュレータの各リンクとの位置関係により、マニピュレータ姿勢が評価される。

2-2 先端軌道計画 前節にて述べた作業空間を用いて、マニピュレータ先端の軌道計画を行う。つまり障害物を回避するようなキューブを順に決定し、そのキューブ位置をマニピュレータの各先端目標位置とする。ここで問題となるのがキューブの決定法である。膨大な数のキューブから瞬時に適当なキューブを選択することは難しく、また作業空間全てを選択範囲とすることは実用的ではない。そのため選択範囲を制限し、効率よく選択枝を探索する決定法が望まれる。そこで本手法では遺伝アルゴリズム(GA)を適用する。GAを適用した軌道計画は、これまでに幾つかの用例が報告されており、その代表的なものとしてビークルや船舶などの軌道計画がある(10)(11)。これを踏まえ本手法では、マニピュレータ先端の軌道計画にGAを適用し、更に選択範囲を作業空間内の各平面に制限することにより効率化を図る。つまり図2に示すように、マニピュレータ先端の初期位置(START)から最終到達位置(GOAL)までの全てのX-Z平面においてGAを適用した軌道計画を行い、各平面上のキューブの中からマニピュレータの先端目標位置を順に決定していく。そのため本手法におけるGA個体の染色体は、各X-Z平面上のキューブ位置を示すものとなる。つまり染色体の遺伝子型はキューブのX位置、Z位置となる。またGAに広い探索範囲を持たせるため、染色体遺伝子を図3に示すように二進数で表現する。GAにおいては、初期個体を複数ランダムに生成することで初期集団を形成し、その初期集団を遺伝子オペレータにかけることにより、終了世代までの各世代において集団を進化させていく。本手法では遺伝子オペレータとして、生殖(ルーレット法)、交差(2点交差)、突然変異を用い

Table 1 Danger value in the path planning

Distance from an obstacle domain [mm]	120	170	200	220	250	270
	170	200	220	250	270	
Danger value	200	150	75	25	5	0

る⁽¹²⁾⁽¹³⁾。全ての個体は適応度を持っており、その適応度により集団が操作される。各個体の適応度は式(1)より求められる。

$$F_i = \alpha_1 f_{1i} / \sum_{k=1}^j f_{1k} + \alpha_2 f_{2i} / \sum_{k=1}^j f_{2k} + \dots + \alpha_3 f_{3i} / \sum_{k=1}^j f_{3k} \quad (1)$$

i : 個体番号. ($i=1, \dots, j$)

j : 個体数.

f_{1i} : 個体 i が示すキューブ位置からゴール位置までの距離.

f_{2i} : 個体 i が示すキューブ位置から各障害物領域までの距離に応じた障害物との衝突危険度.

f_{3i} : 現在のマニピュレータ先端位置から個体 i が示すキューブまでの距離

$\alpha_{1,2,3}$: 各項への重み係数.

本手法では式(1)から求められる適応度の低い個体ほど次世代の個体として選出される可能性が高くなる。 f_{2i} における衝突危険度は表1のように設定しており、障害物領域との距離がある範囲内にあるキューブはGAにおける探索対象からは外され、それらキューブが先端目標位置として決定されることはない。先端軌道においては、現在の先端位置から次のX-Z平面までの先端軌道を探索するために、実行世代数が設定上限に達するまでGAを実行する。こうして得られた全世代を通して最小となる適応度を持つ個体を選出し、その個体が示すキューブ位置をそのX-Z平面における先端目標位置として決定する。

2・3 姿勢計画 前節にて述べた手法により、各X-Z平面において先端目標位置が決定されるたびに、マニピュレータの姿勢計画を行う。姿勢計画では、決定する姿勢が先端目標位置を満たしていることが条件となる。そのためこの条件を満たすマニピュレータの姿勢候補を先に選抜し、更にこれら姿勢候補が障害物に接触せず水中環境に適した姿勢であるかを評価する。本手法では姿勢候補を選抜するために、姿勢計画の対象となるマニピュレータが冗長軸を有することを仮定する。マニピュレータが冗長軸を有する場合、ある先端位置姿勢を満たすマニピュレータ姿勢は無限に存在するため、冗長軸のとり値とマニピュレータ先端のとり姿勢を制限することによりマニピュレータ姿勢数を固定し、それらを姿

Table 2 Danger value in the posture planning

Distance from an obstacle domain [mm]	100	125	150	200	250	300
	125	150	200	250	300	
Danger value	200	150	50	25	10	0

勢候補として選抜する。つまり仮に冗長軸のとり値を N 個に制限した場合、 N 個の姿勢候補が選抜され、更に先端姿勢を M 個に制限した場合、姿勢候補は $(N \times M)$ 個選抜される。また姿勢候補数は冗長軸数の指数倍となるため、冗長軸を G 個有するマニピュレータの姿勢候補数は $(N \times M)^G$ となる。各姿勢候補はそれぞれの制限において、6自由度マニピュレータの逆運動学問題に帰着し求める。姿勢候補の評価は、以下の式(2)より行う。

$$E_m = \beta_1 e_{1m} / \sum_{k=1}^n e_{1k} + \beta_2 e_{2m} / \sum_{k=1}^n e_{2k} + \dots + \beta_3 e_{3m} / \sum_{k=1}^n e_{3k} \quad (2)$$

m : 姿勢候補番号. ($m=1, \dots, n$)

n : 姿勢候補数.

e_{1m} : 現在のマニピュレータ姿勢から姿勢候補 m への変化量.

e_{2m} : 姿勢候補 m に変化する際の障害物との衝突危険度.

e_{3m} : 姿勢候補 m に対する総流体抗力.

$\beta_{1,2,3}$: 重み係数.

式(2)における各評価要素は、AUVが姿勢を安定に保ちつつマニピュレータが障害物を回避する動作において、小さく抑えたい状態変数であるため、 E_m が小さいほど評価は高く、その先端目標位置におけるマニピュレータ姿勢として適している。

e_{1m} は式(3)より求められるマニピュレータの姿勢変化量を意味し、各関節変化に追従するリンク数に応じた重み係数が与えられている。

$$e_{1m} = \sqrt{\sum_{p=1}^q w_p \Delta \theta_p^2} \quad (3)$$

p : 関節番号

q : 関節数.

w_p : 関節 p により動かされるリンク数により定義された重み係数.

$\Delta \theta_p$: 関節 p の変化量.

e_{2m} は各姿勢候補に変化する際の、式(4)から求められる直列リンクと障害物領域との距離に応じた危険度の平均である。

$$e_{2m} = \int (\sum_{r=1}^r ((\sum_{u=1}^u p_u) / v)) / s \cdot dt \quad (4)$$

Fig. 4 Flow chart of the proposed motion planning

- r : 直列リンク番号.
 s : 直列リンク数.
 u : 障害物領域番号.
 v : 障害物領域数.
 p_{ru} : 直列リンク r と障害物領域 u との距離に応じた危険度.

e_{2m} における危険度を表 2 に示す. ここで, 各直列リンクと障害物領域との距離がある範囲内にあるリンクは, 障害物と衝突する危険性をもつとし, このようなリンクが存在する姿勢候補は評価の対象から外される. この範囲は各直列リンクをそれぞれシリンダ形状として考えた場合の最大半径にあたる. 評価対象の選別は, 現在の姿勢から各姿勢候補に変化する過程においても事前に行われ, その際, 各直列リンクと障害物領域との距離が先に述べた範囲にある場合は, その姿勢変化中に障害物と衝突する危険性があるとみなし, 評価の対象から外される. これにより姿勢候補は絞られ, 最終的に評価を受ける姿勢候補は, 姿勢変化中も含め障害物に接触する危険性のないものだけとなる.

e_{3m} は姿勢候補に変化する際の総流体抗力である. 流体抗力は以下の式(5)より得られる.

$$D = \frac{\rho}{2} C_d A V^2 \dots \dots \dots (5)$$

ρ : 流体密度.

C_d : 抗力係数.

A : 流体に対する各直列リンクの投影面積.

V : リンクと流体の相対速度.

式(5)より, 流体抗力は A と V に強く依存すると考えられる. A は流体に対するマニピュレータ姿勢を意味しており, 全ての流体力に関係する重要なファクタであるため, 本手法では A に焦点を当て流体抗力を考えていく. そこで各直列リンクをシリンダ形状と仮定し, e_{3m} を次式より求める.

$$e_{3m} = \int \sum_{r=1}^s (2R_r H_r \sin(\phi_r(t)) + \pi R_r^2 \cos(\phi_r(t))) \cdot dt \dots \dots \dots (6)$$

R_r : 直列リンク r の半径.

H_r : 直列リンク r のリンク長.

ϕ_r : 流体に対する直列リンク r の姿勢.

全姿勢候補を評価した結果, 最小の評価値を持つ姿勢候補を適当なマニピュレータ姿勢として決定される. 姿勢計画は軌道計画により先端目標位置が決定されるたびに, その先端目標位置において実行される. これにより, 先端目標位置を満たしかつ障害物を回避していくマニピュレータ姿勢がその都度決定される. ここで, ある先端目標位置における全ての姿勢候補が評価対象から外された場合, つまり先に選抜された全ての姿勢候補が障害物と衝突する危険性があると判断された場合は, 冗長軸値, 先端姿勢, それぞれの制限を新たに設定し直し, 新たな姿勢候補を選抜した上で, 再度, その全ての姿勢候補を評価する. それでもなお, その姿勢候補が全て評価対象から外されてしまった場合には, その先端目標位置を決定した軌道計画において, 二番目に小さい適応度を持つキューブ位置を新たな先端目標位置とし, 姿勢計画をやり直す. この一連の操作は, 評価対象となる姿勢候補が, あらかじめ設定した個数見つかるまで行われる.

前述したように, GA を適用した軌道計画は作業空間内の各 X-Z 平面において最終到達位置方向に順に行われ, これにより 1 つの X-Z 平面において 1 つの先端目標位置が決定される. 姿勢計画はこの先端目標位置が決定されるたびに, その先端目標位置において行われ, 1 つのマニピュレータ姿勢を決定する. つまり, 1 つの X-Z 平面において先端目標位置とマニピュレータ姿勢がそれぞれ決定され, その姿勢にマニピュレータが動作した後, 次の X-Z 平面において同様に各計画が行われマニピュレータは次の姿勢へと動作する. これを繰り返すことにより, 最終到

Fig. 5 Experimental environment and the underwater manipulator with 7 DOF

達位置までマニピュレータは動作していく。そのためマニピュレータ動作が終了後、次のX-Z平面における動作計画を行う前に作業環境の情報を更新することにより、作業環境の変化に対応したマニピュレータ動作を計画することが可能となる。先端軌道計画および姿勢計画から成る本動作計画手法の全体的な流れを図4に示す。

3. 実験

3-1 実験概要 本論文で提案する手法を用いて、移動障害物と静止障害物を設置した作業空間において実験を行った。実験環境を図5に、動作計画パラメータを表3に示す。また、マニピュレータの姿勢評価における e_{3m} の効果を確認するため、評

Table 3 Parameters of the motion planning

Cube size [mm]	10×10×10
Start position [cube]	X:50 Y:-30 Z:50
Goal position [cube]	X:35 Y:-80 Z:15
Start position of the moving obstacle [cube]	X:45 Y:-75 Z:0
Speed of the moving obstacle [mm/sec]	5
Motion of the moving obstacle	Linear uniform velocity
Position of the stationary obstacle [cube]	X:25 Y:-60 Z:40
Number of individuals of the GA	50
Upper limit of the GA generation	60
Number of candidates for a manipulator's posture	360

価式(2)から e_{3m} を除いて同様の実験を行った。これらの実験は、マニピュレータ先端をスタート地点からゴール地点まで、障害物を回避しつつ到達させることを目的としている。実験では4つの直列リンクからなる7関節機構の水中マニピュレータ(図5参照)を使用しており、流体は作業空間座標系Z軸と一様平行に流れるものと仮定した。静止障害物位置は既知のものであり、移動障害物位置は各動作計画時に更新される。

3-2 実験結果 実験の結果、マニピュレータは障害物に接触することなくゴール地点に到達することができた。図6に時間経過ごとの先端目標位置、マニピュレータ姿勢変化、及び障害物の移動変化を示す。マニピュレータの動作開始時において、各障害物と距離が離れているために障害物領域を含まない空間とみなし、先端軌道がゴール方向へ直線経路となっている。これは軌道計画において、いずれのキューブも f_{2i} の値が抑えられていたために f_{1i} 、 f_{3i} の効果が大きいキューブが決定されていたことが考えられる。マニピュレータ動作においては、全動作を通して大きな姿勢変化が行われないことが確認できる。これは先端軌道が極端な変化を行わずに決定されたことと、姿勢計画において評価要素 e_{1m} の効果より、姿勢変化の小さい候補が選ばれていたことによるものと考えられる。

次に図7は姿勢候補の評価要素から e_{3m} を除いた場合のマニピュレータの姿勢軌跡であり、この姿勢軌跡の外形線にて囲む面積は、全マニピュレータ動作における投影面積を意味する。これより、 e_{3m} の効果によりマニピュレータの投影面積が抑えられたことが確認できる。つまりマニピュレータは、流れ

Fig. 6 Manipulator's postures in objective tip positions and the trajectory of obstacles at interval of some times

Fig. 7 Projected areas through the whole manipulator's motion

に逆らう自身の面積を減らすことにより、流体抗力の影響を軽減させるような動作をとっていたことがわかる。

4. 結 論

本論文では、冗長軸を有する水中マニピュレータに対し、マニピュレータの先端軌道とマニピュレータ姿勢を別離に考える動作計画を提案した。キューブにより分割された作業空間において GA を適用することにより、先端目標位置の探索効率を上げると共に、冗長マニピュレータの利点を生かすことで、選抜された姿勢候補から水中環境に適したマニピュレータ姿勢を決定することが実験にて示された。また、空間的にインターバルをおき、動作計画を繰り返し行うことで、作業環境変化への即応性が確認された。

文 献

- (1) T.Ura, et al, R-One Robot Cruising Type Long-Range AUV with 12-Hour Duration, Equipped with Closed-Cycle (Air Independent) Diesel Engine System, *Sea Technology*, **41-7** (2000), 30-34
- (2) T.Aoki, et al., Deep and Long Range AUV "URASIMA", *Proc. ISOPE* (2001), 314-320.
- (3) S.Ishibashi, et al., A Simulation System for An Underwater Robot Based on Visual Data, *Proc. IECON* (2000), 2177-2182.
- (4) H.Tanaka, et al, Objective Recognition Using the Stereo Vision for Underwater Robot, *Proc. AROB* (2001), 284-287.
- (5) T.LOZANO-PEREZ, A Simple Motion-Planning

Algorithm for General Robot Manipulator, *IEEE J. of Robot. and Auto.*, **3-3**, (1987), 224-238.

- (6) 長谷川勉, 自由空間分類法によるマニピュレータの衝突回避動作計画, 計測自動制御学会論文集, **22-6**, (1986), 616-622.
- (7) 原功・長田正, Configuration 空間における障害物記述に関する考察, 日本ロボット学会誌, **11-2**, (1993), 255-262.
- (8) 河原崎徳之・田口幹, 自由局面によるマニピュレータの衝突回避経路計画, 日本ロボット学会誌, **14-6**, (1996), 860-867.
- (9) 丁全鋼・湯浅秀男・伊藤正美, 間接空間における障害物回避パス探索の一方法, 計測自動制御学会論文集, **26-2**, (1990), 219-224.
- (10) Ming-jun Zhang, et al. Motion Optimaization of Autonomous Underwater Vehicles by Genetic Algorithm, *SNAJ*, **182**, 491-497.
- (11) Xiao-ming Zeng et al. Evolutionary Path Lanning for Ship Using Genetic Algorithm, *Proc. MMAP* (2000), 431-436.
- (12) 安居院猛, 長尾智晴, ジェネティックアルゴリズム, (1993), 10, 照晃堂.
- (13) 伊庭齊志, 遺伝的アルゴリズムの基礎, (1994), 79, オーム社.