自律型海中ロボットの環境外乱中における 最適誘導及び運動制御

正員 金 岡 秀*

正員 浦

環*

Optimal Guidance and Motion Control of Autonomous Underwater Vehicle
under Environmental Disturbances

by Kangsoo Kim, *Member* Tamaki Ura, *Member*

Summary

This paper presents a numerical solution algorithm for the optimal guidance law of AUV (Autonomous Underwater Vehicle), when it transfers between two predetermined points in the region of environmental flow disturbances. In the formulation of optimal guidance law, position vector of the vehicle relative to the inertial frame is qualified as the state vector, while the vehicle's heading as the input. Optimized sequence of the vehicle's heading is obtained in time domain as the solution of the formulated optimal guidance law. Heading control of AUV using this optimized sequence as the reference completes the optimally guided navigation under the given disturbances. Proposed algorithm is applicable to time-varying flow disturbances as well as time-invariant ones, if only the distributions of them are known a priori. Minimum time guidances followed by the optimal heading tracking control are applied to the navigation of r2D4, which is the latest version of cruising type AUV, developed by IIS, the University of Tokyo. Effectiveness of the optimal guidance shows its primary dependency on the detailed distribution of flow disturbances.

1. 結 言

海底資源の探索や海中環境のモニタリングなど海洋環境に対する開発や保護の必要性が高まるに従い、様々な危険を伴う海中作業を人間の代わりに行うことが出来る新しいプラットフォームとして、自律型海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle ; AUV) の利用が近年活発になってきた。

情報転送やエネルギー供給用のケーブルを持たない

システム上の特徴により、自律型海中ロボットは高い作業性と運動自由度が確保できるが、任務途中のエネルギー補給が困難であることから、エネルギー消費をなるべく抑制する低速・低出力を基本にして設計される場合が多い。

海中環境には様々な原因による外乱があるが、代表的なものは、水面近くのみ存在する波浪外乱と一定深度以上に存在する潮流外乱である。外乱速度の大きさがロボットの巡航速度とほぼ同じオーダーになる場合、ロボットの運動には外乱による干渉で相当な漂流運動が発生する。このため、ロボットが外乱の存在する海域内で固定位置として定められた2点間を移動する場合、移動経路の選択により、所要時間やエネルギー消費に差が出ると予測できる。すなわち潮流のような流れ外乱は海中

* 東京大学生産技術研究所

ロボットの航行においてその運動を乱す単なる障害要素でなく、有効に利用する事で所要時間やエネルギー消費などの最適化が図れる活用環境要素であることが分かる。

潮流中における船の最短時間操縦の問題は Bryson と Ho によって変分法で定式化され、微分方程式として最適誘導則が導出されている³⁾。しかしこの微分方程式は船首の方位が入力としての解となる初期値問題であるにもかかわらず、正しい初期方位が未知で解の一部になっていることから、最適初期方位が解析的に求められる極めて単純な流れ分布以外には実際の適用が困難である。これはこの最適誘導則の基になっているオイラー・ラグランジュ方程式が2点境界値問題であるからで、このような問題は特殊の解法を用いてもその数値解を求めるのが容易でない。

最も基本的な2点境界値問題の解法としては shooting 法によって横断性条件を満たす正しい初期値を求め、オイラー・ラグランジュ方程式から時間領域における最適の制御入力を決めて行く手法が考えられる⁴⁾。しかし最短時間誘導問題の場合、終端時間が未知でかつ最小化すべき評価関数となるため、この手法を直接適用するのは困難である。

Crespo と Sun²⁾はセル・マッピング (Cell Mapping) 法によって渦流中における移動目標への最短時間追跡制御を行っている。この手法はシステム及び制約条件におけるいかなる非線形性にも対応できる長所があるが、より精度の高い解を得るためには計算領域を十分に細かく分割する必要がある、それに伴う計算時間の急激な増加に対応する必要がある。

本研究では上述のような特殊の数値手法を利用する代わりに、Bryson と Ho の最適誘導則の直接数値計算による環境外乱中における海中ロボットの最短時間誘導航行の実現を目指し、既知である任意分布の外乱に対して正しい初期方位の導出を可能にする数値アルゴリズムを開発し提案する。この数値解法は外乱の分布が既知でさえあれば適用可能なもので、時間不変だけでなく時間変動の分布に対しても最短時間誘導航行を実行する。

2. 自律型海中ロボット r2D4

2.1 r2D4 の概要

本研究では深海域資源探査や深海底熱水帯の観測を主な任務として著者らによって開発され、2003 年 7 月から本格的な実海域探査活動を行っている東京大学生産技術研究所の自律型海中ロボット r2D4 をプラントとして用いる。Fig.1 には r2D4 の外観を、また Table 1 には重要諸元を示す。

Fig.1 Autonomous Underwater Vehicle r2D4

Table 1 Principal dimensions and powering specifications of r2D4

Principal Dimensions		Powering Specifications	
Length Overall [m]	4.4	Designed Speed [m/s]	1.544
Main Body Width [m]	1.08	Drag [N] at Dsg. Speed	128.5
Main Body Height [m]	0.81	Max. Oper. Range [km]	60
Mass [kg]	1510	Max. Oper. Depth [m]	4000

2.2 r2D4 のダイナミックモデル

海中ロボットのダイナミックモデルは、三次元空間における 6 自由度の連成運動方程式として表される。本研究では数値流体力学的解析によって定常航行中の r2D4 に作用する流体力を求め、その成分の運動学的変数及びアクチュエータ入力に対する微分値を計算し、運動方程式の係数項である安定微係数を導出した³⁾。

式(1)は状態空間モデルとしてまとめた r2D4 の横方向運動応答 (スウェイ、ロール及びヨー) に対する運動方程式である。式(1)で、スウェイ速度 v [m/s]、ロール角速度 p [rad/s]、ヨー角速度 r [rad/s] 及びロール角 ϕ [rad] は状態ベクトル、また主推進器の首振り角 δ_{pr} [rad] 及び左/右のエレベータ角 δ_{el} , δ_{er} [rad] は入力ベクトルとなる。式(1)の速度、加速度及びアクチュエータ入力は、r2D4 の重心に原点を持つ動座標系 (Fig.2 の $o-x'y'$ 座標系) に対するものである。

Fig.2 Lateral motion responses and actuations with reference frames

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5266 & 0.0029 & -0.7754 & -0.0052 \\ -3.5308 & -4.7898 & 7.9442 & -10.5536 \\ -0.1472 & -0.0334 & -0.5742 & -0.0722 \\ 0.0 & 1.0 & -0.0129 & 0.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0335 & -0.0011 & 0.0011 \\ 0.0244 & -2.1704 & 2.1704 \\ 0.0486 & -0.0149 & 0.0149 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{pr} \\ \delta_{er} \\ \delta_{el} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 方位制御システムの設計

r2D4 の横方向運動は方位制御によって補償される。方位制御における制御入力主推進器の首振り角 $\delta_{pr}(t)$ 、出力はロボットの方位 $\psi(t)$ となる。Fig.3 のブロック線図から分かるように r2D4 の方位制御システムにおけるコントローラのモデルとしては PID 補償を用いる。

Figs.4~5 に設計した方位制御コントローラによる目標方位追従制御の結果を示す。Fig.4 の制御入力および Fig.5 の方位出力はともに実機実験の結果と良く一致しており、PID 制御のシミュレーションモデルが高い精度で実機のシステムを表していることが確認できる。

Fig.3 Heading control system of r2D4

Fig.4 Actuator input for heading tracking control

Fig.5 Results of heading tracking control

3. 流れ外乱中における最適誘導航行

3.1 問題の定義

潮流などの環境外乱の存在する海域で、航行の所要時間やエネルギー消費などを最少に抑えながら海中ロボットを目標位置まで移動させる問題を考える。主推進器の駆動モーターへの供給電流を一定値に固定すると、目標位置到着までの総消費エネルギー量は所要時間に比例し、最短時間航行は同時に最少エネルギー消費航行となる。航行中のエネルギー補給が困難な自律型海中ロボットのシステム上の制約を考慮すると、エネルギー最適の航法の開発は、実用上極めて重要である。

3.2 問題の定式化

最適誘導問題においてロボット及び外乱の速度は慣性座標系を基に記述する。ロボットの方角 ψ は Fig.2 に示すように慣性座標系とロボットに固定されている動座標系の x 軸がなす角と定義する。外乱速度の分布は既知のもので、時間と空間の関数として記述できるものとする。主推進器の駆動モーターが一定の電流で動作しているときの静水中で発生するロボットの速度 U_0 と、外乱速度 (u_e, v_e) のあいだに重ね合わせが有効であると仮定すれば、外乱のある海域におけるロボットの速度は次式で表される。

$$u = \dot{x} = U_0 \cos \psi + u_e(x, y, t) \quad (2a)$$

$$v = \dot{y} = U_0 \sin \psi + v_e(x, y, t) \quad (2b)$$

以下の数式表記において太字はベクトル、或いは行列を表す記号として使われる。また最適化された変数に対してはその右上に星印をつける。

式(2)は $x=(x, y)$ を状態ベクトル、 $u=\psi(t)$ を制御入力とする非線形の状態空間モデルとなっており、式(3)はその一般式を表す。

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3)$$

求められている航法が最短時間でロボットを目標位置まで誘導するものであるため、最小にすべき評価関数は終端時間そのものになる。

$$J = \varphi\{x(t_f), t_f\} + \int_0^{t_f} L(x, u, t) dt = t_f \quad (4)$$

終端時間にピークは目標位置 $x_f=(x_f, y_f)$ に着いていなければならないことから、状態ベクトルには次のような拘束条件が設けられる。

$$\eta\{x(t_f), t_f\} = x(t_f) - x_f = 0 \quad (5)$$

共状態量 (随伴変数) のベクトルを $\lambda \in \mathbb{R}^n$ とし、ハミルトニアン H を

$$H = L(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, t) \quad (6)$$

として定義すると、式(3)を満たしながら式(4)の値を最

小にする最適の制御入力 $\psi^*(t)$ は、式(7)~(10)として与えられる連立の偏微分方程式（オイラー・ラグランジュ方程式）の解として求められる¹⁾。

$$\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = f \quad (7)$$

$$-\dot{\lambda} = \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial f^T}{\partial x} \lambda + \frac{\partial L}{\partial x} \quad (8)$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial L}{\partial u} + \frac{\partial f^T}{\partial u} \lambda \quad (9)$$

$$(\varphi_x + \eta_x^T v - \lambda)^T \Big|_{t_f} dx(t_f) + (\varphi_t + \eta_t^T v + H) \Big|_{t_f} dt_f = 0 \quad (10)$$

式(3)~(10)において $x \in R^n$, $u \in R^m$ は状態及び制御入力のベクトル, t_f は終端時間を表しており、各ベクトルの次元は $n=2$, $m=1$ である。また L はラグランジアン, φ は終端状態に対する重み関数である。 $\eta \in R^p$, $v \in R^p$ は終端状態における拘束条件及びそれに随伴する乗数で、 $p=2$ の次元を持つ。

3.3 最適誘導則の導出

本最適誘導問題の動的システムを表わす式(2)及び境界条件である式(5)をオイラー・ラグランジュ方程式（式(7)~(10)）に適用することによって、与えられた外乱分布(u_c, v_c)に適応し、目標位置までの最短時間航行を遂げる最適誘導則が、方位 $\psi(t)$ に関する微分方程式として導出される¹⁾。

$$\dot{\psi} = \sin^2 \psi \frac{\partial v_c}{\partial x} + \left(\frac{\partial u_c}{\partial x} - \frac{\partial v_c}{\partial y} \right) \sin \psi \cos \psi - \cos^2 \psi \frac{\partial u_c}{\partial y} \quad (11)$$

4. 最適誘導則の数値解法

4.1 2点境界値問題

式(11)の最適誘導則はロボットの方位 $\psi(t)$ に対する常微分方程式で、初期方位が分かっており、流れ外乱の速度分布が既知で微分可能であれば Runge-Kutta 法などによって数値解が求められる。しかし正しい初期方位は実際には未知でありかつ解の一部となっているが、これは式(11)の基になっているオイラー・ラグランジュ方程式が、状態が共状態に関して必ず未知の初期値を持ついわば2点境界値問題を構成しているからである^{1,4,5,6)}。

本研究では最適性の定義に基づき、任意の非最適航行の結果を参照する試行錯誤的初期方位の探索によって、最短時間誘導を実現する正しい初期方位 ψ_0^* を導き出す数値アルゴリズムを開発し、提案する。この手法で求めた初期方位を適用して式(11)の最適誘導則を解くと、与えられた外乱分布においてロボットを最短時間で目的位置まで誘導する最適方位の時系列 $\psi^*(t)$ が求められる。

4.2 最適初期方位の探索

開発した数値アルゴリズムが最適の初期方位を求める過程を以下に説明する。まず任意の移動方針、すなわち誘導則によってロボットを目標位置まで移動させ、そのときの所要時間 $t_{f,ref}$ を記録しておく。この航行を“参照航行”，また対応する所要時間は“参照所要時間”と呼ぶ。参照航行における誘導則には何の制約もなく、式(5)のように終端状態が目標位置に収束することだけが要求されるため、たとえば Fig.6 に示すいずれの経路による航行も参照航行として使われる。

Fig.6 Arbitrary reference navigations

次に $0 \sim 2\pi$ の区間を等間隔 $\Delta\psi = 2\pi/N$ に分割して離散化した初期方位

$$\psi_0^{(i)} = i\Delta\psi \quad \text{for } i=0,1,\dots,N-1 \quad (12)$$

に対して式(11)の最適誘導則を時間領域で数値積分し、 $\psi(t)$ の時系列を求めて行く。このとき、 $\psi_0^{(i)}$ を i 番目の“試行初期方位”，また対応する航行を“試行航行”と記する。ここで注意するのは、最適の初期方位の探索には数値積分を時刻 $t=t_{f,ref}$ まで行えば十分ということである。前述のように参照航行とは任意の方針で目標位置まで移動する航行であるため、非最適のものである。最適性の定義により、もしある k 番目の試行航行に対応する初期方位 $\psi_0^{(k)}$ が、近似的に正しい最適の初期方位 ψ_0^* に当たっているとしたら、ロボットは必ず次式を満たす終端時間 t_f^* で目標位置を通過する。

$$0 < t_f^* \leq t_{f,ref} \quad (13)$$

すなわちいかなる任意の方針でロボットを目標位置まで移動させても、その所要時間は必ず最適誘導則に従い最適の経路を辿る航行の所要時間よりは長くなるので、ある試行初期方位から出発させた航行が最適のものであるかを確認するためには、 $0 < t \leq t_{f,ref}$ の範囲で式(11)の数値計算を行い、生成経路が途中で目的位置を通過しているかどうかを確認するのがその必要条件となる。もしある経路が時刻 $t=t_f^*$ で目標位置を通過していると、そ

の時刻にロボットは一旦目標位置に着いていたということになるが、正しい初期方位を与えた場合に限りて式(11)の誘導則による航行でロボットが目標位置に着けることを考えると、当該試行航行は近似の最適航行としてみなすことができる(Fig.7)。

Fig.7 Approximate optimal navigation among discrete trial navigations

試行航行は離散の初期方位に対して行われるものなので、一点として与えられる目標位置をきれいに通過する経路を得るのは極めて難しい。ある i 番目の試行航行による経路から目標位置までの最近距離を $l_{min}^{(i)}$ とすれば、式(14)の条件を満たす k 番目の航行は試行航行の中で最も小さい距離偏差で目標位置に近寄っているものとなり、目標位置を通過する真の最適航行に対する近似の最適航行としてみなすことができる(Fig.8)。

$$l_{min}^{(k)} \leq l_{min}^{(i)} \quad \text{for } i=0,1,\dots,N-1 \quad (14)$$

Fig.8 Determination of the approximate optimal navigation

式(14)を満たす最近距離の最小値 $l_{min}^{(k)}$ が 0 に近いほど対応する k 番目の試行航行はより高い精度で真の最適航行に近似していることになる。もしこの $l_{min}^{(k)}$ がなお大きい場合は、 $\psi_0^{(k)}$ を中心とする離散の初期方位の区間 $\psi_0^{(k-1)} \leq \psi_0 \leq \psi_0^{(k+1)}$ をもっと細かく分割し、この区間において前述のとおり試行航行を繰り返すことによってより精度の高い解が求められる。

5. 数値計算及び結果

5.1 線形せん断流れ外乱中における最適航行

ここでは、開発した手法を時間不変及び変動の流れ外乱中における最短時間誘導の諸問題に適用する。

まず、式(15)のように縦軸方向のみに流速が線形変化するせん断流れの外乱中における最適誘導の問題について考える。この問題は、Bryson と Ho によって取り扱われ、解析解としての最適誘導則が導出されている。

$$u_c(x, y) = 0 \quad (15a)$$

$$v_c(x, y) = -U_0(x/h) \quad (15b)$$

式(15b)の U_0 には 1.544 m/s, h には 100 m の値を使って数値計算を行う。また初期位置は $(x_0, y_0) = (-186 \text{ m}, 366 \text{ m})$ 、終端(目標)位置は原点とする。参照航行としては制御対象の方位を常に相対運動中の目標物に向わせ、衝突が起こるまで対象物を目標物に誘導するいわば比例航法(Proportional navigation)による航行を使う。目標方位の追従制御は対象ロボットである r2D4 の方位制御システムによって行われる。

Fig.9 に示すように本研究で提案した数値手法による計算結果は解析解と極めて良く一致しており、開発した数値手法が正しく動作していることが確認できる。

Fig.9 Optimally guided navigation of AUV r2D4 in a shearing flow

Table 2 に各航行の結果をまとめておく。エネルギー消費量は主推進器の駆動モーターが常に一定の電流で動作している条件で計算したものである。

Table 2 Navigation results in a shearing flow

Results	Navigation		
	Optimal		Proportional navigation
	Analytic	Numerical	
Initial heading [deg]	345	345.0	296.9
Navigation time [sec]	353.8	353.7	739.2
Energy consumption [kJ]	70.2	70.2	146.7

5.2 2点渦による外乱中における最適誘導航行

次に湧き出し (Source) と渦 (Vortex) の重ね合わせで構成される二つの特異点を作り出す外乱分布中における最適誘導航行の問題を考える。湧き出しの強さが m 、渦の強さが K で特異点の位置を (x_{vs}, y_{vs}) としたら、海域内の任意位置 (x, y) における流速は次式で計算される。

$$u_c(x, y) = \frac{m(x - x_{vs}) - K(y - y_{vs})}{r^2} \quad (16a)$$

$$v_c(x, y) = \frac{m(y - y_{vs}) + K(x - x_{vs})}{r^2} \quad (16b)$$

式(16)で r は流速が求められる海域内の位置と特異点との間の距離である。

数値計算に使われる m 及び K の値を Table 3 にまとめておく。特異点は自分の置かれた位置では $r \rightarrow 0$ となり、無限の速度を導いてしまう。この無限の速度による計算上の破綻を防ぐため、それぞれの特異点を作り出す流速の大きさには上限値を設けた (Table 3)。

本計算では参照航行としての比例航法の他にも、外乱による漂流運動が打ち消されるようロボットの方位を補償し、初期位置と目標位置を結ぶ直線経路にロボットを追従させるいわば直線追従制御³⁾のコントローラも設け、その航行の結果を示す。計算条件としてはロボットの初期位置が $(x_0, y_0) = (-400 \text{ m}, 600 \text{ m})$ 、終端位置が原点で、静水中の巡航速度を $U_0 = 1.544 \text{ m/s}$ と設定した。

各誘導方針によって決められた目標方位は、r2D4 の方位制御システムによって追従される。Fig.10 には数値計算の結果として得た航行経路を示す。

Table 3 Properties of vortical sources

No.1 Vortical source			No.2 Vortical source		
m	K	vel. limit [m/s]	m	K	vel. limit [m/s]
-20	-25	0.8004	-20	20	0.7071

Fig.10a Navigation trajectories in a flow by two vortical sources (Case 1 of 3, $d_{vs}=335.4 \text{ m}$)

Fig.10b Navigation trajectories in a flow by two vortical sources (Case 2 of 3, $d_{vs}=223.6 \text{ m}$)

Fig.10c Navigation trajectories in a flow by two vortical sources (Case 3 of 3, $d_{vs}=111.8 \text{ m}$)

海域の流れ分布が完全一様流になっている場合の最適誘導航行の問題を考える。一様流では流速成分の勾配が全て 0 となり、式(11)から次のような最適誘導則が得られる。

$$\psi = 0 \quad \text{therefore,} \quad \psi = \text{const.} \quad (17)$$

すなわち一様流中における最適誘導航行は初期位置と終端位置を結ぶ直線経路への追従航行と等しくなることが分かる。Fig.10a の場合は二つの特異点間の距離 d_{vs} が充分遠く、直線経路の形成される中央海域の外乱分布は流速が遅く一様流に近い様子になっているため、最適誘導による航行経路は直線経路とわずかな偏差で近似している。

二つの特異点が近づくとともに、流れ場の乱れや流速もしだいに大きくなる。強化された中央海域の逆流を回避しながら目標位置に向っている順流成分をうまく利用するよう、最適誘導のコントローラは航行距離の増加

にもかかわらず、r2D4 に No.2 の特異点を迂回し目標位置へ進むよう指示している (Fig.10b)。特異点間の距離がもっと近づくにつれ、外乱分布の乱れと流速もさらに強くなる。Fig.10c の流れ分布においては、r2D4 が No.1 の特異点を迂回することによって最短時間航行を達成している。Table 4 にそれぞれの外乱分布に対する各航行の結果をまとめておく。Fig.10a の外乱分布については各航行の経路にわずかの差しかないことから予測できるように、最適誘導の効果がほとんど現れていない。しかし二つの特異点が近づき、より複雑で強い逆流の流れ分布へ変化していくにつれ、最適誘導の効果も著しくなっている。

Table 4 Navigation results in a flow by two vortical sources

	Navigation Time [sec]		
	Non-Optimal		Optimal
	Proportional navigation	Straight-line tracking	
Case 1	523.8	518.4	518.2
Case 2	534.6	534.6	523.2
Case 3	583.2	577.8	493.8

5.3 時間変動外乱中における最適誘導航行

時間変動の外乱中における最適誘導航行の問題を考える。式(2)に表されるように、式(11)の最適誘導則は時間 t とも関数関係を持つ外乱分布に対して導出されたものなので、ある時刻と場所で流速が一義的に決定できるならば、潮汐のように時間変動する流れ外乱に対しても適用可能である。Fig.11 に時間変動する外乱中における r2D4 の最適誘導航行の結果を示す。本数値計算において初期位置は $(x_0, y_0) = (-600 \text{ m}, 800 \text{ m})$ 、目標位置は原点で、静水中における r2D4 の巡航速度 $U_0 = 1.544 \text{ m/s}$ を計算条件として設定する。

Fig.11a Navigation trajectories in a time-varying flow (1 of 4)

Fig.11b Navigation trajectories in a time-varying flow (2 of 4)

Fig.11c Navigation trajectories in a time-varying flow (3 of 4)

Fig.11d Navigation trajectories in a time-varying flow (4 of 4)

比例航法や直線経路の追従による航行では、r2D4 が海域のほぼ真ん中に着いたところ発生した巡航速度を超える強い回転流れの外乱に流され、目標位置への進行が一時不能になっている。しかし最初からこのような状況の発生を把握している最適誘導のコントローラは、ロボットを直線経路から右上の方向へずれるように誘導し、強い逆流の回避及び順流の積極的な活用を試み、 $t=623$ sec でロボットを目標位置に到着させている (Fig.11c)。次いで直線追従航行 ($t=896$ sec)、最後に比例航行 ($t=902$ sec, Fig.11d) の順番で r2D4 を目標位置に着かせている。

Fig.12 は各航行における方位の時系列を、Fig.13 は最適方位追従制御の結果として得られたアクチュエータ入力 (主推進器の首振り角) の時系列を示す。

Fig.12 Heading sequences by navigations in a time-varying flow

Fig.13 Actuator input for the optimal heading tracking control

5. 結 論

本研究では自律型海中ロボットが航行域内に存在する潮流などの流れ外乱を活用し、最短時間で既定の終端目標位置への移動を実現する最適誘導則の数値解法を開発した。この数値手法で求められた最適方位の時系列

は方位制御システムに送られ、これを目標値にする追従制御によって与えられた外乱分布に適応する最適誘導航行が実行される。また、本誘導・制御問題のプラントモデルとしては、東大生研の開発した実海域航行型海中ロボット r2D4 を対象とした。

開発した数値手法は海域内の外乱分布が時間と空間の関数として記述され、その速度が微分可能でさえあれば、いかなる外乱分布に対しても対応可能である。

最適誘導の効果は与えられる外乱分布の様子によって大きく変わる。一樣流のようにその効果が得られない場合もあるが、流速が速く多向性で複雑な流れ分布になるほど、より高い効果が期待できる。

謝 辞

本研究の一部は「文部科学省科学研究費学術創成」及び「造船学術研究推進機構」から研究費支援を得て行われたものである。また著者 (金) は文部科学省 21 世紀 COE プログラム「機械システム・イノベーション」から支援を受けている。

参 考 文 献

- 1) Bryson, A.E., Jr., and Ho, Y.C. : Applied Optimal Control, Taylor & Francis (1975)
- 2) Crespo, L.G., and Sun, J.Q. : Optimal Control of Target Tracking with State Constraints via Cell Mapping, J of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 24, No. 5, pp. 1029-1031 (2001)
- 3) Kim, K., and Ura, T. : 3-Dimensional Trajectory Tracking Control of an AUV "R-One Robot" Considering Current Interaction, Proc 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-2002, Kita-Kyushu, Vol. 2, pp. 277-283 (2002)
- 4) 大塚敏行 : 非線形最適フィードバック制御のための実時間最適化手法, 計測と制御 第36巻 第11号, pp. 776-783 (1997)
- 5) 鈴木真二 : 最適制御問題の数値解法, 計測と制御 第36巻 第11号, pp. 784-786 (1997)
- 6) 金岡秀, 浦環 : 自律型海中航行ピークルの環境外乱中における燃料最適誘導及び追従制御, 日本造船学会講演会論文集 第二号, pp. 153-154 (2003)