

# マニピュレータを搭載した水中ロボットの開発

—動作シミュレーションとモジュール構造設計に基づく水中マニピュレータの開発・設計—

学生員 石塚 誠\* 正員 石井 和男\*

Development of an AUV with a manipulator

- An underwater manipulator based on motion simulation and modular concept -

by Makoto Ishitsuka, *Student Member* Kazuo Ishii, *Member*

## Summary

We have been developing an autonomous underwater vehicle (AUV) with a manipulator aiming at underwater operations using AUVs.

At first, we describe an underwater manipulator which is designed based on motion control simulation and the modular concept. From the results of simulation, the specifications of the manipulator such as maximum torque and velocity are decided. As the waterproof mechanism of the manipulator, we introduced the magnet coupling structure to transfer motor torque from inside motor to outside gear. And the modular concept is introduced to realize reliability and good maintenance. Each link of manipulator has the same structure and includes a motor and a motor driver inside. Multi degree of freedom manipulator can be realized by combining same link modules. The modular concept is introduced into the AUV design, such that a functional device can be plugged into a motherboard to be less-wiring. Finally, the experimental results using an AUV with a manipulator are discussed.

## 1. 緒言

海洋は地球表面上の70%以上を占めており、魚介類といった水産資源の利用や船舶による物流の場、空港や埋立地といった空間利用など、実に様々な局面で利用されている。しかし、これらの海洋利用は主に海面か浅海に限られており、大部分は未開の地である。特に海底に目を向けるとその平均深度は3,800[m]と深く、現在も未知の生物や現象の発見が相次いでいる<sup>1)2)</sup>。

現在では様々な手法により海洋の動態や生物活動、海底変動など様々な海洋諸現象に関して調査・研究が進められており、海底鉱産物の産出や海底ケーブルの敷設といった海中における活動も増えてきている。しかし海中は、高圧力、暗闇、視認性の悪さ、低温などの問題があり、人間が直接作業を行うことが難しいため、安全や効率の観点から海中ロボットの開発および運用が期待されている<sup>3)4)5)</sup>。

海洋諸現象の調査・研究が進めば、海洋保全や資源利用などの海洋開発がより大規模になっていくことが考えられる。そうなれば、海中における作業は増加し、複雑化することが予測される。より複雑な作業を行うには水中マニピュレータを搭載した水中ロ

ボットが必要となるが、マニピュレータを搭載した自律型水中ロボットはまだ限られている。

本研究ではロボット本体として自律型水中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle:AUV) である”Twin-Burger 1号機 (Fig. 1)<sup>6)</sup>”を用い、マニピュレータを開発・搭載することにより、マニピュレータを搭載した自律型水中ロボットの実現を目指す。

開発においては、信頼性の向上とメンテナンス性の向上を目的としてシステムのモジュール化を図った。マニピュレータは1リンク毎にモータやモータドライバを含んだ自己完結機構とし、水中ロボットのシステムは機能毎に統合し、マザーボードにプラグインできる構造とした。

本論文ではまず、水中ロボットの動作シミュレーションを行ってマニピュレータの設計に必要なパラメータの導出を行い、導出したパラメータを設計性能として、モジュール型のマニピュレータを設計・開発を行った。また、センサの追加に従い、モジュール化を施した制御システムを構築し、水中ロボット”Twin-Burger 1号機”の制御システムを刷新した。

## 2. 水中ロボットの動作シミュレーション

最初に、水中ロボットの動作シミュレーションを行った。本研究で開発するロボットのシミュレーションモデルを作成し、力学的な関係式を導出する。次いで、制御系を組み込んで動作シ

\* 九州工業大学大学院 生命体工学研究科

ミュレーションを行い、水中ロボットに必要な力やトルクを推定した。

## 2.1 水中ロボットの力学

### 2.1.1 ロボットのモデリング

シミュレーションに用いたモデルの座標系及び主な変数をしたロボットを Fig. 2 に示す<sup>7)</sup>。また、モデリングを行うにあたり以下の仮定を設定した。

- 1) ロボットを構成する要素はすべて剛体とする。
- 2) ロボットは水面に水平な二次元平面内で運動し、鉛直方向への運動は行わない。
- 3) 静止流体中で運動する。

本論文で使用する主な記号を以下に示す。

- $\Sigma_U$ : 慣性座標系  
 $\Sigma_i$ : 関節  $i$  を原点としてリンクに固定した座標系 ( $i = 0, 1, 2$ )  
 ${}^A R_B$ :  $\Sigma_B$  から  $\Sigma_A$  への座標変換行列  
 $\mathbf{x}_0$ :  $\Sigma_U$  におけるベースの位置・姿勢ベクトル  
 $l_i$ : 各リンクの長さ  
 $\mathbf{x}_E$ :  $\Sigma_U$  における手先の位置ベクトル  
 $\mathbf{p}_i$ :  $\Sigma_U$  における関節  $i$  の位置ベクトル  
 $\mathbf{v}_i$ :  $\Sigma_i$  における関節  $i$  の速度ベクトル  
 $\theta_i$ : 関節  $i$  の関節角度  
 $\phi_i$ :  $\Sigma_i$  における関節  $i$  の角度ベクトル  
 $\omega_i$ :  $\Sigma_i$  における関節  $i$  の角速度ベクトル  
 $\phi$ : ロボット全体の関節角度ベクトル ( $= [\theta_1 \ \theta_2]^T$ )  
 $m_i$ : リンク  $i$  の質量  
 $M_{ai}$ : リンク  $i$  の各軸方向の付加質量行列

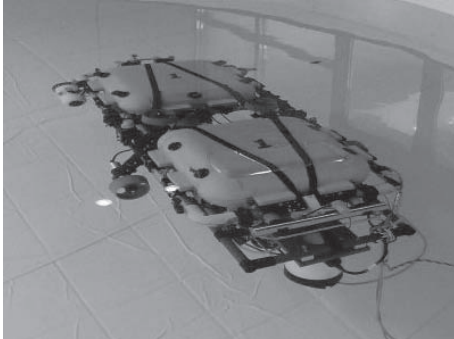


Fig. 1 AUV "Twin-Burger"

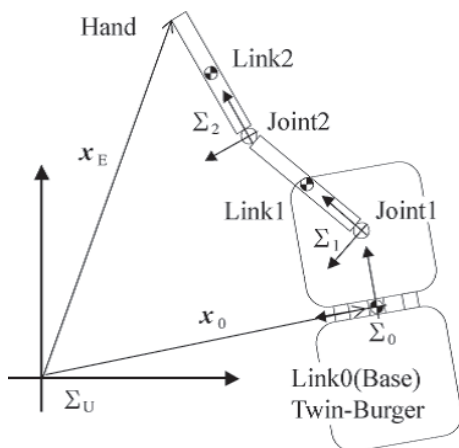


Fig. 2 Model of Twin-Burger with 2-link manipulator

- $I_i$ : リンク  $i$  の各軸方向の慣性モーメント行列  
 $I_{ai}$ : リンク  $i$  の各軸方向の付加慣性モーメント行列  
 $\hat{\mathbf{x}}_i$ :  $\Sigma_i$  における関節  $i$  から関節  $(i+1)$  までの位置ベクトル  
 $\hat{\mathbf{a}}_i$ :  $\Sigma_i$  における関節  $i$  からリンク  $i$  の重心までの位置ベクトル  
 $E$ : 単位行列

### 2.1.2 運動学関係式

使用するロボットモデルの位置・姿勢の幾何学的な関係について以下に述べる。ロボット本体側から順に各関節の位置・姿勢を順に、以下のように計算していく<sup>8)</sup>。

$$\mathbf{p}_i = {}^U R_i \hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{p}_{i-1} \quad (1)$$

$$\phi_i = {}^i R_{i-1} \phi_{i-1} \quad (2)$$

最終的に手先位置を導出し、時間微分してまとめると以下のような変形できる。

$$\dot{\mathbf{x}}_E = \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}\dot{\phi}. \quad (3)$$

上式中の行列  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  については Appendix を参照されたい。

### 2.1.3 運動量方程式

水中で運動するロボットには常に流体力が影響するため、運動量が保存されない。そこで、運動量の時間変化が外力と等価と考え、運動量方程式を導出する。ロボット全体の水平方向の運動量を  $\boldsymbol{\eta}$ 、ロボット全体の回転方向の運動量を  $\boldsymbol{\mu}$  とすると、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= [\eta_1 \ \eta_2 \ 0]^T \\ &= \sum_{i=0}^2 [{}^U R_i (m_i E + M_{ai}) \dot{\mathbf{a}}_i] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &= [0 \ 0 \ \mu_3]^T \\ &= \sum_{i=0}^2 {}^U R_i (I_i + I_{ai}) \boldsymbol{\omega}_i \\ &+ \sum_{i=0}^2 \mathbf{p}_i \times [{}^U R_i (m_i E + M_{ai}) \dot{\mathbf{a}}_i] \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $\dot{\mathbf{a}}_i = \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \hat{\mathbf{a}}_i$  である。

式 (4), (5) をまとめると

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= [\eta_1 \ \eta_2 \ \mu_3]^T \\ &= \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{D}\dot{\phi}. \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで、 $\mathbf{C} \in R^{3 \times 3}$  と  $\mathbf{D} \in R^{3 \times 2}$  はそれぞれベースの姿勢角および各関節角度、付加質量と付加慣性モーメントを含む行列であり、詳しくは Appendix を参照されたい。

### 2.1.4 流体力及び付加慣性力

物体が流体中で運動するとき、その物体は周囲の流体により反力をうける<sup>9)</sup>。本項では、モデル化したロボットに加わる流体力を導出する。

・ マニピュレータに加わる流体力

マニピュレータを円柱型と近似し、各流体力を導出する。付加質量・付加慣性モーメントは主に物体の形状に影響され、代表的な形状の物体に対する付加質量・付加慣性モーメントの値は文献<sup>10)</sup>に示されている値を用いて導出した。

流体抗力項は以下の式で導出できる<sup>11)</sup>。

$$\mathbf{f}_{di} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i \int_0^{l_i} |\mathbf{w}_i| \mathbf{w}_i d\hat{\mathbf{x}}_i, \quad (7)$$

$$\mathbf{t}_{di} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i \int_0^{l_i} \hat{\mathbf{x}}_i \times |\mathbf{w}_i| \mathbf{w}_i d\hat{\mathbf{x}}_i \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

ただし、 $\mathbf{w}_i = \dot{\mathbf{p}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \hat{\mathbf{x}}_i$  であり、 $\rho$ ,  $C_{Di}$ ,  $D_i$  はそれぞれ流体密度、抗力係数、リンク幅を示す。

・AUV に加わる流体力

AUV “Twin-Burger” はオープンフレーム構造を採用しており複雑な形状をしているため、厳密解の導出は難しい。そのため実験により近似したパラメータを運動方程式に用いる<sup>6)</sup>。

$$M_x \ddot{x}_0 + C_x \dot{x}_0 |\dot{x}_0| = F_x \quad (9)$$

$$M_y \ddot{y}_0 + C_y \dot{y}_0 |\dot{y}_0| = F_y \quad (10)$$

$$M_z \ddot{\phi}_0 + C_z \dot{\phi}_0 |\dot{\phi}_0| = T_z \quad (11)$$

ここで  $M$  は付加質量を含んだ質量、 $C$  は流体力による減衰係数、 $F$  及び  $T$  はスラストによって与えられる  $x$ ,  $y$  方向の推進力または  $z$  軸周りのトルクを表す。

### 2.1.5 運動方程式

ロボットの運動方程式をニュートン・オイラー法により求める。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{f}_D = \boldsymbol{\tau}, \quad (12)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & \phi_0 & \phi_1 & \phi_2 \end{bmatrix}^T$$

ここで、 $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{5 \times 5}$  は付加質量及び付加慣性モーメントを含んだ行列、 $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{5 \times 1}$  は遠心力項及びコリオリ力項、 $\mathbf{f}_D \in R^{5 \times 1}$  は流体抗力項、そして  $\boldsymbol{\tau} \in R^{5 \times 1}$  はスラストと関節軸で発生する推力と関節トルクである。各行列の詳細については Appendix を参照されたい。

## 2.2 経路計画

本項ではロボットの経路計画に関して述べる

### 2.2.1 動的可操作性

水中ロボットは浮遊ロボットであり、周囲の流体から常に影響を受けている。この二つの大きな特徴のために、高精度な位置制御を行うことは難しい。そのため、手先が目標位置に到達した後、外力に対して最も手先を動かしやすい姿勢となる経路計画を行う。

マニピュレータは姿勢によって手先の動かしやすさが変化する。これを可操作性と呼び、マニピュレータの性能を評価する指標の一つである。流体力という外力がかかり、土台が固定されていない浮遊型ロボットである水中ロボットにおいては、この可操作性を直接適用することはできない。そのため、流体力を考慮した動的可操作性が提案されており<sup>14)15)</sup>、これを用いてマニピュレータの姿勢を決定する。Fig. 3に動的可操作性の概念図を示す。

まず、運動学関係式 (3) を微分してまとめると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0 \\ \dot{\mathbf{x}}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\mathbf{x}}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{A}} & \dot{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Table 1 Preset value of joint angle

Simulation Number	No. 1	No. 2	No. 3
Angle of Joint 0 [deg]	0	0	0
Angle of Joint 1 [deg]	30	48.3	60
Angle of Joint 2 [deg]	60	96.6	120

このとき、上式を運動方程式 (12) に代入して整理すると、

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\mathbf{x}}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}} \quad (14)$$

ただし、 $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$  は以下の式で示される。

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{\tau}} = & \boldsymbol{\tau} - \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{f}_D \\ & + \mathbf{M}(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{A}} & \dot{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

これは手先位置と関節トルクを関係付ける式であり、マニピュレータがある姿勢をとるとき実現できる加速度を導出できる。手先の実現できる加速度をマニピュレータの姿勢から導出できる。このとき、手先位置が実現可能な加速度の集合を求めると Fig. 3 のように楕円体となり、動的可操作性楕円体と呼ばれる<sup>17)</sup>。この楕円体の大きさが手先を動かしやすさを表現するため、この楕円体の面積が最大となる姿勢が外乱に対する補償性能が最も高い姿勢であるといえる。

シミュレーションで用いるモデルの動的可操作性楕円体を Fig. 4に示し、このときの関節角度を Table 1に示す。このうち、No.2 で示された関節角度の組み合わせが動的可操作性楕円体の面積が最大になる姿勢である。

### 2.2.2 経路計画

動的可操作性を用いた経路設定のアルゴリズムを以下に示す。

- (1): 手先の目標位置を設定
- (2): 動的可操作性を考慮してマニピュレータの姿勢を決定
- (3): (2) を実現するベースの位置・姿勢を決定
- (4): 現在位置から最終姿勢までの直線軌道を生成
- (5): (4) で生成了軌道から目標加速度を導出

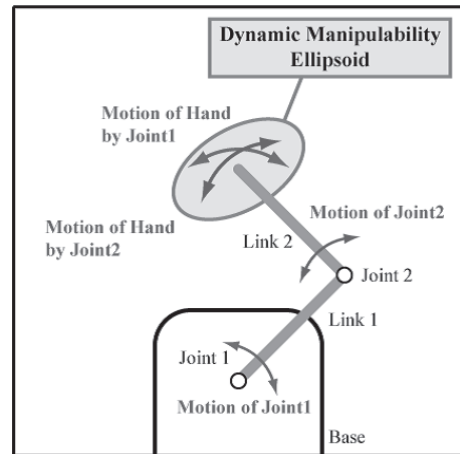


Fig. 3 Dynamic manipulability ellipsoid

Table 2 Simulation parameter of the robot

	Base	Link1	Link2
Mass [kg]	120.00	6.00	6.00
Moment of inertia [kg m <sup>2</sup> ]	1.33	0.19	0.19
Link length (x axis) [m]	1.30	0.50	0.50
Link length (y axis) [m]	0.65	0.12	0.12
Added mass(x) [kg]	320.10	2.00	2.00
Added mass(y) [kg]	191.90	5.60	5.60
Added moment of inertia [kg m <sup>2</sup> ]	29.40	0.45	0.45

2.3 動作シミュレーション

以上のようにロボットのモデルを用いて、動作シミュレーションを行った。

式(3), 式(6)を微分してまとめると、手先位置及びベースの位置・姿勢と各関節角度及びベースの位置・姿勢を関係づける分解加速度制御則が得られる<sup>12)13)</sup>。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} + \mathbf{E} & \mathbf{D} \\ \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

ただし、

$$\begin{aligned} z_1 &= \ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{f}_{ext} - (\dot{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\mathbf{D}}\dot{\phi}) \\ z_2 &= \ddot{\mathbf{x}}_E - (\dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\mathbf{B}}\dot{\phi}) \end{aligned} \quad (17)$$

であり、 $\mathbf{f}_{ext}$ はスラストによる力と水の抵抗を含めたロボットに働くすべての外力を示す。さらに実際のシステムにはモデル化誤差が残るため、式(17)の $\ddot{\mathbf{x}}_0, \ddot{\mathbf{x}}_E$ を次式の位置、速度フィードバック項を付加した修正目標加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_0^*, \ddot{\mathbf{x}}_E^*$ に置き換える。

$$\ddot{\mathbf{x}}_0^* = \ddot{\mathbf{x}}_{0d} + \mathbf{K}_{Bv}(\dot{\mathbf{x}}_{0d} - \dot{\mathbf{x}}_0) + \mathbf{K}_{Bp}(\mathbf{x}_{0d} - \mathbf{x}_0) \quad (18)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_E^* = \ddot{\mathbf{x}}_{Ed} + \mathbf{K}_{Ev}(\dot{\mathbf{x}}_{Ed} - \dot{\mathbf{x}}_E) + \mathbf{K}_{Ep}(\mathbf{x}_{Ed} - \mathbf{x}_E) \quad (19)$$

ただし、

- $\mathbf{x}_{0d}$  ベースの目標位置・姿勢ベクトル
- $\mathbf{K}_{Bv}, \mathbf{K}_{Bp}$  ベースのフィードバックゲイン
- $\mathbf{x}_{Ed}$  手先の目標位置ベクトル

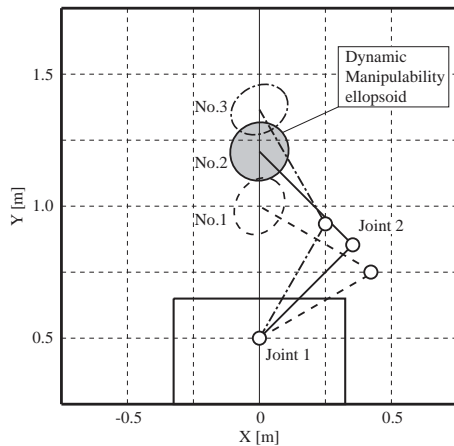


Fig. 4 Dynamic manipulability ellipsoids of each joint angle

$\mathbf{K}_{Ev}, \mathbf{K}_{Ep}$  手先のフィードバックゲイン

である。

上記の制御則を用いて行ったシミュレーションの結果を以下に示す。シミュレーションで使用した各パラメータを Table 2に、Fig. 5に全体の動作経路を、Fig. 6に手先の位置誤差を、Fig. 7にベースの位置誤差を、Fig. 8にベースの姿勢誤差をそれぞれ示す。

以上のように、モデル化したロボットに対して、導出した制御則を用いて手先位置の制御を実現した。

3. マニピュレータを搭載した水中ロボットの開発

3.1 マニピュレータの開発

前項までに行った動作シミュレーションの結果を用いてマニピュレータの関節出力とサイズを決定し、マニピュレータの設計および開発を行った<sup>16)</sup>。

3.1.1 防水構造

本研究ではマグネットカップリング機構を用いて、マニピュレータの関節駆動部の防水加工を行った。この機構は大きなトルクを必要としないウォーターポンプやスラストの駆動軸に用いられており、磁力の力を利用して完全に分け隔てられた隔壁を通して力を伝達することが可能である。マグネットカップリングを使用することで、駆動軸を持つ構造でも容易に防水構造を実現できる。

マグネットカップリングの特徴として、以下のような点が上げられる。

- 1) 伝達トルクが小さい

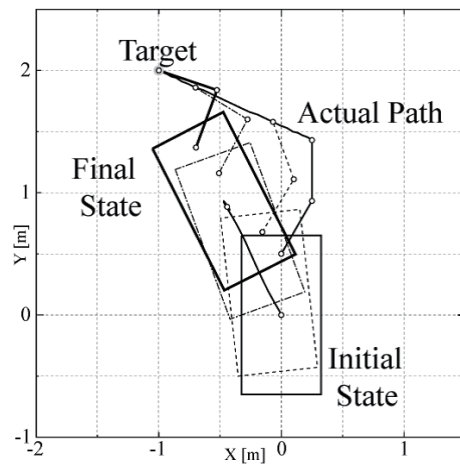


Fig. 5 Motion of the robot

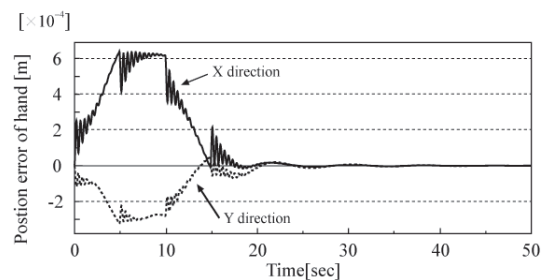


Fig. 6 Tracking error of end-tip

Table 3 Specification of a link of manipulator

サイズ	90×90×500 [mm]
重量	3.4 [kg]
水中重量	300 [g]
関節軸出力トルク	$4.8 \times 10^{-1}$ [kgm](max)
関節軸出力回転数	2 [rpm]

2) 強いトルクを与えた場合にはバックラッシュが生じる。

大きなトルクを伝達することが可能なマグネットカップリングは非常に大きなものになってしまう。そこで、マグネットカップリングを介して伝達された動力をギア機構によって減速し、必要なトルクを得る構造とした。また、各パーツの接合部には O リングを使用した防水加工を施した。

3.1.2 モジュール構造

本論文では 2 リンクのマニピュレータを目標としている。構造の単純化し拡張性を持たせるために、Fig. 9 のようにアクチュエータ（モータ）と関節機構を一つずつ含むモジュール構造とする。このユニットを多数連結することで、多リンクのマニピュレータや複数腕を作成することが可能である。また、モータドライバも内蔵しているため、ロボット本体にアクチュエータのドライバを設置する必要が無く、電源ラインと指令値を送信する通信ポートだけを準備すれば接続が可能となっている。

3.1.3 マニピュレータの製作

前項の条件を踏まえて、3D-CAD システムである Autodesk Inventor を使用してマニピュレータの設計を行い、製作を行った。開発したマニピュレータを Fig. 10 に、性能を Table 3 に示す。また、AUV へ搭載した状態を Fig. 11 に示す。

3.2 AUV の制御システムの開発

本研究では AUV “Twin-Burger<sup>6)</sup>” を用いるが、マニピュレータを搭載するにあたり、各種センサの追加を含めたシステム

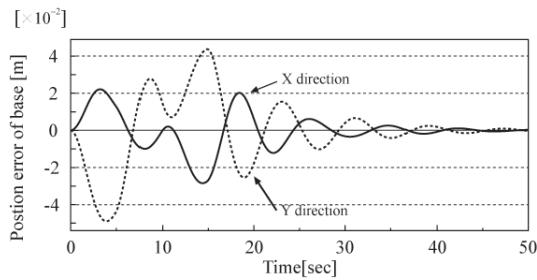


Fig. 7 Tracking error of base

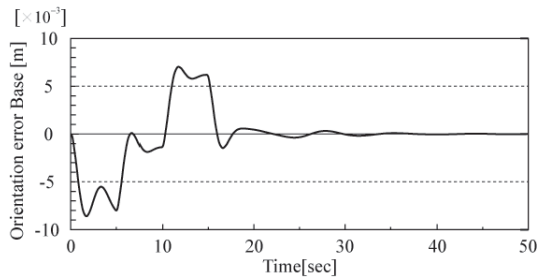


Fig. 8 Orientation error of base

の設計・開発および旧システムからの変更を行った。このシステム改変にあたり、内部に設置するセンサ・制御基板などを全てモジュール構造とし、システム全体の信頼性や整備性の向上、電気配線の簡素化などを実現した。

本項ではこれらの”Twin-Burger”に搭載するシステムの更新に関して述べる。

3.2.1 システムの構成

”Twin-Burger”はロボットのシステムを納める上部の 2 つの耐圧容器とバッテリーを搭載するための下部の耐圧容器、それぞれを接続するフレームから構成されている。前部の耐圧容器（Hull2）においてスラスタの制御を、後部の耐圧容器（Hull1）においてセンサの情報処理を行い、Ethernet を介して互いに通信して行動を決定するシステムとなっている。それぞれの耐圧容器にはノートパソコンを搭載し、各処理を行っている。

様々なデバイスを接続する場合、デバイスの通信規格に合わせてそれぞれ通信ポートを用意する必要がある。通信システムの簡略化のために USB ポートと USB-Serial コンバータを用いて各デバイスとの接続を行う。通信はすべてシリアル通信を用いて行い、直接シリアル通信によって接続できない場合はマイクロコンピュータを用いて各機器と通信し、インターフェース基板を作成して対応した。これにより USB ポートさえあれば通信ポートの増設を容易に行うことができ、センサやアクチュエータの追加が簡単に行うことができる。以上より構成した Twin-Burger のシステム図を Fig. 12 に示す。

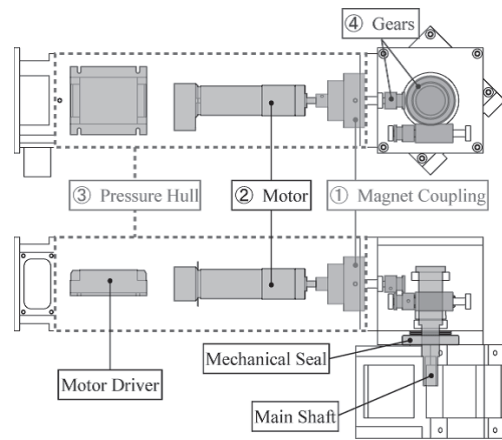


Fig. 9 Mechanism of the manipulator



Fig. 10 Developed manipulator

3.2.2 モジュール構造

ロボットの内部に搭載する全ての機器は、以下の手順でモジュール化を行った

1. 機能ごとに区分してケースに組み込む。
2. 他機器との接続は全てケースに埋め込んだコネクタ等を介して行う。
3. ケース外に配線が極力露出しないような構造とする。

また、耐圧容器内部にはそれぞれ格子状のフレームがあり、すべてのモジュールはこのフレームへ組み合わせた状態で、耐圧容器から簡単に取り外すことができる。

Hull1には様々な回路やセンサを搭載しており、複雑なシステムとなっている。Fig. 12に示したセンサのうち、姿勢センサと距離センサは配置の都合上同じモジュールとし、ジャイロセンサ、深度センサ、マイクロコンピュータ基板、LAN-HUB、USB-HUBはそれぞれ単独での着脱が可能なモジュール構造とした。さらに、各機器への電源を供給するDC/DCコンバータを組み合わせたモジュールを作成した。

Hull1は水中に配置する超音波センサや流速センサなど、耐圧

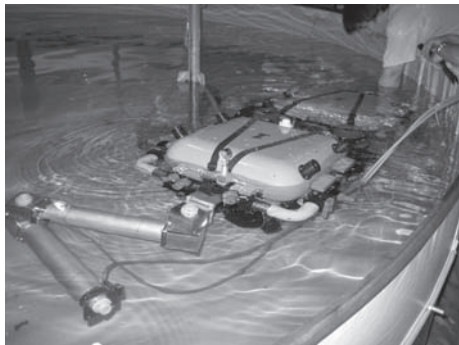


Fig. 11 AUV equipped with a manipulator

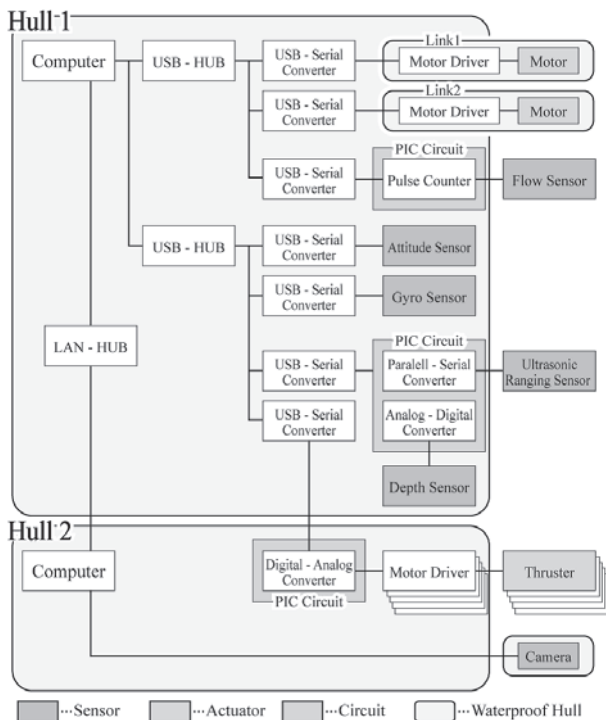


Fig. 12 System Architecture of the robot

容器外部から多数の接続が必要になるため、多数の接続コネクタを一箇所に集中させて着脱を容易にしている。Fig. 13に開発したモジュール群を搭載したHull1を示す。

Hull2にはスラストを制御するための機器が搭載されており、機能ごとにモジュール化を行った。モータを駆動させるモータドライバを配置したモジュールと、PCと通信してアナログ制御指令値を生成するDA変換を行うモジュール、これらに電源を供給するDC/DCコンバータが搭載されたモジュールを作成した。DC/DCコンバータは、スラストの動作時に発生するノイズ対策にアイソレーションを行うために二系統の電源が必要となるため、二種類のモジュールを作成した。以上より、今回作成したモジュールユニットは次の4つである。

- 1) Motor Driver Module
- 2) DA Converter Module
- 3) DC/DC Converter Module 1 (スラスト系統)
- 4) DC/DC Converter Module 2 (センサ系統)

これらのモジュールをFig. 14に、内部システム全体をFig. 15に示す。

それぞれのモジュールにはコネクタを埋め込むことで、モジュール間の接続を容易にするるとともに、配線接続の信頼性およびメンテナンス性の向上が期待される。ロボット内部での各モジュールの接続を示した図をFig.16に示す。

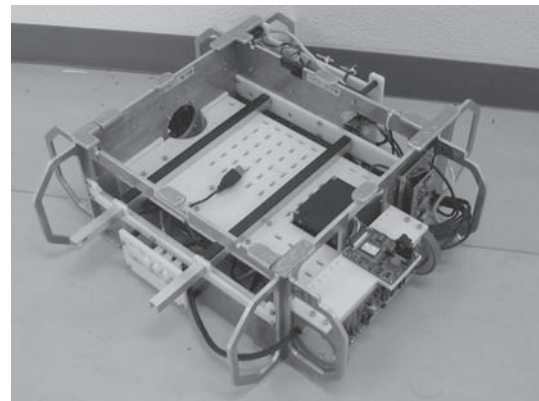
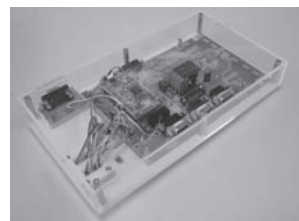


Fig. 13 Assembled modules (Hull1)



(a) MD module



(b) D/A module



(c) DC/DC module 1



(d) DC/DC module 2

Fig. 14 Basic modules in Hull2

3.3 動作試験

開発したマニピュレータと AUV のシステムを用いて動作試験を行った。そのときの状況を Fig. 17 に示す。Fig. 18 に示すように各関節と AUV に LED マーカーを取り付け、関節 1 を 90 度駆動させたときのロボットの軌跡をモーションキャプチャシステムにより計測した。このときの結果を Fig. 19 に、同じ動作をさせたときのシミュレーションの結果を Fig. 20 に示す。

結果を比較すると、マニピュレータの軌跡はシミュレーション結果と一致しており、設計したとおりの性能が実現できていると考えられる。

4. 結論

マニピュレータを搭載した AUV の開発を目指し、まず、シミュレーションにより制御則の有効性を確認し、結果を用いてマニピュレータの設計パラメータを決定した。また、マニピュレータと AUV の内部システムは機能ごとにモジュール化を施し、設計・開発を行なった。今後ハンドモジュールの開発やビジョンシステムの搭載などを行い、マニピュレータを搭載した AUV を用いて物体把持などの自律的な水中作業の実現を目指す。

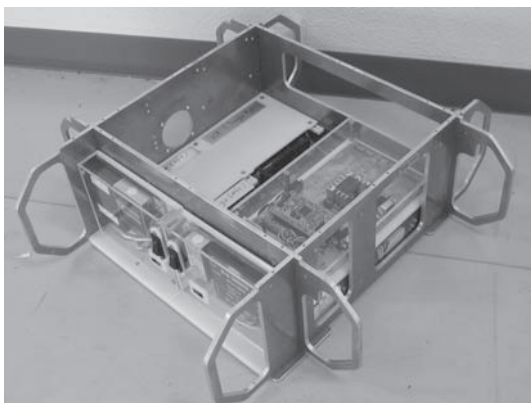


Fig. 15 Assembled modules (Hull2)

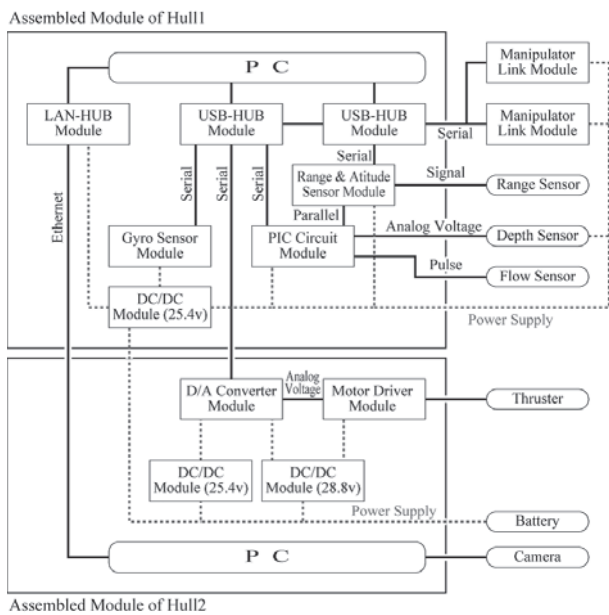


Fig. 16 Module system of the robot

謝 辞

本研究の一部は九州工業大学 21 世紀 COE プロジェクト「生物とロボットの織りなす脳情報工学の世界」の支援により実施した。水中ロボットの開発において、東京大学生産技術研究所の浦環教授に指導を賜った。ここに謝意を示します。

参 考 文 献

- 1) 東京大学海洋研究所編, “海洋のしくみ”, 日本実業出版社, (1997)
- 2) 東海大学海洋学部編, “宇宙から深海底へ 図説海洋概論”, 講談社サイエンティフィック, (1997)
- 3) 山本, 柿倉ほか, “極限作業ロボット そのメカニズムと設計技術”, 工業調査会, (1992)
- 4) 浦, 高川, “海中ロボット総覧”, 成山堂書店, (1994)
- 5) (社)日本造船学会 海中技術専門委員会編, “海中技術一般”, 成山堂書店, (1992)
- 6) 藤井, 浦, “自律海中ロボット「ツインバーガー」の開発”, Proc.Techno-Ocean'94, pp.421-426, (1994)
- 7) 谷川, 高橋, 相良, 加藤, “浮遊型 2 リンク水中ロボットマニピュレータのモデリング”, ROBOMECH'99 講演論文集, 2P1-04-026, (1999)
- 8) 山田, 土屋, “宇宙ロボットマニピュレータ制御における効率の計算法”, 計測自動制御学会論文集 Vol.26 No.7, pp.765-772, (1990)

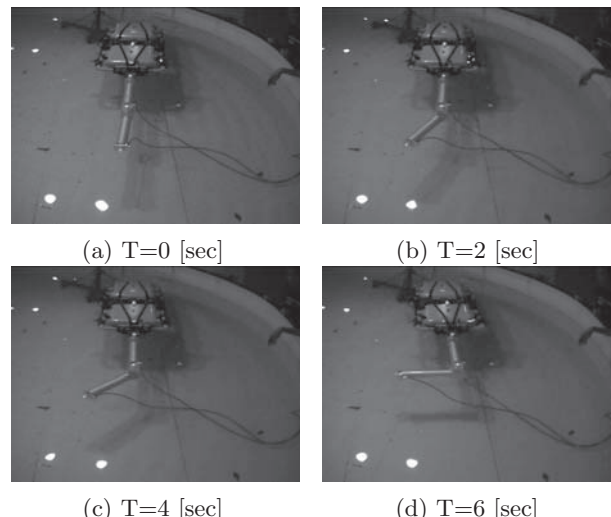


Fig. 17 Experiment of manipulator with AUV

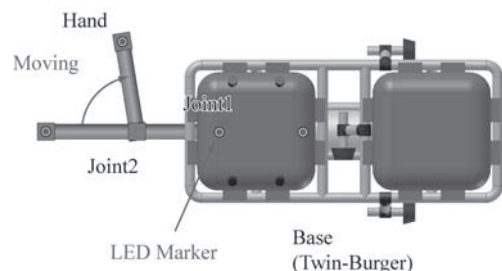


Fig. 18 Outline of experiment

- 9) 日本機械学会編, “機械工学便覧 A5 流体工学”, 丸善, (1986)
- 10) 田古里, 原, “流体工学”, 東京大学出版会, pp.233-pp.235, (1989)
- 11) T.W.McLain, S.M.Rock, M.J.Lee, “Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System”, Autonomous Robots 3, pp.213-232, (1996)
- 12) 檀上, 相良, 田村, “2リンクマニピュレータを搭載した浮遊型水中ロボットの分解加速度制御”, 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, 1A1-L4 (2001)
- 13) Sagara, Tanikawa, Tamura, Katoh, “Experiments on a floating underwater robot with a two-link manipulator”, Artif Life Robotics, pp.215-219, (2001)
- 14) 足達, 吉田, “水中浮遊ロボットの作業領域と動的可操作性”, 日本ロボット学会誌 Vol.12 No.6, pp.863-871, (1994)
- 15) 足達, 吉田, “流体抗力を考慮した水中浮遊ロボットマニピュレータの動的可操作性”, 日本ロボット学会誌 Vol.14 No.3, pp.415-421, (1996)

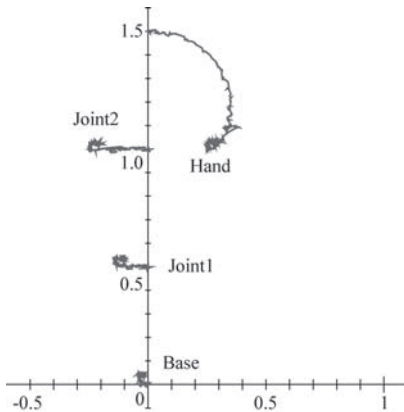


Fig. 19 Experimental result of moving test

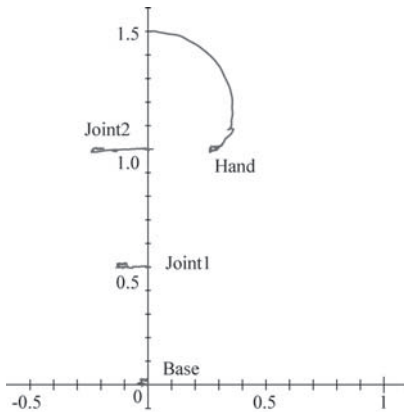


Fig. 20 Simulation result of moving test

- 16) Ishitsuka, Ishii, “Development of an Underwater Manipulator mounted for ana AUV”, MTS/IEEE Oceans2005, 050305-02, (2005)
- 17) Ishitsuka, Ishii, Sagara, “Dynamics Analysis and Resolved Acceleration Control of an Autonomous Underwater Vehicle Equipped with a Manipulator”, UT04, C3-2, pp.277-281 (2004)

### Appendix

ここでは, 第2節で導出した各方程式の詳細を示す.

#### ・運動学関係式

ロボットの運動学関係式は式(20)で与えられる.

$$\dot{\mathbf{x}}_E = \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}\dot{\phi}. \quad (20)$$

ここで各項は以下のようになる.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & A_{13} \\ 0 & 1 & A_{23} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix},$$

$$A_{13} = -l_0 S_0 + B_{11}, \quad A_{23} = l_0 C_0 + B_{21},$$

$$B_{11} = -l_1 S_{01} + B_{12}, \quad B_{12} = -l_2 S_{02},$$

$$B_{21} = l_1 C_{01} + B_{22}, \quad B_{22} = l_2 C_{02},$$

$$S_i = \sin \theta_i, \quad C_i = \cos \theta_i,$$

$$S_{ij} = \sin\left(\sum_{k=i}^j \theta_k\right), \quad C_{ij} = \cos\left(\sum_{k=i}^j \theta_k\right)$$

#### ・運動量方程式

ロボットの運動量方程式は式(21)で与えられる.

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= \begin{bmatrix} \eta_1 & \eta_2 & \mu_3 \end{bmatrix}^T \\ &= \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\alpha}}_0 + \mathbf{D}\dot{\phi} \end{aligned} \quad (21)$$

ここで各項は以下のようになる.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} M_{14} & M_{15} \\ M_{24} & M_{25} \\ M_{34} & M_{35} \end{bmatrix}$$

ただし,  $M_{ij}$  は次節の  $M_{ij}$  と同じである.

#### ・運動方程式

ロボットの運動方程式は式(22)で与えられる.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{f}_D = \boldsymbol{\tau} \quad (22)$$

ここで各項は以下のようになる.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} bq_{11} & bq_{12} & bq_{13} & bq_{14} & bq_{15} & bq_{16} \\ bq_{21} & bq_{22} & bq_{23} & bq_{24} & bq_{25} & bq_{26} \\ bq_{31} & bq_{32} & bq_{33} & bq_{34} & bq_{35} & bq_{36} \\ bq_{41} & bq_{42} & bq_{43} & bq_{44} & bq_{45} & bq_{46} \\ bq_{51} & bq_{52} & bq_{53} & bq_{54} & bq_{55} & bq_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_0^2 \\ \dot{\phi}_1^2 \\ \dot{\phi}_2^2 \\ \dot{\phi}_0\dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_1\dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_2\dot{\phi}_0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned}
\mathbf{f}_D &= [ f_{D1} \ f_{D2} \ f_{D3} \ f_{D4} \ f_{D5} ]^T \\
\boldsymbol{\tau} &= [ f_x \ f_y \ \tau_0 \ \tau_1 \ \tau_2 ]^T \\
M_{11} &= M_{2x}C_{02}^2 + M_{2y}S_{02}^2 + M_{1x}C_{01}^2 + M_{1y}S_{01}^2 \\
&\quad + M_{0x}C_0^2 + M_{0y}S_0^2 \\
M_{12} &= M_{2x}S_{02}C_{02} - M_{2y}S_{02}C_{02} + M_{1x}S_{01}C_{01} \\
&\quad - M_{1y}S_{01}C_{01} + M_{0x}S_0C_0 - M_{0y}S_0C_0 \\
M_{13} &= M_{2x}C_{02}(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) - M_{2y}S_{02}(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) \\
&\quad + M_{1x}C_{01}(S_{1l_0}) - M_{1y}S_{01}(C_{1l_0} + a_1) \\
M_{14} &= M_{2x}C_{02}(S_{2l_1}) - M_{2y}S_{02}(C_{2l_1} + a_2) - M_{1y}S_{01}a_1 \\
M_{15} &= -M_{2y}S_{02}a_2 \\
M_{21} &= M_{12} \\
M_{22} &= M_{2x}S_{02}^2 + M_{2y}C_{02}^2 + M_{1x}S_{01}^2 + M_{1y}C_{01}^2 \\
&\quad + M_{0x}S_0^2 + M_{0y}C_0^2 \\
M_{23} &= M_{2x}S_{02}(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) + M_{2y}C_{02}(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) \\
&\quad + M_{1x}S_{01}(S_{1l_0}) + M_{1y}C_{01}(C_{1l_0} + a_1) \\
M_{24} &= M_{2x}S_{02}(S_{2l_1}) + M_{2y}C_{02}(C_{2l_1} + a_2) \\
M_{25} &= M_{2y}C_{02}a_2 \\
M_{51} &= -M_{2y}S_{02}a_2 \\
M_{52} &= M_{2y}C_{02}a_2 \\
M_{53} &= I_2 + M_{2y}a_2(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) \\
M_{54} &= I_2 + M_{2y}a_2(C_{2l_1} + a_2) \\
M_{55} &= I_2 + M_{2y}a_2^2 \\
M_{41} &= M_{51} + M_{2x}C_{02}(S_{2l_1}) - M_{2y}S_{02}(C_{2l_1}) - M_{1y}S_{01}a_1 \\
M_{42} &= M_{52} + M_{2x}S_{02}(S_{2l_1}) + M_{2y}C_{02}(C_{2l_1}) + M_{1y}C_{01}a_1 \\
M_{43} &= M_{53} + I_1 + M_{2x}(S_{2l_1})(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) \\
&\quad + M_{2y}(C_{2l_1})(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) + M_{1y}a_1(C_{1l_0} + a_1) \\
M_{44} &= M_{54} + I_1 + M_{2x}(S_{2l_1})^2 \\
&\quad + M_{2y}(C_{2l_1})(C_{2l_1} + a_2) + M_{1y}a_1^2 \\
M_{45} &= M_{55} + M_{2y}(C_{2l_1})a_2 \\
M_{31} &= M_{41} + M_{2x}C_{02}(S_{12}l_0) - M_{2y}S_{02}(C_{12}l_0) \\
&\quad + M_{1x}C_{01}(S_{1l_0}) - M_{1y}S_{01}(C_{1l_0}) \\
M_{32} &= M_{42} + M_{2x}S_{02}(S_{12}l_0) + M_{2y}C_{02}(C_{12}l_0) \\
&\quad + M_{1x}S_{01}(S_{1l_0}) + M_{1y}C_{01}(C_{1l_0}) \\
M_{33} &= M_{43} + I_0 + M_{2x}(S_{12}l_0)(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) \\
&\quad + M_{2y}(C_{12}l_0)(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) + M_{1x}(S_{1l_0})^2 \\
&\quad + M_{1y}(C_{1l_0})(C_{1l_0} + a_1) \\
M_{34} &= M_{44} + M_{2x}(S_{12}l_0)(S_{2l_1}) + M_{2y}(C_{12}l_0)(C_{2l_1} + a_2) \\
&\quad + M_{1y}(C_{1l_0})a_1 \\
M_{35} &= M_{45} + M_{2y}(C_{12}l_0)a_2 \\
bq_{11} &= -M_{2x}C_{02}(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) - M_{2y}S_{02}(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) \\
&\quad - M_{1x}C_{01}(C_{1l_0} + a_1) - M_{1y}S_{01}(S_{1l_0}) - M_{0x}C_0a_0 \\
bq_{12} &= -M_{2x}C_{02}(C_{2l_1} + a_2) - M_{2y}S_{02}(S_{2l_1}) - M_{1x}C_{01}a_1 \\
bq_{13} &= -M_{2x}C_{02}a_2 \\
bq_{14} &= 2bq_{12} \\
bq_{15} &= 2bq_{13} \\
bq_{16} &= bq_{15} \\
bq_{21} &= -M_{2x}S_{02}(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) + M_{2y}C_{02}(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) \\
&\quad - M_{1x}S_{01}(C_{1l_0} + a_1) + M_{1y}C_{01}(S_{1l_0}) - M_{0x}S_0a_0 \\
bq_{22} &= -M_{2x}S_{02}(C_{2l_1} + a_2) + M_{2y}C_{02}(S_{2l_1}) - M_{1x}S_{01}a_1 \\
bq_{23} &= -M_{2x}S_{02}a_2 \\
bq_{24} &= 2bq_{22} \\
bq_{25} &= 2bq_{23} \\
bq_{26} &= bq_{25} \\
bq_{51} &= M_{2y}a_2(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) \\
bq_{52} &= M_{2y}a_2(S_{2l_1}) \\
bq_{53} &= 0 \\
bq_{54} &= 2bq_{52} \\
bq_{55} &= 2bq_{53} \\
bq_{56} &= bq_{55} \\
bq_{41} &= bq_{51} - M_{2x}S_{2l_1}(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) \\
&\quad + M_{2y}C_{2l_1}(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) + M_{1y}a_1(S_{1l_0}) \\
bq_{42} &= bq_{52} - M_{2x}S_{2l_1}(C_{2l_1} + a_2) + M_{2y}C_{2l_1}(S_{2l_1}) \\
bq_{43} &= bq_{53} - M_{2x}S_{2l_1}a_2 \\
bq_{44} &= bq_{55} + 2(bq_{42} - bq_{52}) \\
bq_{45} &= bq_{56} + 2(bq_{43} - bq_{53}) \\
bq_{46} &= bq_{45} \\
bq_{31} &= bq_{41} - M_{2x}S_{12}l_0(C_{12}l_0 + C_{2l_1} + a_2) \\
&\quad + M_{2y}C_{12}l_0(S_{12}l_0 + S_{2l_1}) \\
&\quad - M_{1x}S_{1l_0}(C_{1l_0} + a_1) + M_{1y}C_{1l_0}(S_{1l_0}) \\
bq_{32} &= bq_{42} - M_{2x}S_{12}l_0(C_{2l_1} + a_2) + M_{2y}C_{12}l_0(S_{2l_1}) \\
&\quad - M_{1x}S_{1l_0}a_1 \\
bq_{33} &= bq_{43} - M_{2x}S_{12}l_0a_2 \\
bq_{34} &= bq_{45} + 2(bq_{32} - bq_{42}) \\
bq_{35} &= bq_{46} + 2(bq_{33} - bq_{43}) \\
bq_{36} &= bq_{35} \\
f_{D1} &= f_{d2x}C_{02} - f_{d2y}S_{02} + f_{d1x}C_{01} \\
&\quad - f_{d1y}S_{01} + f_{d0x}C_0 - f_{d0y}S_0 \\
f_{D2} &= f_{d2x}S_{02} + f_{d2y}C_{02} + f_{d1x}S_{01} \\
&\quad + f_{d1y}C_{01} + f_{d0x}S_0 + f_{d0y}C_0 \\
f_{D3} &= l_0(f_{d2x}S_{12} + f_{d2y}C_{12} + f_{d1x}S_1 + f_{d1y}C_1) \\
&\quad + l_1(f_{d2x}S_2 + f_{d2y}C_2) + t_{d0} + t_{d1} + t_{d2} \\
f_{D4} &= l_1(f_{d2x}S_2 + f_{d2y}C_2) + t_{d1} + t_{d2} \\
f_{D5} &= t_{d2}
\end{aligned}$$

ただし,  $M_{ix}$ ,  $M_{iy}$  は  $x$ ,  $y$  方向の付加質量を含んだ各リンクの質量,  $I_i$  は付加慣性モーメントを含んだ各リンクの慣性モーメント,  $a_i$  は各リンクの関節位置から重心までの長さを示す。