

## 遊星歯車と定荷重スプリングを有するシリアルマニピュレータの開発

## Development of serial manipulator with planetary gear and constant load spring

- 大森 達登<sup>\*</sup>, 佐藤 晴希<sup>\*</sup>, 湯川 俊浩<sup>\*</sup>, 江刺家 哲朗<sup>\*\*</sup>, 金子 昌晴<sup>\*\*</sup>
- T. Omori<sup>\*</sup>, H. Sato<sup>\*</sup>, T. Yukawa<sup>\*</sup>, T. Esashika<sup>\*\*</sup>, M. Kaneko<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>岩手大学工学部機械システム工学科, <sup>\*\*</sup>岩手大学技術部工学系技術室

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University

<sup>\*\*</sup>Engineering Technology Office, Technical Division, Iwate University

Key word : 遊星歯車 (Planetary Gear), 定荷重ばね (Constant Load Spring), シリアルマニピュレータ (Serial Manipulator), 動力学 (Dynamics)

連絡先 : 住所 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部機械システム工学科 湯川俊浩  
TEL : 019-621-6403, FAX : 019-621-6403, E-mail : yukawat@iwate-u.ac.jp

## 1. 緒言

現在, 製造や医療の分野で多くのロボットアームが使用されている. 加工などの作業で使用される産業用多関節ロボットアームは高い剛性が求められている<sup>1)</sup>. 医療用マニピュレータもまた, 高い剛性, 精度, 自由度が求められている. 剛性を高め, 部品数を減らしてバックラッシュを低減させるために, ばねとリンクからなる機構を使用したマニピュレータが開発されている<sup>2),3)</sup>. しかし, ばねはフックの法則により力が変わるため, 高精度で位置制御するためにはばねの力を考慮する必要があるが, マニピュレータのような関節が屈曲する場合, 引張や圧縮した場合に作用する力と屈曲したばねの変形量によって作用する力が異なり, 制御が難しくなると考えられる.

そこで本研究では, マニピュレータの各軸の内部空間を有効に使うために遊星歯車を用い, 高剛性およびバックラッシュを低減させるために定荷重ばねを使用した汎用シリアルマニピュレータの開発をおこなう.

## 2. 定荷重ばねを有する5軸マニピュレータの開発

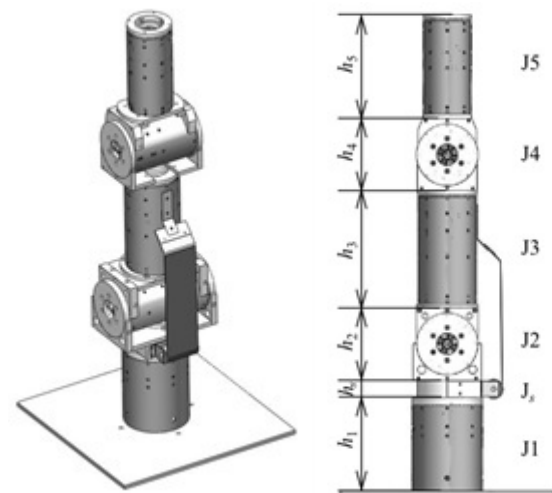
## 2.1 定荷重ばね

定荷重ばねとは一定の曲率で曲げられた長尺のばねであり, 最大出力に達した後は, ストロークにかかわらず引き伸ばす力は一定となる. したがって, 同じ力で引っ張る, 押す, 巻き取ることができる. 主に黒板の昇降や新幹線のロールスクリーンなどに使用されている. 定荷重ばねの特性をマニピュレータに使用することで, 特に重量物を把持した場合, マニピュレータの剛性を高め, 位置制御の向上ができると考えられる. 本研究では, 出力100.9[N]のサンコースプリング社のSB-20を使用する.

## 2.2 5軸マニピュレータの構造

本研究で開発した5軸マニピュレータの全体図を図1に示す. マニピュレータの軸を下から順に, J1, J2, J3, J4, J5, ばね土台をJ<sub>s</sub>とし, J1, J<sub>s</sub>を土台とした二リンクのマニピュレータとする. 各軸の

高さは $h_1=219.0$  [mm],  $h_s=40.0$  [mm],  $h_2=168.0$  [mm],  $h_3=275.0$  [mm],  $h_4=167.9$  [mm],  $h_5=242.0$  [mm]である. J2の回転中心とJ4の回転中心までをリンク1とする. リンク1の長さは $l_1=440.9$  [mm]である. J4の回転中心と手先までをリンク2とし, リンク2の長さは $l_2=327.0$  [mm]である. 動作角度はJ1, J3, J5は $\pm 180^\circ$ , J2とJ4は $\pm 90^\circ$ である. 図2にマニピュレータの構造図を示し, 図3に図1(b)から見た場合の可動範囲を示す.



(a) 3-D view

(b) Side view

Fig.1 Five-axis manipulator

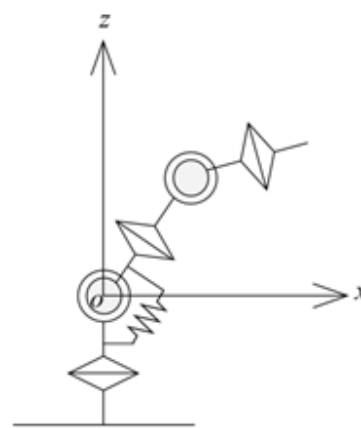


Fig.2 Structure of the five-axis manipulator

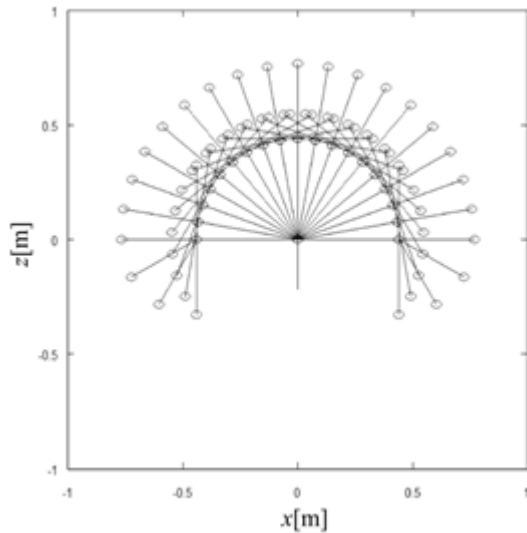


Fig.3 Motion range of movement

各軸の内部構造を図4に示し、表1にマニピュレータの仕様を示す。モータはオリエンタルモータ社のブラシレスDCモータを使用する。モータには減速比100のギアヘッドを取り付ける。ブラシレスDCモータ BLH450K-100の定格電圧はDC 24 [V]、定格電流は6.0 [A]、定格トルクは0.40 [Nm]、定格回転数は2,500 [rpm]となっている。BLH230K-100の定格電圧と定格電流および定格回転数は、BLH450K-100と同じであり、定格トルクは0.20 [Nm]である。J1, J2のモータには負荷が大きくかかるため、BLH450K-100を使用し、J3, J4, J5は、BLH230K-100を使用する。マニピュレータの各軸はそれぞれモジュール1の歯車を使用して、平歯車と遊星歯車機構で減速させている。図5に遊星歯車機構を示す。遊星歯車機構は太陽歯車、遊星歯車、内歯車、遊星キャリアの構成となっており、固定する要素で減速比や回転方向が変わる。内歯車を固定したプラネタリー型、太陽歯車を固定したソーブ型、遊星キャリアを固定したスター型がある。J1, J3, J5はスター型を使い、内歯車の出力を軸の回転とし、J2, J4はプラネタリー型とスター型を使う。太陽歯車の歯数  $z_1$  を、内歯車の歯数を  $z_2$  とすると、プラネタリー型の減速比  $\eta$  は

$$\eta = 1 + \frac{z_2}{z_1} \quad (1)$$

となる。各軸の減速比  $\eta_i$  は、 $\eta_1=278$ 、 $\eta_2=857$ 、 $\eta_3=900$ 、 $\eta_4=1,200$ 、 $\eta_5=900$ である。各軸の動作角速度  $\dot{\theta}_i$  は

$$\dot{\theta}_i = \frac{15000}{\eta_i} \quad (2)$$

であり、 $\dot{\theta}_1=54.0[^\circ/s]$ 、 $\dot{\theta}_2=17.5[^\circ/s]$ 、 $\dot{\theta}_3=16.7[^\circ/s]$ 、 $\dot{\theta}_4=12.5[^\circ/s]$ 、 $\dot{\theta}_5=21.7[^\circ/s]$ である。また、定格トルクはそれぞれ111.1[Nm]、342.8[Nm]、180.0[Nm]、240.0[Nm]、138.0[Nm]となる。

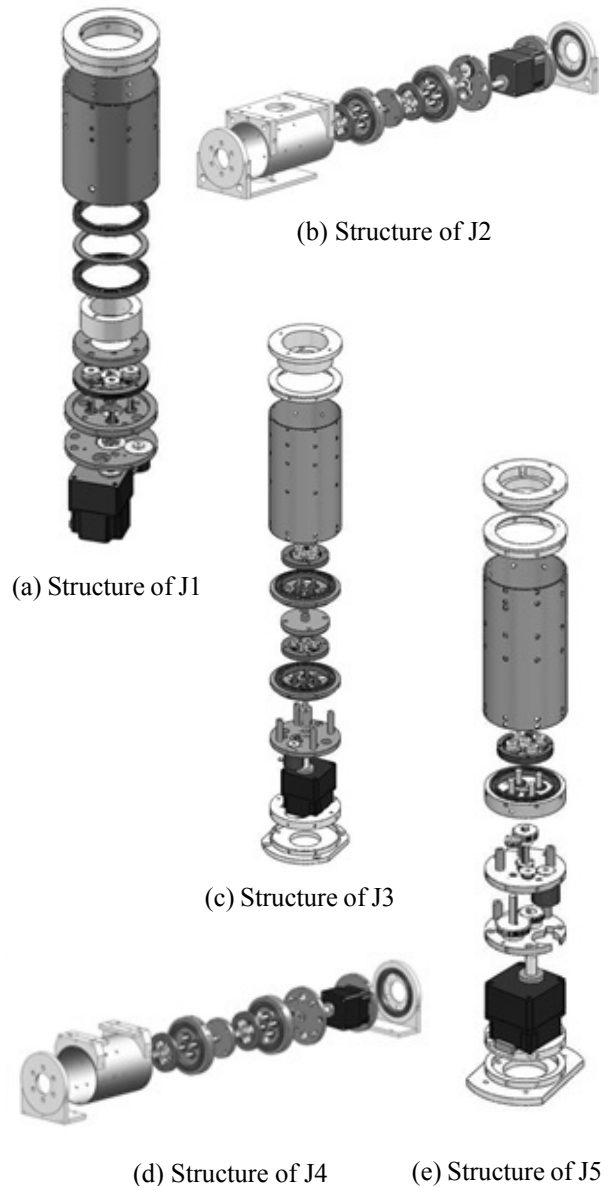


Fig.4 Structures of each arm

マニピュレータの回転角度を検出するエンコーダはライン精機社の分解能2,500 [ppr]、A-B-Z相出力のインクリメンタル型エンコーダCB2500-LCを四通倍で使用する。ゼロ点にはZ相のパルスの検出を利用し、原点検出をおこなう。軸の出力からエンコーダの入力までの減速比  $\eta_{ei}$  ( $i=1\sim 5$ )はそれぞれ  $\eta_{e1}=2.78$ 、 $\eta_{e2}=12.00$ 、 $\eta_{e3}=9.00$ 、 $\eta_{e4}=12.00$ 、 $\eta_{e5}=3.00$ である。よって、エンコーダ一回転でそれぞれの軸は  $\theta_1=129.6^\circ$ 、 $\theta_2=30.0^\circ$ 、 $\theta_3=40.0^\circ$ 、 $\theta_4=30.0^\circ$ 、 $\theta_5=120.0^\circ$  回転する。

歯車によるバックラッシュは、一対のかみ合いで最大0.10[mm]であり、J1は0.32[°]、J2は1.14[°]、J3は1.14[°]、J4は1.14[°]、J5は1.14[°]のバックラッシュがある。また、各軸の重量、J2は10.16[kg]、J3は6.36[kg]、J4は6.05[kg]、J5は3.98[kg]、J<sub>s</sub>は1.24[kg]である。

Table 1 Parameters of the manipulator

Axis name	J1	J2	J3	J4	J5
	Hight of base	Bond length of joint	Length of arm	Bond length of joint	Length of arm
Dimension [mm]	219.00	168.00	275.00	167.90	242.00
Operable angle [°]	±180	±90	±180	±90	±180
Operable angular velocity[°/s]	54.0	17.5	16.7	12.5	21.7
Rated torque of joint[Nm]	111.1	342.8	180.0	240.0	138.0
Backlash[°]	0.32	1.14	1.14	1.14	1.14
Drive motor	Brushless DC motor				
Rated voltage [V]	DC 24				
Rated current [A]	6.0	6.0	3.1	3.1	3.1
Maximum current [A]	9.8	9.8	5.4	5.4	5.4
Rated torque [N·m]	0.40	0.40	0.20	0.20	0.20
Starting torque [N·m]	0.50	0.50	0.24	0.24	0.24
Rated speed [rpm]	2,500				
Permissible inertia moment ×10 <sup>-4</sup> [kgm <sup>2</sup> ]	5.6	5.6	3.3	3.3	3.3
Gear reduction ratio of motor	100				
External gear reduction ratio	2.778	8.571	9.000	12.000	6.900
Encoder	DC5-12V, Open collector output, A-B-Z phase output. Resolution 2,500 [ppr]				
Overload protection circuit	on				
Overvoltage protection circuit	on				
Over-speed protection circuit	on				

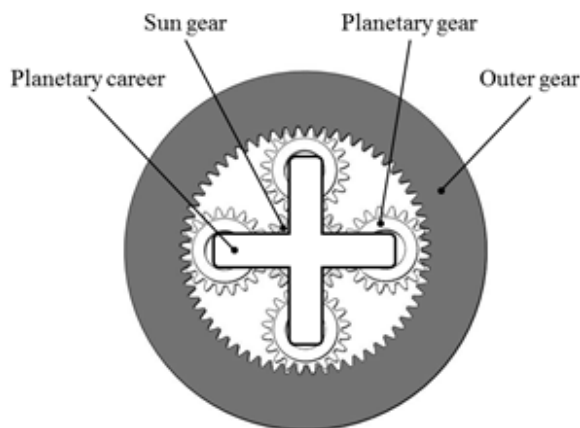
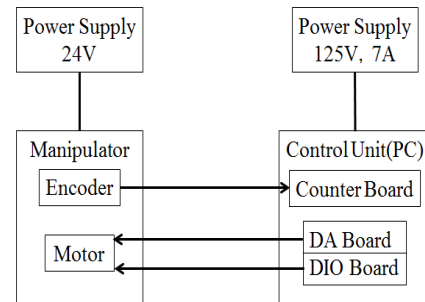


Fig.5 A planetary gear



Board Spec.(Interface Co. Ltd.)  
Counter Board: 24bit, 8CH, isolated  
DA Board: 12bit, 8CH, isolated  
DIO Board: 64 Port, isolated

PC Spec.  
CPU : Corei3-21203.30GHz  
Memory 2046MB  
HDD 222GB  
OS windows7(64bit)

Fig.6 Motor control system

### 2.3 システム

図6にモータの制御システム，図7にマニピュレータの位置制御のフローチャートを示す．モータを制御するためにPCからDAボードとDIOボードに信号を送り，さらにモータドライバへ信号を送ることでモータの回転方向と回転数を制御する．モータの回転数をエンコーダとカウンタボードを使って読み取り，マニピュレータの回転角度でマニピュレータの手先位置を制御する．DAボード，DIOボード，カウンタボードはインターフェース社のPCI-3329, PCI-2702C, PCI-6205Cを使用する．統合開発環境にVisual Studio 2010を使用し，制御プログラムはC言語を使用する．

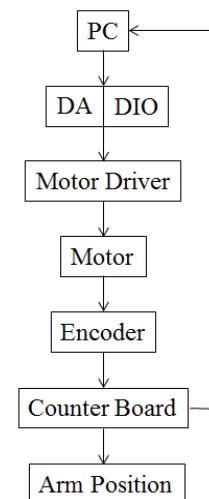


Fig.7 Flow chart of manipulator position

### 3. 五軸マニピュレータの運動学

#### 3.1 順運動学

本研究で開発したマニピュレータの順運動学を導出する. 図8に5軸マニピュレータの構造と座標系を示す.  $J_i (i=1\sim 5)$ における $z$ 軸まわりに $\theta_i$ 回転させる変換行列を ${}^{i-1}T_i$ とする.  $J_1$ は $z$ 軸まわりに $\theta_1$ 回転させる.  $J_i$ の出力軸方向を $z$ 軸にするため,  $J_2$ は $x$ 軸まわりに $-90$ 度回転させ,  $z$ 軸まわりに $\theta_2$ 回転させる.  $J_3$ は $x$ 軸まわりに $90$ 度回転させ,  $z$ 軸まわりに $\theta_3$ 回転させる.  $J_4$ は $x$ 軸まわりに $-90$ 度回転させ,  $z$ 軸まわりに $\theta_4$ 回転させる.  $J_5$ は $x$ 軸まわりに $90$ 度回転させ,  $z$ 軸まわりに $\theta_5$ 回転させる.  $S_i = \sin \theta_i$ ,  $C_i = \cos \theta_i$ とすると, 変換行列 ${}^{i-1}T_i$ は次のように表される.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -l_1 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3T_4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_4 & -C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -l_2 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

したがって,  $J_1$ から $J_5$ までの変換行列 ${}^0T_5$ は

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

である. ただし,  $P_1, P_2, P_3$ は手先位置 $X = [x \ y \ z]^T$ であり,  $R_{mn}$ および $P_1, P_2, P_3$ は次のように表される.

$$R_{11} = -S_1(C_4C_5S_3 + C_3S_5) - C_1\{C_5S_2S_4 + C_2(-C_3C_4C_5 + S_3S_5)\}$$

$$R_{12} = C_4S_1S_3S_5 - C_3(C_5S_1 + C_1C_2C_4S_5) + C_1(-C_2C_5S_3 + S_2S_4S_5)$$

$$R_{13} = -S_1S_3S_4 + C_1(C_4S_2 + C_2C_3S_4)$$

$$R_{21} = -C_5S_1S_2S_4 + C_1(C_4C_5S_3 + C_3S_5) + C_2S_1(C_3C_4C_5 - S_3S_5)$$

$$R_{22} = C_1(C_3C_5 - C_4S_3S_5) + S_1\{S_2S_4S_5 - C_2(C_5S_3 + C_3C_4S_5)\}$$

$$R_{23} = C_4S_1S_2 + (C_2C_3S_1 + C_1S_3S_4)$$

$$R_{31} = -C_3C_4C_5S_2 - C_2C_5S_4 + S_2S_3S_5$$

$$R_{32} = C_5S_2S_3 + (C_3C_4S_2 + C_2S_4)S_5$$

$$R_{33} = C_2C_4 - C_3S_2S_4$$

$$P_1 = -l_2S_1S_3S_4 + C_1\{(l_1 + l_2C_4)S_2 + l_2C_2C_3S_4\}$$

$$P_2 = -l_2C_1S_3S_4 + S_1\{(l_1 + l_2C_4)S_2 + l_2C_2C_3S_4\}$$

$$P_3 = C_2(l_1 + l_2C_4) - l_2C_3S_2S_4.$$

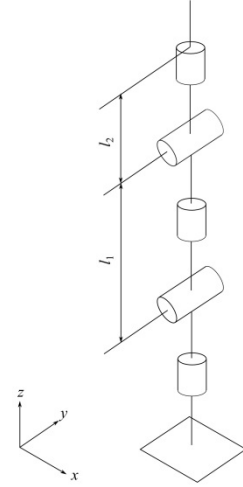


Fig. 8 The structure and coordinate of five-axis manipulator

#### 3.2 逆運動学

位置情報を与えて制御するためにマニピュレータの逆運動学を導出する. 手先位置 $X = [x \ y \ z]^T$ を時間 $t$ で微分すると

$$\dot{X} = J\dot{\Theta} \quad (4)$$

となる. ただし,

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix}, \quad \dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}$$

であり,  $J$ はヤコビ行列,  $\dot{\Theta}$ は角速度である. 式(4)の両辺に $J^{-1}$ をかけると

$$\dot{\Theta} = J^{-1}\dot{X} \quad (5)$$

となる. ヤコビ行列は正方行列ではなく逆行列を導出できないため, 擬似逆行列を導出する. ここで $\dot{\Theta} = J^T \dot{\Theta}'$ とおき, 式(5)の両辺に $J$ をかけると

$$J\dot{\Theta} = JJ^T \dot{\Theta}' \quad (6)$$

となる. ここで, 式(4)より式(6)は

$$\dot{X} = JJ^T \dot{\Theta}' \quad (7)$$

と表され, 式(7)の両辺に $J^T (JJ^T)^{-1}$ をかけると

$$\dot{\Theta} = J^T (JJ^T)^{-1} \dot{X} \quad (8)$$

となる. ここで, 式(8)を離散化すると次のように表される.

$$\Theta(t + \Delta t) = J^T (JJ^T)^{-1} \{X(t + \Delta t) - X(t)\} + \Theta(t) \quad (9)$$

#### 3.3 定荷重ばねを有する五軸マニピュレータの動力学

マニピュレータ単体の動力学モデルをラグランジュ法で導出する.

シリアルリンクマニピュレータの物理パラメータおよび座標を図9のようにとる. リンク $i (i=1, 2)$

の関節の回転角度，質量，質量中心を通り軸に平行な軸回りの慣性モーメント，および長さ，関節*i*からリンク*i*の質量中心までの長さ，重力加速度をそれぞれ $\theta_i$ ， $m_i$ ， $I_i$ ， $l_i$ ， $l_{g_i}$ ， $\mathbf{g}$ とする．二リンクマニピュレータの運動方程式は

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) \quad (10)$$

で与えられる．ただし， $\boldsymbol{\tau}$ は各関節に加わるトルク入力， $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ は慣性力項， $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ は遠心力およびコリオリ力の項， $\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta})$ は重力項であり，次式のように表される．

$$\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{bmatrix} h_{122}\dot{\theta}_4^2 + 2h_{112}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_4 \\ h_{211}\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} m_1\mathbf{g}l_{g1}C_2 + m_2\mathbf{g}(l_1C_2 + l_{g2}C_{24}) \\ m_2\mathbf{g}l_{g2}C_{24} \end{bmatrix}$$

$$\tau_1 = M_{11}\ddot{\theta}_2 + M_{12}\ddot{\theta}_4 + h_{122}\dot{\theta}_4^2 + 2h_{112}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_4 + \mathbf{g}_1$$

$$\tau_2 = M_{21}\ddot{\theta}_2 + M_{22}\ddot{\theta}_4 + h_{211}\dot{\theta}_2^2 + \mathbf{g}_2$$

$$\mathbf{g}_1 = m_1\mathbf{g}l_{g1}C_2 + m_2\mathbf{g}(l_1C_2 + l_{g2}C_{24})$$

$$\mathbf{g}_2 = m_2\mathbf{g}l_{g2}C_{24}$$

$$M_{11} = m_1l_{g1}^2 + I_1 + m_2(l_1^2 + l_{g2}^2 + 2l_1l_{g2}C_4) + I_2$$

$$M_{12} = M_{21} = m_2(l_{g2}^2 + l_1l_{g2}C_4) + I_2$$

$$M_{22} = m_2l_{g2}^2 + I_2$$

$$h_{122} = h_{112} = -h_{211} = -m_2l_1l_{g2}S_4$$

$$C_{24} = \cos(\theta_2 + \theta_4)$$

である．

式(10)と $\tau_s = f_s(\theta_s)$ で表される定荷重ばね単体の式を，未定定数 $\lambda$ を使い，位置的拘束条件から結合モデル $\boldsymbol{\tau}_c = f_c(\boldsymbol{\theta}_c)$ を求めると，定荷重ばねを有するマニピュレータの運動方程式が得られる．

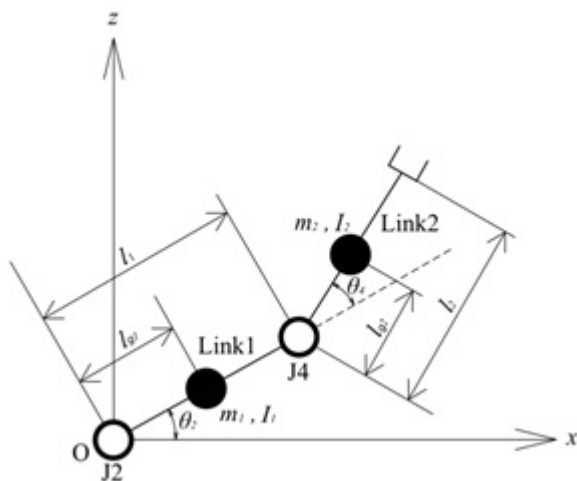


Fig.9 Dynamics model of the manipulator

#### 4. 結言

本研究では高剛性およびバックラッシュを低減させるために，遊星歯車機構と定荷重ばねを用いたシリアルマニピュレータの開発をおこなった．今後は，目標位置を設定し，目標位置にマニピュレータを移動させ，カメラやセンサを用いて，位置精度の検証をおこなう予定である．

#### 参考文献

- 1) 櫛田大輔，中村政俊，後藤聡，久良修郭：“産業用多関節ロボットアームに対するセンサレスのフォースフリー制御”，精密工学会誌 67(9), 1507-1513, 2001
- 2) 荒田純平，斎藤善崇，藤本英雄：“ばね-リンク機構を用いた外殻型2自由度マニピュレータの開発”，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，1A2-K01(1)-1A2-K01(4), 2009
- 3) 荒田純平，斎藤善崇，藤本英雄：“ひねりばね-リンク機構によるバックラッシュレス外殻型2自由度屈曲マニピュレータ”，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，2A1-C06(1)-2A1-C06(2), 2010