

超柔軟ロボットシステムの動力学制御に関する研究

鈴木 高宏 木下 暢* 軍司 怜*

Researches on Dynamic Control of Hyper-Flexible Robot Systems

Takahiro SUZUKI Tohru KINOSHITA* Satoshi GUNJI*

Hyper-flexible systems means highly flexible ones like tethers, strings, ropes and cloths, which can be modeled well by multi-link systems connected by passive joints without elasticity. Hyper-flexible systems will have various possibilities of unconventional manipulations. In this paper, two research subjects on hyper-flexible systems are reported.

In the first part, dynamic stabilization of 3R underactuated manipulators under gravity is studied as a basic research on dynamic control of hyper-flexible systems. Dynamic behaviors produced by vibratory input are analyzed with the averaging method. Dynamic stabilization onto an inclined posture other than the natural gravitational equilibrium is shown.

In the next part, an application example of hyper-flexible robot systems is introduced. A hyper-flexible 3D display (3D-HFD) is proposed by dynamic motion control of hyper-flexible element (HFE) and luminous patterns of LED on HFE. A prototype of 3D-HFD is constructed and verified by experiments.

1. はじめに

元来人間は、手足をしなやかに動かすことで紐やロープ、布といった弾性に依拠しない柔軟要素を入力が限定されるなかで、その劣駆動性や柔軟性を生かし巧みに操ってきた。これらの柔軟要素はその柔軟性ゆえに軽量、簡素、かつ変形性に優れるために、意のままに操ることができれば、その特長を生かしこれまでのいわゆる“硬い”ロボットだけではなくキャストイングマニピュレーション¹⁾のように本質的に柔らかいロボットシステムをも可能にし、その適用分野が広がると考えられる。

本研究においては、このように高い柔軟性を有する系を“超柔軟系”と称し、こうした系を自在に操ることでこれまでの“硬い”ロボットシステムのみではなし得なかった、新たなロボットシステムの可能性を拓げていくことを目的としている。よって、本研究においては、超柔軟系の動力学とその制御を明らかにするための基礎理論に関わる研究と、超柔軟系を応用した新たなシステムの提案とを同時に並行して行っていくことを考えている。

本稿においては、その前者として、超柔軟系の動力学を解明し、その特性を利用した制御を提案する、重力下における超柔軟系の動的安定化に関する研究について述べる。また、後者の超柔軟系の応用の一例としては、ひも状の超柔軟要素の上にLEDを貼り付け、超柔軟要素の回転により形成される3次元面形状と、LEDの明滅パターンを同時に動的に制御することによる、新しい3次元

ディスプレイの提案を行っている。

2. 重力下における超柔軟系の動的安定化

2.1 劣駆動マニピュレータ

ここでは柔軟要素を一種のアームとして操る制御法の構築を行うために、柔軟要素の離散化モデルとして n 関節劣駆動マニピュレータを考える。このような、劣駆動関節マニピュレータの研究は現在盛んに行われている²⁾⁻⁴⁾。従来、非駆動関節を持つロボットは非駆動関節におけるトルク伝達がないことから、たかだか位置制御しか行えず、また重力下に対しては振子となり重力に耐えられないなど、その実用性が疑問視されていた。しかし、筆者らは2関節劣駆動マニピュレータにおいて根元への振動入力により人工的なポテンシャルを生成することにより、重力との合力によって鉛直方向以外への動的安定化が可能であることを示し、一種の力制御を実現している⁵⁾。そこで本研究ではこれを3関節以上に拡張することにより、この制御法がより多リンクでも実現可能であることを示す。

具体的には、3R劣駆動マニピュレータに対して平均化系を導出し、第1関節に周期入力を付加した際の挙動を平均化法により解析することで、重力と周期入力との合力による平衡点への動的安定化を行う方法を提案し、これをシミュレーションにより検証する。

2.2 重力下劣駆動マニピュレータの平均化解析⁶⁾

2.2.1 平均化系の導出

重力下平面シリアルリンク系を考える。この動力学式

2007年04月10日受理

* 東京大学大学院情報学環/生産技術研究所

は次式のように表される.

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}^{[2]} + \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (1)$$

ここで, $\mathbf{M}, \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}^{[2]}, \mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}})$ は各々, 慣性, 遠心・コリオリ, ポテンシャル, 入力トルク・摩擦に関する項を表す.

動力学方程式を駆動関節と非駆動関節に分割すると,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{aa} & \mathbf{M}_{ua}^T \\ \mathbf{M}_{ua} & \mathbf{M}_{uu} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_u \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{aa} & \mathbf{C}_{ua}^T \\ \mathbf{C}_{ua} & \mathbf{C}_{uu} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_a^{[2]} \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_u^{[2]} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{P}_a \\ \mathbf{P}_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_u \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる. これより以下の部分線形化2階非ホロノミック拘束式が得られる.

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a &= \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_u &= \mathbf{M}_{uu}^{-1}(\mathbf{F}_u - \mathbf{P}_u - \mathbf{C}_{uu}\dot{\boldsymbol{\theta}}_u^{[2]} - \mathbf{C}_{ua}\dot{\boldsymbol{\theta}}_a^{[2]} - \mathbf{M}_{ua}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_a) \end{aligned} \quad (3)$$

これらから, 平均化系を導出する. まず, 上式について次式のL変換を行う.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{g}_1(\boldsymbol{\theta})\mathbf{u} \end{pmatrix}$$

ここで, $\mathbf{g}_1(\boldsymbol{\theta})$ は

$$\mathbf{g}_1(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_{uu}^{-1}\mathbf{M}_{ua} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{g}'_1 \end{pmatrix}$$

であるので, 入力を $\mathbf{u} = \dot{\boldsymbol{\theta}}_u$ とすると,

$$\mathbf{x}_2 = \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_a \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_u \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{g}'_1 \end{pmatrix} \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_u - \mathbf{g}'_1\mathbf{u} \end{pmatrix}$$

となる. このL変換により次式の平均化における正準系が求められる.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{x}_2 + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1)\mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{u} + \mathbf{G}_2(\mathbf{x}_1)\mathbf{u}^{[2]} \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_0 &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{uu}^{-1}(\mathbf{F}_{u0} - \mathbf{P}_u - \mathbf{C}_{u0}\mathbf{x}_2^{[2]}) \end{pmatrix} \\ \mathbf{G}_1 &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{uu}^{-1}(\mathbf{F}_{u1} - \mathbf{C}_{u1}) - \frac{\partial \mathbf{g}'_1}{\partial \mathbf{x}_1}\mathbf{x}_2 \end{pmatrix} \\ \mathbf{G}_2 &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{uu}^{-1}(\mathbf{F}_{u0} - \mathbf{C}_{u2} - \mathbf{C}_{ua}) - \frac{\partial \mathbf{g}'_1}{\partial \mathbf{x}_1}\mathbf{g}_1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

である. ただし, 上式の導出に当たっては, 遠心・コリオリ項には $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ の2次項のみが含まれていることと, 摩擦項については速度の2次項までが含まれると仮定して,

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_u(\dot{\boldsymbol{\theta}}_u) &= \mathbf{F}_u(\mathbf{x}_2 + \mathbf{g}'_1\mathbf{u}) \\ &= \mathbf{F}_{u0}(\mathbf{x}_2) + \mathbf{F}_{u1}(\mathbf{x}_2)\mathbf{u} + \mathbf{F}_{u2}(\mathbf{x}_2)\mathbf{u}^{[2]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{uu}(\dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}}_u^{[2]} &= \mathbf{C}_{uu}(\mathbf{x}_1)(\mathbf{x}_2 + \mathbf{g}'_1\mathbf{u})^{[2]} \\ &= \mathbf{C}_{u0}(\mathbf{x}_1)\mathbf{x}_2^{[2]} + \mathbf{C}_{u1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{u} + \mathbf{C}_{u2}(\mathbf{x}_1)\mathbf{u}^{[2]} \end{aligned}$$

と項を分けた. ここで, 入力 u が周期 T を持つ周期関数であるとき, 系に対する平均化系は次のように求められる.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\mathbf{x}}}_1 &= \bar{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{g}_1(\bar{\mathbf{x}}_1)\bar{\mathbf{u}} \\ \dot{\bar{\mathbf{x}}}_2 &= \mathbf{G}_0(\bar{\mathbf{x}}_1, \bar{\mathbf{x}}_2) + \mathbf{G}_1(\bar{\mathbf{x}}_1, \bar{\mathbf{x}}_2)\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{G}_2(\bar{\mathbf{x}}_1)\bar{\mathbf{u}}^{[2]} \end{aligned}$$

ただし, $\bar{\mathbf{x}}_i$ は, \mathbf{x}_i の平均化量を表し,

$$\bar{\mathbf{u}} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}(t) dt, \quad \sigma^{[2]} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^{[2]}(t) dt$$

は, 入力平均および2次モーメントを表している. ここで, 第1関節のみが駆動関節であるとき $\mathbf{u} = u = \dot{\theta}_1$ となる. さらに, 入力 u が周期的であるとき, $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{0}$ となり, 以下の平均化系が求められる.

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_u &= \bar{\mathbf{M}}_{uu}^{-1}(\mathbf{F}_{u0} - \bar{\mathbf{P}}_u - \bar{\mathbf{C}}_{u0}\dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_u^{[2]}) \\ &\quad + \sigma^2 \left(\bar{\mathbf{M}}_{uu}^{-1}(\mathbf{F}_{u0} - \bar{\mathbf{C}}_{u2} - \bar{\mathbf{C}}_{ua}) - \frac{\partial \mathbf{g}'_1}{\partial \boldsymbol{\theta}} \mathbf{g}_1 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

なお, 以下では簡単のため平均化量を表す $\bar{\cdot}$ を省く.

2.2.2 平均化エネルギー

この系について, 次の平均化エネルギーが定義される.

$$E = E_k(\boldsymbol{\theta}_u, \dot{\boldsymbol{\theta}}_u) + E_p(\boldsymbol{\theta}_u) \quad (5)$$

ここで, E_k, E_p はそれぞれ運動エネルギー的項, ポテンシャル的項である. ただし, 各エネルギーは,

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\theta}}_u^T \mathbf{M}_u \dot{\boldsymbol{\theta}}_u \quad (6)$$

$$E_p = \int \tilde{P}_u^T d\boldsymbol{\theta}_u + \frac{1}{2} \sigma^2 \tilde{\mathbf{c}}^T \mathbf{M}_u^{-1} \tilde{\mathbf{c}} \quad (7)$$

と求められ, E_p の第1項は重力によるポテンシャルエネルギー, 第2項が第1関節への周期入力によるポテンシャルエネルギーである.

2.3 重力下3R劣駆動マニピュレータの動的安定化

2.3.1 3R劣駆動マニピュレータの平均化系

ここでは, 前述した平均化系の一般式を3R劣駆動マ

ニピュレータに適用する．3 R 劣駆動マニピュレータの

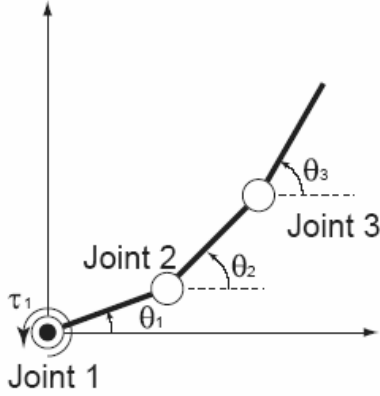


Fig. 1 3R underactuated manipulator

力学モデルをFig. 1に示す．重力下3 R 劣駆動マニピュレータの動力学式は式(1)における $\mathbf{M}, \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}^{[2]}, \mathbf{P}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}})$

を $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$, $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, 0, 0)^T$ として，以下のようにしたものである．

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} A_1 & B_{21}c_{21} & B_{31}c_{31} \\ B_{21}c_{21} & A_2 & B_{32}c_{32} \\ B_{31}c_{31} & B_{32}c_{32} & A_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}^{[2]} = \begin{bmatrix} -B_{21}s_{21}\dot{\theta}_2^2 - B_{31}s_{31}\dot{\theta}_3^2 \\ B_{21}s_{21}\dot{\theta}_1^2 - B_{32}s_{32}\dot{\theta}_3^2 \\ -B_{31}s_{31}\dot{\theta}_1^2 - B_{32}s_{32}\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} P_1c_1 \\ P_2c_2 \\ P_3c_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{bmatrix} -\gamma_2(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \\ -\gamma_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) - \gamma_3(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) \\ -\gamma_2(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

$$A_1 = I_1 + m_1l_{g1}^2 + m_2l_1^2 + m_3l_1^2$$

$$A_2 = I_2 + m_2l_{g2}^2 + m_3l_2^2$$

$$A_3 = I_3 + m_3l_{g3}^2$$

$$B_{21} = m_2l_1l_{g2} + m_3l_1l_2$$

$$B_{31} = m_3l_1l_{g3}$$

$$B_{32} = m_3l_2l_{g3}$$

$$P_1 = (m_1l_{g1} + m_2l_1 + m_3l_1)g$$

$$P_2 = (m_2l_{g2} + m_3l_2)g$$

$$P_3 = m_3l_{g3}g$$

ここで， $m_i, I_i, l_i, l_{gi}, \tau_i (i=1,2,3)$ はそれぞれ，リンクの質量，慣性モーメント，長さ，関節からリンクの重心位

置までの距離，駆動関節第1関節への入力トルクであり， $c_{ij} = \cos(\theta_i - \theta_j), s_{ij} = \sin(\theta_i - \theta_j)$ である．

上式を式(4)に代入することにより，3 R 劣駆動マニピュレータに対する平均化系は次のように求まる．

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{G}_0(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}_2(\boldsymbol{\theta})\sigma^2 \quad (8)$$

$$\mathbf{G}_0 = \mathbf{M}_{\mathbf{u}}^{-1} \begin{bmatrix} -\gamma_2'\dot{\theta}_2 - \gamma_3'(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) - \tilde{P}_2c_2 + s_{32}\dot{\theta}_3^2 \\ -\gamma_3'(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) - \tilde{P}_3c_3 - s_{32}\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_2 = \mathbf{M}_{\mathbf{u}}^{-1} \begin{bmatrix} g_2(\theta_2, \theta_3) \\ g_3(\theta_2, \theta_3) \end{bmatrix}$$

ただし，

$$\mathbf{M}_{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_2 & c_{32} \\ c_{32} & \tilde{A}_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} g_2(\theta_2, \theta_3) \\ g_3(\theta_2, \theta_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (s_{32}\zeta_3 + \tilde{B}_{21}s_{21})\zeta_2 \\ -(s_{32}\zeta_2 - \tilde{B}_{31}s_{31})\zeta_3 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} \zeta_2(\theta_2, \theta_3) \\ \zeta_3(\theta_2, \theta_3) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\mathbf{u}}^{-1}\tilde{\mathbf{c}}$$

$$\tilde{\mathbf{c}} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{21}c_{21} \\ \tilde{B}_{31}c_{31} \end{bmatrix}$$

であり， $\tilde{A}_i = A_i/B_{32}, \tilde{B}_{i1} = \tilde{B}_{i1}/B_{32}, \tilde{P}_i = P_i/B_{32}, \gamma_i' = \gamma_i/B_{32}$ とする．この系についての平均化エネルギーは

$$E = E_k(\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{u}}, \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathbf{u}}) + E_p(\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{u}}) \quad (9)$$

$$E_k = \frac{1}{2}(\tilde{A}_2\dot{\theta}_2^2 + 2c_{32}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + \tilde{A}_3\dot{\theta}_3^2)$$

$$E_p = \tilde{P}_2s_2 + \tilde{P}_3s_3$$

$+\frac{\sigma^2}{2\det\mathbf{M}_{\mathbf{u}}}(\tilde{A}_2\tilde{B}_{31}^2c_{31}^2 + \tilde{A}_3\tilde{B}_{21}^2c_{21}^2 - 2\tilde{B}_{21}\tilde{B}_{31}c_{21}c_{31}c_{32})$ と求まる．

2.3.2 周期入力付加によるシミュレーション

ここでは，求めた部分線形化式をもとにシミュレーションを行う．シミュレーションにおける各パラメータの値を，Table 1に示す．これより， $\tilde{A}_2 = 3.36, \tilde{A}_3 = 0.888,$

$\tilde{B}_{21} = 3.36, \tilde{B}_{31} = 1.0, \tilde{P}_2 = 165, \tilde{P}_3 = 49$ となる．

Table 1 Parameters for Simulation

i	m_i	l_i	l_{gi}	I_i	γ_i
1	2.500	0.200	0.100	0.0243	-
2	2.310	0.200	0.100	0.0230	0.1
3	1.700	0.200	0.100	0.0132	0.4

第1関節に $\theta_1 = 0$ 周りの正弦波入力 $u = \dot{\theta}_1 = \varepsilon\omega\sin\omega t$ を加え，システムの挙動を検証する．振幅を $\varepsilon = 0.1$ [rad],

角速度を $\omega = 32\pi$ [rad/s] としたときの平均化ポテンシャルエネルギーをFig. 2に示す. ここで, 図中における赤線は重力平衡点を表している.

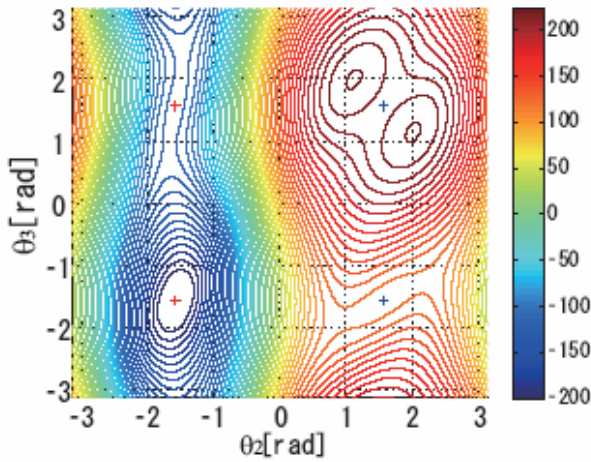


Fig. 2 Potential Energy ($\theta_1 = 0$)

第1関節に $\theta_1 = 0$ 周りの振動入力を加えるとき, 周期入力による平衡点と重力による平衡点の方向が同方向となり, 平衡点は移動しないが, Fig. 2を見てわかるとおり $(\theta_2, \theta_3) = (\pi/2, -\pi/2)$ 近傍にポテンシャル値が周辺より小さい吸引点が発生しているのがわかる. そこで, 平衡点近傍の $(\theta_2, \theta_3) = (1.119, -1.772)$ に初期値をとり, シミュレーションを実行した. その結果をFig. 3に示す.

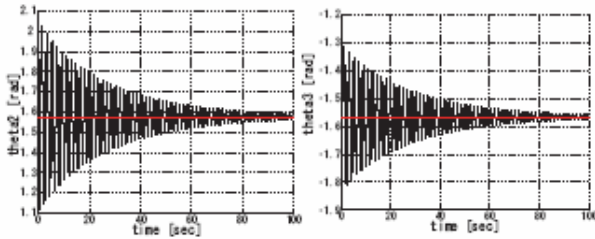


Fig. 3 Simulation Results ($\theta_1 = 0$)

平衡点近傍を初期位置とし, 周期入力を加えると平衡点近傍を中心とした振動を始める. しかし, 第3リンクがバランサーとなり動的安定状態を保ち, 平衡点近傍に収束する. この際, 収束点と平衡点にずれが見られるが, これはこのシステムが1次の平均化系に基づいて構築されており, ε のオーダーの誤差を持っているためである.

次に第1関節に $\theta_1 = \pi/6$ [rad] 周りの正弦波入力 $u =$

$\varepsilon\omega \sin \omega t$ を加えた. このとき, 振幅を $\varepsilon = 0.1$ [rad], 角速度を $\omega = 32\pi$ [rad/s] としたときの平均化ポテンシャルエネルギーをFig. 4に示す. ここで, 図中における赤線は重力平衡点を表している.

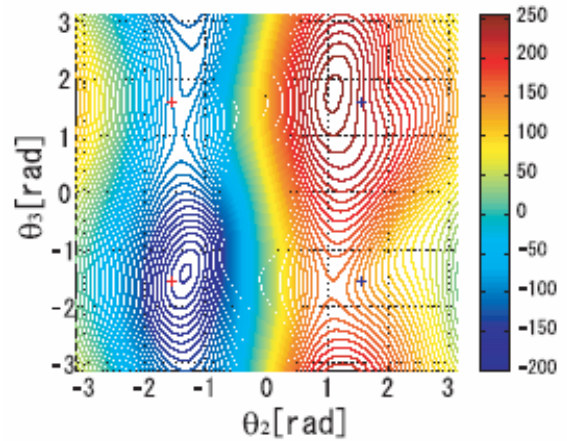


Fig. 4 Potential Energy ($\theta_1 = \pi/6$)

Fig. 4から, 重力方向とは異なる平衡点が形成されていることがわかる. よって, 新たに形成された安定平衡点 $(\theta_2, \theta_3) = (-1.332, -1.420)$ への動的安定化を行った. その結果をFig. 5に示す.

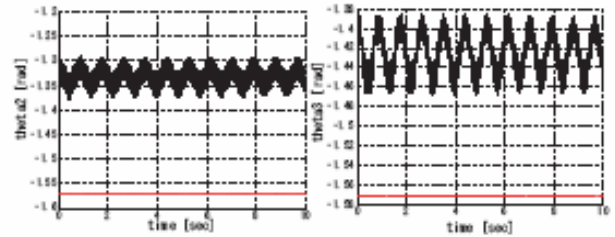


Fig. 5 Simulation Results ($\theta_1 = \pi/6$)

Fig. 5から, 振動はしているものの, 重力平衡点ではなく新たに形成された安定平衡点 $(-1.332, -1.420)$ 近傍に動的安定化できていることがわかる.

以上により重力下における3R劣駆動マニピュレータにおいて, 重力による平衡点以外への動的安定化が可能であると考えられる. ただし, ここでは始点を目標点のごく近傍とした場合について示したのみであるため, 今後は吸引領域 (attraction area) を広げることで始点及び終点を任意とする位置制御法の構築を行い, シミュレーションだけでなく実験で検証する. また, この手法はより多関節のマニピュレータにおいても有効であると考えられるため, この手法を多関節に拡張し検証することも今後の課題である.

3. 超柔軟3次元ディスプレイの提案

3.1 超柔軟3次元ディスプレイ

本研究では, 弾性項を前提としない系である超柔軟要素 (Hyper-Flexible Element: 以下 HFE)⁶⁾ のうち, ひも状の HFE 上に発光体を取り付け, HFE の回転と発光素子の

明滅の制御することで、様々な3次元表現が可能な超柔軟3次元ディスプレイ(以下、3D-HFD)を提案している。ひものような弾性要素が支配的でなく、柔軟な系であるHFEを用いることで、回転速度や回転軸の変化によって様々な3次元面を構成することが可能である。そのため、従来の平面型ディスプレイとは異なる新たな3次元表現が可能であると考えられる。

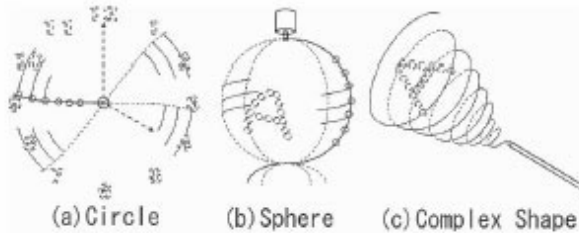


Fig. 6 3D Surface Patterns by 3D-HFD

また、剛体に発行素子を取り付け回転させることによって表示を行うディスプレイと違い、HFEを用いることによって Fig. 6 のように3次元面を様々に変化させることが可能であり、加えて、形成される3次元面が本質的に透過性を有するという特徴を持つ。すなわち、3次元表示面を通してその内部の対象も同時に見えるため、内部対象と表示面との重ね合わせによる新たな表現方法を可能にすると考えられる。本稿では、3D-HFDの表示パターン設計のために、HFEの3次元シミュレーションを行い、それによる動力学挙動の解析を行う。

ひものような1次元HFEのダイナミクスに関しては、望山らによる連続体を用いた研究^{8),9)}などが行われている。連続体モデルによる解析は、厳密なHFEの挙動の解析を行えることなどの利点を持っている。しかし、実際の解析を計算機で行うことや、最終的に計測を行い制御を行うことは、離散的な方が実行しやすいなどの理由から、本稿では離散型のモデルについて考えることにする。

3.2 試作機の製作

本表示機では、装置を回転させるという動きに合わせて、装置に取り付けてある発光要素を明滅させることで残像現象を起こし表示を行っている。残像現象を用いたディスプレイには、

- 1) 平面ディスプレイでは表現しにくい表示が可能.
- 2) 見る方向によって画像を変化させることが可能.
- 3) 発光素子の数が少なくても良いので安価,

という利点があり、様々な研究¹⁰⁾が行われている。これらの多くは剛体に対して発光素子を取り付けるものであるが、前述のように発光素子を取り付ける材料としてHFEを用いると、

- 1) 1次元的な発光素子の配列から3次元面が可能.
- 2) 回転軸の方向や回転速度を変化させることで、様々に3次元面を変化させることが可能.

3) 本質的に透過性を持つ3次元面の形成が可能.

4) 比較的高い安全性を持つ,

という利点が生じる。一方、HFEを用いることによって、

1) 発光素子の取り付けや配線が困難.

2) HFEの制御が困難,

という問題が生じる。

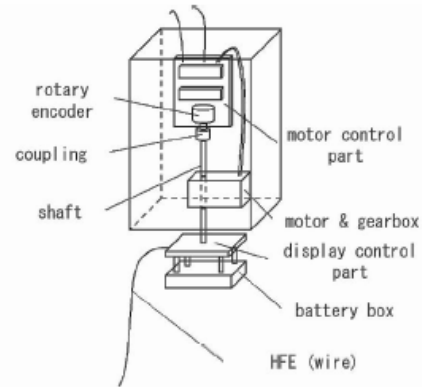


Fig. 7 Mechanism of 3D-HFD

これまでに著者らは、Fig. 7のような形でプロトタイプを考案し、実際に製作することで、3次元ディスプレイとして機能させることが可能であるかの実験を行った。Fig. 8が実際に作成したプロトタイプである。この時、発光素子を取り付けるHFEとして導線を用いることで配線に関する問題を考慮した。また、制御に関しては速度に対するHFEの挙動を実験的に測定することでパターン化し、そのパターンに則して発光素子の明滅を行うことで、様々な形状の表示を行うなどの工夫をした。



Fig. 8 Prototype of 3D-HFD

3.3 表示実験

Fig. 9, Fig. 10は、それぞれ違う回転数で3D-HFDを駆動させた際の表示である。ここでの表示は、"A"と"○"となるようにLEDを明滅させた。まず、Fig. 9に示す結果は、比較的高速回転の場合であり、HFEの形状は円盤状の平面的で、ディスプレイとして機能すること

確認した。次に、Fig. 10 に示す結果は、比較的低速回転の場合であり、図からも分かるように3次元的な曲面形状を形成し、様々な視点から表示を確認することができた。また、回転速度と表示の明滅のタイミングを合わせることで、よりはっきりと表示が行えることも確認した。ただし、回転数が非常に低い状態では表示が困難であるなどの問題が生じた。



Fig. 9 Sample of Display ($\omega = 271[\text{rpm}]$)

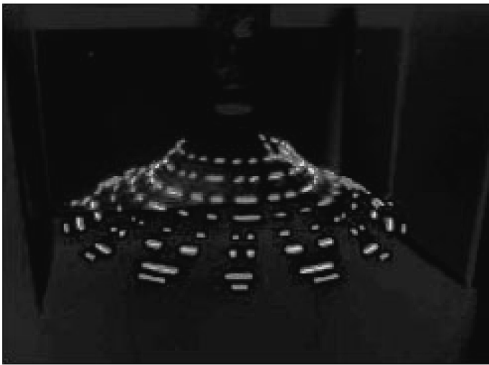


Fig. 10 Sample of Display ($\omega = 91[\text{rpm}]$)

実験から HFE による 3次元面の構成が可能であることが確認できたが、さらに複雑な 3次元形状の構成可能性について確認し、新たな 3次元表現の可能性を考える必要がある。今後においては、HFE を制御することによって生じる、様々な 3次元面の構成についてシミュレーションを行い、それによる動力学挙動の解析を行う必要がある。

4. おわりに

本研究では、まず超柔軟系の動力学とその制御に関する基礎研究の一つとして、超柔軟系の離散モデルとして 3 R 劣駆動マニピュレータに対して平均化系を導出し、第 1 関節に周期入力を付加した際の挙動を平均化解析することで、重力と周期入力の合力による傾斜平衡点への動的安定化を行い、シミュレーションによりその検証を行った。

また、超柔軟系の応用研究の一例として、超柔軟要素

上に発光素子を取り付け、その回転と明滅を制御することにより、様々な 3次元表現が可能な超柔軟 3次元ディスプレイを提案した。まず、プロトタイプの製作を行い、実験を行うことでその有効性の確認を行った。今後においては、超柔軟 3次元ディスプレイの表示パターン設計のために、超柔軟要素の 3次元動力学モデルに基づくシミュレーションによる解析から、制御系設計や、画像計測によるより複雑な 3次元面構成のためのフィードバック制御について検討を行っていく必要がある。

なお、本研究は文部科学省科学研究費(No. 16760192)、および豊田理化学研究所研究嘱託制度の援助による研究の一部として行われた。ここに記し心より感謝する。

参考文献

- 1) 有隅, 神徳, 小森谷: キャスティングマニピュレーションに関する研究(第 1 報), 機論(C 編), 64-626, 1998.
- 2) 中村 他: 自由関節を持つ平面アームのカオスの挙動と非線形制御 - ドリフトを持つ非ホロミック機械の制御 -, 日本ロボット学会誌, 14-4, pp. 602-611, 1996.
- 3) 荒井: 非駆動関節を有する 3 自由度マニピュレータの非ホロミック拘束下における可制御性, 日本ロボット学会誌, 14-5, pp. 751-758, 1996.
- 4) 小林 他: 二つの非駆動関節を持つ平面 4 自由度マニピュレータの可制御性, 日本ロボット学会誌, 17-6, pp. 811-817, 1999.
- 5) 鈴木: 重力下自由関節マニピュレータの動的安定化とインピーダンス制御, 第 7 回ロボティクスシンポジウム, 2002.
- 6) T. Suzuki, K. Shintani and H. Motiyama: Control methods of hyper-flexible manipulators using their dynamical features, SICE Annual Conference 2002, Osaka, 2002.
- 7) T. Suzuki, Y. Ebihara, T. Suzuki, Y. Ando, and M. Mizukawa: Casting and Winding Manipulation with Hyper-Flexible Manipulator, IROS' 06, Beijing, 2006.
- 8) H. Mochiyama and T. Suzuki: Dynamics Modeling of a Hyper-Flexible Manipulator, SICE Annual Conference 2002, pp. 1683-1688, Osaka, 2002.
- 9) 望山, 鈴木: 平面型超柔軟マニピュレータにおけるダイナミクスの幾何, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会, 3E34(1)-(4), 大阪, 2002.
- 10) 坂本 他: ダイオードを用いた回転型 3 次元ディスプレイシステムの提案, 映像情報メディア学会誌, 58-1, pp. 131-134, 2004.