解説

メカニカルソフトネス — リンクフレキシビリティ

Mechanical Softness — Link Flexibility

松野 文俊* *東京工業大学大学院総合理工学研究科

Fumitoshi Matsuno* *Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

「フレキシブル（柔軟）」という言葉は一般には良いイメージで受け止められている。しかし、機械の構造的な柔らかさは嫌われる傾向にある。この柔らかさはシステムの振動の原因となり、ひいては作業の効率化を妨げ、時として不安定現象を引き起こし、重大な損失をもたらす危険性がある。実際の機械システムにおいて、環境との相互作用を考慮した場合、何らかの柔らかさを導入しなければ、すべての現象を説明することはできない。また、システムにコンプライアンスを付加することが柔軟な運動の生成に重要である。剛体アームに制御によってソフト的にコンプライアンスを持たせることは可能であるが、制御が有効でなくなったとき、ソフトネスは失われる。メカニカルソフトネスは本来的に失われることはない。メカニカルな柔軟性を必要とときに制御により剛にできれば、人間とロボットの共存における安全性を向上させることも可能である。

機械システムのモデルとして、剛体モデル、バネモデル、分布定数モデルが提案されている。剛体ロボットモデルに関してはその強い非線形にもかかわらず、各軸のPD制御が有効であることが知られている。一方、産業用ロボットなどは、何らかの柔軟性があるにもかかわらず、剛体システムとして制御され、工場などで活躍している。その謎を解く鍵はシステムの受動性のロバスト性にあることが、仮想バネモデルを用いると分かる。また、剛体機械システムにおいて不確定性として陽には考慮していなかった柔軟性を積極的にモデル化することにより、現象の解明、さらには制御系の設計の指針を得ることができる。

リンクに機械的柔軟性（メカニカルソフトネス）をもった柔軟アームの研究において、柔軟性に起因する振動をいかに抑制するかが主眼であり、そのモデリングと制御について多くの研究成果が報告されている[1][2]。これらの多くは、分布定数モデルにおける無限の振動モードを有限次元で打ち切り、得られた有限次元近似モデルに基づいて制

御系を構成するモデルベース制御である。無視した剰余モードをモデル化誤差として評価し、ロバストな制御系を構成することも可能である。しかし、得られた制御器はもとの無限次元システムを厳密に無限次元の意味で安定化している保証はない。また、制御器の次数は一般に高くなり、実装は容易ではない[3]。

そこで、本来柔軟システムのもっている力学的本質を活かした、ダイナミクスベース制御が提案されている[4]~[6]。その制御則は、モータの回転角度(P)と角速度(D)、柔軟リンクの根元のひずみ(S)をセンサで計測し、その出力にゲインをかけて直接フィードバックするような簡単な出力フィードバック(PDS制御)である[4][6]。また、PDS制御は各軸のPD制御を含んでいることが分かる。

本解説では、柔軟リンクシステムのモデリングや制御についてまとめる。力制御や協調制御など環境との相互作用を伴うタスクには、柔軟リンクのもつメカニカルソフトネスは重要である。これまでの研究では柔軟性のメリットを活かす研究はあまりなされていない。しかし、柔軟リンクの特徴を活かすためには、そのシステムのもつ力学的な性質を明らかにすることが重要である。

2. 集中定数モデルと受動性のロバスト性

剛体マニピュレータの駆動トルクから関節角速度に関する受動性は物理定数が変動しても不変であり、この性質は各軸のPD制御の有効性を保証するものである。これは受動性が物理定数の変動に対してロバストであると言い換えることもできる。では、この受動性はリンクの柔軟性に関してロバストであろうか？

2.1 仮想バネモデル

Nリンクの柔軟アームの完全な運動方程式を導出することは非常に困難であるので、以下のような近似を行い、仮想バネモデルを導出する[7]~[10]。図1に示すように、リンクの柔軟性をバネ・ダンパが埋め込まれた有限個の仮想的な関節(Joint(1,1), ..., Joint(1, m_1), Joint(2,1), ..., Joint(2, m_2), ..., Joint(N,1), ..., Joint(N, m_N))によって表現する。駆動関節*i* ($i = 1, \dots, N$)は通常回転関節で入力 $u_i(t)$ が加えられる。また、柔軟リンク*i*はリンク*i*上に想定された m_i 個の仮想関節 (i, j) ($j = 1, \dots, m_i$) とそこに付加されたバネ・ダンパ系で表現する。仮想関節の

原稿受付 1999年5月15日

キーワード: Mechanical Softness, Flexible Link, Passivity, Imaginary Spring Model, Distributed Parameter Model, Dynamics Based Control

*〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259

*Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

図1 仮想バネモデル

関節角を $q_{(i,j)}$, 入力を $u_{(i,j)}$ とすると

$$u_{(i,j)} = -k_{V_d} \dot{q}_{(i,j)} - k_{V_p} q_{(i,j)} \quad (1)$$

となっていると考える。ここに、 $k_{V_d} > 0, k_{V_p} > 0$ は仮想関節に想定したバネ・ダンパ系の粘性係数とバネ定数である。(簡単のためにそれぞれの定数はすべて等しいとした。) 仮想バネモデルを導入した N リンクの柔軟アームの動特性方程式は

$$J(p) \ddot{p} + \left\{ \frac{1}{2} \dot{J}(p) + S(p, \dot{p}) \right\} \dot{p} + k_{V_p} E_1 p + k_{V_d} E_1 \dot{p} = E_2 u$$

$$\dot{\theta} = E_2^T \dot{p} \quad (2)$$

となる。ただし、 $u = [u_1, \dots, u_N]^T, \theta = [\theta_1, \dots, \theta_N]^T, p = [p_1^T, p_2^T, \dots, p_N^T]^T, p_i = [\theta_i, q_{(i,1)}, \dots, q_{(i,m_i)}]^T$, 行列 $E_1 \geq 0, E_2$ は $0, 1$ を要素にもつ選択行列である。

2.2 受動性の柔軟性に関するロバスト性

仮想バネモデル (2) に対して、剛体システムと同様な以下の性質が成立する。

[P1] 慣性行列 $J(p)$ は任意の p に対して正定である。

$$J(p) > 0 \quad \forall p$$

[P2] 行列 $S(p, \dot{p})$ は歪対称行列である。

$$x^T S(p, \dot{p}) x = 0 \quad \forall x$$

これらの性質を用いると

$$\int_0^t \dot{\theta}^T(\tau) u(\tau) d\tau \geq -E(p(0), \dot{p}(0)) \equiv -\gamma_1^2 \quad (3)$$

が得られ、システムの受動性が証明できる。ここで、 $E(p(t), \dot{p}(t)) = \frac{1}{2} \dot{p}^T J(p) \dot{p} + \frac{1}{2} p^T k_{V_p} E_1 p$ である。この結果はリンクの柔軟性に対する受動性のロバスト性を示している。この受動性を用いると、各軸の PD 制御 ($u = -k_p(\theta - \theta_d) - k_d \dot{\theta}$) に対する閉ループ系の安定性 ($\dot{\theta} \rightarrow 0, \dot{p} \rightarrow 0, \theta \rightarrow \theta_d$) が証明できる [10]。この結果より、リンクに柔軟性が存在した場合にも従来用いられている各軸の PD 制御は有効であることが保証される。

図2 1リンク柔軟アーム

3. 分布定数モデルとダイナミクスベースト制御

3.1 1リンクモデルと受動性

図2に示すような1リンク柔軟アームを考える。ただし、柔軟リンクは、長さ L , 線密度 ρ , 曲げ剛性 EI , 弾性変位 $w(t, r)$ であり、その根元はモータに直結されている。モータの慣性モーメントを J , 回転角度を $\theta(t)$, 駆動トルクを $u(t)$ とする。システムの運動エネルギー K とポテンシャルエネルギー P_w は

$$K = K_\theta + K_w \quad (4)$$

$$K_\theta = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2(t), \quad K_w = \frac{1}{2} \int_0^L (r \dot{\theta}(t) + \dot{w}(t, r))^2 \rho dr$$

$$P_w = \frac{1}{2} \int_0^L EI (w''(t, r))^2 dr \quad (5)$$

となる。ここで、 $'$ は空間変数 r に関する微分であり、 $w^2(t, r) \ll r^2$ を仮定した。ハミルトンの原理により、以下の運動方程式を得る。

モータの回転方程式

$$J \ddot{\theta}(t) + EI w''(t, 0) = u(t) \quad (6)$$

リンクの振動方程式

$$\ddot{w}(t, r) + \frac{EI}{\rho} w''''(t, r) = -r \ddot{\theta}(t) \quad (7)$$

$$w(t, 0) = w'(t, 0) = w''(t, L) = w'''(t, L) = 0$$

システムの全エネルギーは $E = K + P_w \geq 0$ であり、

$$\frac{dE}{dt} = \dot{\theta}(t) u(t)$$

$$\int_0^t \dot{\theta}(\tau) u(\tau) d\tau = E(t) - E(0) \geq -E(0) \equiv -\gamma_2^2$$

を得る。したがって、システムの受動性が示された。

3.2 ダイナミクスベースト制御

ここでは、従来のような有限次元近似モデルを用いない、分布定数モデルに基づいた制御系設計について考える。

リアプノフ関数の候補 V を

$$V = c_1 K_\theta + c_2 (K_w + P_w) + \frac{c_3}{2} (\theta(t) - \theta_d)^2 \quad (8)$$

とする。ここで、 θ_d は $\theta(t)$ の目標値である。V の式 (6) (7) の解軌道に沿った微分は

$$\frac{dV}{dt} = \dot{\theta}(t)[c_1 u(t) + (c_1 - c_2)EIw''(t, 0) + c_3(\theta(t) - \theta_d)]$$

となるので、入力トルク $u(t)$ を

$$u(t) = \frac{1}{c_1} \{ -(c_1 - c_2)EIw''(t, 0) - c_3(\theta(t) - \theta_d) - c_4\dot{\theta}(t) \} \quad (9)$$

とすると

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{c_4}{c_1}\dot{\theta}^2(t) \leq 0 \quad (10)$$

となり、V がリアプノフ関数になることが分かる。偏微分作用素の性質と不変原理を用いると

$$\dot{\theta}(t) \rightarrow 0, \theta(t) \rightarrow \theta_d, \dot{w}(t, r) \rightarrow 0, w(t, r) \rightarrow 0$$

を得る。すなわち、閉ループ系の漸近安定性が証明され、平衡状態が目標状態であることが示される [6]。

入力トルク (9) において、モータの角度 $\theta(t)$ 、角速度 $\dot{\theta}(t)$ 、アームの根元のひずみ $w''(t, 0)$ は、それぞれ計測可能な物理量である。また、 $c_1 = c_2$ とした場合には、入力トルク (9) は PD 制御となり、 $c_1 \neq c_2$ の場合には PD 制御にひずみ (Strain) フィードバックを加えた PDS 制御になる。

提案する制御系は設計の段階で有限次元近似を必要とせず、したがってスピルオーバーは生じない。提案制御則は物理パラメータには依存せずロバストであり、非常に簡単な構造で実装が容易であることが分かる。

4. 柔軟アームの協調制御

4.1 分布定数モデル

図 3 に示すような、2 本の 1 リンク柔軟アームを用いた剛体物体の把持制御について考える。アーム i ($i = 1, 2$) の長さを L 、曲げ剛性を $E_i I_i$ 、線密度を ρ_i 、把持物体の質量を M_{ob} 、モータ i の慣性モーメントを J_i 、回転角度を $\theta_i(t)$ 、駆動トルクを $\tau_i(t)$ 、柔軟アーム i の位置 r_i における弾性変位を $w_i(t, r_i)$ とする。 $\theta_i(t)$ を微小とし、 $w_i^2(t, r_i) \ll r_i^2$ と仮定する。 $w_i(t, L) = w_{iE}(t)$ と定義する。各アームの先端の x 座標が等しいので、幾何学的拘束条件

$$\begin{aligned} \phi(\theta_1(t), \theta_2(t), w_{1E}(t), w_{2E}(t)) \\ = L\theta_1(t) - L\theta_2(t) - w_{1E}(t) + w_{2E}(t) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

を満足する。この拘束条件に対応するラグランジュ乗数を $\lambda(t)$ とすると、以下の運動方程式を得る。

モータ i の回転方程式

$$J_i \ddot{\theta}_i(t) + E_i I_i w_i''(t, 0) = \tau_i(t) \quad (12)$$

図3 柔軟アームの協調制御

リンク i の振動方程式

$$\ddot{w}_i(t, r_i) + \frac{E_i I_i}{\rho_i} w_i''''(t, r_i) = r_i \ddot{\theta}_i(t) \quad (13)$$

$$w_i(t, 0) = 0, w_i'(t, 0) = 0, w_i''(t, L) = 0$$

$$E_i I_i \left\{ \frac{M_{ob}}{2\rho_i} w_i''''(t, L) + w_i'''(t, L) \right\} = (-1)^{i+1} \lambda(t)$$

4.2 PDS 協調制御

目標把持力 λ_d に対応するモータ i の目標角度を θ_{id} 、柔軟リンク i の目標定常変形を $w_{id}(r_i)$ 、 k_{ai}, k_b, k_{pi} を正の定数として、以下の関数 V を定義する。

$$\begin{aligned} V = \sum_{i=1}^2 \left[\frac{1}{2} k_{ai} J_i \dot{\theta}_i^2(t) + \frac{1}{2} k_{pi} (\theta_i(t) - \theta_{id})^2 \right. \\ + \frac{1}{2} k_b \left\{ \int_0^L \rho_i (\dot{w}_i(t, r) - r_i \dot{\theta}_i(t))^2 dr_i \right. \\ + \frac{1}{4} M_{ob} (\dot{w}_{iE}(t) - L \dot{\theta}_i(t))^2 \\ \left. + \frac{1}{2} \int_0^L E_i I_i (w_i''(t, r_i) - w_{id}''(r_i))^2 dr_i \right\} \left. \right] \quad (14) \end{aligned}$$

入力トルク $\tau_i(t)$ をセンサの出力のみを用いて

$$\begin{aligned} \tau_i(t) = -\{ K_{pi} (\theta_i(t) - \theta_{id}) + K_{di} \dot{\theta}_i(t) \\ + K_{si} E_i I_i (w_i''(t, 0) - w_{id}''(0)) \\ - E_i I_i w_{id}''(0) \} \quad (15) \end{aligned}$$

とすれば、V がリアプノフ関数であることが示される。ここで、 $K_{pi} = k_{pi}/k_{ai}$ 、 $K_{si} = (k_b - k_{ai})/k_{ai}$ 、 $K_{di} > 0$ である。制御則 (15) において、 $k_b = k_{ai}$ ($K_{si} = 0$) の場合は各軸の PD 制御となり、 $k_b \neq k_{ai}$ ($K_{si} \neq 0$) の場合は PDS 制御となる。目標把持力 λ_d に対応する $\theta_{id}, w_{id}(r_i)$ を

$$\theta_{id} = (-1)^i \frac{L^2}{3E_{3-i}I_{3-i}} \lambda_d \quad (16)$$

$$w_{id}(r_i) = (-1)^i \frac{1}{6E_i I_i} \lambda_d (-3Lr_i^2 + r_i^3) \quad (17)$$

とし、平衡状態の解析をすれば、閉ループ系の漸近安定性が証明され、平衡状態が目標状態であることが示される。

図4 実験装置

(a) PD Control

(b) PDS control

図5 インパルス外乱応答

4.3 実験

提案した PDS 制御則の有効性を、図 4 に示すような実験装置を用いて実験により検証する。柔軟アームとして幅 50 [mm]、厚さ 2 [mm]、長さ 500 [mm] のばね鋼板を使用した。目標把持力を 3.0 [N] とした。図 5 に定常状態においてアーム先端にインパルス外乱を加えた場合の応答を示す。図の上段は左からアーム 1, 2 のひずみ、下段は把持力の応答を表している。

5. おわりに

機械システムにメカニカルソフトネスを持たせることにより、環境との相互作用の変化に柔軟な応答が可能になることを示した。柔軟リンクアームの分布定数モデルを用いることにより、本来システムが持っている物理的本質を活

かした、実装が容易でロバストなダイナミクスベース制御 (PDS 制御) を構成できることを紹介した。柔軟アームの協調制御の実験結果は、例えばロボットと人間との衝突による外力をメカニカルソフトネスにより吸収し、タスクを失敗することなく、人間への衝撃を和らげることができることを示している。また、環境との相互作用の変化に対し、ソフトネスを柔軟に制御することによりタスクを実現できることを示唆している。柔軟リンクが本来の「フレキシブル」の意味として広く受け入れられるように、研究を進めなければならない。今後の進展に期待したい。

なお、本解説で紹介した研究結果の一部は文部省科学研究費 (COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステムおよび基盤研究 (C)(2) 課題番号 11650243) の援助を受けた研究成果であることを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 松野, 大石 (編): 「特集」フレキシブル・マニピュレータ, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.2, pp.169-230, 1994.
- [2] 大久保, 松野 (編): 「特集」宇宙構造物の力学と制御, システム/制御/情報, vol.39, no.3, pp.101-148, 1995.
- [3] 松野: 「柔軟構造物の制御」, 計測と制御, vol.34, no.12, pp.953-954, 1996.
- [4] 李, 宮崎, 有本: 「柔軟リンクマニピュレータの PDS 制御」, 計測自動制御学会論文誌, vol.25, no.6, pp.675-681, 1989.
- [5] 羅: 「二階発展方程式の半群生成性と指数安定性—最近の進展」, 計測と制御, vol.33, no.6, pp.479-486, 1994.
- [6] 松野: 「機械システムのタスクディレクテッドモデリング」, システム/制御/情報, vol.42, no.9, pp.477-486, 1998.
- [7] F. Matsuno and Y. Sakawa: "A Simple Model of Flexible Manipulators with Six Axes and Vibration Control by Using Accelerometers," J. Robotic Systems, vol.7, no.4, pp.575-597, 1990.
- [8] 吉川, 細田: 「仮想的な剛体リンクと受動関節を用いたフレキシブルアームのモデリング」, 計測自動制御学会論文誌, vol. 27, no. 12, pp.1389-1395, 1991.
- [9] F. Matsuno: "Vibration Absorption Control of Force-Controlled Manipulators on the Basis of an Equivalent Spring Model," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.41, no.5, pp.501-507, 1995.
- [10] K. Osuka and F. Matsuno: "On Robustness of Passivity of Manipulators," Proc. TIT COE/Super Mechano-Systems Workshop'99, pp.114-120, 1999.

松野文俊 (Fumitoshi Matsuno)

1957 年 7 月 26 日生。1986 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学助手、神戸大学講師・助教授を経て、1996 年より東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授 (知能システム科学専攻) となり、現在に至る。主に、ロボット・大型宇宙構造物の制御、分布定数系の制御、地理情報システムに関する研究に従事。最近では、地理情報システムを基盤としたレスキュー活動支援システムに関する研究を行っている。工学博士。1989 年度日本ロボット学会研究奨励賞、1993 年度システム制御情報学会論文賞、1997 年度消防防災科学論文賞 (消防庁長官表彰) などを受賞。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会、地理情報システム学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)