〔解 説〕

フレキシブルアームの可補償性*

内 山 勝**

1. は じ め に

フレキシブルアームの制御の困難さは、アクチュエータにより直接制御することができるジョイントの自由度以外に、直接制御できないリンク変形の自由度が存在することによる。このリンク変形により発生する振動をジョイントアクチュエータにより制御する問題は、研究者の関心を引き、モデリング、制御制御について多くの研究がなされてきた¹⁾。

しかし、アームの振動が抑制されたのちの問題、すなわち、アームをロボットアームとして作業に使用するときには生じる問題については、多くの関心が払われてきたとはいえない。剛体ロボットアームについて研究されてきた問題の多くは、フレキシブルアームについても新たな観点より研究される必要があるにもかかわらず、これらの問題はまだまだほとんど手つかずの状態にある。

筆者の研究室においても、比較的早い時期より、フレキシブルアームの振動抑制制御の問題に取り組んできた。そのとき考えたのは、フレキシブルアームといえども、ロボットアームとして研究するためには最低2リンクは必要であろう、ということであった。しかし、これは安易な考えで、後述するように間違っていた。

ともかく、2リンクのフレキシブルアームを製作し、振動抑制制御の実験を始めた^{2),3)}。この実験を通して興味深い2つの問題を発見した。ひとつはジョイントアクチュエータによっては制振できない振動モードが存在すること、もうひとつは振動抑制が実現できても、重力などの外力が加わると、アームの変形により先端に位置決め誤差が生じることである。

この2つの問題は互いに密接に関連しているように思えた。しかし、あまりに複雑であったので、段階的に解決することとし、まずは運動学的な観点より研究した。その結果得られたのが、フレキシブルアームの可補償性の理論である^{4),5)}。この理論は、アーム先端の位置決め

誤差を補償する補償制御系の設計の基礎を与える⁶⁾。前者の問題は現在研究中である。

以下、本稿では、フレキシブルアームの可補償性の理論と補償制御の考え方を紹介する。なお本稿で紹介する研究成果の詳細は本学会誌に原著論文として投稿中である^{7),8)}。

2. 振動抑制制御から補償制御へ

振動抑制制御の実験を目的として、図1に示す平面2リンクフレキシブルアーム（通称 FLEBOT と命名）を製作した。各リンクは、平面内の曲げのみが発生するように、図に示すような平板構造に設計した。運動面は水平面のつもりであったが、いざ完成して設置すると、図1に示すように、重力によってアームが鉛直下方に変形した。平板はねじりに弱く、リンク1のねじり変形によってアーム全体が下方に垂れたのである。

そこで、急速、アームを図2のように鉛直面内に設置することとし、そのためのフレームを製作した。ところが今度は重力の影響が加わり、振動が抑制されてもリンクのたわみが残るという問題が生じた。また、モータ2の重心位置が偏心していたため、加減速時の慣性力によりリンク1にねじり振動が誘起されるという問題が生じた。この振動の抑制は困難であるように見えたので、結局、図2に示すように、モータ2の反対側にバランスを取り付け、ねじり振動を誘起しないような構造とした^{2),9)}。モータ重心位置の偏心に基づくリンク1のねじり振動の制御問題は連成スピルオーバーの問題として研究されている⁹⁾。

図1 2リンクフレキシブルアーム(水平面内運動)

原稿受付 1988年8月16日

* Compensability of Flexible Arms

** 東北大学工学部

図2 2リンクフレキシブルアーム(鉛直面内運動)

以上の試行錯誤的な研究過程を通して、以下のいくつかの問題が研究課題として浮かび上がってきた。

(1) フレキシブルアームにはジョイントアクチュエータによって振動抑制制御ができない不可制御の振動モードが存在する。この振動モードが何らかの外乱により誘起されるとアームの制御ができない。この振動モードの存在を判定する手法の開発が必要である。

(2) アームの変形により先端に位置誤差が生じる。これはジョイント変位により補償する。しかし、図1の例に見るように、アームの形態によっては、この補償が必ずしも可能とは限らない。可補償の判定基準と補償制御のアルゴリズムを研究する必要がある。

(3) リンクのねじりまで考えると、フレキシブルアームの特徴をすべて備えたアームは、最低2リンク3自由度の空間アームとなる。1リンクアーム(ビーム)や平面2リンクアームではフレキシブルアームの問題を研究できない。

(1)、(2)の問題は互いに関連しているように思えるが、それを裏付けする研究成果はない。(2)の問題については最近一定の研究成果が得られた^{4)~6)}。現在(1)、(2)の問題を総合的に研究するため、(3)の2リンク3自由度フレキシブルアーム(通称 FLEBOT II と命名)を製作し、研究を継続中である。以下、本稿では、(2)の問題についての研究成果を紹介する。

3. 補償制御の考え方

補償制御について述べる前にフレキシブルアームの運動学について簡単に触れることにする。

剛体アームでは、エンドエフェクタの位置、姿勢を決定するパラメータは、ジョイント変位(回転またはスライド)のみである。フレキシブルアームでは、エンドエフェクタの位置、姿勢は、ジョイント変位とリンクの変

形により決定される。リンクの変形を表すパラメータは分布パラメータであるが、エンドエフェクタの位置、姿勢に直接影響するパラメータは、リンク先端の並進、回転変位である。

フレキシブルリンクの両端に座標系 $O_i-x_iy_iz_i$ と $O_i'-x_i'y_i'z_i'$ を固定すると、リンクの変形によるエンドエフェクタの位置、姿勢の変化は、 $O_i'-x_i'y_i'z_i'$ の $O_i-x_iy_iz_i$ に対する位置、姿勢の変化によって決まる。この位置、姿勢の変化は、 $O_i'-x_i'y_i'z_i'$ の x_i, y_i, z_i 軸方向並進変位 s_{xi}, s_{yi}, s_{zi} と回転変位 $\phi_{xi}, \phi_{yi}, \phi_{zi}$ により表される。添字 i は i 番目のリンクを表す。

1リンク n 自由度のフレキシブルアームを考え、エンドエフェクタの位置、姿勢を

$$p=[p_1, p_2, \dots, p_m]^T \quad (1)$$

と表すことにしよう。 p は、ジョイント変位

$$\theta=[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \quad (2)$$

とリンク変位

$$e=[s_{x1}, s_{y1}, s_{z1}, \phi_{x1}, \phi_{y1}, \phi_{z1}, \dots, s_{xn}, s_{yn}, s_{zn}, \phi_{xn}, \phi_{yn}, \phi_{zn}]^T \quad (3)$$

の関数である。すなわち

$$p=f(\theta, e) \quad (4)$$

と表される。

上式において直接制御できるパラメータは θ である。エンドエフェクタの正確な位置決め制御あるいは軌道制御を実現するためには、 e により生じる p の誤差を θ により補償する必要がある。

p の目標値 p_r が与えられたとき、それを実現する θ_r と e_r が計算されたとしよう。この計算は一定の仮定を設けることにより可能である。 e をアクティブに制御することはできないので、 e を測定し、 e_r との誤差を求め、この誤差による p の誤差を θ_r により補償する。

(4) 式をある基準点周りで線形化すると

$$\delta p = J_\theta \delta \theta + J_e \delta e \quad (5)$$

を得る。 J_θ, J_e はそれぞれ f の θ, e に関するヤコビ行列である。 θ_r に加える補償量 $\delta \theta_r$ は、(5) 式において

$$\delta p = 0 \quad (6)$$

とおき、これを $\delta \theta$ について解くことにより、

$$\delta \theta_r = -J_\theta^{-1} J_e (e - e_r) \quad (7)$$

と求まる。ここに J_θ^{-1} は J_θ の一般化逆行列を表す。

この補償制御を実現するためには e を測定するためのリンクたわみセンサが必要となる。差らは半導体レーザと PSD(Position Sensitive Detector) を用いたたわみセンサを開発し、図2のフレキシブルアームの補償制御実験を行っている^{4), 6)}。同様のたわみセンサはその他いくつか提案されているが、測定たわみは2次元たわみまでに限られている^{10), 11)}。筆者らはこれをねじりを含

む3次元たわみ測定に拡張した¹²⁾。

4. 可補償性の概念

補償制御は(5)式を基本式とするが、常に可能であるとは限らない。 $\delta p=0$ としたときの $\delta \theta$ の解が常に求まるとは限らないからである。この関係を写像を用いて眺めてみよう。

(5)式による写像を図3に示す。 J_θ, J_e はそれぞれ $\delta \theta, \delta e$ を δp に写像する。ある δe による δp が $\delta \theta$ により補償できるためには、 $-\delta p$ に対応した $\delta \theta$ が存在しなければならない。このためには、写像の線形性より、 δp に対応した $\delta \theta$ が存在すればよい。このときフレキシブルアームは可補償となる。

フレキシブルアームが可補償であるための必要十分条件は、 J_e の値域が J_θ の値域に覆われることである。すなわち、

$$R(J_e) \subseteq R(J_\theta) \quad (8)$$

$R(J_e)$ が $R(J_\theta)$ に覆われないとき、 $R(J_\theta)$ に覆われない部分の δp に対応する δe を補償する $\delta \theta$ は存在しない。すなわち、フレキシブルアームは不可補償で、3.の補償制御が実行できない。可補償性が補償制御の基礎となる。

5. 特異点との比較

フレキシブルアームの不可補償点は剛体アームの特異点と密接な関連がある。

リンク変位 e が微小であると仮定すると(4)式を線形化するときの e の基準点は $e=0$ となる。このとき J_θ は剛体アームのヤコビ行列に等しい。 J_e の値域が δp の空間を覆いつくす以上に拡大することはないので、 J_θ が特異点になればアームは可補償である。

しかし、 J_θ が特異点にあっても、アームが不可補償になるとは限らない。4.で述べたように、 J_e の値域が J_θ の値域に覆われればアームは可補償である。 J_θ が縮退したとき、その分だけ J_e も縮退すれば、アームは依然として可補償である。この意味で、可補償性は可操作性(特異点にないこと)より弱い条件であるといえる。

図4に2リンク3自由度アームの例を示す。図4(a)、(b)はともに剛体アームの特異点であるが、リンクの伸縮変形がないと仮定すれば、図4(a)は不可補償であるが、図4(b)は可補償である。図4(b)では、 $\delta \theta$ による p の自由度が図の矢印方向に退化するが、 δe による p の自由度も同じ方向に退化しているからである。

図3 アーム座標系より作業座標系への写像

(a) 不可補償特異点 (b) 可補償特異点

図4 特異点と可補償性の関係

6. おわりに

フレキシブルアームの補償制御とその実現条件となる可補償性について解説した。フレキシブルアームがロボットアームとして実用化されるためには、現在研究が盛んな振動抑制制御だけではなく、そのつぎの問題として、エンドエフェクタの位置制御と軌道制御が研究されなければならない。この位置制御と軌道制御のひとつの実現法として、リンク変位を直接計測し、フィードバック制御する補償制御法が注目される。本稿では、この制御法について、主として筆者らの研究を中心に解説したが、読者の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本ロボット学会誌, “フレキシブルアーム特集”, Vol. 6, No. 5, 1988.
- 2) 渡部秀雄, “ロボットマニピュレータの制御に関する研究”, 東北大学工学部精密工学科卒業論文, 1984.
- 3) 内山勝, 姜兆慧, 箱守京次郎, “2リンク弾性ロボットアームの振動抑制制御”, 第25回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 425-426, 1986.
- 4) Z. H. Jiang, M. Uchiyama, and K. Hakomori, “Active Compensating Control of the Flexural Error of Elastic Robot Manipulators”, Proc. of the IMAC/IFAC Int. Symp. on Modelling and Simulation of Distributed Parameter Systems, pp. 413-418, 1987.
- 5) 姜兆慧, 内山勝, 箱守京次郎, “フレキシブルロボットの誤差可補償性”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 301-304, 1987.
- 6) 姜兆慧, 内山勝, 箱守京次郎, “フレキシブルロボットの誤差補償制御”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 305-308, 1987.
- 7) 姜兆慧, 内山勝, “フレキシブルロボットアームの可補

- 償性”，日本ロボット学会誌（投稿中），Vol. 6, No. 5, 1988.
- 8) 内山勝，姜兆慧，箱守京次郎，“フレキシブルロボットアームの補償制御”，日本ロボット学会誌（投稿中）.
- 9) 福田敏男，新井史人，細貝英実，矢島信之，“フレキシブルロボットアームの曲げ・ねじり連成振動抑制制御”，第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 315-316, 1987.
- 10) A. Zalucky and D.E. Hardt, “Active Control of Robot Structure Deflections”, Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 106, pp. 63-69, 1984.
- 11) H. Hashimoto, K. Hasegawa and F. Harashima, “A Discrete Model Reference Adaptive Control of a Flexible Arm Using End-Point Position Sensing-Consideration on Sampling Period and Adaptation”, Proc. of the USA-Japan Symp. on Flexible Automation, pp. 407-414, 1988.
- 12) 内山勝，近野敦，“フレキシブルロボットアームのレーザ光学式リンクたわみセンサ”，第6回日本ロボット学会学術講演会，1988（発表予定）. 1988.

内山 勝

(Masaru UCHIYAMA)

昭和 24 年 9 月 16 日福岡県生まれ。昭和 47 年東京大学工学部産業機械工学科卒業，52 年同大学大学院博士課程修了，工学博士。同年，東北大学工学部精密工学科助手，55 年同助数授となり，現在に至る。この間，57～58 年英国ニューカッスルアポンタイン大学客員研究員，61～62 年米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員教授。55 年計測自動制御学会論文賞受賞，56 年日本機械学会賞論文賞受賞。ロボット，自動制御の研究，教育に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，精密工学会，IEEE の会員。

(日本ロボット学会正会員)