衝突を含む冗長系多リンクマニピュレータの 位置決め安定制御[†]

正 司 康 雅*・稲 葉 忠*・福 田 敏 男**・細 貝 英 実***

Stable Positioning Control of Redundant Multi-Link Manipulator with Collision Phenomena

Yasumasa SHOJI*, Makoto INABA*, Toshio FUKUDA** and Hidemi HOSOKAI***

In this paper, a methodology using the Lyapunov direct method is proposed to analyze the stability of a nonlinear redundant multi-link manipulator system which is positioned on a flexible wall with collision phenomenon. The stability and response of the system are examined by parameter studies of numerical simulation. As the demands for rapid motion of robotics has been increasing in the field of industry to achieve higher efficiency, collision has become a problem to be solved, because every task includes contact when manipulator acts on an object. However, few researches have been undertaken to overcome this problem. In this paper, we employ a Hertz-type model with energy loss parameter to express the impact force between the manipulator and the wall. Using this model, we proved theoretically by Lyapunov direct method that this nonlinear system can be controlled with linear feedback law and that collision has the stabilization effect. The facts are confirmed by the simulations. In the simulations, it is also shown that simple decoupled feedback is more preferable than coupled feedback, if stability is more important than any others. As a result, stable positioning of the manipulator on the flexible wall is assured, and use of collision is sometimes effective to control manipulator to do a task with rapid contact to environment.

Key Words: collision, multi-link manipulator, stability, Lyapunov method, simulation

1. はじめに

近年のロボットに関する研究はめざましい。これは、あらゆる分野においてロボットに対する必要性が生じ、さらに、これらの研究が、ロボットに実際に応用されうだけのハードウェアやソフトウェアに関する

環境と技術が確立されてきたからである。

一方、ロボットに対する要求は、高効率化のための高速性や、多種作業のための多様性を含んでいる。ところが、ロボットに何らかの作業を行わせると、環境たとえば対象物との間で相互作用が生じる¹⁾。この相互作用は高速化に伴い衝突となって制御を困難にし、場合によっては、制御系を不安定にすることもある²⁾。また、衝突を含んだ制御に関する研究については、Khatibら³⁾の衝突エネルギーをダンピング制御で緩和するもの、Caiら⁴⁾の質量配分により耐衝撃性を向上させるもの、北垣ら⁵⁾や永田ら⁶⁾の衝突前速度の最適な制御による突き当てなど、近年多くなっているものの、いまだに少ない。この理由の一つには、衝突が構造自体の変化を伴う非線形性の強い現象であることが挙げられる。ただ、物理現象としては、衝突はエネルギー損失を伴う現象であり、系の安定化作用をもつとも考えられる⁷⁾。しかも、ロボット作業の高速化

[†] ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91 で発表 (1991・6)

* 東洋エンジニアリング(株) 応用技術部 習志野市茜浜 2-8-1

** 名古屋大学工学部 名古屋市中種区不老町

*** 東京理科大学工学部 東京都新宿区神楽坂 1-3

* Applied Technology Group, Toyo Engineering Corp., Narashino

** Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya

*** Faculty of Engineering, The Science University of Tokyo, Shinjuku-ku, Tokyo

(Received February 15, 1991)

(Revised August 30, 1991)

を考えると、衝突を避けるためのゆっくりとした接触は全工程の速さを決める工程になってしまうため、制御系においても衝突を含む制御は解決すべき問題となってきた。特に、マニピュレータを物体の表面で停止させねばならない場合などは、位置決め誤差の存在のため、接触/衝突は不可避であり、解決が必要である。また、衝突が避けられないものであれば、逆に衝突を利用して制御による位置決め荷を低減させることも期待できる。

そこで、筆者らは衝突を含むマニピュレータの制御について、既報^{8),9)}では直列1自由度マニピュレータの押し付けや、直列1自由度マニピュレータによる物体把持についてのおおの1自由度系の安定性などを対象にして報告してきた。本報では、より一般的に扱うために多自由度系を対象として、よく使われる多リンク型のマニピュレータの衝突を含む制御について考える。ここでは、平面上に拘束された冗長な n 自由度のマニピュレータを対象物に押しつける2次元問題を扱う。これにより、より複雑な系にでも適用できることを示す。ただし、マニピュレータは位置サーボ系で構成されているものとする。この問題について、リアプノフの方法による安定性の検討を行った。また、実際の制御では安定性が保証されていることと共に、要求通りの応答性をもつことも重要である。この応答性を検討し、安定性を検証し、また制御則による違いを比較するために、シミュレーションを行った。

本論文では、衝突を含む非線形多リンク系は非干渉な線形フィードバック制御によって安定に制御できることがわかった。

2. 力学モデルと運動方程式

安定性の検討とシミュレーションを行うため、**Fig. 1**のように、 n リンクのマニピュレータが変形可能な対象物(壁)に衝突するような力学モデルを考える。

2.1 仮定

各リンクの固有座標は、**Fig. 2**のように原点が各リンク先端で、リンク方向に x 軸、それと直角に y 軸と定義する。このモデルではつぎの仮定を設けた。

Fig. 1 Mathematical link model

Fig. 2 Link coordinate system

〔仮定1〕 運動は2次元の平面(x - y 平面)内で起こるものとする。

〔仮定2〕 文献10)など一般的にもよく用いられているように、マニピュレータは、集中質量系とする。すなわち、剛体のリンクを関節でつないだ形で表わし、質量はすべて各リンク先端部の関節およびマニピュレータ先端部に集中的に存在するものとする。また、各関節には制御トルクが働くものとする。

〔仮定3〕 対象物は壁のようなものを想定し、面の法線方向(y 方向)と接線方向(x 方向)とで運動が独立であるとし、これらを分けて考える。すなわち、面の法線方向には直線運動をし、等価な質量-バネ-ダンパー系の1自由度系として表わす。また、接線方向には運動はしない。

〔仮定4〕 衝突による力は、マニピュレータ先端と対象物との局部変形によって生じるものとし、Hertz型の力に減衰効果を表わすパラメータを乗じたものとしてモデル化¹¹⁾する。

〔仮定5〕 衝突による反発力は正のみとし、面の法線方向に加わる。接触状態では、この衝突による力とは独立に、面上でマニピュレータの先端との間に摩擦が生じるものとする。摩擦力は、相対速度(すべり)に比例する粘性摩擦の形で表わされるものとする。

〔仮定6〕 アクチュエータの慣性は集中質量の中にすでに考慮されているものとする。

〔仮定7〕 位置エネルギーは考えない(運動の拘束平面は重力方向と垂直な平面とする)。

2.2 運動方程式

まず、対象物についての運動方程式をたて、つぎにマニピュレータについて動特性方程式をたてる。

2.2.1 対象物の運動方程式

対象物の局部変形を表わす運動方程式はつぎのようになる。ただし、壁は壁面の法線方向のみに自由度をもっているため、運動方程式は y 方向のみとなる。

$$m_b \ddot{y}_b = -k_{by} y_b - c_{by} \dot{y}_b + f_{wy} \quad (1)$$

ここで、 m_b , k_{by} , c_{by} は対象物の等価な質量、バネ定数、減衰定数である。

2.2.2 マニピュレータの動特性方程式

マニピュレータの動特性方程式はラグランジェの方法によって求める。

まず運動エネルギー E_K は次式のようになる。

$$E_K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \theta_j} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial \theta_k} \right) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \quad (2)$$

ただし、 J_i は i リンクの慣性行列を表わし、 T_i は i 座標からグローバル座標への変換行列を表わしている。これらは、以下の式で表わすことができる。

$$J_i = \begin{bmatrix} m_i l_i^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & m_i l_i^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & m_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_i = A_1 A_2 \cdots A_i \quad (4)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & l_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & l_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、行列 A_i は、 i リンクから $(i-1)$ リンク間の変換行列であり、 m_i は i 番目の質点の質量、 l_i は i 番目のリンク長さ、 θ_i は $(i-1)$ 番目のリンクと i リンク番目のとの相対角度である。

仮定よりポテンシャルエネルギーは発生しないので、ラグランジアン L は運動エネルギー E_K と一致し、

$$L = E_K$$

となる。また、 $\theta_1 = \theta_2 = \cdots = \theta_i = \cdots = \theta_n = 0$ のとき、マニピュレータは発生力 0 となり、自然状態の対象物と接触力 0 の状態で接するものとする。ラグランジュの方法から i 番目のリンクに関する動特性方程式は次式のようになる。

$$F_i = \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial T_j}{\partial \theta_k} J_j \frac{\partial T_j^T}{\partial \theta_i} \right) \ddot{\theta}_k + \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 T_j}{\partial \theta_k \partial \theta_m} J_j \frac{\partial T_j^T}{\partial \theta_i} \right) \dot{\theta}_k \dot{\theta}_m \quad (6)$$

ここで、一般化力 F_i は仮想仕事の原理から

$$F_i = \tau_i + M_{wi} \quad (7)$$

ただし、 τ_i は、 i 番目の関節に加わる制御トルクで、(8)式で表わし、 M_{wi} は接触力によって i 番目の関節が受けるモーメントで、(9)式で表わす。

$$\tau_i = - \sum_{j=1}^n k_{pij} \dot{\theta}_j - \sum_{j=1}^n k_{vij} \dot{\theta}_j \quad (8)$$

$$M_{wi} = |{}^{i-1}\mathbf{r} \times {}^{i-1}\mathbf{f}_w| \quad (9)$$

ここで、 k_{pij} 、 k_{vij} はのおの j 番目の関節の角度および各速度に対する i 番目の関節アクチュエータゲインである。また、 i 番目の関節 (すなわち、 $(i-1)$ 番目のリンク座標の原点) から見たマニピュレータ先端の位置を ${}^{i-1}\mathbf{r}$ とし、同先端の力を ${}^{i-1}\mathbf{f}_w$ とする。これらのベクトルにつき、つぎの 2 式が成り立つ。

$${}^{i-1}\mathbf{r} = A_i A_{i+1} \cdots A_n {}^n\mathbf{r} \quad (10)$$

$${}^{i-1}\mathbf{f}_w = A_i^{-1} A_{i+1}^{-1} \cdots A_n^{-1} \mathbf{f}_{\text{worg}} \quad (11)$$

${}^n\mathbf{r}$ は n 番目のリンクから見たマニピュレータ先端で、このリンクの原点なので、つぎのようになる。

$${}^n\mathbf{r} = (0 \ 0 \ 1)^T \quad (12)$$

また、 $\mathbf{f}_{\text{worg}}$ は、グローバル座標から見た接触力で、つぎの (13) 式のように表わすことができる。

$$\mathbf{f}_{\text{worg}} = (-f_{wx} -f_{wy} \ 0)^T \quad (13)$$

ここで、 f_{wx} は粘性摩擦による x 方向の力、 f_{wy} は y 方向の衝突による Hertz 型の力である。これらの力はおのの、(14)、(15) 式で表わす。

$$f_{wx} = \begin{cases} c_{vx} \dot{x}_n & (u_y \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_y \geq -1/p_y) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (14)$$

$$f_{wy} = \begin{cases} (1 + p_y \dot{u}_y) H_y u_y^{3/2} & (u_y \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_y \geq -1/p_y) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (15)$$

また、以下添字 x 、 y はのおの x 方向、 y 方向に関するものであることを示している。ただし、 $p_y (\geq 0)$ は、エネルギー損失を表わすパラメータであり、 H は Hertz の力の定数で通常大きな正の値となる。 p_y といわゆる反発係数 e との関係は付録 1¹¹⁾ となる。また、 u_y はマニピュレータ先端と壁の法線方向相対変位であり、(16) 式で定義する。

$$u_y = y_n - y_b \quad (16)$$

また、 x_n 、 y_n は次式で表わされる。

$$\begin{Bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{Bmatrix} = A_1 A_2 \cdots A_n \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

本論文では、既報^{8),9)}の通り、衝突中のモデルとして最も妥当と思われる (15) 式を採用¹¹⁾したが、これにより、仮定 5 から $u_y \geq 0$ かつ $\dot{u}_y \geq -1/p_y$ を接触状態、その他を非接触状態と考える。以上で対象物とマニピュレータの動特性方程式は求まった。

3. 衝突を含む系の安定性

前章で考慮すべき系のモデル化ができたが、本章では、衝突を含んでいても安定な制御が可能であることを、リアプノフの直接法によって理論的に示す。

3.1 スカラー関数

マニピュレータの運動エネルギー E_K を用いて (18) 式のようなスカラー関数 V を定義する。

$$V = E_K + \frac{1}{2} m_b \dot{y}_b^2 + \frac{1}{2} k_{by} y_b^2 + \frac{1}{2} \theta_p^T K_p \theta_p + \Delta k_y u_y^2 \quad (18)$$

ただし、

$$\Delta k_y = \begin{cases} a_y H_y u_y^{1/2} & (u_y \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_y \geq -1/p_y) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (19)$$

$$K_p = \begin{bmatrix} k_{p11} & k_{p12} & \cdots & k_{p1n} \\ k_{p21} & k_{p22} & \cdots & k_{p2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{pn1} & k_{pn2} & \cdots & k_{pnn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\theta_p = \{\theta_1 \ \theta_2 \ \cdots \ \theta_n\}^T \quad (21)$$

また、 a_y は任意の正の定数で、制御変数ではなく、何らかの形で存在すれば、 V がリアプノフ関数であることが示されるものである。スカラー関数 V について考えると、右辺の第1項はリンクの運動エネルギーであるから非負である。また、それ以外の項は完全平方の形をしており非負である。よって、明らかに

$$V \geq 0. \quad (22)$$

3.2 スカラー関数の微分

つぎに、 V の微係数について考える。(18)式を微分し、(1)式を代入すると、

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{E}_K + \dot{\theta}_p^T K_p \theta_p + f_{wy} \dot{y}_b - c_{by} \dot{y}_b^2 \\ + 2\Delta k_{uy} \dot{u}_y + (\Delta k_y) \dot{u}_y^2 \end{aligned} \quad (23)$$

(23)式で運動エネルギー E_K を時間で微分すると、

$$\begin{aligned} \dot{E}_K = \sum_{k=1}^n \dot{\theta}_k \left\{ \sum_{i=k}^n \sum_{j=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \theta_j} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial \theta_k} \right) \dot{\theta}_j \right\} \\ + \sum_{k=1}^n \dot{\theta}_k \left\{ \sum_{i=k}^n \sum_{j=1}^i \sum_{m=1}^i \text{Trace} \right. \\ \left. \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta_j \partial \theta_m} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial \theta_k} \right) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_m \right\}. \end{aligned} \quad (24)$$

添字に注意して(6)式を(24)式に代入すると、

$$\begin{aligned} \dot{E}_K = \sum_{i=1}^n (\dot{\theta}_i \cdot F_i) \\ = \sum_{i=1}^n \{(\tau_i + M_{wi}) \dot{\theta}_i\} \\ = \sum_{i=1}^n \left\{ \left(- \sum_{j=1}^n k_{pij} \dot{\theta}_j - \sum_{j=1}^n k_{vij} \dot{\theta}_j + M_{wi} \right) \cdot \dot{\theta}_i \right\} \\ = -\dot{\theta}_p^T K_p \theta_p - \dot{\theta}_p^T K_v \theta_p + \sum_{i=1}^n M_{wi} \dot{\theta}_i. \end{aligned} \quad (25)$$

(25)式を(23)式に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \dot{V} = \sum_{i=1}^n M_{wi} \dot{\theta}_i + f_{wy} \dot{y}_b - c_{by} \dot{y}_b^2 \\ + 2\Delta k_{uy} \dot{u}_y + (\Delta k_y) \dot{u}_y^2 - \dot{\theta}_p^T K_v \theta_p. \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、

$$K_v = \begin{bmatrix} k_{v11} & k_{v12} & \cdots & k_{v1n} \\ k_{v21} & k_{v22} & \cdots & k_{v2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{vn1} & k_{vn2} & \cdots & k_{vnn} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

付録2より

$$\sum_{i=1}^n M_{wi} \dot{\theta}_i = -f_{wx} \dot{x}_n - f_{wy} \dot{y}_n. \quad (28)$$

(28)式を(26)式に代入すると、

$$\begin{aligned} \dot{V} = -f_{wx} \dot{x}_n - f_{wy} \dot{y}_n + 2\Delta k_{uy} \dot{u}_y - c_{by} \dot{y}_b^2 \\ + (\Delta k_y) \dot{u}_y^2 - \dot{\theta}_p^T K_v \theta_p. \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、接触状態と非接触状態とを別々に考える。

(1) 非接触状態

このとき

$$\dot{V} = -\dot{\theta}_p^T K_v \theta_p - c_{by} \dot{y}_b^2 \leq 0 \quad (30)$$

(2) 接触状態

このとき、(14)、(15)、(19)式の接触条件とつぎの(31)式を考慮し、(29)式の衝突の項について注意すると、(32)式が求まる。

$$(\Delta k_y) = \frac{1}{2} a_y H_y u_y^{-1/2} \dot{u}_y \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = - \left(1 - \frac{5}{2} a_y \right) H_y u_y^{3/2} \dot{u}_y - p_y H_y u_y^{3/2} \dot{u}_y \\ - \dot{\theta}_p^T K_v \theta_p - c_{bx} \dot{x}_n^2 - c_{by} \dot{y}_b^2 \end{aligned} \quad (32)$$

いま、(32)式で

$$a_y = 2/5 \quad (33)$$

ならば、つぎの(34)式が成り立つ。

$$\dot{V} = -p_y H_y u_y^{3/2} \dot{u}_y - \dot{\theta}_p^T K_v \theta_p - c_{bx} \dot{x}_n^2 - c_{by} \dot{y}_b^2 \leq 0 \quad (34)$$

a_y は定義から $2/5$ に固定してもよいから、 V がリアプノフ関数であるためには K_p 、 K_v について

$$K_p = K_p^T > 0, \quad K_v = K_v^T > 0 \quad (35)$$

であればよいことがわかる。もしも、

$$\begin{aligned} K_p &= \text{diag} \{k_{p11} \ k_{p22} \ \cdots \ k_{pnn}\} \\ K_v &= \text{diag} \{k_{v11} \ k_{v22} \ \cdots \ k_{vnn}\} \end{aligned} \quad (36)$$

で、全ゲインが正であれば K_p 、 K_v は明らかに(35)式を満足する。したがって、衝突の安定制御を実現する最も速くて簡単な制御として非干渉な局所フィードバック則を用いればよいことがわかる。

なお、以上の議論では、接触/非接触の二つのリアプノフ関数 V が交互に切り替えられるという見方もあるが、付録3に示す通り、この切り替え時においても単調減少は保証されており、かつ常にリアプノフの条件も満足するので、リアプノフの意味での安定性の証明はなされたと考えられる。

また、(34)式と(30)式とを比較すると、(34)式のほうが、 $p_y H_y u_y^{3/2} \dot{u}_y + c_{bx} \dot{x}_n^2$ だけ小さい。この差の分は衝突が原因となっており、マニピュレータ単独の運動より衝突中はリアプノフ関数の減り方が速く、全体的に見ると、他の項で $\dot{V} = 0$ でも衝突の項の分で $\dot{V} \leq 0$ となるので、関数の減少範囲が広いことを示しており、本手法では衝突が系を安定化させるように働いていることがわかる。これは、衝突をうまく使えばより安定な制御が可能であることを示すものである。

また従来、マニピュレータの衝突を制御する問題では、マニピュレータ単独で安定になるようにし、衝突は外乱としてマニピュレータのロバスト性によって対

処するのが一般的である^{12),13)}。しかし、本章で示した制御則は、安定性が保証されているので、接触面でマニピュレータを止めるような問題では、フィードバックゲインの決定などに有利であることがわかる。なお、離散系の制御系に適用する場合には、十分にサンプリングと制御の時間間隔を小さく取ればよい。

4. シミュレーション結果と考察

本章では、衝突を含む制御について、以下シミュレーションにより安定性と過渡状態について検討する。ここでは、リンク数 n を 3 とし、3 リンク系についてシミュレーションを行う。前章の安定性解析で扱った制御則は、線形であり、フィードバック則としては最も簡単な例であった。ここでは干渉項のある一般的な線形フィードバック則と非干渉制御とを比較する。

$$\tau = \{\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3\}^T = K_p \theta_p + K_v \dot{\theta}_p \quad (37)$$

ここで、 τ は制御トルクベクトルである。また、非干渉系の制御則を同様に表わすと次式のようにになる。

$$\tau = [\text{diag } K_p] \theta_p + [\text{diag } K_v] \dot{\theta}_p \quad (38)$$

4.1 解 法

運動方程式を 4 次のルンゲクッタ法によって数値積分する。ただし、マニピュレータと対象物とは独立な系であると考え、この二つの系が接触した場合には衝突力がお互いに働いただけとし、接触している状態であっても機械的に連結しているとは考えない。

4.2 境界条件

接触・非接触の判別は、マニピュレータ先端と壁との y 方向の相対変位 u_y と相対速度 $\dot{u}_y$ から求める。特に接触と非接触の状態の変化については、積分における各時間刻みの前後の状態量から接触か否かの状態を見て判断し、線形補間から真の状態変化時刻を求め、計算すべき状態を切り替える。全体の計算は、この状態判別をおのおのの時間刻みで行っていく。

4.3 計算結果

Table 1 と Table 2 にシミュレーションに用いたパラメータとフィードバックゲインを、また、Fig. 3~9 にシミュレーション結果を示す。マニピュレータの初期条件は、第 1 関節のみが 0.495 ラジアンで他の関節角は 0 の真直な状態である。なお、目標位置は前節の理論解析と同じく、全関節角度 0 の静止状態である。ここで、Table 1 では金属間の衝突を考え、 H_y の値は他のバネ定数よりも十分に大きく、また p_y は現実とはかけはなれない程度でシミュレーションに違いの出る値、 m_b 、 k_{by} 、 c_{by} 、 c_{bx} については、マニピュレータに対し「剛」な壁を表わせる値とした。また、No. 1 から No. 7 の計算はつぎの条件である。

Table 1 Parameters for the simulations

m_1	1.0	l_1	2.0	m_b	5.0
m_2	1.0	l_2	1.0	k_{by}	50.0
m_3	0.5	l_3	1.0	c_{by}	0.0
H_y	10000	p_y	0.3	c_{bx}	5.0

Table 2 Feedback gains

Gains	Case						
	1	2	3	4	5	6	7
k_{p11}	15	15	15	15	15	15	15
k_{p12}	3	3	3	3	0	0	0
k_{p13}	3	3	4	4	0	0	0
k_{p21}	4	4	1	1	0	0	0
k_{p22}	5	5	5	5	5	5	5
k_{p23}	4	4	2	2	0	0	0
k_{p31}	3	3	1	1	0	0	0
k_{p32}	3	3	2	2	0	0	0
k_{p33}	10	10	10	10	10	10	10
k_{v11}	3	3	3	3	3	0	0
k_{v12}	2	2	6	6	0	0	0
k_{v13}	2	2	7	7	0	0	0
k_{v21}	1.5	1.5	3	3	0	0	0
k_{v22}	3	3	3	3	3	0	0
k_{v23}	1.5	1.5	4	4	0	0	0
k_{v31}	1.5	1.5	3	3	0	0	0
k_{v32}	1.5	1.5	3	3	0	0	0
k_{v33}	3	3	3	3	3	0	0

No. 1 一般的な状態フィードバック制御を行った場合の応答例 (Fig. 3)。この場合、制御は (37) 式に表わされるようにフィードバックゲインの部分行列が対角行列でない場合を考えており、各制御トルクとジョイント角の間で干渉項が存在する。

No. 2 No. 1 のケースで、壁との衝突を生じず、マニピュレータ単体を同じ制御則と初期条件で制御した場合の応答 (Fig. 4)。同じ制御を行っても収束時間が長くなっており、No. 1 における衝突の影響が安定化の方向に働いていることがわかる。

No. 3 一般的な状態フィードバック制御の別の応答例 (Fig. 5)。No. 1 のケースと比較して、(37) 式の非対角項である各リンク間の干渉項の値を変化させ、特に速度に関するフィードバックゲインを大きくした。ここでも、安定な応答を示しているが、ゲインの変更によって、安定性がやや悪くなっている。

No. 4 No. 3 のケースで、壁との衝突を生じず、マニピュレータ単体を同じ制御則と初期条件で制御した場合の応答 (Fig. 6)。同じ制御を行っても収束時間が短く、No. 3 と比較すると、衝突が系を不安定化させるように働いていることがわかる。

Fig. 3 Linear state feedback (coupled #1)

Fig. 5 Linear state feedback (coupled #2)

Fig. 4 No wall with linear state feedback #1

Fig. 6 No wall with linear state feedback #2

No. 1 から No. 4 の結果を見ると、(37)式で表わされるような一般的な線形フィードバックでは、単体では安定なマニピュレータも衝突によって安定化されたり、逆に不安定化されたりすることがわかり、また、衝突の無い場合では安定性のより高いマニピュレータも衝突が生じることで、その安定性の高さが逆転することもあることがわかる。このように、マニピュレータ単体の安定性と衝突を含む場合の安定性は必ずしも一致せず、これが従来の制御において衝突を回避すべき理由の一つでもある。

No. 5 (38)式に表わされるようにフィードバック

ゲイン行列の対角成分のみが非零となるような線形フィードバック制御を行った場合の応答 (Fig. 7)。これは、マニピュレータの各リンクについて非干渉制御を行っていることを意味している。ここでの制御では、対角成分は No. 1 から No. 4 と同じとしている。このシミュレーションは第3章で考えた制御を行っているので、リアプノフの安定性解析の通り安定な挙動を示している。これにより、簡単な局部線形フィードバックによる制御でも衝突を含む非線形マニピュレータの安定な押しつけが可能であることがわかる。

以上から、一般的な非線形な多リンク系の状態フィ

Fig. 7 Decoupled state feedback

Fig. 8 No damping (decoupled)

ードバック制御で衝突という現象が系に含まれる場合には、系が非線形であっても、非干渉線形制御によって各リンクを独立に制御したほうが、安定性の面で、より良いとも考えられる。

Fig. 9 No damping except collision (decoupled)

また第3章では、系の応答に対して衝突が安定化要素として働くことがあることを示したが、このことについてシミュレーションにより検討してみる。

No. 6 非常に理想的な状態で、減衰の項をすべて0とした系の応答 (Fig. 8)。この制御では減衰効果のある相対角速度に対するフィードバックは考えず、角度のフィードバックのみとした。系は、臨界安定であり、応答は減衰も発散もせず周期的に続く。

No. 7 マニピュレータ本体と壁自身による減衰の項をすべて0とし衝突のみに減衰効果をもたせた ($p_y, c_{bx} > 0$) 場合の応答 (Fig. 9)。No. 6 と同様で、制御は角度のみをフィードバックした。No. 6 と比較して明らかに運動が収束する傾向を示している。これにより、減衰のないようなマニピュレータや対象物を含む系でもエネルギー散逸を含む衝突により安定化することができ、衝突が安定化作用をもっていることがわかる。このことは、第3章の安定性解析の結果と一致しており、衝突を利用することによって、位置決め制御を容易にすることが可能になることがわかる。

5. ま と め

本論文では衝突を含む多リンクマニピュレータの押しつけ動作につき、第2章でマニピュレータのモデル化を行い、第3章ではリアプノフの直接法によって理

論的に検討し、また第4章ではシミュレーションによってその安定性と過渡状態について検討した。この結果、衝突を含む多リンク系であってもリアプノフの直接法によって安定性を論じることが可能なことが示された。また、衝突は系を安定化させる現象であり、簡単な線形フィードバック制御でも衝突を含む非線形系の安定な押し付け制御が可能であることが理論からもシミュレーションからも確認された。さらに、安定性に着目すると、通常の干渉項を含んだ線形フィードバックよりも、非干渉な線形フィードバックによる制御を行ったほうが、簡単な割に安定性が保証されており、制御にかかる計算機パワーが減り、サンプリング間隔を短くできる分だけ有利となることもわかった。

参考文献

- 1) 福田, 北村, 谷江: 対象物の動特性を考慮したグリッパの適応ハイブリッド力制御方式, 日本ロボット学会誌, 6-2, 3/12 (1988)
- 2) 正司, 稲葉, 福田, 細貝: 衝突を考慮したマニピュレータの制御 (第2報: 2本の1自由度マニピュレータによる物体把持), 第28回 SICE 学術講演会予稿集, 209/210 (1989)
- 3) O. Khatib and J. Burdich: Motion and Force Control of Robot Manipulators, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1381/1386 (1986)
- 4) C. Cai and R. Both: Impact Sensitivity to Mass Distribution of a Planar Manipulator, Proc. of the 3rd International Conference on Advanced Robotics, 115/124 (1987)
- 5) 北垣, 内山: 外部環境に対するマニピュレータの最適接近速度, 日本ロボット学会誌, 8-4, 413/420 (1990)
- 6) 永田, 小笠原, 小侯: 多関節ロボットの柔軟な突き当てのための最適速度ベクトル, 計測自動制御学会論文集, 26-4, 435/442 (1990)
- 7) 倉掛, 原: 磁気ばね動吸振器の作用について (衝突を伴う場合の最適効果), 日本機械学会論文集C編, 45-399, 1217/1224 (1979)
- 8) 正司, 稲葉, 福田, 細貝: 衝突を含むマニピュレータの安定制御 (第1報: 1自由度マニピュレータの押し付け制御の安定性), 日本機械学会論文集C編, 56-527, 203/209 (1990)
- 9) 正司, 稲葉, 福田, 細貝: 衝突を含むマニピュレータの安定制御 (第2報: 2本の1自由度マニピュレータによる物体把持), 日本機械学会論文集C編, 56-529, 114/122 (1990)
- 10) 高西, 武谷, 唐木, 桑田, 加藤: 未知の外力下における2足歩行 (プログラム制御を用いた歩行実験による制御方式の検討), 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 695/698 (1989)
- 11) 藤田, 服部: 周期衝突振動における衝撃特性, 日本機械学会論文集C編, 45-395, 738/746 (1979)
- 12) S. Arimoto and F. Miyazaki: Asymptotic Stability of Feedback Control Laws for Robot Manipulators, Proc. of 1st IFAC Symposium on Robot Control, 447/452 (1985)
- 13) 宮崎, 有本: ロボットマニピュレータのためのフィード

バック制御の安定性とロバスト性に関する考察, 計測自動制御学会論文集, 21-1, 78/83 (1985)

《付 録》

1.

衝突力のエネルギー損失パラメータ p と, 反発係数 e との関係は, 衝突速度 v_0 を用いて二つの質量の衝突モデルから以下の式のように求められる。

$$e = \frac{1}{pv_0} - \left(1 + \frac{1}{pv_0}\right) \exp\{-pv_0(e+1)\}$$

2. $\Sigma M_{wi}\theta_i$ について

Fig. A.1 を用いて仮想仕事の原理から考える。

(1) 接触力の微小な仕事: $f_{wx}dx_n + f_{wy}dy_n$

(2) 全関節の仕事: $\sum_{i=1}^n M_{wi} \cdot d\theta_i$

仕事の和は0だから

$$\sum_{i=1}^n M_{wi} \cdot d\theta_i + f_{wx}dx_n + f_{wy}dy_n = 0$$

dt で除すと, $dx_n/dt = \dot{x}_n$, $dy_n/dt = \dot{y}_n$ だから

$$\sum_{i=1}^n M_{wi} \dot{\theta}_i = -f_{wi}\dot{x}_n - f_{wy}\dot{y}_n$$

3. リアプノフ関数の連続性について

本論文では, ある意味で二つのスカラー関数を接触状態と非接触状態とで切り替えて使っている。本件についてつぎのように考える。

衝突を論じる場合, 本論文のモデルではヘルツの力の係数 H とエネルギー損失パラメータ p_y とが重要となる。 H は, マニピュレータと壁との間の局部変形に関わるバネ定数と同等のものであり, p_y は衝突の加減速時の力の履歴の違いからくる減衰定数と同等のものである。ただし, 本論文での接触状態判別では p_y のほうが重要であり, この p_y に着目してリアプノフ関数を考える。ここで, 物理的に考え, p_y は非負とする。

(18)式の定義から, リアプノフ関数の等値線は図の Fig. A.2 のように表わすことができる。いま, 十分に減衰が小さく, p_y が小さい場合を考えるとリアプノフ関数の奇跡は Fig. A.3 のようになる。ここで, いくつかの閉曲線があるが, 内側の閉曲線はスカラー関数の値が小さいことを意味している。また, 接触および非接触を表わす等値線は2点A, Bでなめらかに

Fig. A.1 Forces and displacement

Fig. A.2 Contour of the Lyapunov function with small p_y

Fig. A.3 Trajectory of the Lyapunov function

つながっており、衝突での軌跡は時計回りとなる。このとき、系が安定ならば、軌跡は原点に収束し、運動は平衡点で静止する。この場合は、リアプノフ関数が連続であり、微分可能であることは明らかである。

しかしながら、減衰が大きく、すなわち p_y があまり小さくない場合には少し違う。この場合の等値線図とリアプノフ関数の軌跡は Fig. A.4 のようになる。いま、接触状態にある関数が、点 C において $\dot{u}_y = -1/p_y$ の面と交差するものとする、衝突力モデルの定義から、接触状態が非接触状態に変化する。このとき、スカラー関数では、いままであった衝突を表わす非負の項がなくなるので、この分真下へ値がジャンプして小さくなるが、 u_y , $\dot{u}_y$ は変化しない。また、この軌跡を、 u_y - $\dot{u}_y$ 平面に投影すると Fig. A.5 のようになる。この投影面上では、軌跡は時計回りなので、ジャンプの方向は Fig. A.4 における点 C から下側の点

Fig. A.4 Contour of the Lyapunov function with large p_y

Fig. A.5 Projection of the trajectory with large p_y

D への一方向であり、リアプノフ関数が 2 点 C, D で不連続であっても関数 V の値は常に減少することが明らかである。さらに、運動が遅くなり、平衡点に近づくといくると、 $du_y/dt = -1/p_y$ の影響を受けなくなり、Fig. A.3 で示される系と同様になり、連続性と微分可能性が確保されるようになる。

以上から、論文で示したリアプノフ関数の連続性に關する妥当性が示された。

[著 者 紹 介]

正 司 康 雅 (正会員)

1984年、慶応義塾大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。同年、東洋エンジニアリング(株)入社、現在に至る。応用技術部員。この間、東京理科大学に国内留学(1988年より1989年)。構造解析、知能ロボットの研究などに従事。

稲 葉 忠

1969年、慶応義塾大学工学部機械工学科卒業。同年、東洋エンジニアリング(株)入社、現在に至る。応用技術部長。プラントの耐震設計、プラントの知能化に関する研究に従事。

福 田 敏 男 (正会員)

1977年、東京大学大学院博士課程修了、工学博士。1977年より機械技術研究所、1982年より東京理科大学工学部機械工学科を経て、1989年4月、名古屋大学工学部機械工学科第2学科教授。自己組織化ロボットなどの研究に従事。

細 貝 英 実 (正会員)

1967年、東京理科大学理学部物理学科卒業。同年同大学工学部機械工学科助手。自動車用タイヤに関する研究、大型フレキシブル構造物の振動制御の研究、配管診断ロボットに関する研究、ロボット用力センサに関する研究などに従事。工学博士。