衝突を含むロボットマニピュレータの 統一的アプローチに基づく安定制御

正 司 康 雅* 稲 葉 忠* 福 田 敏 男**

Stable Contact Control of Robotic Manipulator Based on Unified Approach

Yasumasa SHOJI Makoto INABA Toshio FUKUDA

In this paper, a methodology is proposed to obtain a stable control law for the manipulators which perform contact tasks. The methodology is based on unified approach of the Lyapunov direct method. The subject manipulators are varied from a simple linear manipulator to a nonlinear 3-dimensional redundant multi-link manipulator, which are interacting with a flexible wall with collision phenomena at the contact of tasks. The stability and response of the system are examined by parameter studies of numerical simulations adequately. 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 a manipulator acts on an object. The contact, or collision, is analyzed and proved to be stable on the manipulator tasks.

Key Words : Manipulator, Lyapunov method, Stability, Collision, Positioning

1. はじめに

近年のロボットの発展は目を見張るばかりである。特に産業用ロボットのハードウェアの進歩について言える。ただ、これら産業用ロボットの動きはフィードバック制御を用いているものもあるが、オープンループのシーケンス制御によって実現されているものもあり、これらでは環境との相互作用やセンサー情報のフィードバックなどは取り入れられていないものが多い。即ち、未だに知的とはいえない状況である。しかも、これらの制御のうち衝突制御、特にその安定性についてはほとんど考慮されていない。確かにエンドエフェクタがある地点からある地点まで往復する、いわゆる「サイクルタイム」は速くなったが、これでは接触が問題となるような制御では自ずから高速化に限界を生じてしまう。従って、衝突を

考えたマニピュレータの制御は解決すべき問題の一つと考えられる。

ロボットマニピュレータを用いて環境に働きかける場合、必ず両者の間で衝突などの相互作用を生じ、多くの場合マニピュレータの制御を困難にすることが見受けられる¹⁵⁾。ところが逆に、衝突はエネルギー散逸を伴う現象であるため、工学的には強度が十分な場合、配管のブレ止めや塔などのサポート等に制振用として用いられている。この違いは、マニピュレータの通常の制御理論では、衝突が接触状態と非接触状態で構造変化を伴う非線形性の強い現象であるため、取扱いが困難であるという理由と、衝突が通常のマニピュレータの運動速度に対して非常に速い現象であるため、複雑な制御では時間的に追いつかないという理由に基づいている。また逆の見方をすると、衝突は分かりにくい現象であることから、高速の接触を避けるために、マスタースレーブマニピュレータの、スレーブ側をゆっくり動かす“Guarded Motion”¹⁶⁾のように運動自体を遅くしなければならない状

原稿受付 1992 年 8 月 10 日

* 東洋エンジニアリング(株)

** 名古屋大学工学部

況にある。著者らもマニピュレータの力/位置ハイブリッド適応制御等の研究を行ってきた^{1)~5)}が接触・衝突のモデリングに基づく制御問題に対しては特に触れなかった。ロボットの衝突に関する研究も衝突回避問題が多い¹⁷⁾。

ところで、衝突に関する一般的な従来の研究のうち、モデル化については次のような範疇に分類できる。即ち、衝突物体間の力をモデル化する相互作用型⁶⁾⁷⁾、衝突後構造のバネ定数を変える非線形バネ型⁸⁾、反発係数を用いて衝突後の速度を表す反発型⁹⁾、衝突の代わりに衝撃力を加える衝撃力型¹⁰⁾、力積で相互作用をモデル化する力積型¹¹⁾、その他¹²⁾¹³⁾である。

また、モデル化の他に衝突を含んだ制御に関する研究については、Khatib ら¹⁹⁾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²⁰⁾の質量配分により耐衝撃性を向上させるもの、北垣ら²¹⁾や永田ら²²⁾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。

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^{26)~33)}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各々1自由度系の安定性などを対象にして報告してきた。これらは、衝突を含んだグライнда¹⁸⁾や突き当てなどに応用できる。また、2次元平面内に拘束された多リンク系の問題や線形多自由度マニピュレータについて報告してきた。また、衝突が避けられないのであれば、逆に可能性として衝突をうまく利用して制御による位置決めへの負荷を低減させることも期待できることも述べてきた。

本論文では、第2章で衝突のモデルについて述べ、第3章でピュマ型ロボットに代表されるような3次元空間内の肘型多リンクロボットに着目して衝突を含む制御について考える。第4章以降では既報についてまとめて述べる。また、3次元多リンク系では一般化を考えて7自由度以上の冗長系でも扱えるようにした。ここでは、衝突をさせてマニピュレータを平面の壁の表面に停止させる問題を扱う。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。理論的にはリアプノフの方法¹⁴⁾による安定性の検討を行い、その検証のために、シミュレーションを行った。既報分については、3次元を2次元に落とした系や、動特性方程式が線形式で表される系について安定性を中心に示す。

本論文では、衝突を含む非線形多リンク系は線形フィードバック制御によって、従来の如くマニピュレータのロバスト性に期待する²⁴⁾²⁵⁾ことなく、安定に制御できることを示す。

2. 衝突/接触力のモデル

本章では、本論文に使用されている衝突・接触のモデルについて述べる。衝突は、藤田、服部によって提唱された次式⁶⁾で表す。

$$f_w = \begin{cases} (1+p\dot{u})Hu^{3/2} & (\text{if } u \geq 0 \text{ and } \dot{u} \geq -1/p) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで

$$u = x_1 - x_2 \quad (2)$$

x_1, x_2 は二つの物体の各変位であり、 u はその相対変位で、近づくとき正となる。(1)式は、基本的に $Hu^{3/2}$ の部分が一般的に受け入れられている Hertz の接触力であり、 $(1+p\dot{u})$ の部分が速度による減衰を表すものである²⁸⁾。また、 p はエネルギー損失を表すパラメータであり、 $p=0$ のとき完全弾性衝突、 $p>0$ のとき減衰を伴う非完全弾性衝突を表す。また、 H は Hertz の理論による値で大きな正值となる。 p は減衰項であるので、いわゆる反発係数とも物理的な関係があり、この2者についての関係式も付録1に記してある。 p, H は以下の通りとなる。

$$p \geq 0, H > 0 \quad (3)$$

本論文では、安定性の検討、あるいはシミュレーションに際し、衝突は有限の計測可能な時間で生じるものとして表すために衝突中の力もモデル化する必要があり、ここでは最も妥当と思われる(1)式を採用した。衝突の式は各モデルにより添え字などがついて若干異なるものの、考え方は全く同じである。

これより、 $u \geq 0$ かつ $\dot{u} \geq -1/p$ を接触状態、その他を非接触状態と考える。

3. 3次元空間内における冗長系多リンクマニピュレータの衝突を考慮した位置決め安定制御

本章では、ピュマ型ロボットに代表されるような3次元空間内に置かれた肘型多リンクロボットに着目して衝突を含む制御について考える。また、一般化を考えて7自由度以上の冗長系でも扱えるようにした。制御についての問題設定は、3次元で n 自由度を有するマニピュレータを、衝突を回避せずに平面の壁の表面に停止させる問題を扱う。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う。また、理論の検証のために、シミュレーションを行った。

ここでは、衝突を含む非線形多リンク系は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を示す。

Fig. 1 Mathematical model of 3 dimensional link manipulator

Fig. 2 Link parameters and link coordinates

3.1 力学モデル

力学モデルは、Fig. 1 に示されるように、3次元空間内で自由に運動することのできる肘型ロボットマニピュレータと空間内に固定された変形可能な対象物とを考える。ここでは運動の目標として、このマニピュレータを発生力の無い状態で対象物である壁の表面に停止させる事を考える。なお、このマニピュレータの自由度は「 n 」であり、7自由度以上の冗長系でもよい。また、運動はマニピュレータと壁との衝突を含んでおり、いかに安定な制御を実現するかを最も重要なテーマとした。

このモデルでは、以下のようにいくつかの仮定を設けている。即ち、マニピュレータの質量は分布系であるとし、アクチュエータはバックラッシュの無いモーターであるとする。リンクは剛体で、撓みや捻れ等の変形は生じないものとする。各モーターは制限無しに必要な力を発生させ得るものとする。なお、アクチュエータをバネとダンパと置きかえ、吉川ら³⁴⁾が行なっているように、1本のリンクを複数のリンクで表わせれば、撓みなども考慮することができる。壁については、壁面の法線方向には、壁の振動を表す1自由度があり、接線方向には自由度は無い。ただし、接線方向にも壁とマニピュレータとの相対速度に比例した粘性摩擦力がマニピュレータには働くものとする。なお、壁の法線方向の自由度は、等価な質量-バネ-ダンパと制御力で表されるものとする。衝突力は前章で示したように壁とマニピュレータ先端の局部変形（食い込み）によって生じるものとし、反発を

正と表し、この力は非負の値しか取らないものとする。

3.2 運動方程式

まず、マニピュレータについての動特性方程式をたて、次に壁について運動方程式をたてる。

3.2.1 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。座標系を Fig. 2 に示す。

まず運動エネルギー E_k は

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Tr} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \theta_j} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial \theta_k} \right) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{a_i} \dot{\theta}_i^2 \quad (4)$$

ただし、 θ_i は、第 $(i-1)$ リンクと第 i リンクとの相対角度、 J_i は i リンクの慣性行列を表し、 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。また、 $\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_n = 0$ のとき、マニピュレータは自然状態となり、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。

T, J は、以下の式で表わすことが出来る。

$$T_i = A_1 A_2 \dots A_i \quad (5)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} (-I_{ixx} + I_{iyy} + I_{izz})/2 & I_{ixy} \\ I_{ixy} & (I_{ixx} - I_{iyy} + I_{izz})/2 \\ I_{ixz} & I_{iyx} \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i \\ I_{ixz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{iyz} & m_i \bar{y}_i \\ (I_{ixx} + I_{iyy} - I_{izz})/2 & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

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、 J_i の各要素は以下の様に表すことができる。

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{ixx} &= \int_{i-\text{link}} (y_i^2 + l_i^2) dm_i \\ I_{iyy} &= \int_{i-\text{link}} (x_i^2 + z_i^2) dm_i \\ I_{izz} &= \int_{i-\text{link}} (x_i^2 + y_i^2) dm_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{ixy} &= \int_{i-\text{link}} x_i y_i dm_i, & I_{ixz} &= \int_{i-\text{link}} x_i z_i dm_i, \\ I_{iyz} &= \int_{i-\text{link}} y_i z_i dm_i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} m_i \bar{x}_i &= \int_{i\text{-link}} x_i dm_i, & m_i \bar{y}_i &= \int_{i\text{-link}} y_i dm_i, \\ m_i \bar{z}_i &= \int_{i\text{-link}} z_i dm_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、 a_i, d_i, α_i は、Fig. 2 に表すように各々リンク長さ、リンク間距離、リンク捻れ角である。また、 m_i, I_{ai} は、各々第 i リンク質量、第 i ジョイントのアクチュエータ慣性モーメントである。

次に、マニピュレータのポテンシャルエネルギーは

$$E_p = - \sum_{i=1}^n m_i g^T T_i \bar{r}_i \quad (11)$$

と表せる。ただし、 $g, \bar{r}_i$ は、各々重力加速度ベクトルと第 j リンク局所座標系から見た第 i リンク重心の位置ベクトルを意味している。これらからラグランジュの方法を用いて次の運動方程式が導かれる。

$$\begin{aligned} F_i &= \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \text{Tr} \left(\frac{\partial T_j}{\partial \theta_k} J_j \frac{\partial T_j^T}{\partial \theta_i} \right) \ddot{\theta}_k \\ &+ \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{Tr} \left(\frac{\partial^2 T_j}{\partial \theta_k \partial \theta_m} J_j \frac{\partial T_j^T}{\partial \theta_i} \right) \dot{\theta}_k \dot{\theta}_m \\ &+ I_{ai} \ddot{\theta}_i - \sum_{j=i}^n m_j g^T \frac{\partial T_j}{\partial \theta_i} \bar{r}_j \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 F_i は一般化力であり、制御トルク τ_i 、接触力による第 i ジョイントでのモーメント M_{wi} を用いて以下のように表すことができる。

$$F_i = \tau_i + M_{wi} \quad (13)$$

制御トルクを状態フィードバックとポテンシャル(位置)エネルギーの補償から決定するものとし、次のように定義する。これが、マニピュレータに関する制御則である。

$$\tau_i = - \sum_{j=1}^n k_{pij} \theta_j - \sum_{j=1}^n k_{vij} \dot{\theta}_j - w_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (14)$$

または、次のようになる。

$$\tau = \{\tau_1 \tau_2 \dots \tau_n\}^T = -K_p \theta - K_v \dot{\theta} - w \quad (15)$$

また、接触力によるモーメントは次のようにして求めることができる。

$$M_{wi} = {}^{i-1}r \times {}^{i-1}f_w \quad (16)$$

ただし、式(14)から(16)で使った各定数及び変数の定義は以下の通りである。

k_{pij} : j 番目の関節角度に対する i 番目の関節アクチュエータのフィードバックゲイン。

k_{vij} : j 番目の関節角速度に対する i 番目の関節アクチュエータのフィードバックゲイン。

w_i : 重力及びアクチュエータ慣性モーメントの補償項。

${}^{i-1}r$: i 番目の関節 ($(i-1)$ リンク原点) から見たマニピュレータ先端位置ベクトル。

${}^{i-1}f_w$: i 番目の関節 ($(i-1)$ リンク原点) から見たマニピュレータ先端での接触力ベクトル。

ここで、 ${}^{i-1}r, {}^{i-1}f_w$ については次の式が成立する。

$${}^{i-1}r = A_i A_{i+1} \dots A_n {}^n r \quad (17)$$

$${}^{i-1}f_w = A_{i-1}^{-1} A_{i-2}^{-1} \dots A_1^{-1} f_{worg} \quad (18)$$

さらに、

$${}^n r = \{0 \ 0 \ 0 \ 1\}^T \quad (19)$$

また、接触力をグローバル座標の原点から見たものを f_{worg} とすると以下のようになる。

$$f_{worg} = T_b {}^b f_w = \{f_{wx} \ f_{wy} \ f_{wz} \ 0\}^T \quad (20)$$

ここで、 $T_b, {}^b f_w$ は、各々壁からグローバル座標への座標変換マトリクスと壁座標から見た接触力である。

$${}^b f_w = \{{}^b f_{wx} \ {}^b f_{wy} \ {}^b f_{wz} \ 0\}^T \quad (21)$$

さて、接触力についてモデル化する。まず、自由度のある壁の法線方向については、第2章¹⁾のようにヘルツの接触力にエネルギー損失のパラメータを掛けた形で(22)式のように表す。ただし、後の展開のためにここでは壁座標で表すものとする。

$$\tau {}^b f_{wx} = \begin{cases} (1+p\dot{u})Hu^{3/2} & (u < 0, \dot{u} \geq -1/p) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (22)$$

ただし、

$$u = {}^b x_n - {}^b x_b \quad (23)$$

また、自由度の無い壁の接線方向については以下のようにマニピュレータとの相対速度に比例した粘性摩擦力が働くものとする。

$${}^b f_{wy} = \begin{cases} c_{by} {}^b \dot{y}_n & (u \geq 0, \dot{u} \geq -1/p) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (24)$$

$${}^b f_{wz} = \begin{cases} c_{bz} {}^b \dot{z}_n & (u \geq 0, \dot{u} \geq -1/p) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (25)$$

ここで、

$$\{{}^b x_n \ {}^b y_n \ {}^b z_n \ 1\}^T = T_b^{-1} T_n \{0 \ 0 \ 0 \ 1\}^T \quad (26)$$

と表すことができる。

また、これらの接触/衝突力の定義から、 $u \geq 0$ かつ $\dot{u} \geq -1/p$ を接触状態、その他を非接触状態と考える。

3.2.2 対象物の運動方程式 対象物の局所変形を表す運動方程式は次のようになる。ただし、壁は壁面の法線方向のみに自由度を持っているので、運動方程式は x_b 方向のみとなる。

$$m_b {}^b \ddot{x}_b + c_b {}^b \dot{x}_b + k_b {}^b x_b = {}^b f_{wx} + f_{ab} \quad (27)$$

ここで、 m_b, k_b, c_b, f_b は壁の等価な質量、バネ定数、減衰定数および壁に付いたアクチュエータ出力である。このアクチュエータの制御は以下のような状態フィードバックであるものとする。

$$f_{ab} = -k_{pb} {}^b x_b + k_{vb} {}^b \dot{x}_b \quad (28)$$

以上でマニピュレータと壁との動特性方程式は求まった。

3.3 衝突を含む系の安定性

前節でのモデルを用いて、衝突を含んだ3次元系の安

定な制御が可能であることを、理論的に考える。系の安定性はリアプノフの直接法によって判定する。

3.3.1 スカラー関数

マニピュレータの運動エネルギー E_k を用いて式(29)の様なスカラー関数 V を定義する。

$$V = E_k + \frac{1}{2} m_b {}^b \dot{x}_b^2 + \frac{1}{2} k_b {}^b x_b^2 + \frac{1}{2} k_{bp} {}^b x_b^2 + \frac{1}{2} \theta^T K_p \theta + \Delta k u^2 \quad (29)$$

ただし、

$$\theta = \{\theta_1 \ \theta_2 \cdots \theta_n\}^T \quad (30)$$

$$K_p = \begin{bmatrix} k_{p11} & k_{p12} & \cdots & k_{p1n} \\ k_{p21} & k_{p22} & \cdots & k_{p2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{pn1} & k_{pn2} & \cdots & k_{pnn} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\Delta k = \begin{cases} aHu^{1/2} & (u \geq 0, \dot{u} \geq -1/p) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (32)$$

また、 a は任意の正の定数である。これは、制御数ではなく、何らかの形で定数として存在すれば、 V がリアプノフ関数であることが示されるものである。

カスラー関数 V について考えると、右辺の第1項 (E_k) はリンクの運動エネルギーであるから非負である。従って、

$$K_p = K_p^T > 0 \quad (33)$$

のとき

$$V \geq 0 \quad (34)$$

となる。以降式(34)は成立するものとする。

3.3.2 スカラー関数の微分

次に、 V 微係数について考える。式(29)を微分し、式(27)を代入すると、

$$\dot{V} = \dot{E}_k - c_b {}^b \dot{x}_b^2 + {}^b f_{wx} {}^b \dot{x}_b - k_{vb} {}^b \dot{x}_b^2 + \dot{\theta}^T K_p \theta + 2 \Delta k u \dot{u} + (\Delta \dot{k}) u^2 \quad (35)$$

$\dot{E}_k$ について考えると式(4)から次の式が導かれる。

$$\begin{aligned} \dot{E}_k &= \sum_{k=i}^n \theta_k \left\{ \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^i \text{Tr} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \theta_j} J_j \frac{\partial T_i^T}{\partial \theta_k} \right) \dot{\theta}_j \right\} \\ &+ \sum_{k=i}^n \theta_k \left\{ \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^i \text{Tr} \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta_j \partial \theta_m} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial \theta_k} \right) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_m \right\} \\ &+ \sum_{i=1}^n I_{a1} \dot{\theta}_i \ddot{\theta}_i \end{aligned} \quad (36)$$

これに式(12)を代入すると、

$$\dot{E}_k = \sum_{i=1}^n \theta_i \left\{ F_i + \sum_{j=1}^n m_j g^T \frac{\partial T_j}{\partial \theta_i} j \bar{r}_j \right\} \quad (37)$$

また、以下の式(38)と、 w_i が位置エネルギー補償項であり、下の式(39)と定義できる事を考えると

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \theta_i \left\{ - \sum_{j=1}^n k_{pi} j \theta_j - \sum_{j=1}^n k_{vij} j \theta_j \right\} \\ &= - \dot{\theta}^T K_p \theta - \dot{\theta}^T K_v \dot{\theta} \end{aligned} \quad (38)$$

$$w_i = \sum_{j=i}^n m_j g^T \frac{\partial T_j}{\partial \theta_i} j \bar{r}_j \quad (39)$$

式(35)は、式(37)、(13)、(14)から、次のように整理される。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^n M_{wi} \dot{\theta}_i - c_b {}^b \dot{x}_b^2 + {}^b f_{wx} {}^b \dot{x}_b - k_{vb} {}^b \dot{x}_b^2 \\ &- \dot{\theta}^T K_v \dot{\theta} + 2 \Delta k u \dot{u} + (\Delta \dot{k}) u^2 \end{aligned} \quad (40)$$

ところで、仮想仕事の原理から次の関係が得られる³⁰⁾。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n M_{wi} \cdot d\theta_i &= - {}^b f_{wx} \cdot d {}^b x_n - {}^b f_{wy} \cdot d {}^b y_n \\ &- {}^b f_{wz} \cdot d {}^b z_n \end{aligned} \quad (41)$$

両辺を dt で除すと式(42)となる。

$$\sum_{i=1}^n M_{wi} \cdot \dot{\theta}_i = - {}^b f_{wx} \cdot {}^b \dot{x}_n - {}^b f_{wy} \cdot {}^b \dot{y}_n - {}^b f_{wz} \cdot {}^b \dot{z}_n \quad (42)$$

式(42)を式(40)に代入して整理すると、次の式が求まる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= {}^b f_{wx} \cdot \dot{u} - {}^b f_{wy} \cdot {}^b \dot{y}_n - {}^b f_{wz} \cdot {}^b \dot{z}_n - c_b {}^b \dot{x}_b^2 \\ &- k_{vb} {}^b \dot{x}_b^2 - \dot{\theta}^T K_v \dot{\theta} + 2 \Delta k u \dot{u} + (\Delta \dot{k}) u^2 \end{aligned} \quad (43)$$

この式の中には接触状態と非接触状態で異なる形となるものがあるので、二つの状態を以下別々に考える。

(a) 非接触状態

このとき

$$\begin{aligned} {}^b f_{wx} &= {}^b f_{wy} = {}^b f_{wz} = 0 \\ \Delta k &= (\Delta \dot{k}) = 0 \end{aligned}$$

より、

$$\dot{V} = -c_b {}^b \dot{x}_b^2 - k_{vb} {}^b \dot{x}_b^2 - \dot{\theta}^T K_v \dot{\theta} \leq 0 \quad (44)$$

となる。ただし、

$$K_v = K_v^T > 0 \quad (45)$$

(b) 接触状態

このとき

$$\begin{aligned} {}^b f_{wx} &= (1+p\dot{u})Hu^{3/2}, \quad {}^b f_{wy} = c_{by} {}^b \dot{y}_n, \\ {}^b f_{wz} &= c_{bz} {}^b \dot{z}_n \end{aligned}$$

$$\Delta k = aHu^{1/2}, \quad (\Delta \dot{k}) = \frac{1}{2} aHu^{-1/2} \dot{u}$$

であるから、 dV/dt は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \left(\frac{5}{2} a - 1 \right) Hu^{3/2} \dot{u} - pHu^{3/2} \dot{u}^2 - c_{by} {}^b \dot{y}_n^2 - c_{bz} {}^b \dot{z}_n^2 \\ &- c_b {}^b \dot{x}_b^2 - k_{vb} {}^b \dot{x}_b^2 - \dot{\theta}^T K_v \dot{\theta} \end{aligned} \quad (46)$$

いま、式(46)で、定義から a は任意に固定しても良いから、

$$a = \frac{2}{5} \quad (47)$$

とすれば、次式が成立する。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -pHu^{3/2} \dot{u}^2 - c_{by} {}^b \dot{y}_n^2 - c_{bz} {}^b \dot{z}_n^2 \\ &- c_b {}^b \dot{x}_b^2 - k_{vb} {}^b \dot{x}_b^2 - \dot{\theta}^T K_v \dot{\theta} \leq 0 \end{aligned} \quad (48)$$

式(44)と式(48)から

$$K_p > 0, \quad K_v > 0 \quad (49)$$

ならば、

$$\dot{V} \leq 0 \quad (50)$$

となり、 V はリアプノフ関数であり、リアプノフの意味で安定であることが示された。なお、以上の議論で、接触状態と非接触状態での状態の連続性、あるいはリアプノフ関数の切り替えについて触れていないが、これらについては、文献³⁰⁾にもあるとおり、リアプノフの方法を考えるうえで必要なリブシツツの条件を満たし、関数自身も減少することがわかるため、問題無いと考えられる。

また、式(44)と式(48)とを比較すると、式(48)の方が、 $pHu^{3/2}\dot{u}^2 + c_{by}^b\dot{y}_n^2 + c_{bz}^b\dot{z}_n^2$ だけ小さい。この差の分は衝突が原因であり、リアプノフ関数の微係数でみると、ここで考えた制御則では、衝突が系を安定化させるように働いていることが分かる。言い替えると、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、マニピュレータの衝突に対する感度を低くする方法や、衝突に対して十分なロバスト性を持たせるなどの手法が一般的であるが、ここで議論した制御を用いれば、これらマニピュレータの特性に期待する事なく安定性の補償された制御を行うことが出来ることが解る。

3.4 リンク形マニピュレータの低次モデルの安定性

前節まででは、3次元空間の n リンクマニピュレータについて検討したが、スカラー形ロボットのように2次元空間内でのみ考えればよい問題については、前節モデルの低次モデルで扱うことができる。本節では、これらの低次モデルについて若干触れる。なお、一般的にも用いられているとおり²³⁾、これらについては、集中質量系として考える。

以下に低次モデルの例を示す。平面内に拘束された2次元の多リンクモデルのうち、Fig. 3のように表すことのできる2リンク系であれば既報²⁸⁾で示したように、平面内の作業空間内で任意の位置にエンドフェクタを持って行くことができ、かつ対象物に対して衝突が生じた場合でも安定な位置決めをすることが出来ることを示す。

Fig. 3 2link manipulator model

した。また、Fig. 4のように平面内の n リンク系であれば、冗長系であり3自由度以上であれば任意の位置のみならず姿勢も自由に決めることができる。この問題についても既報³⁰⁾で報告した通り非線形の衝突を含んだ非線形のマニピュレータ系が安定に制御できることを示した。なお、これらの衝突を含んだ制御の安定性については、前節の定式化及びリアプノフの直接法を用いた証明が包含しているので、その式の導出過程を各々2次元とし、適当な n を選ぶ事により考えて行くことができる。

3.5 シミュレーション

ここでは、3.3節までの検証の意味も含めて衝突を含む制御について、以下シミュレーションにより検討する。

3.5.1 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2つの系が接触した場合には衝突力がお互いに働くだけと考える。従って、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。

3.5.2 境界条件 接触・非接触の判別は、壁の法線方向のマニピュレータ先端と壁との相対変位 ${}^b u_x$ と相対速度 ${}^b \dot{u}_x$ により決定する。このうち、特に接触と非接触の状態の変化については、積分における各々の時間刻みの前後の状態量 (${}^b u_x, {}^b \dot{u}_x$) 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、この状態判別を各々の時間刻みで行っていく。

3.5.3 低次モデルのシミュレーション ここではまず、低次モデルを用いてシミュレーションを行う。

衝突を含む系の制御について、安定性について考え、過渡状態についても検討する。3.4節でも述べたように、この低次モデルは平面モデルであり、重力の影響のない面内に拘束されているものとする。また、簡単のために本シミュレーションでは、自由度 n を3として3質点でモデル化でき、アクチュエータの3つある3自由度系を考える。このモデルは、Fig. 4での3リンクに相当する。

解法については、3.5.1項の通り4次のルンゲクッタ法で解く。また、接触・非接触の判別を含む境界条件等の与え方は、3.5.2項のようにした。

Fig. 4 n -link planar manipulator model

以下にシミュレーション結果を示す。

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. 5** から **Fig. 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、まは p_y 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」な壁を表せる値とした。シミュレーション結果とその条件は以下の通りである。なお、**Fig. 5** から **Fig. 8** は前節で考えた安定条件を満たしていない。

まず、**Fig. 5** は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である。この系を、壁との衝突を生じさせず、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が **Fig. 6** である。同じ制御を行っても収束時間が長くなっており、衝突の影響が安定化の方向に働いていることが分かる。**Fig. 7** は、別の応答例である。本例では前2ケースと比較して、各リンク間の干渉項の値を変化させた。ここでも、安定な応答を示

しているが、ゲインの変更に因って、安定性がやや悪くなっている。この系を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が、**Fig. 8** である。同じ制御を行っても収束時間が短く、衝突が系を不安定化させるように働いていることが分かる。

これら4つの結果を見ると、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、逆に不安定化させたりすることが分かる。これが、衝突の制御が難しい理由の一つである。

ところで、リアプノフ解析から求められた安定条件を

Table 1 3link manipulator simulation parameters

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 3link manipulator feedback gains

Fig.	5	6	7	8	9
Gains					
kp11	15	15	15	15	15
kp12	3	3	3	3	0
kp13	3	3	4	4	0
kp21	4	4	1	1	0
kp22	5	5	5	5	5
kp23	4	4	2	2	0
kp31	3	3	1	1	0
kp32	3	3	2	2	0
kp33	10	10	10	10	10
kv11	3	3	3	3	3
kv12	2	2	6	6	0
kv13	2	2	7	7	0
kv21	1.5	1.5	3	3	0
kv22	3	3	3	3	3
kv23	1.5	1.5	4	4	0
kv31	1.5	1.5	3	3	0
kv32	1.5	1.5	3	3	0
kv33	3	3	3	3	3

Fig. 5 3link simulation result with collision not satisfying stability condition (sample 1)

満たす最も簡単な制御則は対角成分のみを非零とした場合である。Fig. 9 は、この例である。衝突を考慮しても安定に制御されており、安定性解析の検討の妥当性が示されている。以上から、通常の制御では衝突によって系がより安定になったり、逆により不安定になったりして安定性の観点から見てわかり難いの 비해、ここで考えている制御を用いれば衝突を含む系も安定に制御できることが示された。

3.5.4 ビューマ形マニピュレータのシミュレーション
次に3次元の問題についてシミュレーションを行なう。ここでは、リンク数 n を6として Fig. 10 に示すような市販のビューマ形のコンフィギュレーションを持ったマニピュレータについてシミュレーションを行なう。なお、重力の影響は式 (12), (14), (39) から関節角度のみによって決定される重力補正項により制御トルクによって容易にキャンセルすることができ、焦点を衝突とマニピュレータの挙動に置いているため、簡単のためにシミュレーション上は重力の影響を無視し、(51)式に示すようにアクチュエータのついている軸の角度のみ

をフィードバックするローカルフィードバックを用いる。

$$\tau = [\text{diag } K_p] \theta_p + [\text{diag } K_v] \dot{\theta}_p \quad (51)$$

明らかにこの式は安定条件を満足している。

Table 3 にシミュレーションに用いたパラメータを、また、Fig. 11 にマニピュレータの初期位置を示す。

(51) 式を基にしたシミュレーション結果を Fig. 12 および Fig. 13 に示す。ここで、二つの図は同じマニピュレータであり、同じ初期位置かフィードバックゲインで制御される。ここで、Fig. 12 は衝突を含まないマニピュレータ単独の挙動であり、Fig. 13 は壁との衝突を含んだものである。衝突を含んでいても安定に制御され

Fig. 6 3link simulation result without collision not satisfying stability condition (sample 1)

Fig. 7 3link simulation result with collision not satisfying stability condition (sample 2)

ること、およびリアプノフの安定性解析によるフィードバックゲインの決定法が妥当であること、更に衝突により収束が早くなり系の挙動が安定になることなどが分かる。従って、マニピュレータの制御について、衝突を含む系であっても安定に制御できることが3次元のマニピュレータについても示され、衝突は回避しなくてもよく、逆に積極的に利用することもできる事が示された。

4. 多自由度線形マニピュレータの安定制御

前章までは、非線形の運動方程式で表されるリンク型のマニピュレータを扱ってきた。本章では、既報²⁹⁾に述べたように線形の運動方程式で表されるような n 自由度のマニピュレータが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を示す。また、その安定性を保証するような制御則の決定方法について述べる。前章までの議論は非線形のマニピュレータを非線形のまま扱い、式の取扱も複雑であったが、通常マニピュレータの制御がシステムを線形化して行っていることを考えると、線形システムの安定性に関する検討も重要であると考えら

れる。

本章で扱う問題は、先述の通り動特性方程式が線形マトリクスで表されるような n 自由度マニピュレータを衝突をもって壁の表面で止める非線形な問題である。このようなモデルは質量-バネ-ダンパーの組（フォークトモデル）が直列につながったような系や、それ以外でも線形な系については適用できる。前者のようなマニピュレータのモデルとしては、例えば衝突を含んだグラインダ¹⁸⁾や、その他突き当てや押し付けをするような系も考えられるし、後者のような系としては、例えば単純な倒立振子のモデルなども考慮することができる。このよう

Fig. 8 3link simulation result without collision not satisfying stability condition (sample 2)

Fig. 9 3link simulation result with collision satisfying stability condition

な問題について、リアプノフの方法による安定性の検討を行い、検証としてのシミュレーションも行なった。

なお、衝突のモデル化は第2章の通りとした。

4.1 衝突を含む系の安定性

第3章と同じく、安定性はリアプノフの直接法によって判定する。また、安定性の検討のために線形の動特性

Fig. 10 Puma configuration model

Table 3 Simulation parameters

$k_{pij}=0.0 \ (i \neq j)$			
k_{p11}	$1.00E+10$	k_{v11}	$2.00E+08$
k_{p22}	$5.00E+09$	k_{v22}	$5.00E+08$
k_{p33}	$3.00E+09$	k_{v33}	$3.00E+08$
k_{p44}	$1.00E+09$	k_{v44}	$1.00E+08$
k_{p55}	$5.00E+08$	k_{v55}	$5.00E+07$
k_{p66}	$3.00E+08$	k_{v66}	$3.00E+07$
m_b	$1.00E+05$	H	$5.00E+06$
k_b	$5.00E+05$	p	0.5
c_b	$1.00E+03$	c_{vz}	5.0
		c_{vy}	5.0

Fig. 11 Initial posture of puma simulation

方程式が線形と表されるようなマニピュレータが変形可能な壁に衝突するような力学モデルを考える (Fig. 14).

ここで、対象物となる壁は、マニピュレータ衝突後の残留振動や壁自身の制御も考慮して、面の法線方向に1自由度を有し、質量—バネ—ダンパー系にアクチュエータの付いた形で表す。また、マニピュレータの先端には質量があり、これは壁の運動方向のみに運動するもの m_1 などとする。衝突/接触力は、マニピュレータ先端と壁の局部変形によって生じるものとし、Hertz型の力でモデル化する。また、衝突/接触力は反発する方向を正とし、正の方向のみに働くものとする。

4.1.1 系のモデル化と運動方程式 Fig. 14の、衝突を含む壁—マニピュレータの系が式(52)のように表されるものとする。

$$\dot{x} = A^*x + Fx + df_w \quad (52)$$

ここで、 x は状態ベクトル、 A^* はシステム行列、 F はフィードバックゲイン行列、 f_w は衝突/接触力、また d はその係数ベクトルである。この式からもわかるように制御則は線形フィードバックである。いま、

$$A = A^* + F \quad (53)$$

として

$$\dot{x} = Ax + df_w \quad (54)$$

式(54)の各々のベクトル、行列は以下のように表さ

Fig. 12 Puma simulation result without collision

Fig. 13 Puma simulation result with collision

れるものとする。

$$x = \{x_b, x_1, \dots, x_n, \dot{x}_b, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n\}^T \quad (55)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$f_w = \begin{cases} (1+p\dot{u})Hu^{3/2} & (u \geq 0, \dot{u} \geq -1/p) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (58)$$

ただし

$$u = x_1 - x_b \quad (59)$$

$$d = \left\{ 0 \ 0 \dots 0 \ \frac{1}{m_b} \ -\frac{1}{m_1} \ 0 \dots 0 \right\}^T \quad (60)$$

式 (53) より

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_{21} + F_{21} & A_{22} + F_{22} \end{bmatrix} \quad (61)$$

また、式 (58) は、第 2 章で示した衝突力である。

Fig. 14 Mathematical model of linear manipulator

4.1.2 安定性の検討 衝突を含んだマニピュレータ壁の系について、リアプノフの直接法を用いて安定性について検討する。まず、式 (62) のように 2 次形式のスカラ関数を定義する。

$$V = x^T P x \quad (62)$$

ただし

$$P = P_{nc} + P_c = P^T > 0 \quad (63)$$

であり、 P_{nc} は衝突の項を含まない時不変行列であり、 P_c は衝突の項を含む時変行列である。

実際のリアプノフの方法による安定性解析は既報²⁹⁾に詳しいので省略するが、以上の定式化から表されるシステムでは、リアプノフの意味で安定であるための十分条件として次式が導かれる。

$$A_{21} + F_{21} = A_{21}^T + F_{21}^T < 0 \quad (64)$$

$$A_{22} + F_{22} = A_{22}^T + F_{22}^T < 0 \quad (65)$$

これにより、線形のシステムが与えられた場合、系を安定に制御するための制御則を線形フィードバックとして与えられることが分かる。また、式 (64)、(65) は十分条件であるから、これ以外にも安定な制御を可能にする制御則は存在する。既報²⁹⁾にも示したが、 $A_{21}^T = A_{21}$ かつ $A_{22}^T = A_{22}$ の場合においても式 (64)、(65) を満たさない制御則が求められることがある。この例としては、以下ようになる。

いま、マニピュレータが Fig. 15 のように直線的に表せる場合のうち、アクチュエータが最も根元にある場合を考える。この系は、例えばグライNDERやビリヤードのキューなどを表している。このとき、システム行列の部分行列は、

$$A_{21} = -M^{-1}K, \quad A_{22} = -M^{-1}C \quad (66)$$

$$K = K^T > 0, \quad C = C^T > 0 \quad (67)$$

と表せる。式 (64)、(65) から

$$F_{21} = -M^{-1}K_p, \quad F_{22} = -M^{-1}K_v \quad (68)$$

$$K_p = K_p^T \geq 0, \quad K_v = K_v^T \geq 0 \quad (69)$$

なる制御則を求めることができる。しかし、アクチュエータが根元にしかない場合を考えてるので、対象な制御

では根元の質点しか考慮できないことになる。しかし、以下のように非対称な制御則を考えると、

$$K_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 \\ 0 \cdots 0 & k_{p(n-1)} & k_{pn} \end{bmatrix} \neq K_p^T \quad (70)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 \\ 0 \cdots 0 & k_{v(n-1)} & k_{vn} \end{bmatrix} \neq K_v^T \quad (71)$$

以下の条件を満足する範囲でリアプノフの意味での安定となる。

$$k_{n-1} - k_{(n-1)} > 0 \quad (72)$$

$$k_n + k_{p(n-1)} + k_{pn} > 0 \quad (73)$$

$$c_{n-1} + c_n + k_{vn} > 0 \quad (74)$$

$$\frac{c_{n-1}k_{n-1}(c_{n-1} + c_n + k_{vn})}{k_{n-1} - k_{p(n-1)}} - \left\{ \frac{k_{n-1}(c_{n-1} - c_{n-1} - k_{v(n-1)})}{2(k_{n-1} - k_{p(n-1)})} \right\}^2 > 0 \quad (75)$$

以上、線形マニピュレータが壁と衝突するような非線形問題について、線形フィードバックにより安定に制御できること、更にそのゲインの決め方について示した。

4.2 シミュレーション

検証の意味も含めて線形マニピュレータと非線形現象である衝突を考慮したシミュレーション結果を示す。なお、系は Fig. 15 に示す系とし、3質点系であるとす

る。解法としては4次のルンゲクッタ法を用いた。また、接触・非接触の境界条件に関する考え方は第3、4章と同じである。

Table 4 はこの系のシミュレーションパラメータであり、Fig. 16 から Fig. 19 までは系の挙動である。

まず、Fig. 16 は、衝突させずにあるマニピュレータを単独で制御した場合の応答である。このマニピュレータは単独では安定な系である。次に、このマニピュレータを衝突を伴った形で位置決め制御を行なおうとした場合の応答が Fig. 17 である。フィードバックゲインや初期条件は Fig. 16 の場合と同じであるが、系は発散しており、位置決めができないことを示している。この二つのシミュレーションは、前述の式 (68) と (69) から決定される安定条件を満たさないフィードバックゲインの組合せを用いた場合の応答である。もともとリアプノフの方法から求まる安定条件は十分条件であり、これを満たさなくとも安定な制御は可能である事は既に述べた。

しかし、これを衝突させた場合には、Fig. 16 と Fig. 17 とに表されたような不安定化が生じることがあり、衝突はロボットの制御では避けられてきた。ところが、このマニピュレータを、式 (68) と (69) を満たすようなフィードバックゲインを用いて制御した場合の応答が、Fig. 18 である。5.1 節での安定性解析の通り安定な挙動を示している。また、この系を、同じ制御ゲインと同じ初期条件で衝突をさせずに単独で制御したものが

Fig. 15 Mathematical model of n -DOF linear manipulator

Table 4 Linear system simulation parameters

Sub-script	Mass	Spring Const.	Damping Coef.
	m (kg)	k (N/mm)	c (Ns/mm)
1	1.0	10.0	0.1
2	1.0	10.0	0.05
3	0.5	5.0	0.1
b	5.0	200.0	0.05
Hertz Coef.	H	10000.0

Fig. 16 Positioning of manipulator without collision not satisfying stability condition

Fig. 19 である。Fig. 18 の場合と比べてオーバーシュートから目標位置に至るまでの時間が長くなっており、対象物表面で止めるような位置決めでは衝突を利用した方が、より短時間で制御できることがあることを示している。これより、非線形現象である衝突を含んだ線形マニピュレータでは、式 (68) と (69) によって決定される安定条件下では系の安定性が保証されており、衝突が安定化に役立つこともある事が分かる。また、安定条件を満たしていなければ、逆に不安定化させることもあることが分かる。したがって、本論文で示したリアプノフの方法による安定判別の有効性が示された。

4.3 線形マニピュレータの簡単なモデル

前節までの議論は線形マニピュレータが単純化されても当然成り立つ。既報²⁵⁾では、マニピュレータが1自由度で1本ある時に、これを壁に接触させて停止させる問題を考えた。このモデルは Fig. 20 に示すようなもので、安定制御を実現するフィードバックゲインは、4.1 節で考えた安定条件を明らかに満たしている。

Fig. 17 Positioning of manipulator with collision not satisfying stability condition

Fig. 18 Positioning of manipulator without collision satisfying stability condition

Fig. 19 Positioning of manipulator with collision satisfying stability condition

また、このマニピュレータ2本を用いた把持の問題も既報²⁶⁾で扱った。モデルは Fig. 21 に示すとおりで、把持される物体は拘束されていない。しかしながら、左右のマニピュレータと衝突を繰り返すうちに両側のマニピュレータが把持位置に収束するため、物体の把持が安定

Fig. 20 1 degree-of-freedom manipulator model for positioning

Fig. 21 Model for grasping by DOF manipulators

Fig. 22 Grasping simulation by asymmetric DOF manipulators

に可能であることが示された。また、これは左右のマニピュレータの特性が異なっても成り立つことが示された。Fig. 22 にそのシミュレーション結果の一例を示す。このモデルでは、左右のマニピュレータの特性が異なっているが、マニピュレータは物体との間で反発を繰り返しながら、平衡点に収束して行く様子が表されている。

5. ま と め

本論文では、非線形現象である衝突を含む一般的な非線形多リンクマニピュレータ及び線形多自由度系マニピュレータの位置決め制御につき、リアプノフの直接法によって理論的に検討した。系としてはビューマ形のように3次元空間内での肘型マニピュレータから1自由度の線形マニピュレータまで多種に及ぶが、それぞれ同一の手法により安定性を論じることができ、線形フィードバックの範囲でマニピュレータのロバスト性に期待する事なく安定に制御できることが分かり、その求め方についても示された。さらに、シミュレーションによってその安定性および過渡状態について検討し、制御則の妥当性も示された。また、適当な制御則では、衝突は系を安定化させる現象であり、衝突を含む系の対象物表面での安定な位置決め制御が可能であり、衝突を積極的に利用することが有効であることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 福田・北村・谷江：対象物の特性を考慮したロボットの力制御方式（第1報，適応力制御によるグリップの把握動作の力制御）日本機械学会論文集C編，53-487，（昭62），726。
- 2) 福田・北村・谷江：対象物の特性を考慮したロボットの力制御方式（第2報，適応ハイブリッド力制御による1自由度マニピュレータの制御）日本機械学会論文集C編，53-496，（昭62），2577。
- 3) 福田・谷江・光岡：マイクロマニプレータの制御（第1報，マイクログリップの基本特性とバイラテラル制御の一方法），日本機械学会論文集C編，53-493，（昭62），1950。
- 4) 福田・長谷川：マイクロマニプレータの制御（第2報，画像セグメント法による生物の認識と同定），日本機械学会論文集C編，55-512，（1989-4），959。
- 5) 福田・北村・谷江：対象物の動特性を考慮したグリップ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，（1988），91。
- 6) 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，（1979），738。
- 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，（1979），1217。
- 8) 小林(孝)・小林(繁)・紀平：有限要素法による頭がい衝撃問題の基礎研究（第1報，解析手法と円筒形モデルへの適用），日本機械学会論文集C編，46-402，（昭55），197。

- 9) 佐藤：両端固定ばりの質量による非線形衝撃応答，日本機械学会論文集C編，51-468，(1986)，1937.
- 10) 遠藤・岡：ガタ支持部をもつばり振動系の不規則応答，日本機械学会論文集C編，52-477，(昭 54)，1217.
- 11) Youcef-Toumi, K. and Gutz, D., Impact and Force Control, Proc., IEEE Robot and Automation '89, 410.
- 12) Kahng, J. and Amirohche, F., Impact Force Analysis in Mechanical Hand Design-Part I, Int'l J. of Robot and Automation 3-3, (1988), 158.
- 13) Colgate, E. and Hogan, N., An Analysis of Contact Instability in Terms of Passive Physical Equivalents, Proc., IEEE Robot and Automation '89, 404.
- 14) 市川：適応制御，昭晃堂，昭 59，13.
- 15) 福田：フレキシブルロボットアームの制御（第1報，一，二自由度系の位置決め時の振動制御），51-468，(昭 60)，2140.
- 16) Tanie, K. Komoriya, K. Kaneko, M. Ohno, T. and Fukuda, T., Proc. of the Sixth CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, MIT Press, 1988, 296.
- 17) T. Yoshikawa and M. Lipsett, "Reducing Robot End Effector Impacts Using Proximity Sensing", 日本ロボット学会第7回学術講演会予稿集，(1990)，189.
- 18) 吉見・神野・阿部：グラインダ作業ロボットの研究（第1報：システムの解析），日本ロボット学会第7回学術講演会予稿集，(1990)，209.
- 19) O. Khatib and J. Burdich: Motion and Force Control of Robot Manipulators, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1986), 1381.
- 20) C. Cai and R. Both: Impact Sensitivity of Mass Distribution of a Planar Manipulator, Proc. of the 3rd International Conference on Advanced Robotics, (1987), 115.
- 21) 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，(1990)，413.
- 22) 永田・小笠原・小俣：多関節ロボットの柔軟な突き当り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，(1990)，435.
- 23) 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，(1989)，695.
- 24) S. Arimoto and F. Miyazaki: Asymptotic Stability of Feedback Control Laws for Robot Manipulators, Proc. of 1st IFAC Symposium on Robot Control, (1985), 447.
- 25) 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，(1985)，78.
- 26) 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，(1990)，203.
- 27) 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：1本の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，(1990)，114.
- 28) 正司・稲葉・福田・細貝：衝突を用いた多リンクマニピュレータの安定制御，日本ロボット学会誌，9-5，(1991)，592.
- 29) 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4報：多自由度線形マニピュレータの安定制御），日本機械学会論文集C編，57-543，(1991)，186.
- 30) 正司・稲葉・福田・細貝：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，計測自動制御学会論文集，28-2，(1992)，255.
- 31) 福田・和田・松浦・新井・渡辺・正司：衝突を含むマニピュレータの安定制御（第3報：重み付き最小2乗法を用いた学習制御による衝突を含む力制御実験），日本機械学会論文集C編，57-541，(1991)，2953.
- 32) 和田・福田・小菅・松浦・新井・渡辺：衝突を含むマニピュレータの安定制御（第5報：学習制御による衝突音に関するオーディオ・フィードバック制御），日本機械学会論文集C編，58-546，(1992)，520.
- 33) 柴田・福田・新井・和田・鶴田・光岡・正司：神経回路モデルによるロボットマニピュレータの位置・力制御の研究（第4報：衝突を考慮したセンシングとハイブリッド制御）日本機械学会論文集C編，57-539，(1992)，2305.
- 34) 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集，27-12，(1991)，1389.

付録 1 衝突力のモデルと反発係数についての説明

ここで採用したモデルはヘルツの力 $Hu^{3/2}$ に，減衰項 $(1+pv)$ を乗じた形で表される．この時，反発係数 e との関係であるが，これは， p と衝突速度 v_0 を用い，衝突から最大局部変位，またここから反発までについて加速度を積分すると次式のように表すことができる．

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

外力が無い場合，反発の最大速度は $-ev_0$ であるが， $\dot{u} = -ev_0 \geq -1/p$ が常に成立する条件は， $e \leq 1/pv_0$ である．上記の e と p の関係式から，この条件は常に成立する．従って， $\dot{u} < -1/p$ となるのは，外力がある場合に限られる．制御系では，制御力にこれに当たり，この場合，制御力は衝突力に比べて大きい必要がある．これは，物理的には柔らかいものに対するゆっくりとした接触であり，2つの物体が局部変形をして食い込んで復元しようとしている時に，制御によって復元速度よりも速く引っ張られるような状態に対応する．よって，通常行なわれるような金属同志の衝突ではほとんどありえない．

正司康雅 (Yasumasa SHOJI)

1959 年 7 月 3 日生。1984 年慶応義塾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等に従事。

(日本ロボット学会正会員)

福田敏男 (Toshio FUKUDA)

1948 年 12 月 12 日生。1971 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1977 年東京大学大学院博士課程修了、工学博士。通産省工業技術院機械技術研究所研究官、及び東京理科大学工学部機械工学科助教授を経て、1989 年 4 月より名古屋大学工学部機械情報システム工学科教授、IEEE IES Vice President, IEEE NNC Secretary, IEEE R & A TC 委員長等歴任。

(日本ロボット学会正会員)

稲葉 忠 (Makoto INABA)

1944 年 8 月 11 日生。1969 年慶応義塾大学工学部機械工学科卒。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。