衝突を含むロボット・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)

正 司 康 雅*¹, 稲 葉 忠*¹
福 田 敏 男*², 細 貝 英 実*³

Stable Control of a Robotic Manipulator with Collision Phenomena

(2nd Report, Grasping of an Object by 2 1-DOF Manipulators)

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 2-single-DOF-manipulators system which is used to grasp an object freely moving along a straight line. This analysis involves the collision phenomenon at the time of the contact. The stability and response of the system are examined by parameter studies of numerical simulation. In our 1st report, we adopted a Herz-type model with energy loss parameter to express the impact force between the manipulator and the object. Using this model, we proved the stabilization effect of collision using a nonlinear Lyapunov's function. The effect is confirmed by the simulation. As a result, stable grasping of a free object is shown to be possible.

Key Words: Stability, Stable Control, Robotic Manipulator, Collision, Lyapunov Method, Grasping, Simulation

1. は じ め に

ロボット・マニピュレータを用いた作業に対し, 近年FA化やFMS化等により, 工場のラインではマニピュレータによる高速の把握や挿入あるいはその他の高速タスクに対する必要性が増してきている⁽²⁾⁻⁽⁷⁾. 既報⁽¹⁴⁾でも述べたように, これらの作業ではマニピュレータと環境あるいは作業対象物との間でなんらかの相互作用が生じ, 特に高速になった場合衝突を伴う⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾. 特に, 宇宙での作業などではマニピュレータの剛性が低下するため環境との相互作用により制御が困難になることがある⁽¹⁾. マニピュレータの制御では衝突は制御性を低下させるが, これは, 現在の制御理論が, 衝突の非線形性を扱いにくいことや, 衝突に対する研究が他の制御と比べてあまり進んでいないことなどが挙げられる. また, 現状では衝突は回避するように制御されており, 例えばマスタースレーブによるテレオペレーションでは接触点近くでスレーブ側を

ゆっくり動かす制御などが行われている⁽¹⁵⁾. しかし, ロボットによる部品のはめあい作業や釘打ちなどのような衝突を伴うさまざまなアプリケーションを実現しようとする際やテレオペレーションを高速化する際には, 今後解決すべき問題となることは明らかである.

そこで本論文では, 既報の押付け動作の後を受けて, 衝突を考慮しながら2本の1自由度マニピュレータで一直線上に拘束された物体を把持することについて考える. 既報では対象が固定された壁であったのに対し, 本報では被把持対象物は直線上を自由に動けるものとし, また2本腕は独立であり線形フィードバック制御を受けるものとする. さらに, マニピュレータと対象物は衝突・反発をするものとする. このとき, 制御性を考えるには安定性と応答性が重要になる. 既報同様, この非線形システムの安定性についてはリアプノフの直接法を用いて証明を行った. また, これを確認するためにシミュレーションによるパラメータスタディを用いた. その結果, 物体の把持においてもある条件下で衝突が安定化作用を持つこと, および衝突を伴っても安定な把持が可能であることがわかった.

2. 力学モデルと運動方程式

安定性の検討, シミュレーションを行うために図1

* 原稿受付 平成元年7月14日.

^{*1} 正員, 東洋エンジニアリング(株) (〒273 船橋市東船橋6-12-10).

^{*2} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町1).

^{*3} 正員, 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3).

のような力学モデルを考える。

2.1 仮定 図1のモデルを設定するために次のような仮定を設けた。

仮定1 マニピュレータ全体を質量-バネ-ダンパ系とし、制御入力はこのパラメータとは独立に与えられる。また、左右のマニピュレータは必ずしも同一である必要はない。

仮定2 2本のマニピュレータと対象物の運動は一直線上に拘束される。ただし、対象物はこの直線上を自由に運動することができる。

仮定3 衝突による力は、ポインタと対象物の相対的な局部変形によって生じるものとし、Herz形の力に減衰効果を表すパラメータを乗じたものとしてモデル化する。

仮定4 衝突による力は正（お互いに反発する力を及ぼし合う状態）のみとする。

2.2 運動方程式 図1中の三つの質量について運動方程式をたてると次のようになる。

左マニピュレータ/

$$m_l \ddot{x}_l = -k_l x_l - c_l \dot{x}_l + f_l - f_{wl} \quad (1)$$

右マニピュレータ/

$$m_r \ddot{x}_r = -k_r x_r - c_r \dot{x}_r + f_r + f_{wr} \quad (2)$$

対象物/

$$m_o \ddot{x}_o = f_{wl} - f_{wr} \quad (3)$$

ここで x_l, x_r, x_o は各々左右マニピュレータと対象物の位置を表し、 $x_l = x_o = x_r = 0$ において二つのマニピュレータは自然状態になり、接触力0でマニピュレータと対象物とが接するものとした。 f_l, f_r は各々左右のマニピュレータ制御入力、 f_{wl}, f_{wr} は各々左右マニピュレータと対象物との間に働く衝突力（仮定により正のみ）である。また、力の符号は x の正方向をそれぞれ正とした。制御入力は左右それぞれ位置フィードバックゲイン K_p 、速度フィードバックゲイン K_v を用いて、線形状態フィードバックとして次式で表されるものとする。

$$f_l = -K_{pl} x_l - K_{vl} \dot{x}_l \quad (4)$$

$$f_r = -K_{pr} x_r - K_{vr} \dot{x}_r \quad (5)$$

また、衝突力は式(6)、(7)で表す^{(8)~(10)}。

図1 力学モデル

$$f_{wl} = \begin{cases} (1 + p_l \dot{u}_l) H_l u_l^{3/2} & (u_l \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_l \geq -1/p_l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{wr} = \begin{cases} (1 + p_r \dot{u}_r) H_r u_r^{3/2} & (u_r \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_r \geq -1/p_r) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (7)$$

ただし

$$\begin{cases} u_l = x_l - x_o \\ u_r = x_o - x_r \end{cases} \quad (8)$$

また、 p_l, p_r はエネルギー損失を表すパラメータであり、 H_l, H_r は Herz の理論による値で大きな正値となる。

$$p_l, p_r \geq 0, \quad H_l, H_r \geq 0 \quad (9)$$

本論文では、安定性の検討や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するために衝突中の力も表現する必要があり、ここでは最も妥当と思われる式(6)、(7)を採用した^{(7)~(10)(14)}。

これより、接触状態の判定において、仮定4から接触状態を

$$u_i \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_i \geq -1/p_i (i=1, r)$$

とし、その他を非接触状態と考える。

3. 衝突を含む系の安定性

系の安定性はリアプノフの直接法によって判定する。ただし、この平衡点は x_l, x_o, x_r が原点にある状態とした。このとき発生力は零となる。式(10)のように2次形式の非線形スカラー関数を定義する。物理的にはバネおよび質量によって蓄えられるエネルギーで、制御入力、衝突力もこれに寄与する。

$$V = \mathbf{x}^T P \mathbf{x} \quad (10)$$

$$P = \begin{bmatrix} k_l + K_{pl} + \Delta k_l & 0 & -\Delta k_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\Delta k_l & 0 & \Delta k_l + \Delta k_r & 0 & -\Delta k_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta k_r & 0 & k_r + K_{pr} + \Delta k_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{x} = \{x_l, \dot{x}_l, x_o, \dot{x}_o, x_r, \dot{x}_r\}^T \dots\dots\dots (12)$$

ここで, a, b を定数として

$$\Delta k_l = \begin{cases} aH_l u_l^{1/2} & (u_l \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_l \geq -1/p_l) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

$$\Delta k_r = \begin{cases} bH_r u_r^{1/2} & (u_r \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_r \geq -1/p_r) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

この系では次の四つの接触状態があり, 以下では
各々の状態について別々に考えていく.

- ① すべてが接触している.
- ② 左アームと対象物のみが接触している.
- ③ 右アームと対象物のみが接触している.
- ④ いずれも接触していない.

3.1 すべて接触している状態 このとき

$u_l \geq 0$ かつ $\dot{u}_l \geq -1/p_l$, $u_r \geq 0$ かつ $\dot{u}_r \geq -1/p_r$ で

$$\Delta k_l = aH_l u_l^{1/2}, \quad \Delta k_r = bH_r u_r^{1/2}$$

$$f_{wl} = (1 + p_l \dot{u}_l) H_l u_l^{3/2}$$

$$f_{wr} = (1 + p_r \dot{u}_r) H_r u_r^{3/2}$$

式(10)から式(14)より

$$\begin{aligned} V = & (k_l + K_{pl})\dot{x}_l^2 + m_l \dot{x}_l^2 + m_o \dot{x}_o^2 \\ & + (k_r + K_{pr})\dot{x}_r^2 + m_r \dot{x}_r^2 \\ & + aH_l u_l^{5/2} + bH_r u_r^{5/2} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

式(15)は $k_l + K_{pl} > 0$, $k_r + K_{pr} > 0$, $a, b > 0$ ならば

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} = \mathbf{0} \text{ のとき } V = 0 \text{ であり} \\ \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \text{ のとき } V > 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

また式(15)を微分すると

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2\dot{x}_l \{(k_l + K_{pl})x_l + m_l \ddot{x}_l\} + 2m_o \dot{x}_o \ddot{x}_o \\ & + 2\dot{x}_r \{(k_r + K_{pr})x_r + m_r \ddot{x}_r\} \\ & + \frac{5}{2} aH_l u_l^{3/2} \dot{u}_l + \frac{5}{2} bH_r u_r^{3/2} \dot{u}_r \end{aligned}$$

これに式(1)から式(3)を代入して整理すると

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -2(c_l + K_{vl})\dot{x}_l^2 - 2p_l H_l u_l^{3/2} \dot{u}_l^2 \\ & - 2(c_r + K_{vr})\dot{x}_r^2 - 2p_r H_r u_r^{3/2} \dot{u}_r^2 \\ & - \left(2 - \frac{5}{2}a\right) H_l u_l^{3/2} \dot{u}_l - \left(2 - \frac{5}{2}b\right) H_r u_r^{3/2} \dot{u}_r \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

式(17)で

$$\left. \begin{aligned} c_l + K_{vl} > 0, \quad c_r + K_{vr} > 0 \\ a = b = \frac{4}{5} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

ならば

$$\dot{V} \leq 0 \dots\dots\dots (19)$$

式(16)と式(19)より, アームと対象物がすべて接触している場合はリアプノフの意味で安定である.

3.2 左アームと対象物のみが接触している状態

このとき

$$u_l \geq 0 \text{ かつ } \dot{u}_l \geq -1/p_l, \quad u_r < 0 \text{ または } \dot{u}_r < -1/p_r$$

$$\Delta k_l = aH_l u_l^{1/2}, \quad \Delta k_r = 0$$

$$f_{wl} = (1 + p_l \dot{u}_l) H_l u_l^{3/2}, \quad f_{wr} = 0$$

式(10)から式(14)より

$$\begin{aligned} V = & (k_l + K_{pl})\dot{x}_l^2 + m_l \dot{x}_l^2 + m_o \dot{x}_o^2 \\ & + (k_r + K_{pr})\dot{x}_r^2 + m_r \dot{x}_r^2 + aH_l u_l^{5/2} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

式(20)は

$$k_l + K_{pl} > 0, \quad k_r + K_{pr} > 0, \quad a > 0$$

ならば

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} = \mathbf{0} \text{ で } V = 0 \\ \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \text{ で } V > 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

また式(20)を微分すると

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2\dot{x}_l \{(k_l + K_{pl})x_l + m_l \ddot{x}_l\} + 2m_o \dot{x}_o \ddot{x}_o \\ & + 2\dot{x}_r \{(k_r + K_{pr})x_r + m_r \ddot{x}_r\} + \frac{5}{2} aH_l u_l^{3/2} \dot{u}_l \end{aligned}$$

これに式(1)から式(3)を代入すると

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -2(c_l + K_{vl})\dot{x}_l^2 - 2(c_r + K_{vr})\dot{x}_r^2 \\ & - \left(2 - \frac{5}{2}a\right) H_l u_l^{3/2} \dot{u}_l - 2p_l H_l u_l^{3/2} \dot{u}_l^2 \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

これは

$$c_l + K_{vl} > 0, \quad c_r + K_{vr} > 0, \quad a = \frac{4}{5} \dots\dots\dots (23)$$

ならば

$$\dot{V} \leq 0 \dots\dots\dots (24)$$

式(21)と式(24)より左アームと対象物のみが接触しているときリアプノフの意味で安定である.

3.3 右アームと対象物のみが接触している状態

この場合は, 3.2 節の左アームの場合と比べて左と右が変わっただけで本質的に同じである.

よって,

$$\left. \begin{aligned} k_l + K_{pl} > 0, \quad k_r + K_{pr} > 0 \\ c_l + K_{vl} > 0, \quad c_r + K_{vr} > 0 \\ b = \frac{4}{5} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

ならば

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} = \mathbf{0} \text{ で } V = 0 \\ \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \text{ で } V > 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

$$\dot{V} \leq 0 \dots\dots\dots (27)$$

よってリアプノフの意味で安定である.

3.4 いずれも接触していない状態 このとき,

$u_l < 0$ または $\dot{u}_l < -1/p_l$, $u_r < 0$ または $\dot{u}_r < -1/p_r$
で

$$\Delta k_l = \Delta k_r = 0$$

$$f_{wl} = f_{wr} = 0$$

式(10)から式(14)より

$$V = (k_l + K_{pl})x_l^2 + m_l\dot{x}_l^2 + m_o\dot{x}_o^2 \\ + (k_r + K_{pr})x_r^2 + m_r\dot{x}_r^2 \dots\dots\dots (28)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} V_l &= (k_l + K_{pl})x_l^2 + m_l\dot{x}_l^2 \\ V_r &= (k_r + K_{pr})x_r^2 + m_r\dot{x}_r^2 \\ V_o &= m_o\dot{x}_o^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

以下左アーム, 対象物, 右アームで分けて考える

①左アーム

$$\left. \begin{aligned} x_l = \dot{x}_l = 0 \text{ のとき } V_l &= 0 \\ \text{それ以外 のとき } V_l &> 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

V_l を微分して式(1)を代入すると

$$\dot{V}_l = 2\dot{x}_l\{(k_l + K_{pl})x_l + m_l\dot{x}_l\} \\ = -2(c_l + K_{vl})\dot{x}_l^2 \dots\dots\dots (31)$$

②右アーム

左アームと同様にして

$$\dot{V}_r = -2(c_r + K_{vr})\dot{x}_r^2 \dots\dots\dots (32)$$

①, ②から非接触状態での左・右アームは

$$c_l + K_{vl} > 0, c_r + K_{vr} > 0$$

であれば各々単独では安定で $t \rightarrow \infty$ のとき $x_l = x_r = 0$ に収束することがわかる。

③対象物

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_o = 0 \text{ のとき } V_o &= 0 \\ \dot{x}_o \neq 0 \text{ のとき } V_o &> 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

V_o を微分して式(3)を代入すると

$$\dot{V}_o = 2m_o\dot{x}_o\ddot{x}_o = 0 \dots\dots\dots (34)$$

ここで $\dot{x}_o \neq 0$ (すなわち $x \neq 0$) のときでも $V_o = 0$ となるのでリアプノフの意味での厳密な安定判別はできない。しかし, $\dot{x}_o = \ddot{x}_o = 0$ 以外で $V_o = 0$ となるのは系が静止していて対象物が原点にないことを意味している。このような静止した系は外力が働かない限り静止した状態で保存される。

ところで, ここではいずれもが接触していない状態を考えており,

$$x_l - \varepsilon_l < x_o < x_r + \varepsilon_r \dots\dots\dots (35)$$

ここで $\varepsilon_l (> 0)$, $\varepsilon_r (> 0)$ は, 衝突力が働かない状態でアームが対象物に食い込んでいる量を表しており, 衝突時に生じた局部変形の復元速度よりも反発後のアームと対象物との相対速度のほうが大きい場合にのみ考慮すべきものである。

また $\varepsilon_l, \varepsilon_r$ について考えると, すべてが非接触の状態では

$$u_l = x_l - x_o < 0 \text{ または } \dot{u}_l = \dot{x}_l - \dot{x}_o < -1/p_l$$

$$u_r = x_o - x_r < 0 \text{ または } \dot{u}_r = \dot{x}_o - \dot{x}_r < -1/p_r$$

いま仮に例えば左アームについて考えると $u_l > 0$ であっても, $\dot{u}_l < -1/p_l$ であることは条件によっては存在する。しかし, アームが対象物に無限に食い込むことは物理的にありえないので, $\dot{u}_l < -1/p_l$ となるのは, ある有限の正值 ε_l よりも u_l が小さく $\varepsilon_l > u_l > 0$ となる場合だけである (ただし通常 ε_l は小さい正值となる)。また, $u_l < 0$ であれば $\varepsilon_l > 0 > u_l$ となり, 結局左アームでの接触は

$$\varepsilon_l > u_l \dots\dots\dots (36)$$

と表せる。

同様に考えれば,

$$\varepsilon_r > u_r \dots\dots\dots (37)$$

これからまた式(35)が導かれる。ところが $t \rightarrow \infty$ で単独のアーム自体は $x_l \rightarrow 0, x_r \rightarrow 0, \dot{x}_l \rightarrow 0, \dot{x}_r \rightarrow 0$ となる。そのとき f_{wl}, f_{wr} は零に収束するため食い込み量 $\varepsilon_l, \varepsilon_r$ も零に収束する。よって, 式(35)から x_o は $t \rightarrow \infty$ で零に収束していく。したがって, 接触していない条件下でも物理的に安定と言える。

以上, 3・1節から3・4節までの結果から衝突を含む系が安定であることが示された。

また式(17), (22)で各々 $2p_l H_l u_l^{3/2} \dot{u}_l^2 (\geq 0)$ および $2p_r H_r u_r^{3/2} \dot{u}_r^2 (\geq 0)$ は, 衝突による項であるが, 衝突のない場合 [式(31), (32), (34)] と比べて, $\dot{V}$ がこの分小さくなっている。すなわち, 衝突が安定化作用を持つことが示される。これは, 例えば式(17), (22), (31), (32), (34)で $c_l = c_r = 0, K_{vl} = K_{vr} = 0$ とすると物理的に非接触時には $\dot{V} = 0$ となって臨界安定となるが, この場合接触時には

$$\dot{V} = -\sum (2p_i H_i u_i^{3/2} \dot{u}_i^2) \leq 0 \quad (i=1, r) \dots\dots\dots (38)$$

となってリアプノフの意味で安定となることから考えることができる。

4. シミュレーション結果と考察

衝突を含む安定制御について, 以下シミュレーションにより検討する。

4・1 解法 運動方程式より次の状態方程式を定義する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}f + \mathbf{f}_w \dots\dots\dots (39)$$

ここで, $\mathbf{x}$ は状態ベクトル, $\mathbf{b}f$ は制御入力ベクトル, $\mathbf{f}_w$ は衝突ベクトルで

$$\mathbf{x} = \{x_l \quad \dot{x}_l \quad x_o \quad \dot{x}_o \quad x_r \quad \dot{x}_r\}^T \dots\dots\dots (40)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_l}{m_l} & -\frac{c_l}{m_l} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_r}{m_r} & -\frac{c_r}{m_r} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$b = \left\{ 0 \quad \frac{1}{m_l} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{m_r} \right\}^T \quad (42)$$

$$f_w = \left\{ 0 \quad -\frac{f_{wl}}{m_l} \quad 0 \quad \frac{f_{wl} - f_{wr}}{m_o} \quad 0 \quad \frac{f_{wr}}{m_r} \right\}^T \quad (43)$$

これを4次のルンゲクッタ法で解く。

ただし、マトリックス A からわかるように左右のアームおよび対象物はいずれも系としては全く別々であると考え、接触した場合には相対変位と相対速度とから決定される衝突力がお互いに働くだけと考える。したがって、接触している状態であってもつながらているとは考えない。また、ここでの手法では、接触、非接触の繰返しがあっても計算をすることができる。

4・2 境界条件 接触・非接触の判別は、相対変位 u_l, u_r と相対速度 $\dot{u}_l, \dot{u}_r$ 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、ルンゲクッ

タ法による各々の時刻の前後の状態量 ($u_l, \dot{u}_l, u_r, \dot{u}_r$) から接触か否かの状態を見て左右別々に決める。例えば、いま左アームのみについて考えて、ある時刻の前の非接触状態 ($u_l < 0$ または $\dot{u}_l < -1/p_l$) だったものが、時刻の後の計算結果では接触状態 ($u_l \geq 0$ かつ $\dot{u}_l \geq -1/p_l$) になっていれば、その時刻のどこかで接触するはずである。そこで、その時刻の中の接触する時刻 t_{lc} を時刻の前後の $u_l, \dot{u}_l$ から線形補間により求め、この時刻 t_{lc} における全状態量 ($x_l, \dot{x}_l, x_o, \dot{x}_o, x_r, \dot{x}_r$) を時刻 t_{lc} の比から求める。この、時刻 t_{lc} の状態を初期条件と置き直して t_{lc} 以降の時刻の残り分を計算し、順次その次の時刻へ計算を進めていく。接触状態が非接触状態になる場合は接触する場合の逆に考え、ある時刻の前の状態が接触で、後の状態が非接触であれば、その時刻の中で非接触となる時刻を求めてこの状態量を初期条件として計算を進める。ただし、接触状態と非接触状態の違いは式(43)の f_{wl} が零か否かの違いだけである。

右アームについても全く同じように考え、時刻

表 1 シミュレーションの基準パラメータ

m_l	1	m_o	5	p_l, p_r	0.1
k_l	10	K_{pl}	5	H_l, H_r	10000
c_l	0.2	K_{vl}	0.5	x_{lo}	0.3
m_r	1	K_{pr}	5	v_{lo}	0
k_r	10	K_{vr}	0.5	x_{ro}	0.5
c_r	0.2			v_{ro}	0

図 2 基準パラメータの結果

図 3 臨界安定、完全弾性衝突

図4 臨界安定, 非完全弾性衝突

図7 左右アーム質量10倍の結果

図5 基準系, 完全弾性衝突

図8 左アームのみ質量10倍の結果

図6 基準系, 非完全弾性衝突

図9 左右アームバネ剛性10倍の結果

の前後の接触状態をそのときの状態量から決める。

計算では、この左・右アームについての状態を両方ともすべての時間刻みごとに判定する。また、ある同一の時間刻みで左・右アームの両方の接触状態が変化しても、その時間刻みにおける各々の変化時刻を求めて早いほうをまず採用し、次に残りの時間分の計算をしてその上で別のほうの状態がなお変わっていれば、この時点でまた状態変化時刻を求めて以降の計算を行った。

4.3 計算結果 図2から図15にシミュレーション結果を示す。ここでNo.1からNo.14の計算は次の条件となっている。

No.1 以下のパラメータスタディの基準とする(図2)。使用したパラメータは表1に示す。左右のマニピュレータは同じ特性を持ち、初期条件のみが異なる。図の中で x_l のほうが x_o よりも大きくなっている

部分は左マニピュレータが対象物に食い込んでいる状態を示している。右マニピュレータについても同様である。以下の条件についても同じ。

No.2 減衰の項をすべて零とした臨界安定な系の応答($c_l, c_r, K_{vl}, K_{vr}, p_l, p_r=0$)。制御はアームの位置のフィードバックのみ。この応答は減衰も発散もせずに周期的に続いていく(図3)。

No.3 マニピュレータに含まれる減衰の項をすべて零とし衝突のみに減衰効果を持たせた($p_l=p_r=1$)場合の応答(図4)。

No.4 No.1のマニピュレータで完全弾性衝突($p_l=p_r=0$)とした場合の応答(図5)。

No.5 No.1のマニピュレータで衝突による減衰を大きくした場合($p_l=p_r=1$)の応答(図6)。

No.6 No.1の左右のマニピュレータ質量を10

図10 左アームのみバネ剛性10倍の結果

図12 左アームのみ減衰定数10倍の結果

図11 左右アーム減衰定数10倍の結果

図13 変位フィードバックゲイン10倍の結果

図 14 速度フィードバックゲイン 10 倍の結果

図 15 対称物のみ質量 10 倍の結果

倍にした場合の応答。 $m_l = m_r = 10$ (図 7)。

なお, No.6 (図 7) から No.11 (図 12) までについては初期条件を左右で同一とした。

No.7 No.1 の左マニピュレータ質量のみを 10 倍にした場合の応答 (図 8)。 $m_l = 10$ 。

No.8 No.1 の左右のマニピュレータのバネ剛性を 10 倍にした場合の応答 (図 9)。 $k_l = k_r = 100$ 。

No.9 No.1 の左マニピュレータのバネ剛性のみを 10 倍にした場合の応答 (図 10)。 $k_l = 100$ 。

No.10 No.1 の左右のマニピュレータの減衰定数を 10 倍にした場合の応答 (図 11)。 $c_l = c_r = 2$ 。

No.11 No.1 の左マニピュレータの減衰定数のみを 10 倍にした場合の応答 (図 12)。 $c_l = 2$ 。

No.12 No.1 の左右のマニピュレータの位置についてのフィードバックゲインを 10 倍にした場合の応答 (図 13)。 $K_{pl} = K_{pr} = 50$ 。

No.13 No.1 の左右のマニピュレータの速度についてのフィードバックゲインを 10 倍にした場合の応答 (図 14)。 $K_{vl} = K_{vr} = 5$ 。

No.14 No.1 の対象物の質量を 10 倍にした場合の応答 (図 15)。 $m_o = 50$ 。

この結果から次のことがわかる。

① 図 3 と図 4 より, 臨界安定の系がエネルギー散逸を含む衝突 ($p > 0$) により安定化させられる。これはリアプノフの直接法による前章の結果とも一致する。

② 図 2, 5, 6 より, 同じ特性を持ち同じ制御をされるマニピュレータでも衝突の際のエネルギー散逸が大きくなれば系全体の収束性がよくなる。

③ 線形フィードバックでも安定な把持が可能である。

④ 質量, バネ剛性, 減衰定数等のパラメータが変

動しても安定な把持は可能である。しかし, 応答性など収束するまでの挙動にはいろいろな違いが出てくる。

例えば左右アームの特性が同じであれば

⑤ アーム質量が大きくなると振動数が大きくなり, 応答性が悪化する (図 2, 7 参照)。

⑥ アームのバネ剛性が大きくなると, ある範囲までの収束性は良いが十分な減衰に時間がかかるようになる (図 2, 9 参照)。

⑦ アームの減衰定数が大きくなると収束性が良くなる (図 2, 11 参照)。

⑧ 左右アームの特性が異なると, 全体の傾向は収束であっても挙動が左右で異なり制御性が悪くなる (図 8, 11, 12 参照)。

⑨ フィードバックゲインの変化によっても挙動は変わってくる。例えば

⑩ ゲイン K_{pl}, K_{pr} が大きくなると, 大きな制御入力が必要になり, 減衰効果が相対的に小さくなり収束しにくくなる (図 2, 13 参照)。

⑪ ゲイン K_{vl}, K_{vr} が大きくなると, 減衰効果が大きくなり, 収束性が良くなる (図 2, 14 参照)。

⑫ 対象物の質量が大きくなると応答性が悪化し, 把持のために時間がかかるようになる (図 2, 14 参照)。

5. ま と め

本論文では衝突を含むマニピュレータの把持動作につき, 既報と同様に 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 4 章ではシミュレーションによってその過渡状態について検討した。この結果, 高速な動作のために物体把持が衝突現象を含んでい

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であることが示された。また衝突は臨界安定な場合など、ある条件下では系を安定化させる現象であり、線形フィードバック制御によっても衝突を含む系の安定な把持動作制御が可能であることが確認された。ただし、把持する複数のマニピュレータの動特性が大きく異なる場合には制御が難しくなることもわかった。

今後は、衝突に関する現象について実験的に検証し、またさらに複雑な系に本論文の手法を適用していくことが課題である。

文 献

- (1) 福田, 機論, 51-468, C (1985), 2140.
- (2) 福田・北村・谷江, 機論, 53-487, C (1987), 726.
- (3) 福田・北村・谷江, 機論, 53-496, C (1987), 2577.
- (4) 福田・谷江・光岡, 機論, 53-493, C (1987), 1950.
- (5) 福田・長谷川, 機論, 55-512, C (1989), 959.
- (6) 福田・北村・谷江, 日本ロボット学会誌, 6-2 (1988), 91.
- (7) 正司・福田・稲葉, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '89 予稿集 (1989), 189.
- (8) 藤田・服部・機論, 45-395, C (1979), 737.
- (9) 藤田・服部, 機論, 45-397, C (1979), 985.
- (10) 藤田・服部, 機論, 46-403, C (1980), 227.
- (11) Youcef-Toumi, K. and Gutz, D., *Proc., IEEE Robot and Automation '89*, (1989), 410 など.
- (12) Kahng, J. and Amirouche, F., *Int'l J. of Robot and Automation*, 3-3 (1988), 158 など.
- (13) Colgate, E. and Hogan, N., 文献(11)の 404 ページ.
- (14) 正司・稲葉・福田・細貝, 衝突を含むロボット・マニピュレータの安定制御 (第1報: 1本の1自由度マニピュレータの押し付け制御の安定性), 機論, 56-527, C (1990), 1847.
- (15) 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*, (1988), 296, MIT Press.