衝突を含むロボット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)正 司 康 雅*¹, 稲 葉 忠*¹
福 田 敏 男*², 細 貝 英 実*³Stable Control of Robotic Manipulator with Collision Phenomena
(4th Report, Positioning of Multi-Degrees-of-Freedom Linear Manipulator)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 an multiple degree-of-freedom linear manipulator system which is positioned on a flexible wall with collision phenomenon. A methodology to determine the controllaw of the manipulator which guarantees the system stability is also discussed. As collision is a phenomenon with energy dissipation, it is used in the field of industry for such purposes as to suppress vibrations. On the other hand, in the field of robotics, the phenomenon is usually avoided, because the controllability of the system becomes poorer at contact. But as demands for fast tasks against environment increases, collision becomes a problem which must be solved. In our previous reports, some approaches using the Lyapunov method were discussed. In this report, we expanded the manipulator complexity to n -D. O. F and proved the stability of the system, including even collision. Some numerical simulations were also executed to show the transient behavior of the system and to compare their results with the results of the theoretical analysis.

Key Words: Stability, Stable Control, n -D. O. F., Linear Manipulator, Collision, Lyapunov Method, Positioning, Simulation

1. はじめに

現在のロボットの発展, 普及には目を見張るものがある。特に, センサベースの制御や他の高度な制御を用いたロボットについての研究や, 自動化された工場における工業用ロボットの普及はめざましい。

ところで, これらのロボットは本来与えられた仕事を実行して役に立つように考えられているはずであり, ロボットと対象物との間では相互作用が生じる。ところが, 現在用いられているロボット制御や, また現在研究中のロボット制御は対象物に触る前と後を完全に分離しているのが現実である。したがって, 接触状態へ変化する場合の制御については, 例えばマスタスレーブ方式の制御で用いる「Guarded Motion」と呼ばれる制御⁽⁹⁾のように, ロボットをゆっくり動かして制御則が急激に変化しないようにしている。しかし, ロボットの高速化を図ろうとする場合には, この接触動作における高速化を実現しなければ, 自ずから限界

がある。ここで, 接触動作を高速化する場合には衝突を生じることとなり, 注意をする必要がある。

さて, このロボット動作中の衝突であるが, 現象的にはエネルギー散逸を含むものであるから, 原理的には系に対して安定要素として働くことが予想される。実際, 衝突は振動抑制やブレ止めとしてなど工業用としては有効に利用されている⁽⁸⁾。ところが, ロボティクスの分野では一般に制御性が悪くなる⁽³⁾として, 衝突は回避すべきものとして扱われ, 衝突に関する研究も衝突回避問題が多い⁽¹⁰⁾。しかし, ロボットの高速化に対する必要性が増し, 接触までの時間を短縮する場合や, フレキシブルアームのようにロボットの剛性が, 扱うペイロードや自重と比べて相対的に低くなる場合には, 環境(対象物)とロボットとの接触時に衝突は避けられないものとなる。

そこで, 著者らは衝突を含むマニピュレータの制御について直列1自由度マニピュレータの押し付け⁽¹⁾, 直列1自由度マニピュレータによる物体把持⁽²⁾について報告してきた。また, これら以外にも多リンク系のうち最も簡単な2リンク系や, 1自由度ではあるが構造的に複雑な系など, いくつかのモデルについて, 主に安定性に着目して報告した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本論文ではより現実に近いマニピュレータを対象とし, 一般化を考慮

* 原稿受付 平成3年3月22日。

*¹ 正員, 東洋エンジニアリング(株) (〒275 習志野市茜浜2-8-1)。*² 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中種区不老町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)。

して、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壁の表面で止める非線形な衝突問題を考えた。このようなモデルは質量-ばね-ダンパの組(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⁽¹¹⁾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った。また、実際の制御では安定性ととも、応答性も重要である。この応答性を検討し、先の安定性の理論と比較するためにシミュレーションを行った。

本論文では、強い非線形現象である衝突を含む n 自由度の線形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し、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。

2. 衝突を含む系の安定性

安定性はリアプノフの直接法によって判定する。また、安定性の検討とともにシミュレーションを行うために線形の動特性方程式で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(図1)。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-ばね-ダンパ系にアクチュエータのついた形で表す。また、マニピュレータの先端には m_1 なる質量があり、これは壁の運動方向のみに運動するものとする。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 形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。

2.1 系のモデル化と運動方程式 図1の、衝突を含む壁-マニピュレータの系が式(1)のように表さ

図1 線形マニピュレータと対象物の衝突モデル

れるものとする。

$$\dot{x} = A^*x + Fx + df_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

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、

$$A = A^* + F \quad \dots\dots\dots (2)$$

として

$$\dot{x} = Ax + df_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)の各々のベクトル、行列は以下のように表されるものとする。

$$x = \{x_b, x_1, \dots, x_n, \dot{x}_b, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n\}^T \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$f_w = \begin{cases} (1 + p\dot{u})Hu^{3/2} & (u \geq 0 \text{ かつ } \dot{u} \geq -1/p) \\ 0 & (0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし

$$u = x_1 - x_b \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$d = \left\{ \underbrace{0 \ 0 \ \dots \ 0}_{n+1}, \underbrace{\frac{1}{m_b} \ -\frac{1}{m_1} \ 0 \ \dots \ 0}_{n+1} \right\}^T \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(2)より

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_{21} + F_{21} & A_{22} + F_{22} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (10)$$

また、式(7)で p はエネルギー損失を表す非負のパラメータであり、 $p=0$ 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 の理論による値で通常大きな正值となる。本論文では、衝突は有限の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る、ここでは最も妥当と思われる式(7)を採用した⁽⁶⁾。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。

2.2 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(11)のように2次形式のスカラ関数を定義する。

$$V = x^T P x \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし

$$P = P_{nc} + P_c = P^T > 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

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。これらは、次式のように表されるものとする。

$$P_{nc} = \begin{bmatrix} P_{nc1} & P_{nc2}^T \\ P_{nc2} & P_{nc3} \end{bmatrix} = P_{nc}^T > 0 \dots\dots\dots (13)$$

$$P_c = \begin{bmatrix} \Delta k & -\Delta k & 0 & \cdots & 0 \\ -\Delta k & \Delta k & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} = P_c^T \geq 0 \dots\dots\dots (14)$$

ただし,

$$\Delta k = \begin{cases} aHu^{1/2} & (u \geq 0 \text{ かつ } \dot{u} \geq -1/\rho) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \dots\dots (15)$$

ここで, a は任意の正の定数で, なんらかの形で決定できればよい値であり, 制御数ではない。このとき,

$$V = \mathbf{x}^T P \mathbf{x} \geq 0 \dots\dots\dots (16)$$

いま, V の時間微分 $\dot{V}$ を考える。これは,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\mathbf{x}}^T P \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \dot{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T P \dot{\mathbf{x}} \\ &= \mathbf{x}^T (A^T P_{nc} + P_{nc} A) \mathbf{x} + 2f_w \mathbf{d}^T P_{nc} \mathbf{x} \\ &\quad + \mathbf{x}^T \dot{P}_{nc} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T (A^T P_c + P_c A) \mathbf{x} \\ &\quad + 2f_w \mathbf{d}^T P_c \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \dot{P}_c \mathbf{x} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

式(13)の右辺の部分行列 $P_{nci} (i=1, 2, 3)$ について次式のように定義する。

$$P_{nci} = \begin{bmatrix} P_{nci-bb} & P_{nci-b1} & \cdots & P_{nci-bn} \\ P_{nci-1b} & P_{nci-11} & \cdots & P_{nci-1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{nci-nb} & P_{nci-n1} & \cdots & P_{nci-nn} \end{bmatrix} \dots\dots (18)$$

($i=1, 2, 3$)

式(17)の右辺の各項について別々に考える。

第1項 これは全く衝突を考慮しない場合の判別と同様であり, 次式が成立すればよい。

$$A^T P_{nc} + P_{nc} A = -Q \dots\dots\dots (19)$$

$$Q > 0 \dots\dots\dots (20)$$

第2項 衝突/接触力 f_w の係数を考えると

$$\begin{aligned} \mathbf{d}^T P_{nc} \mathbf{x} &= \frac{1}{m_b} \left\{ P_{nc2-bb} x_b + P_{nc3-bb} \dot{x}_b \right. \\ &\quad + \sum_{j=1}^n p_{nc2-bj} x_j + \sum_{j=1}^n P_{nc3-bj} \dot{x}_j \Big\} \\ &\quad - \frac{1}{m_1} \left\{ p_{nc2-1b} x_b + p_{nc3-1b} \dot{x}_b \right. \\ &\quad + \sum_{j=1}^n p_{nc2-1j} x_j + \sum_{j=1}^n p_{nc3-1j} \dot{x}_j \Big\} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

第3項 P_{nc} が時不変行列であるから

$$\mathbf{x}^T \dot{P}_{nc} \mathbf{x} = 0 \dots\dots\dots (22)$$

第4項 行列を展開して整理すると

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T (A^T P_c + P_c A) \mathbf{x} &= 2\Delta k (x_1 - x_b)(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) \\ &= 2\Delta k u \dot{u} \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

これは A 行列に関係しないことがわかる。

第5項 実際に行列とベクトルとの乗算を行うと

$$2f_w \cdot \mathbf{d} P_c \mathbf{x} = 0 \dots\dots\dots (24)$$

第6項 実際に行列とベクトルとの乗算を行うと

$$\mathbf{x}^T \dot{P}_c \mathbf{x} = (\dot{\Delta k})(x_1 - x_b)^2 = (\dot{\Delta k})u^2 \dots\dots\dots (25)$$

これも A 行列に関係しないことがわかる。

ところで, 第2項から第6項までは衝突に関わる項であり, 式(19), (20)が成立するとき, これら5項の総和が負または零であれば $\dot{V} \leq 0$ を示すことができる。これを接触/非接触の状態について考えると, マニピュレータが壁に接触していない状態では, この5項の総和は零であり, 問題無いので, これ以上言及する必要はない。したがって以下, 衝突/接触時について考える。

まず, 第3項から第6項までの和は衝突時には

$$\begin{aligned} 2\Delta k u \dot{u} + (\dot{\Delta k})u^2 &= 2aHu^{3/2}\dot{u} + \frac{1}{2}aHu^{-1/2}\dot{u}u^2 \\ &= \frac{5}{2}aHu^{3/2}\dot{u} \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

なので,

$$\mathbf{d}^T P \mathbf{x} = -bu \quad (b > 0) \dots\dots\dots (27)$$

の形であれば, 第2項以降の和は

$$\begin{aligned} -2f_w \cdot bu + \frac{5}{2}aHu^{3/2}\dot{u} \\ = -2bpHu^{3/2}\dot{u}^2 - \left(2b - \frac{5}{2}a\right)Hu^{3/2}\dot{u} \dots\dots (28) \end{aligned}$$

となり, 定数 a について

$$a = \frac{4}{5}b \dots\dots\dots (29)$$

であれば, $\dot{V} \leq 0$ であることが言える。

式(27)が成立するには, 式(21)で $\dot{x}_1, \dot{x}_b$ 以外の項がすべて零でなければならないので

$$\frac{p_{nc2-bb}}{m_b} - \frac{p_{nc2-1b}}{m_1} = 0 \dots\dots\dots (30)$$

$$\frac{p_{nc2-bj}}{m_b} - \frac{p_{nc2-1j}}{m_1} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \dots\dots (31)$$

$$\frac{p_{nc3-bb}}{m_b} - \frac{p_{nc3-1b}}{m_1} = 0 \quad (j=2, 3, \dots, n) \dots\dots (32)$$

$$\frac{p_{nc3-b1}}{m_b} - \frac{p_{nc3-11}}{m_1} = -\left(\frac{p_{nc3-bb}}{m_b} - \frac{p_{nc3-1b}}{m_1}\right) < 0 \dots\dots\dots (33)$$

以上から系の安定性の条件は, 以下のとおりとなる。

<安定の条件> 式(13), (14), (19), (20)および(30)から(33)が成立すること。

この条件を満足する行列 P, F_{21}, F_{22} を求める。

i) 式(14)は常に成立する。

ii) 式(30)および(31)から

$$P_{nc2} = 0 \dots\dots\dots (34)$$

としてみる。このとき, 式(13)から

$$P_{nc} = \begin{bmatrix} P_{nc1} & 0 \\ 0 & P_{nc3} \end{bmatrix} > 0$$

となり、次式が成立しなくてはならない。

$$P_{nc1} = P_{nc1}^T > 0 \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$P_{nc3} = P_{nc3}^T > 0 \quad \dots\dots\dots (36)$$

iii) 式(19), (20)より

$$\begin{aligned} Q &= -(A^T P_{nc} + P_{nc} A) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & & \\ -P_{nc1} - P_{nc3}(A_{21} + F_{21}) & & \\ -P_{nc1} - (A_{21}^T + F_{21}^T)P_{nc3} & & \\ -(A_{22}^T + F_{22}^T)P_{nc3} - P_{nc3}(A_{22} + F_{22}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (37)$$

$Q \geq 0$ となるためには、

$$P_{nc1} + P_{nc3}(A_{21} + F_{21}) = P_{nc1} + (A_{21}^T + F_{21}^T)P_{nc3} = 0 \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$(A_{22}^T + F_{22}^T)P_{nc3} + P_{nc3}(A_{22} + F_{22}) < 0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

この2式は次の2式が成立すれば解を持つ。

$$A_{21} + F_{21} = A_{21}^T + F_{21}^T < 0 \quad \dots\dots\dots (40)$$

$$A_{22} + F_{22} = A_{22}^T + F_{22}^T < 0 \quad \dots\dots\dots (41)$$

すなわち、式(40)および(41)はリアプノフ関数が存在し、系が安定であるための十分条件である。さらに、これらの式は式(17)の第1項を負または零としつつ第2項以降の和をも負または零とする条件である。これは、衝突の項によってリアプノフ関数の微係数が衝突のない系と比べてさらに小さくなることを示しており、言い換えれば、衝突現象が系を安定させるように働くことがあることを示している。

2.3 安定な制御則の例 いま、例えば先述のグライディングの系のように図2のように表されるような、 n 個の質量-ばね-ダンパに n 個のアクチュエータのついた直線状の系が、壁の表面に衝突を含んで止められるような問題について、安定条件を満たす制御則を考える。この系は、

$$A_{21} = -M^{-1}K, A_{22} = -M^{-1}C \quad \dots\dots\dots (42)$$

と表すことができる。ただし、

$$K = K^T > 0, C = C^T > 0 \quad \dots\dots\dots (43)$$

また、制御則として線形フィードバックを考え、以下の式のように定式化すると、

$$F_{21} = -M^{-1}K_p, F_{22} = -M^{-1}K_v \quad \dots\dots\dots (44)$$

式(40)および(41)から

$$K_p = K_p^T \geq 0, K_v = K_v^T \geq 0 \quad \dots\dots\dots (45)$$

は、安定な制御則の解となり、このとき

$$P_{nc1} = K + K_p, P_{nc3} = M \quad \dots\dots\dots (46)$$

を部分行列とする2次形式のリアプノフ関数が存在する。ところで、物理的にこの制御則は、複数のアクチュエータを持つ場合に、そのアクチュエータについて

る質量の変位と速度をお互いにフィードバックするという制御則であり、アクチュエータが複数あれば有効な制御則と考えられるが、もしもこれが一つしかない場合には、非常に限定されたものになってしまう。そこで、〈安定の条件〉から別の制御則を考えてみる。仮に、図2の系で最も根元よりの部分(m_n の付け根側)にのみアクチュエータがある場合を考える。これは、例えばビリヤードのような突き当てなどにも対応するが、この問題では、

$$K_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ K_{p(n-1)} & K_{pn} \end{matrix} \equiv K_p^T \quad \dots\dots\dots (47)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ K_{v(n-1)} & K_{vn} \end{matrix} \equiv K_v^T \quad \dots\dots\dots (48)$$

なる制御則、すなわち制御入力 f が

$$f = -k_{p(n-1)}x_{n-1} - k_{pn}x_n - k_{v(n-1)}\dot{x}_{n-1} - k_{vn}\dot{x}_n \quad \dots\dots\dots (49)$$

で表される場合は、リアプノフ関数が存在し、安定な制御が可能である。ただし、この場合には式(35)および(36)を満足するために、以下のような条件がつく。

$$k_{n-1} - k_{p(n-1)} > 0 \quad \dots\dots\dots (50)$$

$$k_n + k_{p(n-1)} + k_{pn} > 0 \quad \dots\dots\dots (51)$$

$$c_{n-1} + c_n + k_{vn} > 0 \quad \dots\dots\dots (52)$$

$$\frac{c_{n-1}k_{n-1}(c_{n-1} + c_n + k_{vn})}{k_{n-1} - k_{p(n-1)}} - \left\{ \frac{k_{n-1}(c_{n-1} - k_{v(n-1)})}{2(k_{n-1} - k_{p(n-1)})} + \frac{c_{n-1}}{2} \right\}^2 > 0 \quad \dots\dots\dots (53)$$

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、さらにそのゲインの決め方について示した。

4. シミュレーション

制御において安定性の検討とともに、過渡応答を含

図2 n 自由度直列マニピュレータの力学モデル

む系の応答性は重要である。ここでは、衝突を含む系の制御について、以下シミュレーションによりその過渡状態について検討するとともに前章での結果についても検証する。本シミュレーションでは、前章の最後に扱った図2の系のうち、 $n=3$ として3質点でモデル化でき、アクチュエータの三つある3自由度系を考える。

4.1 解法 式(1)について、式(5), (6), (7), (42), (44), (47)および(48)を考慮して4次のルンゲクッタ法で解く。ただし、マニピュレータと壁とは独立な系であると考え、したがって、この二つの系が接触した場合には、構造的につながるものではなく、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ものとする。

表1 動特性パラメータ

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

図3 安定条件を満たさない場合で衝突を含まないマニピュレータ単独の挙動

4.2 境界条件 接触・非接触の判別は、相対変位 u と相対速度 $\dot{u}$ により決定する。すなわち、各々の時間刻みの前後の状態量 $(u, \dot{u})$ から接触か否かの状態を決め、このうち特に接触と非接触の状態が変化する場合には、その時間刻み内での線形補間から真の状態変化時刻を求めて、これを初期条件として新しい状態での計算を行う。よって、接触状態と非接触状態の違いは接触力 f_w が零か否かの違いだけである。

4.3 計算結果 表1にマニピュレータの動特性に関するパラメータを示し、図3から図6にはシミュレーションの結果を示す。

まず、図3はあるマニピュレータを衝突させずに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おうとした場合の応答が図4である。フィードバックゲインや初期

図4 図3と同一のフィードバックゲインを用いて衝突を含んだ制御をした場合の挙動

図5 安定条件を満たし衝突を含んだ場合の挙動

条件は図3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(44)と(45)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。しかし、これを衝突させた場合には、図3と図4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(44)と(45)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、図5である。第3章での安定性解析のとお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図6である。図5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ほうが、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

図6 図5と同一のフィードバックゲインを用いて衝突をさせずにマニピュレータを単独で制御した場合の挙動

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(44)と(45)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ことがわかる。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わかる。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ととともに、可能であれば安定領域で制御するべきであることがわかる。

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、また、そのうちの直列な系について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た。この結果、衝突を含む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であることが示され、また安定な制御則の決定について一つの方法が示された。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、線形フィードバック制御によっても、マニピュレータのロバスト性に期待することなく、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、さらに、衝突を積極的に利用することが有効であることがわかった。

文 献

- (1) 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), 機論, 56-527, C(1990), 203-209.
- (2) 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), 機論, 56-529, C(1990), 114-122.
- (3) 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, (1989), 209-210.
- (4) 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8報, 多リンクマニピュレータの押し付け制御), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '90 予稿集, (1990), 27-28.
- (5) 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9報, 1自由度で多構造系マニピュレータの押し付け制御の一般化について), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '90 予稿集, (1990), 29-32.
- (6) 藤田・服部, 周期衝突振動における衝撃特性, 機論, 45-395, C(1979), 738-746.
- (7) 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, (1988), 3-12.
- (8) 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), 機論, 45-399, C(1979), 1217-1224.
- (9) Tanie, K., Komoriya, K., Kaneko, T., Ohno, T. and Fukuda, T., Bilateral Remote Control with Dynamic Reflection, *Proc. Sixth CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, (1988), 269-308.
- (10) Yoshikawa, T. and Lipsett, M., 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), 189-192.
- (11) 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), 209-210.