パラレルリンクアームのダイレクトコンプライアンス制御*

(第2報, 関節剛性の調整範囲と安定性)

横井 一仁^{*1}, 金子 真^{*1}, 谷江 和雄^{*1}

A Direct Compliance Control for a Parallel Link Arm

(2nd Report, The Stability Analysis for the Arm with Negative Stiffness Joints)

Kazuhito YOKOI, Makoto KANEKO, and Kazuo TANIE

In the Direct Compliance Control (DCC) of robotic arms, the arm compliance which can be selected is limited when only the positive joint stiffness is allowed. This is a drawback of the DCC, as the previous paper suggested. One way of removing this is to expand the adjusting ranges of the joint stiffness to negative values. However, this may cause unstable motion of the arm. This paper discusses the stability of the parallel link arm which includes joints with negative stiffness. Through potential energy analysis, the stability condition for the arm is derived, and it is suggested that a parallel link arm structure provides a great benefit in obtaining get stable control motions by robotic arms with negative stiffness joints. A planar parallel link arm with three variable stiffness joints was designed. Using the arm, two compliant motion tasks were carried out and the analytical results were confirmed.

Key Words: Application of Control, Compliance Control, Robot Manipulator, Parallel Link, Stiffness Control

1. 緒 言

組立作業のように、対象物からの拘束を伴う作業をロボットに実行させるには、ロボットアームの位置を拘束力に応じて適応的に制御することが必要である⁽¹⁾。こうした位置と力の双方を取扱う制御としてコンプライアンス制御^{(2)~(5)}や、位置と力のハイブリッド制御⁽⁶⁾が検討されている。

著者らも、コンプライアンス制御の一手法として、ダイレクトコンプライアンス制御(D.C.C.)法を提案しシリアルリンクアームおよびパラレルリンクアームを対象にその基本的問題を検討してきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。D.C.C.は、アーム先端の作業座標系において設定される剛性行列が含む独立な剛性成分の数に対応する可変剛性要素を関節に用意し、それらを調節することによって作業座標系での剛性を制御する方法である。このように、作業座標系における制御すべき剛性行列の中の要素の数と、アーム中の剛性制御可能な関節数とを対応させると、従来より提案されているソフトウェアサーボの手法により仮想的に剛性を制御する試み⁽³⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾に比

べて、各関節の剛性制御を独立に行うことで作業座標系の剛性制御が実現できるため、コンプライアンス制御を実施するための関節トルクの制御則が単純化されるという特長が生まれる。前報⁽⁸⁾で著者らは、水平多関節形パラレルリンクアームを対象に、D.C.C.法が適用可能なアーム形状とその剛性の非干渉化条件、剛性比の制御性について検討し、こうしたD.C.C.法の特長を確認した。一方、その中でアームの形状、姿勢が剛性の制御性に大きく関わることをも示し、特に関節の剛性の調整範囲を正值に限ると、アーム先端に指定できる剛性値に制限が生じることも指摘した。この制限値はD.C.C.法の一つの不都合な点であるが、もし関節の剛性調整範囲を負値まで拡大できればそれは取り除くことができる。

そこで本報では、関節の剛性値を負値とすることの可能性とアームの挙動の安定性について検討し、剛性調整範囲が狭いという前報で指摘したD.C.C.法の欠点を克服する問題を検討する。ここでは、こうした検討の第1ステップとして、関節に純粋なばね効果を備えたパラレルアームを想定し、それに慣性効果を見做る程度に低速な外乱を加えたときの平衡点での安定性をポテンシャルエネルギーを用いて解析する。次に実機を用いてそれを実証し、結論としてパラレル形ア

* 平成元年4月5日 第66期通常講演会演会において講演。
原稿受付 昭和63年3月10日。

*¹ 正員、機械技術研究所(〒305 つくば市並木1-2)。

ームでは、アーム先端での剛性がある条件を満たせば、剛性値が負値をとる関節が存在しても動作は安定にできることを示す。

2. 関節の剛性値とアーム先端の剛性の調整範囲

二つの二関節シリアルリンクアーム, Arm 1, Arm 2 を, 図1に示すように先端Pで結合して構成した五角形リンクアームモデルを対象とする。ここで、関節番号を図1に示すように定義し、関節1~3に剛性可変なアクチュエータを配置する。関節4と先端Pは回り対偶(ピンジョイント)で回転自由に結合されているものとする。また、先端Pを原点とする直交座標系を作業座標系として設定する。以下では、図中のArm i ($i=1, 2$) の諸量には添字 i を、関節 j ($j=1\sim 4$) の諸量には添字 j をつけて示す**1。

前報で報告したように、図1のパラレルリンクアームの関節の剛性行列 $K_{\theta i}$ とアーム先端の剛性行列 K の関係式は式(1)のようになる。

$$K = J_1^{-1} K_{\theta 1} J_1^{-1} + J_2^{-1} K_{\theta 2} J_2^{-1} \dots \dots \dots (1)$$

上式において J_i^{-1} はヤコビ行列 J_i の転置行列の逆行列、また $K_{\theta i}$ は関節の剛性 k_j を用いて以下の式(2)、(3)で、 K は作業座標軸 x, y 方向の剛性成分 k_x, k_y と干渉成分 k_{xy} を要素とする式(4)の対称行列で定義される。

$$K_{\theta 1} = \text{diag}[k_1, k_2] \dots \dots \dots (2)$$

$$K_{\theta 2} = \text{diag}[k_3, 0] \dots \dots \dots (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} \\ k_{xy} & k_y \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、ヤコビ行列の逆行列 J_i^{-1} の各成分を記号 λ_{mn} ($m=1\sim 4, n=1, 2$) を用いて式(5)、(6)のように定義する。

$$J_1^{-1} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

$$J_2^{-1} = \begin{bmatrix} \lambda_{31} & \lambda_{32} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

この λ_{mn} を用いると、式(1)は次のように書くことができる。

$$k_x = \sum_{m=1}^3 \lambda_{m1}^2 k_m \dots \dots \dots (7)$$

$$k_{xy} = \sum_{m=1}^3 \lambda_{m1} \lambda_{m2} k_m \dots \dots \dots (8)$$

$$k_y = \sum_{m=1}^3 \lambda_{m2}^2 k_m \dots \dots \dots (9)$$

k_x, k_{xy}, k_y は、上式から明らかなように関節の剛性

k_j ($j=1\sim 3$) とアーム先端Pの位置に依存するパラメータ λ_{mn} との関数になる。また式(7)~(9)の連立方程式を解くことによって、先端の剛性行列 K から関節の剛性行列 $K_{\theta i}$ の要素 k_j を求めることができる。すなわち、図1のパラレルアームでは、関節の剛性を調節することでアーム先端の剛性を任意の値とする可能性を持つことがわかる。

ところでロボットアームに作業を実行させる時は、作業座標系のそれぞれの方向に対し剛性を独立に制御すること、すなわち選択剛性特性が求められる⁽¹⁰⁾。そこで、一般には $k_{xy}=0$ とする必要がある。一方、 k_x, k_y は作業内容に応じて指定されることになるが⁽⁹⁾、 $k_{xy}=0$ を満たしつつ k_x, k_y を指定される値にするように各関節の剛性要素 k_j を定める時、この k_j に $k_j \geq 0$ という制約条件を付けると解が求められない場合が生ずる。これを計算機シミュレーションで検討した結果を図2(a)、(b)に示す。

図2(a)は、図1のモデルにおいて、各関節の剛性要素に $k_j \geq 0$ なる条件を付けた時に、アーム先端Pの位置を種々変化させて剛性行列 K の各要素を $k_x=100 \text{ N/m}$, $k_y=10 \text{ N/m}$, $k_{xy}=0 \text{ N/m}$ に設定できる領域を示したものである。ここで、アームの隣接する関節間の距離はすべて 0.2 m とした。図中の外枠はアーム先端Pの動作範囲を示している。また黒い部分以外はすべて関節の剛性要素 k_j の少なくとも一つを負としなければ k_x, k_y, k_{xy} を上述の指定された剛性値にすることができない領域である。図2(a)では、設定さ

図1 パラレルリンクアームモデル

図2 関節剛性値の制限による先端の剛性制御可能領域 ($k_x=100 \text{ N/m}$, $k_y=10 \text{ N/m}$, $k_{xy}=0 \text{ N/m}$)

**1 表記の便宜上、アーム番号および関節番号は前報と異なっている。

れた剛性値の実現可能な面積は可動範囲内のわずかな領域を占めているにすぎない。すなわちこのアームでは、多くの姿勢において設定し得る選択剛性に制限が生じており、作業性も大幅に低下することが予測される。ここでもし、各関節の剛性要素 $k_j \geq 0$ の条件を取り除き負の関節の剛性値を許容できるとすると、先端 P の前記剛性値を満たす領域は図 2 (b) となる。すなわち、負の関節の剛性値を許容することによって、当然のことながら指定される先端の剛性値を満たす関節の剛性値が、可動範囲の全領域において存在することになる。D. C. C. では、このように各関節の剛性値を負の領域にまで拡張すれば、先端での剛性の制御能力を大幅に改善することができる。

3. 負の関節の剛性を許容する パラレルアーム系の安定性

本章ではパラレルアームの関節が負の剛性を持つ時の安定性を検討する。本論文では検討の第 1 段階として、関節部に純粋な剛性要素のみを仮定し、アームは慣性効果を無視し得る程度に低速で動作するものと仮定する。この時、アームの安定性は平衡点回りのポテンシャルエネルギーの挙動から評価できる。まず剛性 k_j を有する一つの関節を考える。平衡位置から関節が角度 $\delta\theta_j$ 変位した時の関節のポテンシャルエネルギー U_j は、次式で表される。

$$U_j = \frac{1}{2} k_j \delta\theta_j^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(10)より、関節の剛性 k_j を負の値にした場合、その関節のポテンシャルエネルギー U_j は平衡位置において極大値をもつから、わずかな外乱に対しても関節を平衡位置に保つことはできない。すなわち、こうした単独に存在する負の剛性を持つ関節は不安定である。

一方、パラレルリンクアームでは、剛性を有する各関節が運動学的に相互に干渉する。そのため、負の剛性の関節を含む場合でも、その関節の変形が他の関節の変形を誘起し、互いに反力を及ぼしあうことで運動が抑制され、結果的に系全体を安定にすることが予想される。そこで、次にアーム先端 P の平衡点近傍の微小変位に対し、パラレルリンクアーム系に蓄積されるポテンシャルエネルギー U に着目する。

先端 P を平衡点から微小量 $\delta\mathbf{x} = [x, y]^T$ だけ変位させたときの各関節角変位 $\delta\theta_j$ は、まず式(5)、(6)の λ_{mn} を用いて次のように表すことができる。

$$\delta\theta_j = \lambda_{j1}x + \lambda_{j2}y \quad \dots\dots\dots (11)$$

各関節には線形な剛性 k_j を与えるとすれば、系のポテンシャルエネルギー U は式(12)で表される。

$$U = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 k_j \delta\theta_j^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 k_j (\lambda_{j1}x + \lambda_{j2}y)^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

先端が安定であるためには、ポテンシャルエネルギー U が平衡点近傍で極小になっていることが必要である。式(12)を原点まわりでテラ展開すると、式(13)を得る。

$$U = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 k_j \delta\theta_{j0}^2 + \delta\mathbf{x}^T \nabla U|_{(0,0)} + \frac{1}{2} \delta\mathbf{x}^T H|_{(0,0)} \delta\mathbf{x} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $\delta\theta_{j0}$ は各関節の初期角度偏差 (通常 $\delta\theta_{j0} = 0$)、 ∇U は式(14)で定義される偏微分ベクトル、 H は式(15)で定義される Hessian 行列である。

$$\nabla U = \left[\frac{\partial U}{\partial x} \quad \frac{\partial U}{\partial y} \right]^T \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (15)$$

平衡点でポテンシャルエネルギー U が極小となるためには、式(13)より次の二つの条件を同時に満足しなければならない。

(I) $\nabla U|_{(0,0)} = 0$ (平衡条件)

(II) $H|_{(0,0)}$ が正定値行列となる。

条件(I)は次式のように成立する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{(0,0)} &= \sum_{j=1}^3 k_j (\lambda_{j1}^2 x + \lambda_{j1} \lambda_{j2} y) \Big|_{(0,0)} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_{(0,0)} &= \sum_{j=1}^3 k_j (\lambda_{j1} \lambda_{j2} x + \lambda_{j2}^2 y) \Big|_{(0,0)} = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (16)$$

次に、条件(II)を検討する。 $H|_{(0,0)}$ の主小行列式を、 $\det H_1, \det H_2$ とすると、これらは式(17)、(18)のようになる。

$$\det H_1 = \sum_{j=1}^3 k_j \lambda_{j1}^2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\det H_2 = \sum_{j=1}^3 k_j \lambda_{j1}^2 \sum_{j=1}^3 k_j \lambda_{j2}^2 - \left(\sum_{j=1}^3 k_j \lambda_{j1} \lambda_{j2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

条件(II)を満たすためには、 $\det H_1 > 0$ かつ $\det H_2 > 0$ でなければならない。ここで、式(7)~(9)で示した先端の剛性と関節の関係を用いて式(17)、(18)を作業座標空間での先端 P の剛性値で表すと、式(19)、(20)が得られる。

$$\det H_1 = k_x \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\det H_2 = k_x k_y - k_{xy}^2 \quad \dots\dots\dots (20)$$

一般の作業では、 $k_{xy} = 0$ かつ $k_x > 0, k_y > 0$ と設定されることが考えられ、式(19)、(20)において $\det H_1 > 0$ かつ $\det H_2 > 0$ となる。したがって、この時、条件(II)は満たされる。しかし特殊な作業で、もし $k_{xy} \neq 0$ が要求さ

れる場合は、 $k_x k_y > k_{xy}^2$ となるように先端 P での剛性行列 K を設定すれば安定は保持される。以上より、系の安定性は関節の剛性値の正負によらず、先端 P での剛性値を条件 ($k_x > 0$ かつ $k_x k_y > k_{xy}^2$) を満たすように指定すれば保証されることがわかる。

一方、シリアルリンクアームでは、関節間の動作は運動学的には互いに拘束されていないから、動作を安定に行わせるためには、各関節のポテンシャルエネルギーはそれぞれ正でなければならない。すなわち、一つでも負の剛性値を持つ関節があると、式(10)に対し述べた理由で、その関節は不安定になり、結果的に系は不安定になる。

これまでの議論から、パラレルリンクアームは関節剛性の調節可能範囲が広く、アーム先端における剛性の選択の自由度が高いという点でシリアルリンクアームよりすぐれており、ダイレクトコンプライアンス制御を行うための、有効なアーム構造ということが推測される。しかし、以上の解析には動的効果が考慮されていないので、以下において実機を用いてより現実的な条件下でも上記の議論が成立することを検証する。

4. 水平多関節形パラレルリンクアームの構成

図3に外観を示す水平多関節形パラレルリンクアームを製作した。その構造概略を図4に示す。これは、ベースに固定された二つのアクチュエータを備えた並列駆動形平行リンク機構で構成されるアーム1と、ベース部分の関節にだけアクチュエータを備え、もう一方の関節はピンジョイントでフリーに結合された2節シリアルリンク式アームを、それぞれの先端 P でピンジョイントによって結合して、水平多関節形パラレルリンクアームとしたものである。アーム1には平行リンク機構を採用し、二つのアクチュエータをともにベースに取付けることによって、アクチュエータの質量が他のアクチュエータの負荷になる難点を回避した。またこの構造では、双方のアクチュエータとも動作反力はベースに吸収され、直接他の関節への干渉力として作用することもないため、モータの負荷が軽減でき、その結果アーム全体の軽量化も図ることができた。

使用したアクチュエータは、ハーモニックギア付 DC モータである。DC モータには3関節分ともタコジェネレータ付の定格出力 17 W モータを用いた。リンク1とリンク3を駆動するモータには、減速比 1:100 のハーモニックギアが取付けられ、定格トルク 5.3 N・m を得ている。一方、リンク2を駆動するモータには、減速比 1:50 のハーモニックギアが取付けられ、

定格トルク 2.6 N・m を得ている。またギアの出力軸角度を、ポテンシオメータにより検知した。

一般に、ギア付モータはギアに摩擦を有するため、ギア出力軸でのトルクを制御するには、トルクセンサの設置が不可欠である。今回使用したハーモニックギアも、最大出力トルクの 25 % 程度の摩擦トルクを含むことが確認された。そこで、リアクション形のトルクセンサを使用してトルクサーボを構成し、摩擦を補償した。

以上の関節駆動ハードウェアを使用して、剛性可変な関節を構成するための制御システムを図5に示す。このシステムは、アナログ制御回路で組まれたトルクサーボを行う内部ループと、位置制御をするための計算機を含む外部サーボループから構成されている。各サーボループはアームのダイナミクスを介して相互に干渉する。外部ループにおいては、まずポテンシオメータにより検出された駆動関節の回転角度 θ_i 、およびタコジェネレータにより検出されたモータの回転角速度 $\dot{\theta}_i$ が、12 bit の A/D コンバータを通して制御用コンピュータ (浮動少数点演算プロセッサ 8087 付 PC 9801Vm2, クロック周波数 10 MHz) に取り込まれる。計算機では、目標関節角度 θ_{0i} と検出関節角度 θ_i の差、および検出関節角速度 $\dot{\theta}_i$ から、次式の制御則により関節 j のトルクサーボ系への目標制御トルク

図3 パラレルリンクアーム

図4 パラレルリンクアーム構造概略図

τ_{j0} を計算し、関節のトルクサーボ系を駆動する。

$$\tau_{j0} = \alpha_j (\theta_{j0} - \theta_j) - k_{vj} \dot{\theta}_j \quad \dots\dots\dots (21)$$

ただし、 α_j は位置ゲイン、 k_{vj} は速度ゲインである。この制御則では α_j を変えることで、サーボ系の剛性が変わるから、この特性を利用して関節の剛性を調整することができる。すなわち、作業に応じて設定された先端 P の剛性 k_x, k_{xy}, k_y から式(7)~(9)を解くことによって各関節の剛性 $k_j (j=1\sim3)$ を求め、その k_j に応じて、式(21)の α_j を変化させる。指定された剛性をもって、アーム先端 P をある軌道上にそって動かす時には、まず先端 P の目標軌道から逆運動学方程式を解いて目標関節角度 θ_{j0} を求め、それと逐次計算される関節の剛性 k_j 、およびトルクセンサ、位置検出器からの信号を用いて、式(21)に基づき内部ループへのトルク目標値 τ_{j0} を計算する。ただし、今回は計算速度の関係からテーブル参照方式により、 θ_{j0}, k_j を決定している。また、以上のようにサーボゲイン α_j を変化させると、位置制御系のダンピングも変化する。そこで、低速動作における関節サーボ系の特性を2次系であるとみなせば、系の減衰比は、速度フィードバックゲイン k_{vj} と位置ゲイン α_j の逆数の平方根との積に比例することから、速度フィードバックゲイン k_{vj} を関節の剛性 k_j すなわち α_j の平方根に対し次式により変化させ、常に減衰比を一定に保つようにした。

$$k_{vj} = \beta |k_j|^{1/2} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここで、比例係数 β は実験によって決定した。式(21)によって計算されたトルク指令値 τ_{j0} は、12 bit の D/A コンバータを通して内側のアナログトルク制御ループに送られる。剛性の調節と軌道制御双方を含む作業でのサーボループの計算速度は、三つの駆動軸を合わせて1サイクル約3msである。

内部ループでは、トルク指令値 τ_{j0} とトルクセンサからのフィードバック信号 τ_j との差によってトルク偏差 $\delta\tau_j$ が生成され、それが積分要素を含んだ補償回路を通ったのち、アンプへの入力信号となり、それに応じてモータが駆動される。

5. 実 験

コンプライアンス制御は、アームが仮想位置目標値と現在位置との差に応じて、力・トルクを発生することに特長がある。こうした特長は、特にアーム先端が作業中において、拘束・無拘束の両状態におかれるような作業の遂行に有効である。コンプライアンス制御に類似した制御法に、作業座標軸の各軸方向に位置と力の制御モードを選択できる位置と力のハイブリッド制御がある⁽⁶⁾。この制御法では、力制御モードをとる軸方向では、拘束をうけていないと、位置が一定に保持されない。したがって、例えば空間内のある軌道に沿って移動している時に、遭遇する障害物に柔らかく接触しながらそれを回避するような動作を行わせようとする場合、センサによって障害物を検知し、それによって位置制御モードから力制御モードへ切り換えるようにしないと無拘束中での軌道制御が維持できない。コンプライアンス制御ではこうした場合、仮想軌道の設定と、剛性の指令だけで対応できる。以下、このようなコンプライアンス制御の特長が生かせる動作を2種類取り上げ、評価実験を行った。

5・1 実験 I

5・1・1 方法 本実験は、ある関節に負の剛性を与えた時の、D.C.C.による先端 P の剛性の制御性と、先端 P への外乱に対するアーム挙動の安定性を調べるものである。図6に示すように、アームの平衡点姿勢(仮想目標位置)を $\theta_{10}=1.68$ rad, $\theta_{20}=3.67$ rad, $\theta_{30}=1.03$ rad と設定し、先端 P を原点にもつ作業座標系の y 軸に直交する拘束面を設けて y 軸方向のみ運動を拘束する。それと同時に、先端 P での剛性を $k_x=200$ N/m, $k_y=2000$ N/m, $k_{xy}=0$ N/m に設定する。この時、それに対応する各関節の剛性は $k_1=11.43$ N・m/rad, $k_2=66.52$ N・m/rad, $k_3=-5.28$ N・m/rad となり、関節3の剛性は負の値となる。剛性をこれらの値に制御しつつ、 y 軸方向にアーム先端を圧迫するように拘束面をゆっくり移動させることにより、 y 軸方向への外乱を生成し、それに対するアーム挙動の安定性と選択剛性特性を確認する。

図5 ダイレクトコンプライアンス制御システム

5.1.2 結果 図7にアーム先端Pの初期姿勢からの x 軸, y 軸方向の変位 $\delta x, \delta y$ および、先端の発生力の y 軸方向成分 f_y の時間履歴を示す。実験Iでは、 x 軸方向には運動を拘束していないので、先端の発生力の x 軸方向成分 f_x はほぼ零となるから、 x 軸方向の諸量としては変位 δx だけを表示した。また、先端Pでの諸量はすべて関節のセンサ出力から評価している。すなわち、先端Pの位置 $\mathbf{x}=[x, y]^T$, 変位 $\delta \mathbf{x}=[\delta x, \delta y]^T$, 発生力 $\mathbf{f}=[f_x, f_y]^T$ は、目標関節角度 $\theta_{10}=[\theta_{10}, \theta_{20}]^T$, 検出関節角度 $\theta_1=[\theta_1, \theta_2]^T$, 関節トルク $\tau_1=[\tau_1, \tau_2]^T$, $\tau_2=[\tau_3, 0]^T$ を用いて、次式で評価した。

$$\mathbf{f} = \mathbf{J}_1^{-T} \tau_1 + \mathbf{J}_2^{-T} \tau_2 \quad (23)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\theta_1) \quad (24)$$

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{f}(\theta_{10}) - \mathbf{f}(\theta_1) \quad (25)$$

ここで、 $\mathbf{f}(\theta)$ は関節角ベクトルを作業座標空間でのアーム先端位置にベクトルに対応づける関節関数である。

図7から関節3の剛性が負であるにもかかわらず、変位、力の挙動が安定していることが確認される。また剛性の干渉成分を $k_{xy}=0$ とし、かつ y 方向のみに外乱を与えているから、 x 方向変位 δx は零に保たれるはずである。実験結果にはわずかに δx の変位が観測されるが、全体の傾向は理論とほぼ一致している。 δx が微小に変位する原因は、 y 軸方向への拘束壁の移動を手動で行ったため、 $k_{xy}=0$ を設定した際の y 軸に沿って必ずしも正確に壁が移動されなかったことによると推測される。一方、 y 方向の発生力 f_y も計測時のノイズの影響による高周波変動は見られるが、その振幅の中心は y 方向の変位 δy に比例して $f_y = -2000 \delta y$ で示される挙動を示すことから、指定された剛性条件を満たしつつアームが動作していることが確認される。

5.2 実験II

5.2.1 方法 途中に障害物が存在するような軌道に沿って、D.C.C.を実行しつつ、アームの先端を移動させる問題を考える。図8に示すようにアーム先端Pに角速度約0.12 rad/sで作業座標系の原点Oを中心とする半径20 mmの円を描かせる。ただし、制御システムには速度目標値を与えるのではなく、円軌道を628分割して、その各点を仮想目標位置として3 msのタイミングで出力し、ほぼ一定速度の円軌道追従動作を得るものとする。この時、図8に示すように円軌道上に作業座標系の y 軸方向に直交するように固い障害物を置き、その作業座標の y 方向の運動を拘束すると、アーム先端がある剛性を持つ時、拘束をう

けない半円上ではアーム先端は円軌道上を動き、拘束される軌道上では、障害物表面に垂直に $f_y = -k_y \delta y$ なる力を作用させつつその表面をならって動くことが予測される。ここでは、 $k_x=1000$ N/m, $k_y=1000$ N/m, $k_{xy}=0$ N/mとして、動作時におけるアーム先端の移動軌跡、発生力、指令した関節の剛性の変化を記録し、この予測された動作が得られることを確認する。なお、発生力、軌道は実験I同様、式(23), (24)を用いて評価している。

5.2.2 実験結果 動作中のアーム先端の移動軌跡、発生力変化、関節の剛性変化を図9に示す。先端の発生力変化、関節の剛性変化は時間履歴を示している。図中の記号P₀, P₁, P₂, P₃はアーム先端の移動軌跡上の位置に対応している。まずこの結果からも、関節剛性が一部の期間で、負の値をとるにもかかわらず、動作が安定に制御されることが確認される。またアーム先端の挙動も前述の予測に合ったものであることは明らかである。すなわち無拘束軌道上では先端の経路は図9に破線で示した仮想目標位置の軌跡である円弧に明白に追従している。拘束面に接触すると、先端の経路は x 軸に平行な直線を描き始め、それとともに y 方向の接触力 f_y は、図7の場合と同様に計測時のノイズの影響による高周波変動は見られるが、その振幅の中心は先端の位置偏差 δy に応じて $f_y = -1000 \delta y$ で変動することが認められる。この時 x 方向の発生力 f_x はアーム先端と拘束面との間の摩擦力により完全

図6 実験I方法概念図

図7 実験I結果

図8 実験II方法概念図

図9 実験II結果

に零にはならないが、一応低い値を保っている。これらの事実は $k_{xy}=0$ とする制御が適切に行われていることを示している。仮想目標位置が拘束面内部から出ると、再び先端は円軌道に追従することが認められる。なおこの実験では慣性効果低減のため、低い指令速度で実験を行っている。したがってアーム先端の速度が十分遅いため拘束面に接触する際の衝撃力はほとんど検出されていない。

6. 結 言

本論文の結言は以下のようにまとめられる。

(1) 水平多関節パラレルリンクアームにダイレクトコンプライアンス制御を応用した場合の安定性を、ポテンシャルエネルギーの面から検討した。その結果、

一般の作業に要求されるように作業座標系の剛性が、 $k_x > 0, k_y > 0, k_{xy} = 0$ と設定される場合には、そうするために関節の剛性 k_j が負の値となっても系は安定である。また、特殊な作業において $k_{xy} \neq 0$ が要求される場合には、安定性を保つためには $k_x > 0$ かつ $k_x k_y > k_{xy}^2$ となるように作業座標系の剛性行列 K を設定すべきである。つまり系の安定性は、関節の剛性の正負によらず先端での剛性の値によって支配されることを明らかにした。またこの性質は、パラレルリンクアーム固有のものであり、剛性非干渉領域や、選択剛性比を拡大することに利用できることを指摘した。

(2) 剛性可変要素を関節に備えたダイレクトコンプライアンス制御可能な水平多関節パラレルリンクアームを設計製作し、その基本動作を確認した。

(3) 製作したパラレルリンクアームを用いて、安定性に関する理論的検討を検証する実験を行い、その妥当性を確認した。ダイレクトコンプライアンス制御が、作業座標系の剛性行列の各成分を独立に制御できること、およびアームの無拘束運動と拘束運動を含む作業に有効に適用できることを実験例により示した。

現段階ではダイレクトコンプライアンス制御による剛性という静的要素の制御のみに注目し検討を進めているが、今後は高速動作への対応や粘性や慣性の取扱いも含むインピーダンス制御へと拡張していくことが望まれる。

最後に、本研究を行うにあたり多大なご支援をいただいた、機械技術研究所・阿部検次長ならびに、実験装置の製作にご協力いただいた(株)ハーモニックドライブシステムズの関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) Whitney, D. E., *IEEE J. Robotics Research*, 6 (1987), 3.
- (2) Paul, R. P. and Shimano, B., *Proc. Joint Automatic Control Conf.*, (1976), 265.
- (3) Salisbury, J. K., *Proc. 19th IEEE Conf. Decision Control*, (1980), 284.
- (4) Hogan, N., *Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, Control*, 107 (1985), 1.
- (5) 辻・ほか2名, 第1回生体・生理工学シンポジウム予講果, 1A-2-6 (1986), 61.
- (6) Raibert, M. H., Craig, J. J., *Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, Control*, 102 (1981), 126.
- (7) 金子・ほか3名, 機論, 54-503, C (1988), 1510.
- (8) 横井・ほか3名, 機論, 54-505, C (1988), 2131.
- (9) 内山, 機論, 45-391, C (1979), 32.
- (10) Mason, M. T., *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, SMC-11-6 (1981), 418.
- (11) 末広・高瀬, 日本ロボット学会誌, 3-2 (1984), 11.
- (12) 平林・ほか3名, SICE 論文集, 22-3 (1986), 96.