Attitude Control of Planar End-Effector and Estimation of Contact Point Using Parallel Mechanism

Ryogo Kubo Student Member (Keio University, kubo@sum.sd.keio.ac.jp)

Kouhei Ohnishi Senior Member (Keio University, ohnishi@sd.keio.ac.jp)

Keywords: parallel mechanism, attitude control, compliance control, haptics, environment recognition, reaction torque observer

Recently, many robots have been utilized in unknown environment, for example, slave robots of teleoperation systems, walking robots and so on. They are called environment-adaptive robots. In most teleoperation systems, slave manipulators are placed in unknown environment. In the case of walking robots, the paddle foot is a planar end-effector and road surface is unknown environment. They recognize shape of road surface and need to walk on rough terrain. Therefore, it is very important for the environment-adaptive robots to contact stably and to recognize unknown environment.

In this paper, a compliance controller of attitude of a planar end-effector is proposed to achieve stable contact with unknown environment. The robot utilized in this research has parallel mechanism as a whole as shown in Fig. 1, since the planar end-effector is supported by three arms. Virtual compliance models are inserted at the end of each arm for compliant motion of the end-effector. On the other hand, position control is also achieved for COG (center of gravity) of the end-effector.

Moreover, an estimation method of the contact point without sensors is presented. We assume that only face-to-point contact exists between the end-effector and unknown environment. Reaction torque observer is utilized to estimate reaction force from unknown

environment. And excessive stress is not exerted on the robots and the environment by means of the proposed controller in the estimation.

We carried out some experiments by changing force feedback gain K_f . Fig. 2 shows comparison of accuracy in the estimation. d is the distance between the environment and the estimation value. Estimation is achieved with a high degree of accuracy if d is small. α means z -direction displacement of COG of the end-effector after the end-effector contacts the environment. If α increased or K_f approaches zero, accuracy was improved as shown in Fig. 2. In this case, reaction force from the environment gets larger and ratio of force exerted on each arm can be detected more accurately. In the case of $K_f = 1.0$ and $d = 3.0$ mm, correct values were estimated in spite of not exerting excessive stress on the environment.

In this paper, face-to-point contact was realized by means of a planar end-effector instead of a spherical end-effector. We proposed compliance controller for attitude of a planar end-effector and an estimation method of the contact point. The validity of the proposed method was shown by the numerical and experimental results. Our new approach of contact motion can be widely applied to the robots using parallel mechanism.

(a) overview

(b) end-effector

Fig. 1. Parallel-link manipulator

Fig. 2. Comparison of estimation accuracy

パラレルメカニズムを用いた 平面状エンドエフェクタの姿勢制御と接触位置の推定

学生員 久保 亮吾* 上級会員 大西 公平*

Attitude Control of Planar End-Effector and Estimation of Contact Point Using Parallel Mechanism

Ryogo Kubo*, Student Member, Kouhei Ohnishi*, Senior Member

Recently, many robots have been utilized in unknown environment, for example, slave robots of teleoperation systems, walking robots and so on. They are called environment-adaptive robots. It is very important for the environment-adaptive robots to contact stably and to recognize unknown environment. In this paper, a compliance controller of attitude of a planar end-effector is proposed to achieve stable contact with unknown environment. The robot utilized in this research has parallel mechanism as a whole, since the planar end-effector is supported by three arms. With the assumption that only face-to-point contact exists between the end-effector and unknown environment, an estimation method of the contact point without sensors is also proposed. Moreover, excessive stress is not exerted on the robots and the environment by means of the controller we propose, when the contact point is estimated. Our new approach of contact motion can be widely applied to the robots using parallel mechanism. The validity of the proposed method is shown by the numerical and experimental results.

キーワード：パラレルメカニズム，姿勢制御，コンプライアンス制御，ハプティクス，環境認識，反力推定オブザーバ

Keywords: parallel mechanism, attitude control, compliance control, haptics, environment recognition, reaction torque observer

1. 序 論

近年，ロボットが人間の生活空間へと進出するにつれてロボットが直接人間と接する機会が増えてきた。工場内とは異なりこのような環境下では，ロボットはあらかじめ決められた動作をするだけでなく，未知の環境に対して柔軟に軌道を修正し適応しなければならない。したがって，ロボットは人間や環境と安定な接触動作をすることが必要であると考えられ，ロボットの接触安定性については多くの研究がなされてきた。Vukobratovićら⁽¹⁾は接触動作における制御手法を受動的コンプライアンス制御と能動的コンプライアンス制御に大別し，さらに数種類に分類した上で安定解析を行った。榊ら⁽²⁾は振動要素，目標インピーダンスの設定値やモデル化誤差が接触安定性に影響を与えることを示した。また，インピーダンス制御を6自由度の産業用マニピュレータに実装し，実験を行った例もある⁽³⁾⁽⁴⁾。

多くの研究事例⁽⁵⁾では，ロボットが環境と直接接する部分であるエンドエフェクタは点接触を前提とした球状エ

ンドエフェクタ等であった。例えば，加藤ら⁽⁶⁾は，医師による乳ガンの触診を自動化する目的で乳ガン自動触診ロボットを製作し，臨床試験を行った。しかし，複数の触子を用いて触診したとしても接触させる回数が膨大となり，通常，医師が触診に要する時間よりも多くの時間を要してしまうことが問題とされた。このような事例においては，使用するエンドエフェクタを平面にすれば，一度に広い領域をスキャンできるようになり，触診時間の短縮が期待できると考えられる。また，パラレルメカニズム⁽⁷⁾を用いて各関節のモータを根元に集中配置することで，アームを軽量化でき，安全性が向上する。パラレルメカニズムは，可動部が並列に駆動される閉リンク機構のことであり，一般的に以下のような特徴をもつ。

- 複数のリンクで支持されるため，剛性が高い
- 複数のアクチュエータで支持されるため，アクチュエータにかかる負荷を分散させることができる
- 可動域が広くない

本研究で用いるパラレルリンクマニピュレータは空間6自由度に対して関節9自由度という冗長な構造をしているため，パラレルメカニズム特有の特異姿勢が存在せず，可動域が比較的広い。

そこで本研究では，平面状エンドエフェクタをパラレル

* 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
Department of System Design Engineering, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

メカニズムによって構成し、面-点接触を仮定して環境と接触させ、その接触位置を推定することを目的とする。平面状エンドエフェクタを用いることで、面-面接触、面-線接触、面-点接触の3種類の接触状態を実現できるが、本論文ではその第一段階として面-点接触のみを扱うものとする。最終的には、面-面接触、面-線接触、面-点接触の3つの状態を判別し、接触している環境の形状を把握できるようになることを目標としている。

また、推定の際に反力推定オブザーバ⁽⁸⁾を用いることで、センサレスでエンドエフェクタと環境との接触位置を推定できる。さらに、ロボットや環境に大きな負荷を与えずに接触位置を推定するために、エンドエフェクタの中心位置に対しては位置制御、姿勢に対してはコンプライアンス制御を行う手法を提案する。

以下に本論文の構成を示す。まず、次章で制御対象である平行リンクマニピュレータのモデル化を行う。次に、第3章で接触位置の推定法を、第4章で環境と安定な接触を行うための姿勢制御手法を提案する。第5章、第6章ではシミュレーションと実験により、提案する手法の有効性を確認する。最後に第7章で結論を述べる。

2. 平行リンクマニピュレータのモデル化

本研究では、平面状のエンドエフェクタを実現するため、図1(a)に示すような3台の3リンクアームを有する平行リンクマニピュレータを使用する。3台のアームは同構造であり、便宜上、各アームをそれぞれアームA、B、Cとする。また、平面状のエンドエフェクタは図1(b)のように各アームの先端にボールジョイント⁽⁹⁾を介して接続されている。本章では、平行リンクマニピュレータを図2、図3、図4のようにモデル化する。

〈2・1〉 3リンクアームの運動学 図2において、 L_1 、 L_2 、 L_3 はそれぞれリンク1、リンク2、リンク3の長さ、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 はそれぞれ関節1、関節2、関節3の回転角度である。アームの先端位置ベクトルを $\mathbf{x}_{arm} = [x, y, z]^T$ 、アームの関節角ベクトルを $\boldsymbol{\theta}_{arm} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ とすると、アームの順運動学は以下のように記述される。

$$\mathbf{x}_{arm} = \begin{bmatrix} (L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3) \cos \theta_1 \\ (L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3) \sin \theta_1 \\ L_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \cdots \cdots (1)$$

(1)式の両辺を時間微分することにより、(2)式が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}}_{arm} = \mathbf{J}_{arm} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{arm} \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $\mathbf{J}_{arm}$ は3リンクアームの関節角速度ベクトルと先端速度ベクトルを関係づけるヤコビ行列である。

〈2・2〉 平行リンクマニピュレータの運動学 3台の3リンクアームはベースリンクに図3で示すように取り付けられている。ここで、 r_{base} はベースリンクの半径である。アーム座標系($\Sigma_A, \Sigma_B, \Sigma_C$)からベース座標系(Σ_W)への回転行列、並進ベクトルをそれぞれ ${}^W\mathbf{R}_{arm}$ 、 ${}^W\mathbf{p}_{arm}$ とする

図1 平行リンクマニピュレータ

Fig. 1. Parallel-link manipulator

図2 3リンクアームのモデル化

Fig. 2. Modeling of 3-link arms

図3 アーム座標系とベース座標系の関係

Fig. 3. Relationship between arm coordinate system and base coordinate system

図4 エンドエフェクタ座標系

Fig. 4. Definition of end-effector coordinate system

と、ベース座標系におけるアームの先端位置ベクトル ${}^W\mathbf{x}_{arm}$ は(3)式のように表される。右下添え字の arm はアームA、B、Cに対応している。

$${}^W\mathbf{x}_{arm} = {}^W\mathbf{R}_{arm}\mathbf{x}_{arm} + {}^W\mathbf{p}_{arm} \dots\dots\dots (3)$$

ベース座標系におけるアームの先端速度ベクトルを $\dot{\mathbf{X}} = [{}^W\dot{\mathbf{x}}_A^T, {}^W\dot{\mathbf{x}}_B^T, {}^W\dot{\mathbf{x}}_C^T]^T$, アームの関節角速度ベクトルを $\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_A^T, \dot{\theta}_B^T, \dot{\theta}_C^T]^T$ とすると (4) 式が得られる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}_r \dot{\boldsymbol{\theta}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで, $\mathbf{J}_r$ はアームの関節角速度ベクトルとアームの先端速度ベクトルを関係づけるヤコビ行列である。

図 4 より, エンドエフェクタの中心位置 ${}^W\mathbf{p}_E$, エンドエフェクタ座標系 (Σ_E) の x , y , z 軸正方向の単位ベクトル $\mathbf{N}$ (単位法線ベクトル), $\mathbf{S}$ (単位スライディングベクトル), $\mathbf{A}$ (単位アプローチベクトル) は (5)–(9) 式のように求められる。 r_{end} はエンドエフェクタの半径である。

$${}^W\mathbf{p}_E = \frac{{}^W\mathbf{x}_A + {}^W\mathbf{x}_B + {}^W\mathbf{x}_C}{3} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mathbf{S} = \frac{{}^W\mathbf{x}_B - {}^W\mathbf{p}_E}{r_{end}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\mathbf{A}_t = \left(\frac{{}^W\mathbf{x}_A - {}^W\mathbf{p}_E}{r_{end}} \right) \times \mathbf{S} \dots\dots\dots (7)$$

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{A}_t}{|\mathbf{A}_t|} \dots\dots\dots (8)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{S} \times \mathbf{A} \dots\dots\dots (9)$$

ベース座標系におけるエンドエフェクタ中心の速度ベクトルを $\dot{\mathbf{P}} = [{}^W\dot{\mathbf{p}}_E^T, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ とすると, (10) 式が成り立つ。ただし, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ はそれぞれエンドエフェクタ座標系の x 軸, y 軸, z 軸まわりの回転角速度とする。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}_v \dot{\mathbf{P}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで, $\mathbf{J}_v$ はエンドエフェクタ中心の速度ベクトルとアームの先端速度ベクトルを関係づけるヤコビ行列である。

したがって, パラレルリンクマニピュレータの順運動学は (11) 式, 逆運動学は (12) 式で表せる。

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{J}_v^+ \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}_v^+ \mathbf{J}_r \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{P}} \dots\dots\dots (12)$$

ここで, $\mathbf{J}$ はアームの関節角速度ベクトルとエンドエフェクタ中心の速度ベクトルを関係づけるヤコビ行列であり, $\mathbf{J}_v^+, \mathbf{J}^+$ はそれぞれ $\mathbf{J}_v, \mathbf{J}$ の擬逆行列を表す。

〈2・3〉 動力学 まず, パラレルリンクマニピュレータの閉ループ構造をエンドエフェクタを 3 等分することにより仮想的に切断し, 開ループ木構造モデルを考える⁽¹⁰⁾。次に, この開ループ木構造モデルの動力学方程式を Newton-Euler 法を用いて求める。これに拘束条件 $\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{0}$ を加えると, パラレルリンクマニピュレータの動力学方程式は (13) 式のように表せる。

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_m^T \mathbf{f}_e^{ext} + \mathbf{J}_c^T \boldsymbol{\lambda} \dots\dots\dots (13)$$

ただし, $\mathbf{M}$ は慣性行列, $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ は重力・速度依存項, $\boldsymbol{\tau}$ は関節トルク, $\mathbf{J}_m$ は開ループ木構造モデルにおいて関節角速

図 5 接触位置の推定

Fig. 5. Estimation of contact point

度ベクトルとエンドエフェクタ中心の速度ベクトルを関係づけるヤコビ行列, $\mathbf{f}_e^{ext}$ はエンドエフェクタ中心に加わる外力, $\boldsymbol{\lambda}$ は拘束力, $\mathbf{J}_c = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\theta}}$ である。

3. 接触位置推定法

本章では, 3 リンクアーム A, B, C の先端の位置情報と反力推定オブザーバからセンサレスで獲得する力情報を用いて, エンドエフェクタと環境との接触位置を推定する方法を提案する。

〈3・1〉 x, y 座標の推定 図 5 において, 点 E がエンドエフェクタの中心であり, 点 A, 点 B, 点 C はそれぞれアーム A, アーム B, アーム C の先端位置, 点 K は環境との接触位置を表す。接触位置から各アーム先端までのベクトルを $\mathbf{l}_A, \mathbf{l}_B, \mathbf{l}_C$ とし, 各アーム先端に加わる力を $\mathbf{f}_A, \mathbf{f}_B, \mathbf{f}_C$, 接触位置に加わる力を $\mathbf{f}_K$ とする。エンドエフェクタが静止している場合, エンドエフェクタの力のつり合いは (14) 式, モーメントのつり合いは (15) 式で表される。

$$\mathbf{f}_A + \mathbf{f}_B + \mathbf{f}_C = \mathbf{f}_K \dots\dots\dots (14)$$

$$\mathbf{l}_A \times \mathbf{f}_A + \mathbf{l}_B \times \mathbf{f}_B + \mathbf{l}_C \times \mathbf{f}_C = \mathbf{0} \dots\dots\dots (15)$$

ベース座標系における点 K の位置を ${}^W\mathbf{x}_K$ とすると, (15) 式は (16) 式と書き換えられる。

$${}^W\mathbf{x}_K \times \mathbf{f}_K = {}^W\mathbf{x}_A \times \mathbf{f}_A + {}^W\mathbf{x}_B \times \mathbf{f}_B + {}^W\mathbf{x}_C \times \mathbf{f}_C \dots\dots\dots (16)$$

第 1 章で述べたように, 本研究では環境とエンドエフェクタの接触状態として点接触のみを仮定する。また, 計算を簡略化するため, エンドエフェクタに加わる外力は z 方向のみと仮定する。したがって, 次章で説明する反力推定オブザーバより得られる力情報は z 方向のみを採用し, x, y 方向は全て 0 N とする。以上の仮定から, (16) 式の右辺を $\mathbf{M} = [M_x, M_y, M_z]^T$ とすると, (16) 式は以下のように簡略化できる。

$$f_{Kz} x_{Ky} = M_x \dots\dots\dots (17)$$

$$f_{Kz} x_{Kx} = -M_y \dots\dots\dots (18)$$

ただし, f_{Kz} は $\mathbf{f}_K$ の z 成分, x_{Kx}, x_{Ky} はそれぞれ ${}^W\mathbf{x}_K$ の x, y 成分である。

n 回の実験データを (19)–(21) 式として最小自乗法を用いると, (14), (17), (18) 式から接触位置は, (22), (23) 式のように求まる。

$$f_{Kz} = [f_{Kz1}, f_{Kz2}, \dots, f_{Kzn}]^T \dots\dots\dots (19)$$

$$M_x = [M_{x1}, M_{x2}, \dots, M_{xn}]^T \dots\dots\dots (20)$$

$$M_y = [M_{y1}, M_{y2}, \dots, M_{yn}]^T \dots\dots\dots (21)$$

$$x_{Ky} = (f_{Kz}^T f_{Kz})^{-1} f_{Kz}^T M_x \dots\dots\dots (22)$$

$$x_{Kx} = -(f_{Kz}^T f_{Kz})^{-1} f_{Kz}^T M_y \dots\dots\dots (23)$$

〈3・2〉 z 座標の推定 接触位置の z 座標 x_{Kz} はエンドエフェクタの平面方程式から以下のように求められる。

$$x_{Kz} = \frac{1}{c}(1 - ax_{Kx} - bx_{Ky}) \dots\dots\dots (24)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_A x_A^T \\ w_B x_B^T \\ w_C x_C^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (25)$$

4. 制御系の構成

本章では, 接触位置の推定を行うにあたり構築した制御系について説明する。

〈4・1〉 姿勢のコンプライアンス制御 コンプライアンス制御は, 任意のインピーダンスモデルを設定することにより, ロボットに所望のインピーダンス特性を実現させる制御方法である⁽¹¹⁾。また, 外界から力を受けた場合にはその外力に倣うように軌道補正を行う制御系であるため, ロボットは高剛性の環境と接触しても挙動が振動的になることなく接触状態を維持できる。本研究では, エンドエフェクタの中心位置に対しては位置制御, 姿勢に対してはコンプライアンス制御を行う。図 6 に提案した制御器を示す。

位置制御に基づくコンプライアンス制御では, 外力 $f^{ext} = [f_A^T, f_B^T, f_C^T]^T$ を位置, 速度, 加速度に変換する必要がある。本研究では, アーム A, B, C の先端にそれぞれ (26) 式のようにコンプライアンスモデルを設定することにより姿勢のコンプライアンス制御を実現する。

$$M_c \ddot{x}_c^{cmd} + D_c \dot{x}_c^{cmd} + K_c x_c^{cmd} = K_f f^{ext} \dots\dots\dots (26)$$

ここで, M_c , D_c , K_c はそれぞれ仮想インピーダンス特性の慣性項, 粘性係数, ばね定数であり, K_f は力フィードバックゲインである。

コンプライアンス制御器の出力は以下のように表される。ただし, 中間変数 $x_c = [x_{cA}^T, x_{cB}^T, x_{cC}^T]^T$ は (27) 式のように表される。

$$x_c = x^{res} + x_c^{cmd} \dots\dots\dots (27)$$

$$p_c = \frac{x_{cA} + x_{cB} + x_{cC}}{3} \dots\dots\dots (28)$$

$$S_c^d = \frac{x_{cB} - p_c}{r_{end}} \dots\dots\dots (29)$$

図 6 提案する制御器

Fig. 6. Proposed controller

$$A_{tc} = \left(\frac{x_{cA} - p_c}{r_{end}} \right) \times S_c^d \dots\dots\dots (30)$$

$$A_c^d = \frac{A_{tc}}{|A_{tc}|} \dots\dots\dots (31)$$

$$N_c^d = S_c^d \times A_c^d \dots\dots\dots (32)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_c \\ \omega_c^{cmd} \end{bmatrix} = J_v^+ (\dot{x}^{res} + \dot{x}_c^{cmd}) \dots\dots\dots (33)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{p}_c \\ \dot{\omega}_c^{cmd} \end{bmatrix} = J_v^+ \ddot{x}_c^{cmd} \dots\dots\dots (34)$$

また, 姿勢の誤差ベクトル E_o は (35) 式のようにして求められる。ただし, N^d , S^d , A^d は姿勢の指令値である。

$$E_o = \frac{1}{2}(N_c^d \times N^d + S_c^d \times S^d + A_c^d \times A^d) \dots\dots\dots (35)$$

以上より, PD 制御器を通した後の位置と姿勢を含む参照値ベクトル $\ddot{p}^{ref}$ は (36) 式となる。

$$\ddot{p}^{ref} = \begin{bmatrix} \ddot{p}_c^{ref} \\ E_o \\ \dot{\omega}_c^{ref} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (36)$$

〈4・2〉 反力推定オブザーバ コンプライアンス制御にはロボットに加わる外力の情報が必要となる。力センサは温度などの外部環境の影響を受けやすく, 未知環境での作業を行うロボットには適していない。そこで, 図 7 に示す反力推定オブザーバ (RTOB: Reaction Torque Observer) を用いてセンサレスで力情報を獲得する。反力推定オブザーバは外乱オブザーバ (JDOB: Joint space Disturbance Observer)⁽¹²⁾ の推定外乱トルクから重力項, 摩擦項等を引きことによって外力トルクを推定するものである。図 7 において J_m , K_t はそれぞれモータ軸慣性, トルク定数, 右下添え字の n はノミナル値を表し, G_r はギア比, G_{rto} はローパスフィルタのカットオフ周波数を表す。

反力推定オブザーバの特徴としてはモータの摩擦の影響を受けやすいことが挙げられる。パラレルリンクマニピュ

図 7 反力推定オブザーバ

Fig. 7. Reaction torque observer

図 8 全体の制御系

Fig. 8. Total control system

レータは駆動関節にツインドライブシステム⁽¹³⁾を採用することで、関節に動力を伝達する際に発生する非線形の静摩擦およびクーロン摩擦の影響を抑えている。したがって、非線形摩擦の影響を受けずに、高精度に反力を推定することが可能となる。

〈4・3〉 全体の制御系 接触位置推定のために用いる全体の制御系を図 8 に示す。作業空間での制御においてロバストな加速度制御系を実現するため、作業空間オブザーバ(WDOB: Work space Disturbance Observer)⁽¹⁴⁾を用いる。

5. シミュレーション

〈5・1〉 シミュレーション内容 シミュレーションはエンドエフェクタ上の 1 点 \$(x, y, z) = (0.015, 0.015, 0.4)\$ に 5 N の力を \$z\$ 方向へステップ入力することにより行った。このとき、エンドエフェクタの中心に関しては常に \$(0.0, 0.0, 0.4)\$ に位置制御を行い、姿勢の指令値はベース座標系の \$xy\$ 平面と平行となるように設定した。ただし本論文では、座標表示はベース座標系を基準とし、単位は [m] とする。シミュレーションで使ったパラメータを表 1 に示す。

〈5・2〉 シミュレーション結果 シミュレーション結果を図 9 に示す。図 9(a), (b) はそれぞれ各アーム先端の

表 1 使用したパラメータ

Table 1. Parameters

Position feedback gain	K_P	900
Velocity feedback gain	K_V	60
Cut-off frequency of JDOB	G_j	80 [rad/s]
Cut-off frequency of WDOB	G_{wd}	80 [rad/s]
Cut-off frequency of RTOB	G_{rto}	30 [rad/s]
Virtual mass	M_c	1 [kg]
Virtual damping	D_c	40 [Ns/m]
Virtual stiffness	K_c	400 [N/m]

(a) Force response

(b) Position response

(c) Attitude response

図 9 姿勢コンプライアンス制御のシミュレーション結果 (\$K_f = 0.5\$)

Fig. 9. Simulation results in the case of attitude compliance control (\$K_f = 0.5\$)

力応答、位置応答であり、図 9(c) はエンドエフェクタの姿勢変化を表している。提案した制御器を用いることにより、エンドエフェクタに外力が加わった場合、外力の大きさに応じて各アーム先端の位置が変化していることがわかる。一方、姿勢にコンプライアンスを入れても、エンドエフェクタの中心に対しては位置制御を行っているため、図 9(b)

に示すように、エンドエフェクタの中心は (0.0, 0.0, 0.4) から変化していない。

6. 実験

〈6・1〉 実験内容 エンドエフェクタを初期位置 (0.0, 0.0, 0.4) から z 方向へと移動させ、環境と接触させた。また、姿勢の指令値はベース座標系の xy 平面と平行となるように設定し、パラメータはシミュレーションと同じ表 1 に示す値を使用した。なお、エンドエフェクタと環境はエンドエフェクタ上のある 1 点で接触するものと仮定する。接触位置の推定は 3 秒間のデータから 0.1 秒間隔で 30 個選り、行った。

〈6・2〉 実験結果 環境の座標が (0.019, 0.015, 0.4017), エンドエフェクタの中心の位置指令値が (0.0, 0.0, 0.4037) の場合の実験結果を図 10 に示す。図 10(a), (b) はそれぞれ各アーム先端の力応答, 位置応答であり, 図 10(c) はエンドエフェクタの姿勢変化を表している。接触した瞬間に各アームに大きな力が加わり, 位置も変化していることがわかる。図 10(a), (b) より, 定常状態では外力の大きさに応じて各アーム先端の位置が変化していることがわかる。しかし, 図 10(b) に示すように, エンドエフェクタの中心には位置制御を行っているため, (0.0, 0.0, 0.4037) から変化していない。

図 11 にエンドエフェクタの姿勢に対して位置制御 ($K_f = 0.0$) を行った場合とコンプライアンス制御 ($K_f = 1.0$) を行った場合のエンドエフェクタ中心の位置応答を示す。図 11(a) より, エンドエフェクタの姿勢に対して位置制御を行った場合には環境との接触時に位置応答が振動的になり, いわゆるチャタリングが生じていることがわかる。一方, 図 11(b) より, エンドエフェクタの姿勢にコンプライアンス制御を行った場合にはチャタリングが少なく, 安定な接触をしていることがわかる。したがって, 提案したコンプライアンス制御器を用いた方が実験機や環境に対して負荷が少ないと考えられる。

次に, 推定された接触位置と実際の環境との距離 d を求め, 侵入量 α による推定精度の比較を行った。結果を図 12 に示す。ここで, 侵入量 α とは, エンドエフェクタが環境と接触した後のエンドエフェクタの中心の z 方向移動量を意味するものとする。つまり, 環境の z 座標は 0.4017 であるので, 侵入量 α はエンドエフェクタの中心の z 座標から 0.4017 を引いた値となる。また, 環境からの反力と侵入量 α との関係を図 13 に示す。

図 12 より, K_f の大きさに関わらず, 侵入量 α を大きくすると推定精度は上がることがわかる。これは, 図 13 で示すように侵入量 α が大きくなると環境からの反力が大きくなり, 各アームに加わる力の比がノイズに埋もれず, より正確に検出できるためである。同じ侵入量 α で比べると, コンプライアンス制御 ($K_f > 0.0$) の場合よりも環境から大きな反力が得られる位置制御 ($K_f = 0.0$) の場合の方が推定精度は良い。一方, 図 12 より, コンプライアンス制御

図 10 姿勢コンプライアンス制御の実験結果 ($K_f = 0.5$)

Fig. 10. Experimental results in the case of attitude compliance control ($K_f = 0.5$)

図 11 位置制御とコンプライアンス制御の比較 ($\alpha = 2$ mm)

Fig. 11. Comparison of position control with compliance control ($\alpha = 2$ mm)

図 12 推定精度の比較

Fig. 12. Comparison of estimation accuracy

図 13 反力の大きさの比較

Fig. 13. Comparison of reaction force

($K_f = 1.0$) を行った場合、侵入量が 3 mm 程度あれば、位置制御を行った場合と比べて小さな反力で精度良く推定できていることがわかる。以上から、提案した制御手法を用いることにより、環境に与える力が小さくても接触位置が推定できることが示された。

7. 結 論

本論文では、平面状エンドエフェクタを用いることにより従来の球状エンドエフェクタでは実現できなかった面-点接触を可能とした。エンドエフェクタと環境との接触状態が面-点接触である場合について、エンコーダより得られた位置情報と反力推定オブザーバによりセンサレスで計算された力情報から、エンドエフェクタと環境との接触位置を推定する方法を提案した。また、環境と安定な接触をし、環境に大きな負荷を与えず接触位置を推定するためにエンドエフェクタの中心には位置制御、姿勢にはコンプライアンス制御を行う制御器を提案した。

シミュレーションと実験により提案した接触位置推定法及び制御手法の有効性を確認した。エンドエフェクタ上の一点に外力を加えるシミュレーションおよび実験では、エンドエフェクタの中心には位置制御、姿勢にはコンプライ

アンス制御が行えていることを確認した。エンドエフェクタの姿勢にコンプライアンス制御を行った場合には、位置制御を行った場合に比べてチャタリングの少ない安定な接触が実現できた。また、接触位置推定の実験では、提案した制御器を用いることにより、環境に与える力が小さくても接触位置が高精度に推定できることがわかった。

本論文で提案した接触位置推定法は、ロボットハンドの手の平や歩行ロボットの足平（足の裏の平面部）が環境や地面と接触する場合に、ロボットが環境や地面を認識する手段となりうる。提案した姿勢制御手法は、パラレルメカニズムによって支持される平面状エンドエフェクタの姿勢に対して所望のコンプライアンス特性を持たせることができるため、人間に過剰な力を与えずに触診を行わなければならない医療用ロボットなどへの適用が期待できる。

ロボットが面-面接触、面-線接触、面-点接触の 3 つの状態を判別し、平面状エンドエフェクタを通して接触している環境の形状を把握できるようになることが今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号 17206027 基盤研究（A）「リニアモータ駆動による低侵襲性医療用多自由度触覚鉗子の開発研究」）によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表す。

（平成 17 年 8 月 22 日受付，平成 18 年 2 月 20 日再受付）

文 献

- (1) M. Vukobratović and A. Tuneski: "Contact Control Concepts in Manipulation Robotics — An Overview", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.41, No.1, pp.12–24 (1994)
- (2) T. Sakaki and S. Tachi: "Contact Stability Analysis on Some Impedance Control Methods", *Journal of the RSJ*, Vol.12, No.3, pp.489–496 (1994-3) (in Japanese)
榊 泰輔・館 暁:「インピーダンス制御の接触安定性についての一考察」, 日本ロボット学会誌, **12**, 3, pp.489–496 (1994-3)
- (3) G. Ferretti, G.A. Magnani, and P. Rocco: "Impedance Control for Elastic Joints Industrial Manipulators", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.20, No.3, pp.488–498 (2004)
- (4) H. Ishikawa, C. Sawada, K. Kawase, and M. Takata: "Stable Compliance Control and Its Implicitshapeentation for a 6 D.O.F Manipulator", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.98–103 (1989)
- (5) S. Katsura and K. Ohnishi: "Transmission and Reproduction of Force Sensation by Bilateral Control", *T. IEE Japan Trans. IA*, Vol.123-D, No.11, pp.1371–1376 (2003-11) (in Japanese)
桂誠一郎・大西公平:「バイラテラル制御による力覚の伝達と再現」, 電学論 D, **123**, 11, pp.1371–1376 (2003-11)
- (6) I. Kato, K. Koganezawa, and A. Takanishi: "Automatic Palpation Systishape for Breast Cancer: WAPRO-4", *Journal of the RSJ*, Vol.5, No.2, pp.18–24 (1987-4) (in Japanese)
加藤一郎・小金沢鋼一・高西洋夫:「乳ガン自動触診ロボット・WAPRO-4」, 日本ロボット学会誌, **5**, 2, pp.18–24 (1987-4)
- (7) M. Morisawa, T. Murakami, and K. Ohnishi: "Motion Control of Parallel Mechanism in Workspace", *Journal of the JSPE*, Vol.70, No.2, pp.203–208 (2004-2) (in Japanese)
森澤光晴・村上俊之・大西公平:「パラレルメカニズムの作業空間におけるモーションコントロール」, 精密工学誌, **70**, 2, pp.203–208 (2004-2)
- (8) T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi: "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.40, No.2, pp.259–265 (1993)
- (9) THK 株式会社:「直動システム 総合カタログ 製品諸元」, No.401-2004,

- pp.T1-T20 (2004)
- (10) Y.K. Yiu, H. Cheng, Z.H. Xiong, G.F. Liu, and Z.X. Li: "On the Dynamics of Parallel Manipulators", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3766-3771 (2001)
 - (11) N. Nishikawa, Y. Fujimoto, T. Murakami, and K. Ohnishi: "Variable Compliance Control for 3 Dimensional Biped Robot Considering Environmental Fluctuations", *T. IEE Japan Trans. IA*, Vol.119-D, No.12, pp.1507-1514 (1999-12) (in Japanese)
西川直樹・藤本康孝・村上俊之・大西公平:「環境変動を考慮した3次元2足歩行ロボットの可変コンプライアンス制御」, 電学論 D, **119**, 12, pp.1507-1514 (1999-12)
 - (12) K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami: "Motion Control for Advanced Mechatronics", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.1, No.1, pp.56-67 (1996)
 - (13) N. Hayashida, T. Yakoh, T. Murakami, and K. Ohnishi: "A Sensorless Force Control in Twin Drive Systitshape", *Proc. of the IEEE Int. Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON-2000)*, pp.2231-2236 (2000)
 - (14) T. Murakami and K. Ohnishi: "A Study of Stability and Workspace Decoupling Control Based on Robust Control in Multi-Degrees-of-Freedom Robot", *IEEJ Trans. IA*, Vol.113-D, No.5, pp.639-646 (1993-5) (in Japanese)
村上俊之・大西公平:「ロバスト制御に基づいた多自由度ロボットの安定性および作業空間での非干渉制御に関する一考察」, 電学論 D, **113**, 5, pp.639-646 (1993-5)

久保亮吾 (学生員) 1983年1月13日生。2005年3月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。同年4月同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程入学。現在、主として環境適応型ロボットのモーションコントロールに関する研究に従事。

大西公平 (上級会員) 1952年7月25日生。1980年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月慶應義塾大学理工学部電気工学科助手。現在、理工学部システムデザイン工学科教授。工学博士。