

# ダブル・アクチュエータ関節によるロボットアームの平衡点制御

## Equilibrium Point Control of a Robot Arm with a Double Actuator Joint

非 向坊 由佳 (慶大)      朴 伸錫 (慶大)  
正 前野 隆司 (慶大)

Yuka MUKAIBO, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama  
Shinsuk PARK, Keio University  
Takashi MAENO, Keio University

This paper presents the Double Actuator Joint Mechanism, for robots to generate human arm-like motion. The mechanism is based on the idea of the equilibrium point control hypothesis that multi-joint limb movements are achieved by shifting the limbs equilibrium positions defined by neuromuscular activity. Force exerted on the arm depends on the difference between the actual and equilibrium positions, and the stiffness and viscosity about the equilibrium position. In the developed system, two actuators are placed on each joint of a two-linked manipulator, one to control position, and the other to control joint stiffness. By so creating human arm-like behavior, this mechanism allows robot limbs to execute stable motion in an unknown environment, owing to its ability to tolerate shock upon contact using a very simple control scheme. The underlying theory and implementation issues of the proposed mechanism are discussed, and experimental results show the potential of our approach.

*Key Words:* robotics; motion control; equilibrium point control hypothesis;

### 1. 背景と目的

産業界において、ロボットは既に広く普及している。高速かつ高精度が求められるタスクにおいては人を超えるパフォーマンスを実現するロボットも少なくない。しかし、不整地における作業や、人の生活空間の中で行なう作業のように、周囲と接触しインタラクトすることが要求されるタスクにおいては、実用化にいたったロボットは少ない。これは、現在利用されている多くのロボットが位置制御されているのに対し、接触時における多様な操作を行なうには、正確な位置制御を行なうと同時にコンプライアンスを制御することが求められるからである。その実現のために、受動的な弾性要素を用いた柔軟関節の開発や、インピーダンスを能動的に調節する制御手法の提案がされてきた。しかし、人のように正確な力制御を行なうにはいずれも不十分である。

これに対し、ヒトの運動生成法に着目し、ヒトの運動制御のしくみをロボットの制御に適用するれば、より正確な力制御を行なうことができると考えられる。複数存在するヒトの運動生成に関する仮説[1]のうち、本研究では、制御則の単純さや、ロボットへの展開のしやすさを考慮に入れ、平衡点制御手法[2]に着目する。また、本研究では新たなダブル・アクチュエータ関節メカニズムを提案することにより、ヒトのように位置と剛性を共に制御することのできる汎用性の高い力制御を行なう。

### 2. 平衡点制御手法

平衡点制御仮説は、筋のばねに似た弾性特性に着目した

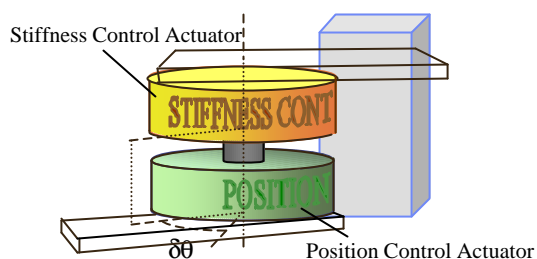


Fig. 1 Double Actuator Joint

仮説である。ばねは変位を与えると、自然長に戻ろうと復元力を発生する。この仮説では、腕を目標位置まで移動させる際に、中枢の指令（随意）によってばねにおける自然長に相当する平衡点（目標位置）が与えられる結果、腕の位置と平衡点の差に対応した力を筋が発生すると考えられている。中枢の指令により平衡点を徐々にずらすことで、平衡点の軌道（仮想軌道）が筋に指令として与えられ、運動生成が行なわれる。

ばねにない筋の特徴として、筋組織は主導筋と能動筋の拮抗配置により、剛性を変化させられる点があげられる。このため、ヒトの腕では関節や手先においてコンプライアンス制御を実現することができる。よって単純な制御則でありながら、不確かな環境下でも意図しない過大な力を環境に加えることなく作業を行なうことができるのである。

### 3. ダブル・アクチュエータ関節の提案

平衡点制御を導入するにあたり、ヒトの腕とロボットアームの構造上の違いを考えなければならない。ロボットは関節に配置されたアクチュエータによって駆動される場合がほとんどであるのに対し、ヒトの腕は拮抗型に配置された無数の筋繊維によって制御されており、この駆動力の冗長性によって位置と剛性を同時に制御することが

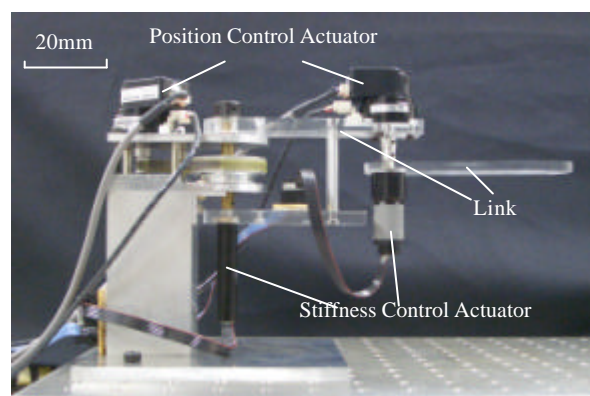


Fig. 2 Manufactured Robot Arm

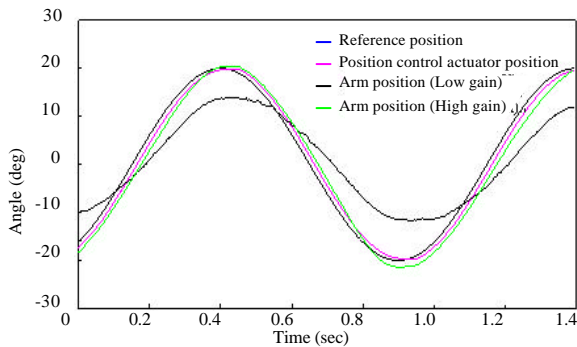


Fig. 3 Position control experiment

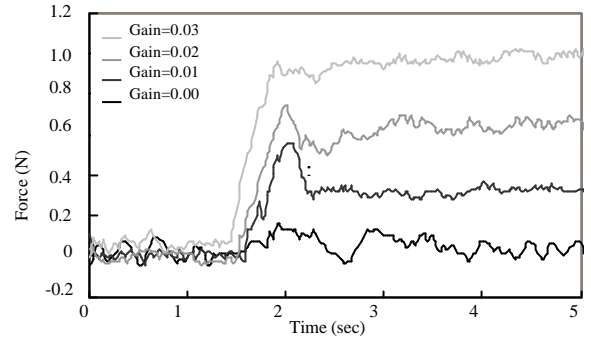


Fig. 4 Collision experiment

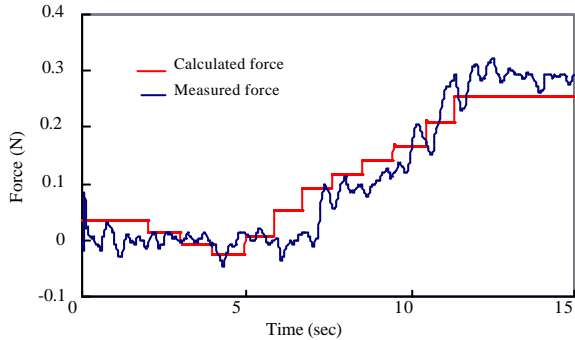


Fig. 5 Position-based force control

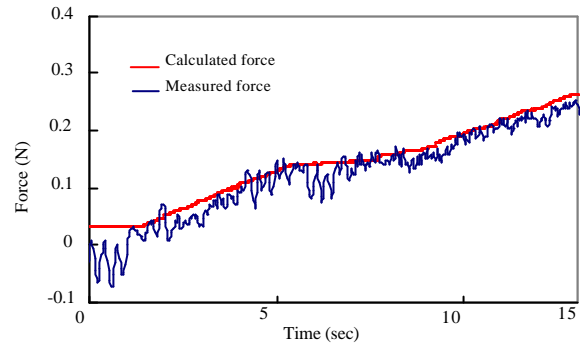


Fig. 6 Stiffness-based force control

きる。このため、本研究では、平衡点制御を実現するメカニズムとして、1関節に2つのアクチュエータを配置したダブル・アクチュエータ関節を提案する。Fig. 1に概略図を示す。関節には、忠実に目標位置に到達するように制御される位置制御用アクチュエータと、回転軸に変位が与えられた時に復元力を発生するように制御される剛性制御用アクチュエータが配置されている。このような制御方法により、自由空間内で位置制御用アクチュエータの目標値どおりにアームを動かすことができる。このとき、剛性制御用アクチュエータのゲイン（剛性）を高く設定することにより、慣性の影響を小さく抑えることができる。一方、拘束のある空間においては、位置制御アクチュエータの回転角と剛性制御用アクチュエータの回転角に偏差が生じ、対象物との接点において力を発生する。

ダブル・アクチュエータ関節の利点を以下に示す。まず、位置情報という操作量を用いながら、力を制御することができるため、力センサを用いずに先端に発生する力を求められる。よって正確な力制御を行なうことができる。次に、単純な制御則を用いているため、容易に制御を行なうことができる。さらに、手先に限らず腕全体においてコンプライアンスを実現することができるため、未知の環境においても安全にタスクを行なうことができる。

#### 4. 装置の製作及び評価実験

提案したメカニズムの有効性を確認するため、Fig.2に示す2リンク型ロボットアームを製作した。位置制御用アクチュエータには超音波モータ、剛性制御用アクチュエータにはDCモータを用いた。超音波モータには指令値として目標位置を与え、ゲインを一定に設定したP制御を行なった。一方、DCモータの比例ゲインを変化させることにより剛性指令を与えた。回転軸に変位が生じた時に復元力が生じるように制御系を構築し、コンプライアンス制御

を実現する。

このロボットアームを用い、まず自由空間内における目標軌道に追従させる位置制御実験を行なった。アーム位置の目標値と実測値の履歴をFig. 3に示す。ゲインが低いときは遅れが大きく、位置の誤差が大きいのに対し、ゲインを高めると、高い応答性が得られた。また、ゲインが高いほど誤差は減少している。よって、本システムにより正確な位置制御を行なえることが示された。

次に、衝突実験を行なった。目標軌道の途中に配置した力センサにアームが衝突した際発生した力を測定した。力測定値の履歴をFig. 4に示す。ゲインを下げるに従い衝突時の衝撃は小さくなり、コンプライアンスの大きい位置制御を行なうことができたといえる。

さらに、力センサと接触した状態で力制御実験を行なった。剛性を変化させることによる力制御と、位置指令を与えることによる力制御を行い、計算値と実測値の比較を行なった。力の計算値と実測値の履歴をFig. 5, 6に示す。計算値と実測値はいずれの場合もほぼ一致していることから、力センサを用いずに正確な力制御が行なえたと考えられる。

#### 5. 結論

コンプライアンスを能動的に制御できる新たな関節メカニズムとその制御法の提案を行なった。制御実験により、単純な制御則を用いながらも、高精度な位置制御と力制御を行なうことができるという本メカニズムの有効性を確認した。

#### 参考文献

- [1] 川人光男, 脳の計算理論, 産業図書, (1996)
- [2] Flash, T., The Control of Hand Equilibrium Trajectories in Multi-Joint Arm Movements, Biol. Cybern., Vol. 57 (1987), p. 257-274