

# 歩行ロボットの従反力運動を実現する膝関節機構

岡田 昌史 (東京大学), 後藤 達哉 (東芝), 中村 仁彦 (東京大学, CREST)

## Design of Knee Joint Mechanism that Follows External Force for Biped Walking Robots

\*Masafumi OKADA (Univ. of Tokyo), Tatsuya GOTOH (TOSHIBA Co. Ltd.)  
and Yoshihiko NAKAMURA (Univ. of Tokyo, CREST)

**Abstract**— For walking robots, it is necessary to realize free motion and to yield high torque transmission on the knee joint. In this paper, we propose the backlash clutch mechanism for knee joint of biped walk robots. This mechanism realizes both free motion and lock motion using joint backlash. The control algorithm of this mechanism is given based on 2-DOF control method.

**Key Words:** clutch mechanism, walking robot, humanoid robot, 2-DOF control

### 1. はじめに

ヒューマノイドロボットの運動では関節を駆動するアクチュエータに位置や速度のハイゲインフィードバック系が構成され、事前、あるいは実時間で生成された目標軌道に追従するような制御がなされることが多い。しかし、環境の変化や外乱の影響を小さくし、エネルギー効率の良い歩行動作を実現するためには、ハイゲインなフィードバックではなく外力に従う運動を行い、外乱の吸収や重力を利用した運動を実現する必要がある。

一方、人間の関節の筋駆動系においては以下の4つの状態が実現されることが知られている<sup>1)</sup>。

1. 無拘束状態 (Free)
2. 負荷と反対方向への運動 (Decreasing)
3. 負荷と同方向への運動 (Increasing)
4. 拘束状態 (Lock)

上記、2.~4. はモータでの実現は容易であるが、1. を実現するためには特殊な制御・機構を要する。トルクフィードバックにより外力をキャンセルさせ無拘束状態を実現する方法が数多く提案されているが、モータの時定数やフィードバック系の応答周波数の関係から完全な無拘束状態を実現することは難しい。このため、機械的な無拘束状態を実現する必要がある。この実現のために、クラッチ機構の導入によって実現される方法が考えられるが、一般的なクラッチは摩擦によって駆動力を伝達するため大きなトルクを伝達することは難しい。特に、ヒューマノイドロボットの膝関節はやや膝を曲げた直立状態では非常に大きなトルクを必要とする。またその一方では歩行の際に遊脚時は無拘束状態とすることで、重力に従った効率の良い運動を実現することが可能となる。これより、大きな駆動力伝達と1.の両方を実現する必要がある。

本研究では、上記駆動を実現する膝関節機構の開発を行う。この機構は膝関節にバックラッシュを持たせ、そのギャップ幅を制御することでクラッチ機構を実現す

るものである。ここでは、これをバックラッシュクラッチと名付けこの機構の設計と制御法に関して述べる。

### 2. 歩行時における膝の無拘束状態

#### 2-1 歩行時

Fig.1 に示されるように、床を蹴り上げた後足は遊

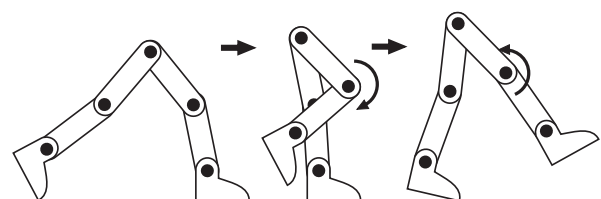


Fig.1 Free motion for walking

脚となり前になる。このとき、下腿部の動きを重力に従った無拘束の運動とすることにより、膝関節は余分なトルクを発生することなく歩行運動が実現される。一般の歩行では膝関節角、角速度あるいは関節トルクは設計者が与えた軌道を描くが、この運動は下腿部の慣性モーメントと重力によって決まる運動であるため、無拘束状態を実現することで自然に発生する動きである。この運動は参考文献<sup>2, 3)</sup>に代表されるパッシブウォークにおいて見られる運動である。パッシブウォークでは関節に駆動力を持たないため重力に従った自然な運動が実現される。

#### 2-2 着地時

Fig.2 の鎖線で表されるように、脚の着地は厳密には一点の接触によって起こる。そのため、ここには大きな衝撃力が加わる。このとき、膝が無拘束状態を実現することで脚は衝撃力に従い Fig.2 の実線のように足裏と床が面で接触するように関節角が決定される。これにより、床からの衝撃力を緩和する効果が考えられる。

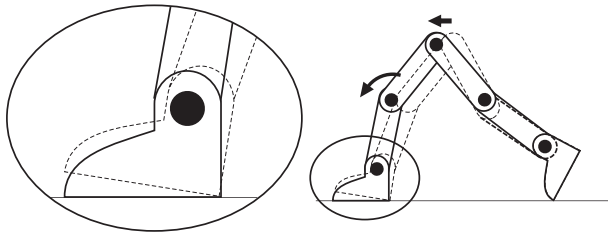


Fig.2 Landing of walking motion

### 3. バックラッシュクラッチの設計

無拘束状態と高トルク伝達の両方を実現する機構として、バックラッシュクラッチを開発した。バックラッシュクラッチの機構を Fig.3 に示す。この機構はリンク

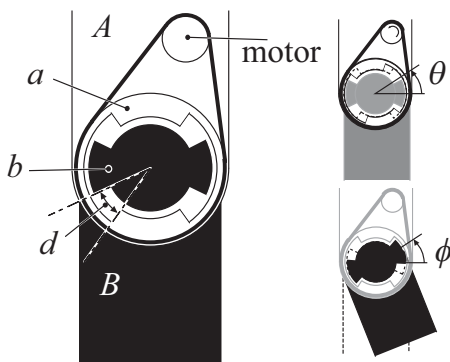


Fig.3 Backlash clutch

A(大腿部), リンク B(下腿部) と回転機構  $a, b$  から構成されている。 $a$  は A に固定されアクチュエータ (モータ) によって A に対して回転する。 $b$  と B は固定されており、回転駆動力を伝える  $a$  と  $b$  の間にはギャップ  $d$  が存在する。右図  $\theta$  は A に対する  $a$  の回転を表し、 $\phi$  は膝関節の回転角を示す。ギャップ幅  $d$  を一定に保つような制御を行うことで無拘束状態を実現し、

$$d = \theta - \phi = 0 \quad (1)$$

とすることで、大きな駆動力を伝える。

この機構はバックラッシュを持つため一つの回転方向への駆動力を伝達する能力に優れているが、サーボ問題には不向きである。しかし、膝関節では重力の影響により接地時には大きなトルクが働くため、一つの方向に駆動力を発生することで十分な制御が行える。

Fig.4 に設計したバックラッシュクラッチ機構を示す。図の  $a, b$  はそれぞれ Fig.3 の  $a, b$  に対応しており、右図は二つを組み合わせたものである。また、 $a$  と  $b$  のギャップ部には硬いゴムをいれ、衝撃吸収の役割を果たす。

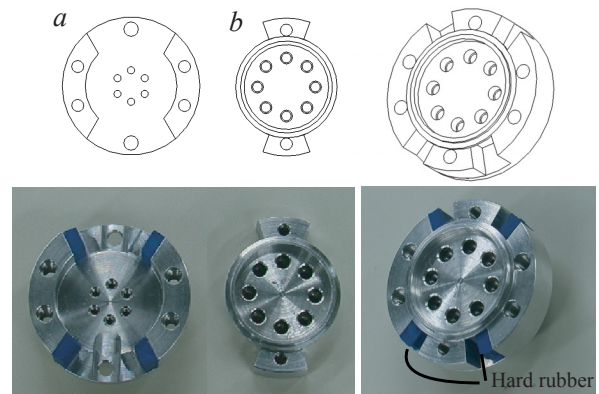


Fig.4 Design of backlash clutch

## 4. ヒューマノイドロボットの脚機構への適用

### 4.1 膝関節機構

バックラッシュクラッチを Fig.5 のように構成することで、膝関節機構を構成した。モータの駆動はタイミ

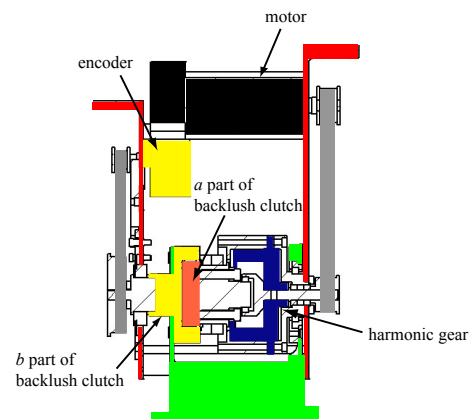


Fig.5 Design of knee joint

ングベルトによって減速器 (ハーモニックギア) に伝達され、減速器の出力軸にはバックラッシュクラッチの  $a$  部が取り付けられている。この駆動力を  $b$  部に伝えることで、膝のトルクを発生する。下腿部の回転  $\phi$  をエンコーダによって検出し、モータに取り付けられたエンコーダの回転角値との差によってギャップ幅  $d$  を計測する。

### 4.2 脚機構

バックラッシュ機構を搭載したヒューマノイドの脚機構を Fig.6 に示す。この機構は膝に 1 自由度、足首に 2 自由度を有する。足首関節の下には 6 軸力センサを搭載し、床反力や ZMP を計測可能とする。また、周囲のカバー部はマグネシウム合金による鋳造部品によって作成し、強度と軽量化の機能を備えたものとなっている。

バックラッシュクラッチ機構は Fig.7 に示す部分に

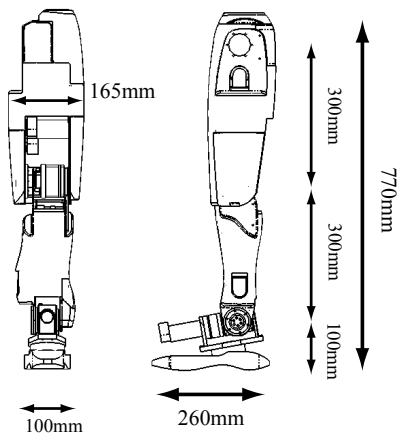


Fig.6 Design of humanoid knee

搭載している。また、脚部の全体図を Fig.8 に示す。こ

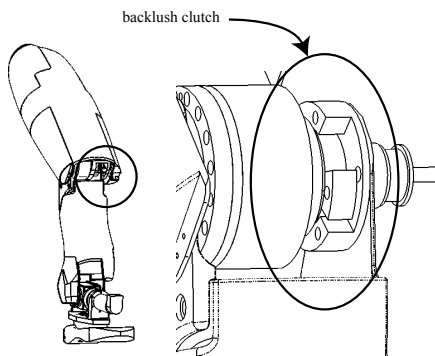


Fig.7 Location of backlash clutch

こでは、足裏の衝撃吸収を目的としてスポーツシューズを履いている。



Fig.8 Humanoid leg

## 5. 制御系の設計

### 5.1 バックラッシュクラッチの制御状態

バックラッシュクラッチの制御は

1. 無拘束状態
2. 負荷と反対方向への駆動力
3. 1. から 2 への遷移状態

の三つに分けられ、それぞれの状態に対応した制御系の切り替えを行う必要がある。2 の状態はフィードバック制御によって実現が可能であり、ここでは PD 制御によって実現した。

### 5.2 無拘束状態の制御

脚が遊脚時に無拘束状態を実現する必要がある。この実現は、ギャップ幅  $d$  を一定量に保つよう制御を行えばよい。一般に、フィードバック系を構成した場合コントローラの応答には時間遅れが生じるためギャップ幅を一定値に保つことは難しい。しかし、無拘束状態では下腿部は自由振動を行うため制御系の交差周波数がこの振動周波数より十分高ければ、無拘束状態が実現可能である。Fig.9 上図は下腿部の自由振動による膝の回転角  $\phi$  と、無拘束状態を実現するためのモータの回転角  $\theta$  を示し、下図は二つの信号の差  $d(=\theta - \phi)$  を表す。二つの信号の差が  $\pm 1.5[\text{degree}]$  に収まっている

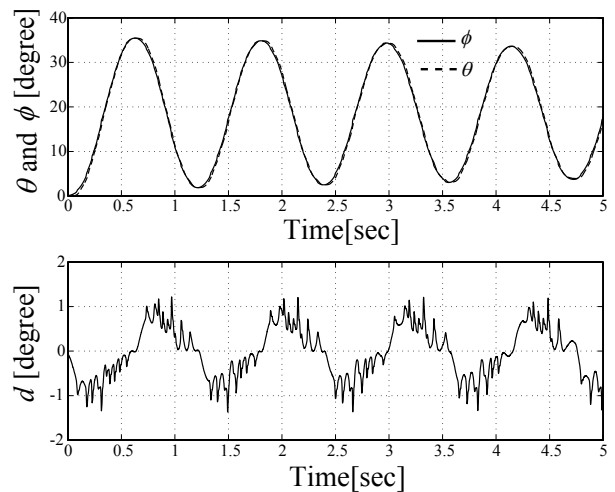


Fig.9 Free motiont

ため、ギャップ幅を  $4[\text{degree}](\pm 2[\text{degree}])$  になるように設計することで、遅れのあるフィードバックコントローラを用いても無拘束状態が実現可能である。

### 5.3 制御状態の遷移

いま、無拘束状態から負荷と反対方向への駆動力の状態に制御モードが遷移することを考える。このとき、ギャップ幅はある大きさから 0 になるような制御則を用いなければならない。一般に、フィードバック系を構成した場合、その応答はオーバーシュートを持つ。上述の遷移において、応答がオーバーシュートを持つこ

とは、クラッチのバックラッシュ部分が衝撃を伴って衝突することを意味し、これはふさわしくない。このため、オーバーシュートの無い応答の実現が必要となる。そこで、Fig.10 に示されるような制御系を構成した。ここで、 $P$  はロボットの下腿部の伝達関数、 $K$  は

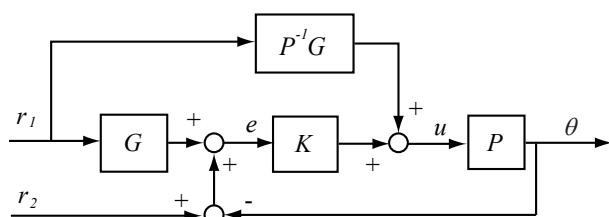


Fig.10 Two DOF control system

5.1 章で設計した PD コントローラであり、 $G$  は希望の応答を実現する伝達関数である。 $G$  がオーバーシュートの無い応答を持つように設計する (零点のない伝達関数) ことで、 $\theta$  はオーバーシュートの無い応答を持ち、 $a$  部と  $b$  部はなめらかに衝突する。これは、2 自由度制御系によるモデルマッチング問題<sup>4)</sup> を応用したもので、それぞれの状態の制御に応じて入力  $r_1, r_2$  を以下のように切り替える必要がある。

無拘束状態

$$r_1 = 0 \quad (2)$$

$$r_2 = \phi \quad (3)$$

無拘束状態から負荷と反対方向への駆動力への遷移

$$r_1 = \phi_{ref} (\text{目標角度}) \quad (4)$$

$$r_2 = \phi \quad (5)$$

負荷と反対方向への駆動力を維持する

$$r_1 = \phi_{ref} \quad (6)$$

$$r_2 = 0 \quad (7)$$

コントローラに外部からの指令を送り、上記の状態を変化させる実験を行った。結果を Fig.11 に示す。Fig.9 と同様に、実線が膝関節の回転角  $\phi$ 、点線がモータの回転角  $\theta$  を示し、下図が二つの差を表す。各時間の制御状態は以下になっている。

- 0 ~ 0.8[sec] : 無拘束状態。
- 0.8 ~ 1.6[sec] : 無拘束から負荷と反対方向への駆動力へ遷移する。
- 1.6 ~ 5.6[sec] : 膝の回転角度を徐々に曲げる。
- 5.6 ~ 6.6[sec] : 拘束状態。
- 6.6[sec] ~ : 無拘束状態を維持し、下腿部は振り子振動をする。

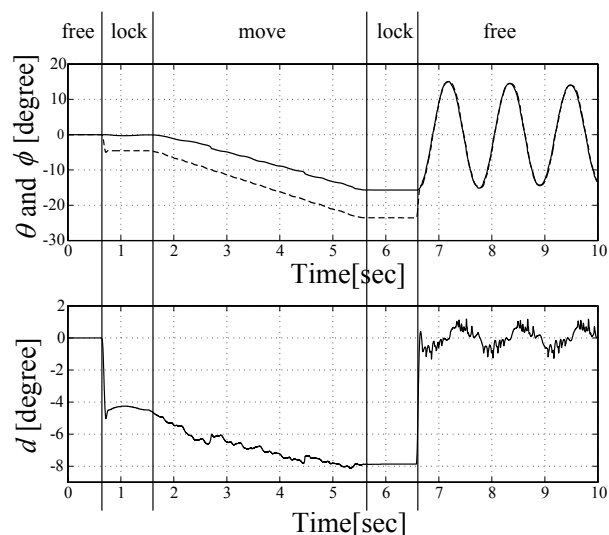


Fig.11 Motion of knee joint

1.6 ~ 5.6[sec] の間にギャップ幅  $d$  が大きくなるのは衝撃吸収のためのゴムが変形することによるものである。これにより、提案した制御手法で制御状態の遷移が行えている様子が理解できる。

## 6. おわりに

本研究における成果を以下に示す。

- バックラッシュを利用したバックラッシュクラッチ機構を開発し、ヒューマノイドロボットの膝関節機構として用いた。この機構は拘束状態と無拘束状態の両方が実現されるだけでなく、高トルク伝達特性も持つ。
- バックラッシュ機構に対して、2 自由度制御系を応用したコントローラを設計し、拘束状態から無拘束状態への遷移を可能とする制御アルゴリズムを開発した。

本研究は科学技術振興事業団「自律的行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」の支援を受けた。

## 参考文献

- 1) 生田, 川原, 山住: サイバネティックアクチュエータの研究 (第 1 報) 基本概念と試作実験, 第 9 回 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.9, pp35-36 (1991)
- 2) T.McGeer: Passive Dynamic Walking, The International Journal of Robotics Research, pp.62-82 (1990)
- 3) T.McGeer: Passive Walking with Knees, Proc. of IEEE Robotics and Automation Conference, pp.1640-1645 (1990)
- 4) 前田, 杉江: アドバンスド制御のためのシステム制御理論, システム制御情報学会編, 朝倉書店 (1990)