

# 機構的優位性によるヒューマノイドロボットのモデル化と運動制御の容易化

## Simplified Modeling and Control of Humanoid Robot based on Mechanical Advantages

清水洋介 芥川浩之 岡田昌史(東工大)

\*Yosuke SHIMIZU, Hiroyuki Akutagawa and Masafumi Okada (Tokyo Inst. of Tech.)

**Abstract**— Study of robot mainly focuses on the design of motion pattern and controller. It's often the case that mechanism exists a priori. Therefore if the additional functions are required, some actuators are added. It causes increase of weight and the complexity of control. In this paper, we focus on the mechanism of the conventional humanoid robot and design a new humanoid robot with mechanical advantages. We introduce the new humanoid robot to the one of mechanical advantages the ankle passive joint. The ankle passive joint has advantages for not only actuator reduction, but also to enable easy application of inverted pendulum model to motion control. We verify the effectiveness of the advantages of new mechanism by experiment of locomotion with the prototype of humanoid robot.

**Key Words:** Humanoid robot, Double spherical hip joint, Passive joint

### 1. はじめに

ロボットの運動制御において所望の運動を実現するために、既存の身体に対して制御則の設計を行うのが一般的であるが、ダイナミクス設計という観点からすれば、身体設計も可能であり、制御系設計を容易にするような身体・機構の設計が必要であると考えられる。しかし、特にヒューマノイドロボットの研究では、機構に即した制御系設計は積極的に行われているのに対し、機構設計に関しては人間を模倣した機構設計が既存の機構として用いられており、制御に即した設計は十分に行われていない。そのため、アクチュエータ増加に伴う重量の増大や、制御則の複雑化を引き起こしている。これらより、ヒューマノイドロボットに関しても制御を考慮した機構の設計、すなわち機構的優位性を持つ機構の研究が必要であると考えられる。

そこで、本研究では参考文献 [1][2] と同様、これまでに、従来のヒューマノイドロボットの機構を見直し、制御を容易化するための新たな機構を導入したヒューマノイドロボットを設計・試作してきた。導入した機構には、二重球面股関節、足首ロール軸フリー関節、および参考文献 [3][4] でも用いられているつま先機構を上げている。これまでに参考文献 [5] において、二重球面股関節の機構的優位性については検証されているが、足首ロール軸フリー関節の機構的優位性については十分に検証されていない。そこで本稿では特に足首ロール軸フリー関節の機構的優位性について考察・検証してゆく。

足首ロール軸フリー関節は効果の少ないと考えられる足首のロール軸のアクチュエータを削除しフリー関節としたものである。足首ロール軸フリー関節はアクチュエータ数の低減化による実際的な制御の容易化および参考文献 [6] の逆さ振り子モデルを用いた運動制御におけるモデル誤差低減化による理論的な制御の容易化を目的としている。制御を容易化する方法として、アクチュエータ数低減化は制御系を容易にするばかりでなく、ロボット本体を軽量化し、さらに、これはアクチュエータの小型化・軽量化にもつながるため、その相

乗効果から軽量化という面においても大きな機構的優位性をもたらすと考えられる。逆さ振り子モデルを用いた運動制御の容易化は、足首ロール軸をフリーにすることにより振り子の支点である ZMP (Zero Moment Point) を動きにくくし、モデル誤差を低減化することで運動制御の容易化を図っている。

足首ロール軸フリー関節の機構的優位性の検証には試作したヒューマノイドロボットを用いて検証を行う。検証には逆さ振り子モデルから求めた運動に対してフィードフォワード的な制御のみで運動が実現できることを示し、モデルと実際の一致性を検証する。

### 2. ヒューマノイドロボットの設計・試作

Fig.1 に設計・試作したヒューマノイドの外観を、Table.1 に機構緒元を示す。機構的特徴として股関節に二重球面股関節、足首にはロール軸方向をフリーにした関節を導入している。以下では、導入した足首ロール軸フリー関節の機構的優位性について述べる。

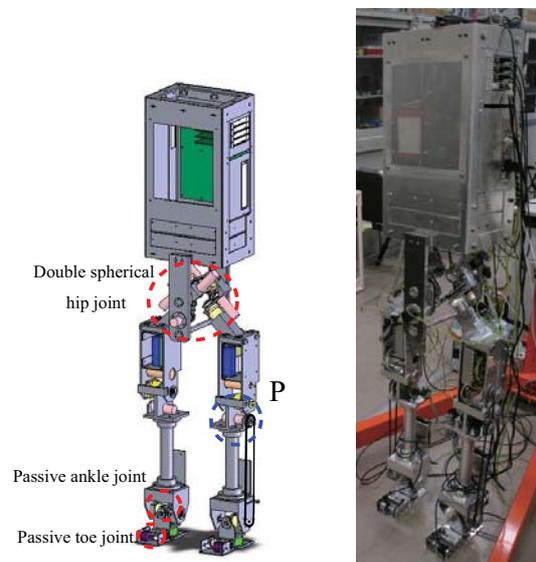


Fig.1 Prototype of Humanoid

Table 1 Specification of designed Humanoid

Height	1476mm
Width	420mm
Upper Part Weight	10kg
Legs Weight	15kg
Active Joints	10
Passive Joints	4
Actuator	90W DCMotor(knee)×2 60W DCMotor×8

### 3. 足首ロール軸フリー関節の機構的優位性

足首ロール軸フリー関節は足部ローリングに使用する関節を Fig.4 のように受動関節としたものである。

足首ロール軸を受動関節とするにあたり足首ロール軸のアクチュエータに関し片脚接地状態での有効性に関し検証を行った。検証のため Fig.2 左図のヒューマノイドの状態を Fig.2 右図のように、足首ロール軸を支点、重心を集中質量とした逆さ振り子としてモデル化する、このとき力とトルクのつり合い式は式 (1)(2)(3) で示される、

$$LMg \sin(\theta) = F_2 \ell - F_1 \ell \quad (1)$$

$$\tau = F_2 \ell - F_1 \ell \quad (2)$$

$$Mg = F_1 + F_2 \quad (3)$$

ただし、 $L$  は足首関節から重心までの距離、 $M$  は質量、 $g$  は重力加速度、 $F_1, F_2$  は地面反力、 $\tau$  はアクチュエータ発生トルクである。また足首ロール軸アクチュエータが有効に使用できる条件式 (4) を考え、式 (4) のように与えた。

$$F_1 > 0, F_2 > 0 \quad (4)$$

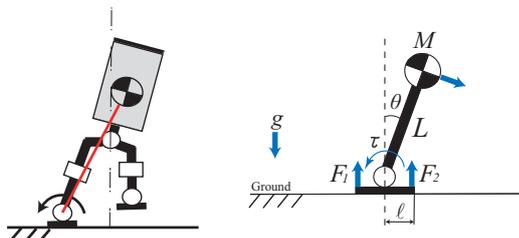


Fig.2 Static of humanoid robot with one leg grounding

この条件で片脚接地状態のとき重心がどの程度の傾き  $\theta$  まで有効であるか静的な状態において検証した。ただし式 (4) の足首ロール軸アクチュエータが有効に使用できる条件式は、もし式 (4) の条件式が満たされない場合、足裏が Fig.3 のように地面から離れてしまい、それ以上アクチュエータによるトルクの使用は無効となると考えこの条件を与えている。この条件から計算すると重心位置の傾きが約  $2^\circ$  程度傾いた時点で、足首ロール軸のアクチュエータは効果的に使用できな

くなる。また動的な運動においてはさらに効果の低いアクチュエータであると考えられる。以上から効果の

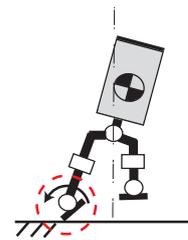


Fig.3 Availability of ankle torque

少ないアクチュエータと考えられる足首ロール軸方向のアクチュエータを削除することによりアクチュエータ数の低減化を達成している。

また、足部ピッチングに使用する関節のモータについても Fig.1 の  $P$  の位置に配置することで、足首にハーモニックギア一つを残すのみとし脚部軽量化、また脚部末端の慣性モーメントの低減化を行っている。

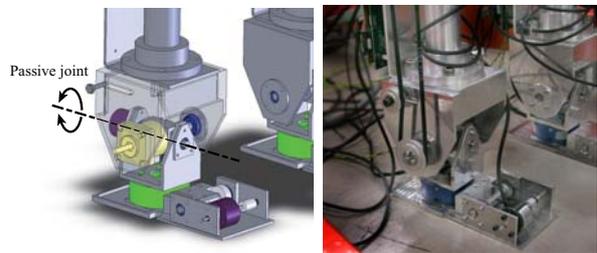


Fig.4 The Passive Joint at the ankle

次に逆さ振り子モデルを用いて運動制御を行う際の、モデル誤差低減化による理論的な運動制御の容易化を与えるための機構的優位性について述べる。ただし、逆さ振り子モデルとは Fig.2 に示すモデルの支点を ZMP (Zero Moment Point), 振り子の集中質量をヒューマノイドの重心と考え逆さ振り子の運動をヒューマノイドに適用するモデル化のことである。ここで ZMP とはヒューマノイドが床のみに接触している場合床反力によるモーメントが 0 になる点として定義される。逆さ振り子の支点である ZMP は足首ロー

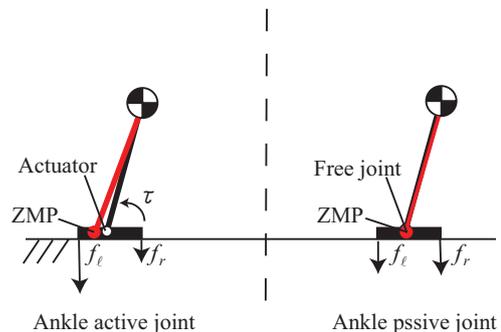


Fig.5 Behavior of ZMP

ル軸にアクチュエータを持つ場合、アクチュエータ発生トルクにより Fig.5 のトルク  $\tau$  が発生し、その影響で Fig.5 の左図のように ZMP が動いてしまう、この ZMP のずれはモデル誤差を増大させてしまう。また、ZMP は力のつり合い点であるため、正確な計測が困

難である，そのため ZMP のずれに対する補償も困難となっている．これに対して，足首ロール軸をフリー関節とすることで Fig.5 の右図のように ZMP は動きにくくなり，この結果モデル誤差が低減化され ZMP 計測の必要がなくなることから逆さ振り子モデルを用いた運動制御の容易化が図れると考えられる．

#### 4. 機構的優位性の検証

足首ロール軸フリー関節の導入による，逆さ振り子モデルのモデル誤差低減化を与える機構的優位性の検証のため，逆さ振り子モデルを用いた運動制御を行う．

##### 逆さ振り子モデル

逆さ振り子モデルを用いた運動制御は Fig.6 に示すように，ZMP に支点，重心を集中質量と考えモデル化したヒューマノイドに対し，Fig.7 のような逆さ振り子の運動を与え運動をさせる運動制御である．ただ

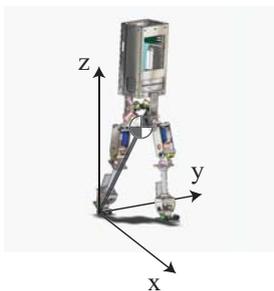


Fig.6 inverted pendulum model

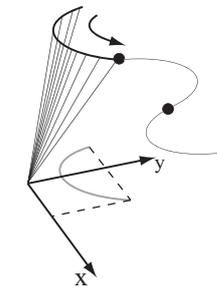


Fig.7 inverted pendulum

し，今回用いる逆さ振り子モデルには振り子の集中質量が Fig.8 の平面  $z$  上を動くような拘束条件を与えた逆さ振り子を用いる．逆さ振り子をこのように定義す

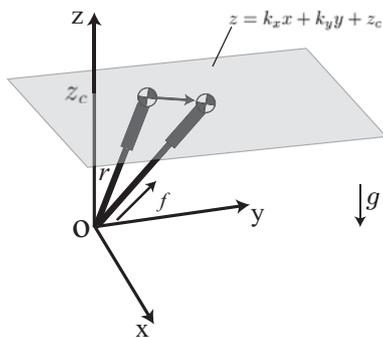


Fig.8 linear inverted pendulum

ることで，集中質量の動きが平面上に限定され，集中質量の位置と速度の一般解が次式のように求まるといふ利点がある．

$$y(t) = y(0) \cosh\left(\frac{t}{T_c}\right) + T_c \dot{y}(0) \sinh\left(\frac{t}{T_c}\right) \quad (5)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{y(0)}{T_c} \sinh\left(\frac{t}{T_c}\right) + \dot{y}(0) \cosh\left(\frac{t}{T_c}\right) \quad (6)$$

ただし， $y(0)$  は初期位置， $\dot{y}(0)$  は初速度， $t$  は時刻， $T_c = \sqrt{\frac{z_c}{g}} = \text{const.}$  であり， $x$  方向に対しても同様の

式が求まる．これらの式を用いて  $x$  方向， $y$  方向の初期位置，初速度をそれぞれ適当に決定することで Fig.7 にあるような逆さ振り子の運動が実現できる．

今回は特に足首ロール軸方向をフリー関節とすることで，側面方向の運動について逆さ振り子モデルに対するモデル誤差が小さくなることを検証することを考えるため，側面方向の運動制御のみを行う．実際に式

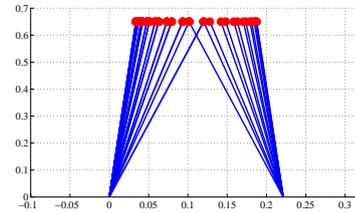


Fig.9 inverted pendulum

(5)(6) を用いて行った逆さ振り子の側面方向の運動のシミュレーション結果を Fig.9 に示す．ただし，振り子の支点は接地脚の ZMP を仮定し一周期ごとに切り替えを行っている．

##### 重心ヤコビアンを用いた方法

試作したヒューマノイドの脚部について，股関節中心変位から両脚部の各関節角  $\theta_{1\sim 12}$  を求める逆運動学の厳密解はこれまでに求められている [5]．しかしながら，逆さ振り子の集中質量の軌道を，ヒューマノイドの重心の軌道に適用するためには，重心位置変位から各関節角を求める必要がある．そのため，ここでは重心ヤコビアン [7][8] の導入を行う．重心ヤコビアンとは式 (7) のように各関節角変位量  $\theta_{1\sim 12}$  を重心位置変位量に写像する  $J_{cog}$  のことである．

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_G & \dot{Y}_G & \dot{Z}_G \end{bmatrix}^T = J_{cog} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 & \dots & \dot{\theta}_6 & \dot{\theta}_7 & \dots & \dot{\theta}_{12} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

式 (7) の関係を与えるためここでは，左右脚を一つの閉リンク系とする拘束条件と既に求まっている股関節中心変位に対する逆運動学の厳密解を用いて以下のような変形を行う．まずはじめに左右脚を一つの閉リンク系とする拘束条件を用いることで

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_G & \dot{Y}_G & \dot{Z}_G \end{bmatrix}^T = J_A \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 & \dots & \dot{\theta}_6 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

のような変形を行う．次に脚部順運動学より

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_G & \dot{Y}_G & \dot{Z}_G \end{bmatrix}^T = J_{GfC} \begin{bmatrix} \dot{X}_H & \dot{Y}_H & \dot{Z}_H & \dot{\phi}_x & \dot{\phi}_y & \dot{\phi}_z \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

のように変形される．ただし  $\dot{X}_H, \dot{Y}_H, \dot{Z}_H, \dot{\phi}_x, \dot{\phi}_y, \dot{\phi}_z$  は股関節中心の位置，姿勢の微小変化量である．

さらに式 (9) は冗長な関係であることから，ここでは便宜上重心に対し姿勢を定義し，これにより冗長な

関係を解消し股関節中心の微小変位に対して、重心位置微小変位が一意に定まるように式 (10) を与える。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_G & \dot{Y}_G & \dot{Z}_G & \dot{\phi}_{gx} & \dot{\phi}_{gy} & \dot{\phi}_{gz} \end{bmatrix}^T = J_{GfH} \begin{bmatrix} \dot{X}_H & \dot{Y}_H & \dot{Z}_H & \dot{\phi}_x & \dot{\phi}_y & \dot{\phi}_z \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

これより、

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_H & \dot{Y}_H & \dot{Z}_H & \dot{\phi}_x & \dot{\phi}_y & \dot{\phi}_z \end{bmatrix}^T = J_{GfH}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{X}_G & \dot{Y}_G & \dot{Z}_G & \dot{\phi}_{gx} & \dot{\phi}_{gy} & \dot{\phi}_{gz} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

となり、式 (11) のように重心位置、姿勢の微小変化量を与えることで股関節中心位置、姿勢の微小変化量が求まることが分かる。

最後に股関節中心変位に対する逆運動学の厳密解を用いることで各関節角微小変位が求まり、これにより重心位置変位から各関節角が求められる。

#### 実機による運動制御実験

以上の重心ヤコビアンの関係式を用いて、Fig.9にある逆さ振り子の運動を実機に与える実験を行った。実験の様子を Fig.10 に示す。ただし、地面から離れている遊脚は単純に振り子の半周期で上下運動させている。実験の結果、左右方向の運動については重心に運動パターンを与えただけのフィードフォワード制御のみで運動が達成できていることからモデル化誤差が低減化されていることがわかり、制御の容易化が達成されていると考えられる。

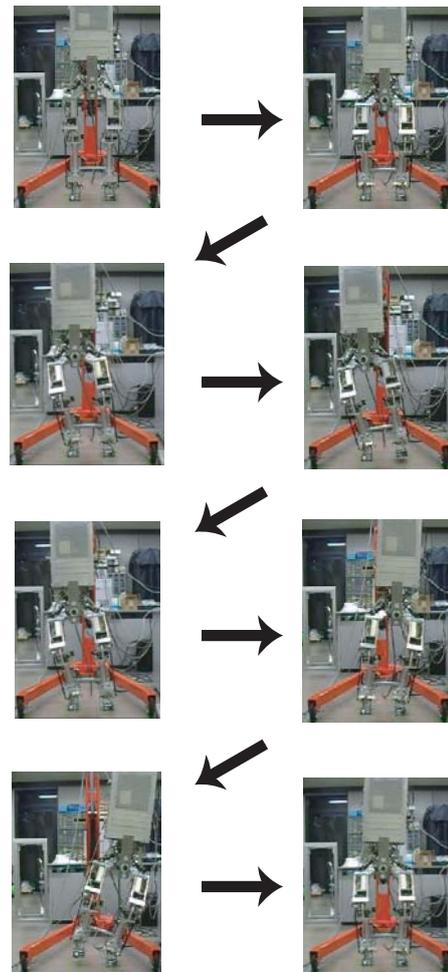


Fig.10 Experiment

## 5. おわりに

機構的改良により運動制御の容易化を計ることを目的とした本研究では以下のことを達成した、

- 足首ロール軸フリー関節の機構的優位性に関する考察。
- 逆さ振り子モデルによる運動制御実現のための重心ヤコビアンの導入。
- 実機による逆さ振り子モデルを用いた運動実験により足首ロール軸フリー関節の機構的優位性についての検証。

#### 謝辞

本研究は文部科学省科学研究補助金若手研究(A)「力学的観点に立ったロボットの身体と知能の相互発達と運動の創発」の支援を受けた。

#### 参考文献

- [1] 梅木健太郎, 岡田昌史, 岩附信行: "環境との力学的相互作用のための足部蹴りだし機構の開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05(2005), 1P1-S-006.
- [2] 篠原, 樋原, 岡田, 中村: "ヒューマノイドロボットの運動性進化にむけての機構開発と運動制御", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03, 2003
- [3] Ramzi Sellaouti, Olivier Stasse, Shuuji Kajita, Kazuhito Yokoi and Abderrahmane Kheddar, "Faste and Smoother Walking of Humanoid HRP-2 with

Passive Toe joints", Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems.

- [4] Y.Ogura et al. "Human-like Walking with Knee Stretched, Heel-contact and Toe-off Motion by a Humanoid Robot" Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems
- [5] 清水洋介, 森田堅次郎, 岡田昌史 "機構的優位性を持つヒューマノイドの身体進化" 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008, 2A1-D03
- [6] Kajita, S. and Tani, K., "Experimental study of biped dynamic walking," IEEE Control Systems, Vol.16, No.1, pp.13-19, February 1996
- [7] 杉原知道, 中村仁彦 "非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作" 日本ロボット学会誌 Vol.24 No.2, pp.222~231, 2006
- [8] R. Boulic, R. Mas and D. Thalmann: "Inverse Kinetics for Center of Mass Position Control and Posture Optimization," Proceedings of European Workshop on Combined Real and Synthetic Image Processing for Broadcast and video Production, 1994.