

二足歩行ロボットのための重心補正機能を有する二重球面股関節の設計

Design of double spherical hip joint with compensation function of COG for biped robot

○小鹿幸司 (東工大) 岡田昌史 (東工大) 岩附信行 (東工大)

*Koji OJIKI, Masafumi OKADA, Nobuyuki IWATUKI (Tokyo Inst. Tech.)

Abstract—For the humanoid motion generation, motion patterns are designed a priori. However, because the specific motion pattern requires the precise model of the environment, the robustability for the perturbation of the environments is entrusted only to the controller. On the other hand, the human motions are generated as the result of the interaction of body dynamics, information processing and environments. This study focuses on the humanoid walking and aims at having the humanoid walking without motion pattern. For this purpose, we design the biped walking robot with double spherical hip joint for decoupling the upper body motion and leg motion. This mechanism has also COG compensation function for the mechanical control of COG from the DOF arrangements point of view. The basic experimental result is illustrated, which shows the advantage of the designed mechanism for COG control.

Key Words: Biped walking robot, Motion pattern, Double spherical hip joint

1. はじめに

現在、ヒューマノイドロボットの研究が盛んに行われており、全身の協調運動によって歩行をはじめとする様々な運動が実現できている [1][2]. ヒューマノイドロボットと人間の運動について比較をした場合、両者には大きな違いがある。これは、運動パターンの存在性と言える。

これまでのヒューマノイドロボットの運動は Fig.1 に示すように、あらかじめ目標となる運動パターンがあり、この目標パターンに追従させることで安定した運動を実現している。例えば歩行においては、ZMP が接地している凸包内に常に存在することを条件として歩行パターンが生成される [3]. また、コントローラではモデル化誤差や外乱によって生じる目標 ZMP からのずれを補償することで安定化を行っている。さらに、地面の勾配が変わるなどの環境が変化する場合はコントローラのロバスト性に委ねられるか、あらかじめその変化に対応したコントローラあるいは目標パターンを作り、条件によって切り替えを行う。しかし、実際にはロバスト性で吸収できる変化は小さいため、様々な環境に適応するためには膨大な数のコントローラやパターンを設計しなければならず、全ての変化をあらかじめ予測しておくことも困難である。

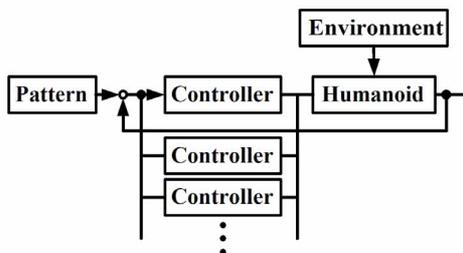


Fig.1 Robot motion control

一方、人間の場合は Fig.2 に示すように、ある運動に対して特定の運動パターンを持っておらず、目的お

よび身体と環境の相互作用の中から運動が生まれる。すなわち運動パターンは目標ではなく結果として生じていると言える。そのため、特定の運動パターンに縛られることなく、環境の変化に柔軟に対応することが可能である。

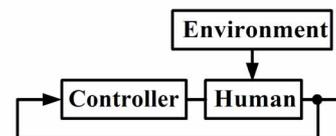


Fig.2 Motion generation of human

複雑な人間環境に適応するヒューマノイドロボットが求められる中、未知の環境変化に柔軟に対応できることは不可欠な機能である。そこで本研究ではまず歩行動作に焦点を当て、あらかじめパターンを与えることなく歩行を実現することを目指す。この実現のためには従来のヒューマノイドロボットを制御面のみならず、機構面からも変えていく必要がある。従来のヒューマノイドロボットの ZMP 規範の安定化制御は機構上、上半身の重心位置を下半身とカップリングさせて制御しなければならず、歩行動作と安定化制御を独立して行うことができないため、複雑な歩行パターンになってしまう傾向がある。このコンセプトから、制御と運動の切り離しを目的として二重球面股関節が提案され、そのプロトタイプがヒューマノイドロボットに実装されてきた [4]. 本稿では重心移動という観点から二重球面股関節の自由度配置の改良について述べ、新たなプロトタイプを設計する。また、これを用いた二足歩行ロボットを設計・試作し、重心移動に関する検証実験を行う。

2. 二重球面股関節の問題点と改良

2.1 二重球面股関節

従来のヒューマノイドロボットの股関節機構の多くでは、Fig.3(a) に示すように片足 3 自由度の軸が 1 点

で交わる球面ジョイントが左右に分離して配置されている。この自由度配置の場合、上半身の重心位置を移動させるためには股関節、膝、足首を協調して動かす必要がある。そのため、歩行動作と安定化制御を独立して行うことができず、複雑な歩行パターンになる傾向があるだけでなく、常に腰を落とした姿勢を維持する必要があるため、エネルギー消費の観点からも望ましくない。二重球面股関節は Fig.3(b) に示すように左右の球面ジョイントの中心を股関節の中心で一致させることで、両足に対して上体を Roll, Pitch, Yaw の 3 軸回りに回転させることができ、上半身と下半身の動きを分離することができる [4]。しかし、これまでに製作された二重球面股関節は以下に示す 2 つの欠点があった。

- 可動範囲確保のため、全体のサイズが大きい。
- 歩行時における重心移動のための、上半身の左右への揺振量が大きい。

そこで、これらの欠点を解決するために機構の改良を行なう。

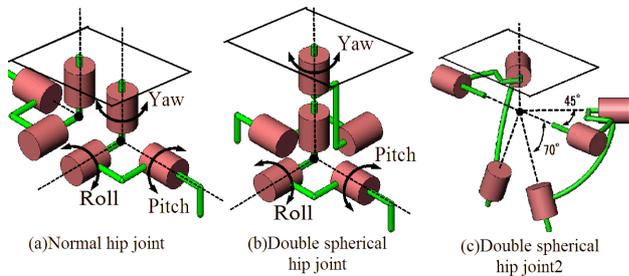


Fig.3 Conception diagram of hip joint

2.2 空間の効果的利用

二重球面股関節は、駆動軸を中心で交わせるために Yaw, Roll 軸の左右 4 つのアクチュエータが中央に集まっていた。そのためリンクの干渉が起こり易く、可動範囲確保のためにサイズが大きくなってしまふ。一方、従来の一般的な股関節機構ではこれらのアクチュエータは左右に分離されていたため、アクチュエータ同士の干渉を避け、可動範囲を確保することが比較的容易にできた。そこで、自由度の配置を Fig.3(c) のように変更することによって、6 つの駆動軸が 1 点で交わりながらもアクチュエータを左右に分離させる。これによって、必要な可動範囲を極力犠牲にすることなく、これまでより一回り小柄なサイズでの設計が可能となる。

また、このような自由度配置をとることにより、負荷が大きくなると予想される上半身の左右の揺振運動を、複数のアクチュエータで分散出力させることになり負荷を低減させる効果も得ることができる。

2.3 重心補正機能の付加

これまでに製作された二重球面股関節は歩行時の重心移動に要求される上半身の揺れ幅が 30 度と大きく、不自然な動作となっていた。そこで、揺振動作に連動して上体が軸足側へスライドする重心自動補正機能を付加する。これによって上体によるバランス制御を補助し、揺振量を低減させる。このスライド機構は自由

度配置の観点から次のように解釈することができる。上体の重心を出力点とした場合、Fig.4(a) に示すように従来の股関節では pitch 軸回転、脚部との協調によって roll 軸回転、前後方向、横方向の 4 自由度を持つ。一方、二重球面股関節では Fig.4(b) に示すように roll 軸回転、pitch 軸回転、yaw 軸回転、脚部との協調によって前後方向の 4 自由度を持つ。重心補正機能を付加した場合、この 4 自由度の内 pitch 軸回転と連動して左右方向にも動くため、Fig.4(c) に示すように同じ 4 自由度でありながら従来の股関節と二重球面股関節の両方の自由度を併せ持っていると言える。この機構を導入することで、歩行時における重心移動の面で以下の効果も得られる。

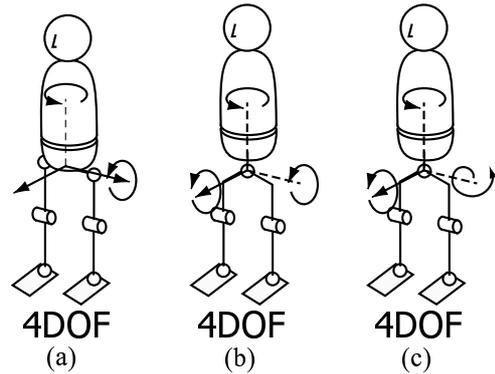


Fig.4 Bend trunk

- 右足を上げる場合 (Fig.5 左下) 足上げ用アクチュエータの回転をタイミングベルトによって上部のボールねじに伝達し、上半身と固定されたボールねじのナットがスライドすることで上半身が左にスライドする。
- 左足を上げる場合 (Fig.5 右下) 足上げ用アクチュエータの回転をタイミングベルトによって上部のボールねじのナットに伝達することで、上半身が右にスライドする。
- 両足を上げる (上半身を前方に倒す) 場合 (Fig.5 中上) 左右それぞれの回転が打ち消しあうことで上半身はスライドしない。

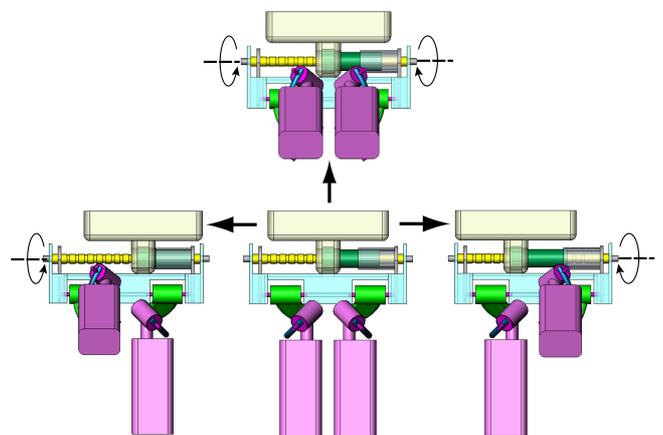


Fig.5 Slide mechanism

なお、上半身の揺振時、および足上げ時のどちらの場合においても上半身が軸足側へ移動することができ

るのは、軸の直交性を排除したためである。

3. 二足歩行ロボットの設計

3.1 設計仕様

前述の自由度配置、重心補正機構に従い二足歩行ロボットの設計を行った。全体図を Fig.6 に示す。外形寸法（高さ・幅・奥行）は約 1120 × 290 × 220[mm]、質量は約 23[kg]（上半身 6[kg]、股関節 7[kg]、片足 5[kg]）、関節配置は回転対偶を股関節に 3 × 2、膝に 1 × 2、足首に 2 × 2 配置し、全ての関節に減速比 100 のハーモニックギアを用いる。筐体にはジュラルミンとアルミニウム合金を用いる。省スペース化のため、モータの出力はタイミングベルトとタイミングプーリを用いてハーモニックギアに折り返して伝達し、DC/DC コンバータ、およびモータドライバの放熱板は筐体と兼ねるようにする。また、ヒューマノイドロボットの目標運動実現のためにはタイムラグのない実時間制御が不可欠であるため、制御用 PC の OS は RTLinux を用いる。可動範囲は Table.1 に示す通りである。角度の定義を Fig.7 に示す。なお、脚部は共同開発した [5]。

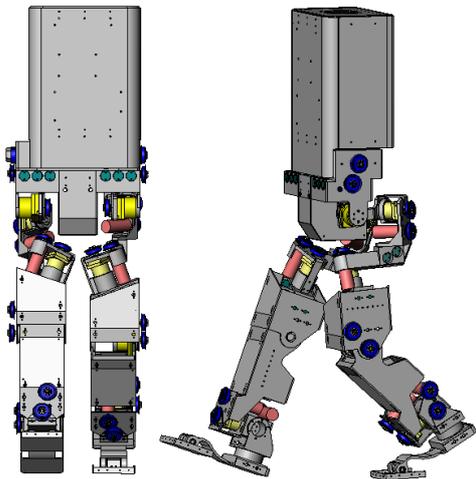


Fig.6 Design model

Table 1 Motion range

Yaw(Upper half body)	-87~+87[deg]
Roll(Upper half body)	-27~+27[deg]
Yaw(Leg)	-48~+48[deg]
Roll(Leg)	-6~+27[deg]
Pitch(Leg)	-35~+87[deg]
Slide	-50~+50[mm]

3.2 デバイス構成

電源は外部に配置し、制御用 PC、DC/DC コンバータ、シリアル通信 RS232C ボード、力センサ用レーザバード、マイクロスイッチ用デジタル IO ボードを上半身に搭載する。モータドライバ、モータ、エンコーダは各部位に分散配置する。脚部には床半力を測定するための 6 軸力センサ、足裏には地面との接触状態検

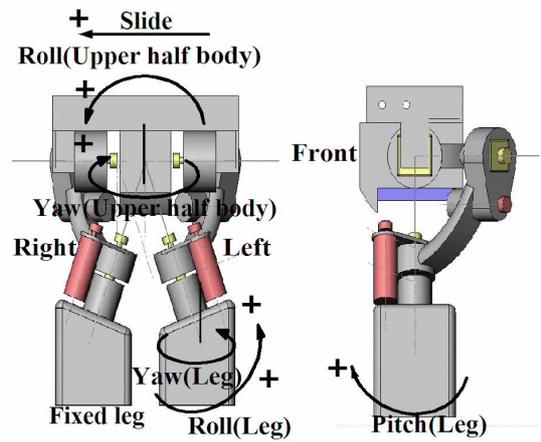


Fig.7 Definition of rotation angle

知のためのマイクロスイッチが搭載されている。アクチュエータは maxon japan の DC モータを使用する。足上げおよびスライド機構の駆動を行う股関節の pitch 軸モータと、負荷が大きくなると予想される膝関節のモータには 90W モータを用い、その他は 60W モータを用いる。

4. 重心移動の検証実験

4.1 実験方法

開発した二足歩行ロボットを用いて、以下の 2 点を検証するための基礎実験を行う。

- 下半身と独立して上半身を動かすことが可能であること。
- 重心補正機能によって重心移動が補助されること。

重心補正機能を付加した場合と付加しない場合で、上半身を roll 軸回りに振幅 15[deg] の正弦波で揺振させ、力センサにより直立状態からの足裏荷重変化量を測定する。各パラメータの定義は Fig.8 および Table.2 の通りである。なお、スライドする上半身の股関節中心からの高さ h は、3次元 CAD ソフトから求めた。

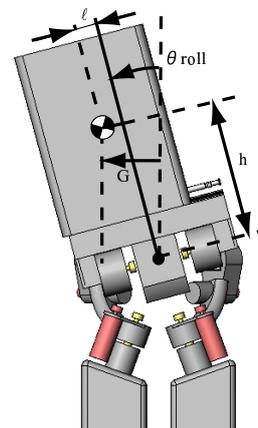


Fig.8 Definition of parameter

重心位置は補正を行わない場合には式 (1)、行う場合には式 (2) で表すことができる。スライド量 l は式 (3) で与えられる。

$$G = h \sin \theta_{roll} \quad (1)$$

Table 2 Parameter

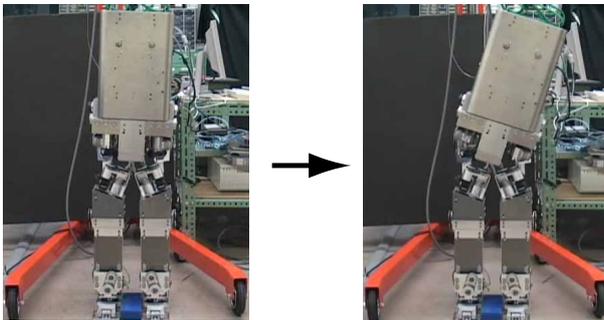
roll angle of upper body	$\theta_{roll}[rad]$
roll angle of right leg	$\theta_r[rad]$
roll angle of left leg	$\theta_l[rad]$
distance from the center of hip joint to the COG	$h = 308[mm]$
gear ratio vir ball screw	$n = 99$
lead of ball screw	$r = 2$
distance of slide	$\ell[mm]$
distance for COG movement	$G[mm]$

$$G = h \sin \theta_{roll} + \ell \cos \theta_{roll} \quad (2)$$

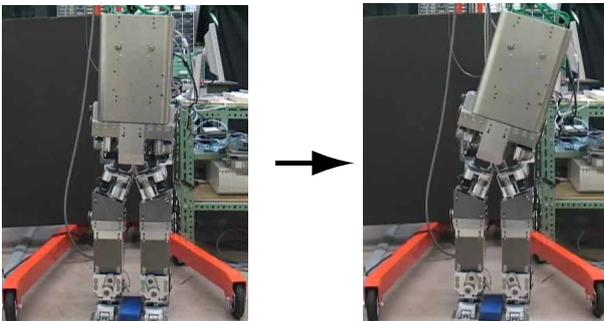
$$\ell = \frac{\theta_r - \theta_l}{2\pi} nr \quad (3)$$

4.2 実験結果

実験の様子を Fig.9 に示す。この図より、脚部と独立して上半身が動いているのが分かる。測定した力センサのデータを Fig.10 に示す。重心補正機能を付加しない場合に比べて付加した場合の足裏荷重変化量が大きいことから、補正機能によって重心位置が軸足側に移動していることが分かる。両者の足裏荷重変化量の差は 4[N] 程度であるが、式 (3) に示した通り歩行などの左右の足の pitch 角に差が生じる運動を行う場合には、さらに重心位置が補正されることになる。



(a) Without slide mechanism



(b) With slide mechanism

Fig.9 Experimental results

5. おわりに

本稿では、二重球面股関節の自由度配置を見直すことで以下の3点が可能になる改良型の試作を行った。

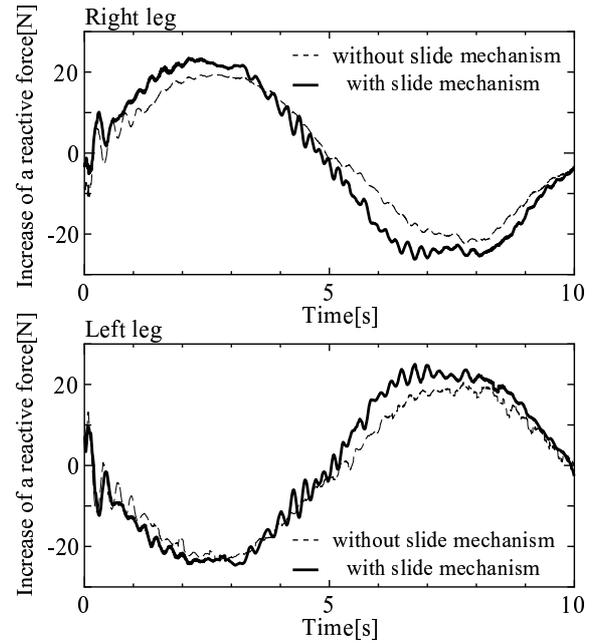


Fig.10 Measured force

1. 股関節機構を従来よりコンパクトにする。
2. 複数のアクチュエータの協調により、揺振時の負荷を低減させる。
3. 重心補正機能を付加し、揺振時、足上げ時に上半身の重心位置を軸足側に移動させる。

また、これを用いた二足歩行ロボットを設計・試作し、重心補正機能の有効性を検証する実験を行った。これより、上半身を用いた安定化制御が下半身と独立して行えることが示されたので、今後は上半身を用いた環境への適応制御則の設計を目指す。なお、歩行パターンを与えない歩行制御則に関しては、参考文献 [5] を挙げておく。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究補助金特定領域研究 (A03) 「力学的情報処理による記号空間と運動空間の結合設計」(研究代表者:岡田昌史) および東京工業大学挑戦的研究賞「非線形力学現象としてとらえたヒューマノイドロボットの運動生成」の支援を受けた。

参考文献

- [1] 金子, 金広, 比留川, 赤地, 五十棹: ”働く人間型ロボット HRP-2”, 映像情報メディア学会誌 Vol.57, No.1, pp.67-70, 2003
- [2] 黒木義博: ”高度な運動能力を有する小型二足歩行エンタテインメントロボット SDR-4X”, 映像情報メディア学会誌 Vol.57, No.1, pp.71-74, 2003
- [3] Q.Huang, K.Yokoi, S.Kajita, K.Kaneko, H.Arai, N.Koyachi and K.Tanie: ”Planning walking patterns for a biped robot”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.17, No.3, pp.280-289, 2001
- [4] 篠原, 伴, 後藤, 稲邑, 岡田, 中村: ”二重球面ジョイントを用いた股関節機構を持つヒューマノイドの開発”, 第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1C16, 2002
- [5] 梅木, 岡田, 岩附: ”環境との力学的相互作用のための機構開発 - 歩行ロボットの蹴りだし機構と推進力制御 -”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05, 2005