

# 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

篠原徹也(東大) 伴茂樹((株)NTTデータ) 後藤達哉((株)東芝)  
稲邑哲也(東大, CREST) 岡田昌史(東大) 中村仁彦(東大, CREST)

## Development of humanoid robot with "Double spherical hip joint"

\*Tetsuya SHINOHARA (Univ. of Tokyo), Shigeki BAN(NTT DATA Co. Ltd.),  
Tatsuya GOTOH(TOSHIBA Co. Ltd.), Tetsunari INAMURA(Univ. of Tokyo, CREST),  
Masafumi OKADA (Univ. of Tokyo) and Yoshihiko NAKAMURA(Univ. of Tokyo, CREST)

**Abstract**— We developed a two armed biped humanoid. This humanoid has three characteristic mechanisms, cybernetic shoulder, double spherical hip joint and backlash clutch. In this paper, we explain the total system of the humanoid and the mechanism of double spherical hip joint. Double spherical hip joint consists of two spherical joints whose center of rotations agree at one point and can realize two functions. One function is as the hip joint and the other function is as the waist joint. It is expected that we can control the balance of the humanoid easily by taking advantage of this mechanism.

**Key Words:** Humanoid, Mechanism, Double spherical hip joint

### 1. はじめに

近年ヒューマノイドの研究がさかんになされているが<sup>1)2)3)4)</sup>、これは人間が活動する環境内において人間と共存し協調作業を行うことができるロボットの形態として人間と同等の機構を持つヒューマノイドが最適であると考えられているためである。現在では全身の協調運動を実現するという優れた運動性能を有する完成度の高いものが多く開発されている。これらのヒューマノイドの全身自由度数は20自由度から30自由度程度となっておりさらに自由度を多くすることによりその運動性能を向上させることができると考えられるが、実際に設計するには小型かつ軽量であることが要求されるため自由度数は制限されるのが一般的である。しかし同じ自由度数で多様な運動を生成できる機構であればそれをヒューマノイドに用いることは非常に有効でありこのような機構を開発することは今後ヒューマノイドを設計する上で重要になると考えられる。

またこれまで開発されたヒューマノイドの動作を見てみると人間と同一の動作を行なうには至っていない。例として歩行動作を挙げると歩行時において常に膝を曲げ腰を落とした状態を保っているためその動きは機械的でぎこちないもの感じられる。これは上半身を使って重心を前後、左右方向に変化させバランスを取るための自由度を確保するには膝を曲げておく必要があるためである。しかしこれは直立状態でも膝を曲げていなくてはならないので膝に高トルク出力が要求されアクチュエータに負担がかかりエネルギー消費増大の原因となる。腰関節として新たに自由度を増やすことで上半身を使ったバランス制御が容易に行えるようになるがこれは重量、体積の増加につながるという問題がある。

本研究ではこのようなヒューマノイドの歩行運動に注目し自由度数を増加させることなく上半身を使って重心を変化させ容易にバランス制御が可能となる股関節機構を持つ全身型ヒューマノイドを開発した。この股関節機構は二重球面ジョイントにより構成される。以下では二重球面ジョイントの機構及び開発した全身型ヒューマノイドについて述べる。

節機構を持つ全身型ヒューマノイドを開発した。この股関節機構は二重球面ジョイントにより構成される。以下では二重球面ジョイントの機構及び開発した全身型ヒューマノイドについて述べる。

### 2. 二重球面ジョイント

従来のヒューマノイドの股関節機構は Fig.1 左図のように左右それぞれの足にヨー、ロール、ピッチの回転軸が一点で交わるよう三つの回転アクチュエータを配置した球面ジョイントにより構成され、合計6自由度となっている。この球面ジョイントはヨー、ロール、ピッチ角の回転がそれぞれ干渉しないアクチュエータで実現されるため回転角度の計算が容易となる。

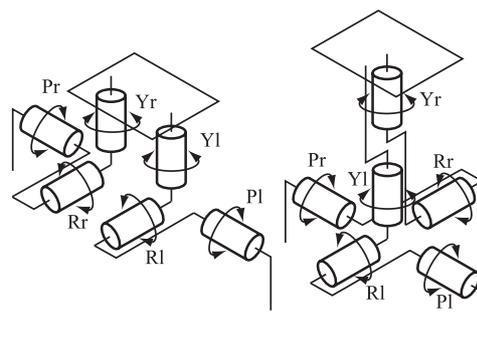


Fig.1 DOFs arrangement of hip joint

人間の股関節が持つ自由度も左右それぞれの足について3自由度の球面ジョイントであり合計6自由度であるがこの他に腰関節として別に3自由度を持つ。最近開発されたヒューマノイドには股関節のほか腰関節として1自由度または2自由度を有するものも存在するが、多くはアクチュエータ数を減らし軽量化を図るため腰関節の自由度を持っておらず左右それぞれに

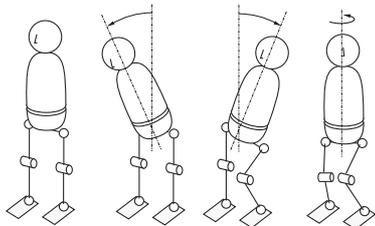


Fig.2 Bending motion of the upper half body with normal hip joint

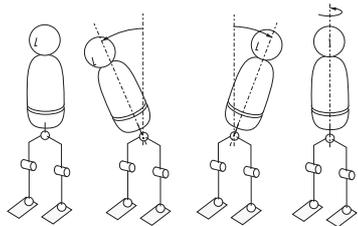


Fig.3 Bending motion of the upper half body with double spherical hip joint

球面ジョイントを配置している．この自由度配置により以下のような問題が生ずる．

- 上体を左右に傾けるまたは鉛直軸周りに回転させるためには Fig.2 のように膝，足首を協調して動かす必要がある．
- 歩行動作の際に上体を使ってバランス制御を行う必要があるため常に膝を曲げたまま歩行しなければならない．
- 常に膝を曲げた姿勢を保つには膝に高トルク出力が要求され膝のアクチュエータに大きな負担がかかる．
- 腰関節の自由度を新たに増やすことで解決するが重量，体積がともに増加しその上制御が複雑化してしまう．

そこでアクチュエータ数を増加させること無く上記の問題を解決するための股関節の機構として Fig.1 右図に示す二重球面ジョイントを開発した．これは2つの球面ジョイントの回転中心を一致させたものであり，球面ジョイントが2つ重なり合った機構となる．この機構により Fig.3 のように膝などを曲げることなく上体を左右に傾ける，回転させるという動作が可能となるため歩行時においても常に腰を落とした状態を保つ必要がなくなり膝を伸ばした自然な歩行が実現でき膝のアクチュエータへの負担軽減にもつながると考えられる．このようにダブルスフェリカルジョイントは自由度数は従来の股関節と同じ6自由度であるが，股関節としての機能を果たすだけでなく腰関節としての機能も併せ持つことができるためヒューマノイドの股関節機構として有効であると考えられる．

### 3. ヒューマノイドの設計

#### 3.1 設計仕様

筆者らの研究室では全身型ヒューマノイドの開発を行っている．肩，腰，膝の機構が一般的なヒューマノイドとは大きく異なり，肩に「サイバネティックショルダ」<sup>6)</sup>，腰に「二重球面ジョイント」，膝に「バックラッシュクラッチ」<sup>7)</sup>という特徴的な機構を用いている．設計は全て三次元 CAD ソフト Solid Works を用いて行いボディとなる構造体にマグネシウム合金を用いることで鋳造加工によって三次元的に滑らかな形状とすることが可能となり軽量かつ剛性の高いものとなった．また機構部品でも剛性が必要であると考えられるものについてはマグネシウム合金を利用した．全体設計図を Fig.4 に示す．ヒューマノイドの身長は約 1500[mm]，体重は約 50[kg] である．自由度配置は首関節に 3 自由度，肩関節に各 3 自由度，肘関節に各 1 自由度，股関節に各 3 自由度，膝関節に各 1 自由度，足首関節に各 2 自由度であり総自由度数は 23 自由度となっている．関節の駆動系はアクチュエータは DC サーボモータ，減速器はスライド部はボールねじ，その他はハーモニックドライブで構成される．ハーモニックドライブは他の減速器に比べてバックラッシュが小さいため正確な位置制御が可能となる．以下で各関節の機構を示す．

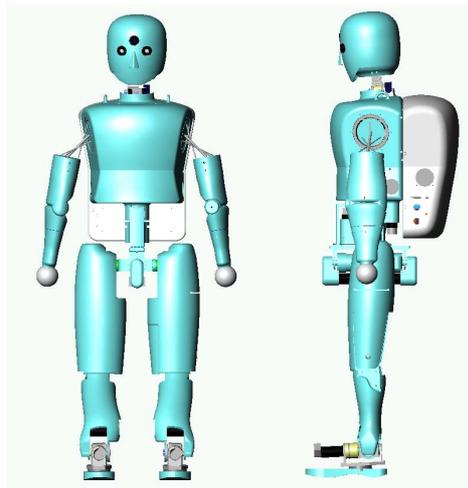


Fig.4 Whole body design of humanoid robot

#### 3.2 首関節

前後，左右，回転の 3 自由度で構成されカラーカメラ 1 台を額部に搭載しモノクロプログレッシブカメラ 2 台を眼部に搭載する．頭部の外装部品は ABS 樹脂で製作した．首関節及び頭部の写真を Fig.5 に示す．可動範囲は前後方向に  $40 \sim -10[\text{deg}]$ ，左右方向に  $\pm 45[\text{deg}]$ ，回転は  $\pm 180[\text{deg}]$  となった．

#### 3.3 肩関節・肘関節

肩関節は「サイバネティックショルダ」<sup>6)</sup>を用いており前後スライド，上下スライド，回転の 3 自由度を持つ．これまでに開発されたサイバネティックショルダは剛性は高い反面サイズが大きく，ヒューマノイドに搭載可能なサイズにするために直動機構の配置を変更し



Fig.5 Neck joint and head



Fig.6 Cybernetic shoulder



Fig.7 Elbow joint

空間を有効利用するよう改善した結果従来と比較し高さが約半分の 175[mm] に縮小された。肘関節は 1 自由度であり下腕部には六軸力センサを搭載している。腕部は肩関節，肘関節あわせて合計 4 自由度で構成される。肩関節の写真を Fig.6 に，肘関節の写真を Fig.7 に示す。肩関節の可動範囲は前後方向に  $100 \sim -80$ [deg]，上下方向に  $80 \sim -100$ [deg]，回転は  $\pm 180$ [deg] となり，

肘関節の可動範囲は伸ばした状態を  $0$ [deg] として  $0 \sim 120$ [deg] となった。

### 3.4 股関節・膝関節・足首関節

ヒューノイドの股関節用に設計した二重球面ジョイントの設計図及び写真を Fig.9 に，正面図，側面図を Fig.8 に示す。ヨー軸，ロール軸用に  $90$ [W] モータ，ピッチ軸用に  $150$ [W] モータを使用する。設計の際には可動範囲，強度，サイズの 3 点に留意した。強度が必要とされる部品はマグネシウム合金を切削加工することで剛性が高く軽量なものとなっている。可動範囲はできるだけ人間のもの<sup>5)</sup>と同程度になるようにした。可動範囲の比較を Table 1 に示す。なお角度の定義は Fig.8 の通りでありここでの可動範囲は左足を直立に保った状態で右足を各軸回りに動かした時のものである。また両足を直立に保った状態で上半身のみを動かした場合はヨー軸回りが  $\pm 90$ [deg]，ロール軸回りが  $\pm 35$ [deg]，ピッチ軸回りが  $-135$ [deg]  $\sim$   $+90$ [deg] となった。サイズと可動範囲の間にはトレードオフの関係があるためサイズをできるだけ小さくした結果人間の可動範囲を完全にカバーすることはできていないが，上半身の可動範囲はバランス制御をする上で十分であると考えられる。膝関節には「バックラッシュクラッチ」<sup>7)</sup>を用いている。足首関節は前後，左右の 2 自由度を持ち，脚部は合計 6 自由度で構成される。また足底上部に六軸力センサを搭載しており ZMP の測定が可能である。脚部全体の写真を Fig.10 に示す。膝関節の可動範囲は伸ばした状態を  $0$ [deg] として  $0 \sim 140$ [deg]，足首関節の可動範囲は前後方向に  $-50$ [deg]  $\sim$   $90$ [deg]，左右方向に  $-25$ [deg]  $\sim$   $80$ [deg] となった。

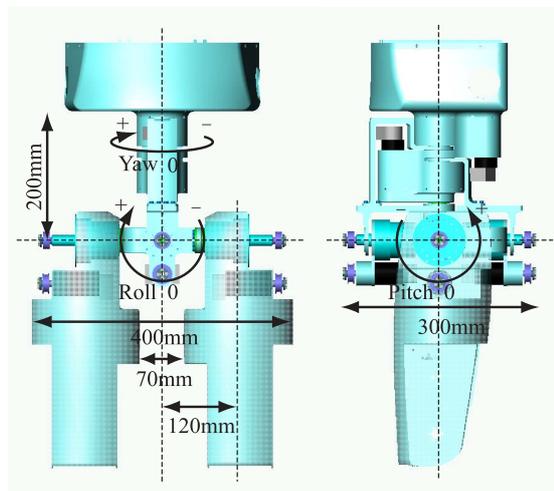


Fig.8 Drawing of double spherical joint

Table 1 Comparison of motion range

	Human	Double spherical joint
Yaw	$-35 \sim +50$ [deg]	$-35 \sim +35$ [deg]
Roll	$-50 \sim +50$ [deg]	$-20 \sim +35$ [deg]
Pitch	$-120 \sim +30$ [deg]	$-135 \sim +90$ [deg]

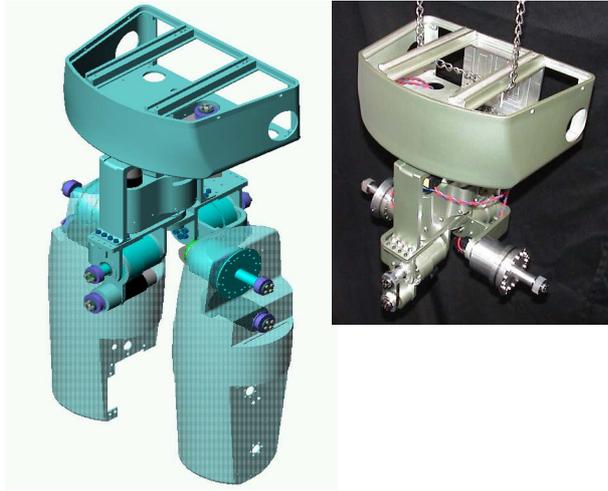


Fig.9 Design and photo of double spherical joint

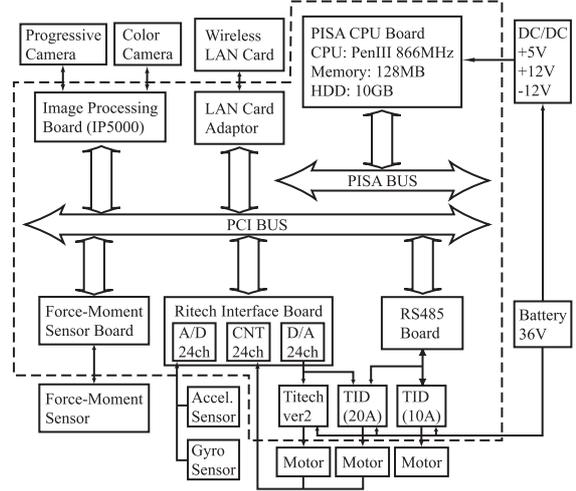


Fig.11 Hardware system



Fig.10 Knee joint and ankle joint

#### 4. ヒューマノイドのシステム構成

ヒューマノイドのシステム構成を Fig.11 に示す。制御用 PC、電源系 (バッテリー, DC/DC コンバータ) を背部に搭載し、モータドライバは配線の容易性から駆動するモータに近くなるよう腹部、背部、腕部、脚部の各所に分散配置する。制御用 PC には PISA 用バックプレーンを用いており、PISA CPU ボード (CPU PentiumIII 866MHz) が PISA バス、Ritech Interface Board (A/D, D/A, CNT), Force Moment センサ用ボード, シリアル通信 RS485 ボード, 画像処理用ボード IP5000, 無線 LAN カードが PCIバスでそれぞれ接続されている。ロボットの制御には実時間処理が不可欠であるため OS には RTLinux を用いる。RTLinux は Linux を利用してハードリアルタイム処理を行なうために機能拡張したものでありリアルタイムスケジューラとタスク管理を提供する。電源に関しては内部に搭載したバッテリーまたは外部電源で駆動することができる。またモータドライバは首の 3 自由度用に Titech Intelligent Driver (以下 TID, 10A 対応版), 肘の 2 自由度用に Titech Driver Ver.2, その他のモータには TID (20A 対応版) を用いる。全ての TID は PC とシリアル接続されておりシリアル

通信で制御モードの設定, 制御パラメータの設定などを行うことができ, モータドライバ上での局所フィードバック制御が可能である。センサ系は体幹に 3 軸加速度センサ, 3 軸ジャイロセンサ, 手先・足先にそれぞれ 3 軸加速度センサを, 足底上部・下腕部に六軸力センサを設置する。

#### 5. おわりに

本稿では新たに開発した股関節機構「ダブルスフェリカルジョイント」及び開発中の全身型ヒューマノイドについて概説した。この機構により上半身を積極的に利用したバランス制御を容易に行うことができると期待される。今後はヒューマノイドの開発を進め股関節, 膝関節の特徴的な機構を活かした歩行動作制御を行う予定である。

なお, 本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 領域「脳を創る」の支援を受けた。

#### 参考文献

- 1) 山口 他: "2 足歩行型ヒューマノイドロボットの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演論文集, pp.849-850, 1997
- 2) Kazuo Hirai et al: "The Development of Honda Humanoid Robot", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1321-1326, 1998
- 3) 黒木, 石田, 山口: "小型二足歩行エンターテインメントロボット", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1093-1094, 2001
- 4) 西脇 他: "全身行動型ヒューマノイド「H6」の開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, 2000
- 5) Mark E. Rosheim: ROBOT EVOLUTION the development of anthropotics, John Wiley & Sons, Inc. pp.229-231, 1994
- 6) 岡田, 中村: "サイバネティック・ショルダの開発 - 人間の肩の動きを模倣した 3 自由度機構 -", 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5, pp.74-82, 2000
- 7) 岡田, 後藤, 中村: "歩行ロボットの従反力運動を実現する膝関節機構", 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002