

# 二重球面ジョイントを用いたヒューマノイドの肩関節機構の開発

山本裕介 (東大) 岡田昌史 (東大) 中村仁彦 (東大,CREST)

## Development of "Double spherical shoulder joint" for humanoid robots

\*Yusuke YAMAMOTO (Univ. of Tokyo), Masafumi OKADA (Univ. of Tokyo) and Yoshihiko NAKAMURA (Univ. of Tokyo, CREST)

**Abstract**— We develop a shoulder mechanism for improving the motions of humanoid robots, double spherical shoulder joint. The double spherical shoulder joint is a six DOF joint that consists of six single DOF mechanical pairs in series with their axes intersecting at a point. The double spherical shoulder joint has large workspace, replaces two shoulder joints (six DOF) of humanoid robot, and even provides the equivalent function of yaw rotation of waist joints without actually adding them. In this paper, we explain the mechanism of double spherical shoulder joint and show results of experiments.

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

### 1. はじめに

ヒューマノイドロボットは歩行や腕動作といった単一の動作だけでなく、それらを組み合わせた特定の動作に限定されない全身動作が要求される。これまでのヒューマノイドロボットの全身自由度数は20自由度から30自由度程度となっており、さらに自由度数を増加させることによりその作業・運動性能を向上させることができると考えられる<sup>1)</sup>。また人間の動作をモーションキャプチャしたデータをヒューマノイドロボットの運動設計に用いることも行われており<sup>2)</sup>、ヒューマノイドロボットの自由度を増やすことで運動性能の向上が期待できる。しかし、自由度数を増加させることは重量、体積の拡大につながり、小型かつ軽量の機構が要求されるヒューマノイドロボットにおいては望ましくない。また自由度数が増加することで制御が複雑化するという問題も生じる。

ロボットの機構については多くの研究が行われ、これまでに数多くのロボットアームが提案されてきた。Omni-Wrist<sup>3)</sup>は少ない自由度で人間らしい動きを実現することを目的としている。サイバネティック・ショルダ<sup>4)</sup>は人間の鎖骨を含む肩部骨格系の動きを模擬することを意図しており、一定の回転中心を有しない構造のため人間に近い動きと大きな可動範囲を持つ。

ヒューマノイドロボットのように小型で軽量の機構を要求されるシステムにおいて、同じ数の自由度の中でより有効な行動を生み出す機構の設計論を与えることは今後のロボット開発において有益である。本研究では自由度の数を変えずにさらに多くの役割を果たし、作業領域を広げる機構として、二重球面ジョイント<sup>5)6)</sup>を用いた肩関節機構を開発した。以下では二重球面ジョイントの機構及び開発した肩関節機構について述べる。

### 2. 二重球面ジョイント

一般に、双腕型ロボットはFig.1の左図のようにベースに対して独立した2つのマニピュレータによって実現される。このロボットの作業領域は上から見るとFig.1の右図の斜線部で表される。

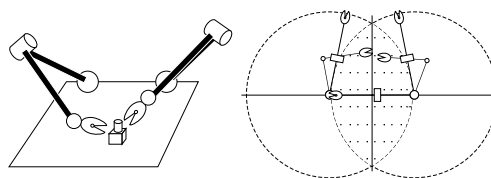


Fig.1 Two arms robot and its reachable workspace

これよりロボットの腕の長さ比べ両腕での作業領域は小さなものとなる。作業領域を大きくする方法としてベース全体を回転させるアクチュエータを設けることが考えられるが、これは自由度を増やし重量、体積の拡大につながる。軽量化・小型化を必要とするヒューマノイドロボットに対して自由度を増やすことは望ましくない。

そこで自由度の数を変えずに上記の問題を解決するため、肩関節機構として「二重球面ジョイント」を採用する。二重球面ジョイントとは、Fig.2のように2つの球面ジョイントの回転中心を図の点Aで一致させた機構である。この二重球面ジョイントをFig.3の左図のように用いて、双腕型ロボットを構成する。このときロボットの作業領域はFig.3の右図のようになり、Fig.1に比べて極めて大きくなる。

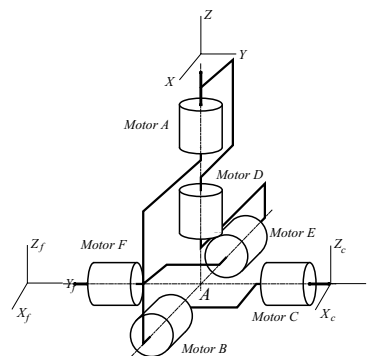


Fig.2 Double spherical joint mechanism

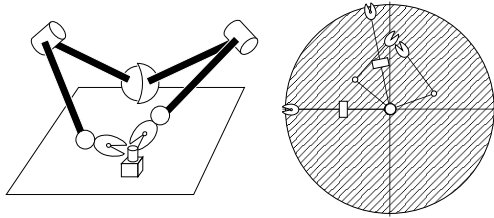


Fig.3 Two arms robot with double spherical shoulder and its reachable workspace

二重球面ジョイントをヒューマノイドロボットの肩関節機構として用いることで、従来の肩関節機構と同じ数の自由度のもと以下に示す特徴を持つ。

作業領域の大型化 より大きな作業領域が得られ、多様な動作を生み出すことができる。

逆運動学問題の簡単化 両腕で物を掴んだ状態での両腕が構成する閉リンク系の拘束が、二重球面ジョイントを用いた肩関節機構においては2つの球面ジョイントの回転中心の一致の3自由度の拘束となる。そのため逆運動学問題が簡単化され、ロボットは手先位置を胴体回りに自由に回転できる。

腰関節のヨー回転機能 腰に自由度を増やすことなく鉛直軸回りに上半身を回転するといった腰関節のヨー回転機能を持たせることができる。これにより軽量かつ小型なヒューマノイドロボットの設計が可能である。

制御の簡単化 ロール、ピッチ、ヨー軸の回転が独立なアクチュエータによって駆動されるため、制御が容易である。

### 3. 肩関節機構の設計

#### 3.1 設計仕様

二重球面ジョイントを用いた肩関節機構の設計を3次元CADソフトSolid Worksを用いて行った。Fig.4に写真を示す。腕は模擬的なものを使用している。Fig.4に示すように6つの回転軸が一点で交わっている。こ

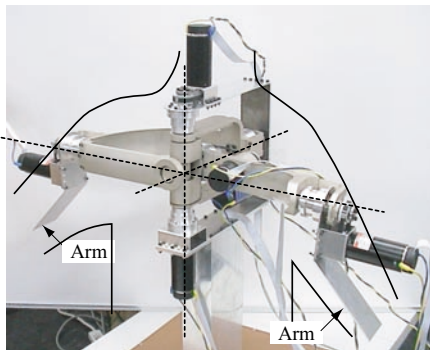


Fig.4 Photographs of the double spherical shoulder

こでは、設計において主に以下の点に留意した。

- リンクの干渉を避け、広い作業領域を得る

- 高剛性を実現する
- 小型化・軽量化

二重球面ジョイントではリンク間の干渉があり、可動範囲が小さくなる傾向が強い。このため出力軸やアクチュエータの干渉を避けてアクチュエータや減速機を配置し、左右の肩関節のリンク部は非対称な部品にした。また3次元CADソフトを用いることにより、リンクの形状を3次元形状の部品に設計し高剛性化を図った。

可動範囲はロール軸回りに約 $\pm 45[\text{deg}]$ 、ピッチ軸回りに約 $\pm 90[\text{deg}]$ 、ヨー軸回りに約 $+50 \sim -30[\text{deg}]$ となった。ここでの角度の定義はFig.5の通りであり、両腕を同じように持ち上げたり、前方に出したり、鉛直軸回りに回したときの右腕のものである。この設計ではロール軸回りの可動範囲が従来のロボットの肩関節に比べて小さくなってしまっているが、腕部をピッチ軸に対して斜め $45[\text{deg}]$ 傾けて取り付け、ある角度以上に腕を上げるためには手先の姿勢を変えることで、腕を真下に下げた状態から真上に上げた状態に持ち上げることができる。人間の腕もこれと同じような動きをするため人間と同じ可動範囲は確保されている。

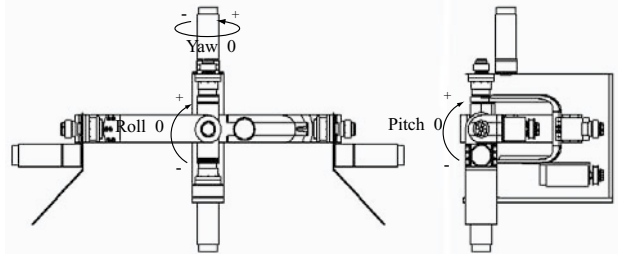


Fig.5 Definition of the joint angles

二重球面ジョイントは直列リンク構造となり片持ち梁を持つ傾向が強く剛性を確保することが難しい。本機構ではリンクの構造を工夫し3次元形状リンクを用いることで片持ち支持部を減らし、上下方向に軸を通すことで高剛性化を実現した。剛性が必要とされるリンクの部品はマグネシウム合金を切削加工した一体型の部品を用いた。これにより機構全体の部品点数を減らし、剛性が高く軽量なものとなっている。

さらにヒューマノイドロボットの胴体の中に肩関節の駆動部を収納することを目指し、Fig.6のように高さが約225mm、両腕の取り付け部間が350mm、奥行きが約240mmと小型化した。これはヒューマノイドロボットに搭載可能なサイズであり、肩関節の後ろの背中に当たる部分にPC、バッテリー等の電源系を配置できる設計となっている。

アクチュエータはMAXON社のエンコーダ付きDCサーボモータ(RE $\phi 35[\text{mm}]$ , グラファイト, 90[W])を用い、減速機は減速比1:100のハーモニックドライブを用いた。モータからハーモニックドライブへの駆動力の伝達にはタイミングベルトを用いた。

#### 3.2 モータドライバの開発

ロボット駆動用モータドライバとしてTMC1コントローラ/TMD1ドライバを開発した。このモータドライバはプロセッサSH-2を内蔵しておりエンコーダ値

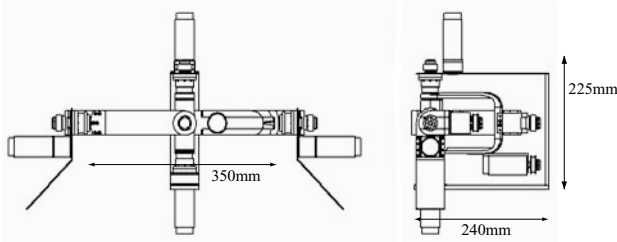


Fig.6 Size of the double spherical shoulder

を入力することでモータドライバ上で PD 制御が可能であり, 1 枚のモータドライバで 2CH のモータを制御することができる仕様である. またシリアル通信の規格の一つである RS232C により外部より 1[ms] で目標値を入力できるようになっている. ヒューマノイドロボットには大きなトルクを必要とするため耐出力を電流 20[A] としている. この写真を Fig.7 に示す.

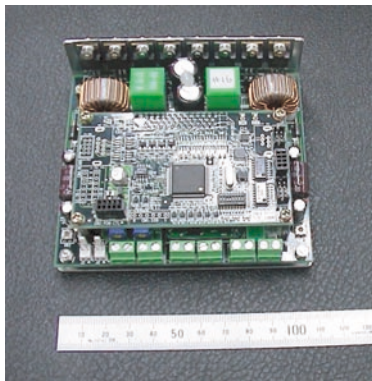


Fig.7 TMC1/TMD1 motor driver

#### 4. 制御実験

制御実験においては目標角度に対する追従実験を行った. 目標角度をあらかじめいくつかの姿勢で与えておき, これらの値を直線で補間した後にさらに 2 次のローパスフィルターを施すことで滑らかな時系列の目標角度データを得た. ここでは目標角度指令値とエンコーダの値の差を入力  $u$ , 状態変数を  $x$ , モータに流す電流を出力  $y$  とする線形システムとし PD 制御によって制御を行い, 二重球面ジョイントを用いた肩関節機構の動きを検証した.

右腕をロール, ピッチ, ヨー軸回りに動かしたときの目標角度に対する関節角度の応答を Fig.8 に示す. Fig.8 から右腕はロール軸回りに約  $\pm 0.7[\text{rad}]$ , ピッチ軸回りに約  $+1.3 \sim -1.1[\text{rad}]$ , ヨー軸回りに約  $+1.3 \sim -0.5[\text{rad}]$  回転しており, 3 章で述べた可動範囲に近い値が得られている様子が見られる. 目標姿勢に制御されたリンクは外力を加えてもひずむことなく姿勢を保持した. これは, 3 次元形状を用いたことによる振動の減衰効果とリンク強度の向上から実現されたものである.

また Fig.9 に示すような姿勢を補間することで得た時系列の目標角度データを与えると, 肩関節は目標角度によく追従し多様な動作が生成できることを確認した.

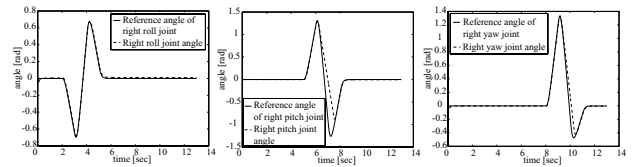


Fig.8 Reference and joint angles of right arm

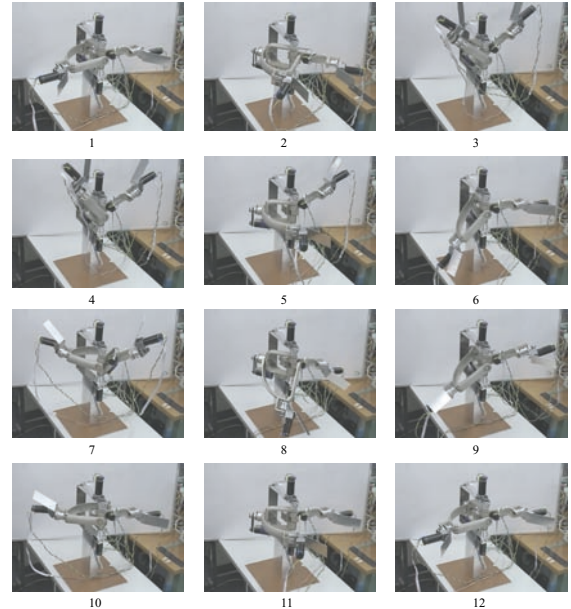


Fig.9 Snapshots of motion of the experimental system

#### 5. おわりに

本稿では新たに開発した二重球面ジョイントを用いた肩関節機構について概説した. 今後は開発した肩関節機構を搭載したヒューマノイドの開発を進める予定である.

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) 稲葉, 長嶋, 水内, 但馬, 吉海, 國吉, 井上: "脊椎を持つ全身腱駆動ヒューマノイド「腱太」の開発-脊椎を持つ全身腱駆動ヒューマノイド「腱太」(その1)-", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿, 3A11, 2001.
- 2) 栗原, 鈴木, 丹下, 山根, 中村: "リアルタイムモーションキャプチャを用いたヒューマノイドのオプティカルコックピット", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2A1-L02, 2002.
- 3) M.E.Rosheim: Robot Evolution: The Development of Anthropoids. JOHN & SONS, INC., 1994.
- 4) 岡田, 中村: "サイバネティック・シヨルダの開発-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.690-698, 2000.
- 5) 篠原, 伴, 後藤, 稲色, 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", 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿, 1C16, 2002.
- 6) Y.Nakamura et al: "Mechanical challenges for further humanoid robot evolution", Proc. The 3rd IARP International Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, 2002