

機構的優位性を持つヒューマノイドの身体進化

Body evolution of humanoid robot with mechanical advantages

清水洋介 森田堅次郎 岡田昌史 (東工大)

*Yosuke SHIMIZU, Kenjiro MORITA and Masafumi OKADA (Tokyo Inst. of Tech.)

Abstract—In this research, we design a humanoid robot to simplify the motion control. This humanoid has mechanical advantages of the double spherical hip joint and the ankle passive joint. The double spherical hip joint enables the decouple of motion of the leg and the movement of the posture of the upper-body to be set independently by intersecting the rotation axes of six hip joints in one point. On the other hand, the ankle passive joint enables the change of arrangements of the motor, motor driver and gear, which causes the mass reduction of the leg and the shift of the center of gravity to a higher position. Advantage of double spherical hip joint is clarified by required actuator motion for upper-body swing comparing conventional mechanism.

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

1. はじめに

ロボットの運動は、機構と制御の組み合わせによって生成されると考えられる。そのため、ロボットの機構と制御の親密さは深く、機構設計と制御系設計は同時に行われるべきと言える。しかし、従来のロボットの研究では制御系設計が主体であり、一般に機構は先にあるものとされ、その上で制御則が開発されてきた。その結果、機能が追加されると単純にアクチュエータ等が追加され制御則のみが複雑化する。そこで本研究では、参考文献 [1][2] と同様にロボットの制御の観点から、機構についての改良に焦点を当て、ヒューマノイドロボット制御の改良を目的とした機構開発を行う。ヒューマノイドロボットにおける機構の改良すべき点としては、アクチュエータの配置の工夫によって新たな機能を組み込むこと、あまり効果のないアクチュエータを削除することなどが考えられる。具体的なアクチュエータの配置の工夫として Fig.1 に示される股関節を構成する 6 つの関節軸が一点で交差する二重球面股関節が提案されている [3][4]。二重球面股関節を用いると、アクチュエータの追加なしに上半身・脚部の運動を独立して設定できるようになる。このことから上半身の揺動を積極的に用いた制御則など制御の容易性が向上すると考えられる。ここでは特に参考文献 [3] で開発されたヒューマノイドについて焦点を当て、その改良機を設計・試作し、二重球面股関節の有効性を示すことを目的とする。また、今回設計・試作したヒューマノイドの機構的特徴としては他に、足首関節の一つからアクチュエータを削除することで足先の重量を低減化し身体の重心バランスの改良を計ること、つま先機構を導入するという二点をあげている。つま先機構については参考文献 [1][8][9] でも用いられているが、地面との接触を確実にし、よりスムーズな歩行動作の実現に寄与することが考えられる。

2. ヒューマノイドロボットの設計・試作

2.1 機構設計

Fig.2 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。設計の要点は以下の通りである。

1. 可動範囲を拡大した二重球面股関節

設計・試作したヒューマノイドの脚部の自由度配置を Fig.3 に示す。Fig.4 に示されるように、股関節を正面から見ると J_{r4} , J_{r5} , J_{l4} , J_{l5} は鉛直軸から 45[deg] 傾けて取り付けられており、左右の脚はそれぞれ上半身と前後に分かれて接続されている。このように二重球面股関節の構造を改善することで、歩行時の開脚角度が参考文献 [3] のヒューマノイドと比較して大きくなるように改善され、さらに後方に脚を充分に開くことができな

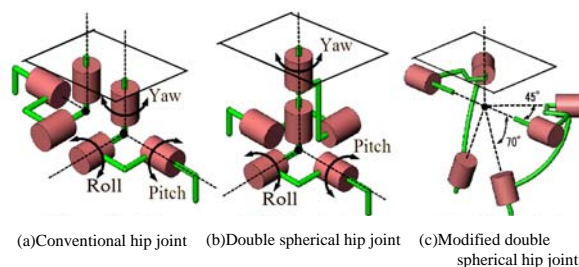


Fig.1 Humanoid Hip Mechanisms[3]

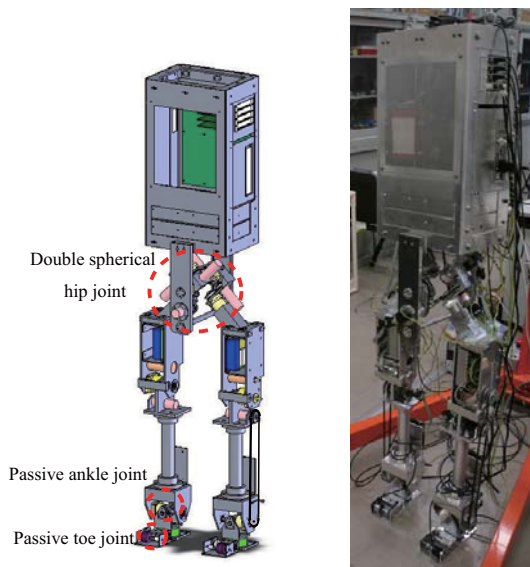


Fig.2 Designed Humanoid

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) \times 2 60W DCMotor \times 8 |

かった問題点も改善された。

2. 足首正面方向の受動関節

足部ローリングに使用する関節である Fig.3 の J_{r1}, J_{l1} を Fig.6 のように受動関節とし、足部ピッチングに使用する関節のモータを膝に配置することで、脚部末端質量の低減化と重心配置の改善を図った。足首受動関節を持たせることで、モータ、モータドライバ、減速機を足首部から除去でき、1[kg] 相当の軽量化が成された。また、重心配置に関しては Fig.5 のようになっており、参考文献 [3] におけるヒューマノイド (Fig.5 左) では上半身と脚部の質量配分比が上半身 0.26, 脚部 0.74 であったのが、設計・試作したヒューマノイドでは上半身 0.39, 脚部 0.61 となっており脚部末端質量の低減化による重心位置の改善がなされたと考えられる。

3. つま先受動関節の導入

今回、足先につま先受動関節を導入した。ヒューマノイドへのつま先受動関節の導入は参考文献 [1][8][9] でも行われている。つま先受動関節は重量増加を伴わない機構の追加であり、地面との接触を確実にするため歩幅の増大、スムーズな歩行制御の実現に効果的な機構であると考えられる。本研究では参考文献 [1] と同様にフリーな受動関節によるつま先機構を導入した。

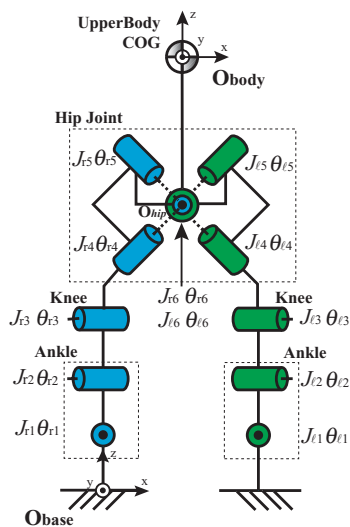


Fig.3 Distribution of Degree of Freedom

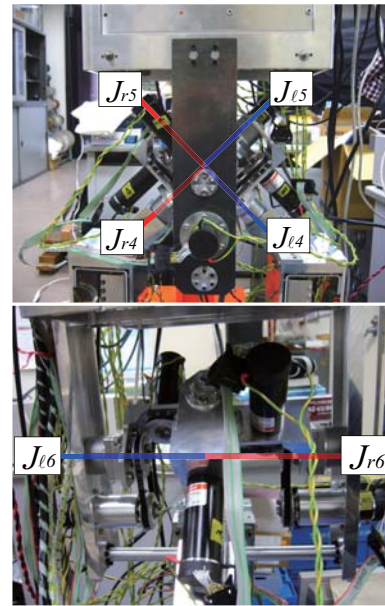


Fig.4 Hip Structure

2.2 制御系設計

今回設計・試作したヒューマノイドの制御系における特徴として、モータドライバとサーバ間の通信にメモリ共有型ネットワーク (Cu-net) を採用していることがあげられる。ヒューマノイドロボットに対してメモリ共有型ネットワークを用いた通信は、これまでに参考文献 [10] において通信の高速化の観点から採用されている。この通信方法は通信の不具合 (パケットロスなど) に対してロバストであり、特に配線が長くなる大型のロボットに極めて適したものである。そこで、これまで用いてきたモータドライバに Cu-net を

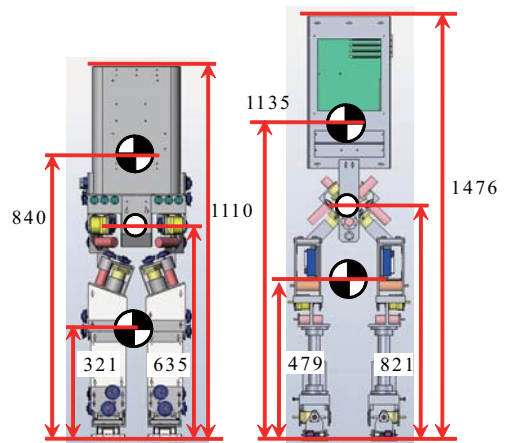


Fig.5 Arrangement of center of gravity

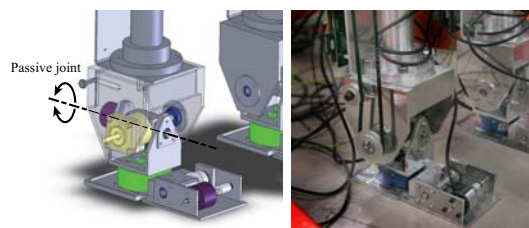


Fig.6 The Passive Joint at the ankle

搭載した新たなモータドライバを開発し、これを用いた。これにより、1msecの通信速度を実現しており運動のリアルタイム制御に十分な通信速度であると考えられる。

3. 運動学解析

3.1 逆運動学解析

股関節中心を基準としてかかとと位置と姿勢を目標軌道として設定できるように、設計・試作したヒューマノイドの逆運動学解析を行う。ヒューマノイドの脚部は、片脚についてかかとを地面に固定して考えると、6自由度空間マニピュレータとして逆運動学の厳密解の導出が可能である。さらにこのヒューマノイドについては、二重球面股関節を有することから連続する3つの関節の回転軸が一点で交わるため、Pieperの解法[6][7]を用いて逆運動学の厳密解の導出が可能な構造である。以上のことからまず、Fig.7のように座標系を設定し、各リンク間の座標変換行列を導出する。

$$\begin{aligned} \Sigma_0 &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_{hip} \Sigma_{hip} \\ &= {}^0T_{hip} \Sigma_{hip} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 T は同次座標変換行列を意味する。続いて、Pieperの解法を用いて逆運動学の厳密解を導出する、Pieperの解法では、回転軸が一点で交差する連続する3つの関節は球面運動を行うため、姿勢変化にのみ影響を与えるという点を用いる。すなわち、Fig.7で、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の変化は出力点である股関節中心の位置と姿勢の両方に、 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ の変化は股関節中心の姿勢のみに変化を与える。よって、目標姿勢・位置として設定したかかと座標系 Σ_0 と股関節中心座標系 Σ_{hip} の間の座標変換行列 ${}^{base}T_{hip}$ の位置ベクトル成分から $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ が求まり、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の解と ${}^0T_{hip}$ の姿勢行列成分から $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ を求めることができる。実際に求めた厳密解は以下ようになる。

$$\theta_1 = \text{atan2}(g_1, g_2) - \text{atan2}(\sqrt{g_1^2 + g_2^2 - p_{tz}^2}, p_{tz}) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(-f_2, f_1) + \text{atan2}(\sqrt{f_1^2 + f_2^2 - p_{ty}^2}, p_{ty}) \quad (3)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left[\frac{r - (\ell_{Uy}^2 + \ell_{Uz}^2 + \ell_L^2)}{2\ell_{Uy}\ell_L} \right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \text{atan2}\left(-R_{I13}, \frac{R_{I23} - R_{I33}}{\sqrt{2}}\right) \\ &\quad - \text{atan2}\left(\sqrt{R_{I13}^2 + \frac{(R_{I23} - R_{I33})^2}{2}}, 0\right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\theta_5 = \sin^{-1} \left[\frac{R_{I23} + R_{I33}}{\sqrt{2}} \right] \quad (6)$$

$$\theta_6 = \sin^{-1} \left[R_{I12}S_4 - \frac{R_{I22} - R_{I32}}{\sqrt{2}}C_4 \right] \quad (7)$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ell_{Uy} \sin \theta_3 \\ \ell_{Uy} \cos \theta_3 + \ell_L \\ \ell_{Uz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_3 \\ f_1 \sin \theta_2 + f_2 \cos \theta_2 \\ f_2 \sin \theta_2 - f_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} p_{tx} \\ p_{ty} \\ p_{tz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \cos \theta_1 - g_2 \sin \theta_1 \\ -g_3 \\ g_1 \sin \theta_1 + g_2 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} R_I &= {}^3R_6 {}^6R_{XYZ} \\ &= \begin{bmatrix} R_{I11} & R_{I12} & R_{I13} \\ R_{I21} & R_{I22} & R_{I23} \\ R_{I31} & R_{I32} & R_{I33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

である。ここで、 ℓ_{Uy}, ℓ_{Uz} は座標系 Σ_3 から座標系 Σ_4 に対しての y 軸方向、 z 軸方向への並進成分、 ℓ_L は座標系 Σ_2 から座標系 Σ_3 への y 軸方向並進成分、 3R_6 は座標系 Σ_3 から座標系 Σ_6 への回転行列、 ${}^6R_{XYZ}$ は上半身を Σ_{hip} において x 軸回りに θ_x, y 軸回りに θ_y, z 軸回りに θ_z 回転させたときの回転行列である。

求めた厳密解の検証を、実機実験にて行った。具体的には足部が半径5cmの円軌道を描くように目標軌道を与えた場合について解の検証を行ったところ、目標軌道的一致を確認した。実験の様子をFig.8に示す。

3.2 二重球面股関節の優位性

また、これまでのヒューマノイドの股関節の配置では両脚を設置した状態で上半身を揺動させようとすると、両脚にある全てのアクチュエータの関節角度を再計算する必要があった。しかし、二重球面股関節を用いたヒューマノイドにおいては、上半身の揺動に関わる x, y, z 軸の各回転成分は股関節のアクチュエータの回転角を求める厳密解にしか含まれていない。両足接地状態で上半身を揺動させるシミュレーションを行った際の、アクチュエータの動きはFig.9のようになる。すなわち、上半身の揺動に際して右足に関して

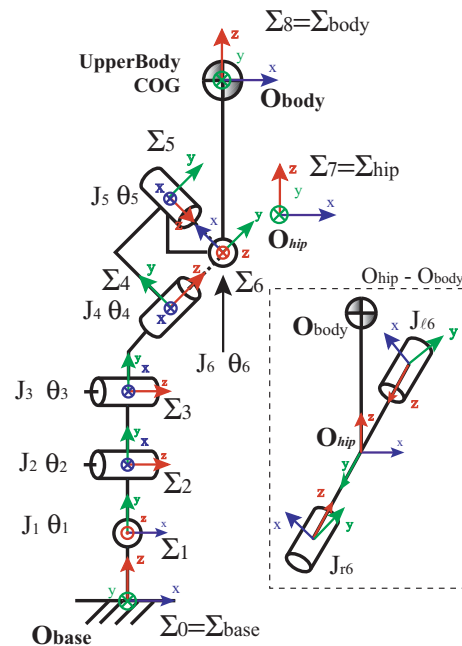


Fig.7 Right Leg

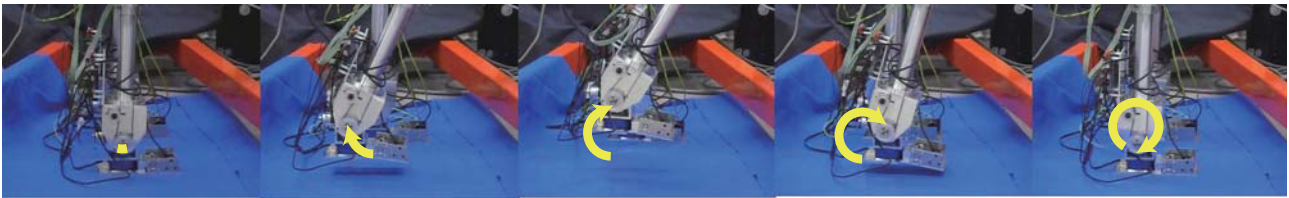


Fig.8 Foot Lift Up

言えば $\theta_{r4}, \theta_{r5}, \theta_{r6}$ のみを計算すればよく、左足に関しても同様に股関節の回転角 $\theta_{\ell4}, \theta_{\ell5}, \theta_{\ell6}$ だけの計算でよい。このように股関節以外の脚部の回転角である $\theta_{r1}, \theta_{r2}, \theta_{r3}, \theta_{\ell1}, \theta_{\ell2}, \theta_{\ell3}$ には影響を与えないことから、両足接地状態での脚部と独立した上半身の揺動を実現できていることがわかる。このことから、上半身の揺動を用いた安定化制御が容易になることが考えられる。

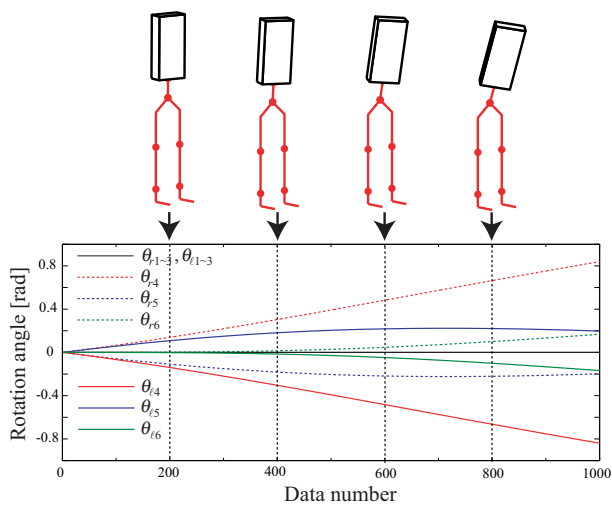


Fig.9 Motion of upper body

4. おわりに

本研究の成果は以下の通りである。

- 二重球面股関節および足首受動関節の機構的優位性を有するヒューマノイドの設計・試作を行った。
- 設計・試作したヒューマノイドについて、Pieperの解法を用いて逆運動学の厳密解の導出とその検証を行った。
- 従来の股関節と比べて、二重球面股関節を用いることで上半身の動きの制御が容易になることが確認された。

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)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] 小鹿幸司, 岡田昌史, 岩附信行: "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", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05(2005), 1A1-S-045.
- [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] Kajita, S. and Tani, K., "Experimental study of biped dynamic walking," IEEE Control Systems, Vol.16, No.1, pp.13-19, February 1996
- [6] John J. Craig, 三浦宏文, 下山勲訳: "ロボティクス - 機構・力学・制御-", 共立出版.1991.
- [7] 吉川恒夫著: "ロボット制御基礎論", コロナ社.1988.
- [8] Ramzi Sellaouti, Olivier Stasse, Shuuji Kajita, Kazuhito Yokoi and Abderrahmane Kheddar, "Faster and Smoother Walking of Humanoid HRP-2 with Passive Toe joints", Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems.
- [9] 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
- [10] 山本江, 杉原知道, 中村仁彦"小型ロボットのためのポータブル制御ユニット AnimatoCoreの開発" 第23回日本ロボット学会学術講演会, 2005