

ヒューマノイドロボット才華3のアーム開発

Development of the Arms for the Humanoid Robot Saika-3

古田友之*, 近野敦*, 内山勝*

Tomoyuki Furuta*, Atsushi Konno*, Masaru Uchiyama*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード： ヒューマノイドロボット (Humanoid Robot), 機械設計 (Mechanical Design), ロボットアーム (Robot Arm), 冗長マニピュレータ (Redundant Manipulator), 双腕 (Dual-Arm)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 内山研究室
古田 友之, Tel.: (022)217-6973, Fax: (022)217-6971, E-mail: furuta@space.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

これまでに、多種多様のロボットが研究、開発されてきた。だが、それらのほとんどが、特定の作業の遂行を目的として造られた、汎用性に乏しいものであった。ロボットに求められるものは、汎用性や機能性よりも、信頼性や低価格の実現であった。しかし近年、エレクトロニクスの進歩と共に、高い汎用性を持つロボットの研究も盛んに行われている。その主たるものがヒューマノイドロボットである。

筆者はヒューマノイドロボットを、様々な作業を人間に代わって実現できるロボット、として考えている。よってヒューマノイドロボットには、以下の点が要求される。

- 人間のために整備されたインフラストラクチャーを、そのまま利用できる。
- 視覚を持ち、人間とのコミュニケーションが期待できる。

- 形態が人間に近く、機能や動作が直感的に分かりやすい。
- バッテリーを搭載可能とし、遠隔操作が可能である。

これまで、多くのヒューマノイドロボットが開発されてきた。しかし、全身を備えたヒューマノイドロボット^{1, 2)}は、その重量が100 [kg]を超え、サイズも重量も大きかった。実験用プラットフォームとしての扱いやすさ、人間との共同作業への応用を考えると、より軽量のヒューマノイドロボットの実現が望まれていた。様々な作業が可能となるヒューマノイドロボットの開発は、機能や形態が複雑かつ巨大化し、困難であった。

しかし、近年のエレクトロニクスの進歩はめざましく、高機能でかつサイズも縮小化されながら、低価格を実現している。長阪らは、電源を外部に置くものの、従来より大幅に軽量化(33 [kg])したヒューマノイドロボットH5を開発した³⁾。さらに筆者らは、H5の軽量という長所を継承しつつ、

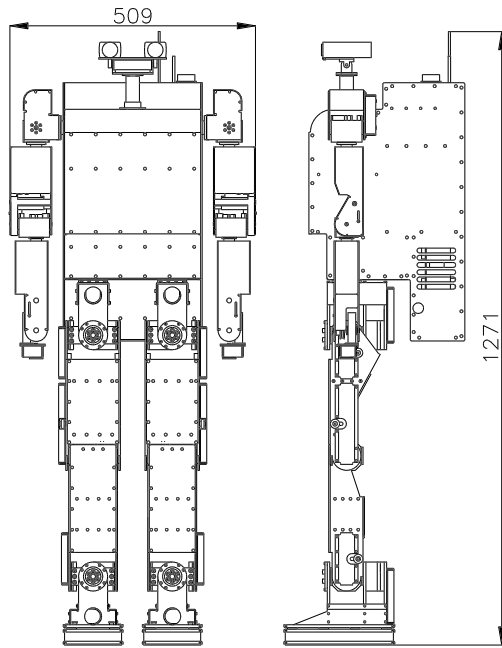


Fig. 1 Design of the full body of Saika-3.

バッテリー搭載型としたヒューマノイドロボットオ
 華3を開発した⁴⁾。西脇らもH5を基にバッテリー
 搭載型としたH6⁵⁾を開発した。

ヒューマノイドロボットオ華3のCADモデルを
 Fig. 1に示す。オ華3の重量配分は、胴体が18.5 [kg]、
 片脚が7.7 [kg]、頭部が1.0 [kg]である。2 [kg]、5 [Ah]
 のバッテリーを、2個1組として3組(6個)搭載可
 能で、最大重量は12 [kg]、容量は15 [Ah]となる。
 脚部は片脚、6自由度を持ち、頭部は2自由度を持
 つ。また、胴体部には、コンピュータ、ハードデ
 ィスク、モータドライバ30台、6軸ジャイロスコ
 プ、ビデオ送信機、フィールド多重化回路、バッテ
 リー、DC/DC変換器、無線LANが搭載されてい
 る。バッテリー駆動による遠隔操作が可能な一方、
 外部電源による駆動も可能である。

ヒューマノイドロボットの性能は、主に以下の
 ようなパラメータによる。

- 脚部の移動能力
- 腕部やハンドの作業能力
- 視覚分解能

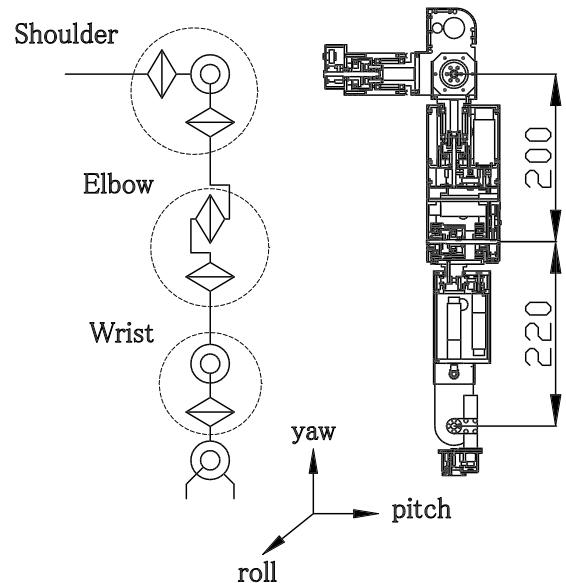


Fig. 2 Design of the arm of Saika-3.

- 搭載コンピュータの性能
- 駆動可能時間

オ華3にも、実用性の高いアームの開発が要求
 される。本論文では、オ華3のアームの開発につ
 いて、詳細に述べて行く。

2. アームの設計要求

ヒューマノイドロボットのアームには、様々な
 環境において、人間と同等の作業が可能であるこ
 とが求められる。よって、アームを設計する上で
 は、必要な能力を見積もり、最低その能力を上回
 る必要がある。

オ華3では、軽量、小型、かつ低価格であることを
 目指し、アームの設計においては、オーバース
 ックによる重量増とならないよう、注意を払った。

2.1 自由度配置

アームの自由度配置をFig. 2に示す。アームの
 自由度は人間に近い動作を実現させるため、合計

Table 1 Specifications of reduction gears.

Joint	Type	Ratio	Max. torque	
			Continuous	Momentary
#1, #2	Harmonic	1/100	11.0 [Nm]	54 [Nm]
#3, #4	Harmonic	1/100	4.5 [Nm]	22 [Nm]
#5, #6	Planetary	1/84	0.2 [Nm]	0.3 [Nm]
#7	Planetary	1/67	0.3 [Nm]	0.45 [Nm]

7自由度とした。自由度の配分は、肩に3自由度、肘に2自由度、手首に2自由度である。自由度配置は、人間を参考にした。人間の腕とは、手首の1自由度が違っている。

2.2 可動範囲

ロボットアームに、人間と同等の作業性を要求するには、人間と同等か、それ以上の可動範囲を持つ必要がある。可動範囲を出来る限り広げること、アームの能力を最大限に引き出すことができる。

腕を垂直に下ろした姿勢を基本姿勢として、以下のように可動範囲に関する仕様を決定した。

- 肩がロール軸回りに約+100 [°]、ピッチ軸回りに約-90 ~ +180 [°] 上げられる。
- 肘がピッチ軸回りに、約+130 [°] 曲げられる。
- 手首がロール軸回りに、約± 90 [°] 曲げられる。
- 各軸方向回転は、約± 90 [°] 回転できる。

2.3 必要最大トルク

各出力軸に必要な最大トルクを概算した。各出力軸が、この必要最大トルクを出力できるように設計を進めた。概算による、各出力軸の必要最大トルクは、以下の通りである。

- 肩ロール、ピッチ軸 最大約8 [Nm]
- 肩ヨー、肘ピッチ軸 最大約3 [Nm]
- 肘ヨー、手首ロール 最大約1 [Nm]
- 手首ヨー軸 最大約0.5 [Nm]

Table 2 Specifications of motors.

Joint	Power	Max. torque	
		Continuous	Stall
#1, #2	20 [W]	28.67 [mNm]	241.0 [mNm]
#3, #4	20 [W]	28.67 [mNm]	241.0 [mNm]
#5, #6	4.5 [W]	5.44 [mNm]	34.7 [mNm]
#7	3 [W]	3.08 [mNm]	10.8 [mNm]

なお、片腕の重量を、約4.0 [kg]として、必要トルクを概算した。

3. アーム設計の詳細

設計にあたり、アームを肩部、上腕部、前腕部の、三つに分別した。これは、あらかじめ各部をモジュール化しておくことで、改良を容易にするためである。才華3に取り付けられるアームには、小型、軽量であることが望まれる。しかし実際には、用いられるモータやギヤにより、サイズはほぼ、決定される。よって、モータなどの選定には注意を要する。

前節で述べた必要最大トルクを元に、各軸に用いるギヤとモータを選定した。Table 1, 2に、各ジョイントに使用した減速器とモータの仕様を示す。

メンテナンスのしやすさ、低コストを考え、入手しやすい部品で構成する必要がある。また、配線を考えて設計する必要がある。実際には、研究プラットフォームとしての実用性に重点を置き、配線が一部アームの外を通るような設計になった。また、構造材は、可能な限り薄い金属板の折り曲げにより、箱形となるようにした。ロボットの暴走などにより、簡単に形状が歪まないよう、剛性は可能な限り高くする必要がある。

以下に、アーム設計の詳細について、述べて行く。

3.1 肩部の設計

肩部には、肩関節のロール軸、ピッチ軸が配置される。肩部の図面を Fig. 3 に示す。内部空間は、モータとハーモニックギヤにより占められ、密な

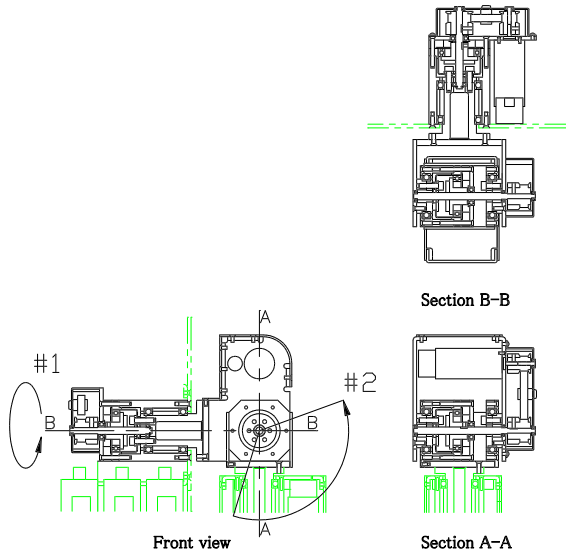


Fig. 3 Design of the shoulder of Saika-3.

構造となる。また、形状をできるだけ箱形とした。これにより、十分な剛性を得ている。

モータの回転は、タイミングプリーで2/3に減速され、ハーモニックドライブで1/100となる。よって、全体で1/150に減速され、最大連続トルクは4.3 [Nm]、ストールトルクは36.1 [Nm]となる。また、取り付けられたエンコーダの分解能は、100 [c/t]である。エンコーダの分解能はエンコーダ単体としての分解能であり、アクチュエータ出力換算の分解能は、ハーモニックドライブの減速比倍となる。最終的なエンコーダ分解能は、1回転あたり $100 \times 150 = 15000$ パルス、つまり、0.024 [°/パルス]である。これにより、エンコーダの手先位置に換算した分解能は、約0.2 [mm]以下となる。

タイミングベルトに適切な張力を与えるため、テンショナーを設計し取り付けした。ハーモニックドライブは、非常にバックラッシュが小さい。この入力軸と出力軸の取り付けに位置決めピンを使用し、高い位置決め精度を確保している。これによりガタの無い、精度の良い制御が可能となる。その出力軸を隣接リンクに直結することで、関節を駆動する仕組みになっている。これにより、モータの配置に対する自由度を上げると共に、関節部のバックラッシュを極力小さくしている。

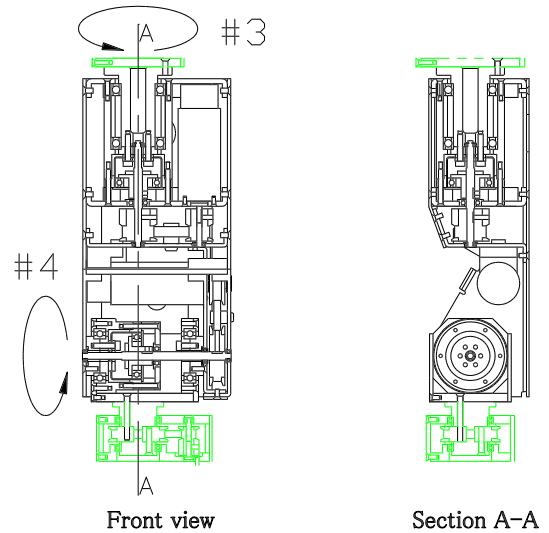


Fig. 4 Design of the upper arm of Saika-3.

3.2 上腕部の設計

上腕部には、肩関節のヨー軸、および肘関節のピッチ軸が配置される。上腕部の図面をFig. 4に示す。肩部同様、内部空間はモータとハーモニックギヤにより占められ、密な構造となる。また、形状をできるだけ箱形とし、十分な剛性を得ている。

取り付けしたモータ、エンコーダ、トルク伝達方式は肩部と同様である。よって、全体で1/150に減速され、最大連続トルクは4.3 [Nm]、ストールトルクは36.1 [Nm]となる。また、最終的なエンコーダ分解能は、0.024 [°/パルス]である。これにより、エンコーダの手先位置に換算した分解能は、約0.1 [mm]以下となる。

上腕部にもタイミングベルトに適切な張力を与えるため、テンショナーを設計し、取り付けした。また、入力軸と出力軸の取り付けに位置決めピンを使用し、高い位置決め精度を確保している。

上腕部では、肘関節の最大屈曲角度を+130 [°]程度確保する必要がある。肘部の最大屈曲時の外観をFig. 5に示す。このためモータなど、関節の駆動の障害になるものの配置が非常に難しくなる。肩や肘部には、エンコーダ付きのモータを使用する。モータ軸に対するエンコーダ取り付け位置は、製品によりばらつきがあるため、肘関節ではモ-

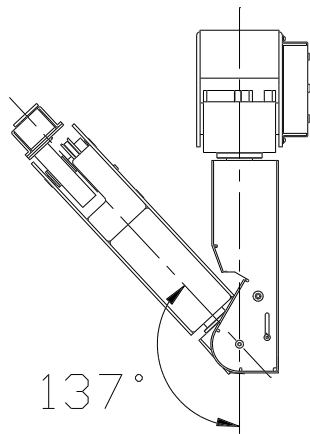


Fig. 5 Movable space of the elbow.

夕取り付け角度を、 $\pm 15 [^\circ]$ 可変となるように工夫した。

3.3 前腕部の設計

前腕部には、肘関節のヨー軸、手首関節のロール軸、ヨー軸が配置される。前腕部の図面を Fig. 6 に示す。

肘関節のヨー軸、手首関節のロールのモータの回転は、まず遊星ギヤにより $1/84$ に減速される。この後タイミングプーリにより、 $7/25$ に減速されて出力軸を駆動する。よって、全体で $1/300$ に減速され、最大連続トルクは $1.6 [Nm]$ 、ストールトルクは $10.4 [Nm]$ となる。取り付けられたエンコーダの分解能は、 $16 [c/t]$ である、最終的なエンコーダ分解能は、1 回転あたり $16 \times 300 = 4800$ パルス、つまり、 $0.075 [^\circ/\text{パルス}]$ となる。エンコーダの手先位置に換算した分解能は、約 $0.1 [mm]$ 以下となる。

手首関節のヨー軸も同様に、遊星ギヤにより $1/67$ に減速される。また、タイミングプーリにより $1/2$ に減速される。よって、全体で $1/134$ に減速され、最大連続トルクは $0.4 [Nm]$ 、ストールトルクは $1.4 [Nm]$ となる。エンコーダの分解能は、 $16 [c/t]$ であり、最終的なエンコーダ分解能は、1 回転あたり $16 \times 134 = 2144$ パルス、つまり、 $0.168 [^\circ/\text{パルス}]$ となる。

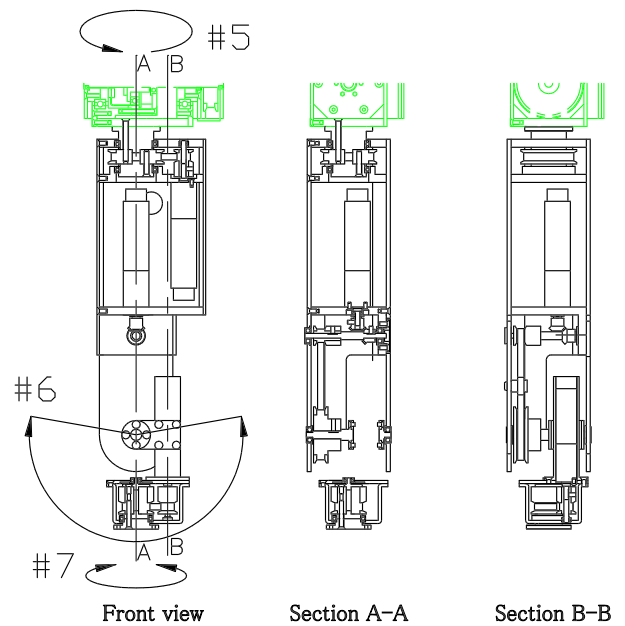


Fig. 6 Design of the forearm of Saika-3.

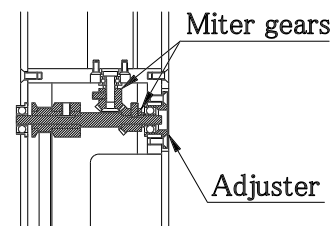


Fig. 7 Adjuster of the miter gears.

ハーモニックギヤでなく、モータ直結の遊星ギヤを用いる。また、エンコーダもモータ直結であるため、モータ部が長くなる。よって、リンクに対して、モータを直角に配置できない。したがって、手首のロール軸には傘歯車を用いて、入力軸と出力軸を直角に配置している。傘歯車は、モジュールが小さく (0.5)、バックラッシの小さいもの (約 $0.05 [mm]$) を使用した。またプーリにより、 $7/25$ に減速されるため、ギヤのバックラッシはさらに減少する。また、傘歯車の噛み合せを、調整用部材をねじで締め付けることで調整可能とした。Fig. 7 に傘歯車調整の様子を示す。これにより、傘歯車が回転に適切な歯当たりになるよう、調整できる。

4. アームの製作

以上の設計に基づき、アーム部を製作した。配線に用いた線材は、各部に流れる総電流量を算出し、適切な断面積のものを選択した。また、腕の取外しが容易になるように、配線用のコネクタを多用した。

本体に製作したアームを取り付けた外観を Fig. 8 に示す。肩部は約0.75 [kg] (胴体内部に含まれる部分を除く)、上腕部は約1.30 [kg]、前腕部は約0.77 [kg]となった、合計で、片腕は約3 [kg]である。設計値(約4 [kg])よりも軽量化が実現できたため、必要トルクの軽減が見込まれる。

減速機にハーモニックドライブを用いた関節は、ガタの無い精度の良い制御が見込まれる。一方、減速機に遊星ギヤを用いた前腕部の関節は、多少ガタを持つ。しかし、減速比の大きいプーリを取り付けたことで、ガタを減少できた。結果、動作精度の良い、小型かつ軽量なアームを製作した。

この製作したアームを用いて、簡単な動作確認を行った。実験内容は、5次補完を用いた各関節の、角度制御である。これにより、各関節の駆動を確認できた。今後、適切な制御法を研究、開発し、実験を行う予定である。

5. おわりに

本論文では、小型、軽量、高機能で、作業能力の高いヒューマノイドロボット、才華3のアーム部を設計し、製作した。また、簡単な動作確認を行った。今後、実用的な制御法を開発し、製作したアームの実用性を検証する。

現在のところ、ヒューマノイドロボットの研究は、脚部の安定した歩行制御法の確立というレベルに留まっている。アームは、まだ歩行に合わせて腕を振るぐらいの補助的なもので、歩行や視覚との全身協調型の制御法は、これから盛んに研究されて行くと思われる。

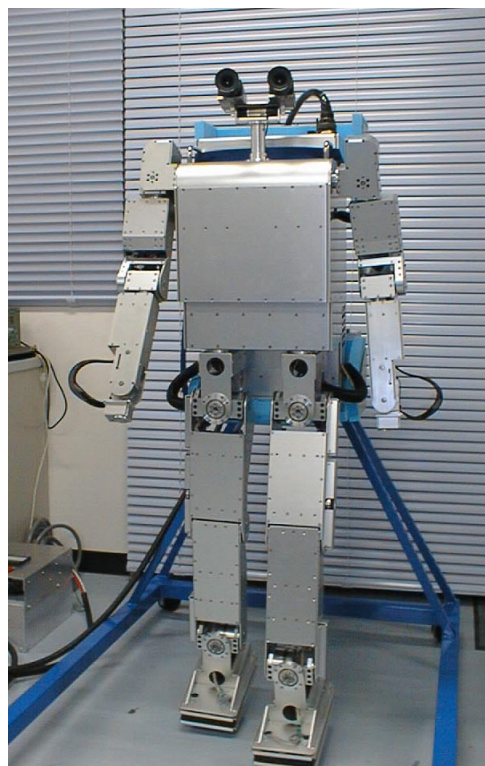


Fig. 8 Overview of Saika-3.

本研究により製作したアームは、今後様々な実験を重ね、改良点を見い出して行くであろう。

参考文献

- 1) J. Yamaguchi, A. Takanishi: "Design of Biped Walking Robot Having Antagonistic Driven Joints Using Nonlinear Spring Mechanism," In Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '97), pp. 251-259, 1997.
- 2) 広瀬, 竹中, 五味, 小澤: "人間型ロボット", 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 983-985, 1997.
- 3) 長阪, 近野, 西脇, 北川, 杉原, 稲葉, 井上: "ダイナミックヒューマノイド H5 の開発", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 837-938, 1998.
- 4) 近野, 白田, 古田, 加藤, 内山: "ヒューマノイドロボット才華3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'00 講演論文集, 2P1-79-123, 2000.
- 5) 西脇, 杉原, 加賀美, 金広, 稲葉, 井上: "全身行動型ヒューマノイド「H6」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'00 講演論文集, 2P2-79-110, 2000.