

ヒューマノイドロボット才華4の設計

Design of the Humanoid Robot Saika-4

白田聡*, 近野敦*, 内山勝*

Satoru Shirata*, 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), 重力補償機構 (Gravity Compensation Mechanism),

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
白田 聡, Tel.: (022)217-6973, Fax: (022)217-6971, E-mail: shirata@space.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, ヒューマノイドロボットの研究開発が盛んに行われている。これは, ロボットに関する技術が発達した事とともに, 高齢化社会における対人サービスや原子炉内部など人間が近づけない場所での作業, 人間と協調・共存するロボットを願う社会的ニーズなどが要因と考えられる。

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みる場合, 以下の点が重要だと考える。

- できるだけ人間に近いサイズ・形態・自由度であること: 人間のために整備されているインフラストラクチャーをそのまま利用でき, また機能や動作が直感的に分かりやすい
- 軽量であること: 人間一人で取り扱うのに困難を伴うロボットでは, 人間と共存するうえで危険が大きい
- 自立型であること: バッテリーやコンピュータ

等が外部に置かれている場合, ロボット自体の動作が制限されることになる

- 安価であること: ヒューマノイドロボットが普及するには, その価格が最低でも300万以下であることが必要ではないかと考える

これらの条件は, ヒューマノイドロボットの研究用プラットフォームに望まれる条件とも一致すると考えられる。

これまで, 多くのヒューマノイドロボットが実用化されてきた。日本国内だけでも, ホンダのP2, P3, ASIMO, 東京大学のH6³⁾, H7, 産総研のHRP-2P⁴⁾, 青山学院大学のMk.5, SONYのSDR-3X, SDR-4X⁵⁾, 富士通オートメーションのHOAP-1, 早稲田大学のWABIAN R-IV等がある。しかし, その多くが上記の条件を満たしていない。小型のものは軽量であるが, 片腕の自由度が5ないし4で, サイズが小さいこともあり, 人間に代わって作業を行うには不十分である。また, 大型のものは片

腕当り7自由度持ち，人間と同程度の作業性を有するが，60 [kg]を超えるものが多く，人間と共存していく上ではまだ重いと思われる．

そこで，筆者らは，すべての条件を満たすため，才華3^{2), 2), 1)}を開発した．そして現在，才華3を元にその後継機である才華4を開発中である．本稿では，開発中のヒューマノイドロボット才華4について報告する．

2. 才華3の特徴と問題点

才華3は，高い柔軟性と汎用性を持ち，人間に近いサイズで軽量かつ自立行動が可能なヒューマノイドロボットとして開発された．人間一人で扱えるよう，全重量53 [kg]，全高1271 [mm]としており，これにより，ロボットに対する人の恐怖心を抑えられ，また安全性が高められている．軽量であり入手性や加工性が良いことから構造材には主にアルミニウム合金を使用しており，モータ等には，入手性，価格，整備性などを考え市販の部品を使用している．自由度構成は，頭部2自由度，腕部各7自由度，ハンド各1自由度，脚部各6自由度，の合計30自由度であり，人間と同程度の作業性を有する．

胴体部にはバッテリーやコンピュータ，モータドライバ，6軸ジャイロセンサ，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と，自立行動に必要なと思われる機材がすべて搭載されている．無線LANを搭載しているため，外部から遠隔操作が可能である．また，外部電源接続端子を有し，外部電源による駆動も可能である．頭部のCCDカメラから得られる画像はビデオ送信機で送信され，遠隔地のTVでモニタできる．

才華3の重量配分は，胴体（バッテリーを除く）が18.5 [kg]，片脚が7.7 [kg]，片腕が3.0 [kg]，頭部が1.0 [kg]である．バッテリーには2 [kg]の鉛蓄電池を2個1組として最大で3組（6個）使用でき，全重量が

53 [kg]となる．

小型・軽量のヒューマノイドロボットとして開発された才華3だが，小型化を推し進めた結果，逆に，整備性が悪くなってしまった，胴体内部の機器の配置が悪いため，重心の前後位置が脚の上に無く，脚部アクチュエータのトルクを有効に使えていないといった問題点が生じてしまった．

3. 才華4の設計要求

才華4では才華3の特徴を維持しつつ，さらに以下のような改善を行う．

- 軽量化を図り，全重量は40 [kg]程度とする
- サイズを維持しつつ，整備性を向上させる
- 胴体内部の機器を適切に配置することで，重心が脚の上にくるようにする
- 脚部に重力補償機構を導入することにより，アクチュエータの出力を有効に使えるようにする

4. 脚部の設計

才華3では関節部分の部品をなるべく同じものを使うようにして，整備性の向上とコストの削減を図った．特に，足首関節と股関節に関しては，その自由度がほぼ同じであるため，多くの部品を共通化した．才華4ではこの考えをさらに推し進め，ロール軸とピッチ軸に関しても基本的に同一構造とする（Fig. 1）．これにより，部品の種類を減らすことができ，コストの削減と整備性のさらなる向上を図る．また，リンクごとにモジュール化を図り，モジュールごとに分解・組み立てができるようにし，整備性を向上させる（Fig. 2）．Fig. 2の左側の図において，丸で囲んだねじをはずす事によって，簡単に右側の図のようになる．各モジュール

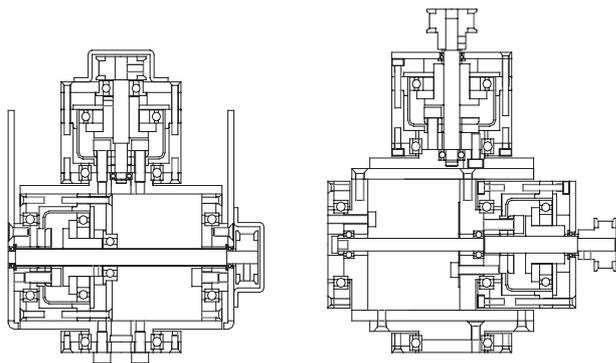


Fig. 1 関節部の構造 (左-才華3, 右-才華4)

Table 1 モータドライバの主要諸元

TITECH DRIVER		Ver. 2	Ver. 3	Ver. 4
最大出力電圧	[V]	48	24	12
最大出力電流	[A]	10	10	7
最大出力	[W]	450	180	84
重量	[g]	90	50	15
長さ	[mm]	47	70	45
幅	[mm]	60	50	27
高さ	[mm]	30	10	10

ルにおける部品の分割も工夫し、モジュールの組み立ても容易にできるようにしている。

才華3では胴体部にあるTITECH DRIVER Ver. 2によってモータを駆動していたが、才華4ではそれよりも小型・軽量のTITECH DRIVER Ver. 3を使用し、さらにそれをモータの近くに配置することで、配線を容易にすると同時に、上半身の重量とサイズを軽減し、脚部のモータに掛かる負荷を減らす。ドライバの主要諸元をTable 1に示す。

才華3では股関節部の剛性や精度が不足したために、歩行を行う上で問題があった。そのため才華4では、股関節部ヨー軸の出力軸にステンレススチールを用い、深溝玉軸受けを4個使用し、更にスラスト軸受けも使用する (Fig. 3)。同様の改良はすでに才華3に導入されており、ヨー軸の剛性不足は解消している。また、ヨー軸の出力軸の取り付け方法も改善することで、組み立て精度と剛性

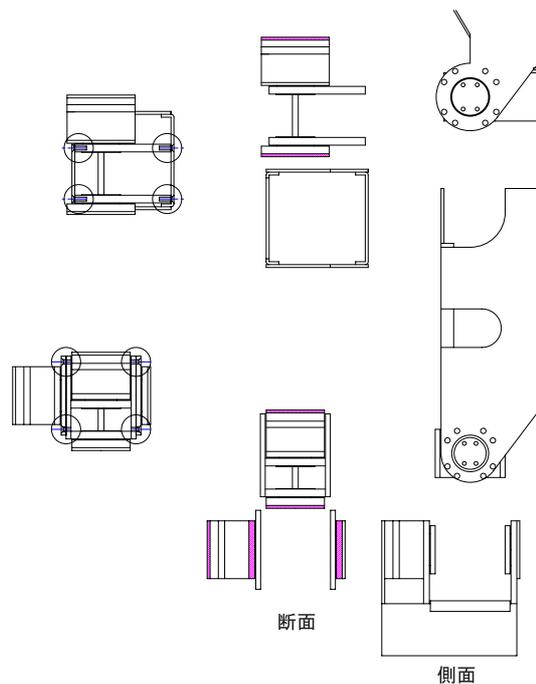


Fig. 2 モジュール構造

を高めた。

各関節は、DCサーボモータとハーモニックドライブ減速器を使用して駆動する。モータからの出力を歯付タイミングベルトを介してハーモニックドライブに入力し、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を極力小さくしている。またタイミングベルトには適度な張力を与えるため、テンショナを設計し取り付ける。DCサーボモータの主な仕様をTable 2に、ハーモニックドライブの主な仕様をTable 3に示す。

股関節部と足首部に関しては、マクソン社製のDC motor RE35と、速比1/120のハーモニックドライブシステムズ社製のCSF-17を使用するが、膝部に関しては、それより大型の、RE40とCSF-20を使用する。これは、才華3での経験により他の関節より大きなトルクが必要になったためである。又、股関節部ヨー軸に関しては、他の駆動軸ほど大きなトルクが必要ないため、才華3同

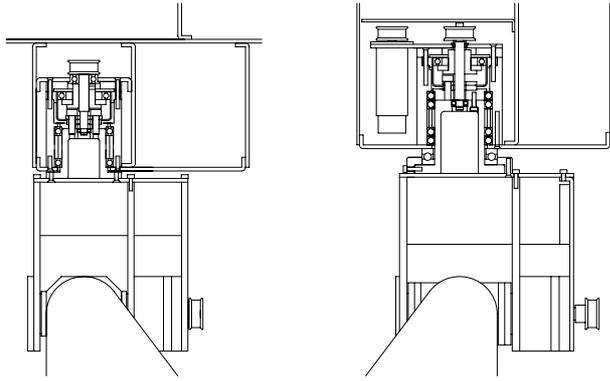


Fig. 3 ヨー軸の接続 (左-才華3, 右-才華4)

Table 2 モータの主要諸元

DCサーボモータ	RE25	RE35	RE40
定格出力 [W]	20	90	150
公称電圧 [V]	24	30	24
最大許容回転数 [rpm]	11000	8200	8200
最大連続電流 [A]	1.22	2.74	6.00
最大連続トルク [Nm]	0.028	0.107	0.181
重量 [g]	130	340	480
直径 [mm]	25	35	40

様RE25とCSF-17を使用する。

各関節の可動範囲は才華3と同程度とし、地面の物を拾うといった動作が可能にする (Table 4)。

足底部には、谷田らが開発中のH型溝付きはりを用いた足底力センサ⁶⁾を取り付け、それを用いてZMPの検出を行う。リンク部分は箱型にすることで、軽量化を図りつつ、十分な剛性を維持する。リンク長は才華3と同様に、250 [mm]とする。モータ軸に対するエンコーダ取り付け位置が製品によりばらつきがあるため、モータ取り付け角度を、 ± 15 [°]可変となるように工夫している。才華3では、モータを取り外す際に、脚部全体を分解する必要があったが、才華4では、モータのみを簡単にはずせるようにしている。

Table 3 減速器の主要諸元

ハーモニックドライブ	CSF-17	CSF-20
速比	120	120
平均負荷トルク [Nm]	39	49
瞬間最大負荷トルク [Nm]	108	147
平均入力回転数 [rpm]	3500	3500
最大入力回転数 [rpm]	7300	6500
重量 [g]	150	280
直径 [mm]	60	70

関節	足首関節及び股関節	膝関節
ロール軸 [°]	± 30	/
ピッチ軸 [°]	+100 ~ -30	140

Table 4 各関節の可動範囲

4.1 重力補償機構

ヒューマノイドロボットを始めとする歩行ロボットにおいては、脚部のアクチュエータはその出力の多くが、上半身の重量を支えるために使われている。これは、歩行ロボットにおいてはどうしても生じてしまう問題であり、これをいかに軽減するかが、エネルギー効率を向上させ、また、運動性能を高める上で重要であると考えられる。そこで、才華4では、上半身の重量によって脚部関節に掛かるトルクをばねで補償する機構を導入することで、脚部のアクチュエータ出力が、有効に使えるようにする。

マニピュレータの重力補償機構については今まで、さまざまな方法が考案されてきているが^{7, 8, 9, 10)}、脚に関しては、サイズや重量に制約があることや、マニピュレータと異なり、土台といった姿勢が常に一定の箇所がないので、重力補償機構の導入が難しい。

ここでは、簡単のために、しゃがみ込み姿勢時に膝関節に掛かる重力トルクを補償することに限

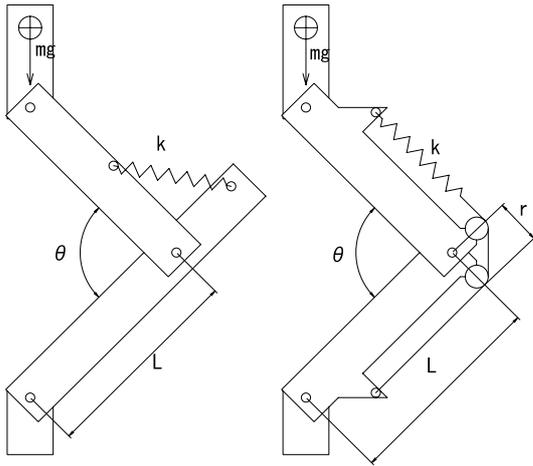


Fig. 4 重力補償機構

定して考える．膝関節に関しては，才華3での経験から，非常に大きな負荷が掛かることがわかったので，これを軽減させることが，重要だと考える．

ばねによる重力補償機構について，一般的な方法と今回新たに提案する方法をそれぞれモデル化し，Fig. 4に示す．一般的な方法（Fig. 4 左）では，重力トルクと補償トルクの釣り合いの式に，膝角度 θ に依存する非線形項が残ってしまうため，正確な重力補償が困難である．

今回新たに提案する方法（Fig. 4 右）では，ワイヤーとプーリーを介してばねを配置する．膝を伸ばした時（ $\theta = 0$ ）に，ばねの伸びがゼロになるように調整すると，重力トルクと補償トルクの釣り合いは式(1)のようになり，適切なばね定数 k を選ぶことによって，角度によらない正確な重力補償ができる．また，この方法は，脚部の外観や重量を大きく変えずに導入することができる．但しこの場合，脚自身の重量は無視している．

$$mgL \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = 2kr^2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

才華4では，この機構によって，膝部に掛かる重力トルクの半分を補償することにしている．また，足首部や股関節部についても，導入を検討中である．

5. 胴体部の設計

胴体部の設計に当たっては，まず，重心が脚の上にくるようにすることを第一に考えた．これは，重心の前後の位置がずれることによって，脚部のモータへの負荷が非常に大きくなってしまうためである．上半身の重量を30 [kg]とし，上半身を垂直に下ろして膝を140 [°]曲げた際に膝部に掛かる重力トルクを求めてみると，重心が脚の直上にある場合は両膝で69.1 [Nm]掛かるのが，そこから後ろに90 [mm]の位置にあると（才華3の場合）95.6 [Nm]となり38 %以上大きくなってしまふ．これによって，脚部のトルクが有効に使われなければならず，股関節部ヨー軸の出力軸に後ろ向きのモーメントが働き，歩行を行う上で問題があった．

また，重心を脚の上に移動させるとともに，軽量化を図った．才華3ではモータドライバとして全てTITECH DRIVER Ver. 2を使用していたが，才華4ではTITECH DRIVER Ver. 3及びVer. 4に変更する（Table.1）．又，脚部モータ用のドライバが脚部に搭載されているため，胴体に搭載されるドライバ数を減らすことができる．胴体部に搭載されているドライバは，Ver3が12個（股関節部ヨー軸用:1 × 2,腕部用:5 × 2），Ver4が8個（腕部用:2 × 2,ハンド部用:1 × 2,頭部用:2）である．バッテリーにはニッケル水素蓄電池（4 [kg]）を使用し，DC/DCコンバータも小型軽量のイータ電機工業製EPKJ01C28（200 [g]）とEPK12SC28（200 [g]）を使用する．バッテリー，DC/DCコンバータ，ドライバの変更によって，10 [kg]以上の軽量化が図られる．また，これら変更によって，全高をほとんど変えることなく，前後幅を才華3の323 [mm]から204 [mm]へと大幅に小さくなり，バックバック部分を完全になくす事ができる（Fig. 5）．

整備性に関しては，ほとんどの機材を背中側からアクセスできるように配置し，又，構造材と機材を取り付ける板を分けた．関連のある機材を一

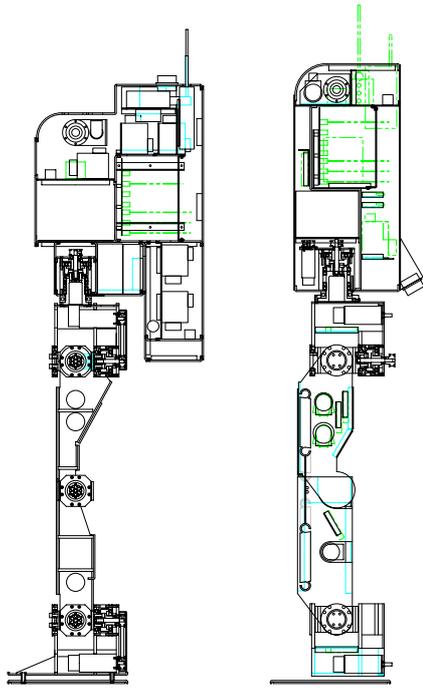


Fig. 5 胴体部の比較（左-才華3，右-才華4）

つの板上にまとめて配置することで、組み立て・分解が容易なようにする（Fig. 6）。コンピュータ用，ドライバ用（Ver3：1枚，Ver4：2枚），電源関係用，センサ用，ビデオ送信用の7枚に分ける．これらは胴体側板にねじによって固定されており，容易に取り外すことができる．脚部や腕部についても容易に取り外しができる様にする．

6. おわりに

開発中のヒューマノイドロボット才華4の，脚部と胴体部の設計について述べた．脚部に関しては，関節部分はほぼ終了しているが，リンク部分（脛，太腿）は，足首部と股関節部に重力補償機構を導入するうえで，若干の設計変更がされる可能性がある．胴体部に関しても，設計はほぼ終了しているが，足底および，ハンドのセンサ用の基板の大きさがまだ未定なので，それによって若干の設計変更がありえる．また，腕部に関しては，才華3を参考にしつつ，新たに設計する予定である．

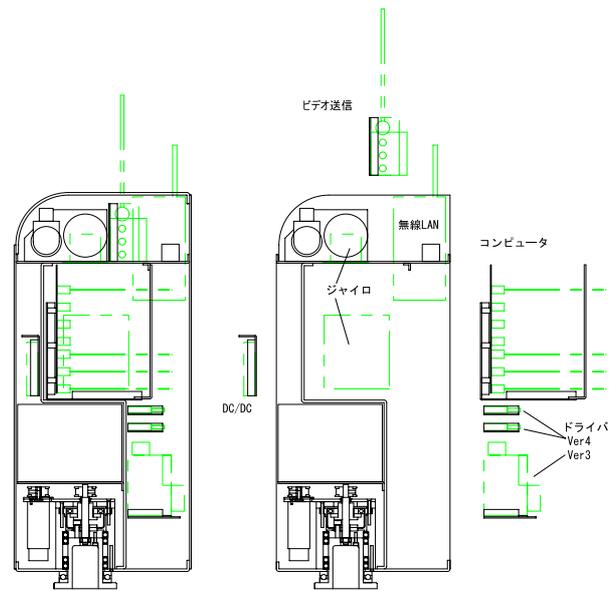


Fig. 6 胴体部の構造

参考文献

- 1) 近野，古田，内山：“ヒューマノイドロボット才華3の上半身設計”，第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集，589/590（2000）
- 2) 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）
- 3) 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）
- 4) 金子，金広，梶田，横山，赤地，川崎，太田，五十棲：“HRP-2プロトタイプの開発”，日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集，1D32（2002）
- 5) 黒木，石田，長阪，山口：“高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボットSDR-4X”，日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集，1C17（2002）
- 6) 谷田，阿部，近野，内山：“H型溝付はりをを用いた足底力センサの設計”，第45回自動制御連合講演会講演論文集，1P1-A43（2002）
- 7) Chu，広瀬：“Float Arm IV:Mechanical Design and Basic Experiments”，第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集，519/520（1999）
- 8) 葉石，石井，広瀬：“フロートアーム5の開発 -新しい多関節自重補償機構の導入-”，第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集，683/684（2001）
- 9) 森田，栗原，菅野：“機械的3次元自重補償手法の提案”，第2回システムインテグレーション部門学術講演会，365/366（2001）
- 10) 森田，塩澤，中井，栗原，菅野：“高運動性能マニピュレータのための機械的3次元自重補償機構の開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02講演論文集，2P1-H03（2002）