

論文・報告

働く人間型ロボット研究用プラットフォーム HRP-4の開発

Development of a new humanoid research platform, HRP-4

赤地 一彦 *1
Kazuhiko AKACHI

金平 徳之 *2
Noriyuki KANEHIRA

宮森 剛 *3
Go MIYAMORI

林 篤史 *4
Atsushi HAYASHI

川田工業（株）では、働くヒューマノイドロボットの研究用プラットフォームとしてHRPシリーズを開発してきた。HRP-4は、HRPシリーズの最新バージョンであり、独立行政法人産業技術総合研究所（以下、産総研）と共同で開発したロボットである。HRP-4Cの設計技術を応用して、大幅な軽量化とスリム化を実現し、研究者にとって安価（販売価格でHRP-2より約30%コストダウン）で実用的な研究用ヒューマノイドロボットプラットフォームとすることを目標とした。なお、HRP-4Cは産総研が開発したロボットであり、ハードウェアの設計・製作を川田工業が担当した。

設計・製作したHRP-4は、身長1514mm、体重39kgであり、腕部の関節数を7自由度（内手首3自由度）とした結果、総自由度数は34となった。また、ソフトウェアプラットフォームとしてOpenRTM-aistを採用した。本論文では、HRP-4の主要仕様および特徴について詳細に報告する。

キーワード：働く人間型ロボット、研究用プラットフォーム、スリム・アスリート、軽量・スリム、HRP-4

1. はじめに

川田工業（株）では、働くヒューマノイドロボットの研究用プラットフォームとして HRP シリーズを開発してきた。

経済産業省および新エネルギー・産業技術開発機構（以下、NEDO）が1998年度から5年間計画で実施した「人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト（以下、HRP）では、独立行政法人産業技術総合研究所（以下、産総研）等と共同で、その後期応用開発期間の成果としてHRP-2¹⁾（身長1539mm、体重58kg、関節自由度数30）を開発した。HRP-2のデモンストレーションでは、人間と協調して作業を行うことが可能な人間型ロボットの可能性を示すことができた。現在 HRP-2 は、国内外の研究機関・大学において20体程度が研究開発に利用されている。

また、NEDOが2002年度から5年間計画で実施した「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」では、HRP-3²⁾（身長1606mm、体重68kg、関節自由度数42）を開発した。HRP-3は、人間が生活している環境（実環境）で働くことを可能とするため防塵・防滴機能を有するロボットとした。

2008年度からは、産総研が開発した HRP-4C³⁾（身長1580mm、体重43kg、関節自由度数42）の骨格構造（外装および頭部を除くロボットハードウェア）を設計・製作した。HRP-4Cは、人間に近い外観を持ち、人間にきわめて近い歩行や動作が出来るロボット「サイバネティックヒューマン：Cybernetic Human」をコンセプトに、エンターテイメント分野への応用を目指して開発されたロボットである。

さて、HRP-2が誕生して約10年が経過し、ユーザからは安価で扱い易いロボットを望む声を多く受けていた。そこで川田工業と産総研は2009年度から共同研究を実施し、新しい研究用ヒューマノイドロボットプラットフォーム：HRP-4を開発した。HRP-4は、HRP-4Cの軽量でスリムな骨格構造設計技術を継承しつつ、ヒューマンインタラクティブ技術（ロボットと人との協業作業や物体把持、操り動作を実現する技術）の研究開発に適するよう、設計を見直し、研究者にとって安価で実用的なヒューマノイドプラットフォームとすることを目指した。

本稿では、HRP-4のコンセプトを示し、そのコンセプトに沿って設計・製作を行った HRP-4 の主要仕様および特徴について報告する。

*1 川田工業株式会社機械システム事業部ロボティクス部設計課 係長

*2 川田工業株式会社技術研究所情報機械研究室 室長

*3 川田工業株式会社機械システム事業部ロボティクス部設計課 係長

*4 川田工業株式会社機械システム事業部マーケティング部

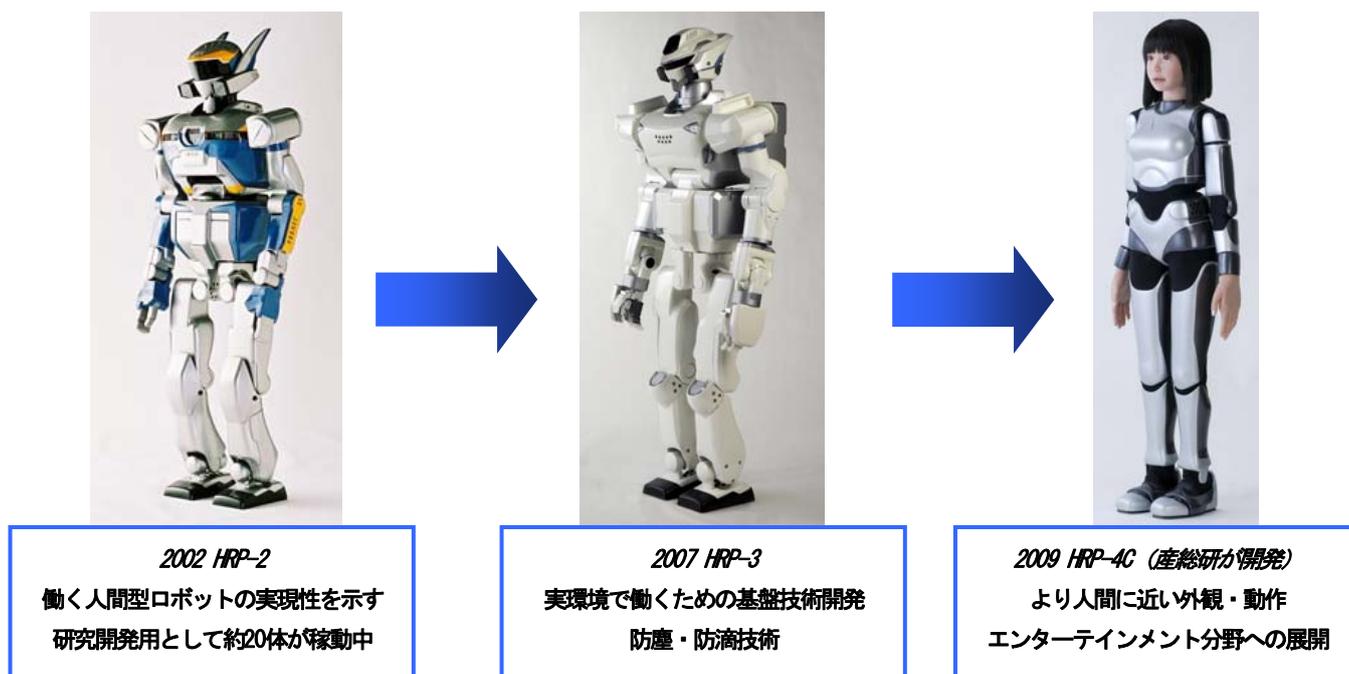


図1 HRPシリーズの開発背景

2. HRP-4のコンセプト

HRP-4は、「スリム・アスリート」をコンセプトとし、人間型ロボットを使用して全身動作の研究を行う研究者にとって安価で実用的なヒューマノイドプラットフォームを提供することを目標とした。具体的な設計仕様を下記する。なお、「スリム・アスリート」とは、軽量・コンパクト・低価格でありながら、研究開発用途として実用性にとんだ機能を備えていることを例えた表現である。

- ① ロボット本体の軽量・スリム化：試験時のロボットの使用性向上を図る。特に直交関節部は、人間型に近づけるためコンパクト化する。
- ② 腕部の7自由度化：人との協業作業や物体把持、操り動作に適するような腕部とする。片腕可搬重量を0.5kgとして設計する。
- ③ 関節軸は全て定格出力80W以下のモータを採用：人と共存するための安全性への配慮を行う。
- ④ 拡張性：物理的（追加搭載する機器の搭載スペース確保）およびシステムの（関節軸追加やセンサ追加が容易なシステム）な拡張性を持たせる。
- ⑤ OpenRTM-aistの採用：ソフトウェアの開発効率が向上するシステムを採用する。

3. HRP-4の主要仕様

上記コンセプトに基づいて設計・製作したHRP-4の主要仕様を表1にまとめる。比較としてHRP-2の仕様を併記する。また、図2にHRP-4の正面図および側面図を、図3に完成写真を示す。

身長は、HRP-2とほぼ同じであるが、体重は39kgと軽量でスリムなボディーを実現できた。

関節自由度数は、インタラクティブ技術の研究に適するようにHRP-2に比べ、ハンドと腕の自由度数を増やした。

コンピュータシステムは、小型化と拡張性を考慮し、バスとしてPCI-104規格を採用、体内制御はライン型ネットワーク（CAN）を採用した。なおHRP-4のシステム構成については、詳細を後述する。バッテリーは試験時の使用性を考慮しツールレスで着脱できるようにした。背中に拡張PCやセンサが追加搭載できるスペースを設けた。

表1 HRP-4の主要仕様

| ロボット | | HRP-4 | HRP-2 |
|-------------------|------------------------------|---------------|-------|
| 主要寸法 | 身長 [mm] | 1514 | 1539 |
| | 幅 [mm] | 458 | 621 |
| | 厚み [mm] | 270 | 355 |
| 重量 [kg] (バッテリー含む) | | 39 | 58 |
| 関節自由度数 | 総自由度数 | 34 | 30 |
| | 首軸 | 2 | 2 |
| | 腕軸 | 7×2 | 6×2 |
| | ハンド | 2×2 | 1×2 |
| | 腰軸 | 2 | 2 |
| センサ | 脚軸 | 6×2 | 6×2 |
| | 各軸 | インクリメンタルエンコーダ | |
| | 胴部 | 姿勢センサ | |
| | 脚部 | 6軸力センサ | |
| 搭載コンピュータ | USBカメラ | | |
| 外部通信 | PCI-104, Pentium M 1.6 [Ghz] | | |
| OS | 有線LAN及び無線LAN | | |
| 体内制御 | Linux+RT-Preempt Patch | | |
| 音声出力 | ライン型ネットワーク: CAN | | |
| 搭載バッテリー | スピーカ×2(胴部に搭載) | | |
| 各関節軸のモータ出力 | ニッケル水素バッテリー DC48V | | |
| 腕部可搬荷重 [kg] | 定格出力80W以下 | | |
| | 0.5 | | |

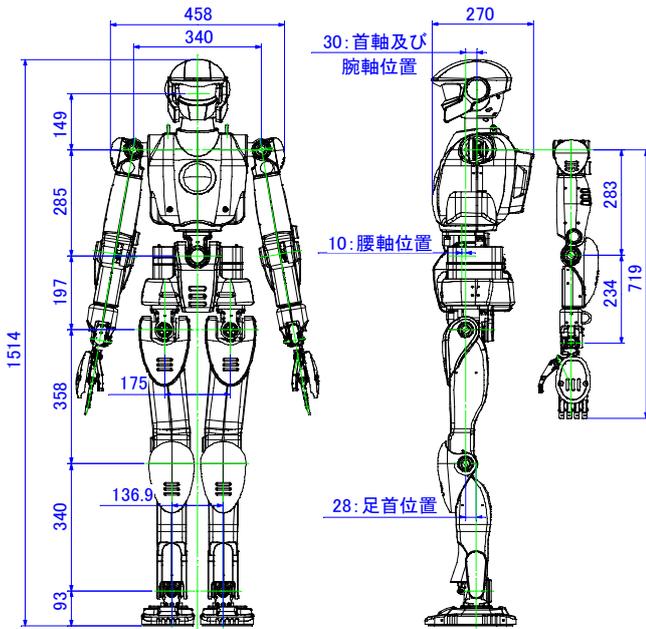


図2 HRP-4の正面図および側面図



図3 HRP-4完成写真

4. HRP-4の特徴

(1) HRP-4のシステム構成

HRP-4のシステム構成図を図4に示す。コンピュータシステムは、汎用性があり、小型で拡張可能なPCI-104規格のバスを採用した。CPUボードは、Pentium Mを搭載し、これにCANインタフェースボードと力センサインタフェースボードの2枚をスタックした。なおスタック数については、拡張性を考慮し、もう一枚挿入できるようにスペースを確保している。

外部の操作PCとの接続は、ハブ兼無線LANを搭載し、無線および有線のどちらでも接続可能とした。

体内制御にはライン型ネットワーク (CAN: Controller Area Network)を採用し、モータドライバを分散配置した。

図5にCANの概念図を示す。CANを採用することでセンサや可動軸 (ドライバ) の追加が比較的容易におこなえるようにした。

ハンド用ドライバは、小出力ながら1つのボードで10ch駆動できるものを採用した。ハンド部の拡張性が期待できる。また、姿勢センサもCAN接続とした。

脚部の6軸力センサは、シリアル接続でインタフェースボードに接続した。現在6軸力センサは脚部のみに搭載しているが、腕部への力センサ搭載の拡張性を考慮し、インタフェースボードは4個までのセンサが接続できるようにした。その他、頭部にはUSBカメラ、胸部にはスピーカを搭載した。

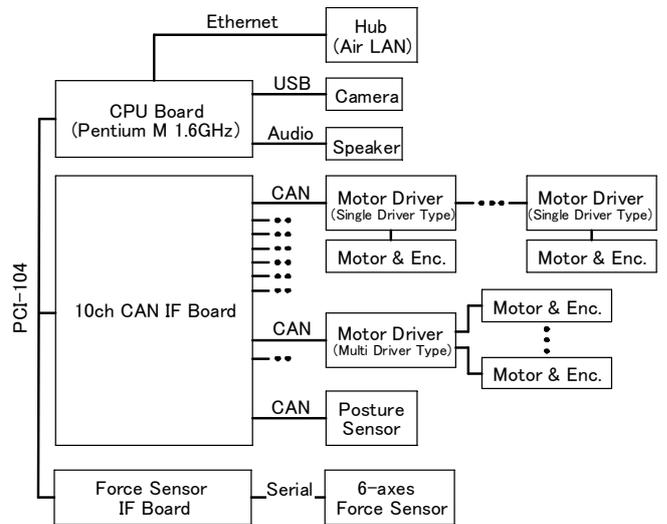


図4 HRP-4のシステム構成図

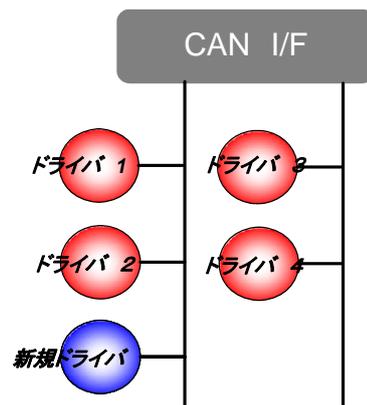


図5 HRP-4のシステム構成図

(2) HRP-4の外装デザイン

図6にHRP-4のデザイン画を示す。外装デザインは、工業デザイナーである園山隆輔氏に制作を依頼した。

「スリム・アスリート」をコンセプトとし、軽量コンパクトであり、マラソン選手のような引き締まった筋肉質で、長時間働くことがイメージ出来ること、加えてHRP-2から

のイメージを崩さず、しかしながらフラッグシップ的なイメージであるHRP-2に対して、HRP-4は汎用性の高いイメージでデザイン画を制作して頂く様に依頼した。

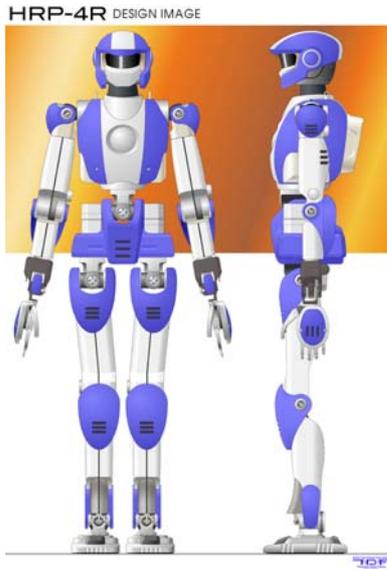


図6 HRP-4のデザイン画

(3) 定格出力80W以下のモータを採用

HRP-4は、安全性を考慮し、使用するモータは全て定格出力80W以下とした。ここで「定格出力80W」という数値は、労働安全衛生規則（第36条第31号）における産業用ロボットの適用除外となる数値である。人と共存できるロボットの安全基準の1つとして定格出力80W以下のモータを採用することとした。

HRP-4の関節軸仕様（モータや減速機の仕様）を策定するため、ほぼ共通の構造を有するHRP-4Cを用いて試験を実施した。HRP-4は、歩行や上半身を使用した作業が継続かつ安定的に実施できるように設計する必要がある。HRP-4Cを用いて、HRP-4で実施されることが想定される動作を行い、各評価値を計測して必要に応じて改良を行った。

図7は、ある歩行動作を行った時のモータのトルクと回転数をプロットしたものである。また同グラフ中には、3種類のモータ（MT1、MT2、MT3）の特性もプロットしている。

図8は、動作時のロボット各部（モータやモータドライバ、構造内部）の温度を時間経過に対してプロットしたものである。継続して同じ動作をさせる場合、温度変化が飽和するように設計する必要がある。

こうしたデータを基に、最終的な各関節のモータ容量や減速比を策定した。また必要と判断したところには冷却ファンや冷却のための開口部を設置した。

以上の検討を行うことにより、全て定格出力80W以下のモータで構成できるロボットとすることが出来た。

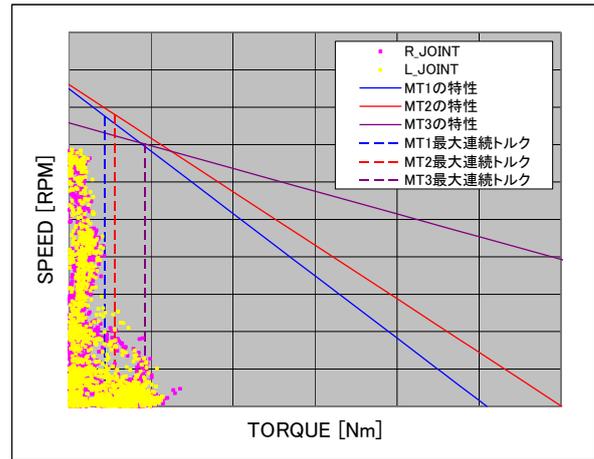


図7 ロボット動作時のモータトルクと回転数

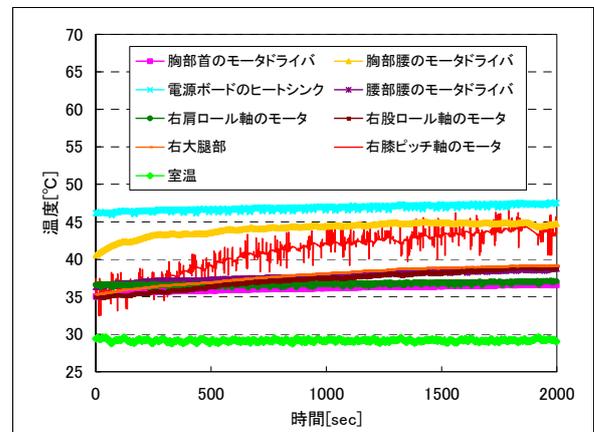


図8 ロボット動作時の温度計測

(4) 足首の機構

HRP-2を始め、これまで当社で設計製作したロボットにおいて、軸が直交する関節部は、機構部品が集中するため大きくなってしまいう傾向にあった。HRP-4は、スリム化を図ってより人間のプロフィールに近づけること、また軽量化と先端イナーシャ低減を行いモータ出力の低減を行う必要があるため、特に足首機構について構造の剛性を保ちつつ、コンパクト化を図ることとした。

図9にHRP-4の足首機構を示す。足首を駆動するモータは、ピッチ軸、ロール軸共に脛構造内に縦方向に搭載した。足首ピッチ軸は、モータの出力をプーリを介してボールネジに伝達しリニアアクチュエータ（ボールネジとストロークシャフトで構成される機構部分）、中間リンクを介して駆動する機構とした（図9の緑で示す機構）。

足首ロール軸は、モータの出力を2組のマイタギヤとプーリを介してハーモニック減速機に伝達し駆動する機構とした。なお足首の構造特性上、ロール軸を動かす際は微量ではあるがピッチ軸のモータも駆動させる必要がある。（図9の赤で示す機構）

また、中間リンクを介す機構とすることでリニアアクチ

アクチュエータのケーシングと脛構造を一体化し、構造および駆動機構の剛性を損なわない設計とした。

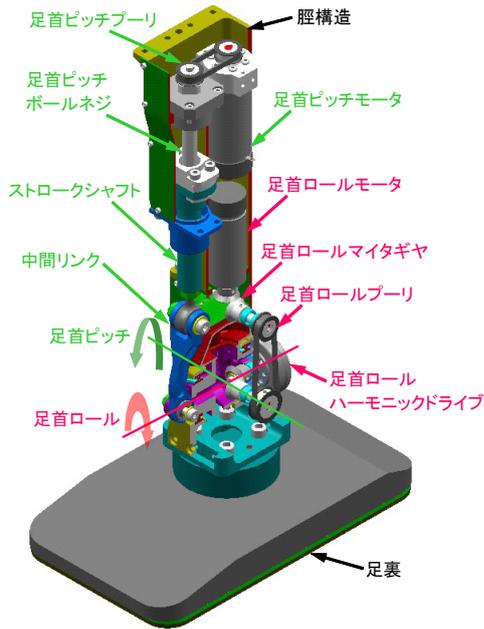


図9 HRP-4の足首機構

(5) 腕部および手の機構

腕部および手の機構を図10に示す。

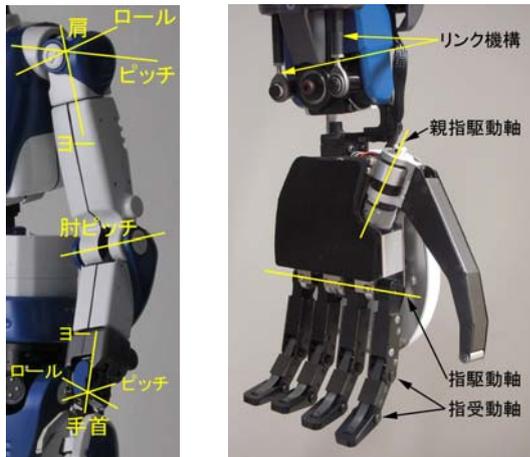


図10 腕部および手の機構

HRP-2は、手首2自由度の片腕6自由度であった。この自由度数では手先の動きが大きく制限されてしまうことがこれまでの経験で分かっている。HRP-4では、この問題を改善するため、手首を3自由度とし、片腕7自由度として、人との協業作業や物体操作に適するような腕とした。また、手首ピッチ軸にリンク機構を採用し、足首機構と同様、2軸直交軸のコンパクト化を図った。腕部の関節軸仕様（モータ容量や減速比）を策定する際は、片腕可搬重量を0.5kgとして設計した。

手は人と同様、5指とした。能動的に駆動できる軸は、親指の根元と、親指以外の指（人差し指、中指、薬指、小指）の根元の2軸とした。親指以外の指は、根元の駆動

軸に対して全ての指が連動して握りこみ動作が出来るように設計した。

(6) 拡張性

HRP-4は、研究者が容易に機能の拡張が図れる様に、物理的（追加搭載する機器の搭載スペース確保）およびシステム的（関節軸追加やセンサ追加が容易なシステム）な拡張性を持たせた設計をしている。主な拡張性を下記する。

- ① 胴体背面にモバイル PC やセンサが搭載できるスペースを確保した。搭載スペースは、おおよそ160mm（横）×120mm（縦）×30mm（奥行）である。図11に搭載スペースを示す。2010年9月に実施したHRP-4のプレス発表では、このスペースにモバイル PC を搭載し、体内の温度表示や視覚認識処理に用いた。
- ② HRP-4の腰関節は、ピッチ軸とヨー軸を有している。腰ロール軸は、エンターテインメント分野に使用する場合やより人間に近い歩行を研究する場合に要求されることがあるが、腰部への関節軸追加は、改造箇所が多くなり、技術的、費用的に困難である。HRP-4は、腰軸への関節軸追加が容易におこなえるよう、股関節の機構を流用することとした。図12に股関節と腰関節の機構を示す。股関節の3軸直交機構を腰関節に使用することで容易に腰関節の3軸直交化がおこなえる。
- ③ 首軸および手首軸は、図13に示す小出力アクチュエータモジュールを共通使用している。小出力の関節軸（例えば首軸の3軸直交化など）を追加する際は、このモジュールを使用することで容易に搭載することができる。
- ④ コンピュータシステム（バス：PCI-104）にボードが1枚追加搭載できるようにスペースを確保した。
- ⑤ 体内制御にライン型ネットワーク（CAN）を採用することでセンサや関節軸（ドライバ）の追加が比較的容易におこなえるようにした。
- ⑥ ハンド用ドライバは、1つのボードで10ch駆動できるものを採用し、更に手の甲に配置することでハンド部の関節軸追加が容易におこなえるようにした。
- ⑦ 腕部へ力センサが容易に搭載可能なようにインタフェースボードは4個までセンサが接続出来るようにした。



図11 胴体背面の機器搭載スペース

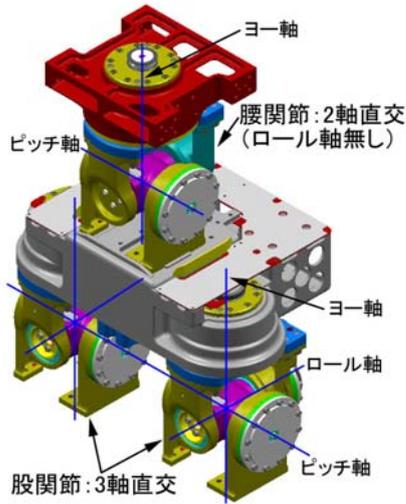


図 12 股関節および腰関節モジュール

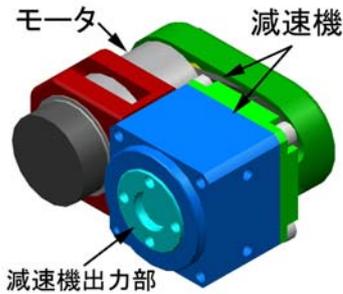


図 13 小出力アクチュエータモジュール

(7) HRP-4ソフトウェア構成

OS は、汎用性の高い Linux カーネルに RT-Preempt パッチを適用したものを採用した。これによりリアルタイム処理を可能とした。

OS と各ソフトウェアをつなぐミドルウェアとしては、OpenRTM-aist を採用した。OpenRTM-aist は国際標準化された仕様に基づいて産総研が実装したソフトウェアである。これによりロボットシミュレータ OpenHRP3 などの国内外のソフトウェア資産が容易に利用可能となり研究効率の向上が期待できる。

図 14 に HRP-4 のソフトウェア構成を示す。OpenRTM-aist に対応した各モジュール：動作、音声、画像などを組み合わせることでロボットシステムを構築している。



図 14 HRP-4 のソフトウェア構成図

5. おわりに

本稿では、川田工業と産総研が共同開発した、働く人間型ロボット研究開発用プラットフォーム：HRP-4 の仕様および特徴を紹介した。

開発した HRP-4 は、身長 1514mm、体重 39kg とし軽量・スリムなロボットとした。また、人との協業作業や操り動作等に適するよう、手首関節を 3 自由度とした。その結果、全自由度数は 34 となった。重量低減および減速比の見直しを行った結果、関節軸に使用するモータは、全て定格出力 80W 以下とすることが出来た。関節軸の低出力化によって安全性の一端を確保することができた。研究者が機器の追加搭載をおこなえるスペースの確保、および関節軸やセンサの追加が比較的容易におこなえるよう、拡張性を考慮した設計とした。ソフトウェアプラットフォームとしては、ソフトウェア開発が効率的に行えるよう、OpenRTM-aist を採用した。

HRP-4 は、2010 年 9 月 15 日にプレス発表をおこない、2011 年 1 月から販売を開始している。現時点で社有機として 1 台、国内の大学に 2 台の計 3 台が研究開発用途として稼動中である。

HRP-4 の開発で得られたノウハウおよび各大学・研究機関への販売・保守を通じて、次世代産業用ロボットの開発・販売につなげていきたいと考えている。

最後に、HRP-4 の開発にご協力頂きました産総研知能システム研究部部門ヒューマノイド研究グループのスタッフに感謝いたします。

参考文献

- 1) 五十棲, 赤地, 平田, 金子, 金広, 比留川: ヒューマノイドロボット HRP-2 の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 8, pp. 1004 - 1012, 2004
- 2) 金子, 原田, 金広, 宮森, 木村, 赤地: ヒューマノイドロボット HRP-3 の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 6, pp. 658 - 666, 2008
- 3) 金子, 金広, 森澤, 三浦, 中岡, 原田, 梶田: サイバネティックヒューマン HRP-4C の開発～プロジェクト概要からシステム設計まで～, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 79 - 90, 2010