

ヒューマノイドロボット・HRP-2の開発

～人と一緒に働くロボットの設計・製作について～

Development of the Humanoid Robot, “HRP-2”

赤地 一彦
Kazuhiko AKACHI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室係長

五十棲 隆勝
Takakatsu ISOZUMI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室室長

平田 勝
Masaru HIRATA

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室係長

太田 成彦
Sigehiko OHTA

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

石崎 雅一
Masakazu ISHIZAKI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

ここで紹介するヒューマノイドロボット「HRP-2」は、経済産業省および新エネルギー・技術総合開発機構（以下、NEDOと記す）が1998年度から2002年度までの5年間で実施した「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト：HRP（以下、HRPと記す）」の一成果であり、当社は5年間の開発期間の内、後期応用開発期間でロボットハードウェアの開発を担当した。HRP-2は、屋外等の不整備な環境において人間と共同作業でき、また転倒しても破損しにくい小型軽量ロボットとすることを目標として開発した。

本論文では、開発されたHRP-2について、設計仕様の策定から設計・製作までの具体的な開発手法を説明する。

キーワード：ヒューマノイドロボット、HRP-2、協調作業ロボット、ロボットハードウェアの設計・製作

1. はじめに

一昔前までロボットは、人間と隔離された生産工場内等の空間で決められた作業を正確にかつ敏速に長時間繰り返し実行できる「産業用ロボット」がその代表であった。ところが近年では、人間と同じ空間で、人間に“楽しさや癒し”を提供するエンターテインメントロボット、医療や介護を補助するロボット、家庭内でお手伝いをするホームユースロボット、そして人間と一緒に働くロボット等の開発が盛んに行われており、販売やレンタルされるロボットも登場し始めている。

当社では、1999年からヒューマノイドロボットの開発に携わり、これまでに東京大学・井上研究室のH6ロボット、H7ロボット、および社内研究用のisamuの設計製作を行った。これらの実績と経験を基にHRPプロジェクトにおいてHRP-2P、HRP-2を設計・製作した。

HRPプロジェクトは、経済産業省とNEDOが実施し、人間の作業・生活空間において、人間と協調・共存して複雑な作業を行うことが可能なヒューマノイドロボットの実現が目的であった。本プロジェクトの後期応用開発期間では、「発電プラント点検」、「対人サービス」、「産業作業の代行運転」、「ビル・ホーム管理」、「屋外共同作業」の5つの応用分野が設定され、当社は屋外共同作業分野に参加し、ヒューマノイドロボット「HRP-2」のハ

ードウェアを設計・製作した。

HRP-2は、下記のような小型軽量ヒューマノイドロボットとすることを目標として開発した。

不整地対応機能：不整地を歩行することが可能

協調作業機能：人間と協調して作業することが可能

転倒対応機能、転倒回復機能：作業中に転倒しても

運動機能を失う程は破損せず、再び起き上がって作業再開することが可能

本論文では、上記した概念的開発目標からHRP-2の具体的な設計仕様の策定し、それに基づいて行った設計・製作について説明する。設計・製作する際は、目標を安定的に達成させるため特に機械的、電気的に軽量かつ高剛性、また信頼性と取り扱いの向上に留意した。

2. HRP-2の仕様策定

屋外共同作業の具体的なタスクを下記のように設定し、HRP-2の仕様を策定した。

「不整地等を含む環境において、遠隔操作装置を携帯した作業員（人間）とロボットが共同でパネルを運搬し、作業員が指示した取り付け位置へパネルを据え付ける作業を行うこと。また作業中転倒しても破損し難いロボットとし、破損がない場合は自ら起き上がることが可能。」

上記タスクのイメージを図1に示す。ここでロボットの主要寸法は、一緒に作業する人間が作業姿勢を取った

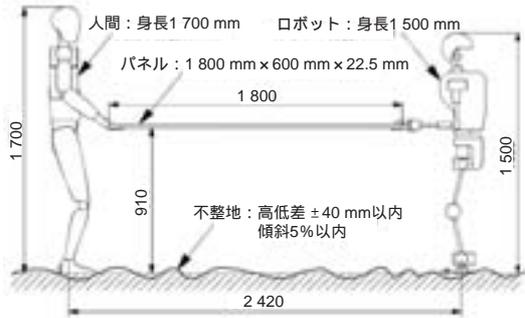


図1 屋外共同作業のイメージ図

表1 HRP-2の主要仕様

| | | |
|------------|------------------------------------|------------------------------|
| 主要寸法 | 身長：1 539 mm，幅：621 mm，最大厚み355 mm | |
| 腕部の関節軸間距離 | 250 mm | |
| 脚部の関節軸間距離 | 300 mm | |
| 重量 | 58 kg：バッテリー含む | |
| 歩行速度 | 0～2 km/h | |
| ハンド把持力 | 2 kgf：片腕 | |
| 関節自由度 | 総自由度数 | 30軸 |
| | 内訳 | 首：2軸，腰部：2軸，腕部：7軸×2腕，脚部：6軸×2脚 |
| 関節部アクチュエータ | DCモータ+タイミングプーリ+ハーモニック減速機 | |
| 動作系コンピュータ | バス | PCI，バックプレーンのスロット数は4 |
| | CPU | Intel Pentium 1.26 GHz |
| | 搭載するボード | IFボード，6軸力センサIFボード |
| | OS | ART-Linux |
| 視覚系コンピュータ | バス | PCI，バックプレーンのスロット数は4 |
| | CPU | Intel Pentium 1.26 GHz |
| | 搭載するボード | 画像IFボード，ハブボード |
| | OS | Linux |
| センサ | 各関節部 | インクリメンタルエンコーダ |
| | 視覚入力 | 3眼ステレオカメラ |
| | 胴部 | 姿勢センサ：振動ジャイロ×3，3軸加速度センサ |
| | 腕部 | 6軸フォースセンサ |
| | 脚部 | 6軸フォースセンサ |
| 無線LAN | 2.4 GHz帯，DS-SS方式 | |
| モータドライバ | 150 W 48 V 20 A (I max)，2軸/1ボード×16 | |
| 音声出力 | スピーカ | |
| 内部電源 | ニッケル水素バッテリー，DC48V14.8Ah | |

時にストレスなく作業できること，タスク遂行のために必要な機器が搭載できること，転倒復帰など全身を使った動作を行うときにその動きを妨げないような外観形状とすることを考慮し決定した。表1に主要寸法と主要搭載機器を示す。主要搭載機器の詳細については，次節以降を参照のこと。

上記タスクを実現するための技術課題を抽出し，それぞれについて仕様の策定を行った。以下に策定した仕様について説明する。

(1) 外観意匠に関する仕様策定

人間と同じ空間で協調作業を行うには人間に圧迫感や違和感をなるべく与えないようにする必要がある。対人親和性の向上を図るため，外観意匠をメカニックデザイナーである出淵裕氏にお願いした。タスク遂行に必要な機器を搭載すると共にヒューマノイドロボットとして違和感のない外観にするため，可能な限りデザイン画を忠実に再現するよう，外装設計を行うこととした。図2にHRP-2のデザイン画を示す。また搭載物のボリューム，関節軸の配置位置を把握するために作成した機構計画図を図3に示す。



図2 HRP-2デザイン画

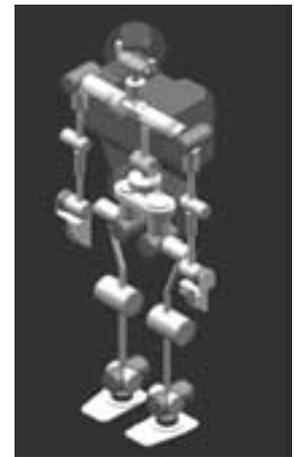


図3 機構計画図

和感のない外観にするため，可能な限りデザイン画を忠実に再現するよう，外装設計を行うこととした。図2にHRP-2のデザイン画を示す。また搭載物のボリューム，関節軸の配置位置を把握するために作成した機構計画図を図3に示す。

(2) 不整地対応機能に関する仕様策定

HRP-2の不整地対応機能として，左右の脚の着地面の高低差±40 mm以内，着地面の傾き±5%以内の不整地歩行実現を目標に仕様設計を行った。

不整地路面においても安定な歩行を実現させるためには，路面に応じて足裏が柔軟にならうような機構で，かつロボットの挙動を確実に精度良く制御できる機構が望ましい。制御用のセンサとして足首部に六軸力センサを装備し，ゴムブッシュを介して足裏を取り付けた。図4に足裏機構部を示す。ゴムブッシュは，歩行時の衝撃力低減とならぬ動作を担うが，XY方向には変形させたくない。また変形時に生じる振動は速く減衰させたい。Z軸方向に撓みXY方向には変形しにくい緩衝ブッシュを配置し，変形時の振動を速やかに減衰させるため減衰ブッシュと緩衝材を配置した。足裏フレームについては，足裏に作用する力を正確にセンサへ伝えるため高剛性化し，外形サイズもセンサが許容する限り大きくして歩行の安定化を図った。

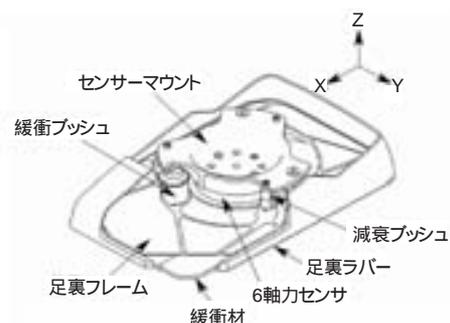


図4 不整地対応機能を装備した足裏機構

(3) 協調作業機能に関する仕様策定

HRP-2の協調作業機能として、パネル集積所から遠隔操作装置（音声入力）を携帯した作業者と共同でパネルを持ち上げ搬送し、作業者が指示した取り付け位置へパネルを据え付ける作業が行えることを目標に仕様設計を行った。パネルの仕様は、幅600 mm×長さ1 800 mm、重量5 kg程度とした。

ロボットが人間と協調してパネルを安定的、かつ安全に搬送等ができるよう、腕部の関節軸仕様を策定した。パネル搬送時はパネルを介して作業者がロボットの動きをコントロールする。腕部に作用する力を計測し制御するため、6軸力センサを装備した。搬送路面の地形観測やパネルの位置を把握するため頭部には3眼ステレオカメラを装備し、作業者と音声コミュニケーションを取るためのスピーカも装備した。

(4) 転倒対応機能

HRP-2の転倒対応機能として、まず下記するような転倒の定義化を行い、その実現を目標に仕様設計を行った。

転倒の定義化：「転倒時にロボットが最初に着地する部位（ヒットポイント）を設定し、この位置で着地する様に制御する。この位置で着地した場合は、各部の損傷は軽微なものでロボット自身で復帰可能である」

ヒットポイントとして想定したのは、後方転倒時は臀部、前方転倒時は膝である。臀部は衝撃吸収性に優れ、かつ比重が0.03～0.085と軽量の低反発ウレタンフォームを採用、膝は衝撃に強いアクリル変性高衝撃塩化ビニル樹脂と衝撃吸収性に優れたゲルの組み合わせを採用し、転倒時の衝撃緩和を図った。転倒対応時の動作はシミュレーション（図5）で最適化を行った。なおシミュレーション時の転倒衝撃値は10G程度であった。



図5 転倒対応時（後方転倒）のシミュレーション

(5) 転倒回復機能

HRP-2の転倒回復機能として、直立姿勢から仰向け姿勢およびうつ伏せ姿勢に寝転び、再び直立姿勢に戻る動作の実現を目標に仕様設計を行った。この動作を安定的に行えるよう、外観寸法や形状、外装素材、関節軸仕様（作動範囲、トルク、速度）を策定した。

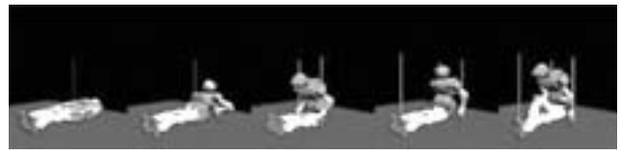


図6 転倒回復時（仰向けからの回復）のシミュレーション

転倒回復時の動作はシミュレーション（図6）で最適化を行った。

(6) モジュール化機能

機械的、電気的に着脱が容易に行えるモジュール部位を設置することで、下記の効果が期待できる。

ロボット組立て作業時の効率化を図れる

故障や破損した時に容易に部位交換が可能となる

ロボットが行う作業用途に応じて容易に部位交換（例えばハンド部）が可能となる

重量増加や着脱部の剛性、信頼性を考慮し、モジュール化部位の仕様設計を行った。図7にモジュール化部位を示す。

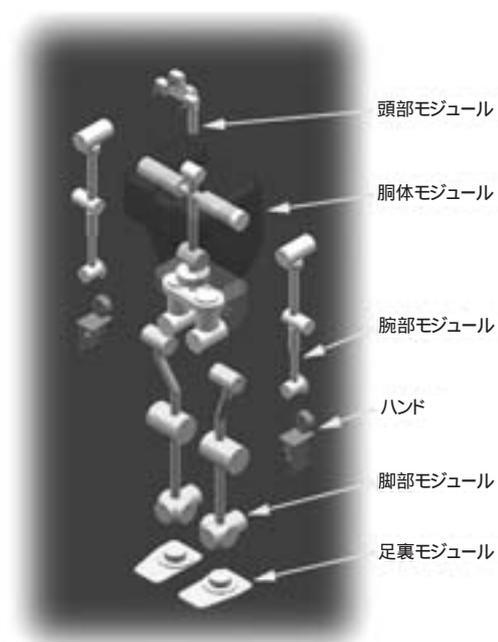
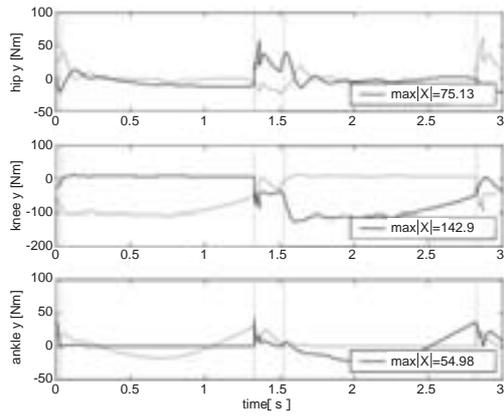


図7 モジュール化部位

(7) 関節軸の仕様

ロボットの機動性のみを考えると関節軸の自由度、配置、作動範囲、出力は多い方が望ましい。しかしこれらが増えることは重量増加、関節部の剛性不足を招く恐れがある。よって前節までに仕様策定してきたHRP-2の要求機能が達成できることを大前提とし、なるべく前記のような不具合が発生しないように仕様の策定を行った。この際、各関節の可動範囲、出力は動作のシミュレーションを行い設定した。一例として、段差200 mm階段昇降の解析結果を図8示す。関節軸の仕様を表2に、配置を図3に示す。



< 段差200 mm階段昇降時の脚部の必要トルク >
 図8 階段昇降時のシミュレーション

表2 HRP-2の関節軸仕様

| 部位区分 総自由度数30 | 関節名称 | | 行動範囲 deg | 最終出力 | |
|------------------------|------|-----|-----------------|-------------|--------------|
| | | | | 最大トルク Nm | 最大回転数 rpm |
| 頭部 自由度数2 | 首関節 | ピッチ | 前方45°, 後方30° | 9.6 | 64.0 |
| | 首関節 | ヨー | 左右方向45° | 9.6 | 64.0 |
| 腕部 自由度数 7×2 = 14 | 肩関節 | ピッチ | 前方180°, 後方60° | 160.3 | 39.7 |
| | 肩関節 | ロール | 外側95°, 内側10° | 100.4 | 22.9 |
| | 肩関節 | ヨー | 外側92°, 内側92° | 48.7 | 39.4 |
| | 肘関節 | ピッチ | 前方137°, 後方2° | 108.5 | 21.2 |
| | 肘関節 | ヨー | 外側92°, 内側92° | 13.9 | 44.0 |
| | 手首関節 | ピッチ | 前方92°, 後方92° | 63.9 | 30.0 |
| | ハンド | 開閉 | 開方向60°, 閉方向約16° | 13.9 | 44.0 |
| 腰部 自由度数2 | 腰関節 | ピッチ | 前方60°, 後方5° | 278.9 | 22.8 |
| | 腰関節 | ヨー | 左右方向45° | 151.8 | 41.9 |
| 脚部 自由度数 6×2 = 12 | 股関節 | ピッチ | 前方125°, 後方42° | 151.4 | 42.1 |
| | 股関節 | ロール | 外側35°, 内側20° | 175.4 | 36.2 |
| | 股関節 | ヨー | 外側45°, 内側30° | 86.2 | 33.8 |
| | 膝関節 | ピッチ | 前方2°, 後方150° | 168.3 | 37.9 |
| | 足首関節 | ピッチ | 前方75°, 後方42° | 131.6 | 48.3 |
| | 足首関節 | ロール | 外側20°, 内側35° | 73.1 | 87.0 |

関節軸の特徴的な設計仕様を下記にまとめる。

関節軸の構成は位置指令に対し忠実にかつ高速応答する必要があるため、機構部にガタのないノンバックラッシュ構成 (図9) とした。

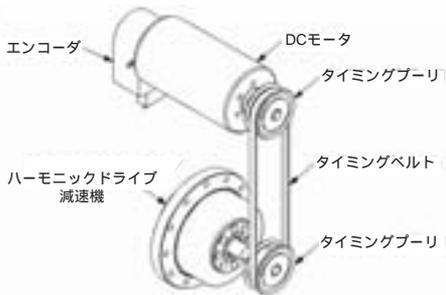


図9 関節軸のノンバックラッシュ構成

図3に示すとおり、腰関節にピッチ軸とヨー軸を配置した。ピッチ軸は、主に転倒対応や転倒回復時の動作に有効である。ヨー軸は、主に協調作業時の上半身作業範囲拡大に有効である。歩行においては歩幅拡大が期待できる。

図3に示すとおり、股関節のピッチ軸を片持ち構造とした。通常のヒューノイドロボットは両持ち構造としているが、HRP-2では歩行の安定化とバランスを崩し転倒しそうな場合の回避動作 (両脚をクロスするような動作が可能) 等が行いやすいように片持ち構造とした。

(8) 電装システムの仕様

図10に電装システムの構成を示す。電装システムについては小型化を行うと同時に、特に安定性と信頼性および機器の着脱性に留意し仕様設計した。

コンピュータは省スペース化と汎用性を考慮し HALF サイズのPCIバス対応品を選定した。また処理能力向上と円滑な試験進行を行うため動作系と視覚系の2つを搭載する。動作系コンピュータはリアルタイム制御と開発のしやすさからOSとしてART-Linuxを採用した。挿入するボード類については、機能の最適化と省スペース化を考慮し特注で製作した。両腕の先端には6軸力センサを配置し、協調作業等の制御に使用する。

両脚の先端に6軸力センサ、胸部に姿勢センサ (ジャイロ, 加速度センサ) を配置し、歩行等の制御に使用する。

30軸のモータにはそれぞれエンコーダが設置されており、この信号を使用して位置制御を行う。

頭部には3眼ステレオモノクロカメラを配置し不整地やパネルを高精度に3次元認識できるようにする。胴体内にバッテリーを内蔵し、また無線LANを搭載することでケーブルレス状態での作動を可能とする。

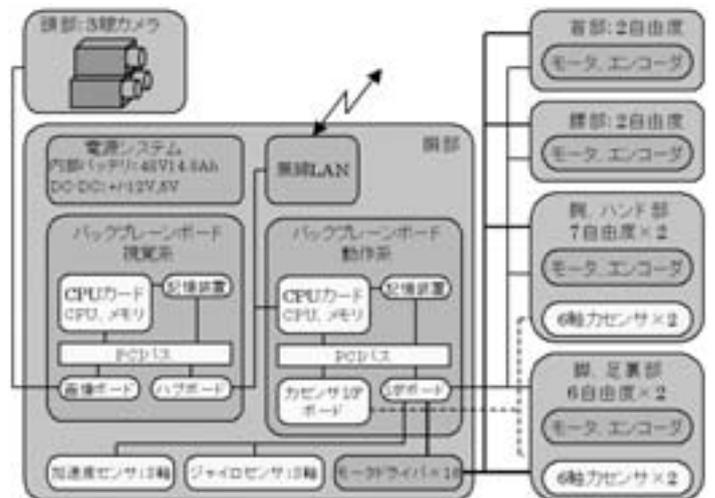


図10 電装システムの構成

3. 設計・製作

本章では、前章「HRP-2の仕様策定」の仕様に基づいて実施した設計・製作について説明する。設計・製作は以下のようにモジュールごとに行った。

(1) 頭部モジュールの設計・製作

頭部モジュールは、視覚認識を行うための3眼モノクロステレオカメラ、また首関節としてピッチ軸およびヨー軸を装備する。主構造は、軽量コンパクトで高剛性とするためアルミ板金+機械加工の複合構造とした。頭部の外装は、軽量かつ強度と成型性を考慮し真空注型法によるウレタン樹脂構造とした。首関節部は、大きな作動角に対応しながら内部構造の保護と外観品質向上のため3分割のウレタンゴム製カバーで覆う構造とした(図11)。

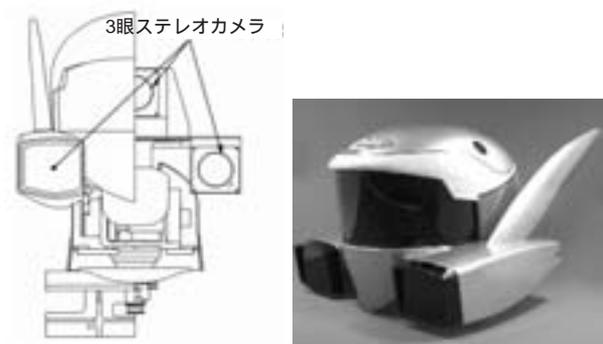
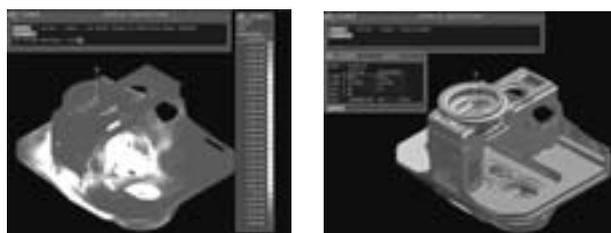


図11 頭部モジュール

(2) 胴体モジュールの設計・製作

胴体モジュールは、電装機器を格納すると共に頭部、腕部、脚部の付け根になる重要な構造部である。主構造は、電装機器の着脱性を考慮しつつ、軽量高剛性とするため胴部、腰部共に石膏鋳造法による薄肉アルミ鋳造を採用した(図13)。構造部の最適化設計を行うため図12に示すような構造解析を実施した。カバーは、シートフォーミング法による成型方法で製作した。材質は、耐衝撃性に優れているアクリル変性高衝撃塩化ビニル樹脂を採用した。転倒時等、二次的に加わる衝撃に対し、内部に搭載している機器を保護するためである。腰部には、転倒時のヒットポイントとして発泡ウレタン製の臀部を設けた。腰関節部は、大きな作動角に対応しながら内部



応力解析

歪み解析

図12 腰部鋳造品の構造解析



図13 胴体構造部品(鋳造)



図14 臀部

構造の保護と外観品質向上のためウレタン樹脂成形品と伸縮性のある布で覆う構造とした(図14)。

(3) 腕部・ハンドモジュールの設計・製作

腕部モジュールは、協調作業と転倒回復時の仕様を考慮し関節軸と構造の設計を行った。主構造(図15)は、軽量高剛性と搭載スペース確保のため石膏鋳造法による薄肉マグネシウム鋳造を採用した。腕部先端には協調作業時の制御を行うため6軸力センサを装備した。ハンドモジュールは、1軸の自由度を有するグリッパとした。ハンド表面をウレタンゴムで覆うことでパネル等を把持するときのグリッパ力を確保した。カバーは、樹脂材料で成形し、安全のため可能な限りファスナーレスとした。配線は、関節作動時ストレスが加わらぬよう、また経路を最短にするよう、可能な限り軸中心を通すようにした。

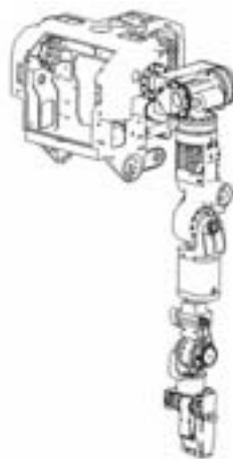


図15 腕部の構造



図16 脚部の構造

(4) 脚部・足裏モジュールの設計・製作

脚部モジュールは、不整地等を含む歩行と転倒および回復時の仕様を考慮し関節軸と構造の設計を行った。主構造(図16)は、軽量高剛性と搭載スペース確保また外観品質向上のため石膏鋳造法による薄肉アルミ鋳造を採用した。足裏は前章で検討した不整地対応機能を有している。膝には、耐衝撃性に優れた樹脂成形品とゲルの組み合わせでヒットポイントを設けた。配線は、モジュール部において複数のコネクタを1つに統合したことにより信頼性と脱着性が向上した。関節軸のモータについ

ては、冷却することで連続歩行時間の延長が認められたため冷却ファンを装備することとした。歩行実験時の膝関節モータハウジングの温度変化を図17に示す。

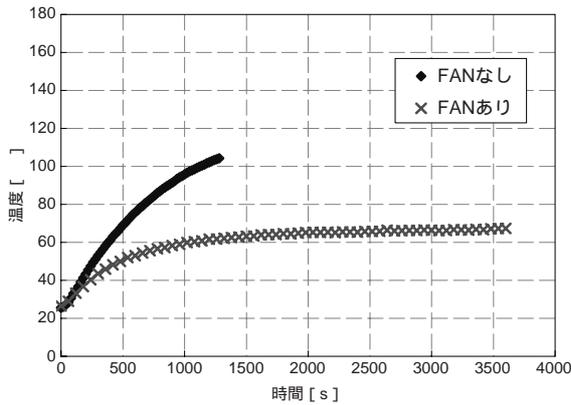


図17 膝関節モータハウジングの温度変化：歩行中

(5) 電装システムの設計・製作

電装システムは、仕様でうたったように小型軽量化、システムの安定性、信頼性の向上、機器の着脱性向上に留意し設計・製作を行った。

配線の基盤化：胴体内の配線は、省配線化と信頼性向上、機器着脱性向上のためできるだけ基盤化した。基盤化設計した部品の一例として、各種信号線を中継するためのボードを図18に示す。

電装機器のユニット化：ユニット化を行うことで省スペース化と機器着脱性向上を図った。ユニット化した一例としてバッテリーユニットを図19に示す。

ノイズ対策：ロボットは信号線や電源線が高密度に搭載されているため、ノイズの影響を受けやすい。予めテストベンチ上でノイズ対策を検討することでロボットに実装したときの安定性、信頼性の向上が図れる。

システムの安定性や信頼性を確保しつつ高密度実装が可能となったため、胴体部の外観はバックパック等の出っ張りを排除することができた。これにより転倒回復等の動作が可能となった。



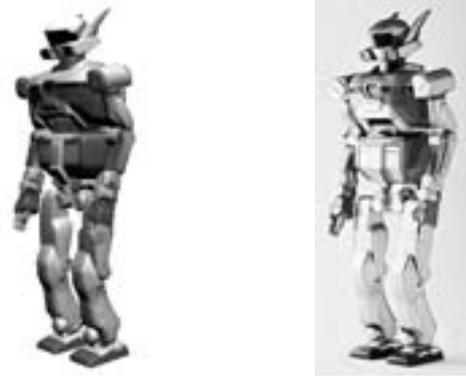
図18 配線の基盤化



図19 バッテリーユニット

(6) 各モジュールの組立て

前記した各モジュールを、機械的、電氣的に結合しそれぞれにカバーを取り付けて製作完了となる(図20)。



設計データ (CAD)

HRP-2製作完了

図20 HRP-2

4. まとめ

本論文では、「人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト」の屋外共同作業分野で研究開発されたHRP-2について、ハードウェアの仕様策定から設計・製作過程を述べた。開発目標として下記機能を設定した。

不整地対応機能

協調作業機能

転倒対応機能、転倒回復機能

この開発目標を考慮し、なおかつ小型軽量化とロボットシステムの安定性、信頼性、取り扱い性に十分留意しながら仕様の策定を行い、これに基づいて設計を行って、最終的にHRP-2を製作することができた。

なお、開発目標に対する評価は、これら機能が網羅されているデモンストレーションを行うことにより、安定的に達成できることが確認されている。詳しくは、平成14年度HRPプロジェクト最終成果報告書を参照されたい。

本プロジェクトで開発したHRP-2を実際の作業空間で使用するのは難しい。今後も引き続き各部の高度化開発を行い、ヒューマノイドロボットがいつか私たちの生活を平和で豊かにするための一助となることを期待する。

最後に、HRP-2は、経済産業省が推進するHRPプロジェクトの一成果として開発されました。ご協力いただきました多くの方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) (財)製造科学技術センター：平成14年度 NEDO委託「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発(新発電技術実用化開発)」成果報告書
- 2) (財)製造科学技術センター：平成14年度 NEDO委託「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発(エネルギー使用合理化技術開発)」成果報告書
- 3) H. Inoue, S. Tachi, Y. Nakamura, K. Hirai, N. Ohyu, S. Hirai, K. Tanie, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Overview of Humanoid Robotics Project of METI," Proc. the 32nd Int. Symposium on Robotics.