

# 実環境で働く人間型ロボット HRP-3

Humanoid Robot “HRP-3” Working in a “Real” Environment

宮森 剛  
Go MIYAMORI

川田工業(株)機械システム事業部  
ロボティクス部係長

赤地 一彦  
Kazuhiko AKACHI

川田工業(株)機械システム事業部  
ロボティクス部係長

平田 勝  
Masaru HIRATA

川田工業(株)機械システム事業部  
ロボティクス部係長

石崎 雅一  
Masakazu ISHIZAKI

川田工業(株)航空・機械事業部  
ロボティクス部

川崎 俊和  
Toshikazu KAWASAKI

川田工業(株)航空・機械事業部  
ロボティクス部

木村 勉  
Tutomu KIMURA

川田工業(株)航空・機械事業部  
ロボティクス部

2002年度から(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より川田工業が委託され、再委託先である(独)産業技術総合研究所と川崎重工業(株)とともに実施した「基盤技術研究促進事業(民間基盤技術研究支援制度)実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」が昨年度をもって終了した。本研究開発では、実環境で働く人間型ロボットプラットフォームを実現するための基盤技術の研究開発を行い、「働く」ことが出来る人間型ロボットを開発した。本論文では、開発したヒューマノイドロボットであるHRP-3の開発内容について報告する。

キーワード：ロボット、ヒューマノイド、防塵、防滴

## 1. はじめに

2002年度から(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より川田工業が委託され、再委託先である(独)産業技術総合研究所と川崎重工業(株)とともに実施した「基盤技術研究促進事業(民間基盤技術研究支援制度)実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」が昨年度をもって終了した。

本研究開発では、実環境で「働く」ことが出来る人間型ロボットを実現することを目的とした。具体的には、身長155[cm]・重量65[kg]・バッテリー稼動時間120分・防滴・防塵処理が施された人間型ロボットハードウェア(川田工業担当)、滑りやすい路面上の二足歩行及び腕と脚を併用した作業を実現するソフトウェア(産業技術総合研究所担当)、および超多自由度の人間型ロボットを操作者の意図に基づき自在に利用できる遠隔操作装置(川崎重工業担当)の3者から成る、実環境で働く人間型ロボットプラットフォームを実現するための基盤技術の研究開発を行った。

本論文では、川田工業が開発した人間型ロボットハードウェアであるHRP-3(写真1)の特徴について述べ、その中でも特筆される防塵防滴に関する研究とシステム構成の概要について説明する。



写真1 HRP-3

## 2. 特徴

表1にHRP-3の主要な諸元を示す。身長約1.6 m、体重68 kgの体内には、運動制御計算および視覚認識計算を担うコンピュータを2台搭載した。また、総自由度数42軸を実現する関節を駆動するモータには、ブラシレスACモータおよびブラシ付DCモータの2方式のモータシステ

ムを採用した。これらの関節を制御するシステムは、「集中制御方式」と「分散制御方式」の2方式を採用した。両方式については4項で詳しく述べる。

次にセンサについて説明する。各関節には関節の角度制御に用いるインクリメンタルエンコーダを搭載する。頭部には視覚距離計測用の3眼ステレオカメラ、遠隔コックピットに映像を映し出すための遠隔操作用2眼カメラ、障害物検知用にレーザ測距センサを搭載する。さらに姿勢安定制御に用いられる姿勢センサや6軸力センサを搭載する。

ロボットの運動性能についてであるが、歩行速度は通常歩行で2 km/hとなっており、濡れた路面等、滑りやすい面上でも安定歩行可能な制御ソフトウェアが実装されている。また、内蔵されるニッケル水素バッテリーで連続2時間の歩行が可能である。可搬能力は左右それぞれ6軸の関節を有するハンドを用いて約1.5 kgの物体を把持することが可能である。ハンドの形状は汎用の電動ドライバを把持できるよう設計されている。

屋外環境での活動を想定し、防滴・防塵性を考慮した構造をもつ外装デザインは対人親和性を高め、本研究開発の目標である“実環境で「働く」ことが出来る人間型ロボット”を表現するために、デザイナーに依頼した。

表1 主な仕様

主要寸法	身長:1 606 mm, 幅:693 mm, 最大厚み:410 mm	
総重量	68 kg:内蔵電源含む	
歩行性能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・滑り易い路面上の歩行:動摩擦係数 <math>\mu=0.3</math>の路面上の歩行</li> <li>・連続歩行速度:2 km/h</li> </ul>	
可搬荷重	ハンドにて1.5 kgの物体を把持し、運搬可能(運搬姿勢に制限あり)	
内蔵電源	ニッケル水素バッテリー:48 V	
LAN通信	有線LAN,無線LAN	
関節部	総自由度数	42軸
	自由度数	首軸:2軸、腰軸:2軸、腕軸:7軸×2腕、脚軸6軸×2脚、ハンド:6軸×2
	アクチュエータ	AC,DCモータ混合+減速機
メインコンピュータ	バス	コンパクトPCI
制御システム	分散コンピュータ	AC & DCモータドライバにMPUを装備
	通信	CAN:Controller Area Network:1Mbps
	システム構成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上半身:頭部,腕部は集中制御</li> <li>・下半身:腰部,脚部は分散制御</li> </ul>
センサ	各関節部	インクリメンタルエンコーダ:差動出力
	視覚環境認識	視覚認識用3眼ステレオカメラシステム
	センサ	遠隔操作用2眼ステレオ視カメラ
	腕部	レーザ式測距センサ
	脚部	3軸姿勢センサ
	腕部	6軸力センサ
	脚部	6軸力センサ

特徴	防滴・防塵	実環境として3 mm/hの雨でも歩行できる
	外装デザイン	イメージコンセプトは、実環境で「働く」ことが出来る人間型ロボット:デザイナーに依頼
	関節部作動範囲	視覚,及び手先の作業性を考慮し、首軸と腕軸の作動範囲を拡大
	ハンド	電動ドライバを把持し,操作できる

### 3. 防滴・防塵に関する研究

屋外の実環境下で働くことをコンセプトとして開発したロボットであるHRP-3は、防塵・防滴性を有することを大きな特徴としてもつ。

ロボットを開発するにあたり、防滴・防塵性の目標を決める必要があった。一般産業分野においては、例えばJISなどにおいて電子機器に関しての公的規格が存在するが、ロボット全体を対象とした規格はない。一般規格に実環境条件を取り入れて検討を実施した結果、IEC 規格No.IP52をもとにした新たな目標を策定した。具体的には、

#### ①降雨量、方向

3 [mm/h], 角度15°の雨

#### ②動作姿勢

原則的に歩行姿勢時のみ継続して作動可能とする。但し腕部は全方向

#### ③保護内容

機能的に問題のない部分への水の浸入は良しとするが、そこに溜まり続けられないこと。すなわちドレンホール等を設けて水の排出を行うこと

などと目標設定した。この目標を満足できるような機構や対策を検討し、設計・試作・評価を行った。採用した主な手法を以下に挙げる。

- ・胴部は、電装システムや冷却機器(ファンやフィン)の配置を再検討し、より効率的な冷却システムを構築した。
- ・頭部、腰部、バッテリーは、ある程度の発熱が懸念されるため、フィルタを介した自然対流を利用し防滴・防塵機能を維持しつつ冷却をおこなうこととした。この際、フィルタに水が直撃しないよう、工夫した。
- ・樹脂カバー等は、装着時の変形による水の浸入を防ぐため、形状の単純化、形状剛性、取り付けピッチに十分留意し、設計製作した。
- ・多少凹凸、歪みがある面や若干変形が生じる面(力センサ部等)の防滴・防塵には、独立発泡もしくは半独立発泡スポンジ(エプトシーラ)を圧縮取り付けすることで対応することとした。

- ・電装機器の集中配置をおこなうことで、内部へのアクセスが必要な部位を減らす。こうすることで防滴・防塵機能と着脱性という相反した特性を有しなければならないカバーを減らすこととした。なお、常にアクセス性を求められない部位に関しては、シリコンゴム等で確実にシールした。
- ・着脱性を考慮し、取り付け取り外しを頻繁におこなう部位は、シリコンゴムや液体ガスケットの使用を極力おこなわない方法で対処することとした。

上述した手法を評価するためにロボット全体もしくは一部分を用い、防滴・防塵性能評価試験を行った。まず、腕部、頭部といった各部位ごとの予備試験を実施し必要な対策を施した後、全身型で評価する手順となる。防滴・防塵性それぞれを評価するための専用の試験装置を用いた。

### 防滴試験

**写真2, 表2**に防滴試験風景と試験法案を示す。試験装置は、本来の目標であるIPX2よりも厳しい条件となるIPX3, 4の散水装置を使用した。試験にあたっては、内部に異物が侵入することによって破損等の恐れがあったことから、頭部や胴体部、腕部といった各部位に分けての予備試験を実施し、防滴・防塵性が十分に確保されていることを確認した後に全身を対象とした全身型試験を実施した。

全身型試験においても、はじめに内部装備品を取り外して電気を投入しない試験を実施し防滴性が十分に確保されていることを確認した後に、電源を投入し歩行動作をしながら全身防滴試験を行うこととした。

立ち姿勢と腕を上げた姿勢の2種類、それぞれ前面・背面から5分間の散水試験を終了後、クレーンにて引き上げ、分解・検査を行った。試験の結果、胴体部の排熱ファンの口からと思われる水の侵入が確認されたため、必要な処置を施した。

### 防塵試験

**写真3, 表3**に胴体部試験の様子と試験法案を示す。試験装置はJIS C 0920に対応した試験装置を使用し、試験粉体にタルク9種を採用した。試験ではカテゴリ-2を適用することから、供試体は無通电の静止状態とした。防塵性の評価は、①試験装置に全身型ロボットを収容することが不可能であったため、②前年度の研究結果から水の浸入がなければ、粉塵も侵入しないことが確かめられていた、ことから部位ごとの試験結果のみから評価した。その結果、目標とする防塵性能を有していることが確認された。



写真2 防滴試験



写真3 胴体部防塵試験

表2 防滴試験法案

試験方法	
1	試験装置：JIS C 0920 IPX3及びX4対応品 試験液体：真水 単品部品試験：水 圧：50 kPa 散水量：30 mm/h±10 % 全身試験：水 圧：200 kPa 散水量：120 mm/h
2	試験時間：1試験面(全身試験では、前面、背面)に対して最低5分散水する。
3	散水ノズルから供試体までの距離及び角度 単品部品試験：供試体から500 mm程度、角度45度程度 全身予備試験：地面から3 000 mm程度、自然雨と同程度の条件 全身動作試験：地面から3 000 mm程度、自然雨と同程度の条件
4	単品部品を槽内へセットする際、検証部位が上面を向くようにセットし検証部位にまんべんなく散水されるように配置する。 全身試験では、試験面にまんべんなく散水されるように配置する。
5	単品部品の検証では、静止(非通電、駆動部停止)状態とする。 全身の検証では静止及び、足踏みをさせ足踏み位置のズレが限界に達した位置で中腰姿勢の状態とする。 なお、何れの検証においても急激な温度変化がないように、供試体と試験水との温度差を小さくして試験を開始する。
6	試験の様子をビデオカメラ2台(全身が写るように配置)、スチールカメラ2台で記録する。
評価方法	
1	試験面全てに散水が終了した後、表面、隙間の水を十分に拭き取る。
2	検証部位を静かに分解し、目視にて水の浸入を点検する。
3	浸入の有無を確認し写真撮影を行う。

表3 防塵試験法案

試験方法	
1	試験装置：JIS C 0920 対応品 試験粉体：タルク9種 (JIS Z 8901) タルク使用量：2 kg/m <sup>3</sup>
2	試験時間：連続8時間(カテゴリ-2に準拠) 動作設定：ブロー-8時間連続運転 (バイブレーション10秒→タルク槽攪拌5秒→攪拌休止3分を試験中繰り返す)
3	供試体を槽内へセットする際、検証部位にタルクが堆積しないように配置する。
4	試験中供試体は静止(非通電、駆動部停止)状態とする。 また、急激な温度変化がないように、試験槽内との温度差を可能な限り無くして試験を開始する。
評価方法	
1	装置停止後、一定時間(試験槽内のタルクが落下するまで)放置した後、供試体を返すなどして上面に堆積したタルクを槽内へ静かに落とす。 その後槽内から取り出し、毛先の柔らかい筆を使用して表面に付着したタルクを静かになおかつ丁寧に除去する。
2	検証部位を静かに分解し、目視にてタルクの浸入を点検する。
3	浸入の有無を確認し写真撮影を行う。

#### 4. HRP-3の電装システム

次に、HRP-3の電装システムとシステムについて説明する。図1にシステムブロック図を示す。

電源はDC 48 Vで内蔵バッテリーから供給される。バッテリーは16 Ahのニッケル水素方式を採用しており、2時間の歩行動作が可能となっている。また、より長時間の運転を可能とするために外部から供給されるDC電源でも動作させることが可能となっている。バッテリーの充電は、バッテリーを外して外部充電器で行う。

胴体部に2台のコンパクトPCIバスコンピュータが搭載されており、それぞれ、運動制御計算と視覚認識計算を行う。

外部(遠隔コックピットなど)とのデータ通信は無線LANを使用する。また、頭部に無線式2眼カメラを搭載しており、離れた場所に映像を送信することができる。

関節サーボ制御システムは、「集中制御方式」と「分散制御方式」の両方式を上半身(16軸)制御、下半身(14軸)制御、ハンド(12軸)制御それぞれに対して使い分けた。

上半身における「集中制御方式」は中央集権ともいえる方式で、中央のメインコンピュータがモータの関節角度を読み込んで直接関節角度制御を行う方式である。特徴としては、関節付近に演算装置を置くスペースを確保する必要がないため、関節付近の形状をすっきりとさせることができる。反面、モータや関節角度センサなどの配線を中央のメインPCに引き回す必要があるため、とくにメインPC付近の配線量が激増する難点がある。本開発においては、デザイン上、あまり大きなスペースが確保できない腕および首軸に関して集中制御方式を採用し、胴体中央にモータアンプを配した。

一方、分散制御方式は地方分散ともいえる方式で、関節モータに近い場所に1軸または2軸用の小型のサーボ演算装置を複数個(関節軸数分)おき、各演算装置をシリアル通信バスで結ぶ方式である。特徴としては、集中制御方式の逆で、中央のメインコンピュータ周辺の配線を減らすことはできるが、関節付近に演算装置用のスペースを確保する必要がある。また、分散制御用の機器が増えることから、重量増とエネルギー消費量の増大を招く恐れがあった。

本開発においては、比較的大きなスペースを確保することができた脚部、腰部、ハンド部に本方式を採用し、

それぞれの部位に通信型モータ制御ドライバを配置した。ドライバの通信方式は自動車などで実績があり、部品等が安価に広く流通しているCAN (Control Area Network)を採用し、小型化とエネルギー消費量の低減化を図ったことで前述したデメリットを極力抑えた。写真4にハンド内部の通信型モータ制御ドライバを示す。写真のように1台あたり2軸を制御可能なドライバ装置が3台搭載されている。集中制御方式であれば片手あたり6軸分の信号線を胴体のコンピュータに引き回す必要があり配線不可能であった。軸数が増えるに従い、分散制御方式のメリットが大きくなることが分かる。

写真5はバッテリーによる連続歩行動作の試験風景である。数メートルの距離を往復する連続歩行動作を繰り返し、並行してバッテリー電圧を計測した。バッテリー残量が減少しシステムが要求する電圧を維持できなくなった時点で試験終了とした。試験の結果、2時間の歩行動作を継続できることが確認できた。

写真6は電動ドライバを使った作業について動作開発を行っている様子であり、ここで行った動作は片手で壁に寄りかかりながら、ドライバでボルトを締結する作業

である。人間であれば簡単に実行できる作業でも、ロボットにとっては、ボルトの認識、全身のバランス、締結力の検知など多くのクリアされるべき問題があることが実験により明らかになっている。今後も継続して動作や機能の開発を進めていく。

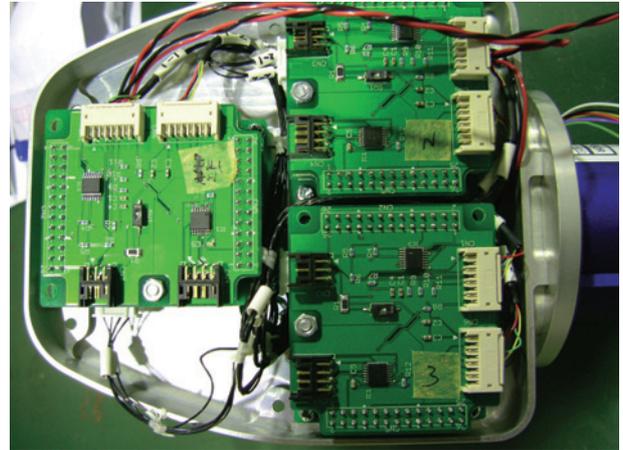


写真4 ハンド制御ドライバ

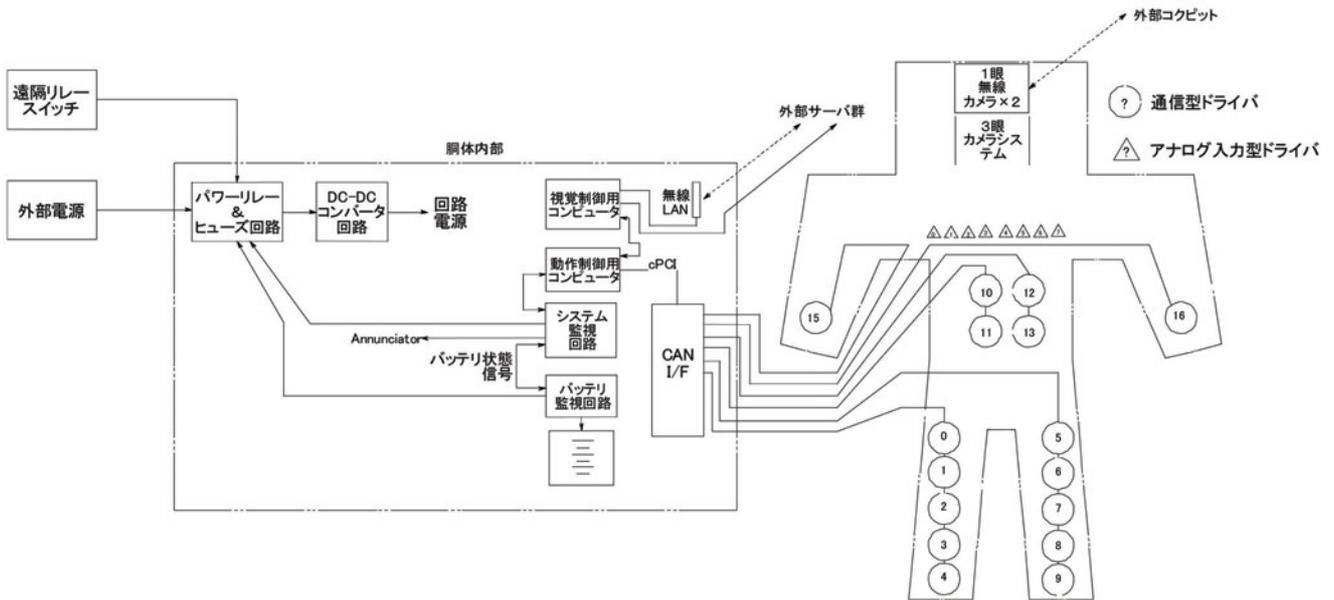


図1 システムブロック図



写真5 歩行耐久試験



写真6 電動ドライバを使った作業

## 5. まとめ

本報告では、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より委託された研究開発「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」の成果品の一部である、人間型ロボットHRP-3の特徴と研究開発概要について説明した。その中で、防滴・防塵性とシステム構成の特徴について説明した。今後、継続して動作機能開発を行い、ロボットを進化させていく予定である。

最後に、本研究に際して多大なるご支援とご協力いただきました(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(独)産業技術総合研究所ならびに川崎重工業(株)の関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 平成18年度 基盤技術研究促進事業「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」成果報告書  
(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 2) 2003 JISハンドブック「電気安全」 日本規格協会