

人間型ロボットHRP-3Pの開発

Development of a Humanoid Robot, HRP-3P

金平 徳之
Noriyuki KANEHIRA

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室係長

宮森 剛
Go MIYAMORI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

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

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

赤地 一彦
Kazuhiko AKACHI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室係長

航空・機械事業部では経済産業省とNEDOの委託を受けて、「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」を行っている。本事業の研究期間は2002年度から2006年度までの5年間であり、2004年度に人間型ロボット試作機を、最終年度である2006年度に最終成果機を製作する予定である。本研究では、防滴・防塵化と高効率稼動を人間型ロボットにおいて達成することを目標としている。これまでに基本的な要素技術の検討、試験を行い、試作機の設計までを完了している。本稿ではこの次世代人間型ロボット試作機に盛り込まれる新しい機能について、その仕様抽出過程と最終設計を報告する。

キーワード：人間型ロボット、実環境、防滴・防塵、高効率

1. はじめに

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と記す）は、1998年度から5年間計画で「人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト」（以下、HRPと記す）を実施し¹⁾、ヒューマノイドロボットの社会への応用可能性について検討した。本事業部はHRPの後期応用開発期間（2000年度～2002年度）に参加し、人と協調してパネル搬送などを行うことができる人間サイズのヒューマノイドロボットHRP-2²⁾を開発した。

2002年度からは経済産業省とNEDOの委託を受けて、「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」を行っている。このプロジェクトでは、実際の労働現場や生活環境で作業ができる人間型ロボットの開発を目指している。プロジェクトの期間は5年間であり、2004年度中に試作機（以下、HRP-3Pと記す）を製作、各種試験を行い、2006年度に成果機（以下、HRP-3と記す）を完成させる。当事業部ではこれまでにHRP-3P設計に必要な試験や解析を行い、設計製作図面までの作業を完了している。

本稿では、まず「基盤技術研究促進事業」におけるヒューマノイドロボットの開発コンセプトを説明する。次にHRP-3Pの主要設計仕様について述べ、次世代ロボットの具体的な目標や特徴を紹介する³⁾。

2. 開発コンセプト

HRPは、働く人間型ロボットの例を社会に示すことに成功したが、実際の労働現場や生活環境等の実環境で人間型ロボットを活用するためには、移動可能環境の拡大、稼動可能時間の延長、滑りやすい路面での歩行、片腕で体を支えながらの作業の実現、遠隔操作の高度化等、さらなる人間型ロボットの基盤技術の研究開発が必要である。

「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」は、上記の課題を克服することを目的として、「人間型ロボットハードウェアの実環境対応技術の研究開発」、「人間型ロボットソフトウェアの実環境対応技術の研究開発^{4) 5)}」、および「人間型ロボットの実環境遠隔操作技術の研究開発」の3つの研究開発項目で構成される。このうち川田工業は「人間型ロボットハードウェアの実環境対応技術の研究開発」を担当する。本研究で開発する人間型ロボットハードウェアの基本コンセプトは、次の通りである。

- ・身長160 cm程度
- ・重量65 kg程度
- ・バッテリー稼動時間120分（HRP-2の2倍）
- ・防滴・防塵機能

3. HRP-3Pの設計諸元

前述の基本コンセプトをもとにして詳細な検討を行い、HRP-3Pの設計諸元を導き出した。表1に主要設計仕様を示す。HRP-2と比較して、重量と関節数が増加している。重量の増加は搭載電子機器数の増加、関節軸数の増加、大容量モータの採用が原因である。関節軸数については手首に1自由度、ハンドに2自由度を新たに追加した。これは腕部分の機能強化によるロボットの作業内容拡張を目的としている。

表1 HRP-3Pの主要設計仕様

諸元	高さ : 1 600 mm 幅 : 670 mm 奥行き : 360 mm
重量	65 kg (バッテリー含む)
関節	36 自由度 頭部 : 2 自由度 (ピッチ, ヨー) 腕 : 7 自由度×2 (肩:3, 肘:1, 手首:3) 手 : 3 自由度×2 腰 : 2 自由度 (ピッチ, ヨー) 脚 : 6 自由度×2 (股:3, 膝:1, 足首:2)

図1にHRP-3Pの計画設計図を示す。HRP-2と比較して、腕部、脚部のボリュームが大きくなっている。これはHRP-2では胴体部に集中的に配置していた電子機器類を四肢に分散して搭載したためである。コンピュータの分散配置については後述するが、機能拡張の容易化、省配線化、中央CPUへの計算量負担減少を目的としている。

4. HRP-3Pの設計仕様

HRP-3Pのハードウェアは、高効率化、防滴・防塵化、作業性能の向上の3点に主眼をおいて開発を行った。

高効率化については、小型高出力モータとしてACモータを開発した。また稼働時間を延長するため、バッテリーをこれまでのニッケル水素系からリチウムマンガン系に変更した。さらにバッテリーの残量を適切に管理する目的でインテリジェントバッテリーシステムを構築した。

防滴・防塵化についてはHRP-2の筐体を用いて防水試験と粉塵試験を行って水や粉塵の浸入度合いを調べ、防滴・防塵を施す箇所を特定して対策を設計に盛り込んだ。防滴・防塵化を行うにあたっては電子機器の発生する熱をどう正確に見積もり処理するかが問題となった。この点についてはHRP-2を用いて熱計測実験を行い、ロボットの詳細な熱モデルを構築して適切な熱処理方法を検討した⁶⁾。HRP-3Pの熱設計については本誌論文報告p.62にて別途詳述している。

作業性能の向上に関しては、まずCPUの分散化を行った。CPUの分散化では、各四肢に配置されたCPUノード

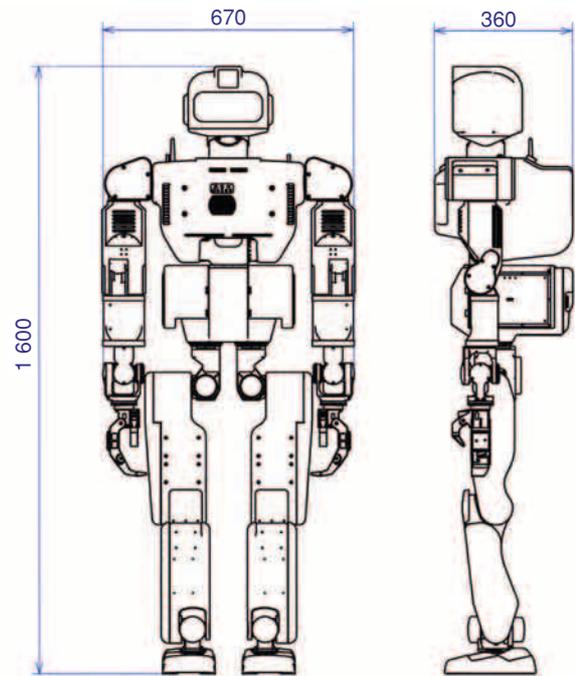


図1 HRP-3Pの計画外観図

をネットワーク通信で結び、リアルタイムに情報をやりとりしてモータやセンサを制御する。このシステムにより中央CPUの演算量を軽減させることができ、その分をロボットの行動計画などより高度な演算にまわすことが可能となる。このCPU分散配置システムはさらに体内の省配線化、ロボット機能拡張の容易化にも寄与する。

作業性の向上に関しては、その他にハンド軸数の追加、搭載カメラ数の増加を行った。

本稿ではここで述べた新機能のうち、高出力ACモータ、防滴・防塵技術、分散CPUシステム、カメラシステムについて説明する。

(1) 高出力ACモータの開発

ロボット用として最適なモータの仕様を導き出すため、図2に示すような脚部だけからなるロボットを製作して歩行実験を行った。

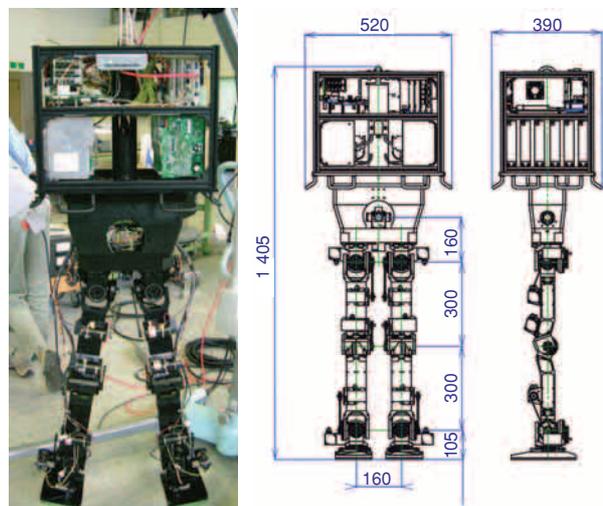


図2 モータ評価用脚ロボット

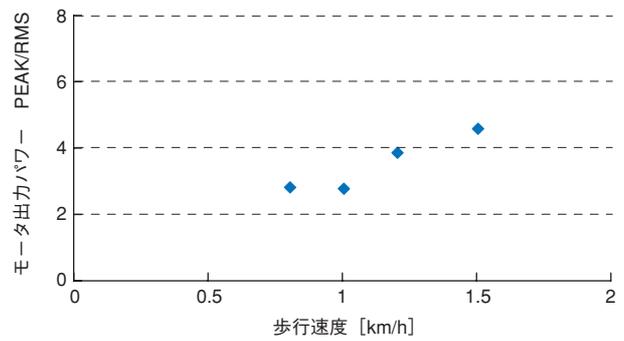
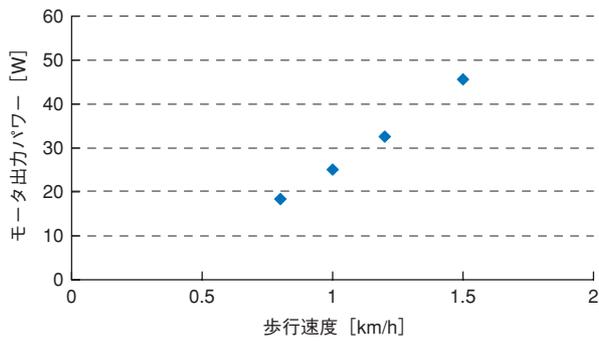


図3 電流計測結果（脚の代表的関節）

図3は歩行速度を変えて電流計測実験を繰り返し、モータ出力パワーを算出して歩行速度についてまとめたものである。左のグラフは脚の代表的な関節における平均出力パワーを、右のグラフは、ピーク出力パワー／平均出力パワーを表している。このように歩行速度とモータ出力パワーには線形の関係がある。またピーク出力パワーに関しては、平均パワーの約4倍が必要であることが分かる。

これら一連の実験データから、ロボットに最適なモータの仕様を導出し、モータの開発を行った。表2に開発したモータの一例の仕様を示す。モータにはACモータを採用した。ACモータは低速高トルク型でありロボットの関節駆動用に適した特性を持っている。今回はこのモータに対応した小型高出力のACモータドライバも同時に開発し、ヒューマノイドロボットの特徴である高ピークトルクも発揮できるようにした。

表2 開発したヒューマノイド用ACサーボ仕様の一例

定格トルク	[Nm]	0.358
瞬時最大トルク	[Nm]	2.00
定格電流	[Arms]	5.2
瞬時最大電流	[Arms]	31.2
定格パワーレート	[kw/s]	26.1

(2) 防滴・防塵化技術の開発

本プロジェクトで掲げられている防滴・防塵の達成目標レベルはIP52である。IPは、国際規格であるIEC 529『Degrees of protection provided by enclosures (IP code)』によって定められている規格である。固形異物および水の浸入に対する保護等級はIP記号に続けた2つの数字で表され、第1特性数字は固形異物の侵入による器具への有害な影響に対する外郭の保護等級を、第2特性数字は水の浸入による器具への有害な影響に対する外郭の保護等級をそれぞれ表している。

この規格によるとIP52は、「粉塵に対する保護と15°以内で傾斜しても垂直に滴下する水に対する保護」と定義される。ただしIPによる保護規格の適用範囲は、電気機

械器具の防水試験および固形物の侵入に対して定められたものである。したがって、人間型ロボットへの規格の適用においては、電子機器類に対してはIP52を適用し、その他の機械部分については実機で様々な動作をしながら許容限界を決定するという方針をとることにした。

開発にあたっては、現状のロボットの防滴・防塵程度を確認するため、HRP-2の部品を用いて粉塵、散水試験を行った。図4に示すのはHRP-2の肘関節部分を粉塵試験にかけた様子である。試験は連続8時間、実際に関節部のモータを駆動しながら行った。



図4 粉塵試験の様子

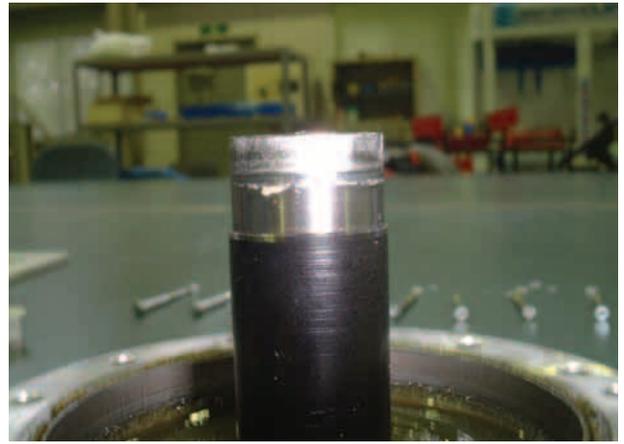
試験終了後の供試体の様子を図5に示す。分解検査をした結果、内部に粉塵の侵入を認めることはできなかった。この実験から粉塵に対しては現在の設計方法でも、必要とされる耐塵性を有していることが分かった。

次に散水試験の様子を図6に示す。試験液には蛍光液(L-DT)を用い、各面5分間試験液を噴霧した。試験後はブラックライトを照射して液体の侵入の有無を確認した。

試験後、供試体を分解し、ブラックライトを照射した結果を図7に示す。緑色に光っている部分が水分を含む部分であり、液体が外部から侵入したことを表している。このような実験結果をもとに、侵入経路を特定し、軸部分の耐水設計を行った。



供試体外観



分解後の軸部

図5 粉塵試験の結果

これらの試験結果をもとに、ロボットへの防滴・防塵機能適用方針を下記のように定めた。

(a) 実環境の定義

- ・防滴：3 [mm/hr]，角度20°の雨を想定。

(b) 動作姿勢

原則的には歩行姿勢時のみ継続して作動可能とする。ただし腕部は全方向とする。また寝転び姿勢等，特定の作業姿勢においては短時間（1分程度）作動可能なこととする。この際機能的に問題

のない部分への水の浸入はよしとするが、そこに溜まり続けることは不可とする。水の排出についてはドレンホール等を設けて対処する。

(c) 各部品の防滴・防塵に対する方向性

- ・減速機部は，単体にて遮蔽する。Oリングの配置やシールベアリングの選定，はめあい部へのロックタイト塗布等を検討する。
- ・ACモータは，単体規格で対応する。DCモータは，防滴・防塵された空間に入れ込む。
- ・バッテリーは単体での遮蔽を検討する。

(3) CPU分散配置システム

CPU分散配置システムの導入にあたっては，ネットワークプロトコルを選択する必要がある。汎用的なプロトコルとしては，Ethernet，CAN，USBなどが挙げられる。これらにはそれぞれに通信速度やリアルタイム性などの特徴がある。表3はこれらの汎用通信プロトコルの特徴をまとめたものである。

表3 汎用通信プロトコルの特徴

	メディア	通信速度	サポートするトポロジ
Ethernet	4芯ツイストペア (10/100Base-T) 8芯ツイストペア (100Base-T4)	100 Mbps	スター型 バス型 これらの複合
ARCNET	2芯ツイストペア	10 Mbps	スター型 バス型 これらの複合
CAN	2芯ツイストペア	1 Mbps	スター型 バス型 これらの複合
USB1.1	2芯 (電源) 4芯 (電信)	12 Mbps (Full Speed Mode)	スター型 バス型 これらの複合
USB2.0	2芯 (電源) 4芯 (電信)	12 Mbps (Full Speed Mode) 480 Mbps (High Speed Mode)	スター型 バス型 これらの複合
IEEE1394	2芯 (電源) 4芯 (電信)	400 Mbps	スター型 バス型 これらの複合

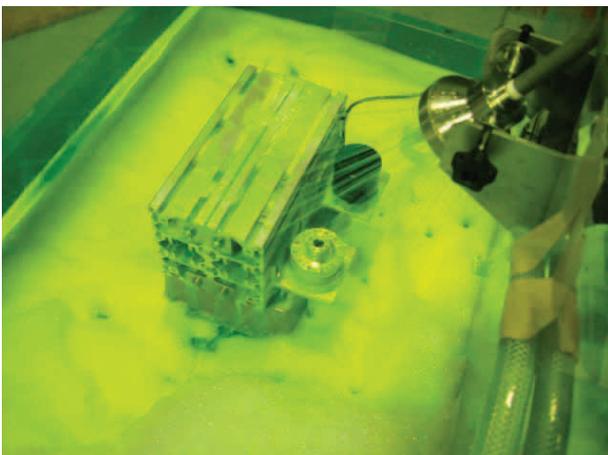


図6 散水試験の様子

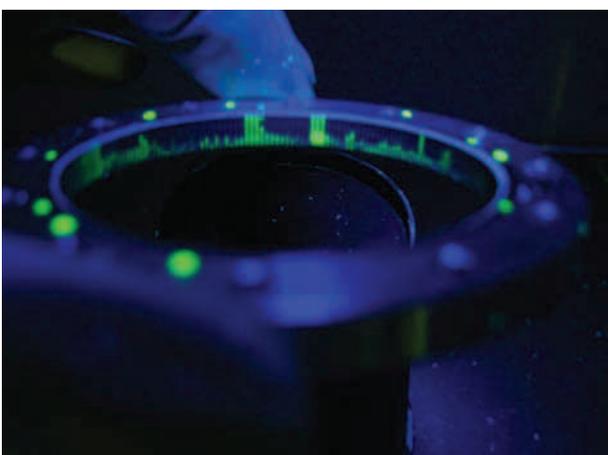


図7 ブラックライトを照射した様子

次に表3のプロトコルの中からロボットに適した通信プロトコルを選択するため、必要な通信情報量を見積もった。その結果、今後の通信情報量増加などを見込んで、10 [Mbps] 以上の通信速度を確保することを条件として導いた。

以上の考察より、プロトコルとしては最終的にEthernetを採用することとした。

分散CPUのハードウェア（以下、ノードと記す）については各四肢に配置されることから小型、軽量のものが望まれる。また、複数のセンサやサーボモータに対応できるように、多数のADやDAチャンネルを有している必要がある。これらのことを考慮して、サーボモータ用とセンサ用の2種類のノードを製作した。

図8に示すのはサーボモータを制御するためのノード（リンクノード）である。外形寸法は95 [mm] × 55 [mm] × 22.2 [mm]、重量は、80 [g] であり、CPU部分とI/O部分から構成されている。I/O部分の機能は、5台のサーボモータをコントロールできるように、AD入力を10チャンネル、DA出力とカウンタをそれぞれ5チャンネル有する。また、CPU部分は前述のEthernet通信モジュールを2個有し、カスケードにノードをつなぐことが可能である。一方センサ用のノードはリンクノードのI/O部分を交換することで得ることができる。このノードでは、より分解能の高いアナログ信号をサンプリングすることができる。

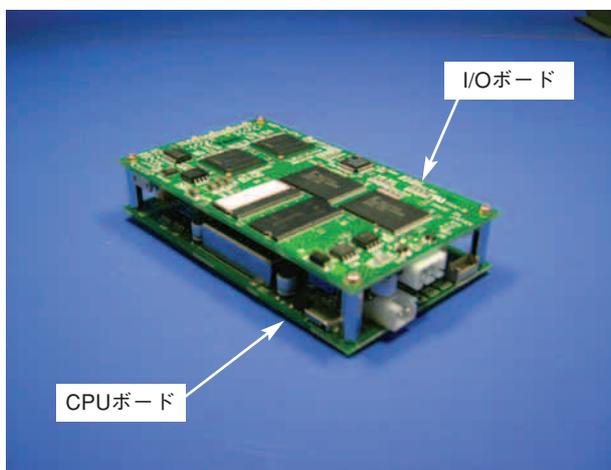


図8 リンクノードの外観

図9は上記で述べたノードをロボット内に配置した様子を概念図として示している。リンクノードは片腕に2台、片脚に1台、胴体に2台の合計8台を搭載する。またセンサノードは、慣性センサ用、手足の力センサ用として最大3台を搭載する予定である。

(4) カメラシステム

実環境にて人間が行う作業を人間型ロボットに代行させる場合、現状のロボット技術では、完全なる自律化は困難である。そこで、遠隔操作による作業を想定し、

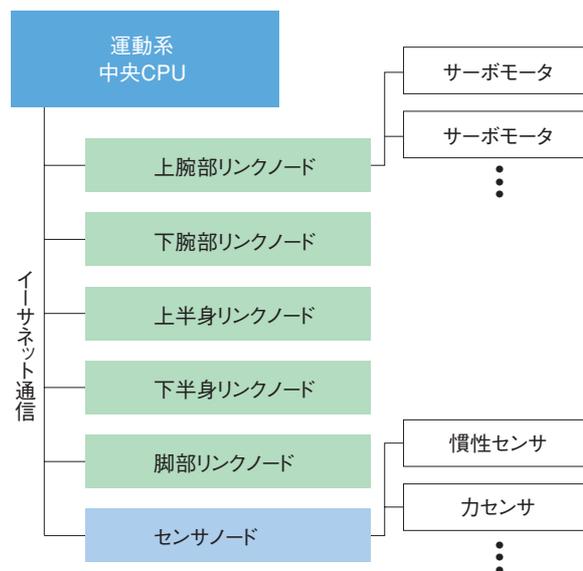


図9 ネットワークポロジ

HRP-3Pの頭部には次のように、2種類のカメラを搭載することとした。

1種類目のカメラは、ロボットの制御用距離認識用のカメラで、HRP-2と同様、3台搭載する。2種類目のカメラは、遠隔操作時に高度な臨場感をオペレータに提示可能な遠隔操縦者モニタ用のカメラで、2台搭載する。

距離認識用カメラの輻射角は、水平方向、垂直方向ともにカメラから1 [m] 先で画角が重なるように配置した。また、カメラシステムの取付け剛性を優先させるため、搭載輻射角を固定式とし調整機構を持たない構成とした。図10に垂直方向の輻射角、画角を設定するために用いた図を示す。

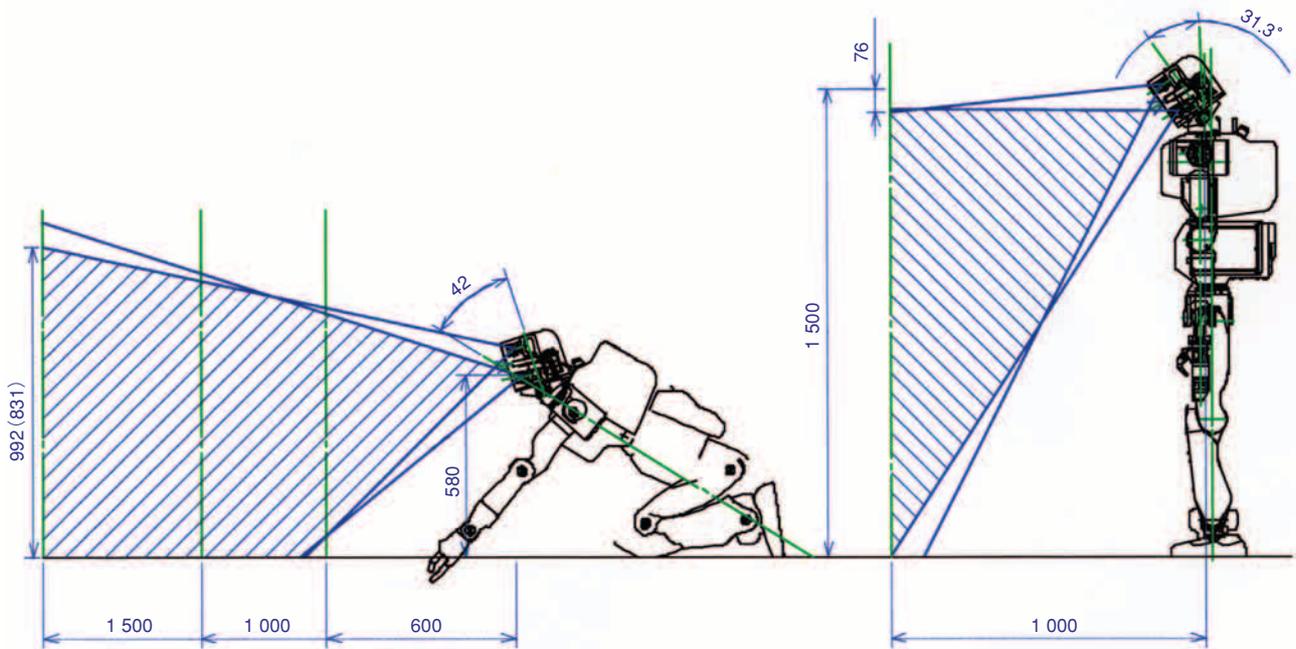
遠隔操縦者モニタ用カメラのカメラ間距離は、立体視時に違和感のないよう、人間の眼間距離60 [mm] にできるだけ近く、最大100 [mm] とした。

5. まとめ

本稿では、「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」において製作中のロボットハードウェア、「HRP-3P」（HRP-3のプロトタイプ）の開発概要を紹介した。HRP-3のハードウェア開発における基本コンセプトは耐環境性向上と稼働効率向上の2点である。しかしながら、より高度な作業を行うためには歩行速度や把持機能、センサやその信号処理機能の向上も考慮して開発を行う必要があり、開発にあたっては、構造やコンピュータに関するより深い知識と応用性が必要であった。

ここで述べたロボットは平成16年度に完成の予定である。完成後はさまざまな試験を行って、当初の仕様を満足できているかどうかの確認を行い、最終成果機の設計にデータを反映していく。

また同時にこの開発で得られた知見や技術を、人間の



上方；膝を着いたとき、前方視野を確保できる。

図10 想定した作業時の視野範囲

社会生活全般に直接役立つ方法も探索していく予定である。

なお、本稿の研究は、経済産業省とNEDOが推進する「基盤技術研究促進事業」において2002年度から5か年の計画で川田工業(株)、(独)産業技術総合研究所、川崎重工業(株)の3組織で受託した「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」の一環として実施された。関係機関の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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, pp.1478-1482, 2001.
- 2) K. Kaneko, et al: Humanoid Robot HRP-2, Proc. IEEE Int.

Conference

- 3) 五十棲, 赤地, 金平, 金子, 金広, 比留川: ヒューマノイドロボットHRP-3Pの開発概要, 第22回日本ロボット学会講演集, 2004.
- 4) S. Kajita, K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, K. Fujiwara, and H. Hirukawa: Biped Walking on a Low Friction Floor, Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, Accepted paper, 2004.
- 5) K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, ZMP Analysis for Arm/Leg Coordination, Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.75-81, 2003.
- 6) 川口, 赤地, 太田, 川又: ヒューマノイドロボットHRP-3Pの熱設計, 第22回日本ロボット学会講演集, 2004.