

脚車輪型移動ロボットのプロトタイプの開発

Development of Leg-Wheeled Type Mobile Robot Prototype

村上 弘 記	技術開発本部総合開発センター制御システム開発部	主幹
曾根原 光 治	技術開発本部総合開発センター制御システム開発部	主査
生川 俊 則	技術開発本部総合開発センター地上ロボット開発グループ	主査 技術士（情報工学部門）
坂野 肇	技術開発本部総合開発センター地上ロボット開発グループ	
立石 淳	航空宇宙事業本部民間エンジン事業部技術部	

人間が活動する屋内空間を効率的に移動するプロトタイプロボットとして、「IMR-Type 1」を開発した。平坦な場所で高速に安定して移動する車輪走行機能と、段差や溝、階段などの障害物を乗り越える歩行機能を併せもつ脚車輪機構を採用した。ロボットの内部システムは、機能拡張性が高い、機内 LAN を用いた分散制御システムを開発した。開発したロボットを用いて、「愛・地球博」のプロトタイプ展などでのデモンストレーションを実証試験として実施し、開発したシステムの信頼性を検証した。

We propose a new type mobile robot, "IMR-Type 1," which is able to move around indoors efficiently. The prototype robot is a leg-wheeled type with 3 legs and 4 wheels on the tip of each leg. The robot can move using the wheels on a flat floor, and walk using the legs to go up and down stairs or to pass a small groove or step. This paper describes the concept and mechanism of this robot, developed distributed control system using CAN (Controller Area Network), and the results of practical tests to evaluate the use and reliability of this robot system, at the Prototype Robot Exhibition set up in the 2005 World Exposition, Aichi, Japan.

1. 緒 言

今後、少子高齢化の進展やサービス産業の発展に伴って、生活分野、公共分野、医療福祉分野などさまざまな分野において、人間の活動を幅広く支援するロボットへの期待が高まっている。このような人間と共存・協調して作業するロボットにとって、移動は最も重要な機能の一つである。人間と共存・協調するために、人の通路をそのまま共有できる移動機構として、2足歩行ロボットの研究開発^{(1),(2)}が盛んに行われている。2足歩行は、人間と同じ移動機能であり、人間向けに用意された環境への適応性が高いが、転倒の危険性や移動時のエネルギー効率が悪くなど問題があり、実用化までの課題は多い。

一方、車輪を利用したロボット^{(3)~(5)}も数多く開発されているが、急な傾斜や段差には対応できず、動作範囲が限定されている。以上の課題から、踏破性の高い移動機構として、車輪と脚を組合せた脚車輪方式^{(6)~(8)}の開発が行われている。これらの開発では、移動が低速で接地している脚の間に重心を配置する静的安定な状態を保持する機構を採用しているため、自由度が多く複雑な構成となる⁽⁹⁾。また、踏破性は劣るが高速移動に主眼を置いた車輪型倒立振子に、上体を取り付けた移動機構^{(9)~(12)}

も提案されている。

筆者らは、屋内環境を効率的、高速に移動可能なシステムの構築を目指して、3本の脚とその脚先端に車輪を持つ脚車輪型移動ロボットの開発^{(13)~(15)}に取り組んできた。このロボットは、屋内空間の大部分を占める平坦地では、静的安定な姿勢を維持して脚先端の車輪による移動を行い、階段や段差、溝といった車輪では踏破困難な障害に対して、脚を使った歩行形態をとるハイブリッドな移動機能をもたせている。

本稿では、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の次世代ロボット実用化プロジェクト「プロトタイプ開発支援事業」⁽¹⁶⁾に参画して開発したプロトタイプロボット「IMR-Type 1」の概要、本プロジェクトで新たに開発した CAN (Controller Area Network) を用いた分散制御システムの構成^{(17)~(19)}および愛知万博「愛・地球博」会場でのプロトタイプロボット展で実施された実証試験の結果について述べる。

2. プロトタイプロボットのコンセプト

移動ロボットで想定する代表的な作業として、監視、巡回、警備が挙げられる。移動ロボットを適用する利点として、固定カメラでの死角となる場所の監視や、現場に行か

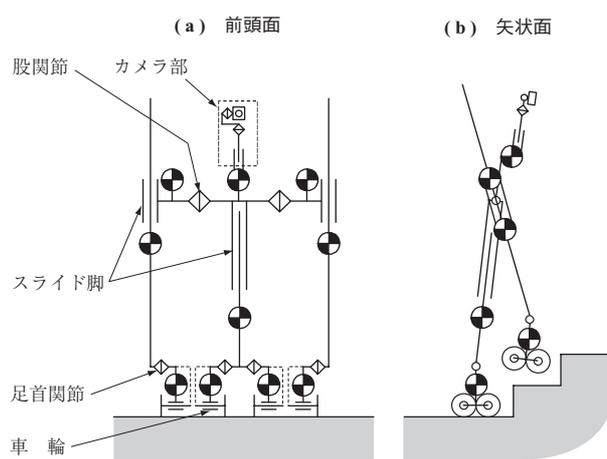
なくては得られにくい詳細な情報（異常振動，異常音など）を入手することが挙げられる。第1図に工場内やオフィスを巡回している作業イメージを示す。人間の使用する通路はほとんどが平坦で整備されているが，一部に踏み越えなければならない障害物（配管，溝，段差など）や階段があり，高い踏破性をもつ移動ロボットが必要となる。

本開発では，人間の使用する通路を通過できる大きさとし，平坦な部分は効率の良い車輪走行，障害物の部分は歩行によって踏破するというコンセプトで開発した。人間の使用する通路幅を想定して，① 900 mm 幅の通路を走行可能なこと ② 人間とほぼ同じ視線を確保できること ③ 階段を歩行可能なこと ④ 機構をできるだけ簡略化すること，を考慮してプロトタイプを開発した。

3. 脚車輪型移動ロボットの概要

開発したプロトタイプロボットの移動機構の構成を第2図に示す。中央胴体部に取り付けられた脚とその脚を基準に移動前後方向で切った面内（矢状面内）で回転する左右の脚の3脚構造となっている。3本の脚は，それぞれ伸縮する自由度を設け，脚先端には中央脚に2組，左右脚に各1組の計4組の足首関節と2列に並んだ車輪を配置している。平坦な部分では，中央脚と左右脚を前後に開いて安定な姿勢で車輪走行する。ロボットには操舵機構はないが，各車輪の回転速度差をつけることで旋回を行う。

一方，段差などの障害物を通過する場合，左右の脚を同期させ，中央脚と交互に振り出すことで，矢状面内におい



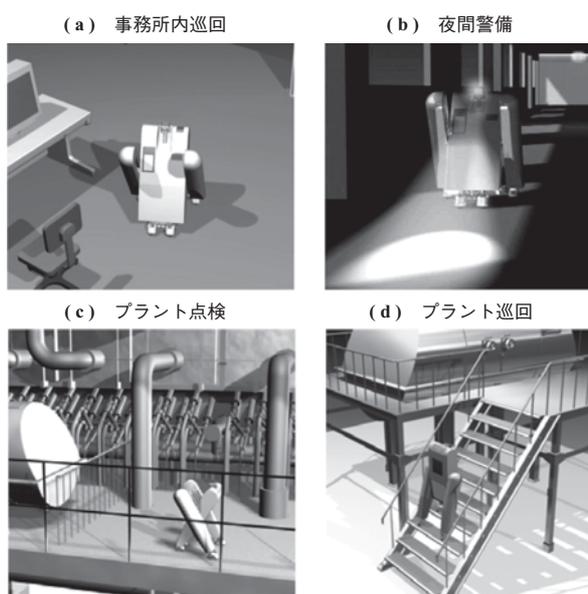
第2図 ロボットの機構構成
Fig. 2 Mechanical configuration of robot

て2足歩行と同様な形態をとることが可能である。歩行動作での片足での立脚時では，接地している脚先の2車輪が接地するので足裏とみなすことができる。矢状面に直交する面（前頭面）方向の重心は，接地車輪間に納まる設計であり，機構的に安定性をもっている。このため，歩行時は，矢状面内のみの安定化制御を行っている。

また，脚の伸縮機能を活用することで，ロボットの高さを変化させることが可能なシステムとなっている。この機能を使うことで，ロボット上部に取り付けた監視用カメラの位置をほぼ人間の視線の高さ（1720 mm）まで変化させることが可能な設計とした。

開発したプロトタイプの外観を第3図に示す。動作状況に合わせてロボットの姿勢を変化させた様子を示している。本ロボットの主要な仕様を次に示す。

サイズ	700 (W) × 400 (D) × 1 150 ~ 1 720 (H) mm
車輪	φ46 × 8個
質量	60.0 kg
動作モード	
歩行モード	2.5 km/h
歩行モード	4.0 s/ステップ
階段歩行性能	
最大高さ	200 mm
最大奥行	250 mm
許容最大斜度	7度（勾配 12%）
自由度配置	
移動機能（合計）	13 自由度
脚スライド	3 自由度
股関節回転	2 自由度



第1図 作業イメージ
Fig. 1 Operating image



第3図 プロトタイプロボットの外観
Fig. 3 Prototype robot "IMR-Type 1"

足首関節回転	4 自由度
車輪回転	4 自由度
カメラ部	3 自由度
可動範囲	
移動機能	
脚スライド	295 mm
股関節回転	± 80 度
足首関節回転	± 45 度
カメラ部	
脚スライド	295 mm
股関節回転	± 70 度
足首関節回転	± 45 度
電源	
電池の種類	ニッケル水素バッテリー
駆動系 (最大値)	12 V × 4.5 Ah × 4 (48 V)
制御系 (最大値)	12 V × 3.6 Ah × 4 (24 V)
稼働時間	約 75 min

4. 分散制御システムの構成

これからのロボットシステムでは、標準化したロボットプラットフォームに、アプリケーションに適したデバイスを簡単に追加できる機能が望まれている。そこで、今回開発したプロトタイプロボットでは、ロボットの内部システムのハードウェアを機能単位でモジュール化して、機内 LAN で接続する分散制御システムを開発した。モジュール間接続のネットワークには、自動車などで実績がある CAN を採用した。ネットワーク構成は、通信量と通信速度を考慮して、ロボット全体を統括する上位系と移動機構の運動をリアルタイムに制御する移動サブシステムに分離する構成とした。

本ロボットは、ロボット外部からの動作指令に従って、運動を生成する。開発した分散制御システム構成を第4図に示す。外部からの指令は、操作用のホストコンピュータ (ホスト PC) から無線 LAN を用いて、複数のロボットを接続する標準的なインタフェースである ORiN (Open Robot/Resource interface for the Network) を介する方法とハンディーコントローラからのラジコン通信による方法を用意した。

上位系システムは、当初は機能ごとに以下の5個の基本的なモジュールで構成した。

① 統括制御モジュール

ホスト PC と通信し、ロボット全体を統括する。

② RC モジュール

ハンディーコントローラからの信号を処理する。

③ 移動制御モジュール

移動機構の運動制御を行う。

④ 状態監視モジュール

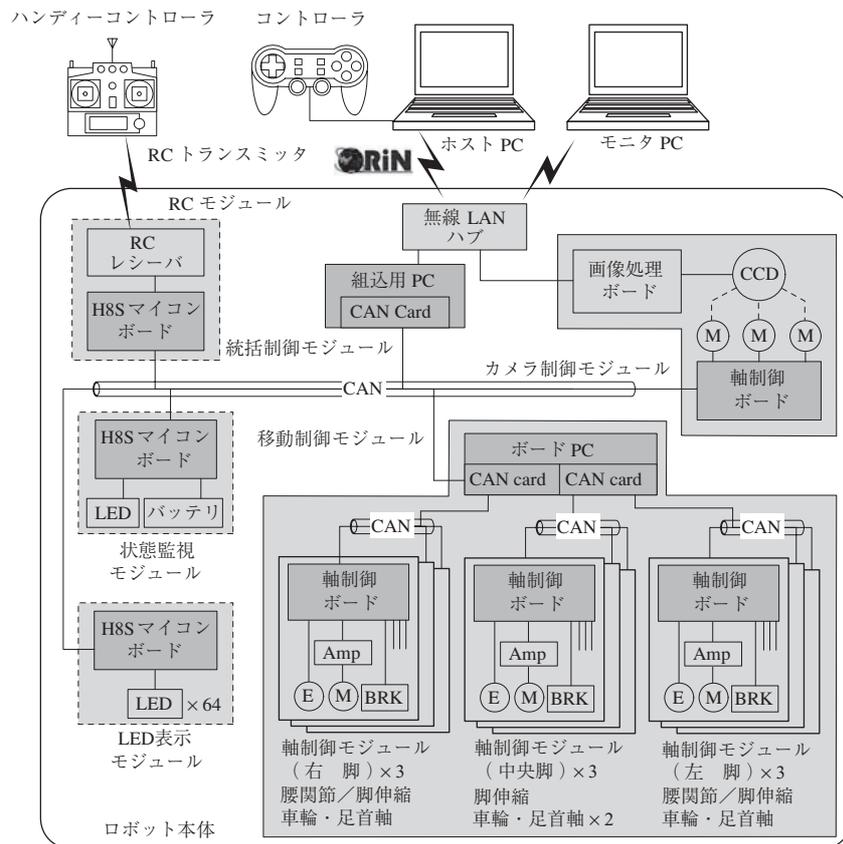
ロボット内部の状態を監視する。

⑤ カメラ制御モジュール

カメラの位置を制御する。

万博会場でのデモンストレーションを意識して、多数の LED 表示によって顔の表情を表現するデザインを追加した。このため、LED 表示モジュールをシステム構築後に追加することとなったが、分散制御システムを採用していたことから、ほかのモジュールのシステムを変更することなく容易に追加できた。これによって、分散制御システムにおける機能追加の容易性を確認することができた。

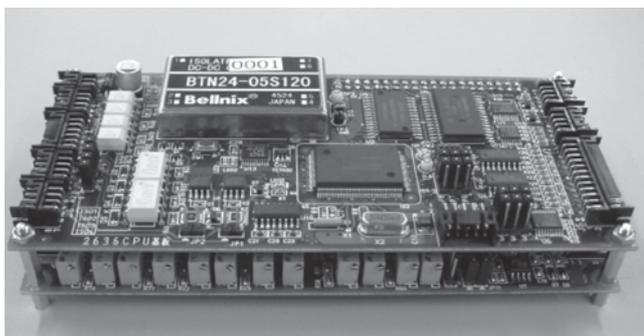
移動制御サブシステムは、移動機構の駆動軸ごとに配置した9個の軸制御モジュールと移動制御モジュールか



(注) ORiN : Open Robot/Resource interface for the Network
 CAN : Controller Area Network
 E : エンコーダ
 M : モータ
 BRK : ブレーキ
 Amp : サーボモータドライバアンプ

第 4 図 分散制御システム構成
 Fig. 4 Distributed control system configuration

ら構成した。CAN の通信帯域が 1 Mbps と速くないことから、機構の特徴を考慮して脚ごとの 3 系統のバスに分割して構成した。この構成で、脚の運動制御のための高速なりアルタイムの動作指令を 500 Hz 周期で実現した。なお、軸制御モジュールは、モータ制御用のインタフェースを備えた軸制御ボードとして CAN 通信機能をもつマイコン (H8S) を搭載して新規に開発した。第 5 図に軸制御ボードの外観を示す。



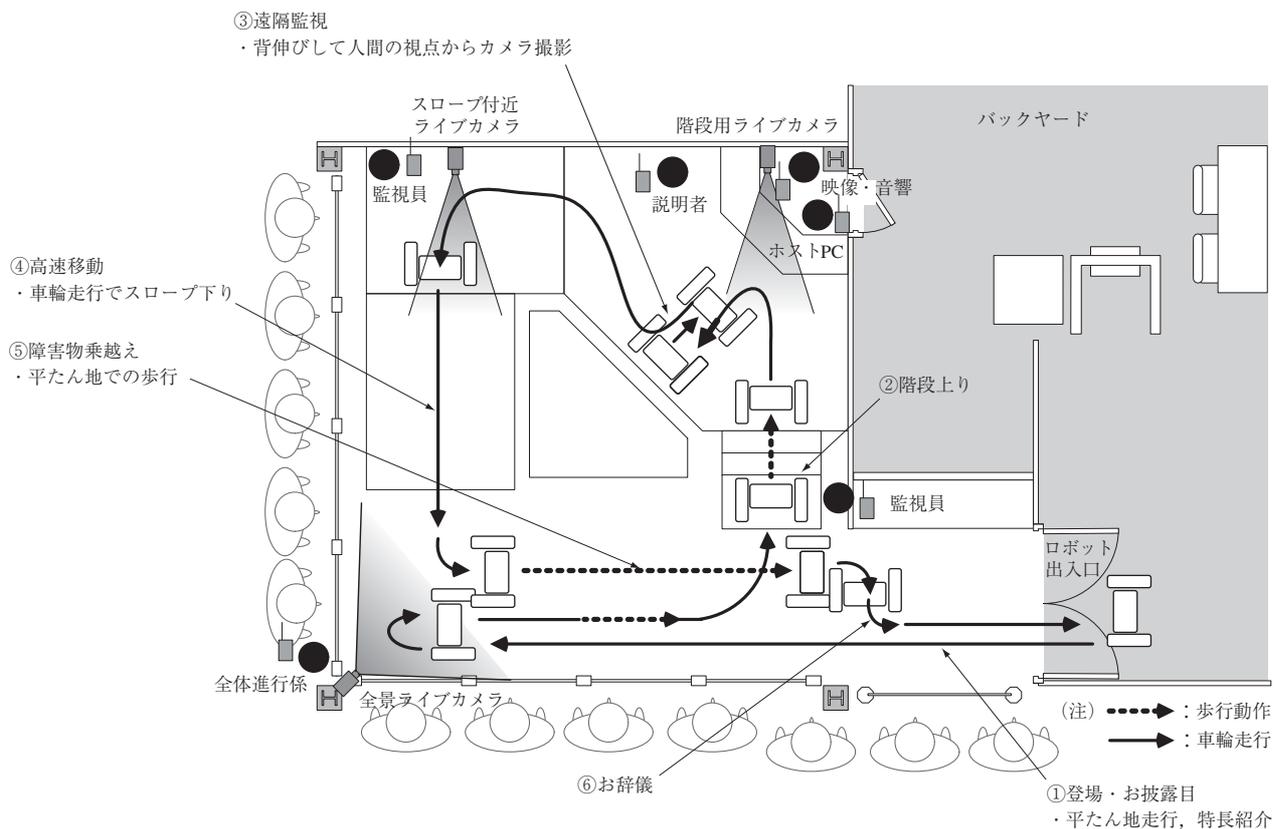
第 5 図 軸制御ボード外観
 Fig. 5 Axis control board

これらの分散制御システムを採用したことによって、システム開発の効率化が図れた。装置開発では、大幅な省配線化を図ることができ、ハーネス質量が約半分以下となる軽量化が実現できた。

5. 実証試験

NEDO「プロトタイプ開発支援事業」では、「愛・地球博」会場でのプロトタイプロボット展 (2005 年 6 月 9 日 ~ 19 日) において、2020 年を想定したデモンストレーションが実証試験と位置づけられて実施された。本ロボットは、工場内などの巡回、監視を適用作業のイメージとして、移動機能の能力を示すデモンストレーションを第 6 図に示すシナリオで実施した。

無線 LAN によって操作するストーリー形式のデモンストレーションを 11 日間で 32 回、ハンディーコントローラを用いて個別の動作を連続的に組合せて実施するデモンストレーションを各 30 分 44 回実施した。この間、デモコースの周回動作に関してはトラブルなく運転し、以



第 6 図 デモンストレーションのレイアウトとシナリオ
 Fig. 6 Layout and scenario of demonstration

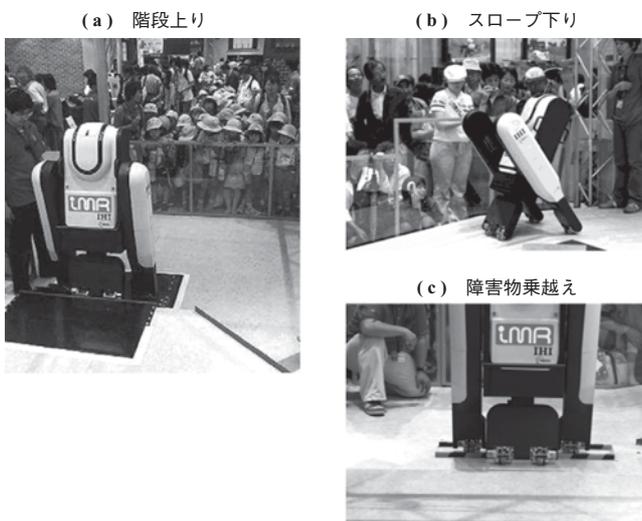
下のような動作実績が得られた。

周回数	約 250 周 (約 6 km の移動)
階段歩行	3 段 (4 歩) × 250 回, 750 段 1 000 歩
障害物乗越え歩行	6 歩 × 250 回, 1 500 歩

以上のような 11 日間の運転によって、開発したシステムの信頼性を検証することができた。第 7 図にデモン

ストレーションの様子を示す。

この後、青少年のためのロボフェスタ 2005 (8 月 27 ~ 28 日), CEATEC JAPAN 2005 (10 月 4 ~ 8 日), 2005 国際ロボット展 (11 月 30 日 ~ 12 月 3 日) において同様なデモンストレーションでの実証試験を大きなトラブルなく実施した。以上のことから、異なる動作環境にも対応できることが確認できた。



第 7 図 デモンストレーションの様子
 Fig. 7 Demonstration scene

6. 結 言

人間が活動する空間を移動するプロトタイプロボットとして「IMR-Type 1」を開発した。このロボットの移動機構は、高速で安定して効率よく移動できる車輪走行の機能と、障害物を歩いて乗越える脚の機能を併せもつ脚車輪機構を採用した。ロボットのシステムは、機能の追加、変更が容易で省配線の効果もある CAN を用いた分散制御システムを構築した。開発したプロトタイプロボットは、「愛・地球博」のプロトタイプロボット展をはじめとして、いくつかのデモンストレーションを通して、ロボットシステムの信頼性の確認を実施した。今後は、工場の巡回、監視や受付案内などのアプリケーションへ展開を図っていく。アプリケーションのイメージを第 8 図に示す。



第 8 図 アプリケーションイメージ
Fig. 8 Application image

なお、本研究は NEDO 委託事業である次世代ロボット実用化プロジェクト「プロトタイプ開発支援事業」の一部として実施した。

— 謝 辞 —

本研究における分散制御システムの構築に関しては、芝浦工業大学水川 真教授、研修生として在籍した磯部真吾氏、塩川満治氏のご協力を得て実施した。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 比留川博久ほか：HRP の成果と人間型ロボットの今後の展開（特集） 日本ロボット学会誌 第 22 巻 1 号 2004 年 1 月 pp.1 - 54
- (2) — 解説：プロトタイプロボット展のために開発されたすべてのロボットの紹介 —：日本ロボット学会誌 第 24 巻 2 号 2006 年 3 月 pp.171 - 204
- (3) 神田真司，村瀬有一，岡林桂樹，麻田 務：サービスロボット：enon FUJITSU 第 57 巻 3 号 2006 年 5 月 pp.307 - 313
- (4) 塩谷成敏，塘中哲也，見持圭一，浅野 伸，大西 献，日浦亮太：人と暮らす世界初の本格コミュニケーションロボット wakamaru 三菱重工技報 第 43 巻 1 号 2006 年 1 月 pp.44 - 45
- (5) 河野 大，松熊研司，半田博幸，横山和彦：7 自由度双腕移動型ロボット SmartPal の開発 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 II23 2005 年 9 月
- (6) 中野栄二，木村 浩，野中洋一：脚車輪分離

型ロボットの開発および胴体振動抑制 日本機械学会論文集（C 編） 第 58 巻 551 号 1992 年 7 月 pp.2 138 - 2 143

- (7) 広瀬茂男，竹内裕喜：ローラウォーカー・新しい脚 - 車輪ハイブリッド移動体の提案 日本機械学会誌（C 編） 第 62 巻 599 号 1996 年 7 月 pp.242 - 248
- (8) 安達弘典，小谷内範穂：脚・車輪複合型移動機構の開発（第 1 報 機構の試作と基本動作） 第 3 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集 1998 年 5 月 pp.169 - 174
- (9) 松本 治，梶田秀司，西郷宗玄，谷 和男：静的歩容を規範とした 2 足歩行型脚車輪ロボットの階段昇降制御 日本ロボット学会誌 第 16 巻 6 号 1998 年 9 月 pp.868 - 875
- (10) 松本 治，梶田秀司，西郷宗玄，谷 和男：自立型脚車輪 2 足システムの開発（第 1 報） 機構と移動形態 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 2001 年 9 月 pp.399 - 400
- (11) 山藤和男，越山 篤：可変構造平行二車輪車の姿勢および走行制御 日本機械学会論文集（C 編） 第 56 巻 527 号 1990 年 7 月 pp.1 818 - 1 825
- (12) 細田祐司，柄川 索，玉本淳一，山本健次郎，中村亮介，戸上真人：人間共生ロボット“EMIEW”の開発 - 開発コンセプトと全体システム - 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 II16 2005 年 9 月
- (13) 曾根原光治，小林研吾，田中宏一，藤井正和，村上弘記：3 脚車輪型ロボットの機構設計と実験システムの開発 第 9 回ロボティクスシンポジウム講演論文集 2004 年 3 月 pp.236 - 241
- (14) 曾根原光治，山本忠幸，村上弘記：3 脚車輪型移動ロボットの高速度歩行制御手法の開発 第 10 回ロボティクスシンポジウム講演論文集 2005 年 3 月 pp.121 - 126
- (15) 曾根原光治，山本忠幸，坂野 肇，立石 淳，生川俊則，村上弘記，磯部真吾，水川 真：脚車輪型移動ロボット IMR-type 1 の開発 第 11 回ロボティクスシンポジウム講演論文集 2006 年 3 月 pp.426 - 431
- (16) 山本哲也：次世代ロボット実用化プロジェクト - プロトタイプ開発支援事業について - 日本ロボ

ト学会誌第 24 卷 2 号 2006 年 3 月 pp.169 - 170

- (17) 磯部真吾, 塩川満治, 山本忠幸, 村上弘記, 水川真: リアルタイム制御への適用を考慮した CAN による分散制御システムの検討 第 5 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集 2004 年 12 月 pp.268 - 269
- (18) 山本忠幸, 曾根原光治, 村上弘記, 水川 真:

移動ロボットにおける分散制御システムの適用 第 5 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門演
会論文集 2004 年 12 月 pp.272 - 273

- (19) 山本忠幸, 曾根原光治, 坂野 肇, 生川俊則, 磯部真吾, 村上弘記, 水川 真: 脚車輪型移動ロボット IMR-Type 1 における分散制御システムの開発 第 6 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集 2005 年 12 月 pp.985 - 986