

平成 21 年 5 月 7 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360123

研究課題名（和文） 腕脚統合型ロボットの3次元環境作業移動

研究課題名（英文） Study of 3-D Mobile Manipulation for Integrated Limb Mechanism

研究代表者

新井 健生 (ARAI TATSUO)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：90301275

研究成果の概要：

本研究では、複雑な3次元環境内における作業や移動を行うに適したロボットの肢、並びに機構を解析し、ハードウェアの設計試作とアルゴリズムの開発を行った。ハードウェアの構成には、腕としての機能と脚としての機能を併せ持つ腕脚統合をコンセプトに採用し、3次元環境の作業移動アルゴリズムを「脚移動」・「腕作業」・「統合動作」の3つに分類することで、それぞれの作業を行うための環境側とロボット機構の力学的条件を解明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2007年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2008年度	3,200,000	960,000	4,160,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：歩行ロボット、3次元移動、作業移動

1. 研究開始当初の背景

レスキュー作業や大規模構造物のメンテナンス作業など、3次元環境での作業移動は社会的に大きなニーズがあり、そのような作業を代替するロボットの研究開発は活発である。壁面や天井の走行・歩行ロボットの研究では、主に吸着や磁力を用いたものが多数提案されている。面が平坦で滑らかであること、磁力を持つことなど環境面での条件が課せられるとともに、吸着のための機構や装備が大掛かりとなり、自立型ロボットの実現は困難である。配管など断面が一様な狭隘環境の上下移動を行うロボットが提案されているが、幅が一定でない隙間などの移動については研究例が無い。レスキュー作業では、クローラを有する体幹を関節で結合し、屈曲運動とクローラの推進運動により瓦礫内外を

移動するロボットが多数研究されている。しかし、クローラは垂直な壁面や隙間の上下移動、天井からの懸架移動ができないなど、必ずしも十分ではない。作業移動の考えは、基本的に移動ロボット+アームであり、この視点では移動台車にアームを搭載したロボットの研究は古く多数の研究が行われている。最近ではヒューマノイドが歩行しながら手作業を行う研究も行われているが、平面での移動に限定される。

当研究グループでは、作業移動の視点で腕脚の機能を統合するというコンセプトを提案しており、この考えに基づき全方向作業移動や人体探査への応用など10年来行っている。腕機能と脚機能を併せ持つリムを基本とするロボットのアイデアは、当初凹凸地での移動と作業を同時に行うことを目的として

いた。当研究グループは、格子状の天井を脚先のフックで引っ掛けながら移動する自立型ロボットを愛地球博で示したが、天井や壁面に若干の工夫を施すことにより、脚移動をベースとする作業移動ロボットが実現できる見通しを得た。このような3次元環境において作業移動を行う自立型ロボットを実現することにより、先に示した様々な作業ニーズに応える現実的な解を示すことが本研究のねらいである。

2. 研究の目的

本研究課題では、3次元環境内で移動と作業を同時に行うロボットの機構と動作制御法を明らかにする。特に、3次元環境における作業移動を「脚移動」「腕作業」「統合動作」の3つに分類し、それぞれの作業を行うための環境側とロボット機構の力学的条件を解明する。脚と腕の機能を併せ持つ「リムメカニズム」の概念は当研究グループがすでに提案し、様々な特徴とメリットを示している。この概念自体は新しくないが、3次元環境における作業移動では必然的にこのような考え方が重要である。通常、3次元での移動では脚の接地と遊脚の交互運動で生成される歩容は意味を成さず、ボディを支持するリムと3次元環境との相互運動に着目する必要がある。この概念に基づき、3次元作業移動の解析法、機構設計や動作計画の枠組を示すことに学術的な意義がある。

3. 研究の方法

腕脚統合機能を有する腕脚統合型ロボットとは、腕と脚の機能を有するリム(肢)を複数備え、状況に応じてそれらの機能を切り替えることで、移動と作業の両方を実現するロボットである。本研究では、3次元環境内における作業移動を行うに適したリム、並びにロボットの機構を解析し、ハードウェアを設計試作するとともに、3次元環境の作業移動アルゴリズムを開発し、模擬環境における実験により有用性を評価する。

3次元環境内の作業移動は次の3つに分類する。

- 脚移動：全リムを用いてスムーズで多様な移動を行う。
- 腕作業：一部のリムを用いて3次元環境内でロボットの安定な支持を行い、他のリムを腕として用いてマニピュレーションを行う。
- 統合動作：一部のリムを用いて3次元環境内を移動すると同時に、他のリムを腕として用い、センサを走査するなどの軽作業を行う。

まず、脚による移動に関連する研究として、提案する腕脚統合型ロボットのデザインコンセプトであるリムの均等配置の構造を利

用した全方向移動の手法として、「脚車輪ハイブリッド動作による段差踏破」と「リムの接触情報を利用した狭隘部の移動」を報告する。「脚車輪ハイブリッド動作を利用した不整地移動」では、脚車輪の特徴である車輪走行と歩行をセンサフィードバックで適時切り替えることで不整地の移動を行うと共に、等方向に配置されたリムのデザインから実現される全方向への均等な不整地の移動能力を示す。「リムの接触情報を利用した狭隘部の移動」では、等方向へ伸びたリムの環境への接触情報を利用し、レスキュー現場や住宅の天井裏・床下などの狭隘部を移動する際に要求される環境適応型の歩行修正手法を提案する。

次に、環境の構造物に取り付きながらの腕による作業と移動に関する課題として「梯子の昇降動作」と「格子壁面歩行」を報告する。

「梯子の昇降動作」では建築基準法で定められている梯子の規格を変更することなく移動するための手法について提案し、特殊な仕様をロボットに設けずに小型のロボットを移動可能にする設計、および、制御手法について述べる。「格子壁面の移動」では、環境側に格子状の環境を取り付けることでロボットが移動可能となる領域を拡大するコンセプトを元に様々な状況で歩容を実現するための手法について報告する。

さらに、作業と移動を同時に実現する統合動作として、「腕脚統合動作による転がし動作」について報告する。小型のロボットの欠点としてあげられる作業能力の低さを全身の動作を利用した転がし動作により重量物を運搬するための手法について提案し、環境との摩擦、ロボットが力を加えるときに発生する内力について解析を行うことで効率の良い転がし動作を実現する方法を示す。

4. 研究成果

(1) 脚車輪ハイブリッド動作による段差踏破

脚と車輪を併せ持つ脚車輪ロボットは、対地適応性に優れた脚機構の特徴と高い移動効率を有する車輪機構の特徴を併せ持ち、状況に応じた安定で効率のよい移動機構として様々な研究が行われている。本研究では、先端に能動車輪を有する6脚の脚車輪型ロボット **ASTERISK H** を開発し、脚と車輪のハイブリッド動作による高速安定な不整地移動方法を提案する。

提案するハイブリッド動作は、歩行では安定に移動できるが車輪では移動できない段差を対象とし、支持脚関節のセンサフィードバックを利用した車輪移動と脚移動の連続的な遷移動作により不整地の移動を実現するものである。段差が小さく車輪での移動が可能な場合、6脚のうちの3脚を支持脚、残

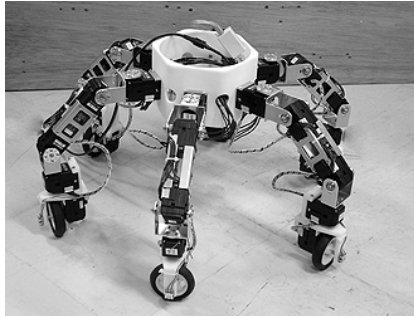


図1 脚車輪型腕脚統合ロボット

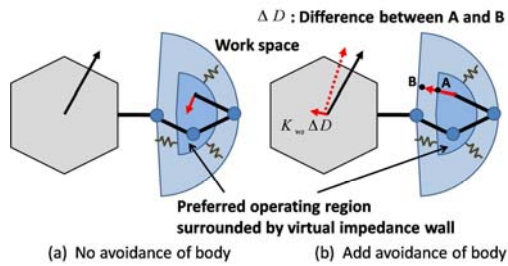
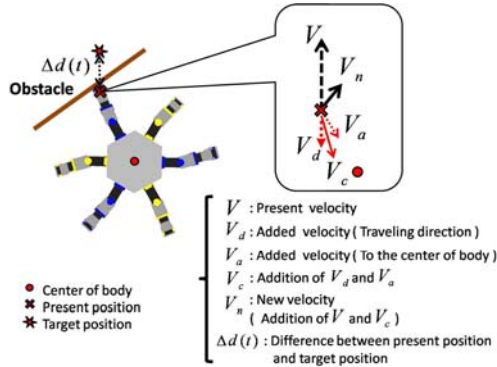


図2 接触情報とバネ・ダンパモデルによる回避方向の計算

りを遊脚とした基本姿勢を維持し、車輪を用いて移動を行う。支持脚のセンサにより車輪では乗り越えられない大きな障害物に衝突したことを検出した場合、待機していた遊脚と支持脚を切り替える動作が生成され、障害物の乗り越えが実現される。

提案手法の乗り越え可能な障害物高さは、基本姿勢における胴体部の高さや脚先位置に依存する。段差踏破に最適な姿勢を分析し、開発した脚車輪型ロボット **ASTERISK H** (図1) を用いて動作の確認を行った。腕脚統合機能を活かす等方向デザインと提案手法によるハイブリッド動作により、平面上のすべての方向に対し効率的な不整地移動を実現した。

(2) リムの接触情報を利用した狭隘部の移動

全方向移動特性を有した腕脚統合型ロボットは、各関節を構成するサーボモータの位

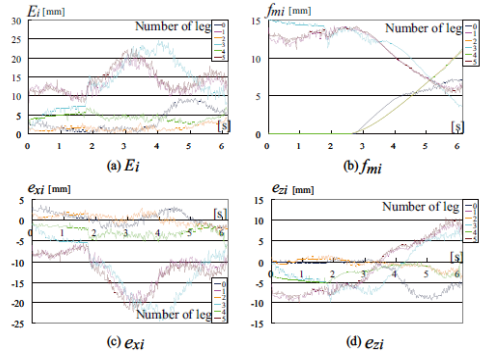
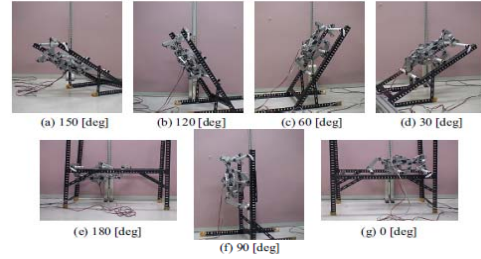


図3 複数の角度での懸架状態と力の分散結果

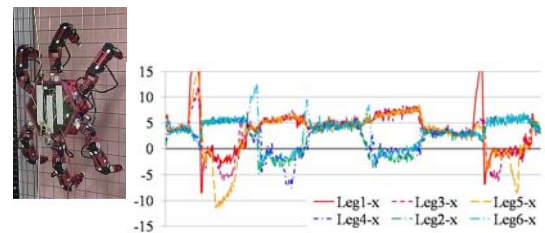
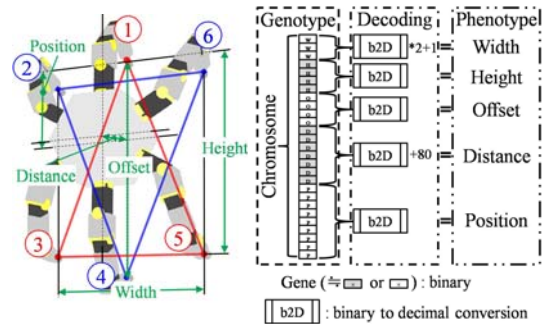


図4 GAの遺伝情報と学習結果を用いた格子壁面移動

置誤差をセンサフィードバックによる接触情報として用いることで、環境と衝突した脚を特定することができる。そこで、各脚のワークスペースを保ちながら障害物を回避する手法として、衝突脚先の位置誤差情報を利用した仮想バネ・ダンパモデルに基づく制御手法を提案した。図2に脚の接触情報モデルとロボットの回避方向の計算モデルを示す。提案手法は、環境の衝突に依って遊脚の着地位置とロボットの移動方向を修正し、狭隘部での移動が実現される。

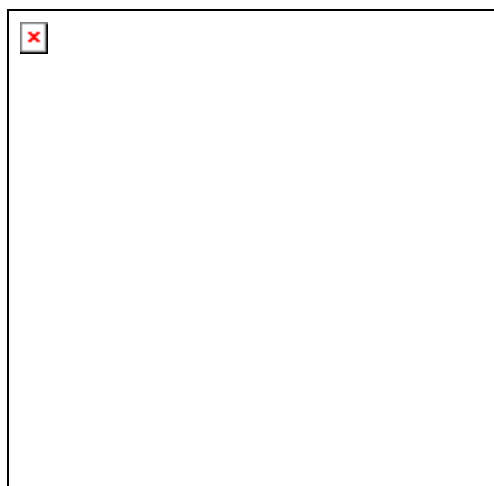
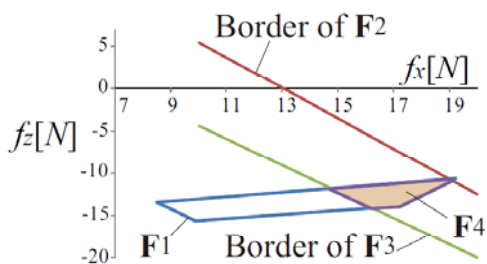


図5 転がし動作における力領域と
実ロボットでの動作実験

(3) 梯子の昇降動作

複数の脚で棒を挟み込むことにより梯子を把持し移動する歩容を提案し、把持可能範囲と必要な関節トルクの解析から提案する歩容の利点を示した。また、ロボットの負荷の軽減のため、各脚が力を支えることができる方向と力の余裕とを計算し、各脚に加わる力を動的に分散させる制御法を提案した。さらに、梯子の棒が太い場合や、梯子が傾いたなどの環境にロボットを適応させる手法を提案し、実験により梯子を安定に移動できることを示した。図3に様々な角度での懸架の様子と力の分散結果を示す。重力方向に依存して分散制御を行っても誤差が発生することが確認できる。

(4) 格子壁面歩行

環境側にロボットの移動を補助する格子を設置した格子壁面上での移動を提案した。脚先にあるフック形状を利用した格子壁面への懸架の方法と安定条件を定義し、関節トルクの解析から実ロボットでの実現可能性を示した。提案する格子移動は複数の解が非線形に存在するため、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた歩容の最適化を行い、関節トルクや懸架の安定性、移動距離など複数項目の評価に基づき歩容が決定した。格子壁面の条件が変更された場合も最適な歩容条件

を求めることが可能となることが示された。図4にGAで最適化を行ったパラメータと生成された壁面歩行の一例を示す。格子に懸架された脚に加わる力が均等に配分され歩行が行えていることが確認できる。

(5) 腕脚統合動作による転がし動作

小型ロボットがより大きく重い物体の搬送を行うことができる方法として「転がし」動作に着目する。提案する転がし動作は、対象物体の Imaginary Zero Moment Point (IZMP) に着目し、IZMP が対象物の支持多角形を超えるための外力をロボットが加えることで転がし動作を実現させる手法である。安定性の指標として用いられてきた IZMP を回転動作の指標とすることで、ロボットの安定性と対象物の転がし動作の条件を同時に判定することができる。ロボットの各脚、対象物体表面、床の間の摩擦係数を考慮し、滑りを発生させずに転がし動作を行うための条件について解析し、実ロボットで動作を効率的に行うための条件を導出した。図5に求められた力の領域とその結果を用いた転がし動作の様子を示す。自重とほぼ同じ重さの対象物を転がすことに成功している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計5件)

- ① Takenobu Yoshioka, Tomohito Takubo, Tatsuo Arai, Kenji Inoue: "Hybrid Locomotion of Leg-Wheel ASTERISK-H", Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.20, No.3, pp.403-412, 2008.
- ② 田窪朋仁, 荒井裕彦, 谷江和雄, 新井健生: "人・ロボット協調搬送作業のための仮想インピーダンス壁を用いた移動マニピュレータの制御手法", 日本機械学会論文集 C編, 査読有, Vol.73, No.731, pp.2115-2122, 2007.
- ③ 飯尾淳, 井上健司, 新井健生: "レーザポインタによる3次元情報入力装置の開発とそのユーザビリティ評価", ヒューマンインタフェース学会論文誌, 査読有, Vol.9, No.3, pp.313-324, 2007.
- ④ Yasushi Mae, Tatsushi Mure, Kenji Inoue, Tatsuo Arai, and Noriho Koyachi: "Sensor-Based Walking on Rough Terrain for Legged Robots", Springer, Field and Service Robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics, 査読有, Vol.24, pp.255-264, 2006.
- ⑤ Tomohito TAKUBO, Tatsuo ARAI, Kenji INOUE, Hikaru OCHI, Takeshi KONISHI, Taisuke TSURUTANI, Yasuo HAYASHIBARA, Eiji

KOYANAG: "Integrated Limb Mechanism Robot ASTERISK", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 査読有, Vol.18, No.2, pp.203-214, 2006.

[学会発表] (計 33 件)

- ① Theeravithayangkura Chayooth, Takubo Tomohito, Mae Yasushi, and Tatsuo Arai: "Stair Recognition with Laser Range Scanning by Limb Mechanism Robot "ASTERISK" ", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008), 21-26 February, 2009, Thailand.
- ② 塚本 健司, 田窪 朋仁, 大原 賢一, 前 泰志, 新井 健生: "接触情報を用いた腕脚統合型ロボットによる障害物回避", 第9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, 2008年12月5-7日, 岐阜.
- ③ 上撫 琢也, 田窪 朋仁, 大原 賢一, 前 泰志, 新井 健生: "高解像度NDTグリッドマップによる地図生成-サブグリッドを考慮した環境認識-", 第9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, 2008年12月5-7日, 岐阜.
- ④ 竹尾 岳, 田窪 朋仁, 大原 賢一, 前 泰志, 新井 健生: "腕脚統合型ロボットによる摩擦を考慮した多角柱転がし動作", 第9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, 2008年12月5-7日, 岐阜.
- ⑤ 柳原 裕也, 田窪 朋仁, 大原 賢一, 前 泰志, 新井 健生: "腕脚統合型ロボットを用いた格子壁面移動の最適歩容計画", 第9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, 2008年12月5-7日, 岐阜.
- ⑥ Kenji Tsukamoto, Tomohito Takubo, Kenichi Ohara, Yasushi Mae, Tatsuo Arai: "Building Monitoring System Using RFID and Mobile Robot", The 5th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2008), 20-22 November, 2008, Korea.
- ⑦ 吉岡健伸, 田窪朋仁, 前泰志, 大原賢一, 新井健生: "脚車輪ハイブリッド動作による不整地環境での全方向移動", 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月9-11日, 神戸.
- ⑧ Theeravithayangkura Chayooth, Takubo Tomohito, Mae Yasushi, and Tatsuo Arai: "Stair Recognition with Laser Range Scanning for Continuous Stair Climbing by Limb Mechanism Robot ASTERISK", 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月9-11日, 神戸.
- ⑨ 塚本健司, 宮内隆弘, 前田真吾, 田窪朋仁, 前泰志, 新井健生: "UFAMと移動ロボットを用いた建造物モニタリングシステム", 第11回建設ロボットシンポジウム論文集, 2008年9月2日, 東京.
- ⑩ 竹尾岳, 田窪朋仁, 前泰志, 新井健生: "腕脚統合型ロボット「ASTERISK」による多角柱転がし動作", ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008年6月6-7日, 長野.
- ⑪ 吉岡健伸, 田窪朋仁, 前泰志, 新井健生: "脚車輪ハイブリッド動作によるASTERISK Hの段差踏破解析", ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008年6月6-7日, 長野.
- ⑫ 藤井祥太, 井上健司, 田窪朋仁, 前泰志, 新井健生: "腕脚統合型ロボットによる梯子の移動", ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008年6月6-7日, 長野.
- ⑬ 柳原裕也, 田窪朋仁, 前泰志, 新井健生: "腕脚統合型ロボット「ASTERISK」による格子壁面移動", ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008年6月6-7日, 長野.
- ⑭ 上撫琢也, 田窪朋仁, 前泰志, 新井健生: "高解像度NDTグリッドマップによる環境地図生成", ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008年6月6-7日, 長野.
- ⑮ Takuya Kaminade, Tomohito Takubo, Yasushi Mae and Tatsuo Arai: "The Generation of Environmental Map Based on a NDT Grid Mapping", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), 19-23 May, 2008, America.
- ⑯ Shota Fujii, Kenji Inoue, Tomohito Takubo, Yasushi Mae and Tatsuo Arai: "Ladder Climbing Control for Limb Mechanism Robot "ASTERISK"", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), pp. 3052-3057, 19-23 May, 2008, America.
- ⑰ 藤井 祥太, 井上 健司, 田窪 朋仁, 新井 健生: "力の分散を考慮した腕脚統合型ロボットによる梯子の昇段動作", 第8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, 2007年12月20-22日, 広島.
- ⑱ Takahiro Miyauchi, Tomohito Takubo, Yasushi Mae, Tatsuo Arai, and Kenichi Ohara: "Collaborative Monitoring Using UFAM and Mobile Robot -2ndreport:Development of integrated

- management system”, The 4th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2007), 22-24 November, 2007, Korea.
- ⑲ Jun Iio, Kenji Inoue, and Tatsuo Arai, “Three-dimensional Pointing Device using a Multi-spot Laser Pointer” The IEEE Second TABLETOP Workshop, 10-12 October, 2007, America.
- ⑳ 上撫琢也, 田窪 朋仁, 新井健生 第 25 回日本ロボット学会学術講演会: “NDT グリッドマップを用いた環境地図生成 高解像度グリッドに対応した収束計算の提案”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007 年 9 月 13-15 日, 千葉.
- 21 上川健司, 田窪朋仁, 新井健生, 井上健司: “リムメカニズムロボットによるケーブルの回転懸垂移動”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007 年 9 月 13-15 日, 千葉.
- 22 吉岡健伸, 田窪朋仁, 新井健生: “脚車輪ハイブリッド動作による ASTERISKH の段差踏破”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 2007 年 9 月 13-15 日, 千葉.
- 23 宮内隆弘, 田窪朋仁, 新井健生, 大原賢一: “UFAM と移動ロボットを用いた協調モニタリングシステム”, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2007 年 9 月 11 日, 大阪.
- 24 Takahiro Miyachi, Tomohito Takubo, Tatsuo Arai, and Kenichi Ohara: “Collaborative Monitoring Using UFAM and Mobile Robot”, The 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2007), 5-9 August, 2007, China.
- 25 吉岡健伸, 田窪朋仁, 井上健司, 新井健生, 國松禎明: “脚車輪ハイブリッド動作による ASTERISK の不整地移動”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007 年 5 月 11-12 日, 秋田.
- 26 藤井祥太, 田窪朋仁, 井上健司, 新井健生, 國松禎明: “腕脚統合型ロボット「ASTERISK」による梯子の昇段動作”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007 年 5 月 11-12 日, 秋田.
- 27 上撫琢也, 田窪朋仁, 井上健司, 新井健生: “腕脚統合型ロボット「ASTERISK」による NDT グリッドマップを用いた環境地図生成”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007 年 5 月 11-12 日, 秋田.
- 28 Tatsuo Arai, Tomohito Takubo, Kenji Inoue, Tomohiro Umetani: “Efficient Monitoring by Robot and Intelligent Tag Collaboration”, The 3rd International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2006), 15-17 October, 2006, Korea.
- 29 Kenji Inoue, Taisuke Tsurutani, Tomohito Takubo, Tatsuo Arai: “Omni-directional Gait of Limb Mechanism Robot Hanging from Grid-like Structure”, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 9-15 October, 2006, China.
- 30 Shota Fujii, Kenji Inoue, Tomohito Takubo, Tatsuo Arai: “Climbing up onto Steps for Limb Mechanism Robot “ASTERISK””, International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2006 (ISARC2006), 3-5 October, 2006, Japan.
- 31 宮内隆弘, 田窪朋仁, 井上健司, 新井健生: “腕脚統合型ロボット「ASTERISK」の走行動作生成”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2006 年 5 月 26-28 日, 東京.
- 32 藤井祥太, 井上健司, 田窪朋仁, 新井健生: “腕脚統合型ロボット「ASTERISK」による段差のよじ登り動作”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2006 年 5 月 26-28 日, 東京.
- 33 新井健生, 井上健司, 田窪朋仁, 梅谷智弘: “ロボットと RFID の協調による詳細モニタリングの構想”, 日本機械学会生産システム部門講演会 2006 講演論文集, 2006 年 5 月 26-28 日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新井 健生 (ARAI TATSUO)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号: 90301275

(2) 研究分担者

田窪 朋仁 (TAKUBO TOMOHITO)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 80397685
前 泰志 (MAE YASUSHI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 50303027
大原 賢一 (OHARA KENICHI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 50517886
井上 健司 (INOUE KENJI)
山形大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40203228

(3) 連携研究者

なし