

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24220005

研究課題名(和文)超高速ビジョンを用いた高速知能ロボットの研究

研究課題名(英文)High-speed Intelligent Robot Using Ultra High-speed Vision

研究代表者

石川 正俊(Ishikawa, Masatoshi)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：40212857

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 167,100,000円

研究成果の概要(和文)：超高速ビジョンを基軸とした高速知能ロボットを実現した。アクチュエータ・画像処理モジュール・光学素子といった要素レベルから設計・開発をおこない、高速多指ハンド・高速二足ロボット・高速ビジョンデバイス・高速視線制御ユニット・高速可変焦点技術に関して、優れた能力を持つシステムを構築することができた。理論・アルゴリズム・システムといった幅広い階層の開発を実施し、それらを融合することで、人間の目では把握し得ない極限的な環境センシング/適応的アクチュエーションが可能となった。これにより、感覚運動統合の視点に基づく認識行動戦略をアプリケーションへ実装することで、多様な超高速ロボット技能を実証した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a high-speed intelligent robot based on ultra-high-speed vision has been achieved. We have designed from the component level as the actuator, image processing module, and optical device. With using the developed components, high-speed multi-fingered hand, high-speed bipedal robot, high-speed vision device, high-speed gaze control unit, and high-speed variable focus technology have been built up as the system with superior performance. Moreover, multi-level developments composed of theory, algorithm, and system have been achieved and the integration has enabled to target sensing and adaptive actuation that are unperceivable for human eye. With implementing the recognition behavior strategy based on motor-sensory integration into various applications, high-speed robotic skills have been demonstrated.

研究分野：知覚情報処理

キーワード：ロボットビジョン ビジュアルフィードバック 知能ロボティクス 高速画像処理

1. 研究開始当初の背景

現在、産業用ロボットはプレイバック方式による繰り返し動作の実行は速いが、センサフィードバックに基づく知的動作はセンサの速度に起因して、低速な動作しか実現されていない。一方、ヒューマノイドロボットは人間の運動を再現することを目標としているため、本質的な機械のダイナミクスに比べて動作が遅いという問題がある。現状の知能ロボットは、機械システムとしての速度限界には達しておらず、今まで以上に高速かつ知的に動作する先進的な領域へ達する可能性が残っている。

2. 研究の目的

超高速ビジョンに関連する幅広い基盤技術を確立するとともに、実際に超高速時間領域で動作する様々なシステムを構築する。新たに、高速3次元形状計測、高速視線制御、高速可変焦点技術を知能ロボットへ統合し、知能ロボットの速度限界へ挑戦する。具体的には、(A)人間の目では見えない極限の高速性を追求した高速知能ロボットの開発、(B)人間の目では把握し得ない高速に変動する実環境・対象のダイナミック把握の実現を目的とする。

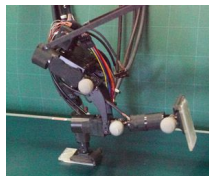
3. 研究の方法

高速知能ロボットの原理を提案・確認し、予備実験等で実現可能性を確かめた上で、実証システムを組んで、従来とは全く異なる性能が得られることを確認する。研究遂行にあたってはサブテーマごとに研究のフェーズが違いため、スケジュールはフレキシブルに対応する形で進めている。概略的には、前半でロボットとセンシングのシステム構築と検証実験等を行い、後半で具体的な応用を念頭に置いた実証を試みることにより、その有効性を確認するとともに、その成果から新たな高速知能ロボットの開拓を目指す。

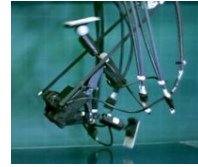
4. 研究成果

[高速二足走行システム ACHIRES]

高速ビジュアルフィードバックを用いた二足走行ロボットシステム ACHIRES を開発した。軽量かつ高出力なモータを用いて高速運動を実現する二足走行機構と、走行姿勢を安定に保つためにロボットの状態をリアルタイムに認識する高速ビジョンを統合したシステムで構成されている。上記の技術を融合することで、転倒を回避するための反応スピードが大幅に向上した。これにより、視覚フィードバックを主体とした簡易かつ直観的な手法でバランス制御が可能となり、通常の二足ロボットで使用されている ZMP 規範制御から脱却した新たな走行アルゴリズムを提案した。ACHIRES を用いた検証実験の第一ステッ



プとして、世界トップクラスのスピードで高速走行することを実現した。走り方も従来とは異なり、体幹姿勢が大きく前傾したダイナミックな走法が可能となった。アクロバティックな脚運動への拡張として、助走しながら前方へ跳躍して1回転する空中転回を実現した。空中では重心回りの角運動量が保存することを利用し、脚の屈伸運動による慣性モーメント変化を利用した空中姿勢制御戦略を提案した。従来のようなバネや油圧を用いずに、汎用的な駆動機構で空中転回を実現している例は他に見当たらない。同時に、環境設置型の高速ビジョンシステムの他に、二足ロボット本体に小型ビジョンを搭載した ACHIRES も開発した。ビジュアルオドメトリを実装することで、二足ロボット視点の映像から自身の姿勢計測を実現した。実験では、2ms の計算時間で誤差 5%以内の姿勢計測が可能なることを示した。



[勝率 100%のじゃんけんロボット]

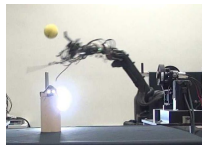
高速ビジョンによる人間の手の認識と、高速ロボットハンドによる瞬間的な動作を組み合わせて、必ず人間に勝つことができるじゃんけんロボットを開発した。このじゃんけんロボットは、人間が出した「手」を認識してから、人間が知覚および運動ができない 60ms 以内に、人間に勝つような「手」をロボットが先に出すメカニズムになっている。画像処理としては、人間の手の位置と指の本数を認識している。従来の人間の手の認識には、画像面積やマーカの位置関係から判定する方法を用いており、手の大きさの個人差による誤認識やマーカの設置などの問題点が存在したが、本手法では人間に装着するデバイス等は必要なく、特定範囲内であれば高速かつ簡単に手を判定することができる。最新版では高速視線制御技術を導入し、動作範囲を拡大化したシステムへ改良することで、よりユーザビリティの高い低遅延なインターフェースとして利用可能であることを示した。実験動画を YouTube で配信したところ、約 1 週間で 300 万アクセスに達し、現在は約 400 万アクセスとなり、全世界で注目されている。経済産業省デジタルコンテンツ協会 Innovative Technologies 2014 にも選出されている。



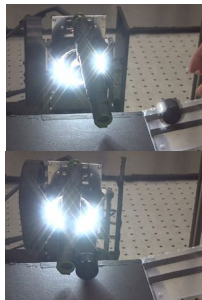
[ハンドアームによるダイナミックスキル]

野球におけるキャッチングとピッチングを実現した。キャッチングでは、アームとハンドの異なる動作帯域特性を利用することで、高速に飛来するボールの追従と位置補償を分離制御する手法を提案した。実験では、

3.8m 離れた位置から初速度 11m/s で発射した軽量ボールを高速ビジョンで計測し、弾かずに捕球することを実現した。この研究により、Finalist of Best Student Paper Award (2015 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics)を受賞した。ピッチングでは、指の機能的役割の観点から支指と投指の2種類に分けて把持/リリースをおこない、リリース直前の指上におけるボールの転がりダイナミクスを考慮することで任意方向への投球手法を提案した。実験では、高速ビジョンによる標的認識とリリース調整をリアルタイムで遂行することで、スウィング中に標的を移動した場合でもボールを投げ当てることを実現した。この研究により、T.J. Tarn Best Paper in Robotics Award (2016 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics)を受賞した。



[塑性変形に基づく衝撃吸収制御]
受動的かつ低反発に衝撃を吸収するロボット制御を実現した。従来のインピーダンス制御では、外力が働くほど変位0の元の位置へ戻るような強い反発力が発生する弾性的特徴があるため、対象の跳ね返りや緩和中の離脱が問題となっていた。これに対し、本研究では衝撃吸収に起因するロボットのバックドライブモーションを「ロボットの塑性変形」と捉えるコンセプトを提案し、塑性変形モデルを導入した制御手法を開発した。このアーキテクチャを基に、物理的なバネとサーボ制御のダンパを統合し、バネ変位を高速ビジョンで計測することで、可塑的に衝撃を緩和するビジュアルショックアブソーバを開発した。実験では、転がってくる鉄円柱を反発することなく衝撃吸収することを実現している。これら一連の研究に対して、2016年計測自動制御学会システムインテグレーション部門研究奨励賞、第21回ロボティクスシンポジウム優秀論文賞を含む計4件を受賞した。



[相対座標制御による高速ペグインホール]
高速ビジョンとバックラッシュのない高速アクチュエータをロボットアームの先端リンクに搭載することで、手先のペグをホールに高速で挿入するペグインホール作業を実現した。視野内にペグとホールを両方捉えて画像内で相対座標制御をおこない、手先の高応答特性とアクチュエータのバックラッシュレス特性を利用することで、アームに関する誤差を手先機構



で高速に補償してタスクを遂行することを可能にした。その結果、通常の力制御を利用したペグインホールに比べて、格段に高速化することを実現した。

[高速高精度ハンドの開発]

微細部品の組み立て作業の自動化/高速化を目指し、高速高精度ロボットハンドのプロトタイプを開発した。これまでに開発してきた高速ハンドをベースに、バックラッシュ要因となるベベルギアを排除してハーモニックギアの出力軸にリンクを直結するメカニズムへ改良し、エンコーダの高分解能化を施すことで高精度化を図った。扱う対象が微小であることを想定し、指根元関節によるダイナミックな運動よりも指先関節による精密な動きを優先することで、指先アクチュエータ特性を重視したバランス設計へ変更した。検証実験では、100mm離れた距離に対して10 μ m内の精度で0.2秒の位置決めを実現した。また、レーザ変位系を用いたフィードバック制御により、エンコーダ分解能と同等の限界精度で制御可能なことを実証した。



[多指ハンドによるマニピュレーション]
柔軟物操りと微小物体操作を実現した。柔軟物操りでは、空中での布のダイナミックな折りたたみ動作と弾性体の制振制御を行った。人間の折りたたみ動作の解析を行うことで布の変形モデルを導出し、高速視覚フィードバックに



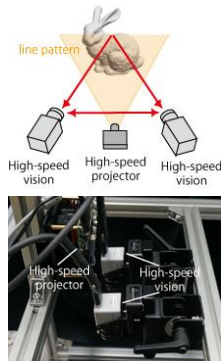
よって布の特徴点認識に基づいた軌道生成手法を提案した。同様に、高速ビジョンにより弾性体の形状取得をおこない高周波振動を認識することで、柔軟パラメータに依存しない振動抑制手法を提案した。微小物体操作では、微小球キャッチとネジ回しを行った。多指ハンドでピンセットを把持し、空中を飛んでくる微小球をピンセットの先端で瞬間的に掴む動作を実現した。ピンセットは固定せずにハンドで接触状態を制御しながら、ロバストなビジュアルサーボ手法を提案した。組み立て作業の一環として取り組んだネジ回しでは、ネジの回転情報を高速ビジョンで計測することで、ネジの緩み具合と外れる瞬間の検出を可能としたロバストな手法を提案した。



[高速3次元計測ビジョンシステム]
スタンドアロンビジョンシステムとパターン照明ビジョンシステムを開発した。スタンドアロンビジョンシステムでは、処理回路・カメラヘッド・電源・配線



などシステム全体を一体化し、小型化することを實現した。高速な画像処理に基づいて撮像形態をフレーム毎に制御する動的撮像システムを開発することで、システムの小型化に伴う機能低下を最大限に抑えた設計となっている。応用として高速書籍電子化を實現した。パターン照明ビジョンシステムは、高速ビジョン 2 台と高速プロジェクタで構成されており、2ms での高速 3 次元形状計測を實現した。プロジェクタとカメラ間は同期がとられており、ラインパターンを能動的に照射し、対象に投影されたパターンを特徴量として認識することで 3 次元点群を取得する構造化光法を提案した。通常はカメラのみで対象の表面情報を精度良く取得するのは困難であるが、本手法では一定のデプス範囲内であれば高精度に 3 次元情報を取得できることを確認した。[1ms オートパン・チルト]



高速ビジョンと高速ミラーの性能の高さに依拠した映像制御を実現するトラッキングシステムを開発した。1kHz オーダの高い応答速度と Full HD 対応の高い解像度をもつ実用的な評価用システムとなっている。可搬性を備えているため様々な被写体にあわせて評価可能であり、屋内外においてプレイ中の卓球ボールやバスケットボールに対し、スポーツ中継用として実用に耐えうる高解像度で継続的なトラッキングが可能なることを検証実験により示した。これにより、従来では困難であった高速かつ不規則に変動する対象の継続観察を達成することで、高速高精度な視線制御技術を確立した。この研究により、経済産業省デジタルコンテンツ協会 Innovative Technologies 2013, および 2016 年日本ロボット学会 Advanced Robotics Best Paper Award を受賞した。

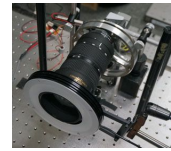


[高速可変焦点デバイス]

大口径化液体可変焦点レンズと補足プレート型可変焦点デバイスを開発した。従来の液体可変焦点レンズは 2 層構造で作成されており、光学特性の低下や毛管現象の物理的制約の問題があったため、大口径化するのは技術的にほぼ不可能であった。そこで新たに、液体-膜-液体の 3 層構造のレンズを提案し、上記の問題を解決した。これにより、大口径化に伴う入射光量や焦点レンジの大幅増加など光学設計が大幅に容易になると同時に、より鮮明な画像が撮れることを確認した。補足プレート型可変焦点デバイスでは、高速カメラとレンズの間に異なる厚さのガラスプレ

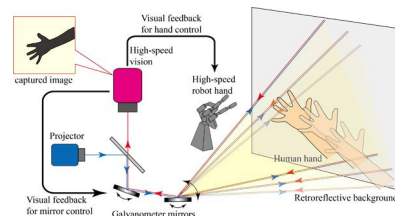


ートを搭載した高速回転機構を導入し、焦点距離の異なる画像を高速に取得可能とした。これにより、間引きして特定対象だけに常にフォーカスの合った動画画像を出力したり、ある瞬間に画像面全体に対して焦点の合った全焦点画像を合成することが可能となる。実機としてプレートを 4 枚と 20 枚の 2 種類を作成し、要求される分解能・撮像レート・ダイナミックレンジに応じて柔軟に焦点調整が可能であることを実証した。

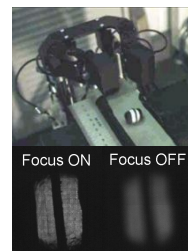


[システム融合]

高速 3 次元形状計測と高速ロボットのシステム融合として、テレマニピュレーションシステムを開発した。パターン照明ビジョンシステムを用いて人間の手の 3 次元センシングをおこない、スレーブ側のロボットハンドへの動作マッピングを実装することで、人間の動作意図を反映した対象把持動作と落下物体キャッチングを實現した。高速視線制御と高速ロボットのシステム融合として、改良版じゃんけんロボットを開発した。



1ms オートパン・チルトを統合してトラッキング機能を導入することで、手のランダムな位置変化にも対応するよう拡張した。高速可変焦点技術と高速ロボットのシステム融合として、高精度タイミング把持を實現した。補足プレート型可変焦点デバイスを用いることで、ブラーのない鮮明な画像取得に基づいた奥行き方向の計測精度が向上し、把持タイミングを高精度化することが可能となった。実験では、カメラ光軸方向に高速移動する対象物に対して、単眼ビジョンの場合でも確実にハンドで把持することを實現した。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 26 件)

- [1] Taku Senoo, Masanori Koike, Kenichi Murakami, Masatoshi Ishikawa: Impedance Control Design Based on Plastic Deformation for a Robotic Arm, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.2, No.1, pp.209-216, 2017. [査読有, DOI:10.1017/S0263574715000740]
- [2] Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa:

- Analysis of Sliding Behavior of a Biped Robot in Centroid Acceleration Space, *Robotica*, Vol.35, Issue 3, pp.636-653, 2017. [査読有, DOI: 10.1017/S0263574715000740]
- [3] Yuji Yamakawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa: Simplified deformation model and shape generation of a rhythmic gymnastics ribbon using a high-speed multi-jointed manipulator, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.3, No.6, Paper No.15-00510 (2016) [査読有, DOI: 10.1299/mej.15-00510]
- [4] 玉田智樹, 五十嵐渉, 米山大揮, 田中和仁, 山川雄司, 妹尾拓, 石川正俊: 高速二足走行システムACHIRESの開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.33, No.7, pp.482-489, 2015. [査読有, DOI: 10.7210/jrsj.33.482]
- [5] Kohei Okumura, Keiko Yokoyama, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa: 1 ms Auto Pan-Tilt - video shooting technology for objects in motion based on Saccade Mirror with background subtraction, *Advanced Robotics*, Vol.29, Issue 7, pp.457-468 (2015) [査読有, DOI: 10.1080/01691864.2015.1011299]
- [6] Shouren Huang, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Dynamic compensation by fusing a high-speed actuator and high-speed visual feedback with its application to fast peg-and-hole alignment, *Advanced Robotics*, Vol.28, No.9, pp.613-624, 2014. [査読有, DOI: 10.1080/01691864.2014.884934]
- [7] Lihui Wang, Hiromasa Oku, Masatoshi Ishikawa, An improved low-optical-power variable focus lens with a large aperture, *Optics Express*, Vol.22, Issue 16, pp. 19448-19456 (2014) [査読有, DOI: 10.1364/OE.22.019448]
- [8] 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: ロボットハンドの構造・運動を考慮した操りスキルの統合に基づく結び目の生成計画, *日本ロボット学会誌*, Vol.31, No.3, pp.283-291, 2013. [査読有, DOI: 10.7210/jrsj.31.283]
- [9] 末石智大, 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊: 二眼駆動鏡面式視線制御による高速運動・変形物体のステレオ計測システム, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.18, No.2, pp.181-190 (2013) [査読有, DOI:10.18974/tvrsj.18.2_181]
- [10] 渡辺義浩, 畑中哲生, 小室孝, 石川正俊: 単一のウェアラブルカメラを用いた人間の歩行動作推定, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.17, No.3, pp.219-229, 2012. [査読有, DOI: 10.18974/tvrsj.17.3_219]
- [学会発表](計89件)
- [1] Hiroshi Sato, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Development of a High-speed, High-accuracy Robot Hand for Micromanipulation, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (Qingdao, China, 2016.12.6) / Proceedings, pp.1535-1541, 2016.
- [2] Taku Senoo, Yuuki Horiuchi, Yoshinobu Nakanishi, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Robotic Pitching by Rolling Ball on Fingers for a Randomly Located Target, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (Qingdao, China, 2016.12.4) / Proceedings, pp.325-330.
- [3] Taku Senoo, Gaku Jinnai, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Deformation Control of a Multijoint Manipulator Based on Maxwell and Voigt Models, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Daejeon, Korea, 2016.10.12) / Proceedings, pp.2711-2716, 2016.
- [4] Shouren Huang, Niklas Bergström, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: High-Performance Robotic Contour Tracking based on the Dynamic Compensation, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Stockholm, Sweden, 2016.5.18) / Proceedings, pp. 3886-3893, 2016.
- [5] 梅村元, 玉田智樹, 五十嵐渉, 米山大揮, 田中和仁, 山川雄司, 妹尾拓, 石川正俊: 高速ビジュアルフィードバックを用いた二足走行ロボットによる空中転回, 第21回ロボティクスシンポジウム(長崎県長崎市, やすらぎ伊王島, 2016.3.18) / 講演論文集, pp. 414-419.
- [6] Kenichi Murakami, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Motion Planning for Catching a Light-weight Ball with High-speed Visual Feedback, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, (Zhuhai, China, 2015.12.7) / Proceedings, pp.339-344.
- [7] Yugo Katsuki, Yuji Yamakawa, Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa: Development of Fast-Response Master-Slave System Using High-speed Non-contact 3D Sensing and High-speed Robot Hand, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,

- (Hamburg, Germany, 2015.9.29) / Proceedings, pp.1236-1241 (2015)
- [8] Taku Senoo, Masanori Koike, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Visual Shock Absorber Based on Maxwell Model for Anti-Rebound Control, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Hamburg, Germany, 2015.9.29) / Proceedings, pp. 1640-1645.
- [9] Tomoki Tamada, Wataru Ikarashi, Daiki Yoneyama, Kazuhito Tanaka, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: High-speed Bipedal Robot Running Using High-speed Visual Feedback, 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, (Madrid, Spain, 2014.11.19) / Proceedings, pp.140-145 (2014)
- [10] Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Planar Sliding Analysis of a Biped Robot in Centroid Acceleration Space, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Chicago, USA, 2014.9.17) / Proceedings, pp.4050-4056 (2014)
- [11] Lihui Wang, Hiromasa Oku, Masatoshi Ishikawa, Adaptive achromatic doublet design by double variable-focus lenses, SPIE Optics + Photonics 2014 (San Diego, USA, 2014.8.18)
- [12] Niklas Bergstrom, and Masatoshi Ishikawa: 1 ms tracking of target boundaries using contour propagation, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Tokyo Big Sight, Koto-ku, Tokyo, 2013.11.4) / Proceedings, pp.2144-2151.
- [13] Shouren Huang, Kenichi Murakami, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Fast Peg-and-Hole Alignment Using Visual Compliance, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Tokyo Big Sight, Koto-ku, Tokyo, 2013.11.4) / Proceedings, pp.286-292.
- [14] Hiromasa Oku: Dynamic image control based on high-speed optical devices, The 5th International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging (Beijing, China, 2013.6.26)/ p.59
- [15] Yuji Yamakawa, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa: Dexterous Manipulation of a Rhythmic Gymnastics Ribbon with Constant, High-Speed Motion of a High-Speed Manipulator, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Karlsruhe, Germany, 2013.5.7) / Proceedings, pp.1888-1893 (2013)
- [16] Lihui Wang, Hiromasa Oku, Masatoshi Ishikawa, Development of variable-focal lens with liquid-membrane-liquid structure and 30mm optical aperture, SPIE Photonics West 2013 (San Francisco, USA, 2013.2.7) / Proceedings, 8617-5.
- [17] Masatoshi Ishikawa, Akio Namiki, Taku Senoo and Yuji Yamakawa. Ultra High-speed Robot Based on 1 kHz Vision System. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (Vilamoura, Portugal, 2012.10.11) / Proceedings, pp.5460-5461.
- [18] Yuji Yamakawa, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa: Card Manipulation using a High-speed Robot System with High-speed Visual Feedback, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Vilamoura, Portugal, 2012.10.10) / Proceedings, pp.4762-4767 (2012)
- [19] Taku Senoo, Mitsuhiro Takano and Masatoshi Ishikawa. Dynamic Horizontal Movement of a Bipedal Robot Using Frictional Asymmetry. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (Vilamoura, Portugal, 2012.10.9) / Proceedings, pp.1834-1839.
- [20] Yoshihiro Watanabe, Shintaro Kubo, Takashi Komuro, and Masatoshi Ishikawa: Finger Detection based on Data Fusion of Fish-eye Stereo Camera for 3D-Gesture Input Interface, IEEE Global Conference on Consumer Electronics (Makuhari Messe, Chiba-shi, Chiba, 2012.10.03) / Proceedings, pp. 284-288.

〔その他〕

ホームページ

東京大学 石川・渡辺研究室

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 正俊 (Ishikawa Masatoshi)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授
研究者番号：40212857

(2) 連携研究者

奥 寛雅 (Oku Hiromasa)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：40212857

渡辺 義浩 (Watanabe Yoshihiro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師
研究者番号：80456160