

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02348

研究課題名(和文) 超高速アクティブビジョンを用いたマルチスレッド高速視覚センシング

研究課題名(英文) Multithread High-speed Vision Sensing Using Ultrafast Active Vision

研究代表者

石井 抱 (ISHII, IDAKU)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：40282686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、計測系・処理系・駆動系の高速化により、一台の高速ビジョンが複数仮想トラッキングビジョンとして機能する時分割マルチスレッド視線制御の概念を提案し、高速画像認識とフレーム単位の視線パスプランニングが統合した高速ターゲットトラッキング理論の体系化を行った。時分割マルチスレッド処理として秒間数百視線の独立制御を行う超高速アクティブビジョンを開発し、複数視線の時空間密度を制御するマルチスレッド視線制御によるサーベイランス応用事例を通し、聖徳太子的な超人的な目として、数十台のトラッキングビジョンに「分身」するマルチスレッド高速視覚センシングの有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一台の超高速アクティブビジョンを複数台の仮想トラッキングビジョンとして機能させる時分割マルチスレッド視線制御技術は、計測目的に応じた効率的な視線パスプランニングを内包する次世代アクティブセンシング技術として、様々な応用場面で技術革新を喚起する点で学術的な意義が高い。また本研究は、超高速ロボットが複数の分身ロボットとして機能する「分身できる超高速ロボット」への野心的挑戦の第一歩であり、数十台の仮想トラッキングビジョンへ「分身」する、聖徳太子的な超高速ロボットの目を目指し、超高速ロボット=分身ロボティクスといった、世界に先駆けた革新的なパラダイムを提案する点で、本研究を行う意義は極めて高い。

研究成果の概要(英文)：This study proposed the concept of time-division multithread viewpoint control in which an ultrafast active vision system can function as multiple virtual pan-tilt cameras by accelerating sensing, computing, and actuation for target tracking, and systematized multithread target tracking theory that integrates high-speed image recognition and frame-by-frame viewpoint path planning. We developed an ultra-high-speed active vision system that can independently perform viewpoint control at hundreds of frames per second as time-division multithreaded processes, and verified the effectiveness of multithreaded high-speed vision sensing that "alternates" to dozens of virtual tracking visions by showing several surveillance applications in which spatio-temporal densities of multiple viewpoints are simultaneously controlled.

研究分野：計測工学

キーワード：計測システム 高速ビジョン トラッキング アクティブセンシング 視覚サーベイランス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

複数ネットワークカメラにより広範囲情報を捉えるビデオサーベイランスの研究では、カメラの動きが遠隔制御可能なPTZカメラによるビデオサーベイランスが多く実現されている。一方で市販PTZカメラは、単一視野の数十fpsビデオ画像取得用に設計され、広範囲の複数視野の同時カバーには、視野数分のカメラが必要となり、数十～数百台のカメラによるビデオサーベイランスでは、カメラの物理的制限や制御ソフトウェア複雑化等のシステム大規模化に伴う制約・コストが問題となる。

この問題に対し、研究代表者らは高速ビジョンとフレーム同期した高速光線駆動系を前提とし、数百視線/秒での独立したマルチスレッド視線制御により、一台が数十台の仮想パン・チルトカメラとして機能する超高速アクティブビジョンの実現に成功した。これらの知見・ノウハウを基に、時分割マルチスレッド視線制御に基づく超高速マルチターゲットトラッキング技術のさらなる高度化を実現するべく、本申請を着想するに至った。

### 2. 研究の目的

計測系・処理系・駆動系の高速化により、一台の高速ビジョンが複数仮想トラッキングビジョンとして機能する時分割マルチスレッド視線制御の概念を提案し、高速画像認識とフレーム単位の視線パスプランニングが統合した高速ターゲットトラッキングアルゴリズムの体系化を行う。ミリ秒レベルでの時分割マルチスレッド処理として独立した視線制御を行う超高速アクティブビジョンを開発し、複数視線の時空間密度を制御するスレッドスケジューリングに基づくマルチスレッド視線制御による応用事例を通して、聖徳太子的な超人的な目として、数十台のトラッキングビジョンに「分身」するマルチスレッド高速視覚センシングの有効性を示す。

### 3. 研究の方法

計測系・処理系・駆動系が高速化した超高速アクティブビジョンを前提とした、時分割マルチスレッド視線制御によるマルチスレッド高速視覚センシングアルゴリズムの体系化を行い、一台の高速ビジョンが複数仮想トラッキングビジョンとして機能する有効性を実システム上の動作検証を通して示す。具体的には以下の研究項目の研究を行った。

- ① 秒間数百視線を制御可能とするマルチスレッド高速アクティブビジョンの開発
- ② 画像認識結果に基づき視線密度を制御するマルチスレッド視線制御アルゴリズム
- ③ マルチスレッド視線制御を用いた多視点ビデオサーベイランス試験

### 4. 研究成果

- ① 秒間数百視線を制御可能とするマルチスレッド高速アクティブビジョンの開発

マルチスレッドアクティブビジョンは、コンピュータ上でのマルチスレッド処理の考えを画像撮影・画像処理・視線切替制御の一連動作を含むトラッキング制御系に導入し、図1のように超高速視線切替制御を前提とした形でトラッキング制御を時分割マルチスレッド化することにより、一台のミラー駆動型高速アクティブビジョンが複数台の仮想パン・チルトカメラとして機能させる考えである。高速アクティブビジョン上でトラッキング制御をマルチスレッド化するためには次の条件を満たす必要がある。

#### 1) 画像撮影・処理の高速化

仮想パン・チルトカメラが数十fpsの画像撮影・画像処理を行うためには、台数分に相当する形で、高速アクティブビジョンは少なくとも数百fpsの撮影・処理を行う必要がある。

#### 2) 視線切替制御の高速化

画像撮影・処理の高速化に伴い、視線切替制御の時間粒度は前後フレームの撮影に影響を与えない形でミリ秒オーダーに最小化される必要があり、これを保障するためにkHzオーダーの周波数特性を持つ高速駆動ミラーがアクチュエータとして必要とされる。

本研究では、後述するサーベイランス应用到に合わせた形で様々な形態のマルチスレッド高速アクティブビジョンを構築している。その一つとして、上記仕様を満たす高速アクティブビジョンと固定された広角カ

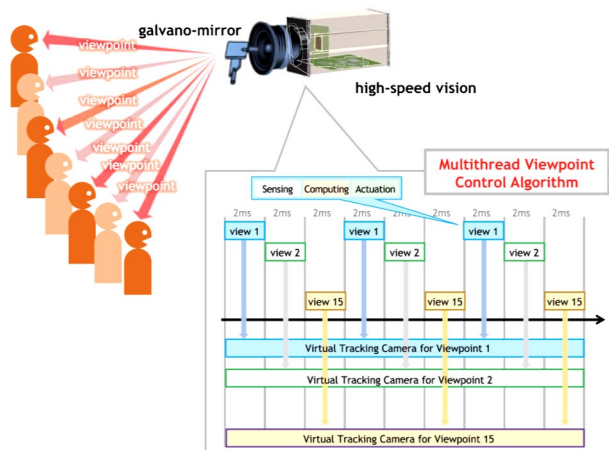


図1 マルチスレッド高速アクティブビジョンの考え

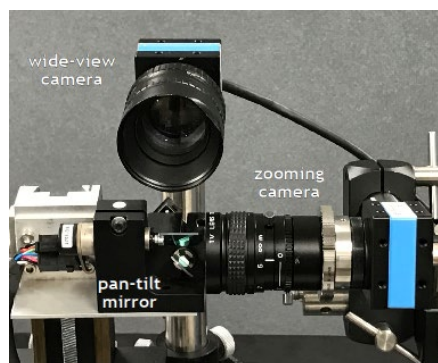


図2 マルチカメラ型マルチスレッド高速アクティブビジョン

メラを組み合わせた、マルチカメラ型マルチスレッド高速アクティブビジョンの外観を図2に示す。本システムは、最大500視点/秒での視点切替可能なパンチルトガルバノミラー(パンチルト角の稼働範囲はいずれも±10度)とVGAサイズ画像を500fpsで取得可能な高速USB3.0カメラからなる高速マルチスレッドビジョンが、ガルバノミラーの稼働範囲と画角が一致する広角固定カメラから構成され、GPU等を用いた広角カメラ画像に対する認識結果に基づく視線マルチスレッド視線制御を可能としている。このようなマルチスレッド高速アクティブビジョンが5台の仮想パンチルトカメラとして屋外シーンを撮影した画像例を図3に示す。

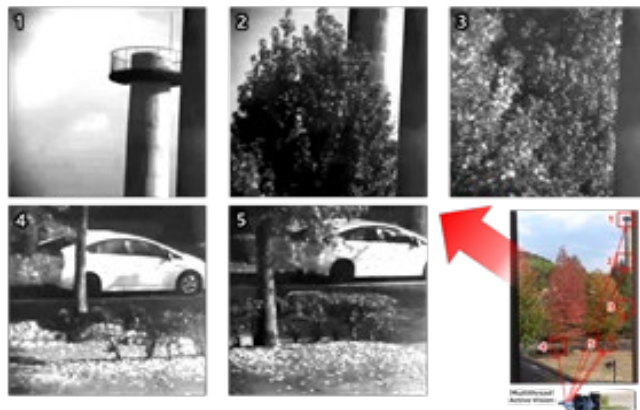


図3 マルチスレッド高速アクティブビジョンによる撮影例

② 画像認識結果に基づき視線密度を制御するマルチスレッド視線制御アルゴリズム

高速ガルバノミラーの整定時間を考慮した視線スレッドスケジューリングを考慮した形で、画像特徴量に基づくマルチスレッド高速アクティブビジョンの視線スレッドの時空間密度を適応制御するアルゴリズムの検討を行った。最初に視線スレッドに異なる時間密度を持たせたヘテロジニアスマルチスレッド視線制御法の検討を行い、スレッド時間分解能が2msである、秒間500視点分の視線スレッドの半分をガルバノミラー稼働範囲全体に対する探索モード、残り視線スレッドを同一対象の追跡モードとして機能させたアルゴリズムについて、マルチスレッド高速アクティブビジョン上で動作確認した。

これを改良する形で、次に前述したマルチカメラ型システムを前提とし、広角カメラ画像の統計的認識結果に基づき、ミラー稼働角内の全ての認識対象を同時追跡可能としたマルチスレッド視線制御アルゴリズムを提案した。図4は顔認識を例に提案マルチスレッド視線制御アルゴリズムの考えを説明しており、Viola-Jones顔検出法の実時間認識結果に基づき、同時に複数顔領域に対するズーム追跡にも成功した。この考えを、様々な畳み込みニューラルネットワーク等による認識と組合せて実現可能とした体系化を行い、実際に広角カメラ画像で認識された全対象の同時ズームアップに成功した。Yolo-v3(実時間30fps動作)を用いた屋外の人や車に対するズーム追跡結果を図5に示す。

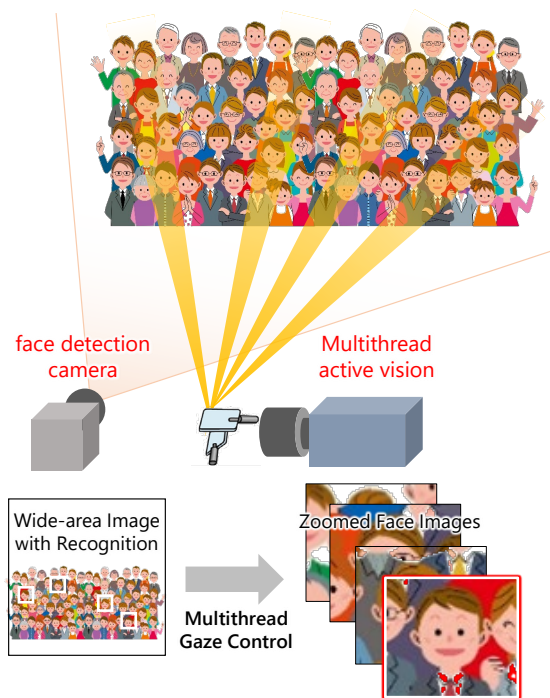


図4 マルチカメラ型マルチスレッド視線制御アルゴリズム

実際に広角カメラ画像で認識された全対象の同時ズームアップに成功した。Yolo-v3(実時間30fps動作)を用いた屋外の人や車に対するズーム追跡結果を図5に示す。

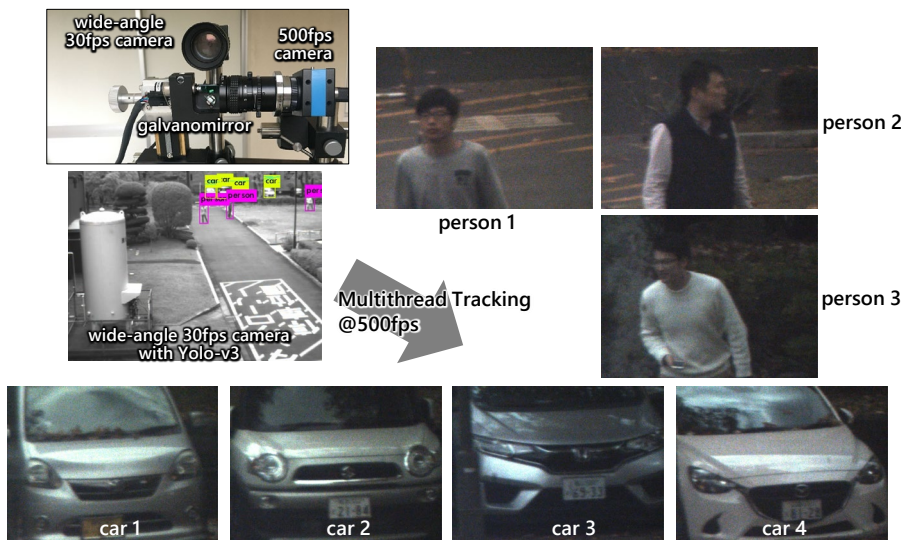


図5 CNN認識結果に基づくマルチスレッド視線制御による同時ズーム追跡

### ③ マルチスレッド視線制御を用いた多視点高速ビデオサーベイランス試験

#### 1) マルチスレッドカメラに基づく単眼三次元ステレオ試験

一般に PTZ カメラ 単体では、複数の異なる方向からの同一対象撮影が難しく、特に広いベースラインによるステレオ対画像に基づく三次元計測が困難である。この問題に対し、マルチスレッド高速アクティブビジョンと反射屈折光学系を組み合わせ、単一システムのみで左視点・右視点の仮想パン・チルトカメラを同時動作させた単眼ステレオトラッキングシステムを実現した。図 6 にシステム構成、外観、座っている人に対する三次元画像を示す。この実験例では 250 視点/秒の視点切替を前提としたマルチスレッド制御を行い、高速ガルバノミラーによる 4ms 間隔左右視点切替により、仮想左視点・右視点パン・チルトカメラの 512×512 画像をそれぞれ 125fps で取得し、左右視点画像をフレーム補間処理により仮想的に同期させた上で、ステレオ計測に基づき 512×512 三次元画像を計算している。設置不能な場所に仮想 PT カメラが設置できるため、室内等の設置スペースが限られた場所でも広いベースラインによるステレオトラッキング計測を実現した。

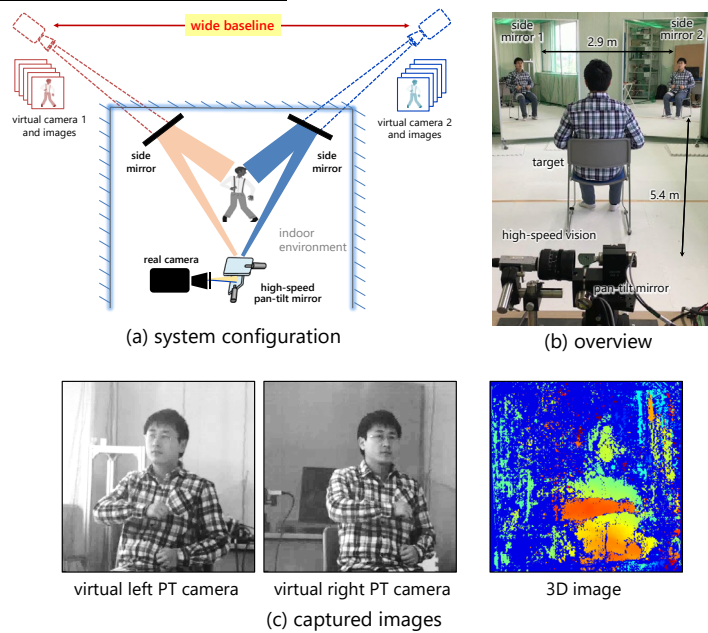


図6 単眼ステレオトラッキングシステムによる人物三次元計測試験

#### 2) 構造物サーベイランス試験に向けたパノラマ撮影・振動試験

研究代表者らが既に提案した大型構造物の振動分布を計測するマルチスレッドアクティブビジョンに基づく振動計測法を拡張する形で、構造物の動的特性の急激な変化が起こらないという仮定の下で、複数振動分布合成に基づき構造物の動的特性変化を検出する新たなダイナミクススペースド検査法を提案した。実際に 4m の橋梁モデルの計測点をいくつかのグループにまとめた形でマルチスレッド追跡を行い、計測点あたりの計測レートを向上させた上で、グループ毎にモード解析を行い、これらのモード波形等の結果の合成により、従来に比べ、高次モードパラメータが推定可能であることを確認した。

また望遠ズームレンズを搭載した高速光線駆動機構でのマルチスレッド視線制御機能を確認した上で、橋梁等の大構造物等に対する撮影し、異なる視点に対する秒間数枚の画像によるパノラマ画像生成をし、広範囲にわたる超空間解像度画像のライブ表示を実現可能とするとともに、同一システムで指定された位置の局所的な振動を含む高フレームレートズーム動画撮影ができることを確認した。図 7 に全長 470m の斜張橋(大芝大橋(広島県東広島市))に対するパノラマ撮影試験における撮影結果例を示す。

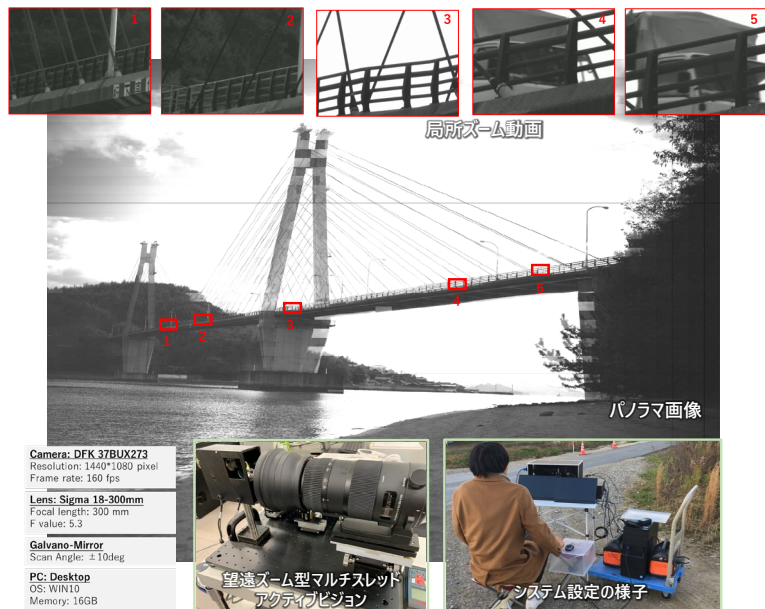


図7 マルチスレッド高速アクティブビジョンを用いた斜張橋パノラマ撮影試験

#### 3) 顕微鏡視野拡張を可能とするマイクロサーベイランス試験

画像処理によりマイクロ流路内の対象を解析するシステムでは、対物レンズの視野範囲が狭いため、顕微鏡下で解析可能な対象物の範囲や速度に制限があり、顕微鏡撮影での視野拡張が求められている。こうした要求に対し、ガルバノミラーを用いて対物レンズの視点を移動させるこ

とにより視野を拡張する顕微鏡撮影システムを提案した。具体的には、1自由度ガルバノミラーと2048×2560画像を200fpsで取得できる高速ビジョンプラットフォームを連動させ、20倍の対物レンズを用いた顕微鏡撮影に対し、秒間200回の視線スレッド制御を行う顕微鏡視野拡張システムを構築した。このシステムでは、異なる視野の8枚の2048×2560画像を瞬時に合成することにより、ある1方向に視野拡張した16000×2000画像を25fpsで実時間取得・撮影可能とした。図8に視野拡張システムの概念、システム外観、直径100 $\mu$ mのウニ卵細胞が200 $\mu$ m幅マイクロ

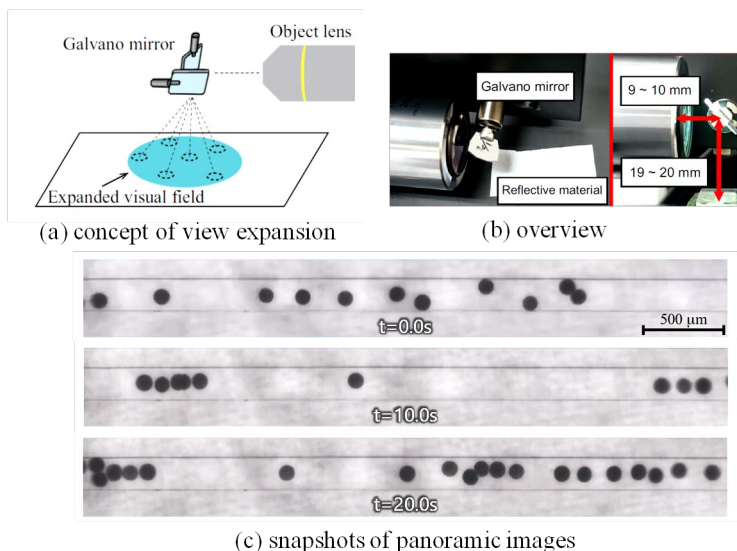


図8 マイクロチャネル観測における顕微鏡視野拡張試験

ロチャネル内を流れる様子を撮影したパノラマ画像列を示す。視野拡張システムでは、画素分解能0.25 $\mu$ mで4.0×0.5mmの範囲を同時観測が可能となり、マイクロチャネル内にウニ卵細胞が流れていく様子をライブ観察を可能とした。これらの結果から、バイオ・医療の分野に向けた細胞の形状や反応、特性などを解析する、lab-on-a-chip解析を始めとした、画像処理ベースの解析システムにマルチスレッド高速アクティブビジョンに基づく本視野拡張システムを導入することで、解析システムの効率化・高性能化が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① J. Li, X. Lu, F. Liu, D. Xu, Q. Gu, I. Ishii, A Hardware-Oriented Algorithm for Ultra-High-Speed Object Detection, IEEE Sens. J., 19(10), 3818-3831 (2019) (査読有) doi 10.1109/JSEN.2019.2895294
- ② T. Aoyama, L. Li, M. Jiang, T. Takaki, I. Idaku, H. Yang, C. Umemoto, H. Matsuda, M. Chikaraishi, A. Fujiwara, Vision-based Modal Analysis Using Multiple Vibration Distribution Synthesis to Inspect Large-Scale Structures, J. Dynamic Syst. Meas. Contr., 14(3), 031007-1-031007-12 (2019) (査読有) doi 10.1115/1.4041604
- ③ 青山忠義, 金石守, 高木健, 石井抱, 長谷川泰久, ガルバノミラーによる視線移動を用いた顕微鏡撮影のための視野拡張システム, 日本ロボット学会誌, 36(4), 294-301 (2018) (査読有) doi 10.7210/jrsj.36.294
- ④ S. Hu, M. Jiang, T. Takaki, I. Ishii, Real-time Monocular Three-dimensional Motion Tracking Using a Multithread Active Vision System, J. Robot. Mechantr., 30(3), 453-466 (2018) (査読有) doi 10.20965/jrm.2018.p0453
- ⑤ T. Aoyama, L. Li, M. Jiang, K. Inoue, T. Takaki, I. Ishii, H. Yang, C. Umemoto, H. Matsuda, M. Chikaraishi, A. Fujiwara, Vibration Sensing of a Bridge Model Using a Multithread Active Vision System, IEEE/ASME Trans. Mechatr., 23(1), 179-189 (2018) (査読有) doi 10.1109/TMECH.2017.2764504
- ⑥ S. Hu, Y. Matsumoto, T. Takaki, I. Ishii, Monocular Stereo Measurement Using High-Speed Catadioptric Tracking, Sensors, 17(8), 1839 (2017) (査読有) doi 10.3390/s17081839

[学会発表] (計8件)

- ① 姜明俊 (石井抱), ディープラーニングを用いた高速対象追跡, ROBOMECH2018, 2018.
- ② 島崎航平 (石井抱), 高速ビジョンを用いた実時間振動スペクトルイメージング, ROBOMECH2018, 2018.
- ③ 足立洋輝 (石井抱), 遠隔広域ビデオ監視に向けた超望遠トラッキングシステムの開発, ROBOMECH2018, 2018.
- ④ 岩井祐樹 (奥寛雅), 1msオートパン・チルトによる目の高速トラッキングアルゴリズム, ROBOMECH2017, 2017.
- ⑤ T. Aoyama (I. Ishii), View Expansion System for Microscope Photography Based on Viewpoint Movement Using Galvano Mirror, IROS2017, 2017.
- ⑥ 金石守 (石井抱), ガルバノミラーを用いた顕微鏡撮影のための視野拡張システム, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 2016.

- ⑦ 李 良 (石井 抱), 高速マルチアクティブビジョンを用いた実時間振動分布計測, RO-BOMECH2016, 2016.
- ⑧ 井上 和生 (石井 抱), ガルバノミラーを用いたアクティブデプスビジョンシステム, RO-BOMECH2016, 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：高木 健

ローマ字氏名：TAKESHI TAKAKI

所属研究機関名：広島大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：80452605

研究分担者氏名：青山 忠義

ローマ字氏名：TADAYOSHI AOYAMA

所属研究機関名：広島大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：00569337 (平成 28 年度)

研究分担者氏名：松本 祐二

ローマ字氏名：YUJI MATSUMOTO

所属研究機関名：広島大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：30803366 (平成 29 年度～平成 30 年度)

研究分担者氏名：奥 寛雅

ローマ字氏名：HIROMASA OKU

所属研究機関名：群馬大学

部局名：大学院理工学府

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：40401244 (平成 28 年度～平成 29 年度)

研究分担者氏名：姜 明俊

ローマ字氏名：MINGJUN JIANG

所属研究機関名：広島大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：30819503 (平成 30 年度)

### (2) 研究協力者

特になし