

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630187

研究課題名(和文) 間欠的瞬時トラッキングに基づくモーションブラーフリーカメラ

研究課題名(英文) Motion-blur-free Camera Using Simultaneous Intermittent Tracking

研究代表者

石井 抱 (ISHII, Idaku)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40282686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高輝度でのモーションブラーフリー撮影を実現する間欠的瞬時トラッキング法を提案した。圧電アクチュエータと高速ビジョンを連動させたモーションブラーフリーカメラのプロトタイプ試作を行い、高速運動対象に対してシャッター時間を小さくすることなく広ダイナミックレンジ撮影を可能とした提案手法の有効性を検証した。具体的には、申請者が有する高速ビジョンハードウェアと高周波数特性を持つ圧電ステージを数百Hzのオーダーのフレーム単位で連動させ、シャッター時間/フレーム間隔、追跡可能な速度範囲、画像鮮鋭度等の定量的な関係を明らかにし、モーションブラーフリーカメラの基本的性能を評価した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a simultaneous intermittent tracking method for high-brightness motion-blur-free video shooting. We built a prototype of motion-blur-free camera consisting of a piezo-actuator and a high-speed vision system, and demonstrated the effectiveness of our simultaneous intermittent tracking method that enables wide dynamic-range video shooting of fast-moving objects without decreasing the camera exposure time. In fact, we verified the basic performance of the prototype by showing the quantitative relationships of camera shutter time and frame interval, measurable velocity range to be tracked, and sharpness of captured images when the high-speed vision hardware and high-speed piezo actuator were operated in real time for frame-by-frame intermittent tracking at hundreds of Hertz.

研究分野：計測工学

キーワード：高速ビジョン 対象追跡 画像計測

1. 研究開始当初の背景

高速運動対象を撮影する場合、モーションブラーを抑えるためにシャッター時間を小さくする必要があり、イメージセンサの受光量減少に起因し、高輝度かつ広ダイナミックレンジな画像取得が困難となる。一方で申請者は1000コマ/秒レベルで動作する高速ビジョンの開発実績を持ち、オプティカルフロー等の画像処理アルゴリズムの高速化やビジュアルフィードバック制御による高速対象追跡の実現に成功している。だが対象を画像中心に連続的に位置制御する対象追跡システムでは、シャッター時間を小さくせずにモーションブラーを低減できる反面、カメラ視点が自動制御されるため、市販カメラのように操作者が自由にカメラ視点を変えられない。このような背景から、シャッター開放時のモーションブラーを低減する間欠的瞬時トラッキング法を提案し、カメラの操作性を失うことなく高輝度モーションブラーフリー撮影を実現する新たな高速対象追跡システムの構築を行う本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、高輝度でのモーションブラーフリー撮影を実現する間欠的瞬時トラッキング法を提案する。実際に圧電アクチュエータと高速ビジョンを連動させたモーションブラーフリーカメラのプロトタイプ試作及びその動作確認を通じ、高速運動対象に対してシャッター時間を小さくすることなく広ダイナミックレンジ撮影を可能とした提案手法の有効性を検証する。具体的には、申請者が有する高速ビジョンと高周波数特性を持つ圧電ステージを連動制御させ、追跡可能な速度範囲、カメラのシャッター時間/フレーム間隔比、撮影画像における鮮鋭度などの定量的な関係を明らかにし、間欠的瞬時トラッキングに基づくモーションブラーフリーカメラの基本的性能・仕様評価を行う。

3. 研究の方法

本研究では、モーションブラーフリー撮影を実現する間欠的瞬時トラッキング法を提案し、高速ビジョンを用いたモーションブラーフリーカメラのプロトタイプ試作及びその動作確認を通じ、高速運動対象に対する高輝度撮影を可能とする提案トラッキング法の有効性を検証する。具体的には、以下の項目の研究を行った。

- ① 間欠的瞬時トラッキング法の基本動作原理及びそのために必要とされる実時間画像処理アルゴリズム、アクチュエータ制御アルゴリズムを含めた、間欠的瞬時トラッキング法のアルゴリズム体系の構築
- ② モーションブラーフリーカメラのプロトタイプ試作及び高速運動対象に対する動作試験等を通じた、プロトタイプカメラによるモーションブラーフリー撮影の基本的性能評価

4. 研究成果

① 間欠的瞬時トラッキング法のアルゴリズム体系の構築

最初に、ズームレンズとパン・チルトに高速回転するミラーを用いることを前提とした上でシャッター開放時のモーションブラーを低減する瞬時間歇的トラッキング法の提案を行った。提案コンセプトは、カメラのシャッター開放時には、対象座標系とイメージセンサ座標系の相対速度を零とするように対象と撮像系の位置関係を制御し、モーションブラーとは無関係なシャッター閉鎖時には、対象と撮像系の位置関係をリセットし、常に元の位置に戻るような制御をカメラのフレームサイクル時間に応じて制御目標を切り替えるといったものであり、その概要を図1に示す。

間欠的瞬時トラッキング法では、カメラのシャッター開放時間を τ_o 、閉鎖時間を τ_c とすると、時刻 t のチルトミラーの制御目標 $\theta(t)$ は次のように設定した形でミラー角度を動かすアクチュエータを制御する。

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_0 + \omega(t_s(t))(t - t_s(t)) & (0 \leq t - t_s(t) < \tau_o) \\ \theta_0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

θ_0 はチルトミラーのホーム角度、フレーム周期は $\tau = \tau_o + \tau_c$ に基づき、時刻 t を量子化した時刻を $t_s(t) = [t/\tau]\tau$ とし、時刻 $t_s(t)$ で対象とミラーの相対角速度 $\omega(t_s(t))$ は画像処理により実時間推定されるとした。 $[a]$ は a を超えない最大の整数である。

本研究では、フレーム毎に対象の移動速度に合わせてミラーを制御し、画像内での見かけの速度を零にするための画像処理として、1) 二値化等により画像内で運動対象が抽出可能な状態を前提とした、画像重心位置計算に基づくトラッキング制御、2) 輝度勾配に基づくオプティカルフロー計算によるトラッキング制御を想定した形で、実時間画像処理アルゴリズムの開発も行った。なお②のモーションブラーフリー撮影の動作検証では、モーションブラー低減の基本性能評価に焦点を絞るため、より定量的な評価が可能な1)での実時間動作を行ったことを付記する。

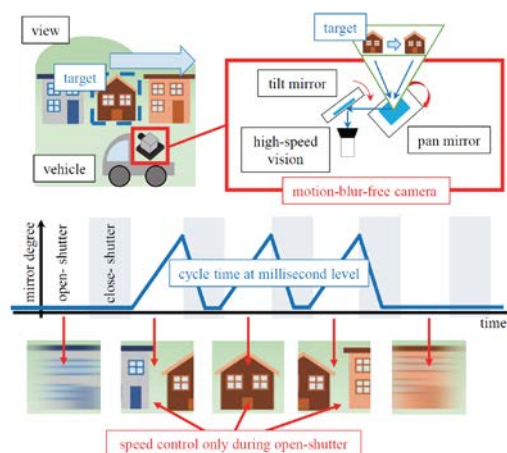


図1 間欠的瞬時トラッキング法

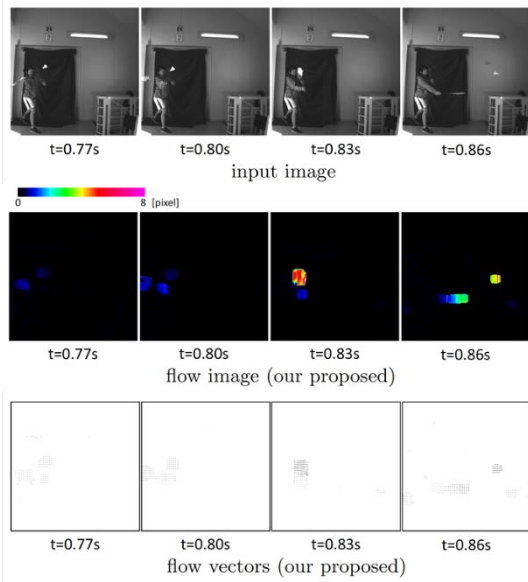


図2 実時間オプティカルフロー推定

特に実時間オプティカルフロー計算法については、輝度勾配計算が局所演算であることに起因し計測ダイナミックレンジが広くない問題を解決するために、輝度勾配の時間/空間差分間隔をフロー速度に対し適応制御することにより、高速対象・低速対象に対しても精度高くフロー計算可能とした改良型 Lucas-Kanade オプティカルフロー法を提案した。また改良アルゴリズムの GPU ベースド高速ビジョンへの並列実装により、 512×512 画像でのフルピクセル実時間オプティカルフロー推定について、時速 100km を超える高速運動対象に対しても実現できることを確認した。図 2 にバドミントンのスマッシュ動作に対する実時間フロー推定結果を示す。

② プロトタイプカメラによるモーションブラーフリー撮影の基本的性能評価

次に提案した間欠的瞬時トラッキング法の有効性を検証するためのプロトタイプカメラを構築した。構築したプロトタイプカメラは、高速ビジョンプラットフォーム IDP-Express、CCTV レンズ (ELICAR, HTZ-8600)、2 台の 1 自由度ピエゾステージ (PT1M36-500S-N、ナノコントロール)、アルミミラー、制御用 PC、D/A ボードから構成される。図 3 に構築したプロトタイプシステムの外観を示す。

使用した 1 自由度ピエゾステージは、アルミミラーを装着した上で可動させるものとし、これらの最大可動範囲は、パン軸 0.173 度、チルト軸 0.171 度、共振周波数は 2500Hz である。ミラーを含めた大きさ、質量はそれぞれ $36 \times 42 \times 29$ mm, 120g であり、大容量ピエゾドライバで増幅された駆動電圧で動作させた。焦点距離 1200mm、径 80 mm のズームレンズを用い、レンズとミラーの距離を 25mm、ミラーと撮影対象までの距離を 4350mm とした。本条件下では 1 画素=0.068mm (= α) である。

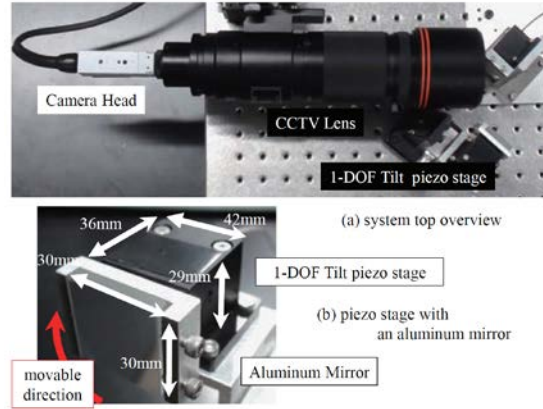


図3 構築したプロトタイプカメラ

入力画像内の対象の見かけの速度は、IDP Express ボードから転送された処理結果を用いて実時間推定され、モーションブラー低減のための制御命令を D/A ボードを介してピエゾステージに出力する。D/A ボードはピエゾステージ駆動電圧 0~150V に対応して、12 ビットの波形データから高速に変換された 0~10.24V のアナログ電圧信号を出力する。

プロトタイプカメラで間欠的瞬時トラッキングを実時間動作させるために制御用 PC にソフトウェア実装した。本研究では、運動対象は画像内の単一対象を観察するものとして、以下のアルゴリズムを実装した。

(1) 二値化: 露光時間 τ_0 、フレーム間隔 τ として、時刻 $t = k\tau$ における濃淡 512×512 入力画像 $I(x, y, t)$ を閾値 θ で二値化した二値画像 $B(x, y, t)$ を取得する。

(2) 重心に基づく速度推定: 時刻 t の画像内対象速度は、時刻 t 及び $t - \tau$ の重心 $c(t) = (M_{10}/M_{00}, M_{01}/M_{00})$ から決定する。

$$v(t) = \alpha(c(t) - c(t - \tau))/\tau$$

M_{00}, M_{10}, M_{01} は $B(x, y, t)$ の 0 次, 1 次モーメント特徴である

(3) 目標軌道の生成: ピエゾステージ制御目標軌道はシャッターが開いている $t = k\tau$ から $k\tau + \tau_0$ の間、画像内における対象速度を打ち消すために $t = (k - 1)\tau$ での推定速度を用いて以下のように生成する。

$$x_d(t) = \begin{cases} v((k-1)\tau)(t - k\tau - \tau_r) + {}^0p_x & (-\tau_r \leq t - k\tau < \tau_0) \\ f(t; x_d(k\tau + \tau_0, {}^0p_x) & (\tau_0 \leq t - k\tau < \tau_b + \tau_0) \\ {}^0p_x & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

0p_x はステージホーム位置、 τ_r, τ_b はビジュアルフィードバックによる追跡制御とホーム位置への制御の継続時間を示す。 $\tau_r = \tau_t - \tau_0$ はピエゾステージの立上り時間を考慮した遅延時間である。 $f(t; x_d(k\tau + \tau_0, {}^0p_x)$ はホーム位置へ戻る制御において大きな加速度を抑える五次多項式軌道関数である。これらの目標軌道に基づく制御はパン・チルト角双方に対して行。図 4 に軌道生成のタイミングチャートを示す。

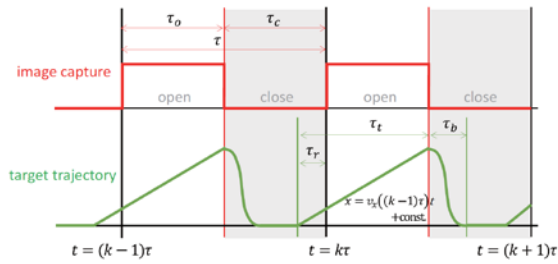


図4 軌道生成のタイミングチャート

(4) ピエゾステージ制御：目標軌道の生成後、D/A ボードは撮像タイミングに同期し、時刻 $t = k\tau - \tau_r$ で制御命令を送信し、増幅された駆動電圧 $V(t) = bx_d(t)$ としてピエゾステージへ送られる。 b は増幅率を指す。

本研究では 512×512 入力画像をフレーム周期 $\tau = 8\text{ms}$ で撮影した。追跡制御とホーム位置へ戻る制御の継続時間は $\tau_t = 4.5\text{ms}$, $\tau_b = 2.0\text{ms}$ であり、 τ_t には $\tau_r = 0.5\text{ms}$ が含まれる。 $\tau_t + \tau_b = 6.5\text{ms}$ の目標軌道は 200kHz の 16 ビットデジタル波形として生成し、 1310 個の 16 ビットデータを 8ms 周期で更新した。

構築したプロトタイプカメラでは、パン軸、チルト軸の最大駆動角はそれぞれ 0.17 度、 0.14 度であり、撮影対象までの距離を 4350mm 、追跡制御時間 $\tau_t = 4.5\text{ms}$ とした場合、対画像内での見かけの対象速度が、水平方向 84 画素/ms、垂直方向 69 画素/ms までは追跡でき、水平、垂直方向の実スケールでの最大追跡速度はそれぞれ 5.7m/s , 4.7m/s である。(1) 二値化と (2) モーメント計算は IDP Express ボードの並列ハードウェア回路に実装し、他の処理ステップはマルチスレッドプロセスとして PC 上でソフトウェア並列実行した。(1), (2) の実行時間合計は 0.108ms 、(3), (4) の実行時間合計は 0.887ms と、総実行時間は 1.01ms と、全処理が 512×512 画像に対し、露光時間 4ms 、 125fps での実時間動作を確認した。

次に、システムから 4350mm 先にある円形ドットパターンを対象として、 $0 \sim 1000\text{mm/s}$ でリニアスライダを使用し定速で一方向に移動させ、対象とモーションブレンダーとの関係性を評価した。円形ドットパターンは直径 4mm の円形ドットが 50mm 間隔に並んだものを用いた。実対象の移動は、プロトタイプカメラが持つ 2 自由度のトラッキング機能を確認するために、(a) 水平方向、(b) 20 度傾いた方向の 2 つについて実験を行った。実験環境を図 5、評価した円形ドットパターンを図 6 に示す。

対象の移動速度が 0mm/s , 250mm/s , 500mm/s , 750mm/s , 1000mm/s の時について、 512×512 入力画像からドットを中心に切り出した画像を図 7 に示す。モーションブレンダーを評価するために、対象速度と図 7 の画像に対しブラー度合いを示す指標 $\Delta\lambda = \lambda_+ - \lambda_-$ の関係を図 8 に示す。 λ_+ , λ_- は円形ドットの楕円近似時の長軸と短軸の長さであり、 $\Delta\lambda$ はブラーが顕著な時は大きく、ブラーがない時は 0 となる。入力画像を閾値 62 で二値化した上で計算された。

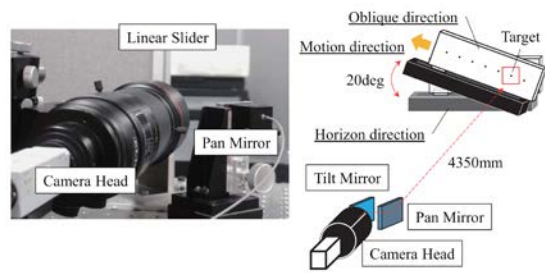


図5 実験環境

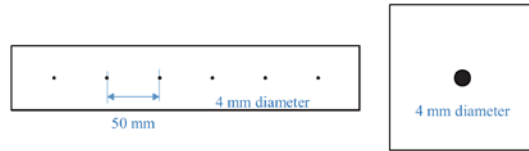


図6 円形ドットパターン

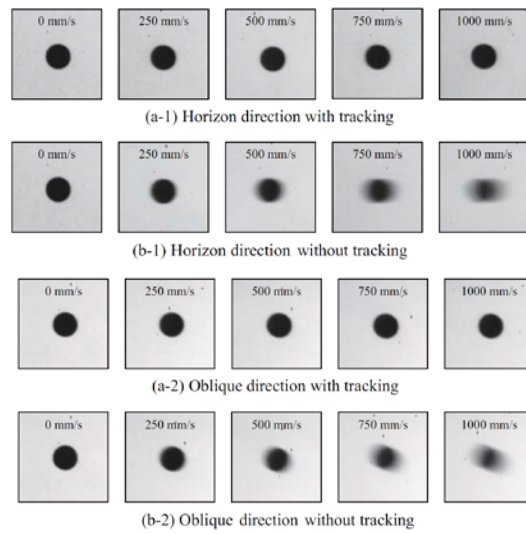


図7 観測された画像（上：水平方向（追跡無/有） 下： 20 度傾いた方向（追跡無/有））

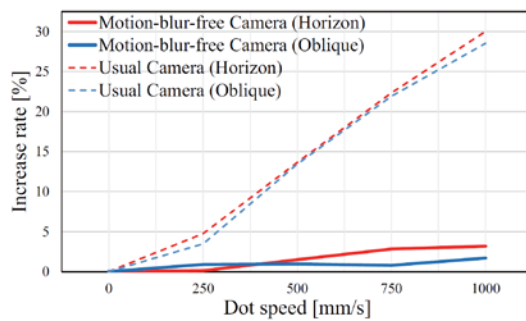
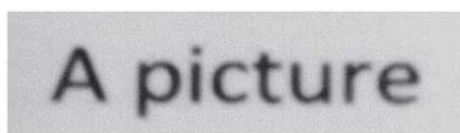
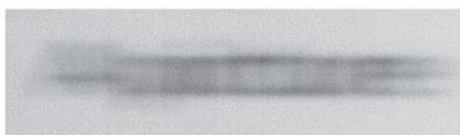


図8 対象速度とブラー度合い

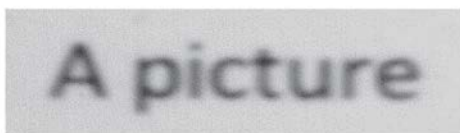
これらの結果から、追跡を行わない場合の入力画像は対象速度が増加するにつれて、対象の移動方向（水平方向または 20 度傾いた方向）にモーションブレンダーが大きく生じたのに対して、追跡を行った場合の画像は対象速度に関係なくモーションブレンダーが低減できていることがわかる。図 8 のブラー度合いからもこれらの傾向は確認され、対象が異なる方向に移動する場合に対しても、間欠的の瞬時トラッキング法ではシャッター時間を小さくせずに



(a) no moving



(b) without tracking



(c) with tracking

図9 文字列を撮影した様子

運動対象のモーションブレンダーが3%以下に抑えられることが確認された。

また紙面に印刷された大きさ 2.5mm の文字をリニアスライダにより 1000mm/s で動作させた撮影実験を行った場合について、追跡を行った場合、追跡を行わなかった場合の入力画像を図9に示す。これらの結果から、間欠的瞬時トラッキングを行うことにより、ブレンダーが低減され文字が明瞭に撮影できていることが確認できた。

試作したモーションブレンダーフリーカメラのプロトタイプを用いた動作試験等におけるモーションブレンダーフリー撮影の定量的評価結果から、本研究で提案する間欠的瞬時トラッキング法が、シャッター時間を小さくせずに撮影することが可能とすることが明確となった。

一方でより高速な運動対象に対する高フレームレート撮影においてモーションブレンダーフリー撮影を行うためには、以下に挙げる問題点がわかってきており、これらの問題を解決する新たな手法・システムの提案が今後の課題として挙げられる。

(1) 可動範囲の限界

ピエゾアクチュエータで代表される高速アクチュエータは、一般に周波数特性と可動範囲にトレードオフ関係があり、高周波数での繰り返し動作の振幅が小さくなる。アクチュエータ可動範囲の限界は、瞬時間歇的トラッキングにおいて対象速度範囲とともに露光時間にも制限を与え、特に大きな露光時間によるモーションブレンダーフリー撮影を難しくする。

(2) リップルを伴う非直線性

間欠的瞬時トラッキングでは、前フレームまでに推定された対象速度に基づき、計測対象とカメラの相対速度を0にするために、傾きを対象速度とした直線的な視線移動をフレーム毎に行う必要があり、ミリ秒オーダーあるいはそれ以下といった、アクチュエータの減衰時間に比べ小さな露光時間でのアクチュエータ線形駆動性が要求される。高速アクチ

ュエータの多くは摩擦力で代表される粘性成分を抑え、減衰率を小さくすることにより、高速駆動を実現する一方で、共振が発生した場合、減衰に時間を要し、減衰時間に比べ小さなフレーム間隔の間歇的駆動による共振の影響により、露光時間中のアクチュエータ動作に共振に伴うリップルが残る問題がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Q. Gu, S. Raut, K. Okumura, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii, Real-Time Image Mosaicing System Using a High-Frame-Rate Video Sequence, J Robot Mechat, Vol.27, No.1, pp.12-23 (2015) (査読有)
- ② J. Chen, Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii, Blink-Spot Projection Method for Fast Three-Dimensional Shape Measurement, J Robot Mechat, Vol.27, No.4, pp.430-443 (2015) (査読有)
- ③ Q. Gu, A. Al Noman, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii, A High-Frame-Rate Vision System with Automatic Exposure Control, IEICE Trans Info Sys, Vol.E97-D, No.4, pp.936-950 (2014) (査読有)
- ④ 石井抱: 高速ビジョンのダイナミックセンシング応用, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.9, pp.793-797 (2014) (査読無)

[学会発表] (計9件)

- ① M. Inoue, Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii, An Intermittent Frame-by-frame Tracking Camera for Motion-blur-free Video Shooting, IEEE/SICE Int Symp Sys Integrat (Nagoya, 2015.12.13)
- ② T. Ueno, Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii, T. Kawahara, Motion-blur-free Microscopic Video Shooting, IEEE Conf Automat Sci Eng (Guthenburg, Sweden, 2015.8.26)
- ③ Q. Gu, N. Nakamura, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii, A Full-pixel Optical Flow System using a GPU-based High-frame-rate Vision, 2015 Conf Advances in Robotics (Goa, India, 2015.6.26)
- ④ 趙仕偉, 中村尚喜, 顧慶毅, 青山忠義, 高木健, 石井抱, 時速100Kmの運動対象を計測する実時間オプティカルフローシステム, ROBOMECH2015 (京都, 2015.5.19)
- ⑤ 井上満晶, 顧慶毅, 青山忠義, 高木健, 石井抱, モーションブレンダーフリー撮影のための間歇的瞬時トラッキングカメラ, ROBOMECH2015 (京都, 2015.5.19)

- ⑥ 上野貴弘, 顧慶毅, 青山忠義, 高木健, 石井抱, 川原知洋, 高速トラッキングに基づくモーシヨンプラフリー顕微鏡, 第20回ロボティクスシンポジア (軽井沢, 2015.3.15)
- ⑦ Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii, Rapid Vision-based Shape and Motion Analysis System for Fast-flowing Cells in a Microchannel, 2014 IEEE Int Conf Robot Automat (Hong Kong, 2014.6.4)
- ⑧ I. Ishii, Real-Time Optical Flow Estimation Using High-Frame-Rate Videos, SIAM Conf Img Sci (Hong Kong, 2014.5.13)
- ⑨ 上野貴弘, 顧慶毅, 青山忠義, 高木健, 石井抱, 瞬時間歇的トラッキングによるモーシヨンプラフリー撮影, ROBOMECH 2014 (富山, 2014.5.26)

[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) 研究代表者

石井 抱 (ISHII IDAKU)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究室番号: 40282686

(2) 研究分担者

高木 健 (TAKAKI TAKESHI)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究室番号: 80452605

青山 忠義 (AOYAMA TADAYOSHI)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究室番号: 00569337

顧 慶毅 (GU QINGYI)
広島大学・大学院工学研究院・特任准教授
研究室番号: 30713979

(3) 連携研究者

特になし