

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2016

課題番号：16K14276

研究課題名（和文）デュアル可変レート高速ビジョンを用いた周波数ロックイン振動トラッキング

研究課題名（英文）Frequency Lock-in Vibration Tracking Using Dual Variable-frame-rate High-speed Visions

研究代表者

石井 抱 (Ishii, Idaku)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号：40282686

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、デュアル可変レート高速ビジョンを用いた画素レベル振動源定位により、音声周波数レベルの振動対象を実時間検出する周波数ロックイン振動トラッキング法を提案し、デュアルカメラ入力フレームレートや視線方向の実時間フィードバック制御を可能とした振動トラッキングカメラ試作及び実時間ドローン定位・トラッキング実験を通じて、これまでにない高精度な光学的振動源定位を可能とする提案手法の有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a novel pixel-level vibration source localization method using a high-speed vision system with dual variable-frame-rate high-speed cameras, and developed a vibration-object tracking camera that enables the frame rates of dual camera inputs and its gaze direction with real-time high-speed visual feedback. The effectiveness of our novel concept for vision-based vibration source localization is verified by showing experimental results for real-time multicopter localization and tracking in several scenarios.

研究分野：高速ビジョン

キーワード：センシング情報処理 高速ビジョン トラッキング 振動源定位 周波数ロックイン

1. 研究開始当初の背景

ドローン技術の高度化に伴い、誰もがドローンを使える利便性が増し、ドローンによる「空の産業革命」が期待される一方で、暴走・墜落事故や反社会的使用が社会問題として不安視され、ドローン監視技術が求められている。Drone Lab 社の音響信号による監視システム等があるが、音響センサの低空間指向性に依存し、定位精度はドローン接近時に警告する程度である。申請者は高速ビジョンを用いた音声周波数レベルの振動ダイナミクス計測の研究を進める中で、画素毎にデジタルフィルタを実装した高速ビジョンにより、数十 Hz 振動領域の実時間定位・追跡を可能とした。一方で検出可能な振動周波数はフレームレートに依存し、高周波数の振動源定位に限界があったため、振動周波数にロックインする形でフレームレートを制御する可変レート高速ビジョンを用いた振動トラッキングカメラにより、フレームレートを上回る高周波数帯域での実時間振動源定位を実現する本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、振動周波数にフレームレートがロックイン可能な可変レート高速ビジョンに基づき、音響信号と同レベルの周波数解析を画素毎に行うダイナミック画像処理により、画像センサの高い空間指向性を生かした画素レベル振動源定位を実現する実時間振動トラッキング法を提案し、背景等の直流成分と振動周波数が重複しないようにフレームレートを制御した上で、異なるフレームレートでの振動周波数解析を統合することにより、フレームレート整数倍の不定性や折返し雑音の影響を抑制した形で、ナイキスト周波数を超えた高周波数帯域の実時間振動源定位を可能とする。また可変レート高速ビジョンに基づく振動トラッキングカメラのプロトタイプ試作を行い、数十～数百 Hz の回転を伴うプロペラを振動対象とした実時間ドローン定位・トラッキング実験を通じ、高い空間指向性による光学的振動源定位を可能とした提案手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、デュアル可変レート高速ビジョンを用いた画素レベル振動源定位により、音声周波数レベルの振動対象を実時間検出する周波数ロックイン振動トラッキング法を提案し、振動トラッキングカメラ試作及び実時間ドローン定位・トラッキング実験を通じ、高精度な光学的振動源定位を可能とする提案手法の有効性を検証した。具体的には、研究期間内に以下の研究項目を行った。

- ① デュアル可変レート高速ビジョンシステムの開発、及びカメラ入力のフレームレートや視線方向の実時間フィードバック制御を可能とした振動源トラッキングカメラの開発

- ② 可変レート/異なるレートのデュアルカメラ入力により、レート整数倍の不定性や折返し雑音を抑制した、ナイキスト周波数を超えた高周波数帯域の画素レベル振動源定位法の提案

- ③ 室内/遠隔距離でのプロペラの高速回転により飛翔するドローンに対する実時間定位・追跡実験及び試作した振動トラッキングカメラの最終評価

4. 研究成果

- ① デュアル可変レート高速ビジョン及び振動源トラッキングカメラの開発

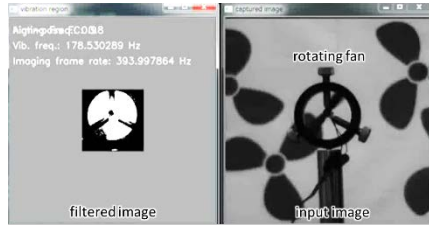
異なるフレームレートで動作する 2 つのカメラ入力に対し、高フレームレートでの実時間画像処理を可能とするデュアル可変レート高速ビジョンシステムを開発した。高速雲台にデュアル可変レート高速ビジョンを搭載した振動トラッキングカメラの外観を図 1 に示す。本システムは、8 ビット 648×488 濃淡画像を 500fps で取得する CMOS カメラ (XIMEA, MQ003MGCM) をカメラヘッドとし、これらのカメラヘッドのレートは、ファンクションジェネレータ (Tekronix, AFG1000) からのトリガ信号により制御され、カメラの画像は USB3.0 を介し画像処理やレート制御を行う PC (ASUSTek SABERTOOTHx79 mother board, Intel® Core™ i7-4280K CPU@3.70GHz, 8GB memory) に転送される。2 台のカメラヘッドは、PC からのファンクションジェネレータへの指令値により、最大 500fps までの可変レート動作を独立制御可能であり、実際に高フレームレート撮影機能を確認している。

次に画像内の輝度変動に対応する形でのフレームレートのビジュアルフィードバック制御機能を確認するために、輝度変動のピーク周波数 f_p を検出する画像処理として、画像中心付近の 400×400 画像に対するエッジ強度を計算し、画像内の総和値 128 フレームに対する FFT 計算する処理を PC 上に実装した。128 フレームは 500fps 動作時では 0.256 秒間のデータに対応する一方で、カメラの可変レートに対応してデータに対応した時間の長さが変動する。これらの処理時間は、PC 上でのマルチスレッド処理により、カメラ 1 台の場合 1.2ms、カメラ 2 台の場合 1.3ms で動作可能であり、カメラヘッドの最大レートである 500fps 動作時でも実時間実行可能である。なお FFT 計算ではフレーム間隔の変動により周波数スケールが変動するが、本研究では FFT 計算に用いるデータのフレーム間隔は一定とし、そのフレーム間隔に基づき周波数スケールを決定した。40000rpm まで回転数が変動する直径 4cm の 2 枚羽根の回転ファン (図 2a) を撮影し、カメラレートを f として、検出されたピーク周波数 f_p を、ナイキスト周波数 $f_N = f/2$ として、その 0.9 倍 ($f_p = 0.9f_N$) になるようにカメラレートを制御させた場合、制御されたカメラレートの時間変動を図 2b に示す。これらのビジュアルフィードバック実験から、

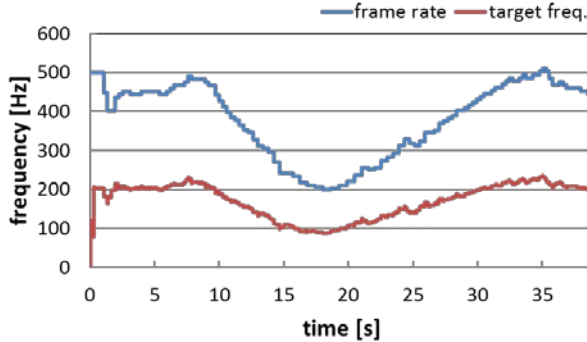
ファンの羽根数に対応した回転数の2倍となるピーク周波数を検出し、100rpsから200rpsといった回転数の変動に追従する形で、カメラのレートが200fpsから500fpsの間で可変制御されることを確認した。



図1 振動トラッキングカメラの外観



(a) 入力画像とフィルタ画像



(b) 回転周波数とフレームレート

図2 ビジュアルフィードバック制御されたカメラレートの時間変化

② 可変レート/デュアルカメラ入力を用いた画素レベル振動源定位法の提案

次に音声周波数レベルの輝度信号の時間周波数応答に対してカメラレートが制御された可変レート/デュアルカメラ入力を用いた画素レベル振動源定位法を提案した。提案方法は、図3に示すように、A) 輝度信号での振動ピーク周波数検出に基づくカメラ可変レート制御、B) デュアルカメラ入力に対する画素レベルデジタルフィルタ、C) デュアルカメラのフィルタ結果を組み合わせた振動源定位から構成される。

A) 輝度信号での振動ピーク周波数検出に基づくカメラ可変レート制御

A-1) エッジ強度画像の総和計算

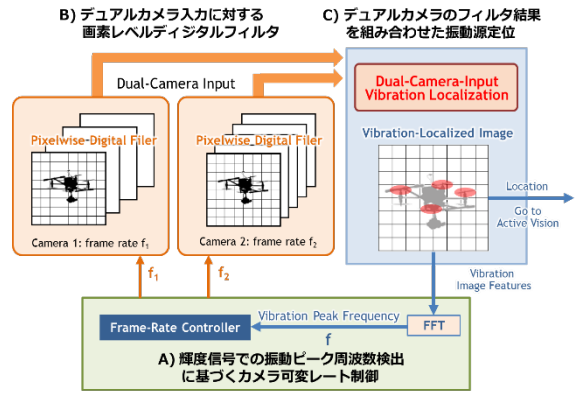


図3 提案する画素レベル振動源定位法

A-2) FFTを用いたピーク周波数検出

A-3) ピーク周波数に基づくレート制御

(A-1~A-3は4①でも記述済なので説明略)

デュアルカメラ入力画像 $I_i(x, y, t_i)$ ($i = 1, 2$)は、画像入力を通じて検出されたピーク周波数 f_p に基づき、それぞれのフレームレート $F_i(f_p) = 1/\delta t_i$ ($i = 1, 2$)が決定されるものとする。

B) デュアルカメラ入力に対する画素レベルデジタルフィルタ

B-1) 画素レベルのデジタルフィルタ

入力画像 $I_i(x, y, t_i)$ ($i = 1, 2$)は、中心周波数 f_i^0 の以下のIIRバンドパスフィルタを全画素の輝度信号に対して適用する。

$$g_i(x, y, t_i) = \sum_{s=0}^{p-1} b_s I_i(x, y, t_i - s\delta t_i) - \sum_{s=1}^{p-1} a_s g_i(x, y, t_i - s\delta t_i)$$

p はフィルタの次数、 a_s, b_s はタップ数であり、追跡対象の振動特性に基づきターゲット中心周波数とバンド幅が決定される。

B-2) フィルタリング後の画像強度移動平均

間隔 ΔT_i でのフィルタ画像の輝度平均と入力画像の輝度平均は次のように計算される。

$$G_i(x, y, t_i) = \frac{1}{\Delta T_i} \int_{t-\Delta T_i}^t |g_i(x, y, t_i)| dt_i$$

$$K_i(x, y, t_i) = \frac{1}{\Delta T_i} \int_{t-\Delta T_i}^t I(x, y, t_i) dt_i$$

ΔT_i は点滅のない振動領域を抽出するため、 $T_i^0 = 1/f_i^0$ の数倍の値に設定する。

B-3) 振動領域の抽出

$G_i(x, y, t_i)$ と $K_i(x, y, t_i)$ の比率が大きく、一定以上の輝度平均値を持つ領域を、閾値 θ_1, θ_2 により、振動領域 $V_i(x, y, t_i)$ として検出する。

$$V_i(x, y, t_i) = \begin{cases} 1 & \left(K_i(x, y, t_i) < \theta_1 \text{ and } \frac{G_i(x, y, t_i)}{K_i(x, y, t_i)} < \theta_2 \right) \\ 0 & \text{(otherwise)} \end{cases}$$

B-4) 1周期の特徴量抽出

1周期における輝度値の最大値と最小値の差が一定値 θ_3 以上の画素を抽出する。

$$D_i(x, y, t_i) = \begin{cases} 1 & (H_i^{max}(x, y, t_i) - H_i^{min}(x, y, t_i) > \theta_3) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

ここで $H_i^{max}(x, y, t_i)$, $H_i^{min}(x, y, t_i)$ は、振動周期 T_{0i} により以下のように定義される。

$$H_i^{max}(x, y, t_i) = \max\{I_i(x, y, t), t_i - T_i^0 \leq t' < t_i\}$$

$$H_i^{min}(x, y, t_i) = \min\{I_i(x, y, t), t_i - T_i^0 \leq t' < t_i\}$$

B-5) 1周期の特徴量によるマスキング

デジタルフィルタにおける遅延の影響を軽減するために、振動領域 $V_i(x, y, t_i)$ に対して $D_i(x, y, t_i)$ により、マスキングする。

$$F_i(x, y, t_i) = V_i(x, y, t_i) \cap D_i(x, y, t_i)$$

C) デュアルカメラのフィルタ結果を組み合わせた振動源定位

C-1) デュアルカメラ処理結果の論理積画像

フレームレート整数倍の不定性や折返し雑音の影響の抑制を目的とし、2つのカメラ入力に対して抽出された振動領域 $F_1(x, y, t_1)$ と $F_2(x, y, t_2)$ の論理積画像を最終的に検出された振動領域とする。

$$J(x, y, t) = F_1(x, y, t_1(t)) \cap F_2(x, y, t_2(t))$$

$t_i(t)$ はカメラ $i(=1,2)$ のサンプリング時刻の中で、時刻 t に一番近い時刻を指す。

C-2) 重心位置計算に基づく振動源定位

振動源位置を特定するために、 $J(x, y, t)$ の0次、1次モーメント特徴量 $M_0(t)$, $M_x(t)$, $M_y(t)$ から重心位置 $(c_x(t), c_y(t))$ を算出する。

$$(c_x(t), c_y(t)) = (M_x(t)/M_0(t), M_y(t)/M_0(t))$$

$$M_0(t) = \sum_{x,y} J(x, y, t)$$

$$M_x(t) = \sum_{x,y} xJ(x, y, t), M_y(t) = \sum_{x,y} yJ(x, y, t)$$

本研究では、A)からC)の処理を最高500fpsで、4①で仕様記述したPC上で実時間実行するために、画像中心を基準とし、A)のエッジ強度計算は 400×400 領域、B)及びC)の振動源定位は 128×128 領域の輝度値に対し、検出されたピーク周波数に基づき決定した中心周波数による4次バターワースのバンドパスフィルタを施した。アクティブビジョンを用いたトラッキング制御では、振動源に対応した重心位置が画像の中心となるようにパン・チルト角を制御するものとした。上記仕様で振動源定位アルゴリズムを実装した場合、500フレーム処理するために必要な実行時間は、1)単一カメラ可変レート動作 1.2ms(A:1.2ms, B&C: 0.9ms, 5スレッド並列動作)、2)デュアルカメラ可変レート動作 1.4ms(A:1.3ms, B&C: 1.4ms, 10スレッド並列動作)となり、いずれの場合も500fpsでの実時間処理に必要な2ms以下での実装を確認した。なお処理時間はカメラレートに比例し、500fpsよりも低いレートの可変レート動作時では処理負荷が軽減することを付記する。

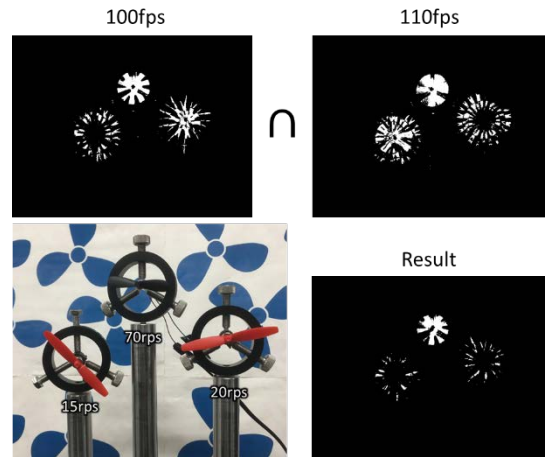


図3 デュアルカメラ入力時における振動源定位の様子

可変レート動作の妥当性は、エッジ強度の時間変化におけるピーク周波数に基づく可変レート制御及び可変レート制御された画像に対するデジタルフィルタによる振動源定位機能は、4.①の図2のような、単一カメラを用いて回転ファンを観測した場合の実時間動作を通して確認している。

デュアルカメラ入力の有効性は、カメラレートをそれぞれ100fps, 110fpsと設定した場合の振動源定位機能について、オフライン撮影画像を用いて確認した。図3に撮影した3つの2枚羽回転ファン(15rps, 20rps, 70rps)振動源定位画像例(100fpsのみ、110fpsのみ、両方)を示す。なお100fps画像、110fps画像に対するバンドパスフィルタの中心周波数はそれぞれ40Hz, 30Hzと設定した(バンド幅は4Hz)。ここではナイキスト周波数を超える周波数帯域を想定したアンダーサンプリングを想定しており、折り返し周波数や整数倍の周波数を考慮すると、これらのフィルタは、それぞれ、40, 60, 140, 160Hz, ... (100fps画像)、30, 80, 140, 190Hz, ... (110fps画像)を検出するフィルタとなっている。図3の結果から、撮影カメラのフレームレートを上回る振動周波数を持つ振動源に対し定位が実現され、各フィルタが検出する30Hz(15rps), 40Hz(20rps)の異なる振動源の影響を、デュアルカメラ入力を用いることにより、抑制できることがわかる。完全にこれらの影響を消せていない理由は、カメラ毎に振動領域検出の閾値処理を行ってから、デュアルカメラ入力の合成処理を行ったためであり、より高精度な振動源定位に向け、これらに関するアルゴリズム改良を今後行う必要があることを付記する。

③ ドローンに対する実時間定位・追跡実験

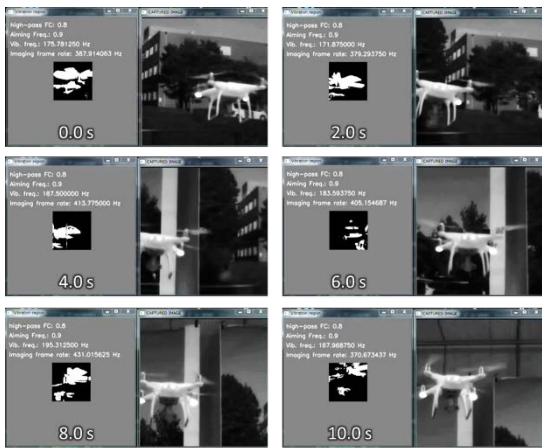
次に振動トラッキングカメラを用いて、数十Hzの回転を伴うプロペラを持つマルチコプターに対する実時間ドローン定位・トラッキング実験を行った。アクティブビジョンを用いた追跡実験の結果について図4に示す。



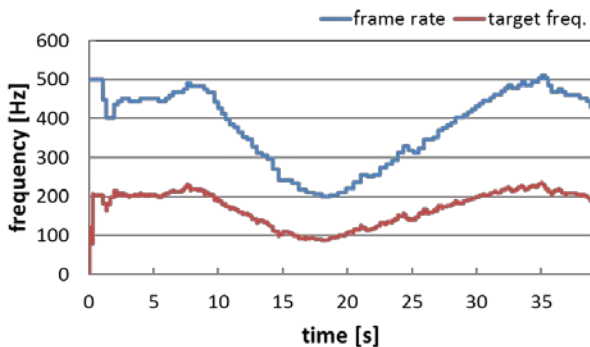
(a) アクティブビジョン追跡実験の様子



(b) 実験に用いたシーン



(c) 追跡画像及び振動源画像

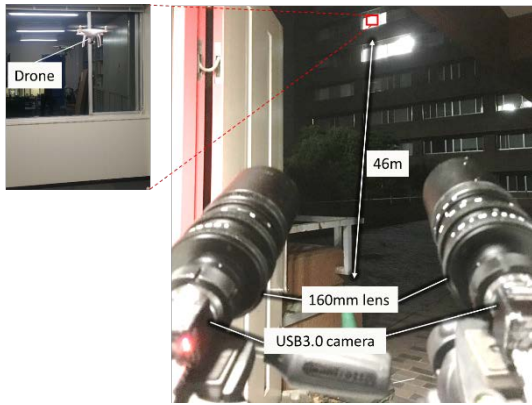


(d) カメラレートの時間変動

図4 アクティブビジョンによるドローン追跡

この実験では、24cmの2枚羽プロペラが4組搭載された、寸法29×29×19.5cmのマルチコプター(DJI, Phantom 3)に対し、単一カメラ入力に対する可変レート制御による振動源定位により、カメラ視野中心に維持するようにアクティブビジョンのパン・チルト角制御を行った。マルチコプターは、図4aで示す室内環境において、スクリーン印刷した屋外写真を背景として、トラッキングカメラから4m前後の距離で上下左右方向に飛翔する。プロペラ回転数は90rps前後を中心に変動しており、飛翔状態に応じて変動した。図4bに通常カメラで撮影した10秒間の飛翔シーン、図4cに図4bのシーンに対する128×128振動領域(左側)及び追跡された512×512入力画像を示す。マルチコプター移動時もプロペラを振動源として検出し、プロペラが画像中心に制御されることがわかる。マルチコプター機体自体が画像中心にない理由は、プロペラの大きさが振動検出を行う128×128領域と同程度であり、一部のプロペラのみが振動源として検出されるためである。図4dにアクティブビジョンのカメラレートの時間変化を示す。プロペラ回転数の2倍に相当する100~230Hz前後の輝度値の時間変動に対応する形で、ナイキスト周波数の0.9倍となるように220~500fps前後でカメラレートが制御されていることがわかる。カメラレートに局所的な変動が多数発生したが、振動領域として検出されるプロペラが常に同じものではなく、かつ飛翔状態に応じてそれぞれのプロペラが異なる回転数を持つことに起因する。

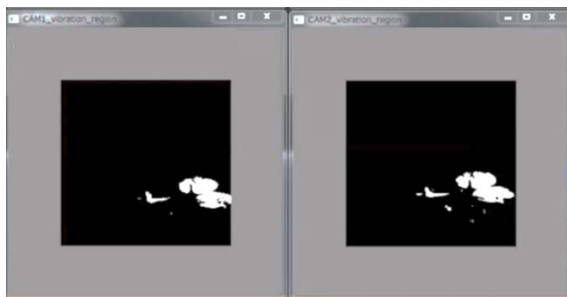
次にデュアルカメラ入力に基づく振動源定位により、トラッキングカメラから空を見上げる形で、46m離れた位置の室内をホバリング飛翔するマルチコプター(DJI, Phantom 3)を実時間追跡する実験を実施した。実験結果を図5に示す。実験では、取得画像を400×400画像、振動源検出画像を250×250画像、カメラレートをカメラ1について120fps、カメラ2について140fpsと設定し、アクティブビジョンによる追跡制御は行わずに、望遠レンズ($f=160\text{mm}$)を用いた実時間振動源定位を行った。なおプロペラ回転数は90rps前後でほぼ安定している状態であり、カメラ1に50Hz以上の帯域とするハイパスフィルタ、カメラ2に30~50Hzを帯域としたバンドパスフィルタを設定した。カメラレート固定(120fps及び140fps)時では、画像取得が1.51ms、振動源定位が5.89msで実行され、実時間振動源定位が実現されている。図5bにカメラ1、カメラ2の撮影画像例、図5cに各カメラで検出された振動領域例、図5dに最終的な振動定位画像及び8秒間のマルチコプター位置の軌跡を示す。およそ50mといった離れた位置からの遠隔撮影により、カメラレートを上回る周波数を持つ振動源であるプロペラをターゲットとした実時間ドローン定位が実現できることがわかる。



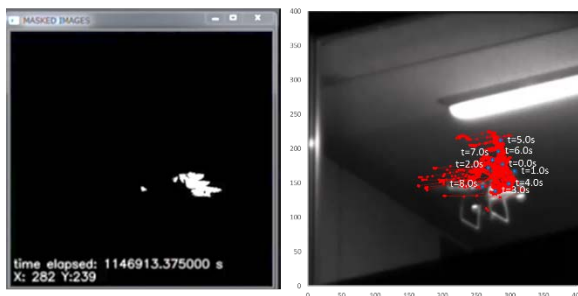
(a) 遠隔ドローン定位実験の様子



(b) 撮影画像例(右:カメラ1、左:カメラ2)



(c) 振動定位画像例
(右:カメラ1、左カメラ2)



(d) 最終的に定位された画像例(右)
8秒間の振動源位置の軌跡(左)

図5 遠隔位置で飛翔ドローンの追跡

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2件)

- ① M. Jiang, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii, Pixel-Level and Robust Vibration Source Sensing in High-Frame-Rate Video Analysis, *Sensors*, Vol. 16, No. 11, 査読有, 2016, 1842; doi:10.3390/s16111842
- ② M. Jiang, Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii, Real-Time Vibration Source Tracking using High-Speed Vision, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 5, 査読有, 2017, pp. 1513-1527; doi:10.1109/JSEN.2016.2647690

[学会発表] (計2件)

- ① M. Jiang, T. Aoyama, T. Takaki, I. Ishii, Vibration Source Localization for Motion-Blurred High-Frame-Rate Videos, *IEEE Conference on Robotics and Biomimetics (青島(中国))*, 2016. 12. 4)
- ② 姜明俊, 青山忠義, 高木健, 石井抱, 高速ビジョンを用いたドローントラッキング, *ROBOMECH2016 (幕張メッセ(千葉))*, 2016. 6. 10)

[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

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

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

(3) 連携研究者

特になし

(4) 研究協力者

特になし