間欠的高速トラッキングに基づく顕微鏡下での モーションブラーフリー撮影

上野 貴弘^{*1} 青山 忠義^{*1} 顧 慶毅^{*1}
高木 健^{*1} 石井 抱^{*1} 川原 知洋^{*2}

Motion-blur-free Video Recording under Microscope using High-speed Intermittent Tracking

Takahiro Ueno^{*1}, Tadayoshi Aoyama^{*1}, Qingyi Gu^{*1},
Takeshi Takaki^{*1}, Idaku Ishii^{*1} and Tomohiro Kawahara^{*2}

In this paper, we propose a novel method for frame-by-frame intermittent tracking to facilitate motion-blur-free video and resolve the tradeoff between brightness and motion blur when shooting moving objects by vision sensor. With the proposed method, vision-based tracking is performed when the shutter is open, and back-to-home control is performed when it is closed. This process occurs at dozens or hundreds of frames per second. We develop a prototype motion-blur-free microscope by implementing our frame-by-frame intermittent tracking method on a piezo-actuator-based microscopic tracking system, accelerated by a high-speed vision platform. Our motion-blur-free microscope can capture non-blurred 512×512 images at 125 fps with frame-by-frame intermittent tracking and its performance is verified by showing the experimental results from several moving scenes in microscopic view.

Key Words: High-speed Vision, Target Tracking, Microscopic Observation, Motion Deblurring

1. はじめに

近年の Lab on Chip (LOC) 技術 [1] の発展とともに、マイクロ流路を用いた μ -TAS が顕微鏡下での細胞検査・ソーティングなど様々な応用場面で使用されている。このような LOC 技術に基づく細胞検査・ソーティングの性能を向上させるためには、高解像度の細胞形状情報が得られる画像処理ベースのマイクロ流路に流れる細胞の瞬時解析が重要となる。特に顕微鏡下では対物レンズの倍率に応じて画像内での対象の見かけの速度が大きくなり、ハイスループットな検査を実現するために細胞の搬送速度を高速にすると、モーションブラーが大きく発生し、静止した細胞の観察時に比べて、詳細な形状認識が困難となる。特に撮影対象の運動が不規則である場合や撮影対象が変形する場合、モーションブラーを抑えるためには露光時間を小さくする必要があるが、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。特に高

倍率観察では、見かけの速度が大きくなると同時に受光量が減少するため、輝度とモーションブラーのトレードオフの関係はより深刻となる。

そこで本研究では、顕微鏡下において撮影対象が不規則に高速運動する場合や撮影対象に変形が伴う場合においても高輝度かつ画像ぶれの少ない画像取得をする手段として、撮影フレームごとに間欠的に観察対象を追跡することでモーションブラーを低減する瞬間欠的トラッキング法を提案する。本手法では、シャッター解放時に画像処理ベースの対象追跡によるカメラ視点位置の制御が行われ、シャッター閉鎖時にカメラ視点位置をホームポジションへ戻すプロセスが数 10～数 100 コマ/秒で行われる。提案手法によるモーションブラーフリー撮影検証のため、ピエゾアクチュエータ、高速ビジョンプラットフォームから構成される高速トラッキングシステムに対して提案する瞬間欠的トラッキング法を実装したモーションブラーフリー顕微鏡を試作する。試作したモーションブラーフリー顕微鏡を用いた高速移動対象の撮影実験により高輝度なモーションブラー画像を取得し、提案手法の有効性を検証する。

2. 瞬間欠的トラッキング法

2.1 従来研究

カメラの手ぶれや撮影シーン内の動きによるモーションブラーがある入力画像からぼけのない鮮鋭な画像を復元するモーシ

原稿受付 2015 年 8 月 6 日

^{*1}広島大学大学院工学研究科システムサイバネティクス専攻

^{*2}九州工業大学大学院生命体工学研究科生体機能応用工学専攻

^{*1}Department of System Cybernetics, Hiroshima University

^{*2}Department of Biological Functions Engineering, Kyushu Institute of Technology

■ 本論文は提案性 (システム設計・構築分野) で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

ンプラー除去の研究は、画像処理の分野で古くから行われている [2] [3]。これらの多くは、モーションブラーを表すぼけカーネル関数を推定し、そのカーネル関数に基づくデコンボリューションによりモーションブラー除去を行うものであり、パラメトリックモデルを導入したぼけカーネル関数による単一画像からのモーションブラー除去 [4]~[6]、複数カメラを用いたモーションブラー除去 [7]~[9] など様々な方法が提案されている。ジャイロセンサと加速度センサを用いて、露光中のカメラの振動や動作を直接計測し、モーションブラー除去を行う手法 [10] やシステムのダイナミクスや入力指令を用いて点拡がり関数を計算することにより、ロボットビジョンの幾何学的配置からモーションブラー除去する手法 [11] のように、カメラの動作を推定することでモーションブラーを除去した研究もある。これらの研究は、入力画像にモーションブラーがあることを前提とするソフトウェア的アプローチであり、撮影時における入力画像自体からモーションブラーを低減しない点で画質改善には限界がある。

一方で光学系を機械的に動かすことにより手ぶれ補正するデジタルカメラが数多く開発され、浮動レンズ要素を動かすことにより、光線パスを動かすレンズシフト方式 [12] [13] や、イメージセンサを動かすセンサシフト方式 [14] 等を導入した市販カメラが実用化されている。これらは、振動ジャイロセンサ等により計測されたカメラの動きに基づいた、光線パスやイメージセンサ位置の制御により補正を行っている。しかし顕微鏡観察ではカメラは顕微鏡に固定されており、内部センサでは画像内の対象の動きを検出できず運動対象撮影に適さない。

近年 1,000 コマ/秒レベルで動作する高速ビジョン [15] [16] が開発され、オプティカルフロー [17] や顔追跡 [18] などのビジュアルフィードバック制御による対象追跡アルゴリズムが高速化され、その有用性はロボット制御 [19]、飛行物体追跡 [20]、微生物追跡 [21] などにより確認されている。このような高速対象追跡システムは対象を画像中心に制御することで、シャッタ時間を小さくせずにモーションブラーを低減できる。しかし対象の動きに合わせてカメラ視点が自動制御されるため、追跡中や顕微鏡観察のようにカメラが固定された場合は自由に視点を変更できない。

顕微鏡撮影時のモーションブラー低減を試みた研究もいくつか報告されており、Ishikawa らはカメラを固定することのない「Mobile microscope」のコンセプトに基づき、観察対象と観察対象の置かれたステージとの相対位置を一定に保つようにステージ位置をビジュアルフィードバック制御することによる顕微鏡観察時の画像安定化手法を提案している [22]。Lee らは顕微鏡に固定されたカメラに対して、観察対象の二次元平面内の運動を相殺するように対物レンズを高速にビジュアルフィードバック制御することで画像安定化を実現している [23]。さらに、対物レンズの動作を三次元に拡張し、観察対象の三次元運動を相殺する画像安定化も実現している [24]。これらの顕微鏡下での画像安定化手法は、従来のビジュアルサーボイング技術 [25] [26] に基づいたものであり、観察対象の動作を相殺するようにカメラ視点が制御され、従来の高速追跡システムと同様、対象追跡中に自由にカメラ視点を変更することはできない。

Fig. 1 Concept of the frame-by-frame intermittent tracking method

Fig. 2 Control framework of the frame-by-frame intermittent tracking method

2.2 提案するコンセプト

提案する瞬間欠的トラッキング法は、カメラのシャッタ状態に応じた「ビジュアルフィードバック制御に基づく対象追跡制御」と「カメラがホーム位置へ戻る制御」の切り替えを機械的にカメラのイメージセンサへの光線パスを高速に変更することにより実現し、運動対象の撮影時の輝度とモーションブラーのトレードオフを解決する手法である。イメージセンサが入射光を受光しているシャッタ開放時は、対象座標系とイメージセンサ座標系の相対速度を 0 となるように対象と撮像系の位置関係を制御することにより、モーションブラーを低減する。光がイメージセンサへ入射しないシャッタ閉鎖時は、撮像系の光線パスを決められたホーム位置にリセットする制御を行うことにより、アクティブビジョンの稼働範囲を超えないようにする。Fig. 1 に瞬間欠的トラッキング法によるモーションブラーフリー撮影の概要を示し、Fig. 2 に瞬間欠的トラッキング制御のフレームワークを示す。

従来のビジュアルフィードバック制御によるモーションブラー低減法と比較し、提案する瞬間欠的トラッキング法は、フレーム単位の追跡制御により固定視点観察でも自由にカメラの視点を自由に変更できる「自由視点観察」において利点がある。瞬間欠的トラッキング法では、シャッタの開放状態に応じた時刻 t のイメージセンサの目標位置が次のように記述できる。

$$p(t) = \begin{cases} p_0 + v(t_s(t)) \cdot (t - t_s(t)) & (0 \leq t - t_s(t) < \tau_o) \\ p_0 & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (1)$$

p_0 はイメージセンサのホーム位置、 τ_o はシャッタ開放時間（露光時間）、 τ_c は閉鎖時間である。フレーム周期 $\tau = \tau_o + \tau_c$ に

に基づき、時刻 t を量子化した時刻を $t_s(t) = \lfloor t/\tau \rfloor \tau$ とした。ここで、 $\lfloor \alpha \rfloor$ は α を超えない最大の整数を表す床関数である。時刻 $t_s(t)$ での対象と撮像系の相対速度 $\mathbf{v}(t_s(t))$ は画像処理により実時間推定されるとした。

式 (1) の上段はシャッター開放時のビジュアルフィードバックによる追跡制御、下段はシャッター閉鎖時のホーム位置に戻る制御の目標値を表す。二つの制御目標はカメラのフレーム周期 τ に対応したミリ秒レベルの高速な周期運動で切り替える必要がある。

瞬時間欠のトラッキングでは、ミリ秒レベルの高速な周期運動を制御目標とするため、運動対象に対して実時間速度推定を行う高速ビジョンおよび高周波数の周期動作を行う高速アクチュエータが必要となる。一方で、ピエゾアクチュエータに代表される高速アクチュエータを用いた瞬時間欠のトラッキングでは周波数特性と可動範囲がトレードオフの関係にあるため、可動範囲の制限により、モーションブラー低減可能な対象速度の範囲が制限される場合がある。

本研究では瞬時間欠のトラッキングの有効性を示すために、アクチュエータの稼働範囲が入力画像における画素ピッチに比べて十分大きく設定可能な顕微鏡下でのモーションブラー除去を可能とするプロトタイプシステムを構築する。顕微鏡下におけるモーションブラーフリー撮影は、特にマイクロチャンネル内で高速に流れる細胞を瞬時ソーティングするための画像処理を行う上で重要であり、ビジョンベースのセルオートメーションを実現するキーテクノロジーとなることを付記する。

3. モーションブラーフリー顕微鏡

3.1 システム構成

構築したモーションブラーフリー顕微鏡は、高速ビジョンプラットフォーム IDP Express [27]、正立顕微鏡 CX41 (オリンパス)、特注設計 1 自由度ピエゾステージ (ナノコントロール)、制御用 PC (Windows7 Professional 32 bit OS, ASUSTeK P6T7 WS Supercomputer ボード, Intel Core i7 960 3.20 GHz GPU, 6GB メモリ)、D/A ボード PCI-3305 (インタフェース) から構成される。Fig. 3 にその外観を示す。

IDP Express はカメラヘッド、専用 FPGA 処理ボード (IDP Express ボード) から成る。画素サイズ $10 \times 10 [\mu\text{m}]$ の

512×512 イメージセンサを搭載するカメラヘッドは、顕微鏡のカメラポートに装着されている。IDP Express ボードは高速画像処理・記録用に設計され、画像処理回路を並列実装した FPGA (Xilinx XC3S5000) からの結果を PCI-e2.0 $\times 16$ バスを介し、 512×512 画素画像に対し最高 2,000 [fps] で PC メモリに実時間出力可能である。

対物レンズが搭載された 1 軸ピエゾステージは、分解能 $1.2 [\text{nm}]$ で水平方向に対物レンズを移動させることができ、可動範囲は $35.1 [\mu\text{m}]$ 、共振周波数は $1,500 [\text{Hz}]$ である。本可動範囲内においては、対物レンズの移動による光軸のずれが撮影に与える影響は軽微であり、無視できることを予備実験により確認している。対物レンズを非搭載時の大きさ、質量はそれぞれ $56 \times 50 \times 27 [\text{mm}]$, $124 [\text{g}]$ であり、大容量ピエゾドライバ PH601 (ナノコントロール) からの $0 \sim 150 [\text{V}]$ の駆動電圧により動作する。ピエゾステージを顕微鏡の対物レンズポートに装着し、10 倍対物レンズ PlanC N 10X (オリンパス) を水平方向に移動可能とした。計測領域は $512 \times 512 [\mu\text{m}]$ 、画像における 1 画素は $a = 1.0 [\mu\text{m}]$ に相当する。

瞬時間欠のトラッキングアルゴリズムは制御用 PC にソフトウェア実装した。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 DA ボードを介してピエゾステージに出力する。DA ボードはピエゾステージ駆動電圧 $0 \sim 150 [\text{V}]$ 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 $0 \sim 10.24 [\text{V}]$ のアナログ電圧信号を出力する。実装アルゴリズムの詳細は次節で述べる。

3.2 実装アルゴリズム

運動対象は一定間隔で一方向に移動するとし、画像内の単一対象を観察する以下のアルゴリズムを実装した。

(1) 二値化

露光時間 τ_o 、フレーム間隔 τ 、フレーム数を k 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 の画像内の対象速度は、時刻 t と時刻 $t - \tau$ の画像重心 $\mathbf{c}(t) = (M_{10}/M_{00}, M_{01}/M_{00})$ から推定される。

$$\mathbf{v}(t) = (v_x(t), v_y(t)) = a(\mathbf{c}(t) - \mathbf{c}(t - \tau))/\tau \quad (2)$$

M_{00}, M_{10}, M_{01} は $B(x, y, t)$ のモーメント特徴である。また、 a は画素数を距離に変換する定数であり、3.1 節で述べたとおり本システムでは $a = 1.0 [\mu\text{m}]$ である。

$$M_{mn}(t) = \sum_{x,y} x^m y^n \cdot B(x, y, t) \quad (3)$$

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

$$x_d(t) = \begin{cases} v_x((k-1)\tau) \cdot (t - k\tau - \tau_r) + {}^0p_x & (-\tau_r \leq t - k\tau < \tau_o) \\ f(t; x_d(k\tau + \tau_o), {}^0p_x) & (\tau_o \leq t - k\tau < \tau_b + \tau_o) \\ {}^0p_x & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

Fig. 3 System overview

Fig. 4 Frame-by-frame intermittent tracking trajectory

0p_x はピエゾステージの x 座標のホーム位置, τ_t, τ_b はビジュアルフィードバックに基づく追跡制御とホーム位置への制御の継続時間を示す. $\tau_r = \tau_t - \tau_o$ はピエゾステージの立ち上がり時間を考慮した遅延時間である. $f(t; x_d(k\tau + \tau_o), {}^0p_x)$ 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. Fig. 4 に軌道生成のタイミングチャートを示す.

(4) ピエゾステージ制御

目標軌道の生成後, DA 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, 以下のように増幅された駆動電圧 $V(t)$ としてピエゾステージへ送られる.

$$V(t) = bx_d(t) \quad (5)$$

パラメータ b は増幅率を示し, 4.1 節にて導出する.

3.3 仕様

本研究では 512×512 入力画像をフレーム周期 $\tau = 8$ [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 $\tau_t = 4.5$ [ms], $\tau_b = 1.5$ [ms] であり, τ_t には $\tau_r = 0.5$ [ms] が含まれる. $\tau_t + \tau_b = 6.0$ [ms] の目標軌道は 166.7 [kHz] の 12 ビットデジタル波形として生成し, 1,000 個の 12 ビットデータを 8 [ms] 周期で更新した. ピエゾステージのホーム位置を駆動電圧 0 [V] に相当する可動域の左端とし, ${}^0p_x = 0$ とした. モーションブラー低減が可能な対象最大速度は露光時間と可動域の比から計算され, 35 [μm]/ 4 [ms] = 8.75 [mm/s], $8,750$ [pixel/s] となる.

本研究では, (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として実装し, 他の処理ステップはマルチスレッドプロセスとして PC 上のソフトウェアにより並列実行した. (1), (2) の実行時間の合計は 0.246 [ms], (3), (4) の実行時間の合計は 1.105 [ms] となった. 総実行時間は 1.351 [ms] であり, すべての処理が 512×512 画像に対して露光時間 4 [ms] の 125 [fps] での実時間動作を確認した.

4. 実験

4.1 増幅率 b の導出

まず, 3.2 節 (4) で述べた増幅率 b を決定するため, ピエゾステージへの入力電圧とピエゾステージの変位の関係を確認する予備実験を行った. 予備実験では, Fig. 5 に示す一定時間に 0 [V] から最大印可電圧 V^{max} まで時間に対して線形増加する電圧をピエゾステージへ入力し, ステージに固定された直径 50 [μm] の円形ドットパターンの重心位置を取得することでピエゾステージの動作を確認した. Fig. 6 に使用した直径 50 [μm]

Fig. 5 Input waveform for piezo stage

Fig. 6 Circle-dot pattern to be evaluated

Fig. 7 Stage displacements

Fig. 8 Relationship between input voltage and stage velocity

の黒色円形ドットパターンを示す. 円形ドットは透明なガラス上に 512 [μm] 間隔で印刷した. ピエゾステージの最大印可電圧 V^{max} を $15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150$ [V] と設定し, フレームレートを $10,000$ [fps] に設定した高速ビジョンにより重心位置の変位を取得した. Fig. 7 にそれぞれの V^{max} に対応した入力電圧対するドットパターンの重心位置の時系列変化を示す. 露光時間である 4 [ms] 間の傾きを最小二乗法によりそれぞれ導出し, V^{max} に対するピエゾステージの速度を Fig. 8

Fig. 9 Images of circle-dots at constant speeds

にそれぞれプロットした。さらに、Fig. 8のプロット点から最小二乗法により近似曲線を導出し、最大印可電圧 V_x に対するピエゾステージ速度 v_x の関係式が以下のように得られる。

$$v_x = 0.057V^{max} \quad (6)$$

式 (6) より、最大印可電圧 V^{max} を 150 [V] に設定した場合のピエゾステージの速度 v_x は 8.54 [mm/s] となる。この時、露光時間 4 [ms] での移動距離は $8.54 \times 4 = 34.16 [\mu\text{m}]$ であることから、増幅率 b は 4.39 [V/ μm] とした。また、式 (4) のように設計した五次多項式を利用した目標軌道生成によって振動の少ない滑らかなピエゾステージの軌道が生成できることが Fig. 7 から確認できる。

4.2 定速度での円形ドット撮影

円形ドットパターンを対象として、0~15 [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ラーとの関係性を評価した。円形ドットパターンは Fig. 6 と同様のパターンを使用した。Fig. 9 に $v_x = 0, 3, 6, 9, 12, 15$ [mm/s] 時の 512×512 入力画像からドットを中心に切り出した 256×256 画像を示す。Fig. 10 に $v_x = 9$ [mm/s] 時の 256 画素幅の水平方向に対する輝度値断面プロファイルを示す。二値化の閾値 θ は 100 とした。これらの図では、瞬間欠のトラッキング時の入力画像 (IT) と機械的な追跡なしで撮影した入力画像 (NT)、さらには動きだけ補正を行った画像 (MD) との比較を行った。IT および MD 画像は同じフレーム周期およびシャッター露光時間で撮影した。MD 画像は推定した対象速度に対応した線状カーネル関数に基づくデコンボリューションを NT 画像に施したものであり、代表的なデコンボリューション法の一つである Richardson-Lucy アルゴリズムを使用することで得られる [29] [30]。

NT 画像は対象速度が増加するにつれて水平方向にモーションブラーが大きく生じたのに対して、IT 画像は速度に関係なくモーションブラーを低減できた。MD 画像は円形ドットのエッジ部分は若干鋭くなったものの、露光時間の間に円形ドットが数十画素移動した場合には、大きなゴーストエラーが残った。これは線形性を前提としたデコンボリューション法では、飽和などの非線形な輝度変化を含む画像における大きなモーションブラーの低減が困難なためである。

Fig. 10 Intersected brightness profile

Fig. 11 Motion-blur indexes vs moving speeds

次にモーションブラーを評価するために、Fig. 9 の画像に対してその程度を示す指標 $\Delta\lambda = \lambda_+ - \lambda_-$ を計算した。 λ_+ , λ_- は円形ドットをだ円近似したときの長軸と短軸の長さであり、 $\Delta\lambda$ はモーションブラーが顕著なときは大きくなり、モーションブラーがないときは 0 となる。これらの指標は入力画像に対して閾値 200 で二値化した場合について計算された。 λ_+ と λ_- は画像の 0 次、一次、二次モーメント特徴を用いて計算した。Fig. 11 に対象速度と $\Delta\lambda$ の関係性を示す。この図では円形ドットが画像内にある 50 画像の $\Delta\lambda$ の平均値をプロットした。NT 画像では、指標 $\Delta\lambda$ は速度 v_x に比例して増加し、 $v_x = 15$ [mm/s] のとき $\Delta\lambda$ は 45.0 画素となった。すべての速度で MD および NT 画像の $\Delta\lambda$ は類似した値となった。これはデコンボリューション法は非線形性の強い高コントラスト画像のブラー除去には効果が薄いためである。IT 画像の $\Delta\lambda$ は、NT 画像に比べてすべての速度で大きく下回り、 $v_x = 3, 6, 9, 12, 15$ [mm/s] のとき 0.9, 0.5, 0.5, 4.8, 12.4 画素であり、NT 画像の $\Delta\lambda$ の 17.9, 4.0, 2.2, 14.8, 27.5% に相当する。IT 画像においてもモーションブラーは観測され、特に $v_x = 10$ [mm/s] 以上から $\Delta\lambda$ が増加する傾向がある。これは、 $v_x = 9$ [mm/s] 以上の速度では速度が大きくなるにつれ、ピエゾステージの目標軌道と実際の軌道との誤差が大きくなるためである。Fig. 12 に各最大印可電圧 V^{max} に対するピエゾステージの目標軌道と実際の軌道をそれぞれ示す。この図から $V^{max} = 150$ [V] 以上では、目標軌道がピエゾステージの可動範囲を超えることにより目標軌道との誤差が大きくなるため、ステージが定速度で移動する直線軌道を維持することが困難となっていることが確認できる。これらの結果から、ピエゾステージが適切に制御できる範囲内において、瞬間欠のトラッキング法はシャッター時間を小さくせずに運動対象のモーションブラーが 3% 以下に抑えられることが確認された。

Fig. 12 Comparison of piezo stage trajectory with respect to velocity

4.3 可変速度での円形ドット撮影

Fig. 6 の円形ドットを使い、リニアスライダを使用して 0～12 [mm/s] の範囲で速度を変動させた場合の撮影実験を行った。リニアスライダへの命令は手動で設定し、0, 4, 8, 12 [mm/s] の速度を 0.3 秒ずつ継続させた。なお、それぞれのパルス指令の間には、0.1 秒以上の静止時間を設定した。

Fig. 13 (a) に $t = 0.0 \sim 1.5$ [s] の間の瞬間欠的トラッキングで撮影した IT 画像の $\Delta\lambda$ と画像から推定された対象速度のグラフを示す。比較のため Fig. 13 (b) に同様な実験を行った場合の NT および MD 画像の $\Delta\lambda$ および推定された対象速度を示す。推定された対象速度はリニアスライダの指令値に対応し、振幅の時間ごとの順に 0, 4, 8, 12 [mm/s] で変化するパルス波として観測された。なお波形の立上りと立下りはリニアスライダの慣性により少し鈍くなっている。Fig. 13 (b) では対象速度に応じて NT および MD 画像の $\Delta\lambda$ が 0～30 画素以上の幅で変化する一方で、Fig. 13 (a) では $t = 0.0 \sim 1.0$ [s] の間、ほぼ 1 画素まで低減できている。 $t = 1.0 \sim 1.5$ [s] では、ピエゾステージの可動域を超える 12 [mm/s] で対象が移動するため $\Delta\lambda$ が 6 画素以上となった。IT 画像のモーションブラーは対象速度が上昇または下降したときにわずかに増加しているが、これは瞬間欠的トラッキングが 125 [fps] で動作し、推定された対象

(a) IT

(b) NT, MD

Fig. 13 Temporal changes of motion-blur indexes

Fig. 14 Diatom samples to be evaluated

Fig. 15 Images captured for moving diatoms

速度を制御に反映するために最低でも 8 [ms] の遅延が生じることが原因と考えられる。

4.4 珪藻サンプルの撮影

複雑な形状の対象に対するモーションブラー低減を確認するために、珪藻サンプルを観測対象として、リニアスライダを用いた定速実験を行った。Fig. 14 に使用した珪藻サンプルを示す。直径 200 [μm] の円形の珪藻が透明ガラス板に 700 [μm] 間隔で配置されている。

Fig. 15 に $v_x = 4, 8, 12$ [mm/s] 時に撮影された 512×512 入力画像から珪藻サンプルを中心として切り出された 256×256 画像を示す。IT 画像は、 $v_x = 4, 8, 12$ [mm/s] のいずれにおいても、静止した珪藻の画像とほぼ同じであり、瞬間欠のトラッキング法を用いることにより、珪藻の被殻パターンが速度に関係なく大きなモーションブラーなしに観測可能となることが分かる。一方で NT 画像のモーションブラーは対象速度の増加につれて非常に大きくなった。 $v_x = 12$ [mm/s]、つまり 4 [ms] のシャッター時間に 48 画素の移動があるとき被殻パターンの判別は困難である。MD 画像は NT 画像にだけ補整を行ったものの、

飽和などによる非線形な輝度変化を含む画像であり、線形性を仮定できなくなったため、高速運動対象を撮影した IT 画像よりもモーションブラーが発生していることが分かる。

5. おわりに

本研究では、運動対象の撮影時におけるモーションブラーを低減する瞬間欠のトラッキング法を提案し、高速ビジョンとピエゾアクチュエータを用いたモーションブラーフリー顕微鏡を構築した。構築した顕微鏡では、顕微鏡下での運動対象に対して、露光時間を小さくすることなくぼけのない高輝度な 512×512 画像を 125 [fps] で撮影できることを、いくつかの実験を通して確認した。今後は、システムのさらなる精度向上や微生物などのより複雑な移動にも対応可能とするなどの改善を行うとともに、マイクロ流路内を高速に流れる細胞の良否を検査するハイスループットな LOC ベースの細胞検査系へのモーションブラーフリー顕微鏡の導入を計画している。

謝辞 本研究の一部は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP)」の支援によって行われた。

参考文献

- [1] R. Oosterbroek and A.B. Van den: Lab-on-a-Chip: Miniaturized Systems for (Bio)Chemical Analysis and Synthesis. Elsevier, 2003.
- [2] D. Kundur and D. Hatzinakos: "Blind image deconvolution," IEEE Signal Proc. Mag., vol.13, no.3, pp.43–64, 1996.
- [3] P. Campisi and K. Egiazarian: Blind image deconvolution: theory and applications. CRC Press, 2007.
- [4] S.K. Kim and J.K. Paik: "Out-of-focus blur estimation and restoration for digital auto-focusing system," Electron. Lett., vol.34, no.12, pp.1217–1219, 1998.
- [5] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S.T. Roweis and W. Freeman: "Removing camera shake from a single photograph," ACM Trans. Graph., vol.25, no.3, pp.787–794, 2006.
- [6] Y.-W. Tai, P. Tan and M.S. Brown: "Richardson-Lucy deblurring for scenes under projective motion path," IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., vol.33, no.8, pp.1603–1618, 2011.
- [7] B. Basclé, A. Blake and A. Zisserman: "Motion deblurring and super-resolution from an image sequence," Proc. Eur. Conf. Comput. Vis., pp.573–582, 1996.
- [8] S. Farsiu, M.D. Robinson, M. Elad and P. Milanfar: "Fast and robust multiframe super resolution," IEEE Trans. Image Proc., vol.13, no.10, pp.1327–1344, 2004.
- [9] J. Chen, L. Yuan, C.K. Tang and L. Quan: "Robust dual motion deblurring," Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Patt. Recog., pp.1–8, 2008.
- [10] N. Joshi, S.B. Kang, C.L. Zitnick and R. Szeliski: "Image deblurring using inertial measurement sensors," ACM Transactions on Graphics, vol.29, no.4, p.30, 2010.
- [11] M. Kim and J. Ueda: "Dynamics-based motion de-blurring for a PZT-driven, compliant camera orientation mechanism," The Int. J. Robotics Research, vol.34, no.4–5, pp.653–673, 2015.
- [12] Canon IS technology, http://www.usa.canon.com/cusa/consumer/standard_display/Lens_Advantage_IS/
- [13] Nikon's effective VR system, <http://imaging.nikon.com/lineup/lens/concept/vr/en/>
- [14] Sony SteadyShot™ INSIDE, <http://www.sony-meia.com/microsite/dslr/10/tech/steadyshot.html>
- [15] Y. Watanabe, T. Komura and M. Ishikawa: "955-fps real-time shape measurement of a moving/deforming object using high-

- speed vision for numerous-point analysis," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.3192–3197, 2007.
- [16] I. Ishii, T. Taniguchi, R. Sukenobe and K. Yamamoto: "Development of high-speed and real-time vision platform, H³ vision," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelli. Rob. Sys., pp.3671–3678, 2009.
- [17] I. Ishii, T. Taniguchi, K. Yamamoto and T. Takaki: "High-frame-rate optical flow system," IEEE Trans. Circ. Sys. Video Tech., vol.22, no.1, pp.105–112, 2012.
- [18] I. Ishii, T. Ichida, Q. Gu and T. Takaki: "500-fps face tracking system," J. Real-Time Image Proc., doi: 10.1007/s11554-012-0255-8, 2012.
- [19] A. Namiki, Y. Imai and M. Ishikawa: "Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelli. Rob. Sys., pp.2666–2671, 2003.
- [20] K. Okumura, H. Oku and M. Ishikawa: "High-speed gaze controller for millisecond-order Pan/tilt Camera," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.6186–6191, 2011.
- [21] H. Oku, I. Ishii and M. Ishikawa: "Tracking a protozoan using high-speed visual feedback," Proc. Annu. Int. IEEE-EMBS Special Topic Conf. Microtechnologies in Medicine and Biology, pp.2014–2019, 2001.
- [22] T. Ishikawa, H. Oku and M. Ishikawa: "Mobile microscope: A new concept for hand-held microscopes with image stabilization," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.3130–3134, 2008.
- [23] S. Lee, Y. Nakamura, K. Yamane, T. Toujo, S. Takahashi, Y. Tanikawa and H. Takahashi: "Image Stabilization for In Vivo Microscopy by High-Speed Visual Feedback Control," IEEE Trans. Robot., pp.45–54, 2008.
- [24] S. Lee, T. Ozaki and Y. Nakamura: "In Vivo Microscope Image Stabilization through 3-D Motion Compensation using a Contact-type Sensor," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelli. Rob. Sys., pp.1192–1197, 2008.
- [25] S. A. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke: A tutorial on visual servo control," IEEE Trans. Robot. Autom., vol.12, no.5, pp.651–670, 1996.
- [26] R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen and F. Reyes: Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.5, no.1, pp.39–48, 2000.
- [27] I. Ishii, T. Tatebe, Q. Gu, Y. Moriue, T. Takaki and K. Tajima: "2000 fps real-time vision system with high-frame-rate video recording," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.1536–1541, 2010.
- [28] A. Levin, P. Sand, T.S. Cho, F. Durand, and W. T. Freeman: "Motion-invariant photography," ACM Trans. Graph., vol.27, no.3, Article 71, 2008.
- [29] W.H. Richardson: "Bayesian-based iterative method of image restoration," J. Opt. Soc. Am., vol.62, no.1, pp.55–59, 1972.
- [30] L.B. Lucy: "An iterative technique for the rectification of observed distributions," Astronomical Journal, vol.79, pp.745–754, 1974.

上野貴弘 (Takahiro Ueno)

2014 年広島大学工学部第二類卒業。2016 年広島大学大学院工学研究科システムサイバネティクス専攻修了。(株)やまびこ勤務。修士(工学)。

顧 慶毅 (Qingyi Gu)

2005 年西安交通大学電子情報工学科卒業。2010 年広島大学工学研究科システムサイバネティクス専攻博士前期課程修了。2013 年広島大学工学研究科システムサイバネティクス専攻博士後期課程修了。同年広島大学大学院工学研究院電気電子システム数理部門特任助教。2015 年同特任准教授。2016 年中国科学院自動化研究所教授、現在に至る。博士(工学)。IEEE の会員。

石井 抱 (Idaku Ishii)

1992 年東京大学工学部卒業。1994 年東京大学工学系研究科修士課程修了。1996 年同大学工学系研究科助手。2000 年東京農工大学工学部講師。2002 年同助教授。2003 年広島大学工学研究科助教授。2007 年同教授、現在に至る。博士(工学)。IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

青山忠義 (Tadayoshi Aoyama)

2007 年名古屋大学工学部機械・航空工学科卒業。2009 年名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士前期課程修了。2012 年名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻博士後期課程修了。同年広島大学大学院工学研究院電気電子システム数理部門助教、現在に至る。博士(工学)。IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

高木 健 (Takeshi Takaki)

2000 年東京理科大学工学部機械工学科卒業。2002 年東京理科大学工学研究科機械工学専攻修了。(株)ディスコを経て、2006 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。2007 年同学特別研究員。2007 年広島大学工学研究院特任助教。2008 年同助教。2011 年同准教授、現在に至る。博士(工学)。IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

川原知洋 (Tomohiro Kawahara)

2002 年熊本電波工業高等専門学校専攻科修了。2006 年広島大学大学院工学研究科博士課程修了。広島大学大学院医歯薬学総合研究科研究員、東北大学大学院工学研究科助教、名古屋大学大学院工学研究科 COE 特任助教を経て、2012 年より九州工業大学大学院生命体工学研究科准教授。博士(工学)。IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)