



指先顕微鏡における 指先の移動量に基づくリアルタイムスティッチング

Image Stitching Method for Fingertip-wearable Microscope Based on Fingertip Movement

重見和秀¹⁾, 大伏仙泰²⁾, 檜山敦³⁾, 稲見昌彦³⁾

Kazuhide SHIGEMI, Noriyasu OBUSHI, Atsushi HIYAMA, and Masahiko INAMI

- 1) 東京大学 工学部 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, 1861812216@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)
- 2) 東京大学大学院 工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, obushi@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)
- 3) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

概要:

本稿では既発表の指先に装着可能な顕微鏡デバイスを用いた, 指先の移動に基づく広視野像の構築手法について報告する. 広視野像のリアルタイムスティッチングは指先の移動に基づく顕微鏡観察を容易にする一方, 顕微鏡画像のみで広視野像の構築を試みる場合, 許容される移動量は画角の制約を受け, 画像処理の実行時間も課題となる. 提案手法では移動量センサの併用により, 画角に非依存かつリアルタイムなスティッチングが実現された.

キーワード: 顕微鏡, イメージスティッチング

1. はじめに

指先に装着可能な小型顕微鏡 (以下, 指先顕微鏡) [1] は, 観察対象に触れる動作を起点とする顕微鏡観察を可能にする. 身体に装着した状態での利用を前提とするウェアラブルデバイスは身体機能を拡張するものであり, 指先顕微鏡は肉眼で視認できない微小世界に加え, 同時に指先の動きも可視化することから, 微細な運動と視覚に関する身体拡張デバイスとして位置づけられる.

従来の指先顕微鏡が抱える問題点として, 光学系の小型化を図るため, 拡大倍率が固定されている点が挙げられる. また光学系の設計において拡大倍率を優先した結果, 広視野像は得ることができず, 目標位置への到達は困難であった. 拡大率と視野のトレードオフに対する解決策として, スティッチングと呼ばれる, 複数の拡大画像を配置・合成する手法が用いられる. スティッチングは高い空間解像度と広視野像を備えた拡大像の構築を可能にする一方, その実現には精密な移動量の調節を可能にするステージ等の装置を要する. このため, 微小な移動を指先に依存する指先顕微鏡においてスティッチングを試みる場合, 移動量の計測手法や画像処理手法を新たに導入する必要がある.

本稿では, 指先顕微鏡から得られる顕微鏡画像を組み合わせ高拡大率・広視野の画像をリアルタイムに出力することを目的に, 移動量の取得を目的とするマウス用の光学式変位センサを取り入れた指先顕微鏡のスティッチング手法を提案する. スティッチング処理に光学式変位センサを用いるにあたり, 並進・回転運動時に出力される変位について, 実

験を通じその精度の検証を試みた. その後, 結果を報告するとともに指先顕微鏡への応用可能性について考察する.

2. 関連研究

顕微鏡画像の拡大率と広視野角の両立を目的とするスティッチングは, 視野の拡張を目的に広く行われている. スティッチングは画像の一部が重なるよう撮影された複数の高倍率画像を入力として用い, 各々の位置関係に基づき配置を行う. 各画像の位置関係は一般的に特徴量のマッチングや位相の相関によって計算される [2].

指先顕微鏡の出力画像に対してスティッチングを試みる場合, 移動量が顕微鏡の視野 (縦 0.25 mm・横 0.45 mm 程度) を上回り処理に失敗するおそれがある. すなわち, 入力画像の重なりを前提とする画像処理に基づくスティッチング手法では拡大率が高くなるほど視野が狭くなり, ユーザは指先の移動量を抑える必要がある. 一方, 高い空間分解能での変位の計測を安価に実現するため, これまでマウス用の光学式変位センサを用いた変位計測システムが提案されている [3]. さらに近年では数 μm の空間分解能をもつマウスが登場しているものの, 顕微鏡画像に対するリアルタイムなスティッチング処理を目的とするものは少ない. そこで本研究では指先顕微鏡から得られる画像のリアルタイムなスティッチングの実現を目的に, マウス用光学式変位センサ (以下, 変位センサ) を用いた変位計測に着目した.

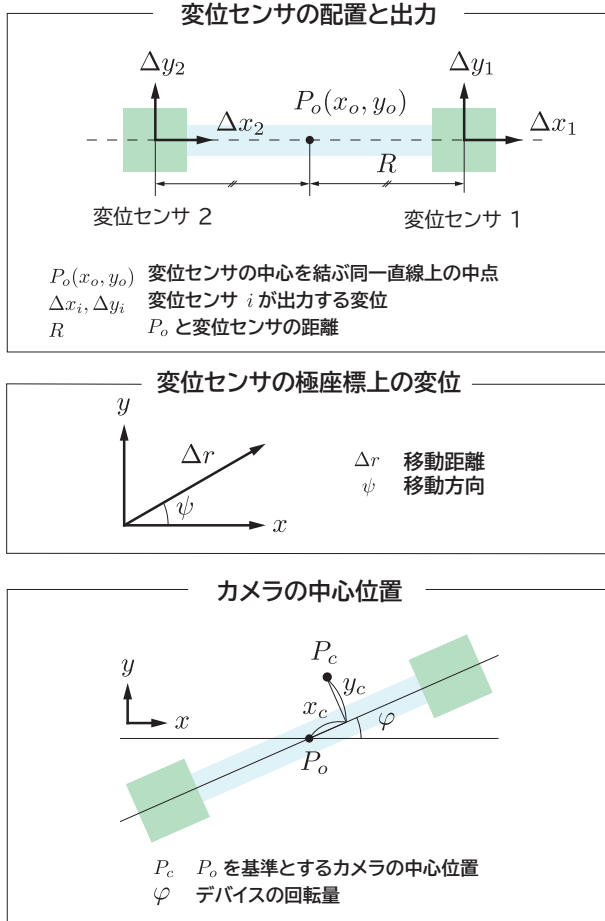


図 1: 提案デバイスのパラメータと変数の定義.

3. 変位センサを用いた移動量と回転量の計測

指先の細かな移動をスティッチングに用いる場合、平面上の移動量に加え回転量（ヨー角）についても考慮する必要がある。一方、変位センサの出力は x, y 方向の移動量に限られるため、単一の変位センサでは両者を分離できない。このため、指先の回転量は複数の変位センサから推定する必要がある。本研究では最小構成での実現を図るため、2つの変位センサを用いデバイスの移動量と回転量を個別に計算しスティッチングへの応用を試みる。

デバイスの各パラメータと変位センサから得られる各変数を図 1 のとおり定義する。ここで指先顕微鏡のレンズの中心 P_c は 2 つの変位センサの中心 P_o と必ずしも一致しない点に注意を要する。このとき、図 1 より以下が成り立つ：

$$\Delta x_1 = \Delta r \cos(\psi - \varphi) \quad (1)$$

$$\Delta y_1 = \Delta r \sin(\psi - \varphi) + R\Delta\varphi \quad (2)$$

$$\Delta x_2 = \Delta r \cos(\psi - \varphi) \quad (3)$$

$$\Delta y_2 = \Delta r \sin(\psi - \varphi) - R\Delta\varphi \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2R} (\Delta y_1 - \Delta y_2) \quad (5)$$

$$\Delta r_1 = \sqrt{\Delta x_1^2 + (\Delta y_1 - R\Delta\varphi)^2} \quad (6a)$$

$$\Delta r_2 = \sqrt{\Delta x_2^2 + (\Delta y_2 - R\Delta\varphi)^2} \quad (6b)$$

$$\psi_1 = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\Delta x_1}{\Delta r_1}\right) + \varphi & \left(\left|\frac{\Delta x_1}{\Delta r_1}\right| < \left|\frac{\Delta y_1 - R\Delta\varphi}{\Delta r_1}\right|\right) \\ \arcsin\left(\frac{\Delta y_1 - R\Delta\varphi}{\Delta r_1}\right) + \varphi & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7a)$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\Delta x_2}{\Delta r_2}\right) + \varphi & \left(\left|\frac{\Delta x_2}{\Delta r_2}\right| < \left|\frac{\Delta y_2 + R\Delta\varphi}{\Delta r_2}\right|\right) \\ \arcsin\left(\frac{\Delta y_2 + R\Delta\varphi}{\Delta r_2}\right) + \varphi & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7b)$$

ここで式 (7a), (7b) の場合分けは計算誤差軽減を目的とし、逆三角関数の解は $\sin(\psi - \varphi), \cos(\psi - \varphi)$ の符号に基づき決定した。以上で得られた変位センサの移動距離 Δr と移動方向 ψ を各センサの変位の平均値から求めると、デバイスの中心 P_o とスティッチングに用いるカメラの中心座標 P_c は以下のとおり導出される：

$$P_o(x_o, y_o) = P_o(\Delta r \cos \psi, \Delta r \sin \psi) \quad (8)$$

$$P_c(x_o + x_c \cos \varphi - y_c \sin \varphi, y_o + x_c \sin \varphi + y_c \cos \varphi) \quad (9)$$

式 (1)–(9) の更新は変位センサの変位 $\sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2}$ あるいは $\sqrt{\Delta x_2^2 + \Delta y_2^2}$ のいずれかが閾値を超過した場合に行い、更新の都度新たなカメラの位置 P_c ・デバイスの回転角度 φ に反映した。

本稿で提案するスティッチング手法は変位センサの出力のみに基づくものであり、境界線の除去等の画像処理は含まれない。スティッチングはカメラの位置 P_c の変化が閾値を超過する場合にのみ行われ、指先顕微鏡の最新フレームとカメラの位置 P_c ・センサの回転角 φ を対応付けた後、広視野画像上の対応する位置に回転後の最新フレームを上書きすることで完了する。

4. 実験

回転量を検出可能なマウスに関する先行研究 [4] に基づき、図 2 に示すとおり変位センサを指先顕微鏡を左右から挟むよう配置し、デバイスを構築した。変位センサにはゲーミングマウス用の光学式変位センサである Pixart PMW3360 を用いた。この変位センサは最大 12000 CPI の空間解像度と最大 250 Hz の時間分解能（リポートレート）をもつ。従って理想的には最小 2.1 μm の変位が検出可能であり、この空間分解能は指先顕微鏡の視野が数百 μm であることを考慮すると十分小さいといえる。デバイスの構築後、前節で述べた手順で並進・回転運動時の変位計測が実現可能であることを検証するため、並進・回転運動時においてデバイスから出力される変位を計測した。実験装置の外観を図 3 に示す。

4.1 並進運動時の計測精度の検証

変位センサの移動方向と出力される変位の精度の関係を調べるため、XY ステージ（ミスミ XYMSG715-LA5-E-N）を駆動させ変位を測定した。移動方向には上下・左右・斜め（移動方向は ψ の組を用いて $(0, \pi), (\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}), (\frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}), (\frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4})$ ）と表される）の 4 方向を選び、移動距離は移動方向に関わらず 10 mm とした。移動経路は 1 方向あたり往路と復路の 2 通り存在するため、4 方向では計 8 通りとなる。各往復移

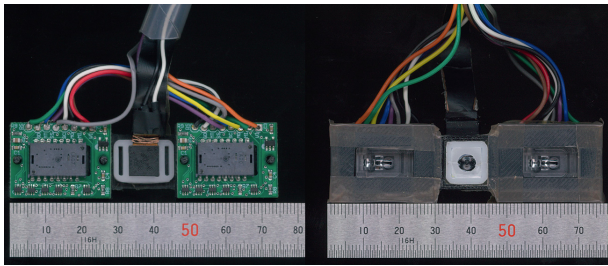


図 2: 上面から撮影した提案デバイスを左に、底面から撮影した提案デバイスを右に示す。本デバイスは中央の指先顕微鏡と左右の変位センサから構成される。

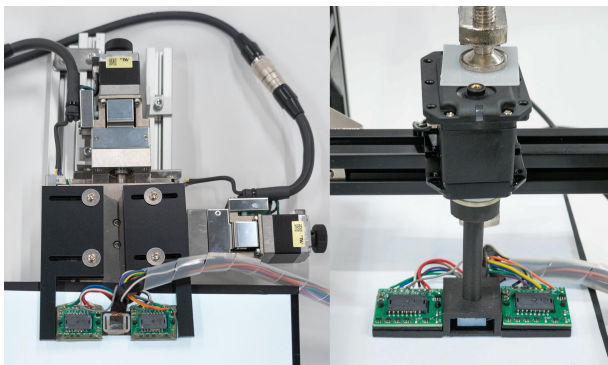


図 3: 実験装置の外観。並進運動は XY ステージ (左), 回転運動はサーボモータ (右) をそれぞれ用いた。

動における往復回数は 10 回とし、往復毎に (1) 往路・復路単独での変位 (2) 往復時の通算変位を記録した。

本稿では回転を考慮した変位の計測手法を提案する一方、XY ステージを用いた並進運動には回転成分が含まれない。そこで並進運動時の変位として回転を考慮した変位に加え、回転を考慮しない計測手法 (2 つの変位センサから得た変位の平均) から得た結果についても併せて記録した。変位の計測精度は理論値との比較に基づき評価した。

実験では XY ステージの位置をコントローラ (ミスミ DS102) を介したコンピュータから $1\ \mu\text{m}$ 単位の絶対座標で与えた。XY ステージの移動速度は $1\ \text{mm/s}$ とした。

4.2 回転運動時の計測精度の検証

2 つの変位センサから成るデバイスを用いた回転量の計測精度を検証するため、1 回転あたり 12 ビットの角度分解能を持つサーボモータ (Robotis Dynamixel MX-28 AR) を用いてデバイスの回転角度 φ を調節した。回転量は基準位置から時計回りもしくは反時計回りに 10° 単位で最大 90° まで回転させた。回転角度を変更する毎に式 (5) から計算される回転角度と指令値を比較した。試行は各回転方向について 5 回ずつ行った。サーボモータの角速度は全ての試行において $12\ \text{rev/min}$ とした。

5. 結果と議論

5.1 並進運動時の計測精度

並進運動に関する実験結果は目標位置への移動と往復後の通算の変位に分けて報告する。前者は移動方向別の定性的な精度の評価を目的とし、後者は出発位置を基準とする定量的な誤差の評価を目的とする。実験で用いた変位センサの空間解像度は $12000\ \text{CPI}$ であり、理論上 $2.1\ \mu\text{m}$ 単位で変位を取得可能である。一方、図 4 から明らかなように $10\ \text{mm}$ の移動に対する実測値は理論値と一致せず、変位センサの出力には無視できない系統誤差が認められた。従って本稿では変位の単位として変位センサの出力値を用いた。

目標位置への移動が完了した時点で得られた変位を図 4 に示す。この図より斜め方向の変位が縦・横方向の変位と比較し不安定な傾向をもつことが分かる。この傾向はいずれの計算手法でも認められるため、斜め方向の変位にはノイズが比較的多く重畳している可能性があると考えられる。一方、水平・垂直方向に動かした場合は理論値との誤差はあるものの、比較的高い精度が得られた。次に出発位置への移動が完了した時点で得られた変位と原点 (往復運動の始点) の距離を図 5 に示す。この図から移動方向に往復運動時の回転を考慮した値が平均値と同程度の精度をもつことを確かめた。垂直・水平方向の移動時における変位の計測精度は比較的高いものの、依然として一定程度の誤差を確認した。斜め方向に動かした場合は誤差・標準偏差とも大幅な増加が認められたが、これは連続的な変位の検出中に誤差が蓄積されたためと考えられる。

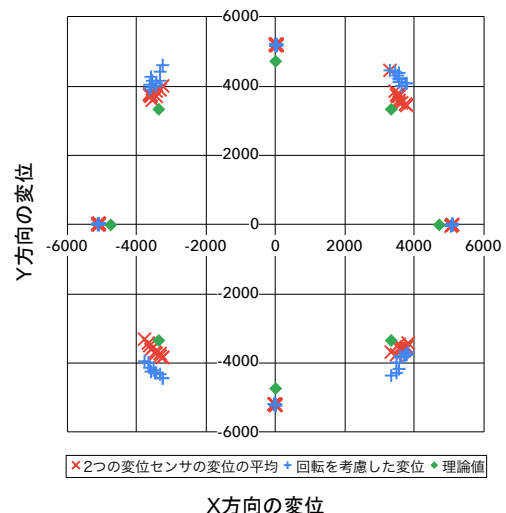


図 4: 並進運動のみで到達した目標位置において計測された変位 ($n = 10$)。数値は変位センサが検出可能な最小距離を 1 単位とする変位を表す。

5.2 回転運動の計測精度

デバイスが回転運動に検出した回転量と実際の回転量を図 6 に示す。 10° 単位で回転させたとき、概ね $\pm 2^\circ$ 程度の精度で回転量の増分を検出した。5 回の試行における真値との差分は平均 0.38° 、標準偏差は 0.74° であった。増分を表

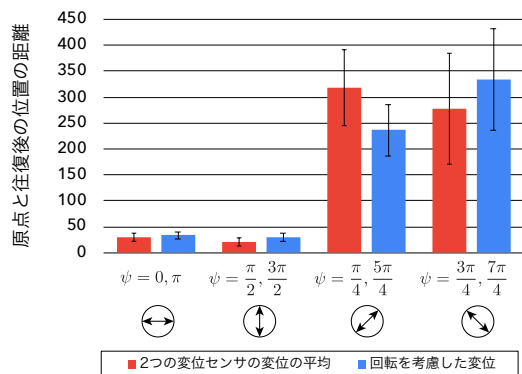


図5: 並進運動のみで往復後, 出発位置において計測された通算の変位 ($n = 10$)。エラーバーは標準偏差, 矢印は移動方向を表す。数値は変位センサが検出可能な最小距離を1単位とする変位を表す。

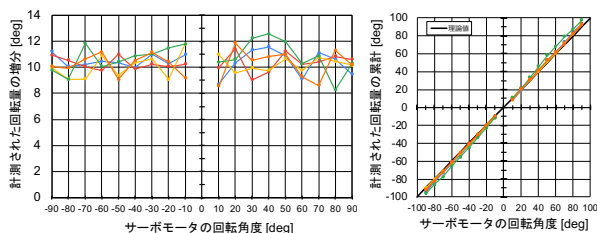


図6: サーボモータの回転量と計測値の推移を 10° 毎の増分 (左) と累積値 (右) で表した結果。

すグラフからも偶然誤差成分が一定程度含まれていると考えられる。以降, 誤差の原因について考察する。

第一に考えられる原因として, 変位センサの誤検出が挙げられる。並進運動での実験時では斜め方向の変位にばらつきがあったことから, 回転運動においても同様に検出精度が低下した可能性は否定できない。

第二の原因として離散化誤差および計算誤差が挙げられる。回転を考慮した変位の計算ではセンサが20単位分の移動を検出する毎に各パラメータを計算・更新したが, 更新頻度を上げると少ない移動量で回転と変位を計算するため誤差が増大し, 更新頻度を下げるとセンサの細かい挙動, 特に回転を追従できなくなる。このトレードオフにより, 回転量の検出精度の大幅な改善は困難であると考えられる。

デバイスの利用時に生じる誤差に加え, 第三の原因として R, P_c などの各パラメータの測定誤差が挙げられる。指先を用いる操作法の観点から R は小さいほうが望ましい一方, 計測値との相対誤差および第二の原因に挙げた諸誤差の低減には大型化を通じた改善策が考えられる。

5.3 指先顕微鏡を用いたスティッチングと課題

変位センサにより上下・左右方向に関する変位の測定が高い精度で可能となった結果を踏まえ, スティッチングが紙に印刷された“h”の文字を指先顕微鏡で撮影し, リアルタイムでスティッチングを試みた。観察終了時点の結果を図7に示す。上下・左右方向の移動が連続する文字の近傍にお

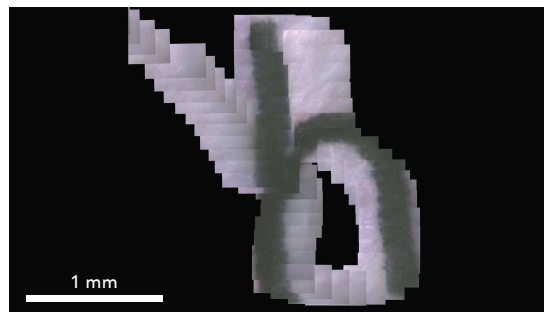


図7: 指先顕微鏡を指先で移動させ, 印刷された“h”の文字を撮影しリアルタイムでスティッチングした結果。

けるスティッチングの結果は概ね良好であるが, 斜め方向の移動が続く左上の部分においてはフレームに欠損が見られ, 変位の計測がやや不安定になっていることが読み取れる。

6. おわりに

本稿では指先顕微鏡を用いた高倍率と広視野を両立する画像のリアルタイムでの構築を目的に, 変位センサから得られる変位に基づくスティッチング手法について, 回転運動を考慮し2つの変位センサを用いる手法を提案した。変位センサが検出するXY方向の変位に関してはスティッチングに十分な精度が得られたものの, 斜め方向や回転運動の検出精度に関しては限界が明らかとなった。原因として検出誤差, 離散化誤差, 計算誤差が考えられる。特に検出誤差は実験により本稿の提案手法よる計算結果に影響を及ぼすことが判明した。今後の課題として, スティッチング精度の定量評価に必要な評価手法の導入が挙げられる。また, 検出誤差をあらかじめ想定しその影響を緩和するフィルタの実装や映像に基づく変位計算誤差検出・スティッチング精度の向上についても取り組んでいきたい。

謝辞 本研究は JSPS 新学術領域研究 (19H05670) および JST ERATO (JPMJER1701) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 大伏仙泰, 廣瀬雅治, 脇坂崇平, 笠原俊一, 檜山敦, 稲見昌彦. 微細環境下で感覚・運動機能を拡張するための指先装着型デバイス. 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019.
- [2] Joe Chalfoun, Michael Majurski, Tim Blattner, Kiran Bhadriraju, Walid Keyrouz, Peter Bajcsy, and Mary Brady. Mist: Accurate and scalable microscopy image stitching tool with stage modeling and error minimization. *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, p. 4988, 2017.
- [3] T.W. Ng. The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 107, No. 1, pp. 21 – 25, 2003.
- [4] Sunjun Kim, Byungjoo Lee, Thomas van Gemert, and Antti Oulasvirta. Optimal sensor position for a computer mouse. 2020.