

単眼高速ビジョンを用いた画像安定化機能を備えるモバイル顕微鏡の基礎検討

石川貴彦 奥寛雅 石川正俊

Takahiko ISHIKAWA, Hiromasa OKU, Masatoshi ISHIKAWA

東京大学大学院情報理工学系研究科

Graduate School Of Information Science And Technology, University of Tokyo

E-mail: takahiko@k2.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract

「モバイル顕微鏡」のコンセプトを提案する。これは、手で把持して様々な場所を観察できる顕微鏡である。顕微鏡は観察可能範囲が微小であるため、手の揺れによって顕微鏡が振動すると、顕微鏡画像がおおしくぶれてしまう。そこで、モバイル顕微鏡の実現のために、手の振動による画像のぶれを安定化する手法を提案する。この手法は、顕微鏡の3次元の振動を計測するために、傾いた撮像素子を用いた高速視覚フィードバックを利用する。さらに、この手法を実装した評価用システムを製作した。実験によって、手で持って顕微鏡観察をしたときの取得画像を安定化できることを確かめた。

てモバイル顕微鏡が実現できればその実用性はきわめて高い。

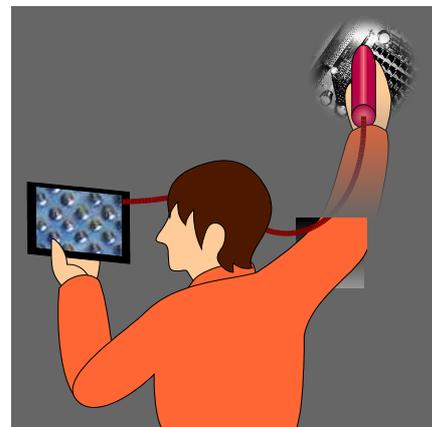


図1 モバイル顕微鏡使用予想図

1 はじめに

現在、顕微鏡に対物レンズ・鏡筒・撮像素子・照明を組み込んだ、片手で持てる小型顕微鏡が複数の企業より市販されている [2]。ところが、このような顕微鏡を手を持って見たい場所にあてても、像がぶれたりぼやけたりしてしまい正常な観察が難しい。これは、顕微鏡の観察可能領域が微小であるため、手のゆれによる顕微鏡位置のわずかな変化が像面で拡大されてしまうことに原因がある。特に光学倍率が高くなるとこの性質が顕著になり、顕微鏡本体をステージに据えつけないと対象の観察ができない。

そこで、手の振動によって生じる顕微鏡の振動を計測し、顕微鏡の焦点面位置を動的に制御することで、取得画像の安定化を行う機能を持った「モバイル顕微鏡」を提案する。図1に示すように、この顕微鏡を実現することで、観察場所を選ばず、手の届く範囲の物体表面の任意の点が観察対象となる。このため、建築物など取り外しが難しい大きな構造物の表面や、ジェットエンジンのように入り組んだ構造物内部の微細な欠陥などを迅速に計測することが可能になり、各種検査の信頼性や効率の向上を実現できると考えられる。したがっ

モバイル顕微鏡実現のためには、顕微鏡本体の観察対象に対する振動の補正が必要である。そのため顕微鏡本体の変位を計測しなくてはならない。

顕微鏡の変位には、3次元方向の平行移動と各軸まわりの回転の計6自由度がある。光軸に垂直な2軸のまわりの回転は、顕微鏡の作動距離が小さく、回転角度が平行移動量に比べて小さいために無視できる。光軸に垂直な軸のまわりの回転も回転角度が小さく、生じた場合も簡単に補正が可能である。よって、顕微鏡を手で持って対象の一点を観察する際に、画像のぶれやゆれの主な原因となるのは3次元方向の平行移動のみである。

手の振動による画像のぶれやぼけを補正する技術として、カメラ向け手ぶれ補正技術 [9][4] がある。しかしこれらのカメラ向け手ぶれ補正技術は被写界深度が大きいカメラ向けに構築されているため、光軸方向の平行移動による焦点のずれが考慮されていない。被写界深度が非常に狭い顕微鏡には画像方向のブレ補正に加えて光軸方向の補正も必要となるため、これらの技術は用いることはできない。

予備実験により計測された手の振動の速度は約

6mm/sであった。また、画像の安定のためには μm オーダーの精度で観察範囲を一定に保つ必要がある。したがって、計測の時間間隔は、6mm/sで動く対象が数 μm だけ移動するよりも短くなくてはならない。このため、センサには数百～数千Hzで計測するだけの高速性が求められることになる。

以上のことより、本稿では、顕微鏡に撮像素子を光軸に対して傾けた高速ビジョンを取り付けることで、その取得画像から顕微鏡本体の3次元方向の変位を計測し、フィードバックする手法を提案する。また、この手法を実装したシステムを構築して画像安定化実験を行うことにより、提案手法の有効性を示す。

この手法は、顕微鏡像の高速ビジュアルフィードバックにより様々な制御を行うマイクロビジュアルフィードバック(MVF)[8]の概念を拡張したものに当たる。

本手法の利点として、計測の際に付加的な画像処理を行うことにより、ライトレースなどの高次機能を付加できる点が挙げられる。

2 画像安定化手法の原理

本手法では、顕微鏡を手で持った時の手の振動による取得画像の振動を安定化するために、顕微鏡に取り付けた高速ビジョンによって取得した画像から、顕微鏡の3次元変位を推定し、顕微鏡の焦点面位置をフィードバック制御する。これによって、注視したい領域が常に顕微鏡の撮像素子上に投影され、画像の安定化が実現できる。

この手法にはまず、「画像から顕微鏡の3次元変位推定」を行うことが必要である。以下ではこの顕微鏡3次元変位推定の原理を説明する。

モバイル顕微鏡はそのコンパクト性が重要なため、高速ビジョンをひとつだけ用いて、顕微鏡の変位推定を行うことにした。また、顕微鏡で観察する対象は光軸に垂直な平面であると近似できるとした。

ひとつの高速ビジョンから同時に得られる画像は1枚のみである。光軸に垂直な平面撮像素子を使ったとき、1枚の画像からは、顕微鏡の光軸垂直方向(対象の平面方向)の変位の情報が得られる。しかし光軸方向の変位(顕微鏡と対象が光軸方向にどれだけ離れているか)を知ることができない。

そこで、一枚の画像から光軸方向及び光軸垂直方向の顕微鏡の変位を推定するために、顕微鏡の光軸に対して撮像素子を傾けて設置した。そうすることで、顕微鏡光軸方向の変位を、画像中の焦点の合っている部分の位置から推定できる。さらに焦点の合っている部分はある程度の広がりをもつため、焦点の合っている範囲内で光軸垂直方向の変位を推定できる。

光学系を光軸から傾けるというコンセプトは、

Carpenter[1]が提案し、Scheimpflug[5]が定式化した。また、撮像面を傾けて、対象の3次元的な構造を計測する先行研究[3]があるが、本研究は光軸に垂直な2方向の変位も同時に検出する必要があるところが異なる。

2.1 光軸方向の変位推定

顕微鏡で光軸に垂直な対象を観察すると、光軸に対して傾いた撮像素子上では、図2のように傾き方向に焦点の合っている部分と合っていない部分が生じる。したがって、取得画像中の焦点の合っている位置を検出することにより、光軸方向の顕微鏡の変位が推定できる。焦点の合っている位置の検出は、画像全体にハイパスフィルタをかけ、得られた画像の重心を計算することによって行う。

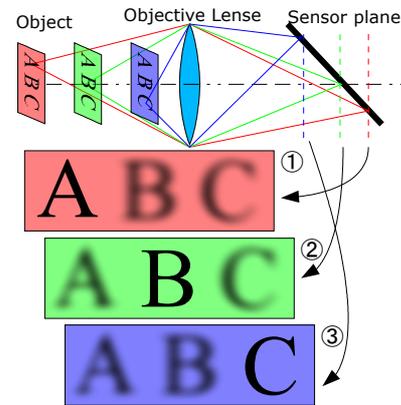


図2 光軸方向の変位に応じて撮像面での焦点の合う位置が変化する

いま図3上のように、撮像素子と像面が、撮像素子の中心で交差する状況を考える。図のように z 軸と ζ 軸をとる。撮像素子の光軸からの傾きを θ 、ピクセル間距離を d 、光学倍率を M とする。このとき、図3右上のように、撮像素子によって得られた画像上では、画

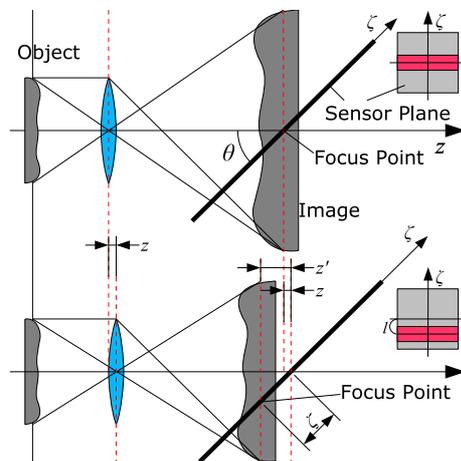


図3 光軸方向変位推定の模式図

像中心の近くの帯状の部分 (図中の赤い部分) に焦点が合う。

図3下のように、顕微鏡が、光軸に沿って対象と反対方向に z だけ変位したとする。すると像の位置はレンズ側に近づく。

このとき、取得画像上で焦点の合う帯状部分は $-z$ 方向へずれる。帯状部分が画像中央から l ピクセルずれていたとする。撮像素子と像面の交差する位置が ζ 、像面の光軸方向の変位の大きさが z' とすると、以下の関係が成り立つ。

$$\zeta = ld \quad (1)$$

$$\zeta = -\frac{z'}{\cos \theta} \quad (2)$$

$$z' = M^2 z \quad (3)$$

$$z = \frac{-ld \cos \theta}{M^2} \quad (4)$$

したがって、画像上での焦点の位置 l から、顕微鏡の光軸方向の変位の大きさ z がわかる。

2.2 光軸垂直方向の変位推定

光軸に垂直な2方向の変位は、焦点の合っている部分でのテンプレートマッチング [7] によって推定する。

この推定では、画像中の一部分をテンプレートとして保存し、次々に流れてくる画像に対してマッチングを行い、テンプレートが画像中でどの部分にあたるかを二次元座標で表す。画像とテンプレートとのマッチする度合いの評価指標は、相関演算の結果とする。図4のように軸を取り、テンプレート画像を T (大きさ $a \times b$)、推定を行うための画像を I (大きさ $A \times B$) という行列で表す。 I 中の座標 (x, y) に T の座標 $(0, 0)$ がマッチする度合い $N(x, y)$ は、

$$N(x, y) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b I(x+i, y+j)T(i, j) \quad (5)$$

となる。

図4の下段中央の図のように、 N の最大値が $N(m, n)$ だと推定されたとする。ここで図5の状況を考える。撮像素子のピクセル間距離は d 、光学倍率は M である。すると撮像素子上のテンプレートがマッチした位置 ξ 、顕微鏡の x 軸方向の変位 x は以下のように表される。

$$\xi = -md \quad (6)$$

$$\xi = Mx \quad (7)$$

$$x = \frac{-md}{M} \quad (8)$$

y 軸方向の変位も同様に

$$y = \frac{-nd}{M} \quad (9)$$

となり、画像中のテンプレートの位置から、顕微鏡の光軸垂直方向の変位の向きと大きさがわかる。

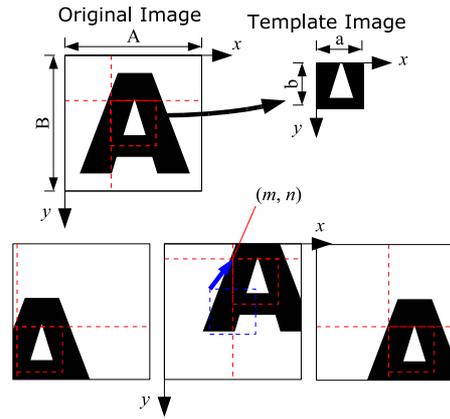


図4 テンプレートマッチング

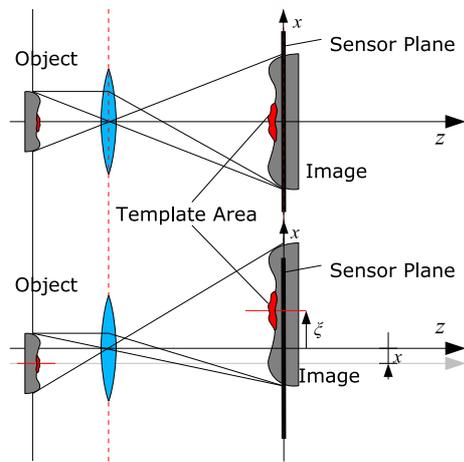


図5 テンプレートがマッチした画像上の位置からの変位推定

2.3 3方向の変位推定による画像安定化

以上の顕微鏡変位推定を組み合わせることで画像安定化を行う。この際に、二つの段階を踏んで最終的に注視点を固定する画像安定化が達成される。

2.3.1 第1段階：焦点合わせ制御

前述の光軸方向変位推定によって顕微鏡が光軸方向にどれだけ変位したかを推定し、それを打ち消すように顕微鏡を制御する。これによって、取得画像の中心付近の焦点を常に合わせることができる。

2.3.2 第2段階：注視点の固定制御

第1段階が行われると、画像の中心付近は焦点が合っている。そこで、画像中心付近だけでテンプレートマッチングを行い、光軸垂直方向変位を推定する。そして

この変位を打ち消すことで、テンプレートが取得された対象の部分を注視し続けることが達成される。

第2段階は、第1段階が行われた後に開始されなくてはならない。また、第2段階においても注視点固定制御と焦点合わせ制御が同時に行われている必要がある。なぜなら画像の中心部分に焦点があっていないと鮮明なテンプレートが取得できず、光軸垂直方向変位推定においてエラーが発生するからである。

3 評価用システム

本手法の評価のための図6に示すようなシステムを試作した。顕微鏡視野の動的制御手法はまだ開発していないので、顕微鏡には制御のためのアクチュエータを装備せず、アクチュエータによって制御するのは観察対象を固定した可動ステージである。最終的なモバイル顕微鏡では光学部品を制御し顕微鏡内部の光の経路を変えて、撮像素子上に注視したい領域の像を結ばせる予定である。しかしこの評価用システムでは顕微鏡に対して対象の相対位置を保つ制御を行い、顕微鏡が常に注視したい領域を見るようにする。この違いを無視すれば、変位推定手法の評価においては評価用システムで実際のモバイル顕微鏡を代替できる。

3.1 主要な構成

システムの主要な構成について述べる。まず図7に示す顕微鏡部分は、2.7倍の対物レンズと落射ハロゲン照明及びCCDイメージセンサを組み合わせることで製作した。そして、鏡筒に高速ビジョンを光軸に対して70度傾けて取り付け、ビームスプリッタによってCCDイメージセンサと高速ビジョンが同じ画像を取得できるようにした。表2に示す高速ビジョン(浜松ホトニクス製プロファイルイメージャ[6])によって得られた画像は画像処理コンピュータへ送られ、光軸方向及び光軸垂直方向の変位推定を行う。この変位の情報は共有メモリを介して制御コンピュータへ送られる。制御コンピュータ内のPID位置制御器は、顕微鏡の変位情報とステージの現在の位置から、ステージの目標位置を計算し、それを制御電圧信号に変換してサーボドライバへ伝える。そしてサーボドライバのモータ制御によりステージが目標位置へと動く。

3.2 高速ビジョン

本システムでは、顕微鏡の光学倍率を2.7倍、撮像素子の光軸に対する傾きを70度とした。また、手の振動の速度は6mm/s程度であることを、予備実験によって計測した。目的である安定な画像を取得することについて、画像安定化を施したとき、除去し切れなかった振動を以下の値以内に抑えられれば安定な画像であると定義し、これを目標とした。すなわち光軸垂直方向についてはCCDカメラの2ピクセル分(被写界におい

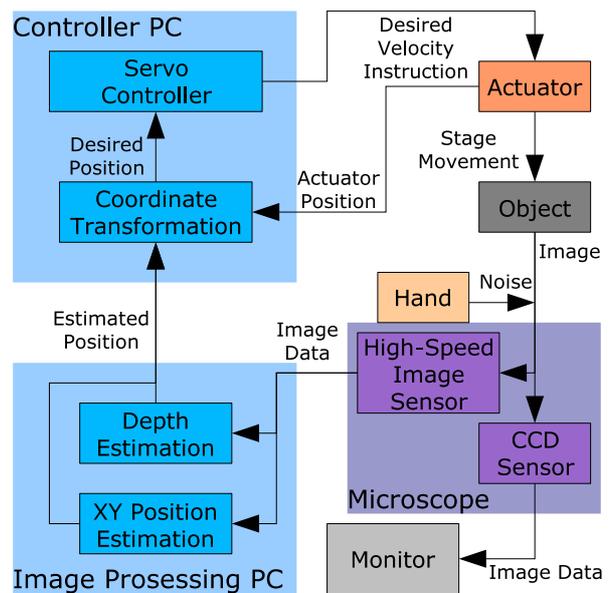


図6 評価用システム接続図

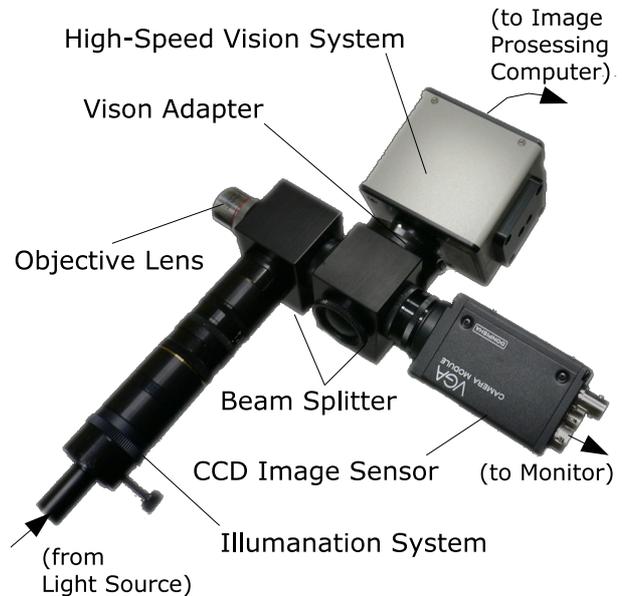


図7 評価用システムの顕微鏡部分写真

ては $\pm 7.3\mu\text{m}$ に相当)以内、光軸方向についてはCCDカメラの被写界深度の $\frac{1}{2}$ ($\pm 3\mu\text{m}$ に相当)以内の誤差を目標とした。

これらの条件及び式4、8、9から、必要となるビジョンの性能が表1のように求められる。

従って、要求性能を満たす表2に挙げた高速ビジョンを使用した。また高速ビジョンの傾き方向の取得画像の長さを320ピクセル、光軸垂直方向の変位推定の際の相関演算を行う範囲は 20×20 ピクセルとした。

光軸垂直方向における制約	
ピクセル間距離	$d < Mx = 7.3 \times 2.7 \approx 20 [\mu\text{m}]$
フレームレート	$f > \frac{6 \times 10^3}{7.3} \approx 818 [\text{fps}]$
光軸方向における制約	
ピクセル間距離	$d < \frac{M^2 z}{\cos \theta} = \frac{3 \times 2.7^2}{\cos 70} \approx 64 [\mu\text{m}]$
フレームレート	$f > \frac{6 \times 10^3}{3} = 2000 [\text{fps}]$

表 1 高速ビジョンの要求仕様

素子サイズ	13.0 × 14.3 mm
ピクセル間距離	20 × 20 μm
アレイサイズ	512 × 512 のうち 320 × 64 を使用
フレームレート	2000 fps
階調	8bits

表 2 使用した高速ビジョンの仕様

4 評価用システムの手持ち観察実験

画像安定化手法の有効性の検証のために、手で顕微鏡を持って金属ねじの頭を対象として観察し、同時にこの評価用システムによって画像安定化を行うという実験を行った。図 8 に結果を示す。図 8 の上段 (i) は画像安定化制御を行わないときの顕微鏡取得画像である。画像がぶれたりぼやけたりしている。図 8 下段 (ii) は画像安定化制御を行ったときの顕微鏡取得画像である。フォーカスが合い、同じ視野を観察できていることがわかる。この結果より、手の振動による顕微鏡の変位推定手法の有効性が示された。

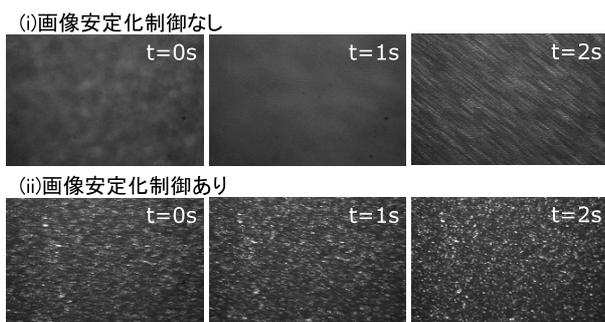


図 8 画像安定化実験結果：(i) は画像安定化なし、(ii) は画像安定化あり

5 まとめと今後の課題

5.1 まとめ

本論文では、まずモバイル顕微鏡のコンセプトを提案した。これは手で持って観察に使用されることを想定した顕微鏡である。手の振動による顕微鏡の変位を

計測し、顕微鏡に内蔵したアクチュエータによって変位がキャンセルするように焦点面を制御するシステムが最終的な目標である。

このモバイル顕微鏡の実現のための画像安定化手法として、撮像面を斜めにした高速ビジョンによるビジュアルフィードバック制御を提案した。この制御に必要な画像からの顕微鏡の 3 次元変位推定を開発した。

そして、アクチュエータを顕微鏡に内蔵しない評価用システムを作成し、実験によってこの画像安定化手法により手で顕微鏡を持ったときの画像が安定化できることを示した。

5.2 今後の課題

目標とするモバイル顕微鏡では、評価用システムのように外部のアクチュエータに頼るのではなく、顕微鏡本体のみで画像安定化ができなくてはならない。したがって、手の振動のセンシングがある程度達成された次の段階として、顕微鏡本体に装備したアクチュエータによる振動制御を実現する必要がある。

類似の機能を実現している手法としては前述したカメラの手ブレ補正が挙げられる。カメラの手ブレ補正においてよく用いられるのは、光学系に挿入したブレ補正用のレンズを動かして、カメラの光軸方向の回転（ピッチ軸とヨー軸の回転）の振動を除去するというものである。しかし、モバイル顕微鏡では 3 次元方向の平行移動を除去しなくてはならないため、カメラの手ブレ補正手法をそのまま用いることはできない。

しかしながら、光学系に挿入したレンズなどを動かすことによって光路を制御するという概念は応用できる。振動の除去のためのレンズもしくは撮像素子を制御する方法を検討し、モバイル顕微鏡の実現を目指す予定である。

参考文献

- [1] Jules Carpenter. Improvements in enlarging or like cameras, 1901. British patent GB 1139/1901.
- [2] KEYENCE CORPORATION. マイクロスコープ (microscope)vhx-600 : 株式会社キーエンス, 2007. <http://www.vhx.jp/>, Online; accessed 6-February-2007.
- [3] Akira Ishii. 3-d shape measurement using a focused-section method. *Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 04, pp. 828–832, 2000.
- [4] C. Morimoto and R. Chellappa. Fast electronic digital image stabilization. *Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 03, p. 284, 1996.
- [5] Theodor Scheimpflug. Improved method and apparatus for the systematic alteration or distortion of plane pictures and images by means of lenses and mirrors for photography and for other purposes., 1904. British patent GB 1196/1904.

- [6] Yukinobu Sugiyama, Munenori Takumi, Haruyoshi Toyoda, Naohisa Mukozaka, Atsushi Ichori, Takayuki Kurashina, Yosuke Nakamura, Takashi Tonbe, and Seichiro Mizuno. A high-speed, profile data acquiring image sensor. *Digest of Technical Papers of IEEE International Solid-State Circuits Conference*, Vol. 1, No. 2, pp. 360–603, 6 2005.
- [7] 安居院猛, 長尾智晴. 画像の処理と認識, pp. 103–105. 昭晃堂, 初版 17 刷, 2005.
- [8] 奥寛雅, 石井抱, 石川正俊. マイクロビジュアルフィードバックシステム. 電子情報通信学会誌, Vol. J84-D-II, No. 6, pp. 994–1002, 2001.
- [9] 鷲巢晃一. すそ野を広げるカメラの手ブレ補正 その歴史と技術を振り返る. 日経エレクトロニクス, Vol. 2006.12.18, pp. 143–154, Dec 2006.