



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

A Fingertip-worn Device toward Augmentation of Sensory and Motor Skills in Micrometer-scale Environments

大伏仙泰¹⁾, 廣瀬雅治²⁾, 脇坂崇平²⁾, 笠原俊一²⁾, 檜山敦²⁾, 稲見昌彦²⁾

Noriyasu OBUSHI, Masaharu HIROSE, Sohei WAKISAKA, Shunichi KASAHARA, Atsushi HIYAMA, and
Masahiko INAMI

1) 東京大学 大学院学際情報学府 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, obushi@star.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

概要: 微小環境における人間の知覚・運動能力の拡張を目的に、指先搭載型の顕微鏡デバイスを提案する。先行研究では指先の移動量を拡大した変位の視覚フィードバックが指先運動の精度向上に寄与することが示されている。そこで本研究では顕微鏡による視覚フィードバックに着目する。これにより、肉眼で捉えられない微細な身体運動の可視化や顕微鏡画像に基づく微小環境の可触化を実現した。実験では指を傾ける動作がポインティング時間の短縮に有効であることが示された。

キーワード: 人間拡張, ウェアラブル, 顕微鏡

1. はじめに

タッチインターフェースの進展に伴い、人間の指がもつ運動能力に関する研究が行われている。先行研究では指の変位を拡大した視覚フィードバックにより、指先の巧緻さが向上する結果が得られている [1][2][3]。こうした成果は拡大鏡の使用により指の巧緻さが向上することを示唆する。しかし既存の顕微鏡の多くは観察対象の移動を前提としておらず、指先による微小な移動操作の実現を目的とする場合、必ずしも適切ではない。また、微小な指先の移動が実現できれば、視覚に加え微小環境における能動的触覚についても提示できる可能性がある。

以上の背景から、本稿では従来の顕微鏡が抱える制約に着目し、マイクロメートルオーダーの微小環境における人間の感覚・運動能力の拡張を目的とする新たな顕微鏡デバイスを提案する。本稿では図 1 に示す、感覚提示と移動操作の各々における能力拡張の取り組みについて報告する。

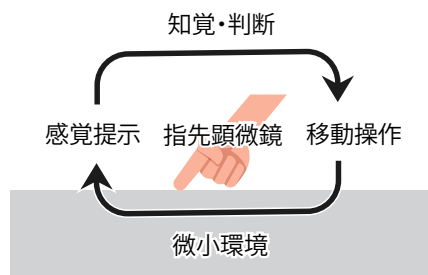


図 1: 提案デバイスをインターフェイスとする微小環境における身体の入出力

2. 関連研究

2.1 指の運動精度

身体運動の精緻性に関する研究は、神経心理学やユーザーインターフェースの分野を中心にこれまで多く行われてきた。指先運動の分解能について、DeNil ら [3] は指先位置の視覚フィードバックにより改善することを示した。さらに、Bohan ら [2] は拡大率を変化させた際に移動時の精度が向上することを示した。Berand ら [4] は画像処理に基づき運動の分解能を測定した。実験ではモニタ上で等倍の視覚フィードバックを行い、直線運動では 0.17 mm, 回転運動では 2.76° と結論付けた。

2.2 顕微鏡用操作インターフェイス

ヒューマン・コンピュータインタラクションの分野において、身体動作に基づく顕微鏡操作のインターフェイスが数多く提案されている。例えば Boulanger ら [5] は両手を用いた作業中における顕微鏡の操作支援を目的に、頭部の傾きを用いた操作インターフェイスを提案した。また Takashima ら [6] は顕微鏡から得られる拡大像をタブレット端末に表示し、両手で傾ける操作によりステージ台の角度を変化させるユーザーインターフェイスを提案した。これらの研究では顕微鏡の移動は機械が担う一方、手動による直接的な操作を目指す研究は少ない。

2.3 微小環境における力触覚の提示

視覚の拡大に加え、微小環境下の触覚提示に関する研究も行われている。マイクロメートルオーダーの微小な凹凸を指先で知覚可能にする装置として、触覚コンタクトレンズ [7] が挙げられる。この装置には微小な変位を増幅するピン

アレイが搭載されており、機械的な機構による触覚提示を行う。顕微鏡用に触覚を取り入れたインターフェイスやマイクロロマンピュレータも提案されており、*Nanomanipulator* [8] は走査トンネル顕微鏡と組み合わせることで原子単位の空間分解能での触覚提示を可能にする。

3. システム設計

指先がもつ微小な感覚・運動機能を拡張するため、図 1 で示したコンセプトに従い指先用のウェアラブル顕微鏡デバイスを構築した。本節では提案デバイスの構成要素である (1) 顕微鏡を実現する光学系 (2) 触覚ディスプレイ (3) 移動を支援する機構の 3 点における設計指針について述べる。

3.1 光学系

本研究で構築する顕微鏡デバイスは指先に装着した状態で表面に触れる操作での利用を前提とする。このため、利用時に表面に触れているような観察体験の実現は重要な要素である。そこで指に装着する顕微鏡デバイスの薄型化を図るため、顕微鏡の光学系として小型で高倍率な顕微鏡の光学系として知られるレーウエンフック式顕微鏡の原理を用いた。提案デバイスの光学系の構成を図 2 に示す。レーウエンフック式顕微鏡ではレンズとして小型で短焦点な特徴をもつボールレンズが用いられる。ボールレンズの直径 D と焦点距離 f の関係は以下の式で表される：

$$f = \frac{nD}{4(n-1)} = 0.73337D \quad (1)$$

ここで n は屈折率を表す。本デバイスではレンズのガラス素材として直径 0.8 mm の BK7 ガラス (屈折率 $n=1.5168$) を用い、その焦点距離は 0.587 mm と求められた。

一方、光学的制約により、算出された焦点距離より内側の領域における物体を撮影することはできないため、レンズと被写体の間には距離を設ける必要がある。この距離 t はレンズの直径 D 、焦点距離 f と撮像素子と後側焦点間の距離 z から以下の式で求められる：

$$t = \frac{f}{z} \cdot f + f - \frac{D}{2} \quad (2)$$

撮像素子はレンズの中心から 3.0 mm 離れた場所に配置した。これにより、 $t = 0.302$ mm となった。

3.2 触覚提示デバイス

光学系と同様の理由により、触覚提示デバイスについても小型化を図った。光学系は指の腹に配置するため、触覚デバイスの搭載部位として指の爪・腹のそれぞれについて検討し、プロトタイプを構築した。特に爪への触覚提示については、先行研究 [9] を参考に行った。また、指の腹への触覚提示は薄型化が容易で応答速度が高速なピエゾ素子を用いたプロトタイプも構築した (図 2)。

3.3 操作方法

本稿で提案する小型顕微鏡デバイスの移動操作は指先により行う。そこで指先による精密な移動に適した操作方法

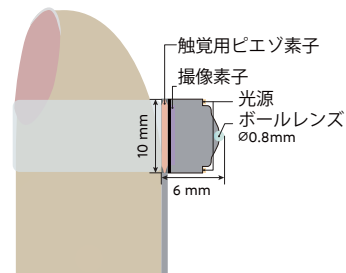


図 2: レーウエンフック式顕微鏡を用いたプロトタイプの詳細

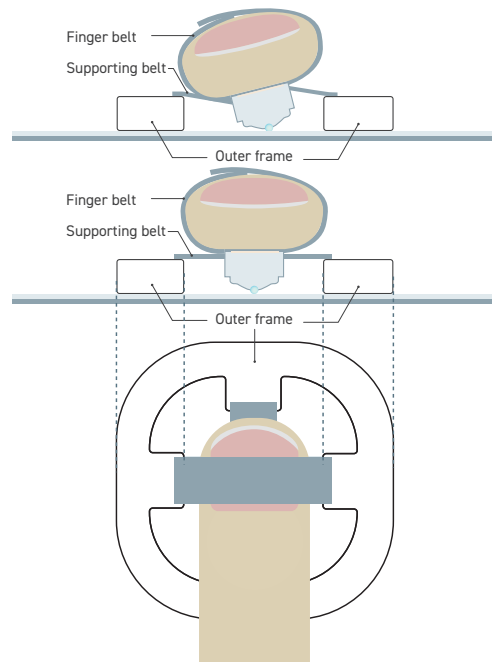


図 3: チルト動作 (上) とスライド動作 (下) による操作方法

について、プロトタイプを用いた予備的な検証を行った。初期のユーザーテストにおいて指先をスライドさせる動作を用いた結果、指先操作の器用さには個人差があり、意図した通りの移動ができない場合もあった。そこで新たに指先の回転動作を取り入れた操作手法を開発した。両者の操作方法を図 3 に示す。

スライド動作 デバイスの上に指の腹を載せ、指先と顕微鏡カメラをシリコン製のベルトで固定した状態でスライドさせることにより移動を行う。

チルト動作 スライド動作が指先の平行移動による操作であるのに対し、チルト動作は指先の回転動作を用いる。この操作方式では顕微鏡カメラの周囲に取り付けた枠を使用する。顕微鏡カメラと枠はシリコンのシートで接続されており、ユーザはデバイスを装着していない手で枠を抑えながらもう一方の指を回転させることで操作を行う。このとき、指先の回転動作が直線的な移動に変換される。スライド動作では移動する向きに指を動かすのに対し、チルト動作では指を傾ける向きとカメラの動く向きは逆になる。

3.4 触覚の生成

撮影した顕微鏡画像の輝度値の変化が定められた閾値を超過する毎に 20 Hz–100 Hz のノコギリ波を生成し、コンピュータから piezo ドライバおよび piezo 素子、あるいは爪に設置したリニア振動アクチュエータにそれぞれ出力することで濃淡の変化に基づく凹凸感の表現を行った。

4. 実験

提案した 2 通りの操作方法を比較するため、タスク時間の計測およびアンケートによる主観評価を行った。なお本実験では触覚フィードバックを行わず、拡大像の視覚フィードバックのみを行った。被験者は 22 歳から 41 歳 (中央値 25.5 歳) までの 8 名 (男性 5 名・女性 3 名) であった。

4.1 実験システム

光学系には先述のレーウエンフック式単レンズ顕微鏡を用いた。撮像素子には Raspberry Pi 3 Model B+ の CSI ポートに接続された 1/4 型の OmniVision Technologies 製 OV5647 を用い、映像をキャプチャボードでコンピュータに取り込み、画像処理の後 10.1 型液晶ディスプレイに表示した。カメラの解像度は 1296×972、ビデオレートは 42 Hz に設定した。また拡大倍率を撮影範囲と表示画面の大きさから算出したところ、前者が 400 μm×300 μm、後者が 180.8 mm×135.6 mm となり、その結果 452 倍と算出された。

4.2 実験方法

2 通りの操作方法について、指先の移動タスクに要する時間を計測し被験者内で比較した。また、タスク後に実施したアンケートでは 5 段階リッカート尺度による主観評価を 5 項目について行い、被験者内で比較した。

4.2.1 実験タスク

移動操作における指の移動時間を計測するため、シートゲージに印刷された直径 50 μm の黒丸が指での操作に応じて移動するように顕微鏡デバイスおよびシートゲージの位置を調整した後、装置一式を机の上に設置した。黒丸の中心座標はハフ変換によりリアルタイムに取得され、初期位置に到達してから目標位置に到達するまでの所要時間を 80 回繰り返し記録した。シートゲージと机の間には光源となるトレース台を設置し、像のコントラストの維持に努めた。被験者は椅子に座るように指示を受け、利き手を机に乗せた状態で人差し指により移動操作を行った。実験環境を図 4、5 に示す。

4.2.2 アンケートによる主観評価

評価項目として、指先のジェスチャ入力手法に関する先行研究 [10] を参考に、以下の 5 項目について 5 段階のリッカート尺度で評価した。

(1) 速く操作できる/(2) 正確に操作できる/(3) 楽しく操作できる/(4) シンプルに操作できる/(5) 習得が容易である

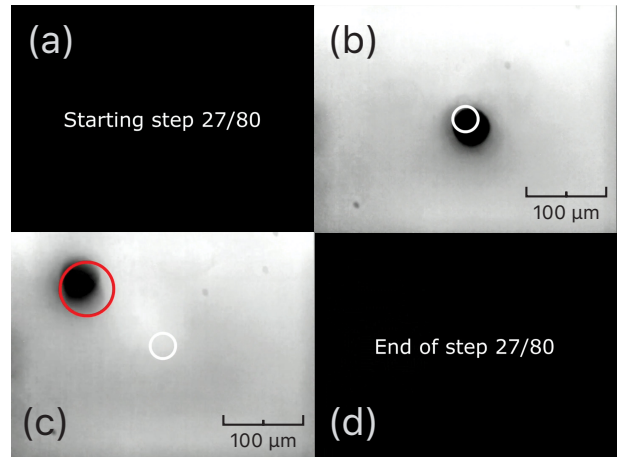


図 4: 実験における画面のシーケンス。(a) 試行の開始を示す画面。(b) ターゲットの初期位置を白丸で指示する画面。(c) ターゲットの初期位置への到達後、最終位置を赤丸で指示する画面。(d) 試行の終了を示す画面。

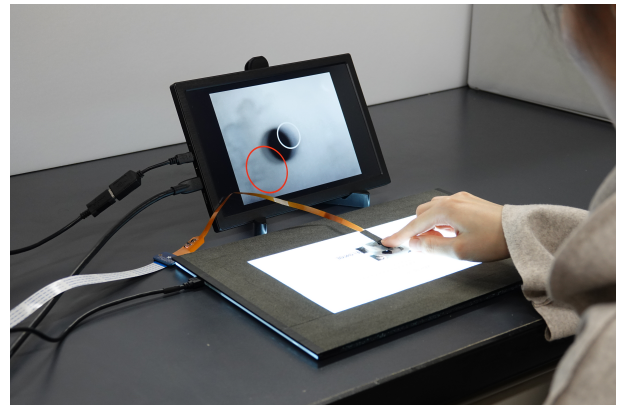


図 5: 実験中の被験者が操作を行う様子

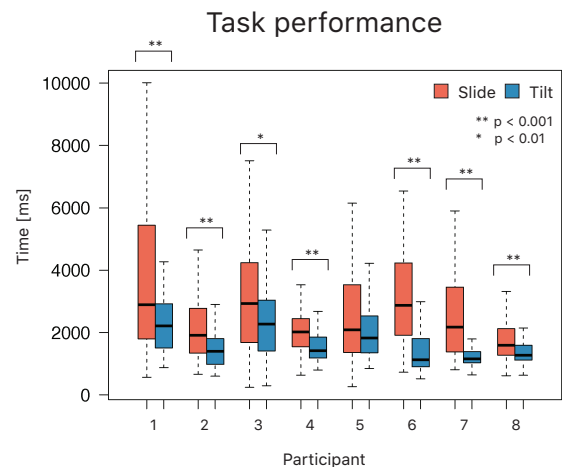


図 6: タスク時間の測定結果。縦軸はタスクに要した時間 (ミリ秒単位)、横軸は被験者である。外れ値は図から除外した。

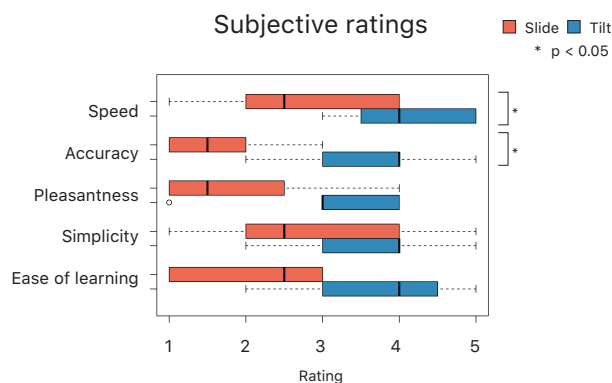


図 7: 主観評価の結果.

5. 結果と考察

5.1 タスク時間

実験結果を図 6 に示す。チルト動作のタスク時間 (中央値 1886.7 ms, IQR 1946.1 ms) がスライド動作のタスク時間 (中央値 1483.2 ms, IQR 1001.1 ms) を下回った。被験者内のタスク時間に関して Wilcoxon の符号順位検定を行ったところ、全員について $p = 0.01$ の有意水準で有意差が認められた。両者の結果を比較すると中央値の減少に比べ IQR (四分位範囲) の減少が目立つ。この要因として、スライド動作はチルト動作に比べ可動域が大きく、画面から見失う場合が比較的多かったためだと考えられる。

5.2 主観評価

アンケートによる主観評価の結果を図 7 に示す。多くの項目においてチルト動作がスライド動作を上回る傾向が見られた。Wilcoxon の符号順位検定の結果より移動時の速度と精度について $p = 0.05$ の有意水準で有意差が認められた。一方、シンプルさについては大きな差が見られなかった。この要因として、チルト動作による操作では指を傾ける向きと逆の向きに画面が遷移するためであると考えられる。

6. おわりに

本稿では人間の微小環境における感覚・運動機能の拡張を目的に、指先装着型顕微鏡デバイスを提案した。身体の入出力に着目し、微小環境における指先の精密な移動支援と視触覚の提示方法の各々について基礎的な検討を行った。実験では指をスライドさせる方式に加え、移動支援の手法として指を傾ける方式を提案し、その効果を比較するために微小距離の移動に要する時間を測定した。その結果、指先を傾ける動作が移動時間の短縮に有効であることが示された。今後は微小環境での触覚の提示手法に関する実験やそのアプリケーションの開発を進めていく所存である。

謝辞 本研究は、JST ERATO JPMJER1701 の支援を受けたものである。

参考文献

[1] Pär-Anders Albinsson and Shumin Zhai. High precision touch screen interaction. In *Proceedings of the*

SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '03, pp. 105–112, New York, NY, USA, 2003. ACM.

- [2] Michael Bohan, Daniel S. McConnell, Alex Charro, and Shelby G. Thompson. The effects of visual magnification and physical movement scale on the manipulation of a tool with indirect vision. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Vol. 16, No. 1, pp. 33–44, 2010.
- [3] Luc F. De Nil and Sophie J. Lafaille. Jaw and Finger Movement Accuracy under Visual and Nonvisual Feedback Conditions. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 95, No. 3-suppl, pp. 1129–1140, 2002.
- [4] François Bérard and Amélie Rochet-Capellan. Measuring the linear and rotational user precision in touch pointing. In *Proceedings of the 2012 ACM international conference on Interactive tabletops and surfaces - ITS '12*, p. 183, New York, New York, USA, 2012. ACM Press.
- [5] Cati N. Boulanger (Vaucelle), Paul Dietz, and Steven Bathiche. Scopemate: A tracking inspection microscope. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology*, UIST '11 Adjunct, pp. 3–4, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [6] Tomomi Takashina, Hitoshi Kawai, and Yuji Koku-mai. Tangible microscope with intuitive stage control interface. Vol. 9299, pp. 603–606, 09 2015.
- [7] A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue, R. Kikuuwe, and H. Fujimoto. Touchlens: touch enhancing tool. In *IEEE Conference on Robotics and Automation, 2004. TExCRA Technical Exhibition Based.*, pp. 71–72, Nov 2004.
- [8] Russell M. Taylor, Warren Robinett, Vernon L. Chi, Frederick P. Brooks, William V. Wright, R. Stanley Williams, and Erik J. Snyder. The nanomanipulator. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '93*, pp. 127–134, New York, New York, USA, 1993. ACM Press.
- [9] Hideyuki Ando, Takeshi Miki, Masahiko Inami, and Taro Maeda. SmartFinger. In *ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications on - SIGGRAPH '02*, Vol. 17, p. 78, New York, New York, USA, 2002. ACM Press.
- [10] Anne Roudaut, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. MicroRolls. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems - CHI 09*, p. 927, New York, New York, USA, 2009. ACM Press.