

回転マイクロフィンガーのビジュアルフィードバック制御

Visual Feedback Control of Rotational Micro Fingers

○三田将幸, 李秀雄, 井上健司

○Masayuki Santa, Suwoong Lee, Kenji Inoue

山形大学
Yamagata University

キーワード: マイクロマニピュレーション(micromanipulation), ビジュアルフィードバック(visual feedback)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学大学院理工学研究科応用生命システム工学専攻
井上健司, Tel & Fax: 0238-26-3335, E-mail: inoue@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

バイオ分野における進展に伴い、顕微鏡下で細胞の位置姿勢を自在に制御できるシステムが求められている。著者らは、ガラス棒の指2本を使って微小物体の把持・移動・回転を行うマイクロフィンガーを開発している[1,2]。各指は、指先の並進3自由度と指の軸回りの回転1自由度を持つ。並進3自由度は3個の直動ステージで、回転1自由度は1個の回転ステージで駆動される。指を軸回りに回転させる場合、回転ステージの回転軸と指の軸のずれ(偏心)のため、回転ステージを回しただけでは、指先の3次元位置がずれてしまう。そこで、この位置誤差を打ち消すように3個の直動ステージを動かす、指を軸回りに回転させる必要がある。これまででは、指の回転角と直動ステージによる指先位置の補正量の関係を予め人手や自動で測定し、補正式を求めていた[2]。しかし、指を交換するたびに補正式を測定しなおす必要があるという問題があった。

本研究では、ビジュアルフィードバック制御により実時間で指先位置を制御し、偏心による位置誤差を補正する方法を提案する。

2. 回転マイクロフィンガー

開発中の回転マイクロフィンガーを図1に示す。各指は、直動ステージ SGSP20-35(XY), SGSP20-35(X)(シグマ光機)による指先の並進3自由度と、モータ SP5241-1AA0(多摩川精機)を用いた回転ステージによる指の軸回りの回転1自由度の4自由度を持つ。直動ステージの分解能は1[μm]、回転ステージの分解能は0.36[deg]である。8個のステージは、コンピュータから8軸パルスモーションコントローラ PCI-7212C(インタフェース)を介して位置制御する。回転ステージにインジェクションホルダー HI-7(成茂科学器械研究所)を固定し、指に相当するガラス棒

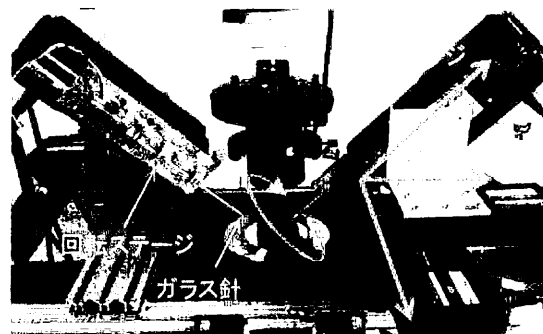


図1 回転マイクロフィンガー

をホルダーの先に付ける。ガラス棒の先端は直径100[μm]程度に加工してある。

3. ビジュアルフィードバック制御

3.1 指先の検出

本研究では、顕微鏡の焦点面を xy (図1の横方向が x)、垂直方向を z とし、 xy 平面内の指先の位置制御を行う。

指先位置を制御するには、顕微鏡画像から指先位置を計測する必要がある。そこで、テンプレートマッチング法により指先を検出する。テンプレートマッチングを行なっているときの顕微鏡画像と指先テンプレート画像を図2に示す。顕微鏡画像上の白枠がテンプレートと一致した指先部分で、白枠の右下角の座標 $(x, y)[\mu\text{m}]$ を取得する。この角と指先の位置関係は一定なので、この角を制御すれば指先を制御できる。以後、便宜上 (x, y) を指先位置と呼ぶ。なお、画像上の単位は[pixel]なので、これを[μm]に換算する。換算係数は予め求めておく。

3.2 フィードバック制御

指先位置 (x, y) の目標位置を $(x_d, y_d)[\mu\text{m}]$ 、ステージのコントローラに入力する指令位置を $(x_c, y_c)[\mu\text{m}]$ 、時刻を $t[\text{s}]$ 、制御周期を $\Delta t[\text{s}]$ とする。 x 方向の制御則を示す。

$$x_c(t + \Delta t) = x_c(t) + \Delta x_c \quad (1)$$

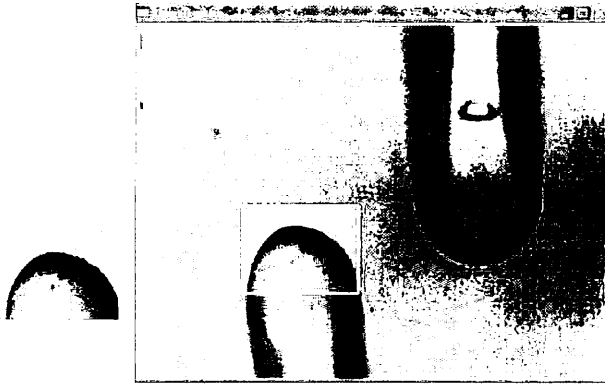


図2 テンプレートマッチング

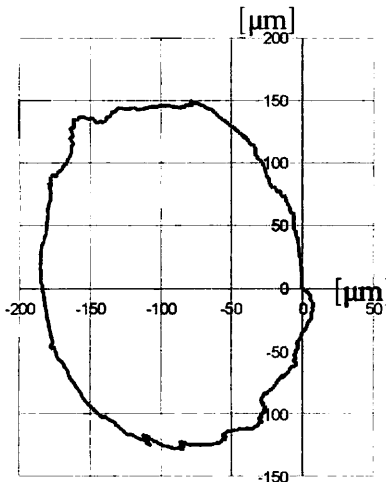


図3 補正前の指先の軌跡

$$\begin{aligned} \Delta x_c = & K_P [x_d(t) - x(t)] - K_D \dot{x}(t) \\ & + K_I \int_0^t [x_d(\tau) - x(\tau)] d\tau \\ & + [x_d(t + \Delta t) - x_d(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)で指令位置の補正量 Δx_c [μm] を計算し、式(1)で求めた $x_c(t + \Delta t)$ を指令位置としてコントローラに入力し、ステージを動かす。

式(2)の右辺第1～3項は偏心等による位置誤差に対するPID補償、第4項は目標位置の変化に伴うフィードフォワード補償である。 K_P 、 K_D 、 K_I は各フィードバックゲインを表す。速度は

$$\dot{x}(t) \approx [x(t) - x(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (3)$$

で差分近似する。 y 方向についても同様の制御則を用いる。

図1のように、指は xy 平面に対して $45[\text{deg}]$ 傾いているため、偏心によって生じる指先の z 方向の位置誤差は x 方向の位置誤差と一致する。そこで、 z 方向の指令位置には、 x 方向と同じ補正量 Δx_c を加算する。

4. 偏心補正実験

4.1 偏心補正前の回転

回転始めの指先位置を原点とし、回転による

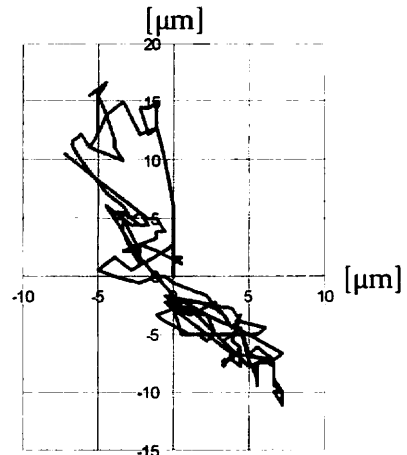


図4 補正後の指先の軌跡

指先の原点からの位置誤差を計測した。

フィードバック制御による補正を行わずに、回転速度 $36[\text{deg/s}]$ で指を回転したときの指先の軌跡を図3に示す。実際は、補正せずに指を回転すると指先が顕微鏡画像から外れてしまい、位置を計測できない。そこで、指先位置の実測値 (x, y) にフィードバック制御による補正量 $(\Delta x_c, \Delta y_c)$ を加えることで軌跡を求めた。

図から、補正しないときの原点から位置誤差は、最大 $210.1[\mu\text{m}]$ 、平均 $135.5[\mu\text{m}]$ であった。

4.2 偏心補正後の回転

フィードバック制御による補正を行いながら、前節と同じ回転速度で指を回転したときの指先の軌跡を図4に示す。制御周期は $20[\text{ms}]$ 、画像の計測周期は $60[\text{ms}]$ で、フィードバックゲインは実験的に決定した。図3と図4ではスケールが異なっている。

図から、補正したときの原点からの位置誤差は、最大 $17.2[\mu\text{m}]$ 、平均 $7.2[\mu\text{m}]$ であった。

5. おわりに

回転マイクロフィンガーの指先位置をビジュアルフィードバック制御し、位置誤差を実時間で補正する方法を提案した。実験の結果、偏心によって生じる指先の位置誤差が、補正しない場合に比べて最大値で 8.2% 、平均値で 5.3% に縮小できた。この方法は偏心補正のための事前処理を必要としないため、作業効率を向上できる。今後の課題は、指先検出の精度向上と指先誤差の更なる縮小である。

参考文献

- [1] Y. Matsuzaki, et al.: "Manipulation of Micro-Scale Objects Using Micro Hand with Two Rotational Fingers", Proc. MHS 2009, pp.438-443, 2009.
- [2] 井上 他: "回転マイクロフィンガーの偏心補正の自動化", 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2D2-6, 2011.