

磁力を用いた無電力変位縮小機構の基本特性

野村 健作*

Fundamental Characteristics of Non-power Displacement Reduction Mechanism using Magnetic Force

NOMURA Kensaku

In this research, we reviewed the existing link mechanism and proposed a displacement reduction mechanism using magnetic force. This mechanism consists of a single body and can reduce the movement of the fingertips of the order of centimeters to the order of micrometers without electric power. And it has a structure that makes it difficult for camera shake to be transmitted. We have examined the fundamental characteristics of this mechanism and how to adjust the characteristics of the generated displacement, the reduction rate of in the displacement, and the generated force in order to accommodate various microscopic works.

Key Words: Microscopic Work, Displacement Reduction Mechanism, Magnetic Mechanism, Non-Power Device

1. 緒 言

顕微鏡下で物を操作する微細作業ツールはバイオ、医療、材料などの分野で幅広く活用され、対象とする微小物の大きさや操作の目的に応じて様々な形態をなしている¹⁾。人が指先を器用に動かして針やピンセットを操作する作業はその一部である。ルーペによって拡大された対象物に細かな操作を行うには熟練した技能が求められ、独自の専用ツールを使うこともある。人がツールを介してダイレクトに微小物を操作できるのは 10^{-4}m ~ 10^{-3}m であり、それ以下の微小物に対しては精密ステージ上に設置して光学顕微鏡で視認しながら操作することになる。この際、外来振動を絶縁するのはもちろんのこと、手振れが伝わらないように指先の動きを縮小して顕微鏡下の微小空間で再現する変位縮小機構が作業の成否をわける重要なツールとなる。

人の動きを変位縮小して対象物を操作する代表的な装置に手術支援ロボット da Vinci²⁾がある。低侵襲な腹腔鏡手術により患者の早期社会復帰を可能とするので、症例数が増加してきている。腹腔鏡手術は従来の開腹手術に比べて、医師には手技に細かなスキルが必要で高難度手術となっている。Da Vinci は、内視鏡で視認しながら、比較的自由にアーム先端を操作できるので手術の正確さが上がり、従来では困難と考えられていたケースも手術でき

るようになるなど、メリットが多い。da Vinci が腹腔鏡手術の難易度を下げた要因の一つに医師の動きを $1/2$ 倍~ $1/5$ 倍にしてアームに伝えるモーションスケールを持っていることである。大雑把な動きで血管の縫合や切除などの繊細な作業ができることは医師にとって大きな利点となっている。また、顕微鏡下で行う微細作業には、圧電素子の発生変位をリンク機構によって変位変換する機構が普及している。原子間力顕微鏡を用いた先端研究³⁾にも基盤技術として不可欠な装置として機能している。

一方、メカニカルなリンク機構による変位縮小機構は古くから存在し、今でも人の動きがダイレクトに対象物へ伝わることの操作感の良さや無電力で小型化できることから様々な作業に利用されている。最近では、圧電素子の変位量を拡大する変位拡大機構としても利用され⁴⁾、工夫しだいでリンク機構の潜在的活用例はまだ多く存在すると考えられる。しかし、対偶での遊びや摩擦のあるリンク機構には位置決め性能に限界があり、マイクロメートルオーダーの微細作業にはリンク連結部に課題が残されている。

本研究では、これまでのメカニカルなリンク機構による変位縮小機構を見直し、磁力を用いた無電力変位縮小機構を提案する。本機構は、現存技術では困難とされる数 cm の指先の動きをマイクロメートルオーダーへ単一体機構で変位縮小できる原理を有し、手振れが伝わりにくい構造となっている。これらの特徴を実験的に検証するとともに、様々な微細作業に対応するために発生変位や変位縮小率の

原稿受付 令和3年9月3日

*総合理工学科 機械システム系

調整方法および発生力特性について考察する。

2. 変位縮小機構

図1に代表的な変位縮小機構を示す⁵⁾。図1(a)は手術器具として使われる鉗子であり、この場合の変位縮小率(モーションスケール)は刃先と指穴の部位の回転支持部からの距離比になる。図1(b)は原画を縮小・拡大転写するパンタグラフ機構を示している。製図用具として利用されていたが、CADの普及によりみられなくなっている。しかし、微細作業用ツールとしてパンタグラフ機構を利用したマイクロマニピュレータ(例えば、SINGER INSTRUMENT Mk1 Micromanipulator)が開発され、直感的操作が可能なマニピュレータとして注目されている。これらは、リンク機構を使って指先の動きを縮小するには適しているが、リンク長の比率を変えても1/10以下の縮小率を得るのは困難と言える。また、支持部の遊びや摩擦からスティックスリップが発生することから分解能に限界がありマイクロメートルオーダーの微細作業には向いていない。

図1(c)はヒンジをもつ弾性体機構を piezo 素子で押し付けて変形させる変位縮小機構である。piezo 素子の発生変位には理論的分解能に限界がなく、ナノメートルオーダーの位置決め性能が得られる超精密ステージ⁶⁾などに利用されている。piezo 素子は高分解能、高速応答、高出力な特性をもち、精密機器をはじめとしてその用途は幅広いが、引っ張りや曲げ荷重に対して脆弱な特性があり取扱いに注意が必要であることと無電力では利用できない欠点もある。

ここで、光学顕微鏡下で行われる微細作業に必要な変位縮小機構に求められる性能についてまとめる。大きさ $10\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ の動植物細胞を対象とする。

- 1) 指先の $1\text{cm} \sim 3\text{cm}$ の動きを $10 \sim 30\ \mu\text{m}$ に変位縮小できること(変位縮小率 $1/1000$ 倍)。
- 2) 光学顕微鏡のステージ上に搭載できるコンパクトなサイズであること。
- 3) 手振れが伝わらない機構で構成されていること。
- 4) 光学顕微鏡と同等の分解能(約 $0.2\ \mu\text{m}$)を有していること。

リンク機構(図1(a)や(b))では、コンパクト化は可能でも、変位縮小率と分解能が不足するのに加えて手振れがダイレクトに伝わるので、条件を満足できない。piezo 素子による弾性体機構(図1(c))では、指先の動きを一旦電気的な信号に変換するので手振れが伝わらない構成で実現できて分解能も十分な性能を有しているが、piezo 素子の駆動のた

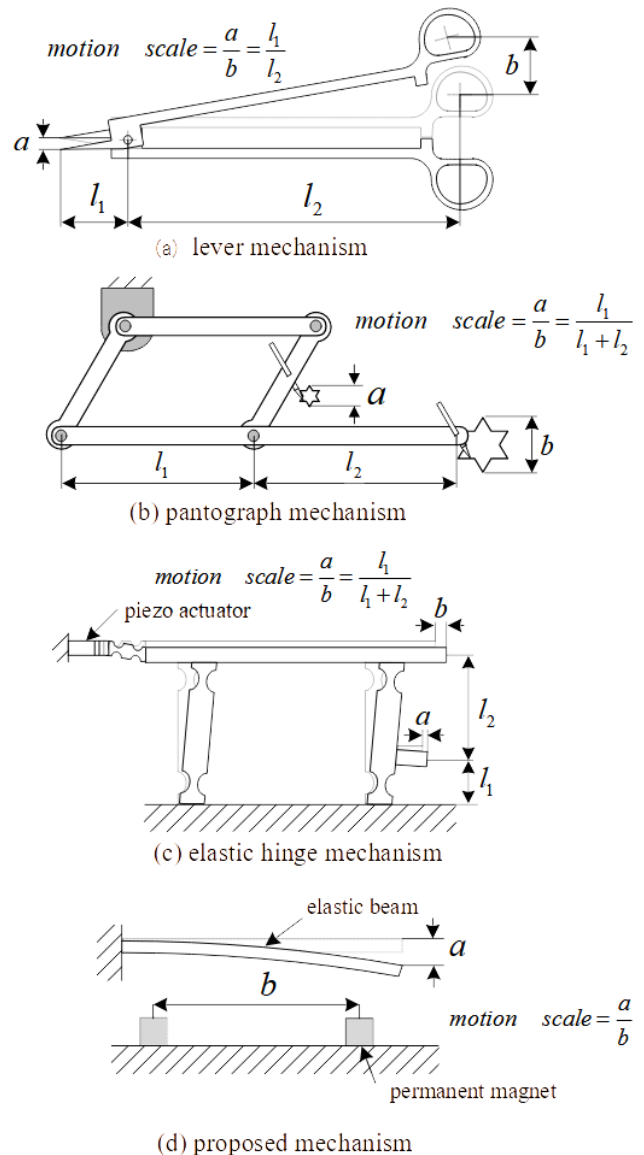


図1 代表的な変位縮小機構

め高電圧直流電源や指先動作をpiezo素子に伝えるインターフェースなどが付随するので装置が肥大化してしまう。リンク機構のように単一体でコンパクトな寸法をもち、piezo素子機構のように高分解能をもつ変位縮小機構を実現するのは困難で現存技術では欠落している領域といえる。

図1(d)は提案する機構である。磁力によって吸引される弾性ビームの撓み量を永久磁石の位置で調整する機構である。まず、本機構の分解能について考察すると、弾性ビームの撓みを変位として出力するので、この部分での制限はないが、永久磁石の移動機構に生じる摩擦などが影響すると考えられる。つぎに、磁石の位置を移動させるマスター部とスレーブ部となる弾性ビームが分離されていることから手振れでマスター部が振動してもダイレクトに伝わらない構成となっている。手振れ振動も変位縮小されて伝わることになるが、手振れが磁石の

移動量に対して微小であるとすれば作業に大きな影響を及ぼすことはないと思定できる。したがって、本機構の顕微作業に対する有意性は、どの程度の変位縮小率が得られるか実験的に検証することで確認できる。さらに、顕微鏡ステージに搭載できるように小型化することが実用上の課題となる。

3. 実験装置

3. 1 構成要素

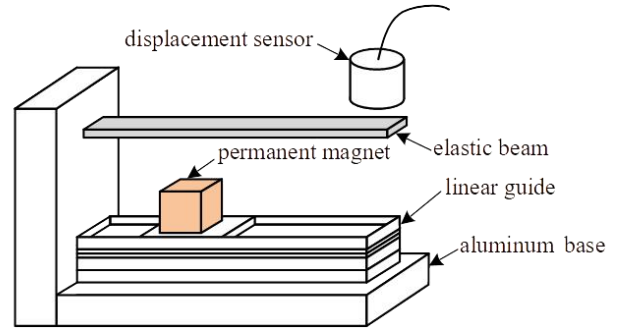
図2は磁力を用いた変位縮小機構の概略である。実験装置は、図2(a)に示すように弾性ビーム、永久磁石とそれを移動させるリニアガイド、固定するためのアルミニウムベースおよび変位センサから構成されている。永久磁石を指でリニアガイドに沿って移動させることで弾性ビーム先端の撓み量を調整する動作原理となっている。図2(b)は、変位センサの位置決め用のZ軸ステージと永久磁石を移動させるためのX軸ステージを含めて実際に構成した実験装置である。弾性ビームは、一般構造用圧延鋼材(SS400 3mm×10mm)の素材を長さ104.4mmの片持ち梁状にアルミニウムベースに固定した。永久磁石は、大きさ10mm×10mm×10mmで表面磁束密度420mTのネオジウム磁石を利用した。変位センサには、非接触型の渦電流式変位センサ(新川電機製VC060)を利用した。センサ端面の直径(22mm)より弾性ビームの幅が狭いため、アルミニウム平板をセンサターゲットとして弾性ビーム先端に貼り付けている。センサの中心位置は弾性ビームの固定端より88.5mmである。また、永久磁石と弾性ビーム間の磁場を歪めないようにするため、リニアガイドに使われるベアリングボールや各要素を固定するためのビスを除きアルミ素材で作られる要素を利用した。なお、アルミニウムベースは磁力によって変形しないように断面寸法(20mm×50mm)をもち高剛性化を図っているため、このままでは顕微鏡に搭載できる寸法となっていない。

3. 2 発生変位特性

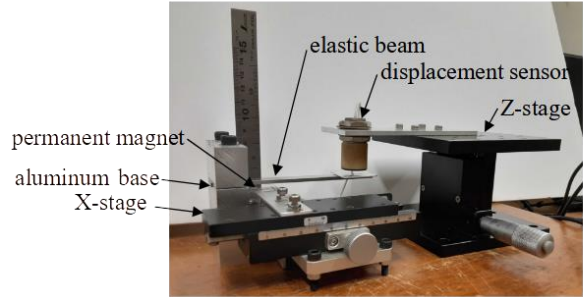
図3に弾性ビームの発生変位を求めるモデルを示す。まず永久磁石の移動開始位置を固定端から l_0 とする。このときの弾性ビームと永久磁石とのギャップを x_0 、弾性ビームの撓み量を δ_0 とし、磁力は弾性ビームに対して集中荷重として働くと仮定すると、磁力 P_0 と撓み量は次式によって与えられるとする。

$$P_0 = \frac{k}{x_0^2} \quad (1)$$

$$\delta_0 = \frac{P_0 l_0^3}{3EI} \quad (2)$$



(a) experimental equipment configuration



(b) experimental equipment setup

図2 実験装置

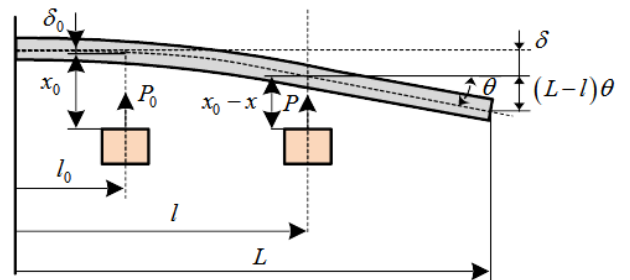


図3 解析モデル

ここで、 k は定数で式(1)より実験的に同定する。 E と I は弾性ビームのヤング率、断面二次モーメントをそれぞれ示す。つぎに磁石が l だけ移動したときの先端の撓み量 w (発生変位)は次式で与えられる。

$$w = \frac{Pl^3}{3EI} + (L-l)\theta \quad (3)$$

ここで、 L は弾性ビームの固定端と先端間の距離であり、 P は磁石の l の位置における磁力を示し、次式で表すように $x = \delta - \delta_0$ だけギャップは小さくなるので P_0 より大きくなる。

$$P = \frac{k}{(x_0 - x)^2} \quad (4)$$

θ は次式で示すように弾性ビームの l の位置における撓み角である。

$$\theta = \frac{Pl^2}{2EI} \quad (5)$$

3. 3 発生力特性

本装置が、微小対象物に対して加える力(発生力)は、図4に示すように弾性ビーム先端で加えるものとする。今、磁石の位置が l_0 で先端が微小対象物に接したとすると、磁石をさらに先端側へ移動させることで微小物に押し付ける力を加えることができる。このとき微小物は移動せず押し付け力に耐えているとすると弾性ビームは撓むことがないので式(1)で表される磁力が先端側に移動するだけとなる。磁石の位置が l のとき発生力 F は次式となる。

$$F = \frac{l-l_0}{L} P_0 \quad (6)$$

4. 実験結果

4. 1 発生変位特性

図5に、永久磁石の移動量と弾性ビーム先端の撓み量を測定した結果を示す。永久磁石は、弾性ビームの固定端から16.7mmの位置から5mm間隔で81.7mmの位置まで移動させた。横軸は移動開始位置からの変位を示し、縦軸は弾性ビームの撓み量を示している。弾性ビームと永久磁石間のギャップはリニアガイドの下に厚さ1mm, 2mm, 3mmのアルミニウム平板を組み合わせて挟み込むことで2mm, 3mm, 4mm, 5mmとした。なお、ギャップを1mmに設定した場合は、弾性ビームと永久磁石が吸着してしまうので測定は不可能であった。また、ギャップを6mm以上に設定すると弾性ビームの撓み量がセンサの分解能以下になるため正確な測定が困難であった。実線は、式(3)を使って計算した解析値であり実測値とよく一致している。

最大発生変位(フルストローク)を弾性ビーム先端の最大撓み量とすると表1に示す結果となった。フルストロークはギャップによって調整できるので、微細作業によって求められるフルストロークになるようにギャップを設定すればよい。ここでは、光学顕微鏡の実視野の大きさにギャップの設定法を示す。顕微鏡で視認しながらプローブで動き回る微生物を捕獲するような場合、プローブには実視野を超えるフルストロークが要求される。光学顕微鏡の実視野は接眼レンズの視野数と対物レンズの倍率で決まり、たとえば、接眼レンズの視野数が20で倍率が10倍、40倍、60倍、80倍の対物レンズを使用した場合、実視野の直径はそれぞれ2.0mm, 0.50mm, 0.33mm, 0.25mmとなる。10倍の対物レンズを使用したときにはフルストロークが不足するが、それぞれギャップは2mm, 3mm, 4mm, 5mmに設定すればよい。

また、変位縮小率を永久磁石の最大移動量(フルスパン)65mmと弾性ビームの最大撓み量の比で定義して表1に示した。今回の装置で確認できた

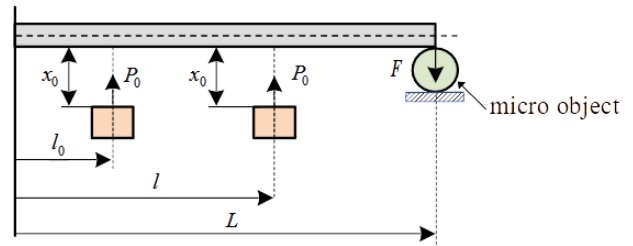


図4 発生力の定義

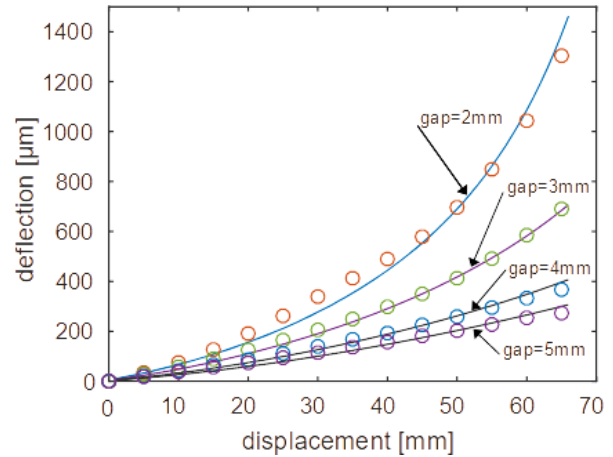


図5 磁石移動量と弾性ビームの撓み量

表1 変位縮小機構の基本特性

gap[mm]	2	3	4	5
full stroke[μ m]	1304	690	367	273
reduction ratio[-]	$\frac{1}{49.9}$	$\frac{1}{94.2}$	$\frac{1}{177.1}$	$\frac{1}{238.1}$
non-linear rate[%]	0.386	0.149	0.030	0.011
resolution [μ m]	<18			

最高変位縮小率は1/238.1である。微細作業のうち、植物のウイルスフリー化のために実体顕微鏡で視認しながら茎の先端にある大きさ0.2mm~0.4mmの茎頂を切り離すような作業においては本装置の変位縮小率をもつツールがあれば有効であるといえる。しかし、指先の数cmの動きを数十 μ mにするには1/1000倍の縮小率が必要となるのでさらに高縮小率が望まれる。一方、ギャップを拡げることで変位縮小率を高められることも確認できる。微細作業では用途や対象物の大きさに応じて所望の変位縮小率が変わるので、ギャップを調整することが効果的な手段の一つといえる。

変位縮小率はギャップの他に弾性ビームの剛性や素材の透磁率を変えることでも調整できると考えられる。

つぎに、磁力はギャップに対して強い非線形性を持つことから発生変位に対しても影響が現れていることが確認できる。最大線形性誤差とフルスパンの比で定義した非線形性の度合いを表1に示す。とくにギャップが狭くなると撓み量が増えるので非線形性が高い特性となっている。一般に、センサやアクチュエータが非線形特性をもつことは忌避されるが、ヒューマンインターフェースとしては感触や操作性の観点から単に平坦な特性のものが良いとは限らない。本変位縮小機構においては、磁石を弾性ビーム先端側で操作すると高感度な動きができ、固定端側では低感度な動きとなるので感度を磁石の位置で使い分けることができる。このことがオペレータの感じる操作性にどのような効果をもたらすかについては、次のステップである。

本変位縮小機構の発生変位は、永久磁石と弾性ビーム間のギャップと永久磁石の移動量に依存する。この関係を式(3)の撓み量に対する磁石の移動量の依存性および式(1)の磁力に対するギャップの依存性をできるだけ損なうことなく次の関数で近似する。

$$w = k_d \frac{(l-l_0)^2}{(g-X_d)^2} \quad (7)$$

ここで、 k_d と X_d は定数、 g はギャップを表している。図6に近似曲面と実測値を示す。残余の非線形最小化アルゴリズム(octave nonlin_residmin 関数)により計算した結果、 $k_d = 2.54 \times 10^{-6}$ 、 $X_d = -0.918\text{mm}$ で決定係数(R^2 値)0.977となり精度良い近似ができた。これにより、事前に要求される発生変位に対する設定ギャップや磁石の移動ストロークを見積もることができる。

4.2 発生力特性

図4に示すように弾性ビーム先端が対象物を押し付ける力を発生力として定義し、永久磁石を移動させることで増加する発生力を求めた結果を図7に示す。磁力が発生力として現れるのでギャップに対しては非線形な特性をもつが磁石の移動量に対しては式(7)に示すように線形な特性をもつ。実線は、次式で示す近似関数の値を示す。

$$F = k_f \frac{l-l_0}{(g-X_f)^2} \quad (8)$$

ここで、 k_f と X_f は定数であり、計算した結果、 $k_f = 3.79 \times 10^{-6}\text{Nm}$ 、 $X_d = -3.12\text{mm}$ で決定係数0.998である。最大発生力はギャップが2mmで移動量が6.5mmのときの9.34Nである。最小発生力

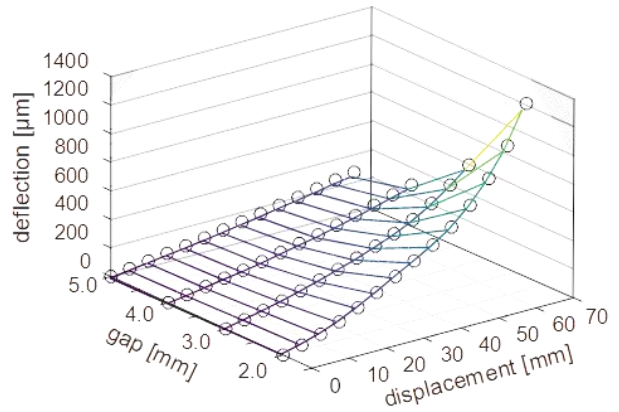


図6 発生変位特性

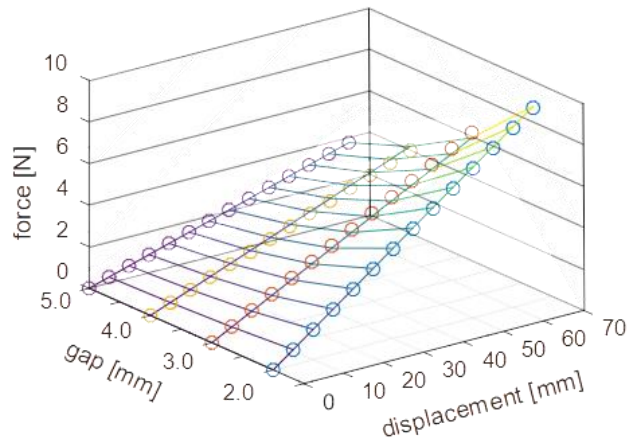


図7 発生力特性

をギャップが5mmで磁石を5mm移動させたときとすれば、0.287Nとなる。これらの発生力は物理現象を慣性力が支配するマクロ領域では対象物体を移動させるような作業には微弱すぎるが、対象とする1mm以下のマイクロ領域において、力学特性を支配するのは、表面張力、ファン・デル・ワールス力、静電気力の三つの相互作用力であり、これらの大きさは0.001N以下である⁷⁾。つまり、微細作業には十分な発生力である。むしろ、過剰な発生力により細胞のような脆弱な対象物を押し潰してしまうことやピペットのようなマイクロツールを破損してしまうことに注意を払うべきである。発生力を調整する方法には、磁石の移動量を調整する他にギャップを変えることや保持力の異なる永久磁石を使うことが考えられるが、弾性ビームに到達する磁束を磁気回路で調整する方法も考えられる⁸⁾。本装置では永久磁石から出る磁束はヨークなどで拘束されることなく放出されるので、漏れ磁束によって外部機器に悪影響を与える可能性もある。効率の良い磁

気回路を設計することは今後の課題である。

4. 3 手動操作実験

図8に指先で永久磁石を移動させて、弾性ビームの撓みを操作した結果を示す。設定ギャップは3mmで記録時間は10秒として、変位センサの信号を見ながら操作した。1秒から4秒の間では、永久磁石を一方向にステップ状に移動させている。粗雑に約 $50\mu\text{m}$ の幅のステップになっているが、スキルを身につけるとより高精度の位置決めができると思われる。5秒付近では急激に開始位置まで戻している。本機構は弾性ビームを片持ちはり状に固定しただけであるので減衰要素に乏しく振動に敏感な機構であるが、磁石の急激な移動によって振動が励起されることがないことを確認した。その後は往復移動させている。これらの一連の操作で手振れが大きく伝わり影響することがないことも確認した。また操作するには、永久磁石を移動させる動作と弾性ビームが撓むことの因果関係を論理的に解釈する必要はなく、直感的に試行してみればよい。上手に操作するには、磁石をこれだけ移動させれば、ビームがこれだけ撓むといったスキルを身につけるとよい。

5. ま と め

本研究では、永久磁石の磁力を弾性ビームに伝える無電力変位縮小機構を開発し、その基本特性を実験的に検証するとともに顕微鏡下で行う微細作業に対する有意性を検討することで次の結果を得た。

- 1) 開発した変位縮小機構の発生変位は、永久磁石を移動させることで分解能 $18\mu\text{m}$ 以下の位置決め性能を有し、微細作業の目的に合わせてフルストローク、変位縮小率をギャップによって設定できることを示した。
- 2) 65mm の入力変位を $273\mu\text{m}$ に変位縮小する機構を一体構造で実現した。高分解能変位センサで計測することで、さらに高縮小率を有することが期待できる。
- 3) 発生力も同様に、永久磁石を移動させることで調整でき、大きさ 1mm 以下の微小物を扱うには十分な大きさをもっていることを示した。
- 4) 磁力による非接触駆動機構であるので、永久磁石を手動操作しても弾性ビームに手振れが大きく伝わることがないことと、急激な操作に対して振動が励起されないことを確認した。

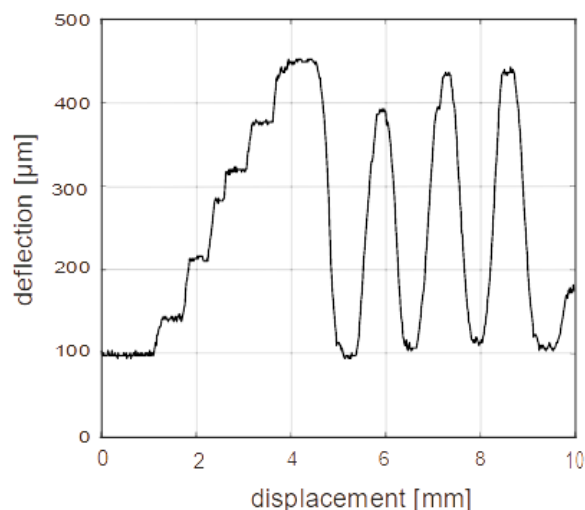


図8 発生変位の手動操作

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 21K03991 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) 増田峰知：三重県科学技術振興センターにおける微細作業事例調査，平成14年度三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告 No. 27 (2003)。
- 2) 小林，佐久間：微細手術支援ロボット，日本ロボット学会誌，Vol. 22, No. 4, pp. 444-447, 2004。
- 3) R. Nigmatullin et al.: Atomic force microscopy study of cellulose surface interaction controlled by cellulose binding domains, SCIENCE DIRECT, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 35 (2004) 125-135。
- 4) 吉川，水野：リンク機構による変位の拡大と縮小，精密工学会誌，Vol. 56, No. 10, pp 1823-1828, 1990。
- 5) 飯田，野村，安田，川崎，佐久間：磁力を利用した変位縮小機構による精密ピンセットの開発，計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会講演論文集，pp 17-18, 2019。
- 6) 松浦，石田，大塚，市川：1nm 分解能の小型超精密位置決め装置の熱変形ドリフト，2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp 1145-1146, 2005 など。
- 7) 新井，安藤，福田：マイクロ領域の物理現象に基づくマイクロマニピュレーション（第1報，ファン・デル・ワールスカの低減方法），日本機械学会論文集（C編），Vol. 62No. 603, pp 4286-4293, 1996。
- 8) 安田，野村，飯田，佐久間，川崎：磁力を利用した変位縮小機構による精密ピンセットの磁場解析，計測自動制御学会中国支部津山地区計測制御研究会講演論文集，pp 15-16, 2019。