解 説

マイクロ機構の動的計測手法

Dynamic Measurement of Micro-mechanical-systems

諸 貫 信 行* *東京都立大学工学部精密機械工学科

Nobuyuki Moronuki* *Faculty of Eng. Tokyo Metropolitan University

1. は じ め に

マイクロ機構の研究開発が進むなか、その評価等に不可欠な計測に関する問題が顕在化してきている。代表寸法が[mm]以下と小さいために長さを測定するにしても相対精度が低下しがちであるばかりでなく、一般寸法の機構にはない、幾つかの問題があるからである。本稿ではこれらの問題を明確にするとともに、変位・振動および力・トルク計測に関する事例の幾つかを紹介する。

2. 動的計測に関連する一般的な問題

(財)マイクロマシンセンターが行ったアンケート調査結果[1]によると、マイクロマシン関連研究機関の多くが計測に関する問題を抱えているとしており、測定分解能をはじめとして、下記のような厳しい仕様要求があることがわかる。以降ではマイクロ機構の計測において注意を払うべき基本原理の幾つかを示す。

1) 変位計測：分解能	1[nm]程度
ストローク	数[μm]～数[mm]
周波数帯域	600[kHz]以上
2) 力	：分解能 10 ⁻⁵ [N]以下
3) トルク	：分解能 10 ⁻⁶ ～10 ⁻¹¹ [Nm]以下

2.1 測定器が系に及ぼす影響

測定器は被測定系との間でわずかながらエネルギーを授受することによって動作するものが多く、測定対象が小さいマイクロ機構の場合、これが系に大きな影響を及ぼしてしまう。各種測定法の Null method と Deflection method の違いもこれと同様であり、Null method によればエネルギー授受が小さいために精度を高めやすい[2]。動的な計測の場合これが難しい場合もあるが、基本原理として認識すべきであろう。

このような影響を小さくするためにマイクロ機構では非

接触測定が一般的になっているが、測定系が与える電磁気的影響も無視できない場合が多い。さらに極論を言えば、光を物体に当てただけでも既に光の放射圧を加えていることになり、影響を完全になくすことは難しい。

2.2 測定システムの応答性

マイクロ機構では物体に作用する体積力（慣性力）の影響が小さくなっていくため、運動が高速になりやすい。これに合わせて測定系の応答周波数も高いものが必要とされる。デジタル式の測定器の場合はサンプリング定理も十分に考慮する必要がある。すなわち、同定理に従えば測定対象となる周波数の2倍以上の周波数でサンプリングをしないと現象に含まれる周波数成分をサンプルすることができないとされるが、応答波形までを議論するためには少なくとも上記周波数の10倍以上のサンプリング周波数が必要であろう。

2.3 分解能とレンジ

測定量の分解能が重要なのは言うまでもないが、空間的な分解能も重要である。たとえば、変位測定において縦方向（機構の運動方向）だけでなく横方向（運動と直角方向）にも高い分解能が要求される。しかし、横分解能が高くなるということは、測定対象の表面粗さ等が測定に大きな影響を及ぼすようになるため、測定結果の評価に際しては注意が必要である。

また、変位測定では[nm]オーダの分解能を持ち、かつ測定範囲が数[mm]までであるようなダイナミックレンジの大きい測定器が求められているが、これを1台で満足できるものは少ない。前節の内容と併せて、縦/横分解能が高く、測定範囲が広く、かつ応答性の良い測定器の出現が望まれる。

3. 変位・振動の測定

3.1 変位測定の原理と問題点

接触式変位測定法は、測定圧がマイクロ機構の運動を拘束することになるため、その応用には限界がある。非接触式測定法には、容量型変位計、レーザ変位計、非接触粗さプローブおよび、レーザドップラ振動計等多くがある。

原稿受付 1996年8月7日

キーワード：Micro-mechanical-system, Measurement, Displacement, Force, Torque

*〒192-03 八王子市南大沢1-1

*Minami-Ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo

超精密応用の変位測定では、高い縦分解能を持つ静電容量型変位計がよく用いられるが、測定対象との間に作用する静電力のため、柔軟な測定対象では変位計に張り付いてしまうという不具合が起こりうる。

レーザ光を用いた三角測量の原理による変位計で、ビームスポットを $20 \times 12 [\mu\text{m}]$ 程度まで絞ったものが市販されており、マイクロ機構の測定に適用された例も多い。ただし、スポット径が小さいゆえに測定対象の表面粗さが測定結果に影響を及ぼしてしまうという問題もある。

非接触粗さプローブには臨界角法や非点収差法等の原理によるものがあり、高い縦/横分解能をもつため表面粗さの測定には適すものの、被測定面の傾斜に対する許容値が小さいものが多く、汎用の三次元形状測定には必ずしも十分とは言えない。

SEM (走査型電子顕微鏡) は被写界深度が十分大きく、変位の測定などにも使われている。しかし、真空中での測定であるために潤滑等の条件が異なってしまうこと、走査速度が遅いため動的な現象は捉えにくいこと、さらに対象によっては電子線損傷の影響があること等の問題がある。

3.2 変位測定の具体例

マイクロな物体の運動力学を明らかにするために、図1のような微小な片持ちはりを作製し、これの振動を測定した例がある[3]。製作した微小はり是最も小さなもので、長さ $260 [\mu\text{m}] \times$ 幅 $40 [\mu\text{m}] \times$ 厚さ $0.9 [\mu\text{m}]$ であるが、市

図1 シリコンウェハ上に作成した微小片持ちはり

図2 マイクロ振動ジャイロ

販のレーザ変位計を用いて $12.2 [\text{kHz}]$ までの固有振動が測定された。変位計のサンプリング周波数は $40 [\text{kHz}]$ であり、1周期当たり4点程度のサンプル点しかないため、振動波形を議論することは難しい。

図2に示すのはマイクロ振動ジャイロの例であり[4]、振動体の大きさは $400 \times 800 [\mu\text{m}]$ 、厚さ $5 [\mu\text{m}]$ の多結晶Siで、これのメカニカルQ値を測定するために圧電素子を用いた加振実験が行われた。振動測定にはレーザ変位計が用いられ、 $14 [\text{kHz}]$ 程度の周波数の固有振動振幅を真空チャンパのポートを通して測定されており、レーザ変位計の特徴のひとつである作動距離の長さを活用していると言える。

3.3 画像応用計測

顕微画像等进行处理することでマイクロな機構の運動や変位を測定することができる。たとえば単結晶シリコンのエッチング技術によって製作された長さ $75 \sim 500 [\mu\text{m}]$ 、幅 $75 \sim 240 [\mu\text{m}]$ 、厚さ $20 [\mu\text{m}]$ 以下のマイクロ片持ちはりの曲げ試験を、電子顕微鏡内で行った例がある[5]。はりの先端にダイヤモンド針で静荷重を加え、破壊強度として $1.5 \sim 7.2 [\text{GPa}]$ という値を得ている。同様に光波干渉を用いた形状計測により微小はりの座屈挙動を調べた例がある[6]。干渉縞パターンをCCDカメラで撮像して解析を行い、図3に示すような座屈を起こしたはりの三次元形状を評価した。視野領域の大きさは $256 \times 256 [\mu\text{m}]$ で、 $1.55 [\mu\text{m}]$

図3 座屈を起こしたマイクロビームの輪郭

図4 マイクロスライドの運動測定装置

というはりの変形量を定量化している。

光学顕微鏡による観察は動的な計測に有効と考えられる。図4にはマイクロ直動機構の運動精度測定の実験装置構成を示す。測定対象は図5に示すようなものであり、単結晶シリコンの異方性エッチングにより加工されたV溝を利用してマイクロスライダとガイドを作成している。このマイクロスライダを針で押して駆動したときの姿勢変化を、実体顕微鏡と高速度ビデオカメラで観察している。得られた画像でのスライダ輪郭と、数値モデルに姿勢変化を与えて生成した輪郭とを対応させることでマイクロスライ

図5 異方性エッチングにより作成したシリコン製マイクロスライダ

図6 マイクロスライダ運動開始時の姿勢変化測定結果

ダの姿勢変化を求めている[7]。図6は測定結果を示し、駆動を開始した直後の1/100秒程度の間に急激な姿勢変化が発生している様子がわかる。この例では、スライダが右前方に傾いた状態ですべていることを示す。

4. カ・トルクの測定

4.1 力測定の原理と問題点

測定対象に作用する力を測定するためには、対象となる力学的連鎖に並列、あるいは直列に力測定器を挿入する必要がある。前述のように、被測定系に対する影響を最小限にするためには以下の指針が必要となる。

- ・被測定系に並列接続の場合、測定器のインピーダンス0が望ましい。
- ・被測定系に直列接続の場合、測定器のインピーダンス無限大が望ましい。

さらに、動的計測という観点からは固有振動数を高くしたいという要求があり、測定器に対する要求は厳しい。

4.2 カ・トルク測定の実例

平行板ばね機構を被測定系に直列に配置し、その変形量をストレインゲージで計ることで微小力を測定する方法がある。マイクロ加工のモニタリングを目的に、分解能0.37[mN]、固有振動数1125[Hz]という装置が試作されている[8]。同様の方法により、図5と類似のマイクロスライダの摩擦力が測定されている[9]。この方法では、力の測定分解能を高めるために剛性を下げると系の固有振動数が低下するというトレードオフの関係がある。

他の方法として、SMA(形状記憶合金)をカテーテルへ応用する際の評価として、その発生力を電子天秤と錘を用いて測定した例[10]や、AFM等に用いられる光てこを応用して微小な力や圧力を測定した例[11]もある。

図7は光マイクロエンジンの特性評価のために行われたトルク測定の例を示す[12]。このエンジンの動作原理は、カーボンブラックを片面に吸着させた4枚の翼を軸受で支持し、希薄気体中で光を照射するとエネルギーが熱に変

図7 光マイクロエンジンのトルク測定

換され、トルクを発生するというものである。この微小トルクを測定するためにパイレックスガラス（直径 100 [μm], 長さ 100 [mm]) のねじり変形を光てこで増幅しながら測定している。測定結果では 10^{-9} [Nm] レベルの微小トルクの測定が行えているが、トルク値が弾性理論式から計算した値であるため、較正法に問題を残している。

5. お わ り に

マイクロ機構の各種計測にかかわる問題の明確化と幾つかの事例紹介を行った。読者諸氏のお役に立てれば幸いである。本稿では扱わなかったが、流体関連の計測を含め、他にも多くの問題がある。この領域は日進月歩研究が進んでおり、(財)マイクロマシンセンターではこれらの標準化を前提とした調査研究を進めている。興味をもたれた方は参考にされたい。

参 考 文 献

- [1] “平成 5 年度マイクロマシン技術の標準化に関する調査研究報告書”, (財)マイクロマシンセンター, pp. 35-54, 1993.
- [2] E. O. Doebelin: “Measurement Systems,” pp. 17-18, McGraw-Hill, 1976.
- [3] 諸貫信行ほか: “マイクロマシンの設計に関する研究”, 精密工学会春季大会講演, pp. 919-920, 1993.
- [4] 田中克彦, 持田洋一, 大和田邦樹: “マイクロジャイロ”, 平成 6 年度マイクロマシン技術研究開発成果発表会予稿集, pp. 55-58, 1994.

- [5] 江刺正喜: “マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス”, p. 84, 培風館, 1992.
- [6] W. Fang and J. A. Wickert: “Post-Buckling of Micromachined Beams,” Proc. IEEE MEMS pp. 182-187, 1994.
- [7] 内山賢治ほか: “顕微画像による微小物体の三次元運動計測”, 精密工学会秋季大会講演, pp. 255-256, 1996.
- [8] M. Mitsuishi et. al: “Information Transformation-based Tele-micro-handling/machining System,” Proc. IEEE MEMS, pp. 303-308, 1994.
- [9] 諸貫信行, 見上康臣: “マイクロ直動機構の試作と評価”, 1995 年度精密工学会春季大会講演, pp. 517-518, 1995.
- [10] 山本啓介, 前田重雄, 伊藤弘隆: “SMA マイクロコイルアクチュエータ”, 平成 6 年度マイクロマシン技術研究開発成果発表会予稿集, pp. 45-48, 1994.
- [11] 金東郁, 下岡聡行, 勇田敏夫: “マイクロシリンドを用いた圧力伝達機構に関する基礎的研究”, 精密工学会誌, vol. 60, no. 9, pp. 1330-1334, 1994.
- [12] 太田正廣, 笠原健治, 坂本守義: “希薄気体効果を用いた光マイクロエンジンに関する研究”, 日本機械学会論文集 B 編, no. 61, vol. 586, pp. 2190-2196, 1995.

諸貫信行 (Nobuyuki Moronuki)

1956 年 5 月 11 日生。1981 年東京都立大学大学院修士課程修了後、日本楽器製造(株)(現ヤマハ(株))に勤務。1983 年より東京都立大学助手、1990 年より助教授。工学博士。異方性エッチングや分子線エビタキシ等の特殊加工技術とそのマイクロ機構への応用、超精密工作機械および知能機械の設計に関する研究に従事。日本機械学会、精密工学会会員。