6 自由度微動機構の研究 (第3報)*

——多自由度動作と質量負荷の影響の低減——

辺 見 信 彦**

A Six-degrees of Freedom Fine Motion Mechanism(3rd Report)
— Multi-degrees of Freedom Motion and Reduction of Influence of an Extra Mass —

Nobuhiko HENMI

The purpose of the study is to establish the six-degrees of freedom(dof) fine motion mechanism which has the following characteristics: (1)each of the six one-dof motions has the same control characteristics as the others, (2)each one-dof motion does not interfere with the others. In the previous study, the mechanism was theoretically designed so that the open-loop characteristics of the six one-dof motions were the same, and so that there were no static and dynamic interferences between the motions. Then an experimental mechanism was made and the six one-dof motions were controlled. In the present study, it is shown that because the six one-dof motions have the same characteristics, the mechanism can make special dynamic motions which other fine motion mechanism cannot make easily. When an extra mass is loaded on the object, dynamic characteristics of the mechanism change from designed ones and the dynamic interference between the one-dof motions occurs. A method to transform the dynamic characteristics into the designed ones and to eliminate the interference is discussed.

Key words: six-degrees of freedom mechanism, fine motion mechanism, position control, positioning, piezoelectric actuator, interferential motion

1. 結 言

精密な加工・測定分野では、多自由度微動機構の必要性が高まっており、これまでに多くの報告があるが¹⁾²⁾、各自由度の動特性を考慮して設計された機構は少ない。本研究では、以下の特徴を有する高速、高精度な6自由度微動機構の実現を目的とする：

- (1) 着目する駆動対象の6自由度の運動方向に同一の制御特性を有する。
- (2) 各方向の駆動に使用するアクチュエータの数が等しく、また少ない。
- (3) 各方向への運動の間で原理的に干渉がない。

本研究では、これまでに、アクチュエータ配置により開ループ状態で6自由度の静的・動的特性を同一化でき、かつ各自由度の運動の間で干渉を生じさせないような微動機構の設計法を理論的に検討し、機構を試作し、特性を明らかにした³⁾。さらに、1自由度運動

の特性のみを用いて設計したコントローラにより6自由度方向の運動を制御して、同一の制御特性が得られることを示し、各自由度について個々に制御系の設計をする必要がないという本機構の利点を確認した⁴⁾。

本報では、以下の2項目について報告する。

- (1) 本機構の各自由度の動特性が同一であることによる多自由度動作時の利点と問題点。
- (2) 本機構に質量負荷を搭載した際に生じる応答特性の悪化を低減するための方法。

本報で述べる多自由度動作時の利点とは、(1)任意の方向への並進ステップ移動、および任意の位置や方向の固定軸回りの回転ステップ移動を簡単な入力により実現できることと、(2)駆動対象を円運動させた場合に周波数を変化させてもほぼ円を描くこと、である。問題点とは、駆動対象を共振点付近の周波数で連続動作させると動的干渉が生じることである。

また、本機構を微動テーブルに応用する際には、駆動対象に質量負荷を搭載するので、機構の応答特性が大きく変化してしまう場合がある。その場合、各自由度の動特性が同一であり各自由度間で干渉がないという本機構の特徴が損なわれ、本研究の目的が達成され

* 原稿受付 平成4年8月17日

** 学生会員 東京工業大学大学院 (現, 正会員, 東京理科大学理工学部: 野田市山崎2641)

Fig.1 Schematic mechanism

なくなる。よって、本報では既知の質量負荷に対処する方法を提案し、その原理と有効性についても検討する。

2. 機 構^{3) 4)}

試作した機構では、質量約1kg、1辺70mmの立方体を駆動対象とし、6自由度の位置と姿勢を6個の圧電アクチュエータで決定する(図1)。同一平面上に配置した2個一組のアクチュエータで駆動対象の並進と回転各1自由度方向に駆動する。各アクチュエータの両端に弾性ヒンジとボールヒンジを設け、各アクチュエータがヒンジを支点に揺動できるようになっており、案内機構を構成している。本機構の共振周波数は測定の結果6自由度方向ともほぼ同一で、開ループシステムでは1040Hz、閉ループシステムでは1140Hzであった。

図2には、図1に示すアクチュエータ3、4で駆動する x, θ_y 方向の動的モデルを示す。ただし、図には4節での議論のために、質量負荷を搭載して描いている。図中の記号の意味は表1に示す。フィードバック用のセンサには静電容量型変位計(ADE社、マイクロセンス)を用い、駆動対象を挟んで各アクチュエータの正面にそれらを配置し、アクチュエータの対向部の変位を非接触で検出する。その変位量から演算し

Fig.2 Dynamic model

て、駆動対象の位置と姿勢を求めている。コントローラには直列補償要素にPI要素、フィードバック補償要素にD要素を用いたPIDコントローラを採用している。

3. 多自由度動作

3.1 ステップ応答

本機構は6自由度運動とも同一の動特性を有するので、多自由度で駆動する際、以下に示すような動作を簡単な入力によって実現することができる。例えば、任意の方向への並進ステップ移動をさせる場合や、任意の位置や方向の固定軸回りの回転ステップ移動をさせる場合、その動作に必要な複数の自由度にステップ信号を同時に入力すればよい。

図3は(a) x 方向と z 方向、(b) θ_y 方向と θ_x 方向、および(c) x 方向と θ_y 方向、の各2自由度にステップ信号を同時に入力した際の運動の軌跡である。図3(a)~(c)の運動の軌跡の意味を換言すると、(a) $x-z$ 平面内の異なる3方向への並進ステップ移動の軌跡、(b) $x-y$ 平面内の異なる3方向の回転軸回りの回転ステップ移動の軌跡、(c) y 軸に平行で位置が異なる3本の回転軸回りの回転ステップ移動の軌跡、である。

図中の破線と実線はそれぞれ入力と出力の軌跡を表す。入力の向きは運動が各グラフの左下から右上に軌跡を描く向きである。センサノイズ等の影響を除去するため、図3のデータには30回のステップ応答を平均した結果を用いている。ただし、1回ごとのステップ応答のばらつきは本機構の精度($\pm 2\sigma$ で約10nm、約0.06arcsec)の範囲内であることを確認している。

図3のいずれのグラフにおいても、出力の軌跡は入力の軌跡とほぼ一致し直線となっている。図3(a)よ

り分かることは、 $x-z$ 面内の異なる方向にステップ駆動しても、駆動したい方向から外れることなく並進ステップ移動しているということである。また、図3 (b) からは、 $x-y$ 平面内の異なる方向の回転軸の回りに回転ステップ移動させても、その回転軸の方向が過渡動作中も固定しているということが分かる。

さらに、図3 (c) では、 y 軸に平行で、 $x-z$ 平面内の異なる位置にある回転軸の回りに回転ステップ移動させても、その回転中心の位置が過渡動作中も設定した位置を外れることなく固定していることが分かる。また、図示はしないが、図3に用いた各ステップ応答波形は1自由度ずつステップ駆動した際の応答にはほぼ一致している。

以上の結果は、並進方向を変化させた場合も、回転軸の位置や方向を変化させた場合も、応答に影響がないことを表している。よって、本機構では、対象の位置と姿勢を表す座標系をどのような位置および方向に設定しようとも、アクチュエータの静的な伸縮量の変換さえ行えば、現在と同一の動特性が各自由度間の運動の干渉なく得られると判断できる。

また、図3に示す動作を簡単な入力で実現できるのは、本機構が6自由度運動に対して同一の特性を有し、かつ各運動の間に静的、動的な干渉がないという特徴があるからであり、これらの特徴を持たない微動機構では実現は困難である。さらに、ここでは2自由度の同時駆動のみ示したが、駆動の自由度を増加しても同様の結果が得られることを確認している。

3.2 円運動

図4は、振幅 $0.05\mu\text{m}$ の余弦波を x 方向に、正弦波を z 方向に入

Table 1 Model parameters

M	Mass of the object	1.05	kg
I	Moment of inertia of the object	8.88×10^{-4}	Nm
k	Spring coeff. of the actuator compo.	2.23×10^7	N/m
c	Damping coeff. of the actuator compo.	1.24×10^2	Ns/m
k_l	Spring coeff. of the hinge mech.	5.24×10^5	N/m
c_l	Damping coeff. of the hinge mech.	1.24×10^2	Ns/m
k_s	Sensor gain	8.00×10^5	v/m
k_p	Actuator gain	7.64×10^{-7}	m/v
T_p	Time const. of the actuator	1.43×10^{-4}	s
ω_0	Natural freq. of the actuator	5.65×10^4	rad/s
ζ_0	Damping ratio of the actuator	1.00	
η_0	Coeff. of lead element of the actuator	9.38×10^{-10}	s
r	Distance between actuators	2.86×10^{-2}	m
m	Extra mass	0.127	kg
M'	Mass of the object with the extra mass	1.18	kg
I'_y	Moment of inertia about y-axis of the object with the extra mass	1.11×10^{-3}	Nm
e_z	Distance between centers of gravity of the object with and without the extra mass	3.93×10^{-3}	m
g	Center of gravity of the object		
g'_z	Center of gravity of the extra mass		
g^i	Center of gravity of the object with the extra mass

(a) loci in $x-z$ plane (b) loci in $\theta_y-\theta_x$ plane (c) loci in $x-\theta_y$ plane

Fig.3 Loci of step motions for multi-degrees of freedom drive

力し、 $x-z$ 平面で駆動対象を円運動させた時の運動の軌跡である。 x 、 z 方向の運動の周波数特性が同一なので、異なる周波数で円運動させた場合であっても、軌跡の形状はほぼ円となっている。ただしゲインの変化のために円の半径は変化している。

共振点付近、またはそれ以上の周波数で円運動させた場合(図4(c),(d))、運動の軌跡はやや楕円になっているが、これは x 方向と z 方向の運動間の位相が 90° からずれているからである。また、そのずれは以下の理由から、 x 、 z 方向の動特性の相違のみによるものではないと考えられる。

例えば、図4(c)(周波数1040Hz)において、余弦波入力に対する x 方向の応答の位相と振幅は -118° と $0.074\mu\text{m}$ 、正弦波入力に対する z 方向の応答の位相と振幅は -94° と $0.067\mu\text{m}$ で、両者の間の位相の 90° からのずれは 24° である。しかし、周波数特性を1自由度ずつ個別に測定した際の x 、 z 方向の間の1040Hzでの位相の差異は、約 5° であったので、 24° のずれは、周波数特性の違いだけでは説明しきれない。このずれの生じる原因の一つは、次に述べるように、各方向の運動間の干渉であると考えられる。

まず始めに、 x または z 方向のいずれか1自由度方向のみに、振幅 $0.05\mu\text{m}$ 、1040Hzの正弦波を入力した時の各方向の応答を図5に示す。図より分かるように、いずれの入力に対しても動的な干渉が見られる。円運動のように多自由度で駆動した場合には、各方向の応答は目標値入力に対する応答(例えば x 方向への入力に対する x 方向の応答)に、干渉による応答(例えば z 方向への入力に対する x 方向の応答)が重畳した応答になる。各方向の干渉波の周波数応答が互いに同一でない場合には、円運動させた際、干渉波の重畳に起因して運動の軌跡は楕円になる。

次に、1自由度ずつ正弦波入力した際の波形(図5)を元に、図4(c)と同条件で駆動すると仮定した時の目標値入力に対する応答と干渉による応答との重畳波の位相と振幅を計算したところ、 x 方向の応答の余弦波入力に対する位相と振幅は -114° 、 $0.074\mu\text{m}$ 、 z 方向の応答の正弦波入力に対する位相と振幅は -97° 、 $0.070\mu\text{m}$ となり、図4(c)に示される応答の位相と振幅にほぼ一致した。すなわち、図4(c),(d)の軌跡がやや楕円となるのは、多自由度で駆動した際の動的干渉が原因であると考えられる。

本機構は各方向の運動間で干渉を生じないように設計されている。しかし、共振点付近の周波数で振動させると、実際には図5に示されるような動的な干渉が生じる。これは機構設計の際に考慮していない干渉が

Fig.4 Loci of circular motions

Fig.5 Responses for sinusoidal input

影響していると考えられる。例えば、本機構ではヒンジを支点とするアクチュエータの揺動を利用した案内機構を採用しているので、制御しない状態では駆動方向以外に静的な干渉が生じる。しかし、その干渉量は駆動量に比較して微小であるので設計の際には無視した。フィードバック制御した場合、ステップ応答や定常状態での微振動には、静的にも動的にも干渉は見られないので問題はない。しかし、制御した状態であっても、駆動対象を共振点付近の周波数で連続動作させて利用するような特別な場合で、かつ現状よりも高精度を要求する場合には対処法を検討する必要がある。

以上本節では、本機構が各自由度に同一の動特性を

持つことの、多自由度駆動での利点と問題点を示した。

4. 質量負荷の影響の除去

本機構を微動テーブルとして利用する場合、駆動対象上に質量負荷が加わる。その場合、駆動対象の質量や慣性モーメント、および重心の位置が変化するので、動特性が変化する。また、各自由度間で動的な干渉も生じるようになり、本研究の目的が達成されなくなる。本節では、そのような質量負荷の影響を低減するための対処法について議論する。

4.1 原理

図2に示した動的モデルでは、運動の着目点は駆動対象の重心 g である。質量負荷を搭載すると、重心の位置は図のように元の駆動対象の重心 g から g' に移動する。図では、重心が z 方向にのみ移動した場合を描いてあるが、重心が3次元的にどのように移動しようとも以下の議論は成立する。

質量負荷を搭載する前の開ループシステムでの目標値入力 $\mathbf{X}_r = (x_r, y_r, z_r, \theta_{xr}, \theta_{yr}, \theta_{zr})^T$ と出力 $\mathbf{X} = (x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)^T$ との関係は運動方程式から導かれ、式(1)のように表わすことができる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}\mathbf{X}_r \quad (1)$$

ここで、本機構の場合、行列 $\mathbf{G}$ が各要素の等しい対角行列となるようにアクチュエータを配置している。質量負荷を搭載することにより $\mathbf{X}_r$ と $\mathbf{X}$ の関係は変化し、式(2)のように表される。

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}'\mathbf{X}_r \quad (2)$$

行列 $\mathbf{G}'$ は対角行列ではなく、各要素も行列 $\mathbf{G}$ の要素とは異なる。よって、 $\mathbf{G} = \mathbf{G}'\mathbf{A}$ となるような変換行列 $\mathbf{A}$ を制御系に挿入すれば、質量負荷の影響を相殺することができる。

図6に、変換行列 $\mathbf{A}$ を挿入した場合の制御系のブロック線図を示す。 $\mathbf{A}$ は機構への入力の前直前に挿入される。ただし、 k_s はセンサゲイン、 k_s' は基準入力要素、 G_{LPF} はノイズ除去用ローパスフィルタの伝達関数を表している。

4.2 実験とシミュレーション

ここでは、質量負荷により重心が z 方向にのみ移動した場合で、かつ図1のアクチュエータ3、4で駆動される x 、 θ_y 方向の2自由度の運動のみに着目し、実験とシミュレーションにより検討する。

この場合、変換行列 $\mathbf{A}$ は2次の正方行列となり、式(3)のように表せる。式中の記号は表1に示す。

Fig.6 Block diagram

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、

$$A_{11}(s) = \frac{1}{f_a(s)} \cdot [M's^2 + 2\{(c+c_l)s + (k+k_l)\}]$$

$$A_{12}(s) = \frac{1}{rf_a(s)} \cdot e_z M's^2$$

$$A_{21}(s) = \frac{1}{rf_a(s)} \cdot e_z M's^2$$

$$A_{22}(s) = \frac{1}{r^2 f_a(s)} \cdot [I_y's^2 + 2r^2\{(c+c_l)s + (k+k_l)\}]$$

$$f_a(s) = Ms^2 + 2\{(c+c_l)s + (k+k_l)\}$$

実験では、変換行列 $\mathbf{A}$ の計算をフィルタ回路や微分回路を組み合わせたアナログ回路により実現し、実際に約0.1kg（駆動対象の質量の約10%）の質量負荷を機構に搭載した。 $\mathbf{A}$ の計算をアナログ回路により実現しているので、微分は一次遅れを伴った不完全微分として計算される。シミュレーションではこれを考慮して計算しているが、影響はほとんど現れなかった。

図7に開ループおよび閉ループシステムで、 x 方向にステップ駆動した時の x 、 θ_y 方向の応答を示す。左から順に(a)質量負荷を搭載しない場合の応答、(b)質量負荷を搭載し、変換行列 $\mathbf{A}$ を制御系に挿入しない場合の応答、(c)質量負荷を搭載し、変換行列 $\mathbf{A}$ を挿入した場合の応答である。図7(b)に見られるように、変換行列 $\mathbf{A}$ を挿入しない場合には θ_y 方向に動的な干渉が大きく現れている。また x 方向のステップ応答にも変化があり、うなりが現れている。それらの干渉とうなりは開ループシステムの方が顕著である。

シミュレーション結果では、 x 方向への $0.1\mu\text{m}$ のステップ入力に対して、 θ_y 方向の干渉量が開ループ、閉ループシステムそれぞれ最大 3.9arcsec 、 1.5arcsec であった。変換行列 $\mathbf{A}$ の挿入により、それらの干渉は $1.7 \times 10^{-2}\text{arcsec}$ 、 $4.2 \times 10^{-3}\text{arcsec}$ まで低減された。また目標値入力に対する応答波形も、変換行列 $\mathbf{A}$ の挿入により質量負荷が搭載される前の応答とほぼ完全に一致することが分かった。

実験結果では、変換行列 $\mathbf{A}$ の挿入後も開ループシステムの応答に多少のうなりが見られる。この原因はモ

Fig.7 Responses for step input to x-direction

デルと実際の機構の差にあると考えられる。本機構に約0.1kgの質量負荷を搭載すると、 x 、 θ_y 方向とも周波数応答の1kHz付近に2個の共振点が現れるが、そのうちの一方の共振周波数に、シミュレーションと実験の間で50Hz程度の差が見られた。変換行列Aはモデルを元に決定されているが、このような共振周波数の差があるので、実際の機構に挿入しても質量負荷の影響が残る、うなりが現れるのだと考えられる。

しかし、開ループシステムの干渉量は搭載前と同程度になっており、質量負荷搭載の影響は低減されている。特に閉ループシステムではうなりや干渉も見られず、本対処法が有効であることが確認できた。ここでは、 x 方向にステップ入力した結果のみを示したが、 θ_y 方向に入力した場合も同様の結果を得ている。

以上本節では、質量負荷を駆動対象に搭載した場合の影響を低減する方法を提案し、有効性を検討した。

5. 結 言

各自由度の運動間で原理的に静的、動的な干渉がなく、かつ各自由度の運動とも同一の制御特性を有する本6自由度微動機構を用いて、多自由度駆動の際の応答を示した。また、本機構を微動テーブルとして利用するような場合にも本研究の目的が達成されるように、質量負荷を搭載する場合の対処法を検討した。

多自由度駆動では、(1)任意の方向への並進ステップ移動と任意の位置や方向の固定軸回りの回転ステップ移動を、簡単な入力により実現できるという利点、(2)駆動対象を円運動させた場合に周波数を変化させてもほぼ円を描くことができるという利点、および共振周波数付近では動的干渉が生じるという問題点、を確認した。また、質量負荷搭載への対処法の検討では、対処法の原理を述べ、その有効性を実験とシミュレーションにより確認した。

今後は、機構を円運動させた時に観察されたような共振点付近の周波数の正弦波を入力した場合に生ずる動的干渉への対処などについて検討する。

参 考 文 献

- 1) 畑村洋太郎, 小野耕三, 長澤 潔, 村山 健: 平行平板・放射平板を用いた多軸微細位置決め機構(第2報), 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1987)495.
- 2) 谷口素也, 稲垣 晃, 杉本浩一, 船津隆一: 6自由度微動機構による超精密位置決め, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1987)499.
- 3) 辺見信彦, 和田真一, 青山尚之, 長田秀治, 下河辺 明: 6自由度微動機構の研究, 精密工学会誌, 55,4 (1989) 761.
- 4) 辺見信彦, 佐藤海二, 和田真一, 下河辺 明: 6自由度微動機構の研究(第2報)-制御特性-精密工学会誌, 58,6 (1992) 1035.