

# 指向性のある弾性変形はりの特徴と応用

阿部 幸勇

東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

## 概要

平行ばねと弾性はりは、 piezo素子や VCM などの微小変位拡大機構および精密測定用平行移動機構として多く用いられているが、大変位を可能にした場合の剛性の低下と移動精度が問題となっている。筆者らの提案している H溝はり は、この平行平板はりの短所である、はりの長手方向軸回りのねじり剛性を大幅に向上させることができ、また、変形部が限られていることから力検出用はりとして有用である。本稿では、これらのはり特徴を FEM により検証し、その応用例である平行ばねと力センサ用はりについて述べる。

## 1 はじめに

精密機器に用いられる支点要素は、併進機構や微小角回転機構の一部として組み込まれ、精密移動ステージ、X線干渉計、加速度計、振動計などに応用されている[1]。これらの機構要素としては、ボールネジ、板ばね、弾性ヒンジなどが用いられているが、なかでも切り欠き支点を持つ弾性ヒンジとその組み合わせはりは、その部分にスティックスリップなどの摩擦がないため位置決め精度が向上でき、発熱がなく移動速度も上げられるという長所を持っている。しかし反面、剛性の低さと疲労という新たな問題点もある[2]。一般的な弾性ヒンジは矩形断面のはりに深い切り欠きを入れ、その部分をはり変形の支点として用いるものである。

一方、応力測定の道具としての力覚センサの世界でも、特定方向への感度のみを求めた指向性のあるセンサはりが求められている[3]。力覚センサの開発では、力やモーメントを弾性ひずみに変換するセンサ構造体をいかに設計するかが重要なポイントとなる。筆者は、特定の方向の力のみを測定するために高指向性の力覚センサの開発を試みており、そのセンサはりに平行平板構造の進展型である H溝付きはりを採用している。この H溝付きはりは、わずかな変形により多くのひずみを取り出すことができると、測定に不要な方向の力には大きな剛性を持っていることが特徴である[4][5]。

これらの弾性変形はりは、平行移動機構として用いられる場合には大変位が求められ、また、力覚センサ用はりとして用いられる場合には小さな変位で大きな歪が求められる。しかし両者とも、感度方向と不感方向のはっきりした指向性のある変位が求められる点では同じである。そこで、これらの構造の基となっている平行平板構造と H溝はりについて、その特徴と有用性について検証を行い、指向性のある弾性変形はりを採用する際の指針に資することとする。

## 2 はりモデルによる解析

### 2-1 片持ちはりの変形

図 1 は、平行平板、単板、H溝型平行平板の端点に y 軸方向の力を掛けた際の、はりのたわみの模式図である。平行平板、H溝型平行平板構造ともに、はり端点が変形方向に対し平行に移動している。この特徴を生かし、センサ用はりや微小移動機構に用いる平行ばね、弾性ヒンジなどの

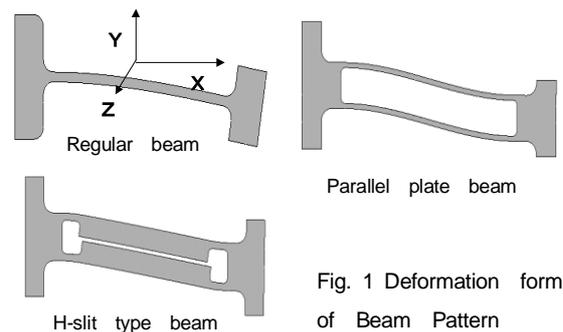


Fig. 1 Deformation form of Beam Pattern

変位拡大機構として用いられている．何れの変形でも，基本的には平行四辺形の形を保持した状態で変形が進行している．このことは，変形部位が4ツ棒リンク機構における4個の回転関節の役割を果たしていることになる．機構学における平行ばねは，平行四辺形を形作る4本のはりのうちの2本を弾性変形はりとし，残りの2本を剛体としたものである．

## 2-2 FEMによる解析

基礎となる平行平板を主体としたはりの変形挙動について，有限要素法(FEM)を用いて解析を行った．使用したFEM解析ソフトはSRAC社製COSMOS-WORKS, Ver7.0である．解析モデルは，平行はり長さ100[mm]，同部板厚2[mm]，はり幅30[mm]とし，平板部の間隔と中間部厚さを変化させて， $y$ 軸方向の可変形性と固有値， $y$ 軸荷重における軸端の傾き， $x$ 軸回りの捩れについて解析を行った．なお解析にあたっての条件は，要素サイズ2mm， $y$ 軸方向荷重50[N]， $x$ 軸周り偶力1.5[Nm]である．

図2は，各はりにおける $y$ 軸方向と $x$ 軸回りの加重の様子である．図3は，各はりのはり間距離と可変形性について解析したものである．はり間距離を増やすことにより剛性は高くなる．この解析では，平行平板，H溝付きはり双方とも，はり長さの15%程度のはり間距離で，その可変形性はサチュレートしている．ここでは詳述しないが，有値に関しても同様の傾向を示す．注意しなければならないのは，はり間距離が極めて小さい場合に単板よりも剛性が低くなることである．これは，はりを薄くしたことによる剛性の低下が，はり間距離を増やした場合の恩恵よりも大きい場合である．H溝型はりは平行平板はりに比べて変位量が小さいが，溝部に応力の多くが集中することから小さな変位で大きなひずみを取り出すことができる．

図4は， $x$ 軸周りのねじれ剛性について解析したものである．はり間距離を大きくすることによって剛性は高くなる．またH溝型はりにすることで，このねじれ剛性を格段に向上できる．

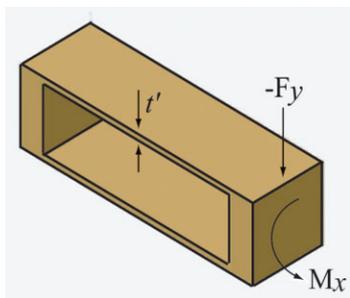


Fig.2 Loading point

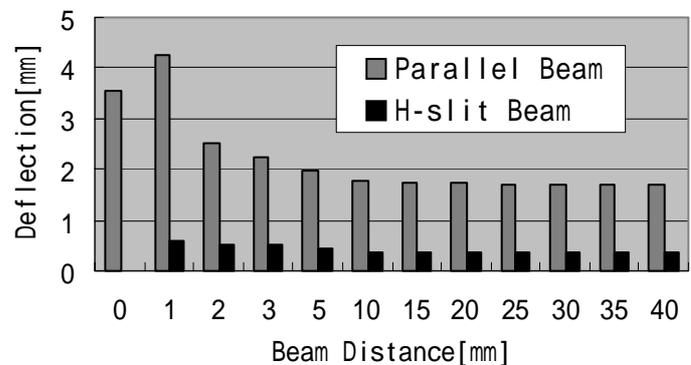


Fig.3 Comparison between the H-slit beam and parallel beam in y-axis

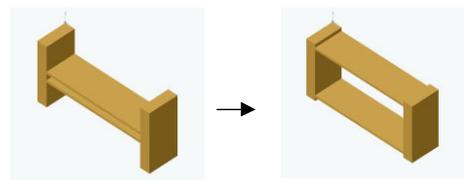
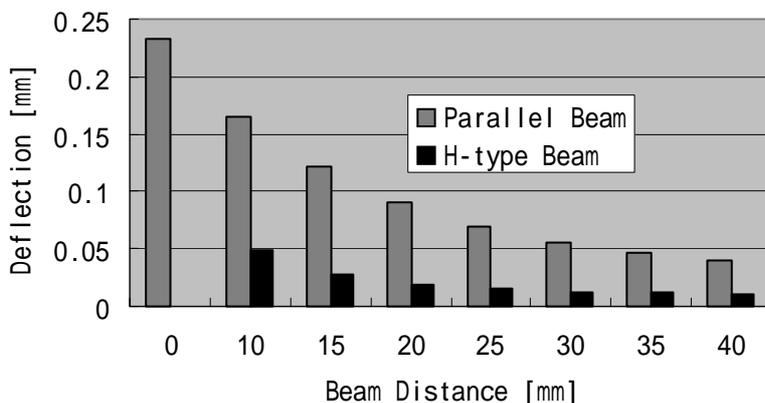


Fig. 4 Relation of deflection with beam distance as a function of moment of x-axis

### 2-3 力検出用はり

力覚センサに用いるはりとしては、多くの場合、単板はりか平行平板はりが用いられ、その応力集中の箇所にはひずみゲージを貼り変形量を歪として取り出している。前章のFEMによる解析でも明らかなように、H溝付きはりは変形箇所が限られていることから、少ない変形で大きなひずみを取り出せることがわかる。さらに、このH溝はりは信号の分離性にも優れ他の方向への剛性も高い。しかし、注意しなければならないのは図5に示す溝部(s)への過度の応力集中で、この溝部の形状を、中心部の曲率を周辺部より大きくした形状が望ましい。

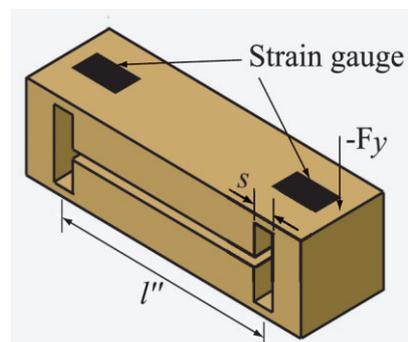


Fig.5 H-slit Type Sensor Beam

### 2-4 平行バネ機構

平行平板機構は力を掛けた端点がほぼ平行に移動することから多くの精密機器の平行移動機構として用いられている。しかし変形量を大きくすると、その平行移動部がわずかながら「沈み込む」ことが知られており、このことへの対策が求められている。そこで筆者は、はりの枚数とそのはり間距離、はり長さなどから、可変形性を保持したまま端点の傾きを最小にした最適構造が決められると考えている。その関係を明らかにするために、いくつかの構造についてFEMによる解析を試みた。

図6は、はり長を変化させた場合のy軸方向の荷重における各はり端点の傾き度(x軸方向の変位をy軸方向の変位で除した値)の解析結果である。はり間距離を大きくすると、その傾き度は小さくなる。

図7は、はり枚数と可変形性をとったものである。各はりの配置構成にもよるが、一般的に言って、はりの総厚さが同じであればはり数の多い方がたわみやすい。

図8は4枚はり構成の例であり、図9は、この内側のはり位置を変化させた場合のy軸方向の可変形性をとったものである。また、図10は、この場合のはり端点のx軸の方向の変位量を、図11は、x軸回りのねじれ剛性をとったものである。これの結果より、内側のはり位置を極端に外側にしない限り、その可変形性に大きな違いはないが、ねじれ剛性および、はり端面の傾きは、内側のはりを外側のはりの近くにするることによってある程度改善できることがわかる。このことから、はりを複数枚とし、各はりを比較的外側に配置したものが、平行バネ機構として最適と思われる。

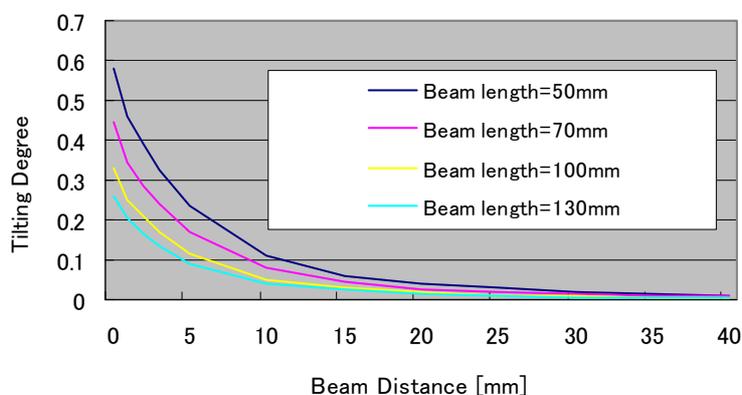


Fig.6 Relation of tilting degree with beam distance as different beam length

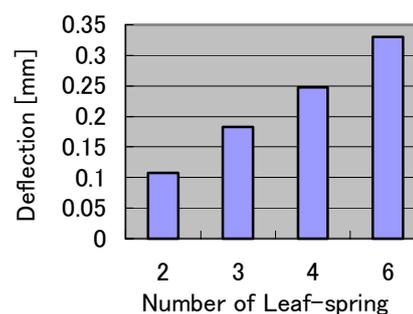


Fig. 7 Relation of deflection and number of leaf-spring

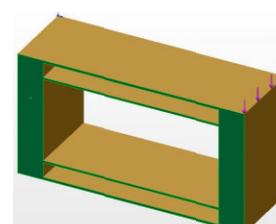


Fig.8 parallel beam model

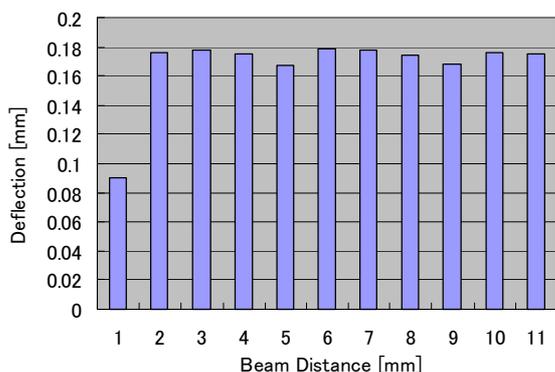


Fig.9 Deflection on y-axis

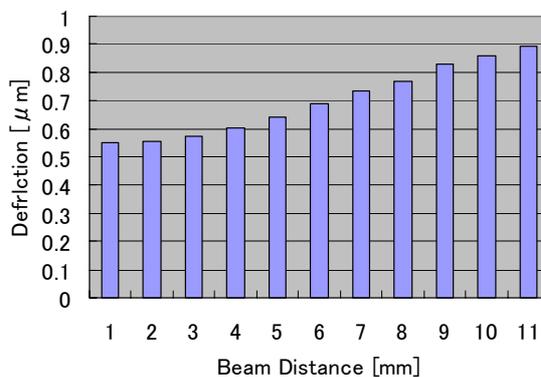


Fig.10 Deflection as a function of moment

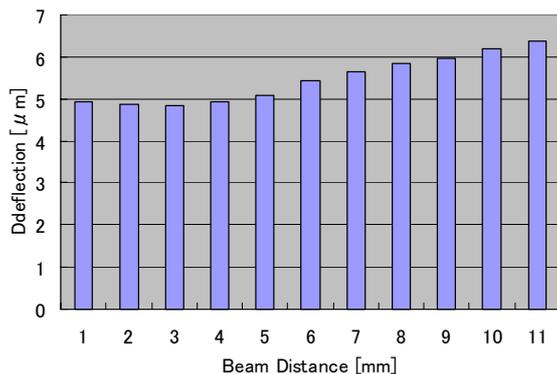


Fig.11 Deflection on x-axis

### 3 おわりに

平行平板構造を基にした指向性のある弾性変形はりの解析をし、その特徴と使用の際の注意点を述べた。

平行平板はりにすることで、 $y$  軸方向の変形性を損なうことなく  $x$  軸まわりの剛性を大きく改善できるが、その特性を生かすためには、はり間距離とはり長さの比が重要である。

H型溝付はりは平行平板はりに比べ  $y$  軸方向の剛性が高くなり、さらに  $x$  軸回りの剛性についても大きく改善できる。また、応力が変形部に集中していることから、取り出せるひずみもより大きい。しかし、問題点もある。本稿では詳述しないが、溝部の疲労について考慮する必要があり適正な溝形状が必要である。また、はり中間部の大きさが固有値を下げる原因になるので、その軽量化についても考慮しなければならない。

平行ばねの場合、単に変形部のはり厚さを減らすことより、はりを薄くして数を増やすこと、また、このはりを比較的、外側に配置することで、不要な方向への剛性を保持したまま必要な方向への剛性をあげることができる。はり長さを長くすることで、端面の傾き/沈み込みは小さくできる。

### 参考文献

- [1] 南光智昭, 関行裕, 本村尚道: 近赤外分光計 Infra-Spec NR800, 横川技報, Vol. 45, No. 3, (2001), pp179-182
- [2] 久曾神煌, 佐川大輔, 豊山晃: 板ばねを利用した直動および回転機構, 精密工学会誌, (1987), pp.1092-1096.
- [3] 阿部幸勇, 三輪敏雄, 内山勝: 微小力測定用平面三軸力覚センサの開発, 日本機械学会論文集(C編), 64-621 (1998/5), 1648-1653.
- [4] 阿部幸勇, 佐藤大祐, 近野敦, 内山勝: 指向性を持った力覚センサ用はりの研究, 第45回自動制御連合演習講演論文集 (2002/11/26, 27), 9-10.
- [5] Koyu Abe, Yusuke Tanida, Atsushi Konno and Masaru Uchiyama, A Directional Deflection Sensor Beam for Very Small Force/Torque Measurement, Proc. of 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1056-1061(2003).