

モザイク回折格子制御台微動ステージの較正 (I)

牧田貢 (京大理) 松川英二 (ニコン)
宮野英治 (ニコン) 上床真司 (ニコン)

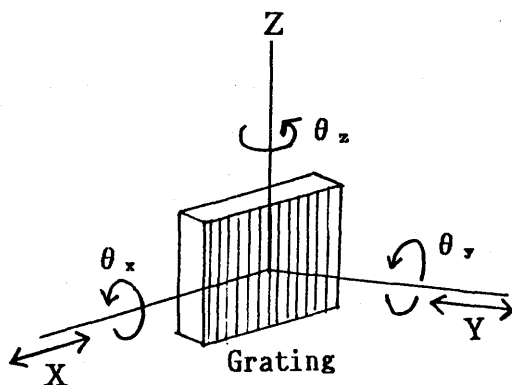
将来の大口径分光望遠鏡にそなえて、試験研究 (科学研究費補助金) で、平成2年度に、幅20cm高さ10cmのエッセル2枚で構成するモザイク回折格子制御台を試作した。その性能を分光光学系を組んで精密に調べる前に、既存の測定器を用いて、特に、ピエゾ素子による制御部分の特性を調べてみた。実験はニコン大井製作所無塵室で行った。

1. 微動量の測定

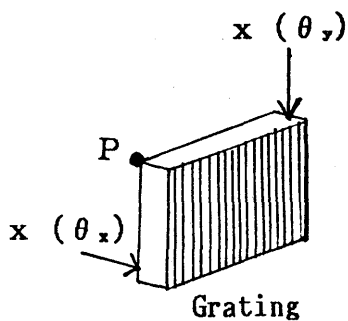
モザイク回折格子制御台の可動グレーティングは積み重ねた4個の微動ステージ (θ_{x-y} ステージ、 θ_z ステージ、Yステージ、Xステージ) 上にあつて、その微動回転や微小移動がピエゾ素子で行われる。微動量は第1図に示した θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、X、Yの5個である。このうち回転量の測定は光電自動コリメーター (ニコン) を用いて行い、ダミーグレーティングの表面反射を利用して θ_x と θ_z 、グレーティングホルダー側面にはりつけた補助鏡の反射によって θ_y と θ_z が測られた。Y方向の移動については電気マイクロメーター (アンリツ) とレーザー偏位計 (キーエンス) を用いた。X方向については実験の段階でピエゾ素子が故障していたため測定できなかった。

実験はできるだけ使用状態に近ずけるために、各ピエゾ素子の初期動作点を制御範囲の中間点においた。即ち、回転については制御範囲が30ミクロンなのでピエゾ素子の伸びが15ミクロンの状態で、Y移動については制御範囲が15ミクロンなのでピエゾ素子の伸びは7.5ミクロンの状態で測定器の出力をゼロにリセットし基準位置とした。そしてこの状態から個別にピエゾ素子を変化させた時の測定器の出力が調べられた。それぞれの読み取りの最小値はピエゾ素子の伸びが0.1ミクロン、光電コリメーターが0.1秒角、電気マイクロメーター及びレーザー偏位計が0.1ミクロンであつて、それぞれの測定精度を大体表しているとしてよい。Y移動については計器の固定がやや心許なく測定値に僅かなドリフト傾向が見られた。又、測定の初期には半自動コリメーターを使用したか、カーソル移動を手動で行うため測定値のバラツキが大きかった。しかし、結果はここに述べる自動コリメーターと同じ傾向を示した。

第1図 可動グレーティングの微動量の座標系



第2図 θ_x - θ_y ステージの原理 ピボット (P) に対する piezo素子の動作方向と動作点を矢印で示す。



2. 微動量の期待値からのずれ

微動回転角については、どの軸まわりについてもほぼ同じ出力が得られた。即ち、

$$\theta_x, \theta_y, \theta_z \text{ (arcsec)} = \pm 1.833 [x \text{ (\mu m)} - 15] \quad (1)$$

が近似的に成立した。ここで x は piezo 素子にはりついた歪みゲージセンサーの与える piezo 素子の伸びである。符号は第 1 図の回転方向を正とする時、 θ_x は正、他の 2 者は負で、これは単に piezo 素子の取付位置によるものである。

θ_x と θ_y は同じ微動ステージ上にあり (第 2 図)、支点 (ピボット) と動作点 (piezo 素子) 間の距離は各々 100 ミリである。従って piezo 素子の伸びがそのまま回転量に変換されていれば、30 ミクロンの動作点の移動は角度の 60 秒に相当し、(1) 式の与える 55 秒角と 5 秒角の差が存在する。

同様に、 θ_z は第 3 図のように 1 組 2 個の piezo 素子で作られ、66 ミリの動作半径に対して、30 ミクロンの piezo 素子の伸びをテコによって ($30 \times 18 / 14$) ミクロンに拡大しているが、期待される θ_z の 117 秒角に対して、測定値は約半分の 55 秒角である。

また、Y 軸方向の移動は第 4 図の原理で行われ、測定量は

$$Y \text{ (\mu m)} = 0.546 [x \text{ (\mu m)} - 7.5] \quad (2)$$

の近似式で表される。式から明かなように piezo 素子の伸びの 54.6% が測定値である。

このように piezo 素子の伸びはそのままステージの回転や移動とはなっていない。その原因としては次の二つが考えられる。

1) piezo の動作点は '点' であり、相手の壁を歪ませるだろう。

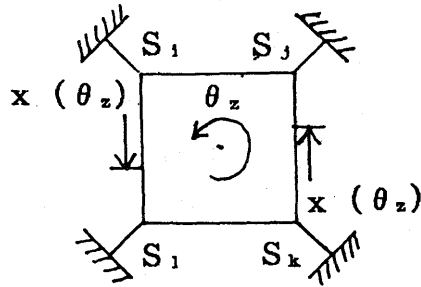
θ_x, θ_y の 10% (3 ミクロン) の違いはこれによって説明できると思われる。

2) θ_z, Y については piezo 動作点からステージの動く部分の間にバネ或いはバネ的部分が介在している。そのため piezo 素子の伸びの半分をそこが吸収していると解釈できる。

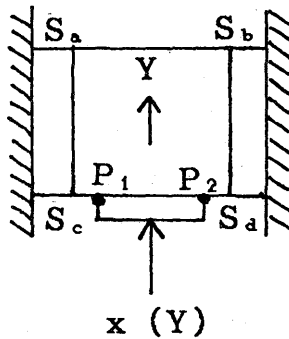
3. 微動量の再現性

第 5 図は第 2 章で与えた (1) 式及び (2) 式からの測定値のずれを示したものである。期待値からのずれの小さい θ_x と θ_y ではずれも小

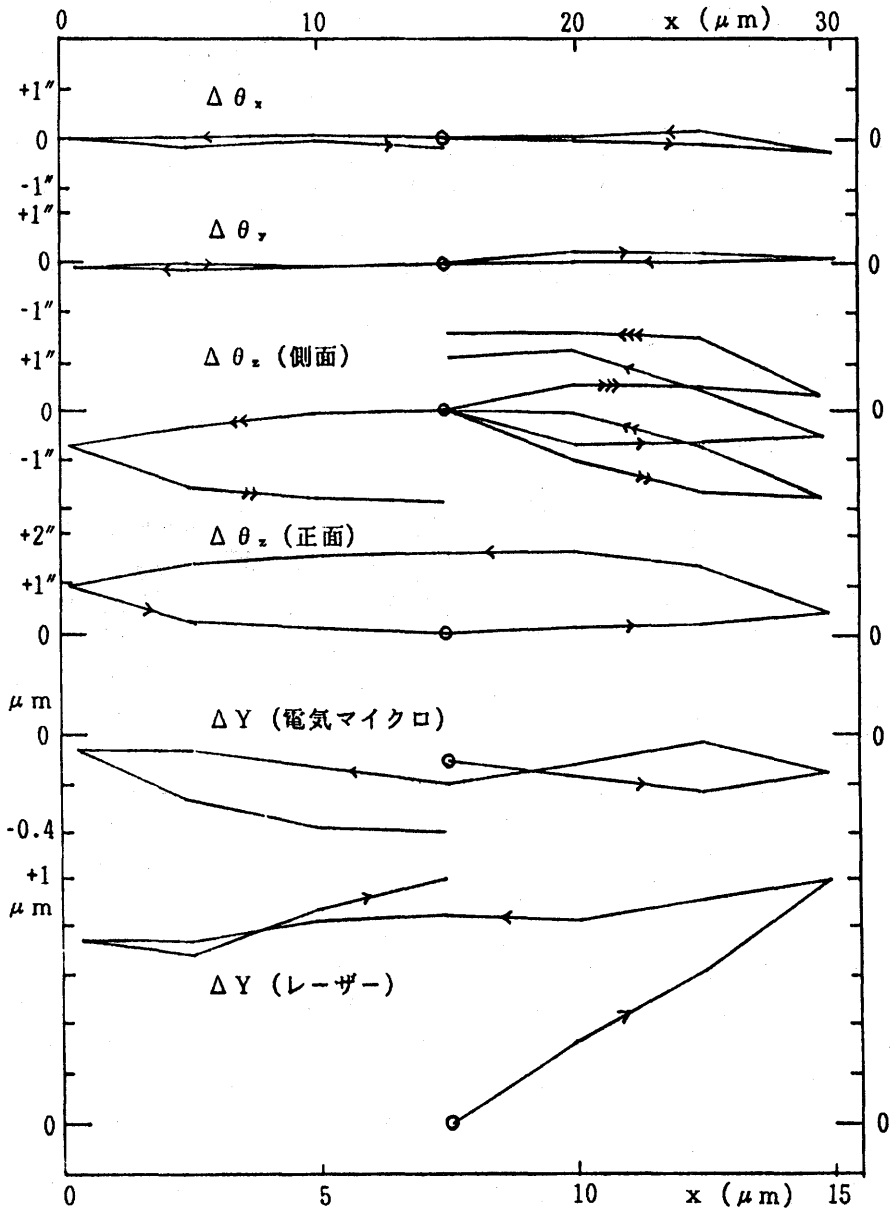
第3図 θ_z ステージの原理 S_1, S_j, S_k, S_l の板バネによって中央のステージが四隅の壁に固定されている。一組のピエゾ素子の動き $x(\theta_z)$ がステージの回転角 θ_z をつくる。



第4図 Yステージの原理 S_a, S_b, S_c, S_d の板バネによって中央のステージが両側の壁に固定されている。矢印 x (Y) で示すピエゾの動きは P_1, P_2 点を介して中央ステージに伝わる。



第5図 ピエゾ素子の伸び x に対する微動量の直線式(1)及び(2)からのずれ 実験は丸点から始まり矢印の順序で測定が行われた。横軸目盛りは ΔY については下側を他は上側を使う。



さく±0. 2秒角の中に入っているが、 θ_z は±1秒角、Yは±0. 2ミクロンとなっている（レーザー偏位計によるYの最初の大きなずれは偏位計自体のすべり移動らしい）。 θ_z （側面）のずれについては3回の実験結果が示されているが、その差はペアとなっているピエゾ素子のどちらを先にどの位ずつ変化させるかで歪み方が異なるためと考えられる。機構的には、一对のピエゾ素子は同時に等量ずつ変形させるべきである。

ずれの大きさについてはこのように大きな開きがあるが、ピエゾ素子を伸ばして行くときと縮めて行くときで系統的な傾向が見られる。いずれにしても上述のずれを無視できれば微動量の再現性は良いといえるのであるが、それらが無視できないとすると、例えば、光学的判定によって微動量を監視する必要がある。更に、ピエゾ素子とステージの間に蓄えられた歪みが再現性を阻んでいることを考えると、一度微動量を何らかの方法で所定の値にしたとしても、それがどの位持続するか、ステージの置かれた環境を考慮しながら追跡することが大事となる。

4. 微動量間のクロストーク

或軸のまわりの回転或いはそれに沿っての移動を行ったとき、他の軸まわりの回転が起こるのは好ましくない。このクロストークが製作したステージについてどの位あるかを調べてみた。測定は各ピエゾ素子の伸びを基準位置に置き、そのうちの一つだけを制御範囲一杯に動かして光電コリメーターで回転を検出する方法で行った。結果は第1表にまとめてある。これによれば、 θ_{x-y} ステージ、 θ_z ステージ、Yステージは0. 1秒角及び0. 1ミクロンという測定精度の枠内では独立でクロストークは無い。ただ、 θ_{x-y} ステージ内で各々の回転を行った時のみ θ_x と θ_y の間に干渉が起こること、及び θ_y 回転によって僅かに θ_z 回転の生ずることを示している。

以上から制御台の機械的精度について次のことがいえる。

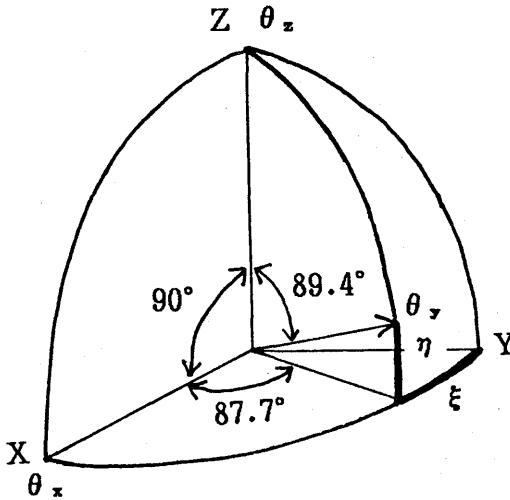
- 1) Yステージの移動は直線的で空間的な回転やねじれが無い。
- 2) θ_z ステージは同一平面内で動いている。
- 3) θ_{x-y} ステージに現れるクロストークは θ_y 回転軸が θ_x 及び θ_z 回転軸と第6図のようにならざるにずれているとして説明できる。即ち θ_y 正回転ベクトルは $\delta\theta_x$ 及び $\delta\theta_z$ 正回転を引き起こし、 θ_x 正回転はZ軸と直交しているので $\delta\theta_y$ 正回転のみを生ずる。 θ_x 及び θ_y の変動範囲は(1)式により55秒角なので、第6図の ξ と η は第1表から次のように計算できる。

$$\xi = 2.0/55 = 2.1^\circ \quad (\theta_x \text{回転から}) \quad (3)$$

第1表

ピエゾ素子の変動範囲 (μm)	クロストーク (arcsec)		
	$\delta \theta_x$	$\delta \theta_y$	$\delta \theta_z$
$x (\theta_x) = 0.4 \rightarrow 30.1$	*	$-1.1 \rightarrow +0.9$	0.0
$x (\theta_y) = 0.6 \rightarrow 30.2$	$+1.2 \rightarrow -1.1$	*	$+0.3 \rightarrow -0.3$
$x (\theta_z) = 0.4 \rightarrow 29.7$	0.0	0.0	$+0.4 \rightarrow -0.2$
$x (Y) = 0.3 \rightarrow 14.9$	0.0	0.0	*
			0.0

第6図 θ_{x-y} ステージにおける回転軸間の関係



$$= 2.3 / 55 = 2.4^\circ \quad (\theta_y \text{回転から}) \quad (4)$$

$$\eta = 0.6 / 55 = 0.6^\circ \quad (5)$$

ξ については平均値をとり θ_y 回転軸が他の軸に対して直角からずれていることを第6図に示す。これによって引き起こされる最大のクロストークは(4)式から求められる4%である。

5. まとめ

この実験で得られた結果は次のようである。

1) ピエゾ素子によれば、0.1秒角及び0.1ミクロンの微動が可能である。

2) ピエゾ素子とステージの間には、バネ等による歪みの蓄積があって、0.1秒角或いは0.1ミクロン精度の再現性は無い。ピエゾ素子自体のヒステリシスはその伸びを測ることで除かれているが、更に上記歪みも避けるにはセンサーをできるだけステージよりにつけることが望ましい。実験計画の段階では高感度でしかも十分に小型なセンサーが見つからなかったため、ここではセンサー付きピエゾ素子を採用した。しかし、このためにピエゾ素子の動きがステージとの間で場合によっては50%近くも吸収されてしまうことが分かった。

3) 回転についてはステージ間にクロストークは無かった。同一ステージに二つの回転機構の載っているもの (θ_x - θ_y ステージ) には高々4%のクロストークが見られた。これは所定の方向にグレーティングの反射光を向けていく過程では問題にならない小量と思われる。

4) 上記2)の歪み—機械的ヒステリシスは経時変化、及び、温度のような環境で変化する可能性があるため調査しなければならない。

5) 再現性が1秒角を越すような悪さ(要求精度0.1秒角と較べて)であること及び4)の環境効果を考えると、2)のセンサーの取付場所による改善にも拘らず、光電コリメーターを用いて測定するような最終段階での監視結果をフィードバックすることが0.1秒角及び0.1ミクロンの精度を保証するために必要かもしれない。

最後に実験にあたって便宜を計らって頂いた大井製作所の方々に感謝いたします。また、レポート作成に先だって国立天文台山下泰正氏と貴重な議論を交わしたこと、及び、レポートの表現について船越康宏氏より有益なコメントのあったことをつけ加えます。