

線スペクトル偏光分光装置

視野確認鏡移動用パルスモーターの 必要出力計算

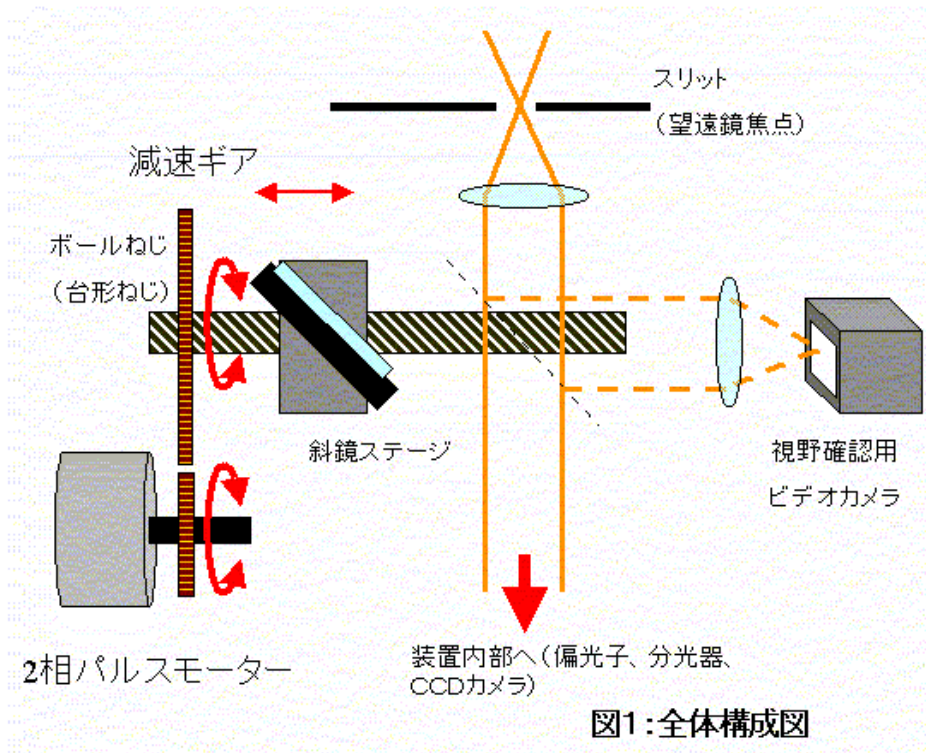
東北大・理・天文 秋田谷 洋

1. 概要

線スペクトル偏光分光装置の視野確認鏡（ボールねじ駆動）をパルスモーター（2相パルスモーター;オリエンタルモーターCSK243-AP)を用いて電動化する。視野確認鏡の移動、加速に必要なトルクを計算し、使用する予定のパルスモーターの出力が十分であるか確認する。

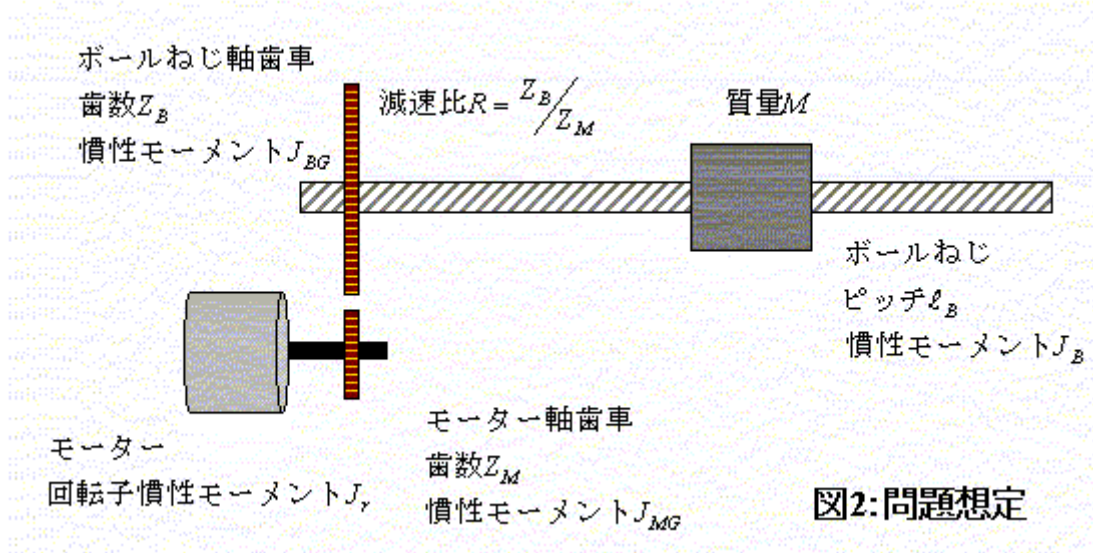
2. 全体構成

視野確認鏡の構成は図1のとおり。



3. 確認すべきこと

図 2 のようなボールねじで駆動されるステージの移動について、モーター軸に換算した系全体の慣性モーメントを計算する。さらに、ステージを定速で移動するとき、加速するときに必要なモーターのトルクを算出する。この値を、モーターのトルクの仕様値と比較し、モーターの出力トルクが必要なトルクを十分上回っていれば良い。



4. 系の慣性モーメントの計算

手順は以下のとおり。

- (1) 直線移動するステージについて、ボールねじ軸に換算した慣性モーメント(J_L)を求める。
- (2) ボールねじ軸全体の慣性モーメント(J_{BA})を求める。
- (3) ボールねじ軸での慣性モーメントを、減速比 R を考慮して、モーター軸の慣性モーメント(J_M)に換算する。
- (4) モーター軸全体の慣性モーメント(J_{MA})を求める。

- (1) ステージのボールねじ軸換算慣性モーメント

$$J_L = M \left(\frac{\ell_B}{2\pi} \right)^2$$

ℓ_B : ボールねじピッチ

M : ステージ全体質量

- (2) ボールねじ全体の慣性モーメント

$$J_{BA} = J_L + J_B + J_{BG}$$

J_B : ボールねじ自身の慣性モーメント

J_{BG} : ボールねじ軸の歯車の慣性モーメント

(3) ボールねじ軸全体の慣性モーメントをモーター軸での慣性モーメントに変換

$$J_M = J_{BA} \cdot \frac{1}{R^2}$$

R : 減速比

(4) モーター軸全体の慣性モーメント

$$J_{MA} = J_M + J_r + J_{MG}$$

J_r : モーター回転子慣性モーメント

J_{MC} : モーター軸歯車慣性モーメント

5. 定速時、加速時に必要なモーターのトルクの計算

- 定速トルク (負荷トルク)

摩擦力などのトルクへの換算

$$T_L = \left(\frac{F \ell_B}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 F_0 \ell_B}{2\pi} \right) \frac{1}{R}$$

$$F = Mg$$

η : 機械効率(0.85–0.95)

μ_0 : 与圧ナットの内部摩擦係数(0.1–0.3)

F_0 : 与圧荷重($\approx \frac{1}{3}F$)

(オリエンタルモーター総合カタログ 1997 より)

- 加速トルク

加速時に必要なトルク

$$T_A = J_{MA} \frac{d\omega}{dt}$$

$\frac{d\omega}{dt}$: 角加速度

6. 実際の視野確認鏡への適用

使用する各部品の諸パラメータは以下のとおり。

ステージ質量 M	1.3 kg
ボールねじピッチ l_B	5 mm/rev.
ボールねじ($d=22\text{mm}$ 、 $l=385\text{mm}$ 、ステンレス)慣性モーメント J_B	$7.1 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$
ボールねじ軸歯車(歯数 $Z_B=60$ 、 $d=60\text{mm}$ 、 $t=6\text{mm}$ 、ステンレス)慣性モーメント J_{BG}	$1.9 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$
モーターねじ軸歯車(歯数 $Z_M=15$ 、 $d=15\text{mm}$ 、 $t=8\text{mm}$ 、ステンレス)慣性モーメント J_{MG}	$1.6 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2$
減速比 $R(=Z_B/Z_M)$	4
モーター回転子慣性モーメント J_r	$3.5 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2$

これらを利用すると、

モーター軸全体の慣性モーメントは、

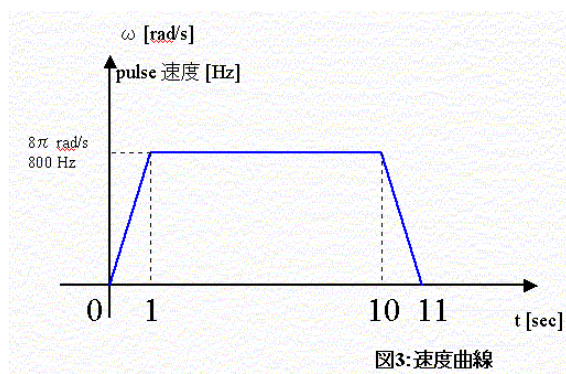
$$J_{MA} = 2.0 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$$

となる。

また、定速トルクは、

$$T_L = 3.2 \times 10^{-3} \text{ N m}$$

となる。



加速トルクを求めるには、モーターをどのように加速するかを決める必要がある。

鏡の移動に必要な総回転数は、ボールねじ軸で 10 回転、モーター軸で 40 回転(減速比 4)、10 秒間で鏡の出し入れをすることを考える。

その場合、平均回転周期は、 $4 \cdot 2 \text{ rad/s}$ 。2 相パルスモーターの場合、200 pulse/rot なので、モーター駆動に必要なパルス速度は 800Hz となる。移動開始終了の前後 1 秒間で加減速することにする。この場合の速度曲線は図 3 のようになる。

加減速時の角加速度は、

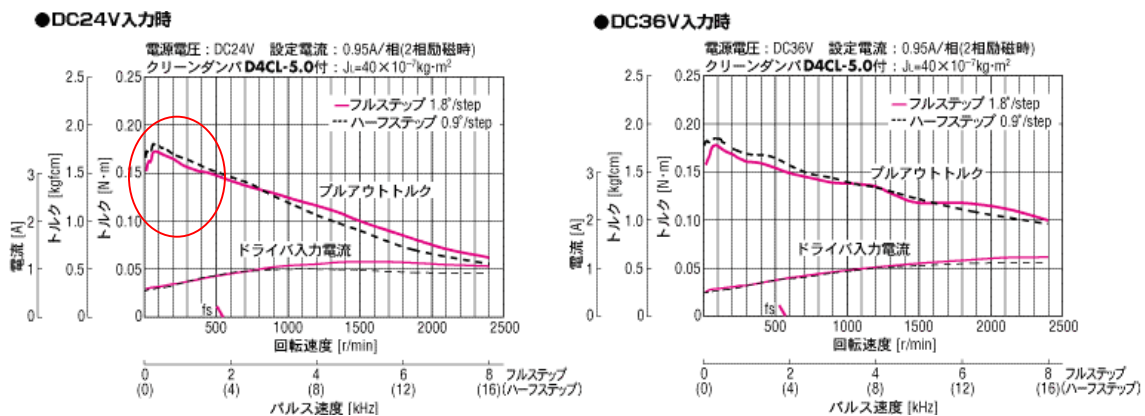
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2 \times 4\pi}{1} = 8\pi \text{ rad/s}^2$$

よって、加速トルクは、

$$T_A = 5.0 \times 10^{-4} \text{ N m}$$

となる。

一方、パルスモーターの速度-トルク特性（図 4）から、パルス速度 1kHz 以下では、モーターの出力トルク $T_M \sim 0.15 \text{ N m}$ 。これは、上で求めた定速トルク $T_L \sim 0.003 \text{ N m}$ 、加速トルク $T_A \sim 0.0005$ より十分大きい。よって、このモーターの出力は目的に対して十分な出力を持っている。



（図 4）パルスモーターCSK243-AP の速度-トルク特性。

7. 参考資料

- 勘どころ設計技術 機械要素の選択 シリーズ II 日経メカニカル別冊、1996、日経メカニカル社
パルスモーターに限らないモーターの選定方法や、負荷計算、応用例に詳しい。慣性モーメント計算式の導出も親切に解説。
- オリエンタルモーター総合 1997
ユーザー向けのモーターの解説、公式の一覧表など。ハンドブック的に利用できる。
- ミスミ FA メカニカル標準部品 カタログ
巻末の付録に、公式などが簡潔に掲載されている

8. 付録

● モーターの種類と特徴

AC モーター、 DC モーター	<ul style="list-style-type: none"> ・ 扱いが容易 ・ 高出力 ・ 速度・出力制御が難しい(負荷に応じた電圧制御が必要) ・ 位置決めが困難(5-40回転のオーバーラン) ・ 安価
ステッピング モーター	<ul style="list-style-type: none"> ・ 位置決めが高精度(特に微小回転時)。5相ステッピングモーターで$0^\circ.36 \pm 0^\circ.05$ ・ 専用ドライバを用いることで、計算機からの制御が容易 ・ 高速になると、トルク低下、脱調が生じる ・ 停止時の発熱が大 ・ 閉ループのため、時に原点センサーが別に必要 ・ 比較的安価
AC サーボモ ーター	<ul style="list-style-type: none"> ・ 位置決めが高精度。$0^\circ.36 \pm 0^\circ.36^\circ$ ・ 高速回転が可能(高速時にもトルクが一定) ・ 停止時の発熱小 ・ 閉ループ(常に光学エンコーダーで回転位置を監視)なので、原点センサーはいらない ・ 高価



装置の視野確認鏡部分



パルスモーター