解説３
ボールねじを用いた精密位置決め機構の剛性と振動特性

信州大学　深田　茂生＊
＊ふかだ　しげお：工学部　機械システム工学科　教授

はじめに

モータの回転運動を直線運動に変換する送りねじは，さまざまな位置決め機構に古くから広く用いられてきている。近年になって応用範囲が広がっているリニアモータ駆動とは異なり，送りねじは，それ自体が軸力を支持する剛性を兼ね備えており，負荷に抗する剛性と精密な位置決めを両立させることができる。最近は，送りねじの中でもボールねじを用いる場合が圧倒的に多いが[1]，ボールねじは，転がり接触によって摩擦損失が低減される反面，すべりねじよりも軸方向剛性が劣っていることが弱点であるとされる。また位置決めの高速化とともに，ボールねじ駆動による位置決め機構の振動特性も重要な要因となっている。本稿では，ボールねじを用いた位置決め機構の静剛性と振動特性（動剛性）の実際について，2つの例を用いて概説する。

位置決め機構の構成

ボールねじを用いた位置決め機構の構成を**図1**に示す。(a)は一般的な位置決め機構の構成を示しており，モータ軸とねじ軸を軸継手で結合し，ナットをテーブルに直接固定している。ねじ軸の両端は軸受で回転案内され，予圧が付与された組合せアンギュラ玉軸受で一端を軸方向に固定し，他端を深溝玉軸受で回転支持している。ステージの駆動源はモータの発生トルクTであり，ステージには軸方向の負荷Fが作用する。

モータ軸とねじ軸を，たわみのない固定軸継手で結合する場合には，この機構は同図(b)のように単純化することができる[2]。ねじは，一定のリード角をもつくさびとして表されており，モータ軸とねじ軸が一体となった回転軸の慣性モーメントをJで表している。この図の変位yはねじ軸の回転角度θと一定の幾何学的関係（$y=\theta\times P/2\pi$，Pはねじのリード）で拘束されているため，この系はθとテーブル変位xの2自由度の振動系となる。一方，軸継手にたわみ軸継手（フレキシブルカップリング）を用いた場合は，モータ軸とねじ軸の回転角度は一致せず，同図(c)のような3自由度の振動系となる。図中のk_1が，軸継手のねじり方向のばね定数を意味する。

静剛性

1. ヘルツ接触の剛性

図1のばね定数kは，軸方向荷重Fに対するテーブル変位xの剛性を表している。これらの振動モデルは集中定数モデルであり，解析においては，機構のどこまでをばね定数kに含めるかについて，単純な場合から複雑な場合までさまざまな取捨選択の余地がある。実際にはねじの接触部だけでなく，ねじ軸やナット本体の引張–圧縮変形やねじり変形，さらにはボルト締結部の剛性までもが問題とされる場合があるが，ボールねじや転がり軸受を用いる場合には，玉周辺のヘルツ接触に伴う変位の影響が大きいとされる。

ヘルツ接触の模式図を**図2**に示す。荷重Fを点

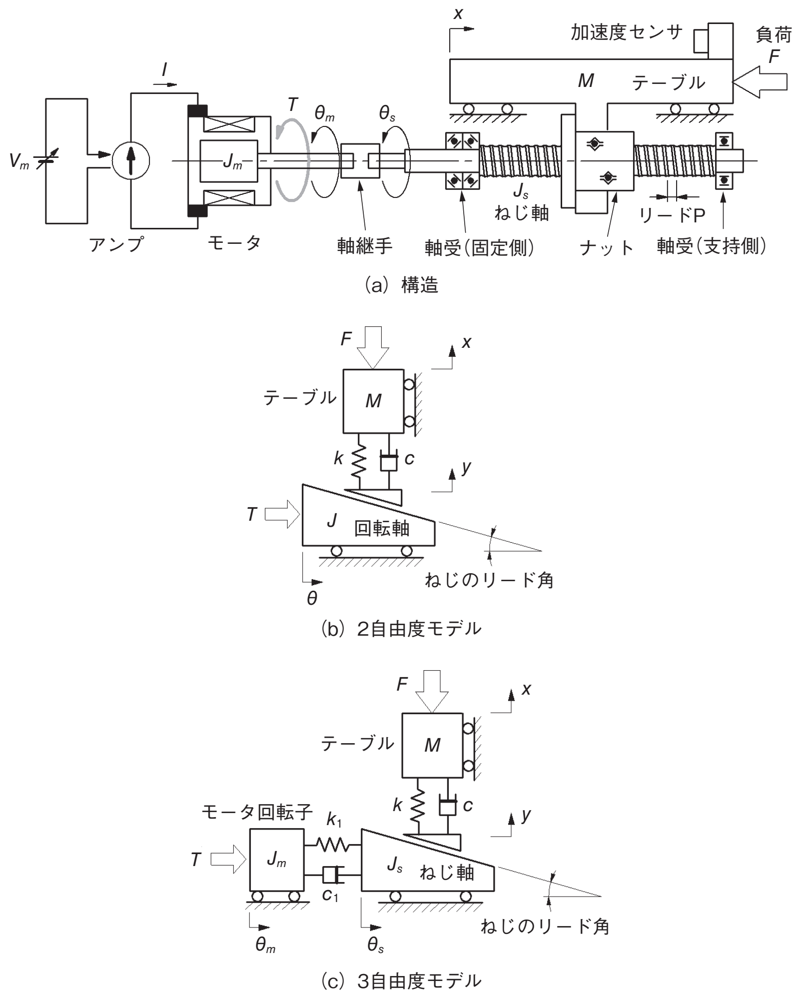

図1　送りねじを用いた位置決め機構(ステージ①)

接触で支持するためには，有限な微小面積Aにわたって分布する高い接触応力が必要であり，その結果，玉中心はδ_0だけ変位し，Fの着力点はδ_t変位する。ここでFとδ_tの間には次の関係がある[3),4)]。

$$\delta_t = c \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{D_w}} \tag{1}$$

D_wは玉径，cは接触部の形状や材料で決まる定数である。逆にFをδ_tで表すと次式のようになる。

$$F = k \cdot D_w^{\frac{1}{2}} \cdot \delta_t^{\frac{3}{2}} \quad \left(k = c^{-\frac{3}{2}}\right) \tag{2}$$

すなわち，Fはδ_tの3/2乗に比例することになる。

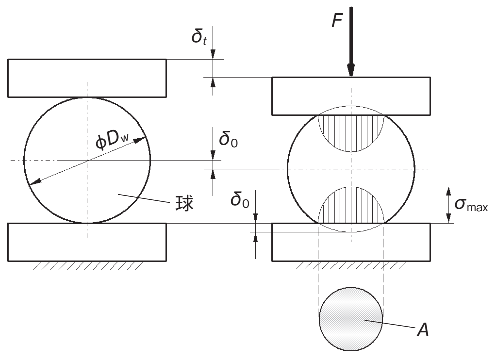

図2　ヘルツ接触の剛性