超精密位置決め技術

ナノメートルオーダー対応

精密・超精密位置決め機構の技術動向

近年、次世代半導体製造装置をはじめとする超精密機械分野の発展に伴い、ナノメートルオーダーでの超精密位置決め機構の需要は一層高まってきている。また、このような超精密位置決め機構を必要とする機器の種類も多様化する傾向にあり、いまだ新しいアクチュエーターの開発は重要な課題である。ここでは筆者らの研究グループによって開発した「空気圧サーボ軸受アクチュエータ」の基本原理や特徴を述べるとともに、長ストローク化のための工夫やXYステージなどへの具体的な応用例について解説する。

精密位置決めを実現するためには①本体を駆動する「駆動要素」②本体の運動精度を補償する「案内要素」③本体の位置情報を得るための「センサー」④駆動要素に指令を与える「制御機器（コントローラー）」―の四つが必要であり、これらをバランス良く選択し、配置することが、位置決めの成否を握るカギとなる。一般的に、精度1マイクロメートル前後での位置決めを「精密位置決め」と呼び、10ナノメートル以下での位置決めを「超精密位置決め」と呼ぶことによって対象を区別することが多い。

精密位置決め機構としては、サーボモーターとボールネジを組み合わせたものや、リニアモーターとリニアガイドを組み合わせたものなど、比較的安価なアクチュエーターが多数発売されている。一方、超精密位置決め機構の需要も年々拡大しており、例えば半導体素子製造用露光装置（ステッパー）のように比較的長い動作領域が求められる場合には駆動要素に非接触案内（あるいは弾性支持案内）が必要であるが、前述の精密位置決め機構に比べると技術が成熟しているとは言い難く、いまだ開発の余地を多く残している。

とはいえ、ナノモーションを実現するさまざまな機構の提案は比較的古くからなされており、その一部は身近なところで既に実用化されるに至っている。例えば摩擦を介して駆動する超音波モーター式アクチュエーターが使用され、動作領域が短くて良い場合には駆動要素にピエゾ素子、案内要素に弾性支持案内（板バネ）が用いられることが多い。いずれにしても、安定した超精密位置決めを実現するには高精度な駆動要素やセンサー、その運動を補償する非接触案内（あるいは弾性支持案内）が必要であるが、前述の精密位置決め機構に比べると技術が成熟しているとは言い難く、いまだ開発の余地を多く残している。

とはいえ、ナノモーションを実現するさまざまな機構の提案は比較的古くからなされており、その一部は身近なところで既に実用化されるに至っている。例えば摩擦を介して駆動する超音波モーター式アクチュエーターは1980年代後半に開発された後、低消費電力や静音性などの特徴を生かしてカメラレンズのオートフォーカス機構に採用されてきた。また、装置内のボールネジやリニアガイドといった各種要素の高精度化、高性能化を図ることによって、その位置決め精度を向上させようという工夫も古くから数多く行われている。

しかしながら、超精密位置決め機構の場合、その技術的な難しさから、これらの例のようにある特定の用途や装置に特化した開発にならざるを得ない側面がある。そのような意味で、現在もよりさまざまな機構のアクチュエーターの提案、開発が望まれており、さらなる選択肢の拡充が期待されている。

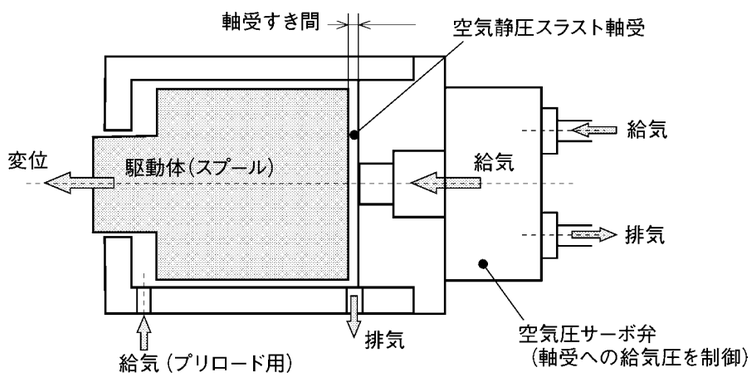

図１「空気圧サーボ軸受アクチュエータ」の構造

同志社大学　理工学部
エネルギー機械工学科
准教授
平山 朋子

「空気圧軸受アクチュエータ」の基本構造と動作原理

筆者らの研究グループでは新しい超精密位置決め機構として、空気圧サーボ技術を応用した「空気圧軸受アクチュエータ」を提案、開発している。本来、空気静圧軸受は案内要素として使用されるものであり、その運動精度は案内要素の中で最も良いとされている。空気静圧軸受は軸受面と搬送物体のすき間長さに応じて発生力が変化するという特性を有しており、逆に見れば、負荷の大小に応じて自動的にすき間長さを変化させるという調心機能を持つ要素であると言える。また、軸受の発生力は給気圧に応じて変化するため、負荷を一定とした状態で給気圧を変化させれば、それに応じて釣り合うすき間長さが自動的に変化することになる。

この静圧軸受特有の特徴を生かして超精密位置決めを行う軸受アクチュエーターの基本構造を**図1**に、試作したプロトタイプアクチュエーターを**写真1**に示す。静圧スラスト軸受の前段に超精密空気圧サーボ弁を設置し、軸受への給気圧を変化させた際のスプールと軸受面の間の軸受すき間の変化を出力変位として得る機構である。軸受すき間内で発生する圧力に面積を乗じた値がスプールの軸方向駆動力であり、左側より掛かるプリロードと釣り合う位置までスプールは移動する。同アクチュエーターの特徴として①静圧軸受が本来有する自動位置調整機能を利用するため、位置フィードバック制御を施すことなく、位置決めが可能②空気圧によって駆動するため発熱が少なく、ドリフトやヒステリシスを生むような不確定な要因が少ない③電磁場を発生しない④高負荷物体の搬送にも応用可能⑤空気しか使用せず、クリーン⑥長寿命―などが挙げられる。

同アクチュエーターの開発の背景には、近年の超精密空気圧サーボ弁の開発技術の発展が欠かせない。このように、軸受への供給圧力を直接変化させて超精密位置決めを実現させている事例は著者らの知る限り他に見当たらず、空圧サーボによる位置決め機構としては、世界最高の位置決め精度を有するものであると自負する。なお、静圧スラスト軸受には、自成絞りやオリフィス（流出口）絞りに比べて駆動体に微振動を与えにくい表面絞り形を採用している（写真1右）。また、スプールは静圧ジャーナル軸受で支持しており、摩擦のない動きが可能である。

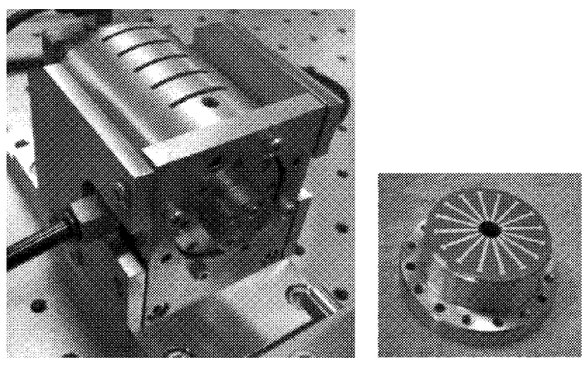
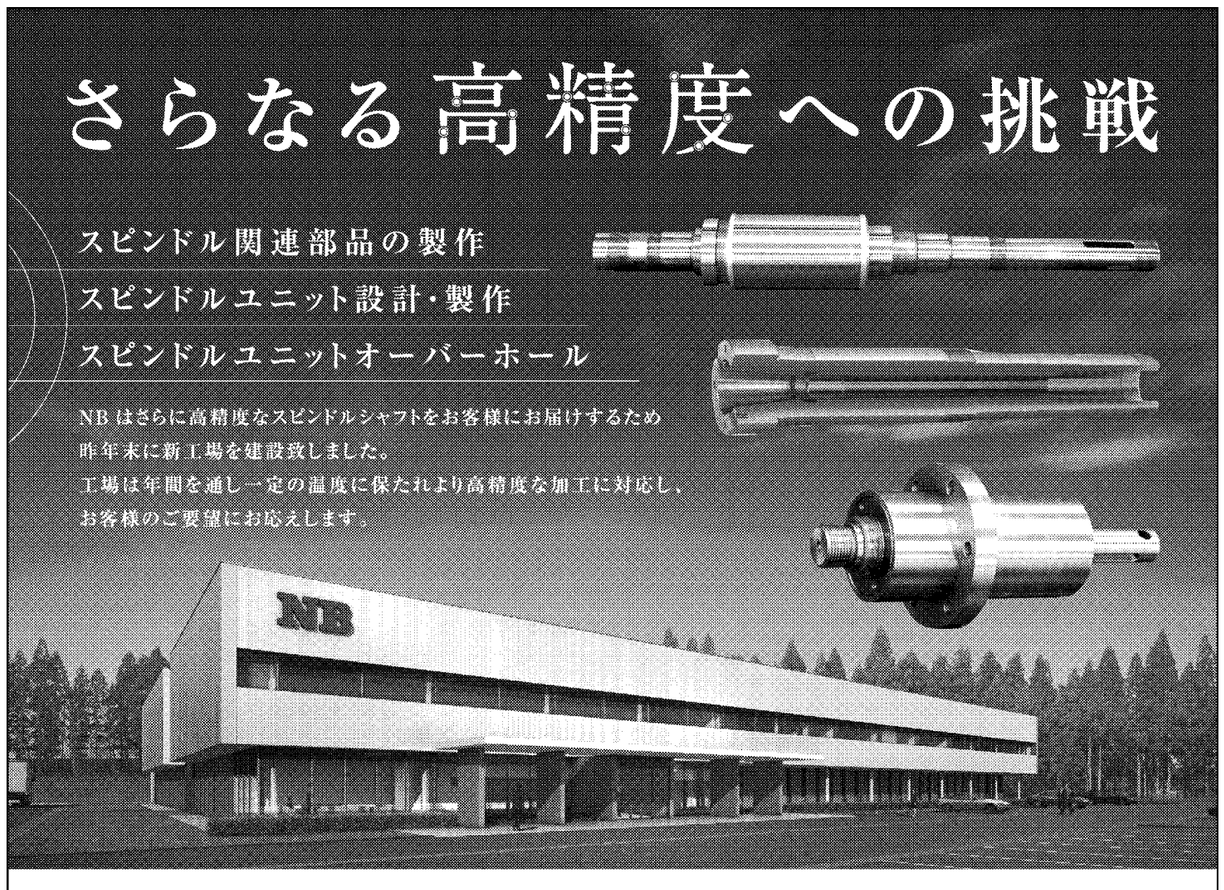
写真１　試作したプロトタイプアクチュエーター
（左は外観、右は静圧軸受部品）