

報告日 2011 年（平成 23 年）4 月 5 日
報告者 東京工業大学精密工学研究所 准教授
吉岡 勇人

1. 研究概要

（和文）

（1）課題名（日本語）

ハイブリッドアクチュエータを用いた高トルク・高精度回転機構

（2）研究者氏名

吉岡勇人 東京工業大学 精密工学研究所 准教授

（3）研究概要（日本文）

本研究では、高トルクを有する空気圧アクチュエータと高い駆動精度を有する電磁アクチュエータを回転軸に対して並列に配置することで、それぞれのアクチュエータの得失を相互に補完した高トルク、かつ高精度なハイブリッドアクチュエータを新たに提案している。さらに提案したアクチュエータを組み込んだ回転テーブルを開発すると共に、実際に駆動特性の評価を行うことにより提案したアクチュエータが優れた駆動特性を有し、精密回転ステージに対して有効であることを明らかにしている。

（4）キーワード

回転機構，空気圧アクチュエータ，電気アクチュエータ，ハイブリッド

（英文）

（1）Research title

High torque precision tilting mechanism driven by a hybrid actuator

（2）Name of researcher with title of position

Hayato Yoshioka, Associate Professor, Tokyo Institute of Technology

（3）Summary

This study has newly proposed a hybrid actuator combined a pneumatic actuator with an electromagnetic actuator for a precision tilting stage. Each actuator has both advantages and disadvantages, and their characteristics are complemented by combining two actuators. Through a series of actual driving experiments using a hybrid actuator-driven tilting stage, the obtained results confirm that the proposed hybrid actuator has remarkable driving performance for a precision tilting stage.

（4）Key Words

Tilting mechanism, Pneumatic actuator, Electromagnetic actuator, Hybrid actuator

2．本研究の意義・特色

近年，金型加工に代表されるような三次元複雑形状を高精度に加工する要求が増大している．このような形状を工作機械で加工する場合，通常は工作物および工具が回転軸に対して偏心した状態で加工を行なう必要があり，その結果回転機構の姿勢に応じて変化する自重によるモーメントを支持しつつ高精度な運動を行うことが要求され，高トルクかつ精密制御可能なアクチュエータが求められる．

本研究では，大きなトルクが得られるが精密な制御が難しい空気圧アクチュエータと，トルクは小さいが高速高精度な制御が可能である電磁アクチュエータを組み合わせ，両者を適切に制御することで，高トルクかつ高精密度な回転機構に適用可能なハイブリッドアクチュエータの実現を目的としている．研究目的達成により産業基盤である加工システムの高精度化が実現され，広く波及効果が期待できる．

3．実施した研究の具体的内容、結果（本文）

3．1 ハイブリッドアクチュエータの概念

提案するハイブリッドアクチュエータの動作原理を図 1 に示す．図に示すように空気圧を用いたベーン形空気圧揺動アクチュエータと電気を用いたボイスコイルモータを並列に配置し，同一の駆動軸に同時にトルクを与えることでそれぞれのアクチュエータの得失を相互補完し，制御対象の高精度な駆動を行う．

空気圧アクチュエータは，固定部と可動部それぞれに 2 つのベーンを持ち，対向する圧力室にサーボバルブを用いて流入する空気を制御し，生じた圧力差により回転軸に偶力を与える．このアクチュエータは，原理上発熱がなく，得られるトルクが大きいという利点を有する反面，推力ゼロ近傍にサーボバルブの不感帯が存在する点や応答性が低いという欠点が存在し，このアクチュエータ単独では高精度位置決めを実現することは難しい．

一方，電気アクチュエータにはボイスコイルモータを用いる．動作原理は，一様磁界中に置かれた可動コイルに電流を流すことで生じるローレンツ力を利用するものである．本装置では，装置可動部に 2 つのコイルを取付け，固定部側にヨークおよび磁石を取り付けた構造となっている．このアクチュエータは原理上，推力リップルや推力不感帯が存在しないことや応答性が高いという利点を有し高精度位置決めに有利な反面，発熱が大きく得られるトルクが小さいという欠点が存在する．

本研究では，これら 2 種類のアクチュエータを組み合わせ同時に制御することで得失を補完しあい，高トルク，高応答，高精度，低発熱など優れた特性を有するハイブリッドアクチュエータを実現する．

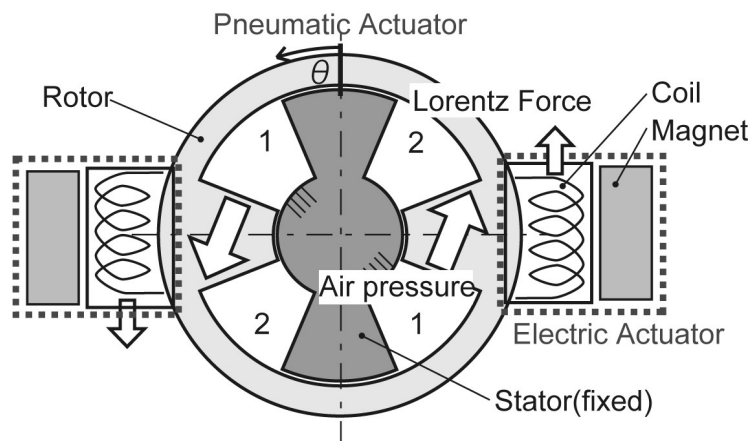


図1 ハイブリッドアクチュエータの概念

3.2 ハイブリッドアクチュエータ駆動回転ステージの構造

図2 に実際に試作した装置の構造を示す．装置の中心部品はベースに固定され，外側は可動部であり，非接触シールを用いたことにより今回試作した装置の可動部と固定部は玉軸受のみを介して接触する構造になっている．また，固定部内部には圧力室に圧縮空気を供給する4本の管路と，圧力計測用の4本の管路を有し，圧力計測の誤差を軽減するためにこれらの経路はそれぞれ独立した構造となっている．また，一般的な空気圧アクチュエータは空気漏れを防止するため，ゴム等の接触シールを用いているが，そこで発生する摩擦力が大きく位置決め精度に悪影響を与えることが指摘されている．そこで，本研究では，空気漏れを許容し可動部と固定部がわずかな隙間を保ったまま相対運動する非接触シールを用いることで性能に悪影響を与える摩擦外乱を低減している．

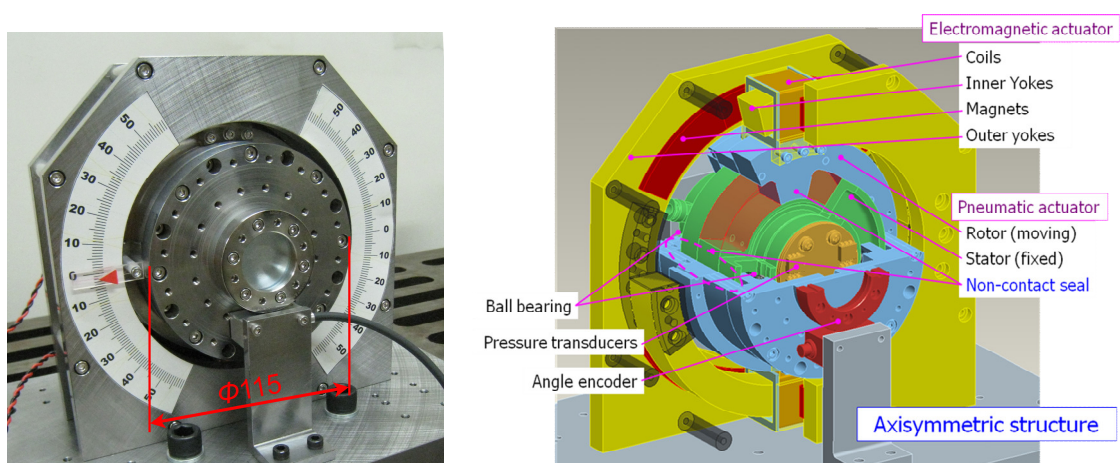


図2 ハイブリッドアクチュエータ駆動回転ステージ

3.2 ハイブリッドアクチュエータの制御

本装置で採用した制御系の構成を図3に示す．空気圧アクチュエータは基本的にフィードフォワード制御により駆動され，回転角度に応じた自重補償や加減速に必要な大きなトルクを発生する．しかし，前述のように空気圧アクチュエータは空気の圧縮性に起因して，トルク出力の応答性や精度の面で誤差を含むこととなる．一方，電磁アクチュエータはロータリーエンコーダで測定した制御対象の角度をPID制御器を用いてフィードバックすることで出力を行い，最終的な定常偏差をゼロとする．さらに空気圧アクチュエータの応答性の遅れや振動を補償するため，空気圧アクチュエータ内の圧力を測定することで圧縮性に起因するトルク誤差を推定し，電磁アクチュエータの出力へ重畳することでキャンセルを行う．

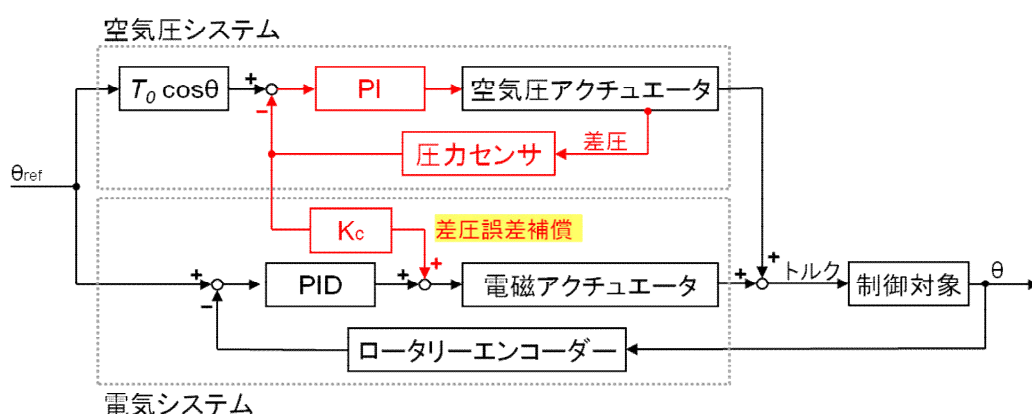
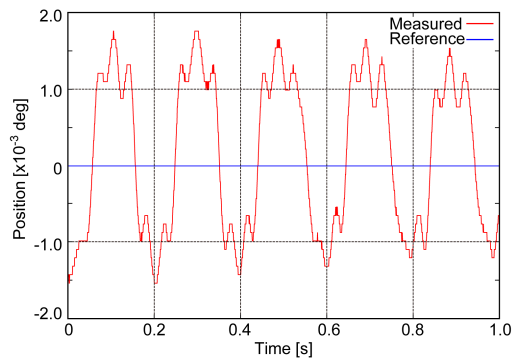


図3 ハイブリッドアクチュエータの制御系

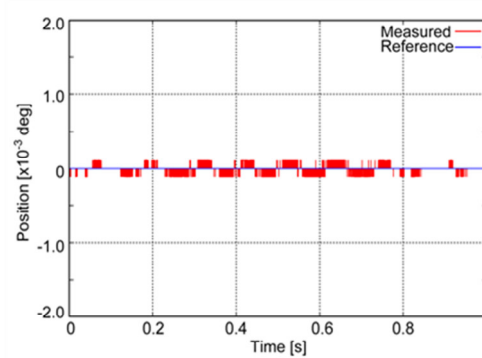
3.3 駆動特性評価

実際に構築した回転ステージを用いて駆動特性評価を行い，ハイブリッドアクチュエータの評価を行った．

図4(a)は圧力センサを用いた空気圧アクチュエータの誤差補償を行わない場合の停止時の角度である．回転ステージは目標値付近で ± 0.0015 度程度の周期的な振動を繰り返していることが確認できる．これはサーボバルブ内部に含まれるノイズの影響であることが確認され，一定の指令値を与えた場合であっても空気圧アクチュエータがある程度の振動的な圧力誤差を含んでしまうことがわかる．一方，図4(b)は圧力センサの測定値からトルク誤差を推定し，電磁アクチュエータで補償を行った際のステージ角度である．圧力誤差に起因するトルク変動を補償することで周期的な変動は大幅に減少し，ロータリーエンコーダの測定分解能である ± 0.0001 度の停止精度が実現されていることが確認できる．本結果より構築した制御系によるハイブリッドアクチュエータの高精度な制御が可能であることを明らかにした．



(a) 圧力誤差補償なし



(b) 圧力誤差補償あり

図4 停止時における圧力誤差補償の効果

図5は左図に示すように回転ステージに偏心負荷として鉄製の角棒を固定し、1.7Nmの定常トルクが作用する状態で微小位置決め特性を評価した結果である。図から明らかなように、エンコーダ分解能に相当する0.0001度の高い割り出し分解能が得られていることが確認できる。本結果は図4に示す停止精度と一致することから、図5のような定常的な偏心負荷の作用下においても低下せず、高精度な駆動が可能であることを明らかにした。

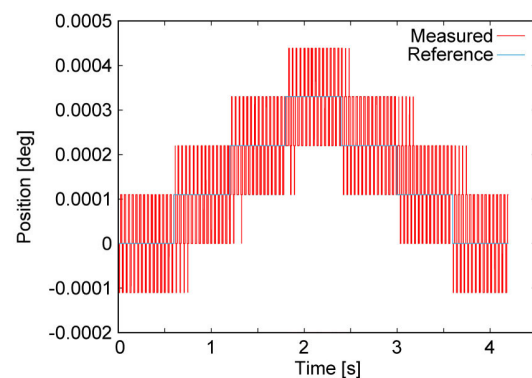
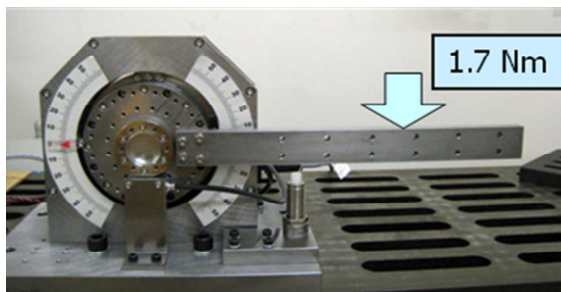


図5 偏心負荷作用下での位置決め特性

図6は回転ステージ上に0.35Nmに相当する偏心負荷を与え、長時間そのままの角度を保持した際の各部の温度変化である。電磁アクチュエータのみで負荷の支持を行った場合、静止している状態であってもコイルに連続的に電流を流すことになり短時間で急激に温度が上昇し、最終的なコイル温度上昇は200分で約30度に達する。その結果テーブル本体構造も約6度の温度上昇を生じ、精密機構として熱変形の影響が無視できなくなる。一方ハイブリッドアクチュエータで駆動を行った場合、定常的な負荷は全て空気圧アクチュエータで支持するため、微小な変動を補償する分だけ電流を供給することになり発熱量が大幅に低減される。その結果、テーブル本体構造の温度変化は0.1度以内に抑制することが可能となり、開発したハイブリッドアクチュエータが精密回転テーブルの駆動において優れ

た特徴を有することを確認した。

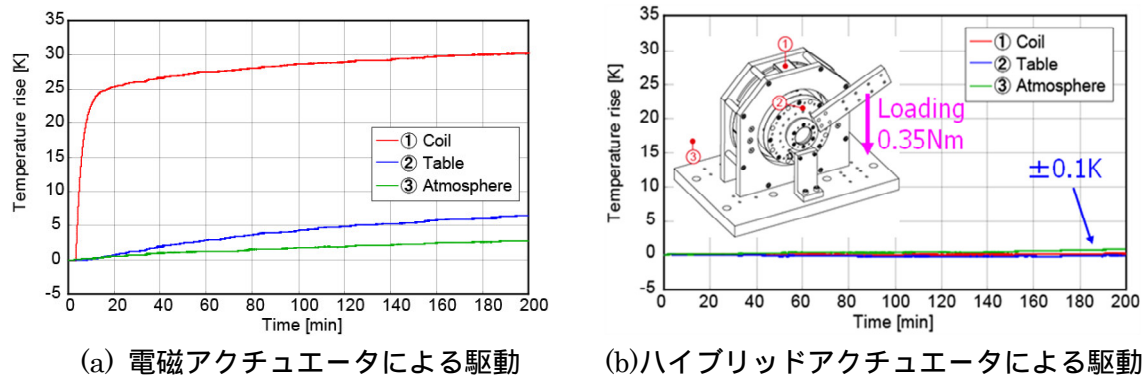


図6 長時間駆動における温度変化

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

- (1) 吉岡勇人，東京工業大学・准教授
- (2) 林 遵，東京工業大学大学院・博士後期課程学生
- (3) 新野秀憲，東京工業大学・教授

5. 研究実施時期

2008年(平成20年)4月1日から 2010年(平成22年)12月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) M.Hayashi, H.Yoshioka, H.Sawano, H.Shinno. High Torque and High Precision Rotary Table System Driven by Hybrid Actuator, Proceedings of the 9th International Conference of the euspen, June 2nd-5th, San Sebastian, Spain, Vol. 1, pp. 402-405, Jun. 2009.
- (2) Hidenori SHINNO, Hayato YOSHIOKA, Mamoru HAYASHI. A High Performance Tilting Platform Driven by Hybrid Actuator, CIRP Annals-Manufacturing Technology, ELSEVIER, Vol. 58, No. 1, pp. 363-366, Aug. 2009.
- (3) Mamoru HAYASHI, Hiroshi SAWANO, Hayato YOSHIOKA, Hidenori SHINNO. Torque Error Compensation in Pneumatic Rotary Actuator System Using an Electromagnetic Force, Proceedings of the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21), The Japan Society of Mechanical Engineers(JSME), Vol. 5, pp. 183-186, Dec. 2009.

7. 内外における関連研究の状況

精密運動機構に関する研究においては，直動機構の高精度化に関する研究は従来より多

く報告されているものの，対照的に回転機構の高精度化に関する研究は国内外で少ないのが現状である．

工作機械など高負荷かつ精度が要求される回転機構において一般に採用される駆動方式は，セルフロック作用が期待できるウォームギアを採用するもの，あるいは高回転速度を実現可能なダイレクトドライブモータを採用するものが主流である．しかし，前者は定常負荷の支持には適するものの，駆動速度が低くバックラッシュによる誤差があるなどの短所を有する．後者においても高速駆動は可能であるものの，長時間にわたる負荷の支持においてはコイル部において大きな発熱が生じることが問題となる．

本研究のように回転機構に要求される特性を考慮したうえで新規にアクチュエータを提案する報告は僅少である．

8．今後の発展に対する希望

提案するハイブリッドアクチュエータの有用性を確認したため，今後はさらに高精度な駆動を実現する制御系の検討を進めることを予定している．さらに本研究で開発した 1 自由度の回転ステージを用いて実際に加工を行い，加工外乱作用下の駆動特性について評価を行う．また将来的には，提案するアクチュエータを発展させ，多軸工作機械へ適用可能な 2 自由度高精度回転ステージの実現を目指す．