

静圧空気軸受における回転誤差測定 —遠隔測定の実験的検討—

Measurement of Run-out for Aero Static Bearing - Experimental Study of Remote Measuring -

富田 宏貴¹⁾

Hiroataka Tomita¹⁾

Abstract : In this paper, remoteness measured run-out of aero static bearing experimentally. It is necessary to reduce the measurement error high-precision to measure run-out of aero static bearing. Background noise to assume measurement environment factor is included in measurement error. I built the remote measuring device which measured run-out by radio to reduce the background noise included in measurements. The remote measuring device uses microcomputer (Arduino UNO) equipped with 16bit A/D converter. As a result of experiment, the remote measuring device was able to measure run-out with nano-meter order. Precision is high in the measurement accuracy repeatedly, and NRRO is measurable.

Keywords : Aero static bearing, Remote measuring, Run-out, Measurement accuracy

1. 緒言

精密加工機や測定機の回転案内運動機構として用いられる静圧空気軸受には高度な「剛性」「負荷容量」「運動精度」が必要となる。運動精度は軸受部品の加工精度が影響することが経験上知られているが、両者の因果関係を定量的に実証した例は少なく、現場技術者の技能に依存した部品加工が行われているのが現状であり、剛性や負荷容量とは異なり明確な設計指針が確立されていない。

本研究では軸受部品の精度設計に有効なデータを得ることを目標とし、軸部品形状と軸受の運動精度との因果関係を実験と解析から定量的に明らかにした¹⁾。研究成果の実用性を高める次の取り組みとして、軸受の運動精度を高精度に測定する手法の確立を目指す。

静圧空気軸受の運動精度はナノメートルオーダーに及ぶこともあるため僅かな測定誤差にも留意する必要がある、その一つとして測定環境から生じる暗振動に着目した検討を行った²⁾。暗振動は室内温度変化や床からの微振動などを含む偶然誤差であり、いずれも室内に人が出入りしたりその場に居続けたりすることが原因で生じると考えられる。

そこで本研究では暗振動を低減するため、軸受の運動精度を測定室外から無線で遠隔測定する装置を実験的に構築し、従来の測定結果との比較を行った。

2. 静圧空気軸受の構造と回転誤差の測定環境

本研究では図 1 に示す自成絞り形式静圧空気軸受の運動精度測定を対象とする。表 1 には軸受の仕様を示す。自成絞り形式静圧空気軸受は主に真円度測定機の回転テーブル

として用いられる。真円度測定機の測定精度は回転テーブルの回転運動精度に依存するため、静圧空気軸受には高度な運動精度が要求される。

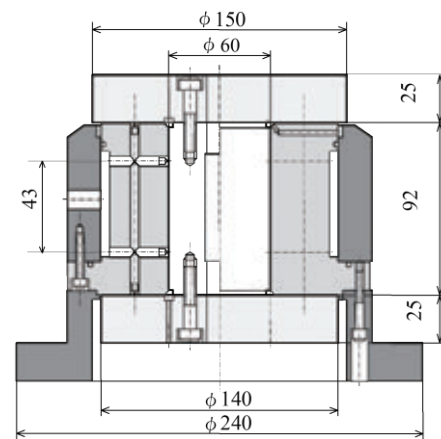


図1 自成絞り形式静圧空気軸受の構造

表1 自成絞り形式静圧空気軸受の仕様

Radial bearing		Thrust bearing	
Diameter	60mm	Outer diameter	140mm
Bearing length	86mm	Inner diameter	66mm
Number of inherent orifice restrictor	2×12	Number of inherent orifice restrictor	12
Clearance	10μm	Clearance	20μm
Diameter of inherent orifice restrictor	0.2mm	Diameter of inherent orifice restrictor	0.25mm
Load capacity	309.7N	Load capacity	1862.0N
Stiffness	77.4N/μm	Stiffness	190 N/μm

¹⁾東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 医療福祉工学コース

軸受の運動精度を評価するには軸が回転運動する際に生じる軸心の振れ回り（以下、回転誤差と称す）を高精度に測定することが必要である。

軸受の回転誤差は軸受隙間内の圧力分布が不均一になることで発生し、その量は極めて微量であるため測定には細心の注意が必要となる。本研究室では温度および湿度を一定に保った恒温室内で回転誤差の測定を実施している。それでも空調機器から吹出す空気の流れが変位計に影響し測定誤差を与えることが過去の実験で確認されている。それを防ぐために図2のサーマルチャンバーを製作し、軸受を含む測定装置をチャンバー内に設置し回転誤差を測定している。チャンバーで使用しているビニールカーテンは電子機器からのノイズを抑える耐電性素材を用いている。

軸受を設置している大型定盤は元々加工機のベッドとして使用されていた定盤で剛性は高い。また、恒温室は振動を軽減する特殊な床材が敷き詰めてあり、定盤と合わせて振動による測定値への影響は極力抑えている。

測定環境に影響を与えないためには外乱を抑えることが必要であり、その対策の一つとしては無人で測定を行うことが考えられる。



図2 恒温室内のサーマルチャンバー

3. 回転誤差の計測実験

3.1 マイコンを用いた遠隔測定装置の構築

図3に本研究室で構築した回転誤差測定システムを示す。静圧空気軸受は構造上、回転誤差を直接測定出来ないため、仕上げ精度の高い基準物（マスタシリンダー）を回転軸の軸心に合わせ設置し、基準物の外周を測定することで間接的に回転誤差を測定する手法を用いている。

軸受自体には回転駆動の機能がないため、スラスト板の側面に駆動ユニットを配置している。駆動ユニットにはACシンクロモーターを用い、モーターのドライブシャフトにOリングを嵌めたプーリーをスラスト板の側面に軽く押し当て、摩擦駆動で軸受を回転させている。実験で使用する静圧空気軸受は測定機相当であることと、後述する装置の仕様上から回転数は 1min^{-1} としている。

回転誤差の測定には静電容量型変位計（マイクロセンス：分解能 10nm 、ADE社製）を使用している。変位計の出力値は $\pm 10\text{V}/\pm 25\mu\text{m}$ （フルスケール）となっている。

変位計の出力信号（アナログ電圧）は、従来の測定ではA/D変換器を介してPCに取り込む方式であり、常に測定者が測定装置の傍でPC等の機器を操作する必要があった。

本実験ではマイコン制御により変位計とPCを物理的に切り離し、無線で回転誤差を測定する。

無線での遠隔機器操作には室内外のネットワーク通信を利用する方法もあるが、測定環境に必ずしもネットワーク環境が整備されている訳ではない。装置構築のし易さやコストを配慮するとスタンドアロン型で測定が行えれば汎用性も期待できることから、Bluetoothを用いてマイコンとPCを無線接続する手法とした。

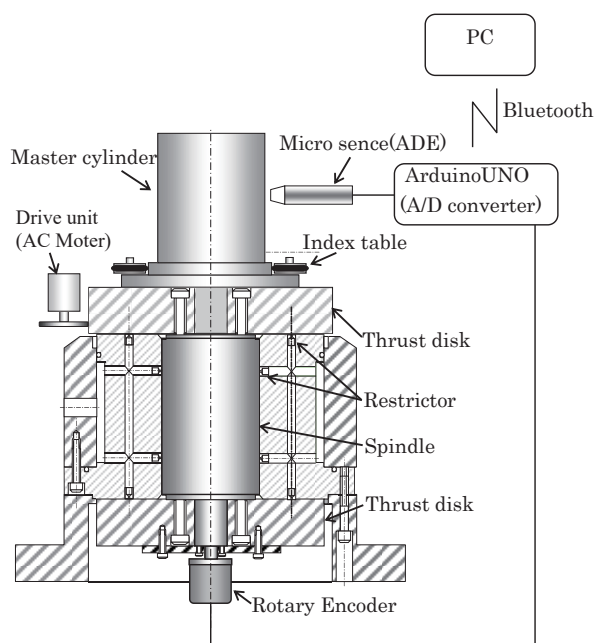


図3 回転誤差測定システム

マイコンにはArduino UNOを使用する。流通、価格共に入手もし易く、様々なセンサー類を利用でき汎用性の高いマイコンである。

Arduino UNO単体ではA/D変換の分解能が10bitであるため、ビットエラーが回転誤差を上回り、測定精度としては不十分である。本研究室で従来から使用していたPC用のA/D変換器が分解能16bitであったことから、Arduino UNOに16bitのA/Dコンバータを組み込むこととした。

測定に使用する静電容量型変位計の出力電圧からビットエラーを計算すると 0.3nm となる。

A/DコンバータにはADS1115を用いる。図4にADS1115の外観を示す。Arduino UNOには直接接続が出来ないため、ブレッドボードを介して接続する。

表 2 に ADS1115 を示す。入力電圧の範囲が最大 5.5V であるため、変位計の出力はフルレンジで扱えない点に留意する必要がある。静圧空気軸受の回転誤差は性能上 10 μ m を超えることはないため、入力電圧の範囲については問題ないものとした。

Arduino UNO に入力された変位計のデータを PC へ無線で送信するため RN-42 使用 Bluetooth 無線モジュール評価キットを用いる。

マイクロチップ RN-42 を使用し、Arduino UNO に Bluetooth による無線通信機能を持たせるモジュールである。

Wi-Fi は最大通信距離が 100m、最大通信速度が 600Mbps の無線規格で通信速度が速く、動画や音声など容量の大きいデータを高速で通信できるメリットがある。一方で消費電力が大きく通信コストが高いことがデメリットとなる。

Bluetooth は最大通信距離 100m、最大通信速度 1Mbps と Wi-Fi には劣点があるが接続が容易で小型化がし易く、Wi-Fi よりも省電力というメリットがある。

本研究では測定装置が設置してある部屋からの退避が目的であるため、通信距離は数 m の範囲で良いことと、測定データ(文字)のみの通信で大容量のデータ送信は行わない点で Bluetooth を採用した。

図 5 に Bluetooth 無線モジュールを示し、表 3 に仕様を示す。本実験では Arduino UNO に簡単に搭載できるように図 6 に示すシールド化した Bluetooth モジュールを用いた。

静圧空気軸受の回転誤差に必要なデータ数は、軸受直下に取り付けたインクリメンタル型ロータリーエンコーダにより 2048/rev としている。回転誤差はロータリーエンコーダのクロック信号の周波数を用いてサンプリングする予定であったが、Arduino に用いる制御プログラム内での割り込み処理が実行出来なかったためこれを断念し、代わりに軸受の回転数 (1min⁻¹) から算出したサンプリング周波数を用いた。よって、回転誤差の測定はサンプリング周波数 34.1Hz として行った。

無線による遠隔測定を行う場合は Arduino UNO を単体で動作させる必要があるため、電源にはスマートフォンでも利用される汎用のモバイルバッテリーを接続し長時間測定を行えるようにしている。

3.2 実験方法

静圧空気軸受を AC モーターで等速回転運動させた際に発生する回転誤差を静電容量変位計で測定する。測定は軸受 10 回転分を連続で測定する。軸受の供給圧力は 0.5MPa 一定としている。実験は全て恒温室内で実施し、室内の温度は標準温度近辺の 22°C 設定で一定としている。

測定の開始・終了およびデータ収集は統合開発環境 (IDE) で作成したプログラムを使用する。プログラムを起動させ PC 上からシリアルモニターで変位計の出力が表示されたことを視認した後、測定室から退避し測定が終了するまで室外で待機する。



図 4 A/D コンバータ (ADS1115)

表 2 ADS1115 の仕様

Resolution	16bit
Sample rate	8~860 SPS
Input range	2.0~5.5 V
Input type	Differential, Single end
Interface	I2C

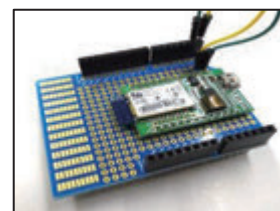


図 5 Bluetooth モジュール

図 6 シールド化モジュール

表 3 RN-42 使用 Bluetooth モジュールの仕様

Version	Bluetooth 2.1
Base Module	RN42(Class2)
USB UART	FT231XQ
Supply voltage	5V
Consumption current	8~50mA
Antenna	Trace pattern type
USB connector	Micro B

回転誤差の測定データは Arduino からリアルタイムで PC へデータ転送される。

測定した回転誤差のデータには前述した暗振動の他に変位計の電氣的ノイズ、供給空気圧力の微小変動によるノイズなどが混入しているため、これについてはガウシアンフィルタで除去する。フィルタのカットオフ値は JIS に準拠し真円度測定機で用いられる 50UPR とした。

また、回転誤差のデータにはスラスト板上に設置したマスタシリンダーの設置誤差が含まれる。マスタシリンダーの位置決めは目視による手作業で行うため、シリンダーの中心と軸受の軸心には僅かながらに偏心する。軸受部品の組付けは入念に行っているが、スラスト板の平面度の状態によってはマスタシリンダーが僅かに傾くため、その場合は回転誤差のデータに楕円成分が含まれる。本実験では調和解析を使用し、演算処理で偏心による振れと楕円成分を除去している。

4. 回転誤差の測定結果

図 7 に遠隔測定による静圧空気軸受の回転誤差および従来の測定方法で得た回転誤差を示す。回転誤差のグラフは判別し易くするため基準円に測定値をプロットしたレーダグラフで表している。回転誤差の定量的な評価はグラフの P-V(Peak to Valley)値としている。

図 7(a)はこれまで本研究で実施されていた従来の測定方法で、測定室内で測定者が居続けた状態で測定した軸受一回転分の回転誤差を表している。回転誤差の P-V 値は 137.9nm となっている。回転誤差には 3 山のうねり波形と波形全体に微小な変動分が見られる。

図 7(b)は測定室外から無線で遠隔測定した回転誤差である。回転誤差の P-V 値は 138.3nm となり図 7(a)とほぼ同一となった。回転誤差の波形についても図 7(a)とほぼ一致しており、従来の測定方法で得た測定結果と同等となった。

波形について詳しく分析するため図 7(a)および(b)を調和解析した結果を図 8 に示す。二つの解析結果は僅かに違いが見られるが波形の一致性は高く、無線でも十分に測定可能であることを示している。

静圧空気軸受の回転誤差は繰り返し精度の高い回転運動が要求されることから回転に非同期な成分 (NRRO : Non-Repeatable Run-Out) も評価する必要がある。

NRRO の評価法の一つは、繰り返し測定した回転誤差の波形を重ね合わせた時の線幅の最大値を用いる。

図 9(a)は従来の方法で測定した NRRO を示す。回転誤差の波形を 10 回転分重ね合わせた結果を示す。回転誤差を重ね合わせると最も太かった線幅は 13nm となった。

図 9(b)は無線による遠隔測定で測定した NRRO を示す。図 9(a)と同様に 10 回転分の回転誤差を重ね合わせている。NRRO は 7.8nm となり、従来の方法で得た結果よりも約 5nm ほど低くなっている。

回転誤差を重ね合わせたグラフを全体的に比較しても、無線による遠隔測定で測定した結果の方がグラフの線が細く、NRRO が低減していることが僅かに確認できる。

サンプリングのタイミングはロータリーエンコーダのクロックを使用していないため、繰り返し測定ではサンプリングに僅かな時間差が生じることが予想されたが、実際の測定ではサンプリングへの影響は特に確認されず、繰り返し性の高い結果が得られた。測定室外から無線で遠隔測定することで測定値に含まれる暗振動を僅かに低減し、従来の手法と同等の精度で測定できることを確認した。

5. 結言

静圧空気軸受の回転誤差を高精度に測定するため、測定値に含まれる暗振動の低減を目的として無線による回転誤差の遠隔測定を実験的に行った。測定装置は Arduino と 16bitA/D コンバータを組み合わせた構成とし、軸受を低速で回転させた場合の回転誤差を測定した。

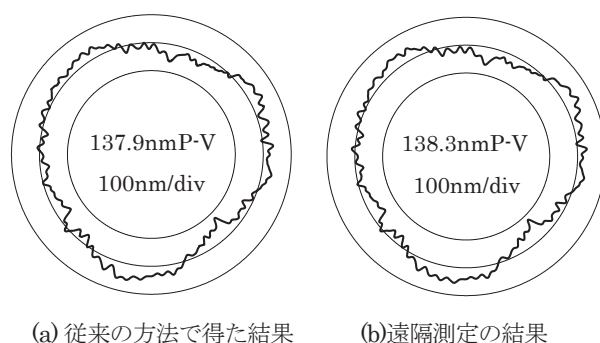


図 7 回転誤差の測定結果

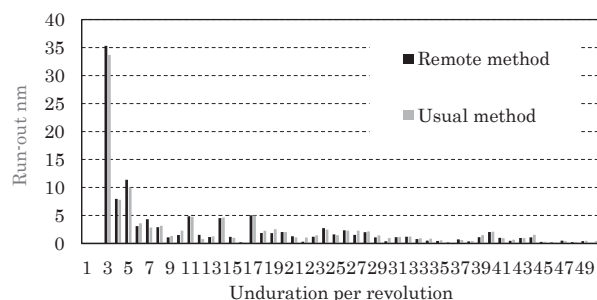


図 8 回転誤差の調和解析結果

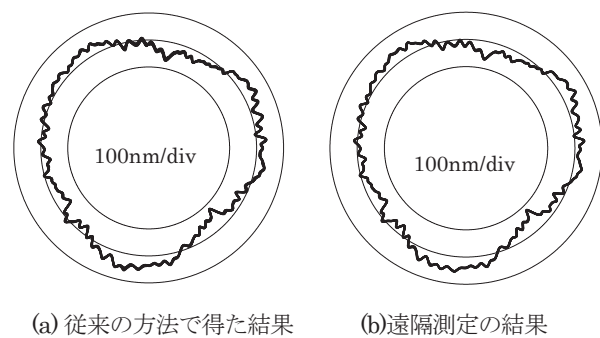


図 9 回転誤差の非同期成分の測定結果

測定結果から従来の測定方法と同等のレベルで測定が可能であることを示した。回転誤差の非同期成分の測定結果から、本測定装置は測定の繰り返し精度も十分であることを確認した。精密測定において環境誤差の対策は必要不可欠であり、無人での遠隔測定は環境誤差を低減するための方法として有効である。

参考文献

- [1] 富田 宏貴, 高橋 正明, 小泉 孝一: 静圧空気軸受の回転誤差に関する研究—軸の半径方向における形状誤差に着目した回転誤差の解析—, 精密工学会誌, 75-4, pp.525-529, 2009.
- [2] 富田宏貴, 小泉孝一: 静圧空気軸受の回転誤差—マルチステップ法の測定精度に関する解析的考察—, 東京都立産業技術高等専門学校研究紀要, 12 号, 2018.