

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560148

研究課題名(和文) 最適レイアウトによる流体軸受スピンドルの角度動剛性の強化と薄型スピンドルの開発

研究課題名(英文) Enhancement of angular dynamic stiffness utilizing optimum layout and development of thin type spindle

研究代表者

落合 成行 (OCHIAI MASAYUKI)

東海大学・工学部・機械工学科

研究者番号：40407995

研究成果の概要(和文)：本研究では、情報機器に使われるスピンドルの薄型化に際して脆弱化が懸念される角度動剛性に注目し、その強化により薄型化スピンドルに必要な設計指針を示すことを目的としている。また同時に、流体軸受の角度動剛性の実験的評価法の確立も検討する。現在、ハードディスクドライブなどの情報機器には薄型化が要求されており、これらの機器に使用されているスピンドルには、高回転精度を確保するための角度動剛性強化が必要になる。そこで本課題では、限られた空間の中に適切に軸受を配置する最適設計法を開発し、ジャーナル軸受とスラスト軸受を組合せた最適設計を行った。その結果、薄型スピンドルでは、スラスト軸受の角度剛性を高めることが重要であることがわかった。また、確立した実験方法により実施した角度動剛性の実験結果より、ジャイロ効果による振動が大きく現れることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to provide a design guideline for a thin type spindles for information related equipments using the enhancement of angular dynamic stiffness on fluid film bearings. In addition, establishment of experimental method of the angular dynamic stiffness was investigated. The spindles used in information related equipments such as Hard Disk Drives are required to become thinner with thinning the information related devices. Consequently, enhancement of angular dynamic stiffness of the fluid film bearings is important problem should be solved in order to obtain high rotational accuracy. In this study, we develop the optimization method to lay out the bearings in a limited space and carried out the optimum design combined with journal bearing and thrust bearing. As a result, it was found that enhancing the angular stiffness of the thrust bearing is important in case of thin type spindles. In addition, from the result of experiment by using the established experimental method, it was found that the vibration caused by gyroscopic effect is significant.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー，機械力学，機械要素，設計工学，最適設計，情報機器

1. 研究開始当初の背景

流体軸受は、油や水、空気など流体の薄い膜で回転軸を非接触支持するため、転がり軸受に比べて静音で衝撃に強く、回転精度にも優れている。したがって、情報関連機器やOA機器等の回転軸の支持要素として広く一般に用いられている。今後の動向としては、装置の薄型化への要求が益々進むものと考えられる。薄型化に際しては、ディスクを支えるスピンドルモータの角度動剛性の強化が最重要課題といえる。すなわち、現行の流体軸受スピンドルでは、上下一対のジャーナル軸受と軸端に設けられたスラスト軸受により角度動剛性を強化し、このような振動を抑えて高回転精度を維持しているが、薄型化に際してはディスクの慣性モーメントはそのまま回転軸の軸長が制限されてしまうためジャーナル軸受の角度動剛性が大幅に低下する可能性が高い。許容される狭い空間の中で効率的な軸受配置（最適レイアウト）を行ない、スピンドルの高性能化を図ることがこれまで以上に重要となる。また一方で、情報機器の消費電力低減のためのスピンドルトルクの低減は同時に重要な課題である。しかしながら一般に、軸受動剛性と軸受トルクは二律背反する関係にあり、ジャーナル軸受とスラスト軸受の適切な剛性分担により、トルクを抑えつつ角度動剛性を高める必要がある。本研究課題はこのような問題を解決すべく企画したものである。

2. 研究の目的

本研究課題では、スピンドルの薄型化に際して脆弱化が懸念される角度動剛性に注目し、その強化により薄型化スピンドルに必要な設計指針を示すことを目的とする。現行の流体軸受スピンドル(2.5in)において、ジャーナル軸受、スラスト軸受の両者を組み合わせた角度動剛性について理論解析できるようにし、薄型化の際の指針を示す。その際、軸受寸法のばらつきに起因した装置性能のばらつき抑制を目的としたロバスト最適設計を適用する。一方で、角度剛性の実験的評価のための試験法の確立を目指す。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた油膜軸受スピンドルの概観を示す。モータの回転体はディスク、ハブ、シャフトで構成されており、これらをジャーナル油膜軸受とスラスト油膜軸受によって支持する構造となっている。

(1) ジャーナル軸受とスラスト軸受の組合せ最適化

HDD用スピンドルはラジアル方向に外部振動が生じた際にコニカルモードにより振れ回りを生じるが、その際にスラスト軸受の角

度剛性が影響を及ぼす可能性がある。そのため、前研究課題で検討したジャーナル軸受単体の解析に対してスラスト軸受の角度剛性の影響を考慮した場合について検討した。図2に計算に用いた振動モデルを示す。また、摩擦トルクにおいてもジャーナル軸受とスラスト軸受の両方を含めて解析を行った。解析手法には、ジャーナル軸受およびスラスト軸受ともに無限溝数理論を用いた。

最適設計に際しては、ラジアル振動が生じた際の振幅の最小化、軸受摩擦トルクの最小化と共に、軸受溝寸法が公差範囲内であればらつた場合の各特性のばらつきを最小化する目的関数を設定した。なお、本計算では、広く一般に用いられている2.5“HDD用軸受の寸法を参考にして、軸直径 $D=3.2$ [mm]、回転体の質量 $m=31.7$ [g]、回転数 $n_s=4200$ [rpm]、潤滑剤の粘度 $\mu=1.31 \times 10^{-2}$ [Pa·s] (40°C程度)、回転体の重心位置 $Z_g=0.8$ [mm]、軸の全長 $Z_l=4.2$ [mm]、回転体の慣性モーメント $I=2.99 \times 10^{-6}$ [kg·m²]、回転体の極慣性モーメント $I_p=5.87 \times 10^{-6}$ [kg·m²]と定めた。

(2) 角度剛性評価のための実験方法の確立

図3に、本実験で使用した実験装置の概略を示す。実験装置は2.5”HDD用スピンドルモータ、スピンドルモータ固定用治具、渦電

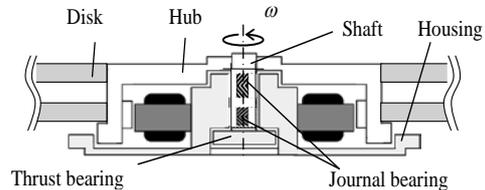


Fig. 1 A schematic diagram of spindle motor for 2.5” HDD

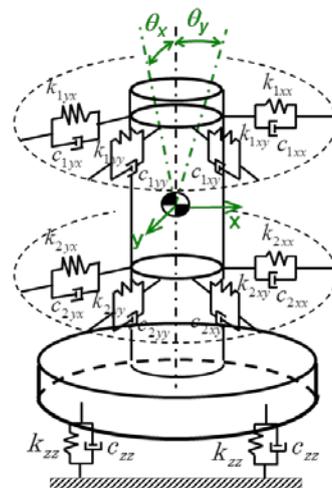


Fig. 2 Four degrees of freedom for shaft-bearing system

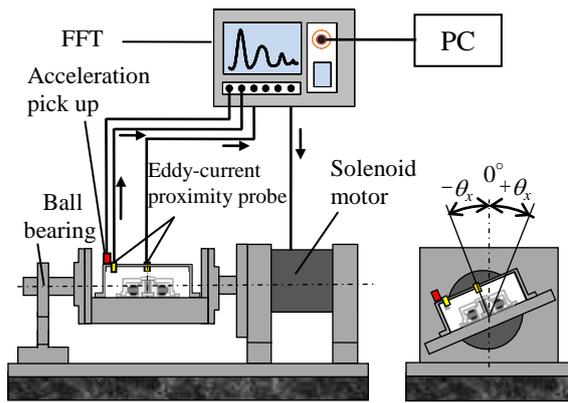


Fig. 3 Swing experimental apparatus

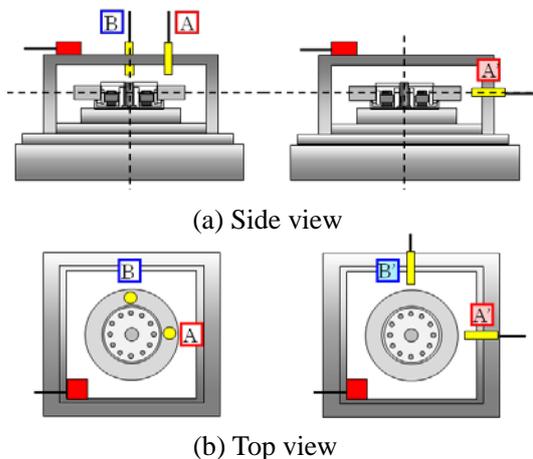


Fig. 4 Positions of eddy-current proximity probes for oscillating measurement

流式非接触変位計（以降変位計と称する）、加速度ピックアップ、ソレノイドモータ、FFT、PC、石定盤により構成されている。本実験装置はFFTを用いてソレノイドモータの回転を制御し、スピンドルモータに揺動運動を付与している。スピンドルモータ固定用治具を水平に保った状態から左右に揺動する仕組みとなっている。また、ソレノイドモータの軸の中心位置とスピンドルモータの回転体の重心位置を一致させている。スピンドルモータ固定用治具を両持ち構造にすることで、荷重によるソレノイドモータの回転軸のたわみを低減し、両持ち構造の片側には深溝玉軸受を用いている。さらに、実験装置を石定盤の上に設置することにより、外部からの振動による影響を軽減している。測定用ディスクは2.5" HDDに用いられている磁気ディスクと慣性モーメントが等しいディスクを使用した。また、磁気ディスクよりも厚みを増すことでディスク側面からの測定を可能にし、さらに揺動時におけるディスクの変形を抑え、測定値への影響を軽減している。

実験に際しては、ソレノイドモータによってスピンドルモータに揺動運動を付与し、そ

の際のラジアル方向およびアキシャル方向の軸受の応答変位を測定した。このときスピンドルモータは平行モードおよびコンカルモードにより振れ回る。また、揺動方向(\square_x 方向)のみでなく、揺動方向と垂直な方向(\square_y 方向)にも変位する。そのため図中に示すようにスピンドル固定用治具の側面および上面に2ヶ所ずつ変位計を取り付け、揺動時における平行モードに起因したラジアル応答変位(Δx , Δy)およびコンカルモードに起因したアキシャル応答変位(Δz_x , Δz_y)を測定した。実験条件はモバイル機器などに搭載されているHDD用スピンドルモータが受ける強弱の揺動を2パターン想定し、揺動角度 $\theta = \pm 5, 30$ [°]と定め、スピンドルモータの回転数を $N = 4200 \sim 6600$ [rpm]とし、600 [rpm]毎に軸受の揺動応答変位を測定した。また、測定したディスクの応答変位は回転同期成分(以降RROと称する)を含んでいるため、正確な軸受応答の測定が困難である。そこで、本実験では予め揺動させてない時のRROを測定し、揺動時におけるディスクの応答波形からRROの波形を差し引くことで軸受の応答変位を算出している。

4. 研究成果

図5は、本ロバスト最適設計(図中赤で表示)と公差の影響を無視した従来の最適設計(図中青で表示)における目的関数の値を比較検討したもので、 x 軸はスラスト軸受の軸受すきまの公差を、 y 軸はジャーナル軸受の溝深さの公差を表している。同図より、ロバスト最適設計では、いずれの公差範囲においても公差を無視した最適設計に比較して目的関数が低い値を示しているのがわかる。

図6は、ラジアル外部振動が生じた際の軸の最大振幅の結果を偏心率 ε として示したものである。図中のプロットは平均値をエラーバーは公差範囲内における特性の最大値

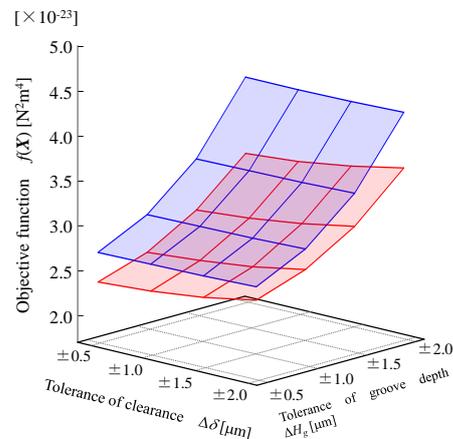
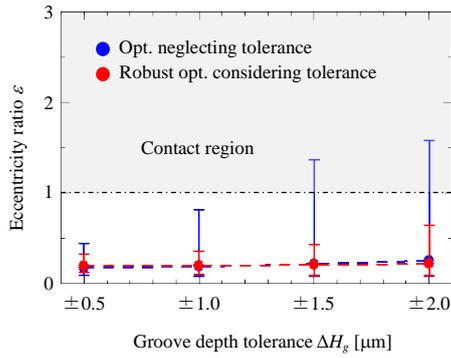
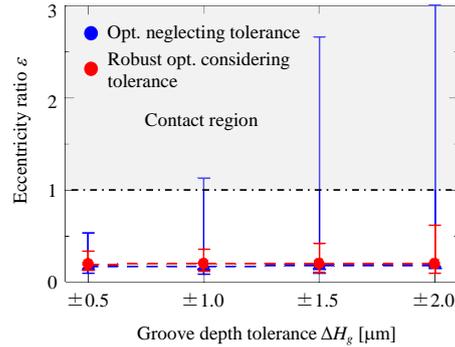


Fig. 5 Objective function vs. tolerances of clearance and groove depth ($\Delta Cr = \pm 0.5$ [mm], $\Delta \alpha = \pm 0.1$)



(b) With effect of thrust bearing



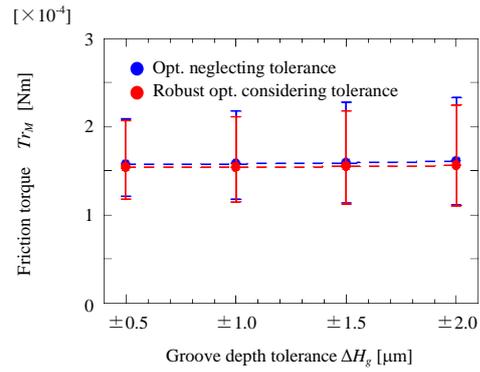
(b) Without effect of thrust bearing

Fig. 6 Results of eccentricity ratio

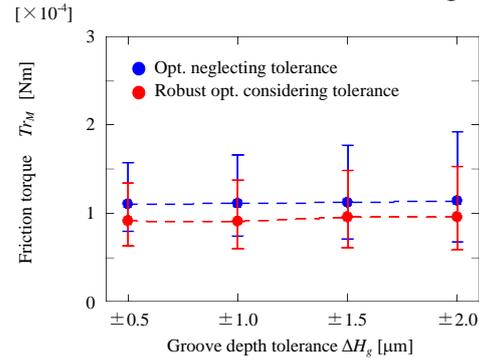
および最小値を表している。また、同図(a)はジャーナル軸受とスラスト軸受を組合せた場合の結果を、同図(b)はジャーナル軸受単一の結果をそれぞれ示している。また、図中の赤丸●は公差を考慮した場合の結果を、青丸●は公差を無視した場合の結果をそれぞれ示している。

同図より、ロバスト最適設計の結果において、組合せの場合とジャーナル軸受単一の場合の双方において同様な傾向を示していることが確認される。一方で、公差を無視した場合においては、平均値では概ね同様の結果を示すのに対し、最大値では組合せの結果の方が小さい値を示している。これはスラスト軸受の角度剛性の影響と考えられる。すなわち、設計変数の公差範囲内においてジャーナル軸受の剛性が著しく低下する領域が存在し、その場合においてスラスト軸受の振幅低減に対する寄与度が大きくなったものと考えられる。

図7は、摩擦トルク Tr_M の結果を示している。同図より、組合せの結果はジャーナル軸受の結果に比べて平均値が高いことがわかる。これはジャーナル軸受単一では考慮されていないスラスト軸受の摩擦トルクが加算されたことによるものである。ロバスト最適設計の結果と公差を無視した最適設計の結果を比較すると、公差を無視した場合においては平均値と最大値および最小値において差異



(a) With effect of thrust bearing



(b) Without effect of thrust bearing

Fig. 7 Results of friction torque

が見られるのに対し、組合せの場合においては双方の結果が同等の値を示していることがわかる。表1に示す最適解の結果から考察すると、公差を無視した最適設計におけるスラスト軸受のすきま h_g が $9.5 [\mu\text{m}]$ であるのに対し、ロバスト最適設計では $7.5 [\mu\text{m}]$ と

Table 1 Optimized results for each optimum design and change ratio

Parameters	Opt. neglecting tolerance	Robust opt. considering tolerance ($\Delta H_g = \pm 2.0[\text{mm}]$, $\Delta \delta = 2.0[\text{mm}]$, $\Delta Cr = \pm 0.5 [\text{mm}]$, $\Delta \alpha = \pm 0.1$)	Ratio
$Cr [\mu\text{m}]$	2.00	2.00	1.00
$B_1 [\text{mm}]$	1.99	1.98	0.99
$B_2 [\text{mm}]$	1.01	1.02	1.01
$Z_1 [\text{mm}]$	1.68	1.65	0.98
$Z_2 [\text{mm}]$	3.40	3.32	0.98
$H_g [\mu\text{m}]$	3.60	5.00	1.39
$\beta_f [\text{deg.}]$	22.0	23.0	1.05
α	0.8	0.8	1.01
$h_g [\mu\text{m}]$	20.0	19.0	0.95
γ	0.75	0.75	1.00
$\delta [\mu\text{m}]$	9.5	7.5	0.79

2.0[μm]の差があることによる。すなわち、ロバスト最適設計により得られた軸受すきまの狭い軸受では、せん断摩擦の影響を大きく受け摩擦トルクが増大したものと考えられる。

以上のことから、ラジアル方向に外部振動が生じた際の振幅を評価する上ではジャーナル軸受単一でも十分であることが確認された。しかしながら、ジャーナル軸受の剛性が著しく低下するような場合においてはスラスト軸受の影響が顕在化するものと考えられる。近年、ウルトラブックと呼ばれる薄型のPCの需要が増えてきており、これに使用されるHDDのスピンデルではジャーナル軸受を確保するスペースが難しく、必然的にジャーナル軸受の角度剛性が低下してしまう。したがって、このような薄型用のスピンデルではスラスト軸受の角度剛性の強化が重要となる。同様に、摩擦トルクにおいてもHDDスピンデルモータを評価する上では、両軸受を組み合わせた場合において検討する必要があるといえる。

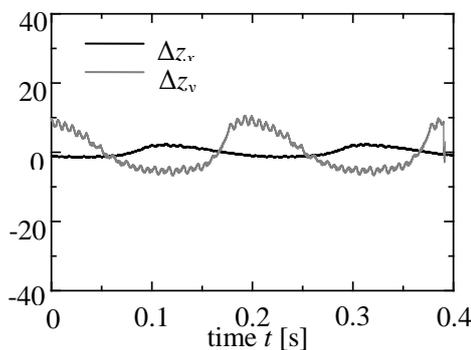
(2) 角度剛性評価

角度剛性の評価方法として、揺動加振試験を確立し、2.5“用HDDスピンデルを用いて実験を実施した。

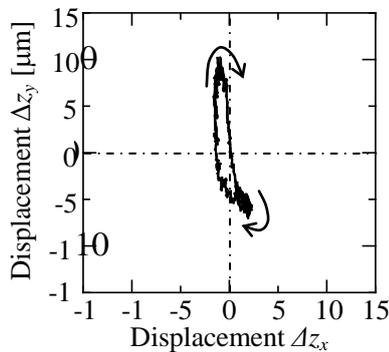
図8にスピンデルモータの回転数 $N=4200$

[rpm]、揺動角度 $\theta_x = \pm 5, \pm 30$ [°]におけるアキシャル方向の揺動応答変位の結果を示す。同図(a)は時間軸波形を、同図(b)は応答変位のリサージュ波形を示している。同図(i)、(a)より、 x 方向および y 方向の変位量($\Delta z_x, \Delta z_y$)に明確な差異が確認される。また、 x 方向の変位量 Δz_x に比べて y 方向の変位量 Δz_y が大きくなっている。これは、油膜剛性の連成分およびスピンドルのジャイロモーメントの影響によるものと思われる。すなわち、揺動させた際に軸が揺動方向に偏心すると、油膜剛性の連成作用により y 方向にも振れる。また軸が倒れることによりジャイロモーメントが発生し、これに起因してコンカルモードの振動が増大し、アキシャル変位が増大する。以上の理由から、アキシャル方向の結果では x 方向の変位量 Δz_x よりも y 方向の変位量 Δz_y が大きくなったものと考えられる。

図9(ii)、(a)より、揺動角度を大きくした場合においても応答変位の傾向は揺動角度 $\theta_x = \pm 5$ [°]の場合と同様に y 方向の変位量 Δz_y は x 方向の変位量 Δz_x に比べて大きい。また、図6(ii)、(b)に示すリサージュ波形の結果からもその傾向が確認される。揺動角度 $\theta_x = \pm 30$ [°]の場合では、ラジアル方向の場合と同様に $\theta_x = \pm 5$ [°]の結果と比較し

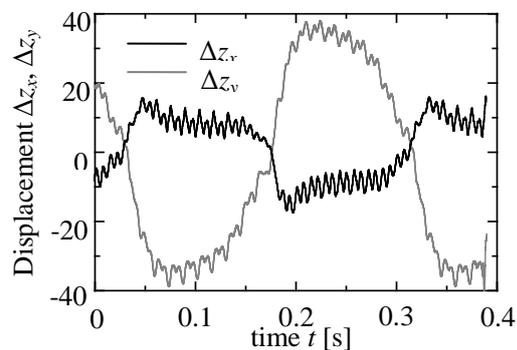


(a) Response displacement

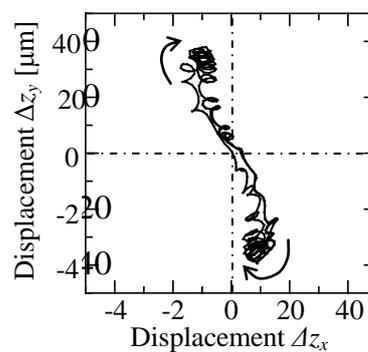


(b) Lissajous wave form

(i) Oscillating angle $\theta_x = \pm 5$ [°]



(a) Response displacement



(b) Lissajous wave form

(ii) Oscillating angle $\theta_x = \pm 30$ [°]

Fig. 8 Response displacement and lissajous wave form of axial direction measurement (Rotational speed 4200 rpm)

てx方向およびy方向の変位量が増加している。しかしながら、揺動角度を $\alpha = \pm 30^\circ$]におけるアキシャル方向の応答変位は揺動角度 $\alpha = \pm 5^\circ$]の結果と比較して3倍以上となる。以上のことから、スピンドルを揺動させた際には、コンカルモードに起因した振れ回りが問題といえる。

(3) まとめ

- ① ジャーナル軸受とスラスト軸受を組み合わせた場合のロバスト最適設計では、公差を無視した最適設計と比較して設定したすべての公差域において目的関数が低い値を示す。
- ② 現行のスピンドルサイズではスラスト軸受の角度剛性の寄与度は低いが、薄型スピンドルではこれが増加し、スラスト軸受の角度剛性を強化することが重要となる。
- ③ スピンドル角度剛性を評価するための揺動試験装置を新たに考案して試験を実施した結果、スピンドルを揺動させた場合には、ジャイロモーメントに起因するコンカルモードの振動が顕著に現れる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Hiromu Hashimoto, Masayuki Ochiai and Yuta Sunami, Robust Optimum Design of fluid Dynamic Bearing for Hard Disk Drive Spindle Motors, Transactions of the ASME, Journal of Tribology, 査読有, Vol.134, No.4, 2012, 1-11.
- ② 落合成行, 砂見雄太, 橋本巨, HDDスピンドル用流体軸受におけるラジアル方向衝撃応答実験, 設計工学, Vol. 47, No.8, 2012, pp. 379-385.
- ③ IBRAHIM Mohd Danial, 難波唯志, 落合成行, 橋本巨, 日本機械学会論文集 C編 (Web), 査読有, Vol.77 No.773, 2011, pp. 234-245.
- ④ 落合成行, 砂見雄太, 橋本巨, HDDスピンドル用流体軸受における油膜係数の同定法, 査読有, Vol.46 No.3, 2011, pp. 157-163.
- ⑤ Masayuki Ochiai, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Experimental Study on Dynamic Characteristics of Fluid Film Bearing for HDD Spindle motor, Selected Articles of the 2nd International Conference on Design Engineering and Science, 査読有, No. 1, 2011, pp. 55-60.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 望月基成, 落合成行, 橋本巨, 情報機器用スピンドルの揺動応答評価 神奈川県産業技術センター, 神奈川県産業技術交流協会, 2012年11月07日
- ② 砂見雄太, 落合成行, 橋本巨, 揺動時におけるHDD用油膜軸受スピンドルの振動特性, 第12回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会, 2012年04月23日
- ③ 砂見雄太, 落合成行, 橋本巨, 軸受特性のばらつき抑制を目的とした小型流体軸受のロバスト最適設計, 日本機械学会2011年度年次大会, 2011年9月13日
- ④ Yuta Sunami, Masahyuki Ochiai and Hiromu Hashimoto, Robust Optimum Design of Fluid Dynamic Bearing for 2.5 Inch HDD Spindle Motors, International Tribology Conference, Hiroshima 2011, 2011年11月1日
- ⑤ 砂見雄太, 落合成行, 橋本巨, HDD用小型流体軸受の振動特性, トライボロジー会議2010秋 福井, 2010年9月16日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称: ジャーナル軸受

発明者: 橋本巨, 落合成行

権利者: 東海大学

種類: 特許

番号: 第4803521号

取得年月日: 2011.0.8.19

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

http://ns.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

落合成行 (OCHIAI MASAYUKI)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号: 40407995

(2) 連携研究者

橋本巨 (HASHIMOTO HIROMU)

東海大学・工学部・教授

研究者番号: 40130877