

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03841

研究課題名（和文）体内埋込み人工腎臓用1自由度制御型磁気浮上遠心ポンプの研究

研究課題名（英文）Research on 1-DOF controlled magnetically suspended centrifugal pump for implantable artificial kidney

研究代表者

張 暁友（Zhang, Xiaoyou）

日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：30431985

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、腎臓病患者の生活の質を向上させるため、小型遠心ポンプ用1自由度制御型磁気軸受を開発した。試作磁気軸受の寸法は径90mm、高さ120mm、質量は1.51kgである。ロータが軸方向に0.3mmの変位になる状態から、浮上するために必要な電流が2.5Aとなり、浮上時にロータの振動幅が約 $\pm 2\mu\text{m}$ となる。

また、遠心ポンプのインペラを回転させるためのモータを設計し、2000rpmまで回転制御が実現できた。さらに、シミュレーションを行い、血液の入口流速やインペラ回転数を最適化した。回転速度が2750rpmを超え、血液の入口流速が1.2m/sの場合、血球成分の分離効率は約45%となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

体内に埋込み可能な人工腎臓に応用できる、コンパクトかつ低エネルギー消費型磁気浮上遠心ポンプの実現を目指すことができる。磁気浮上の無摩擦・無摩耗の特徴を生かし、高耐久性および血栓・溶血低減可能な、体内埋込み型人工腎臓の実現を目指す。

世界中に約200万人以上の腎臓病患者が血液透析治療を受けているが、透析治療に用いる機器は大型であり、システムが複雑である。このため、患者は毎週3回通院し、毎回4時間程度の治療を受けなければならない。体内埋込式磁気浮上人工腎臓の実現により、腎臓病患者の生活の質を劇的に向上することができる。

研究成果の概要（英文）： In this research, to improve the quality of life of kidney disease patients, a one-degree-of-freedom controlled magnetic bearing for compact centrifugal pumps is developed. The dimensions of the fabricated magnetic bearing are 90mm in diameter, 120mm in height, and its mass is 1.51kg. When the rotor is levitated from an axial displacement of 0.3 mm, the required coil current is 2.5A. The vibration of the rotor is within approximately $\pm 2\mu\text{m}$ during levitation.

Moreover, to rotate the impeller of the centrifugal pump, a motor is designed. The motor can rotate the rotor up to 2000 rpm. Furthermore, simulations are performed for the flow of blood in the centrifugal pump, and the inlet flow velocity of blood and impeller rotational speed are optimized.

When the rotational speed exceeded 2750 rpm and the blood inlet flow velocity is 1.2 m/s, the separation efficiency of blood cell components is about 45%

研究分野：工学

キーワード：磁気軸受 遠心ポンプ 人工腎臓

1. 研究開始当初の背景

現在日本における慢性腎臓病の患者数は総計 1300 万人と推定されており、新たな国民病といえる。慢性腎臓病の治療方法は進捗によって異なるが、重度な患者は治療法として血液透析治療を受けなければならない。現在日本には約 33 万人、世界中に約 200 万人以上の腎臓病患者が血液透析治療を受けているが、透析治療に用いる機器は大型であり、システムが複雑である。このため、患者は毎週 3 回通院し、毎回 4 時間程度の治療を受けなければならない。また、厳しい飲水制限を強いられる。このように既存の透析治療は、患者の生活の質を低下させるケースが多くなる¹⁾。

患者の生活の質を劇的に向上させるために、体内埋込式人工腎臓が研究開発されている。通常の血液透析装置では透析膜が使用されているが、透析効率が透析膜の面積に依存するため、小型化には不向きであり、透析膜はタンパク質が付着し透析効率が低下し、長期にわたる連続使用にも限界があるため、既存の血液透析装置は体内への埋込みが困難である。これらの背景から、透析膜の代わりに、小型持続遠心分離装置が開発されている。遠心ポンプを用いて生命維持に必要な血球成分やタンパク質などを分離して体内に戻し、余剰水分や老廃物などを膀胱へ貯めて排出する²⁾。

2. 研究の目的

転がり軸受を用いた遠心ポンプにおける低耐久性、高溶血、高血栓などの問題を回避するため、本研究では、体内に埋込み可能なコンパクトかつ省エネルギー、1 自由度制御型磁気浮上遠心ポンプの開発、および開発した遠心ポンプを用いて血液分離実験を行い、人工腎臓への応用可能性を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) インペラを支持する磁気軸受の小型化・省エネルギー化のため、磁気軸受の構成を検討し、その性能を評価する。
- (2) 血液成分を分離できる目標回転数を達成し得るトルクの発生と、磁気軸受の安定性への影響が小さいことを考慮し、インペラを回転させるためのモータを検討する。
- (3) 分離効率や血液へのダメージなどはインペラの形状に依存するため、流体解析によりインペラの形状や寸法などを最適化する。

4. 研究成果

(1) 1 自由度制御型磁気軸受

① 磁気軸受の構成と設計

図 1 に 1 自由度制御型磁気軸受の構成を示す。本磁気軸受は、互いに反発力が発生するように配置された内周部の永久磁石対と、フランジ状のバックヨークとコイルからなる電磁石・永久磁石より構成される。

内周部の永久磁石対は、4 ペアの着磁方向の異なる永久磁石リングより構成され、それぞれロータとステータの上下に配置される。ロータが径方向に変位するときあるいは傾くとき、これらの永久磁石対が、その変位を抑える復元力あるいは傾きを抑える復元トルクが発生する。すなわち、ロータの半径方向 (X、Y 軸方向) と傾き方向 (θ 、 Φ 方向) を合わせて 4 自由度の運動を拘束する。一方で、外周部の電磁石・永久磁石は、ロータの軸方向 (Z 方向) の運動を制御する。

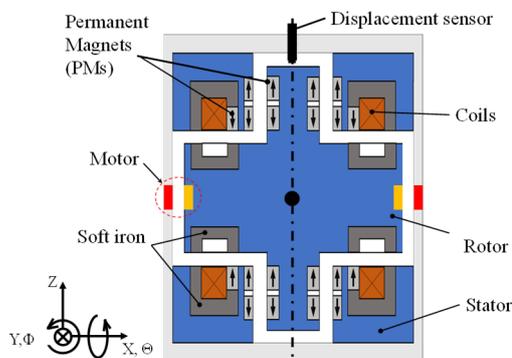


Fig.1 Configuration of 1-DOF controlled magnetic bearing

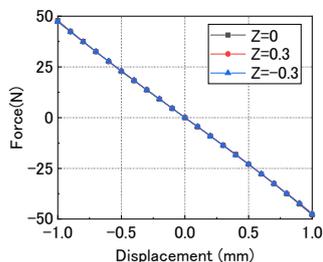
インペラの径が大きくなるほど遠心力が大きくなるが、開発ポンプが体内に埋込み可能であることを考えて、研究の第一段階として、磁気軸受の外形の寸法を $\Phi 90 \times H 120$ にする。また、ロータとステータの隙間を狭くすると、血液ポンプにした際に、ポンプ内の流路幅が短くなり、せん断力等により血液に与えるダメージが大きくなることが予想される。そこで、ロータとステータの軸方向の流体隙間を 0.3mm にする³⁾。径方向には受動制御のため、ロータがステータに衝突しないように、液体隙間を 1.0mm にする。

また、径方向の復元力の目標値を 40N 、傾き方向の復元トルクを 0.75Nm 、軸方向の制御力を 100N に、永久磁石を残留磁束密度 1.44T 、比透磁率 1.09 のネオジウム磁石、バックヨーク部分を電磁軟鉄にし、有限要素法を用いた磁場解析 (Femtet, ムラタソフトウェア(株)) を行い、コイルと永久磁石の寸法を探索し、磁気軸受の設計を行う。

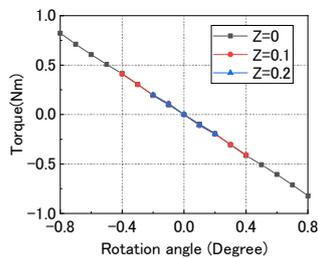
決定した永久磁石と電磁石の寸法を以下のとおりである。ステータに配置する永久磁石リングの外径と内径は 25mm と 19mm となり、高さは 6mm となる。ロータの永久磁石の外径と内径は 16mm と 8mm となり、高さは 6mm となる。2 個の着磁方向の異なる永久磁石の隙間が 2mm

となる。また、外周部の電磁石・永久磁石において、コイルの断面積が 49mm^2 、バックヨークの歯の幅が 4mm 、永久磁石リングの外径と内径が 37mm と 31mm 、高さが 2mm となる。

図2に解析したロータの径方向の復元力と傾き方向の復元トルクを示す。ロータが径方向に 1.0mm 移動した際の復元力が 44.5N となり、支持剛性は 44.5N/mm となる。ロータが平衡位置において、最大傾き角度が約 0.8° となり、その復元トルクが 0.82Nm であり、剛性が 59.31Nm/rad である。図3に電磁石のコイル電流と制御力の関係を示す。上下の電磁石のコイルの最大電流が約 800AT 、最大制御力が 108N 、電流・力係数が 0.15N/AT となる。また、ロータが 0.3mm 軸方向に変位した状態から、タッチアップするために必要な電磁石のコイル電流が 500AT であった。



(a) Radial stiffness



(b) Inclination stiffness

Fig.2 Radial stiffness and inclination stiffness

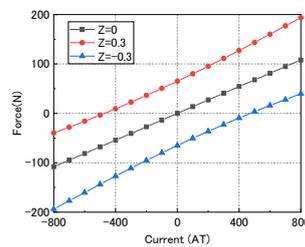


Fig.3 Relationship between coil current and force

②磁気軸受の試作

図4に試作した1自由度制御型磁気軸受を示す。試作した1自由度制御型磁気軸受の寸法は径 90mm 、高さ 120mm であり、質量は 1.51kg である。ロータの長さは 94mm 、最大直径は $\Phi 66\text{mm}$ 、質量は 0.37kg である。また、永久磁石リングの材質は N52 のネオジム磁石であり、2個のコイルの銅線径は 0.5mm であり、それぞれ巻き数は 126 巻きである。

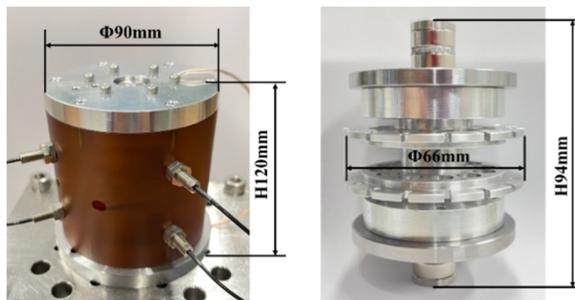
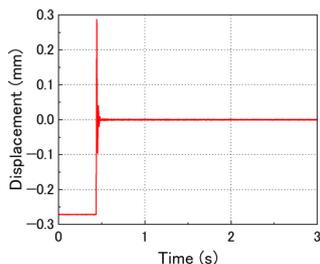


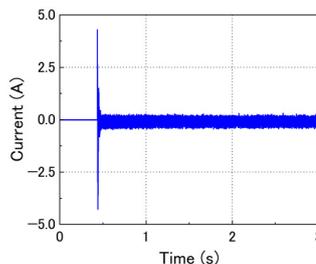
Fig.4 Prototype of proposed bearing

磁気軸受のコントローラには積分器および分母1次分子1次のレギュレータが含まれている。また、電磁石の応答性を改善するため、電流フィードバックループを適用する。設計したコントローラを1自由度制御型磁気軸受に適用してロータの浮上実験を行う。ロータが制御されていない静止状態で制御を加え、制御前後の様子を図5に示す。これより、1自由度制御による完全非接触浮上を確認した。制御開始後、ロータがおよそ 0.2s 以内に安定に浮上でき、その電流も一定範囲内に収まった。また、X方向と傾き方向において、ロータが減衰振動しており、約 1.5s 後に定常状態となっている。

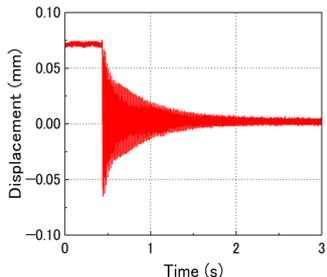
設計したコントローラを1自由度制御型磁気軸受に適用してロータの浮上実験を行う。ロータが制御されていない静止状態で制御を加え、制御前後の様子を図5に示す。これより、1自由度制御による完全非接触浮上を確認した。制御開始後、ロータがおよそ 0.2s 以内に安定に浮上でき、その電流も一定範囲内に収まった。また、X方向と傾き方向において、ロータが減衰振動しており、約 1.5s 後に定常状態となっている。



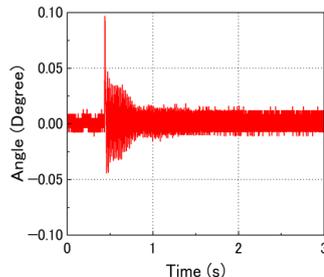
(a) Displacement in Z direction



(b) Coil current



(c) Displacement in X direction



(d) Rotating angle in ϕ direction

Fig.5 Bearing responses at a start up

(2) インペラを回転させるためのモータ

①モータの設計

図6に示すように、モータのトルクと効率を高めるため、ロータに8極を有するハルバツハ配列にした16個の永久磁石を配置し、ステータに3相4組計12個の空芯コイルを配置する。コ

イルに三相交流電源より給電を行うことで、随時 u , v , w 相の磁極が変化する。それに伴い、ロータに配置された永久磁石間に吸引・反発力が発生し、ロータが回転する。

モータの目標トルクを 0.10Nm とし、有限要素法を用いた磁場解析でモータの寸法を探索する。 u , v , w 相の電流は 1 回の切り替えでロータを 15° ずつ回転させるため、磁場解析の際には 0° から 15° の間におけるモータのトルクの検討をする。図 7 に決定したモータの寸法を示す。円形に配置されたコイル陣列の内径を 70mm 、外径を 90mm 、高さを 16mm とした。また、ハルバツハ配列にした永久磁石リングの内径を 52mm 、外径を 62mm 、高さを 15mm とした。

コイルに通電する電流を 400AT とし、磁場解析より求めたモータのトルクと回転角度の関係を図 8 に示す。モータのトルクが約 0.11Nm となり、目標値を達成することが確認できた。また、ロータは X 方向に 1mm 、 Z 方向に 0.3mm 変位しても、あまり影響がなく目標トルクを達成することを確認できた。

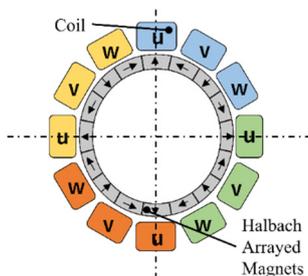


Fig.6 Configuration of motor

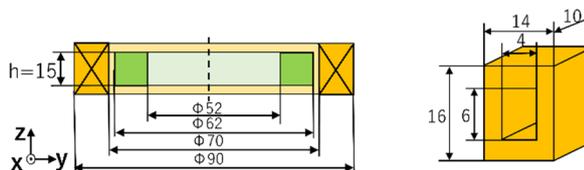
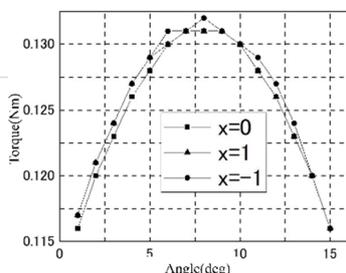
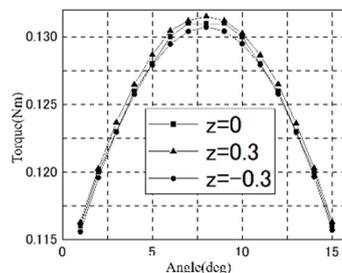


Fig.7 Determined dimensions of coils and PMs



(a) X direction



(b) Z direction

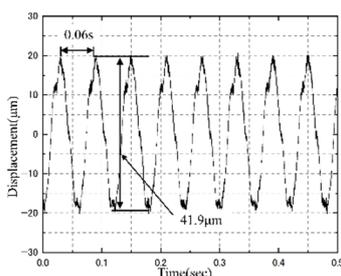
Fig.8 Relationships between torque and rotation angle

②モータを用いた回転実験

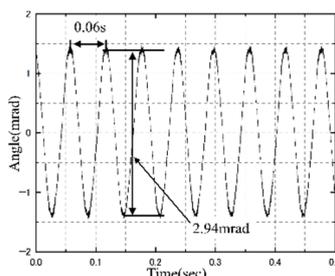
モータ用の永久磁石の材質がネオジウム N52 であり、8 極の磁極を有するハルバツハ配列のようにロータに接着していた。コイルは巻き数 170 巻で、 0.54mm の直径を有する銅線を使用する。12 個のコイルをステータに取り付けていた。また、ロータの回転数を計測するため、ロータの磁極を検知する目的でホール素子 (UGN3503EUA, Allegro MicroSystems Inc.) を、3 相の空芯コイル内にそれぞれ 1 個ずつ配置した。また、回転時のロータの振動を評価するため、4 本の渦電流センサ (PU-05, (株) 電子応用) を配置した。

ホール素子から得られた正弦波状の出力信号を 2 値化し矩形波信号を得る。得た信号がハイパスフィルタを通り正負の楔状の信号になり、3 相の楔状の信号を加算した後、2 乗して 2 次のローパスフィルタで処理する。求めた信号の直線成分は回転数に比例するため、ゲインを乗じることで、回転数を検出できる。モータの回転制御を PID コントローラによって行う。

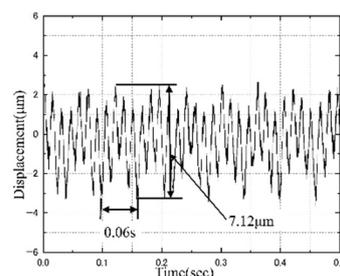
試作したモータを用いてロータの回転実験を行った。目標値を 1000rpm とした実験結果を図 9 に示す。ロータの振動周期が 0.06 秒になり、ホール素子より回転速度を測定できることが確認できる。ロータの各自由度方向の振動の両振幅は、 X 方向が $41.9\mu\text{m}$ 、 Y 軸回り方向が 2.94mrad 、 Z 方向が $7.12\mu\text{m}$ となった。また、試作モータを用いてロータを 2000rpm まで回転制御ができることを確認できた。今後の予定はモータコントローラのパラメータをチューニングし、 3000rpm 以上の回転制御を実現することである。



(a) X direction



(b) Φ direction



(c) Z direction

Fig.9 Rotational vibration at 1000rpm

(3) インペラの最適化

分離効率や血液へのダメージなどはインペラの形状に依存する。流体解析により、ポンプ内部の流れとせん断応力の解析を行い、インペラの形状と寸法を最適化した。図10に最適化した遠心分離ポンプのモデル図を示す。インペラが6枚あり、それぞれの径が46mm、厚さが2mmとなる。インペラ間の距離が上から3.5, 3.0, 2.5, 2.0, 1.5mmとなり、インペラとポンプの外壁間の隙間が1mmとなる。血液を通すため、インペラの表面には微小な穴を空けている。また、6枚のインペラが円錐状の柱で支えられている。血液入口の径が4mm、腎静脈への血球成分の出口の径が4mm、膀胱への余剰水分や老廃物などの出口の径が2mmとなる。

人間腎動脈の血液流速が0.2~1.4m/s、腎動脈の入り口の圧力が100mmHg、腎静脈への出口の圧力が10mmHg、血圧が80~120mmHg(10.64~15.96KPa)であるため、遠心分離ポンプをシミュレーションするとき、血液入口の流速を0.3~1.2m/s、インペラの回転数を2500rpm~3250rpmにする。また、人間の血液の粘度と密度を参考し、シミュレーション用の流体の粘性を0.0035 Pa·s、密度を1060kg/m³にする。シミュレーション結果を図11に示す。

図11(a)と(b)から明らかなように、血液入口の流速とインペラの回転数の増加に伴い、血液入口と出口の間の圧力差およびインペラ表面のせん断力が増大していく。血液入口の流速が1.2m/sになり、インペラの回転数が2750rpm以上になったら、血液入口と出口の間の圧力差が人体の基本的な生理的ニーズを満たすことができる。また、図11(c)と(d)から明らかなように、回転速度が2750rpmを超え、血液の入口流速が1.2m/sの場合、血球成分の分離効率は45%以上となり、血液の滞留時間が6分以下となった。

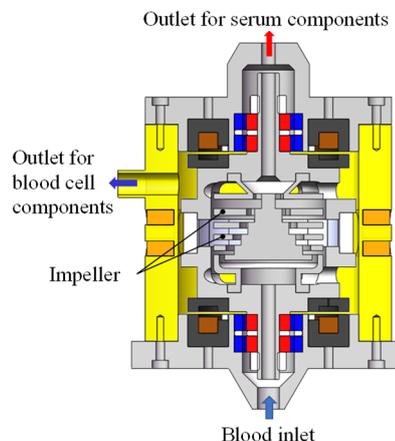
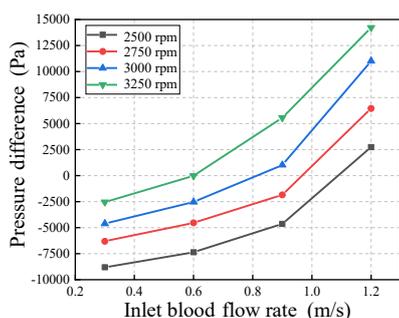
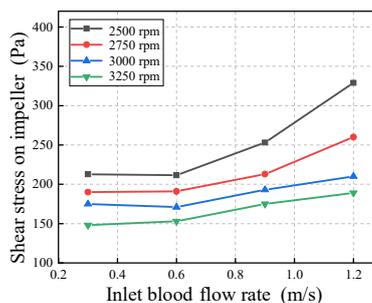


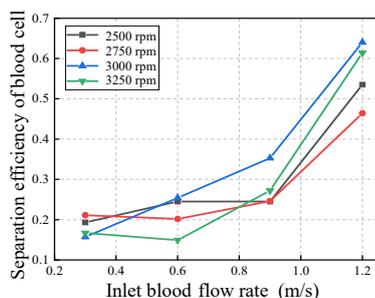
Fig. 10 Optimized centrifugal pump model



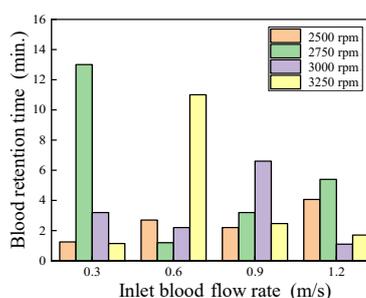
(a) Pressure difference between blood inlet and outlet



(b) Shear stress on impeller surface



(c) Separation efficiency of blood cell



(d) Blood retention time

Fig.11 Simulated separation characteristics of centrifugal pump

参考文献

1. 峰島三千男ほか：頻回・長時間透析の現状と展望，日本透析医学会誌，52，9，(2019) 497-531.
2. K. ARIYOSHI et al.: Centrifugal separator for implantable artificial kidney, 63nd ASAIO, 2017.
3. 湯本淳史他，小型遠心ポンプ用1自由度制御型磁気軸受の研究，日本機械学会論文集C編 Vol. 74, No. 742 (2008), pp. 1625-1630.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Junjie Jin, Yanfeng Wang, Chengcheng Xu, Wenxuan Lu, Xiaoyou Zhang, feng Sun, Fangchao Xu	4. 巻 59
2. 論文標題 Design and Magnetic Force Characteristics Analysis of Magnetic Levitation Bearing for Artificial Kidney Pumps	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Southwest Jiaotong University	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3969/j.issn.0258-2724.20230090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 陸 文軒, 張 曉友
2. 発表標題 小型遠心ポンプ用1自由度制御型磁気軸受
3. 学会等名 2022年度 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陸 文軒, 張 曉友
2. 発表標題 小型遠心ポンプ用1自由度制御型磁気軸受, - 磁気軸受の浮上性能 -
3. 学会等名 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会(IIP2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xiaoyou Zhang, Chengcheng Xu, Wenxuan Lu, Junjie Jin, Feng Sun, Fangchao Xu
2. 発表標題 Research on 1-DOF Controlled Magnetic Bearing for Artificial Kidney Pump
3. 学会等名 2023 2nd International Conference on Mechanical Engineering and Power Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平郡すみれ, 張曉友
2. 発表標題 小型遠心ポンプ用1自由度制御型磁気軸受モータ, - モータの設計と性能評価 -
3. 学会等名 2024年度 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------