

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04148

研究課題名(和文)油圧半浮上すべり送りねじの分離度を基準とする接触・摩擦状態の能動的制御手法の構築

研究課題名(英文) Construction of active method of controlling contact-friction condition in hydraulic half-floating leadscrew using rate of separation as reference valuable

研究代表者

深田 茂生 (Fukada, Shigeo)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：70156743

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、低摩擦で高剛性な送りねじを実現するために、二面が分離しない程度の流体圧を接触面間に供給して見かけの摩擦係数を低減する‘油圧半浮上すべり面’に着目し、摩擦の最小化と高剛性を両立する接触・摩擦状態の能動的な制御方法について実験的に検討を行った。Tr30×8の実機ねじ面間の接触を円筒端面どうしの接触にモデル化して実験を行い、分離度制御ループを主ループとし、圧力制御系と浮上変位制御系を副ループとする三重のカスケード制御系をPID制御動作により構成し、圧力-分離度制御系と浮上変位-分離度制御系を並列して同時に動作させることで、分離度を準静的な正弦波状目標値に追従させることが可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工業製品を高精度に製造する工作機械の直動ガイドや送りねじでは、精密な動作を実現するために摩擦の低減と負荷に対する剛性の向上が同時に要求される。しかし一般に両者は相反する特性であり、それらの二つの要求を同時に満たすことは困難であった。本研究は、低摩擦と高剛性を両立させるために二面が分離しない程度の流体圧を接触面間に供給して摩擦係数を低減する‘油圧半浮上すべり面’に着目し、実際の接触状態に応じて流体圧を浮上直前まで増大して摩擦を限界まで低減して摩擦の最小化と高剛性を両立する接触・摩擦状態の能動的な制御方法を実現した。本方法を送りねじに応用することで、低摩擦で高剛性な位置決め要素を実現できる。

研究成果の概要(英文)：In order to realize an ideal leadscrew with both of low friction and high stiffness, this study refers to a ‘hydraulic half-floating sliding bearing’ which decreases apparent frictional coefficient by providing appropriate fluid pressure without full-separation between frictional surfaces, and considers experimentally on an active method of controlling contact-friction condition to provide both of minimum friction and high stiffness. Some experiments were performed using a simplified model whose cylindrical end surfaces correspond to actual screw thread of Tr30×8. A triple cascade control system was constructed with PID controllers, and it made the rate of separation possible to follow sinusoidal reference by operating the parallel control system of pressure-separation and displacement-separation simultaneously.

研究分野：精密工学

キーワード：すべり送りねじ 半浮上状態 円筒状モデル 油圧 分離度

1. 研究開始当初の背景

精密位置決め系を構成する機構には、アクチュエータの発生力に対する忠実な応答性と負荷に対するロバスト性が要求される。そのため、精密位置決め機構の基本要素である直動案内や送りねじにおいては、運動方向の摩擦の低減と、垂直方向の負荷に対する剛性の向上が同時に要求される。しかし二つの要求を同時に満たすことは一般的に困難であった。

相対運動面の構成原理として実用的に用いられる方法には、すべり方式と転がり方式および静圧浮上方式がある。すべり方式では、剛性は大きい摩擦も大きい。逆に静圧浮上方式の場合は摩擦が小さいが剛性も低下してしまう。そこで低摩擦と高剛性を両立させるために、二面が分離しない程度の流体圧を接触面間に供給し、負荷の一部を流体圧で支持して見かけの摩擦係数を低減する‘半浮上すべり面’が提案され、直動案内ではすでに実用化されている。しかし現状では、既知の負荷に対して高々数十%程度の荷重を流体圧で分担する方式が一般的である。理想的には流体圧を浮上直前の状態まで増大して、部分的な固体接触を維持しながら摩擦を限界まで低減することができるはずである。しかしそのためには、摩擦面の接触状態をモニタして流体圧を操作することが必要となる。摩擦面の接触状態を示す定量的指標をリアルタイムにモニタしながら流体圧を操作することによって、接触・摩擦状態を一定に保持するための能動的制御手法が従来より望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では図1に示すような、作動流体として鉱油を用いた油圧半浮上すべり面に着目する。供給圧力 P_s に設定された油圧が絞り ρ を介してリセスに供給され、接触面間の微小なすきまを通過して大気圧に放出される。ただし半浮上すべり面ではすべり面間に固体接触が存在し、流体圧と固体接触の両方で負荷を支持している。ここで、油膜厚さのかわりに、 $P_s=0$ の状態から一定の P_s が供給されるまでの上下方向の変位を浮上変位 h とする。一方、両面間に一定電圧 V_s をバッファ抵抗 R を介して与え、接触面間に現れる電圧 V_x を‘分離電圧’と呼ぶと、 V_x は固体接触の緊密さに依存する接触抵抗 R_x とともに変化し、 $R_x=0$ の状態では $V_x=0$ となり、両面が油膜で隔てられて $R_x=\infty$ になると V_x は供給電圧 V_s に等しくなる。そこで V_x と V_s の比 ($=V_x/V_s$) を‘分離度’ τ と定義すると、 τ ($0 \leq \tau \leq 1$) の大きさによって接触状態を表現できる。

図2は、供給油圧 P_s に対する分離度 τ と浮上変位 h および摩擦力 f の関係を模式的に示している。 P_s の増大とともに f は減少し、 f が最小となる付近で h と τ が立ち上がりはじめる。ここで P_s を操作することによって $\tau=0.5$ の状態を理想的な半浮上状態として維持できれば、固体接触を維持したまま摩擦力を極微小に保持できる。そこで本研究では油圧半浮上すべり面の分離度に着目して摩擦の最小化と高剛性を両立する接触・摩擦状態の能動的な制御方法を構築し、その方法を実際に半浮上すべり送りねじに応用して、低摩擦で高剛的な位置決め要素を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、以下に示す3つのステップの目標を設定して検討を行った。

ステップ1：実機ねじにおけるねじ面間の接触を円筒端面どうしの接触にモデル化し、浮上領域における浮上変位と摩擦力および分離度と供給圧力の関係を明らかにする。

ステップ2：明らかになった特性を持つ制御対象に対して、油圧サーボ弁による制御系を構成し、接触・摩擦特性を能動的に制御する手法を構築する。

ステップ3：円筒モデルにより実現された接触・摩擦特性の能動的制御手法を半浮上すべりねじに展開してその有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) すべり送りねじのモデル化と基礎実験

① 円筒モデル：本研究では実機ねじのねじ面間の接触を一對の円筒状モデルの端面どうしの接触に単純化して実験を行う。図3に本実験で使用する円筒モデルの形状を示す。円筒モデルはメートル台形ねじ Tr30×8 のねじ面に対応した、端面外径 30 mm のねじ軸モデルと内径 22

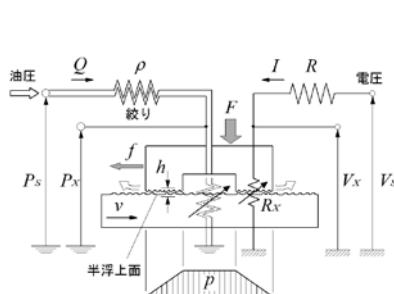


図1 油圧半浮上面

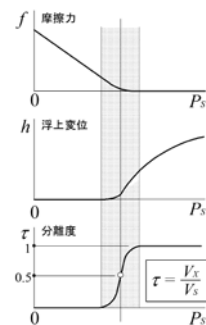


図2 特性の概略

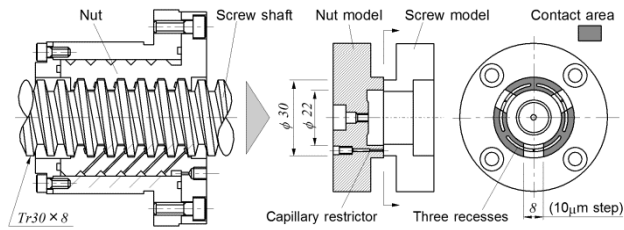


図3 送りねじの円筒モデル化

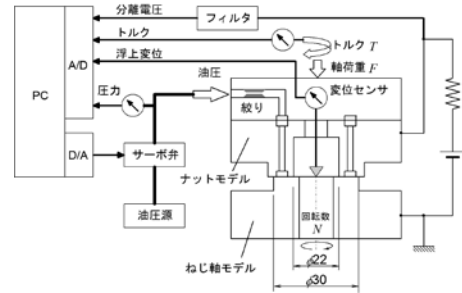


図4 円筒モデル実験装置

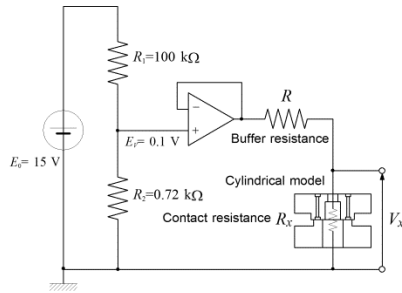


図5 分離度の測定方法

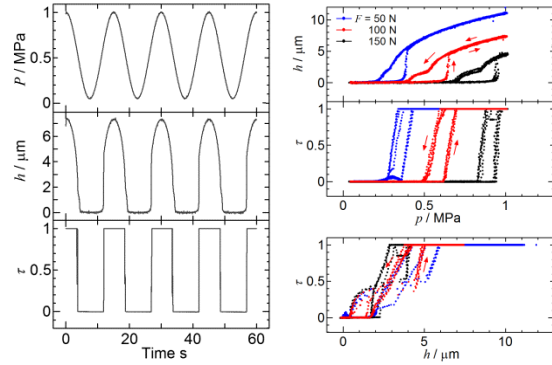


図6 実験結果

mm のナットモデルから成り、油圧はナットモデルに設けられた内径 0.4 mm、長さ 15 mm の毛細管絞りを通り、三分割されたリセスに供給される。またナットモデル端面には、実機ねじに存在するリード誤差等により形成されるすきまを模擬するために、幅 8 mm、深さ 10 μm のステップ状の段差が三カ所設けられている。

② 実験方法：図 4 に実験システムの構成を示す。円筒モデルを円筒摩擦摩耗試験機上に設置し、一定の軸荷重下において一定回転速度で相対的に回転させる。2 円筒間の動摩擦トルクをひずみゲージを用いたロードセルにより検出する。トルク測定への外乱を排除するため、固定側円筒（ナットモデル）は空気軸受により支持されている。油圧は直動型リニアサーボ弁により操作し、毛細管に供給される実圧力 P をひずみゲージ式の圧力センサで検出する。油圧作動油の粘度は VG10 である。ねじ軸モデルに対するナットモデルの浮上変位 h を、軸中心上に設置した静電容量型非接触変位センサで検出する。 h は $P=N=0$ 、における変位計の出力値をゼロとして、そこからの変化を浮上量とした。また円筒モデル間の接触電気抵抗に伴う分離電圧 V_x を測定するため、図 5 に示すような分離電圧測定回路を構成した。OP アンプによるボルテージフォロワからバッファ抵抗 R を介して一定電圧 $V_s=0.1$ V をねじ軸とナットモデル間に印加する。このとき二面間に現れる電位差 V_x は接触電気抵抗 R_x と一意的に対応する。ここで、次の式(1)で与えられる V_x と V_s の比を分離度 τ と定義する。

$$\tau = \frac{V_x}{V_s} = \frac{R_x}{R + R_x} \quad (1)$$

すなわち、二面が電氣的に短絡接触している場合には分離度 $\tau=0$ 、油膜などによって二面が完全に隔てられると $\tau=1$ となる。式(1)によると、 τ が 0.5 となるのは、 $R_x=R$ となる場合であり、 R の値を変更することによって、着目する接触電気抵抗のオーダーを選択することができる。本実験では、 $R=0.23 \Omega$ とした。

③ 実験結果と考察：図 6 は、無回転で圧力の目標値を周期 15 s の正弦波状に準静的に変化させた場合の圧力 p と浮上変位 h および分離度 τ の変化であり、制御対象の準静的特性を示している。時間応答では、圧力が正弦波状に制御されており、圧力の増減とともに浮上変位 h と分離度 τ も変化する。ここでは LPF のカットオフ周波数 $f_c=100$ Hz としているが、一般に分離電圧は半浮上から完全浮上の遷移領域において激しい変動を伴うため LPF による整形が必要であり、以降では f_c を 100 Hz として実験を行った。浮上変位が 5 μm 以上の状態においては、 p と h の関係は静圧理論に基づく理論曲線に従っており、この領域では完全浮上状態にある。半浮上状態は h が 5 μm 以下の領域に存在すると考えられ、分離度 τ は 0.5 まで徐々に増大した後、急激に増減して $\tau=1$ の状態に至っている。各変数間の関係を見ると、 p の変化に対して h は比較的緩やかに変化するが、浮上前後では圧力の増減に対してヒステリシスを示している。また τ は圧力変化の狭い範囲で殆どオンオフに近い急激な変化を示しており、やはりヒステリシスを持つ。また τ と h の関係は複雑な増減挙動を示しているが、これは浮上に伴い円筒面が傾斜することが影響していると考えられる。

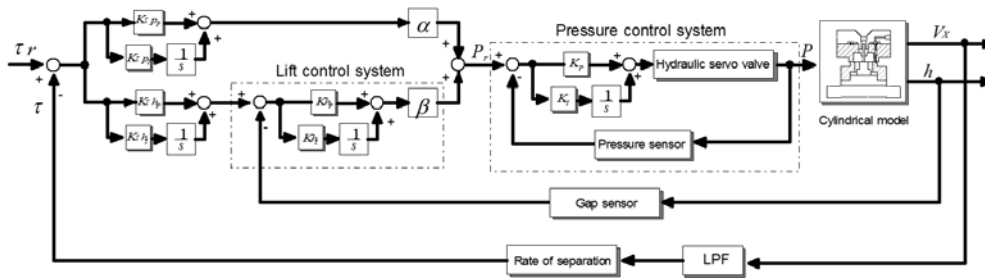
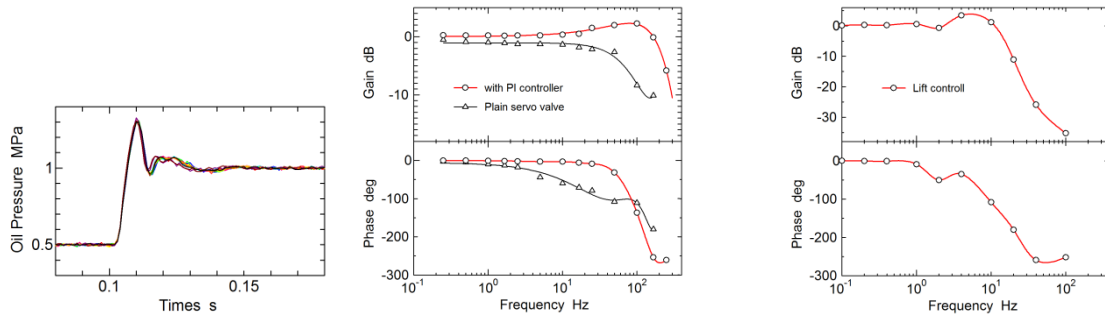


図7 分離度制御系のブロック線図



(a) 圧力制御系

(b) 浮上変位制御系

図8 分離度制御系の各マイナーループの応答性

(2) 円筒モデルによる分離度制御

① 制御系の構成： 制御系のブロック線図を図7に示す．分離度制御系を主ループとし，圧力制御系と浮上変位制御系を副ループとする3重のカスケード系を構成し，圧力制御系のみを副ループとした系（圧力-分離度制御系）と，浮上変位制御系を副ループとする系（変位-分離度制御系）を並列させ，それぞれに重み α （圧力系重み）と β （変位系重み）を乗じて同時に動作させる．全てのループを比例積分動作でフィードバック制御する．圧力制御系の閉ループ周波数応答を図8(a)に，変位制御系の閉ループ周波数応答を同図(b)に示す．圧力制御系の帯域幅が約165 Hzであるのに対して，変位制御系の帯域幅は約15 Hz程度に制限される．各ループの制御動作はPC内のソフトウェアで処理される．サンプリング周波数は1kHzとした．

以降の実験では，軸荷重は全て $F=100\text{ N}$ とする．分離電圧の信号はカットオフ周波数 $f_c=100\text{ Hz}$ のローパスフィルタで整形している．

② 実験結果と考察： 実験ではまず変位制御系のみでの制御応答を検討した．浮上変位制御系に対して $2\text{ }\mu\text{m}$ 一定の目標値を与えた場合の浮上変位 h の応答と，操作圧力 P および分離度 τ の変化を，回転を与えない場合と回転速度 $N=16\text{ rpm}$ の場合について検討し，いずれの場合も変位出力は $2\text{ }\mu\text{m}$ 一定に保持されていることを確認した．回転を伴う場合は， h が一定であるにもかかわらず τ が回転運動（周期3.75秒）に同期して変動した．これはナットモデルの軸心が極微小なすりこぎ運動を伴うためと考えられる．また，目標変位を中心値 $2\text{ }\mu\text{m}$ に対して振幅 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ の正弦波状（周期5秒）に変化させた場合について実験により検討を行い， h が $2\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 変化するのに伴って，分離度 τ が $0\sim 1$ の範囲で変動し，16 rpmの場合には τ の変化に連動して摩擦トルク T も変化した．

図9は，図7の制御系によって目標分離度 τ_r を周期5 sの正弦波状に準静的に変化させた場合の制御結果を示す． τ の変化は50 msの移動平均を取っている．(a)の無回転の場合は，圧力系重み α と変位系重み β を $(\alpha, \beta)=(0.2, 1.0)$ としているが，(b)の16 rpmの場合には $(\alpha, \beta)=(1.0, 0.05)$ のときに最も良好な結果が得られた．無回転の場合は準静的な動作に対して応答の遅い変位系で対応できるが，回転を伴う場合には上述したすりこぎ運動からの外乱を補償する必要があり，より応答の速い圧力系の動作が必要になるためと考えられる．

以上の結果，分離度を制御量とするフィードバック制御により，分離度を準静的な正弦波状目標値に追従させることが可能となった．今後は，外乱に対して柔軟に対応可能な最適な重みの配分についてさらに検討してゆく必要がある．また図10は図9における各変数間の関係を示している．今後はこれらの関係を詳細に検討し，金属間の接触電気抵抗に関する理論と静圧理論を援用して，半浮上すべり面の力学モデルを検討してゆくことも必要である．

(3) 実機すべり送りねじへの展開

① 実験方法： 試作した半浮上すべり送りねじを図11に示す．基本ねじ山形はねじ軸外径30mm，リード8mmのJISメートル台形ねじTr30×8とした．ねじ軸の材質はSCM415H(浸炭焼入れ焼戻し)とした．油圧供給路は直径1mmの絞りを1リードに3個，120度等配に配置した．ナットフランクには油圧を均一に供給するため幅1mmのリセスが設けてある．

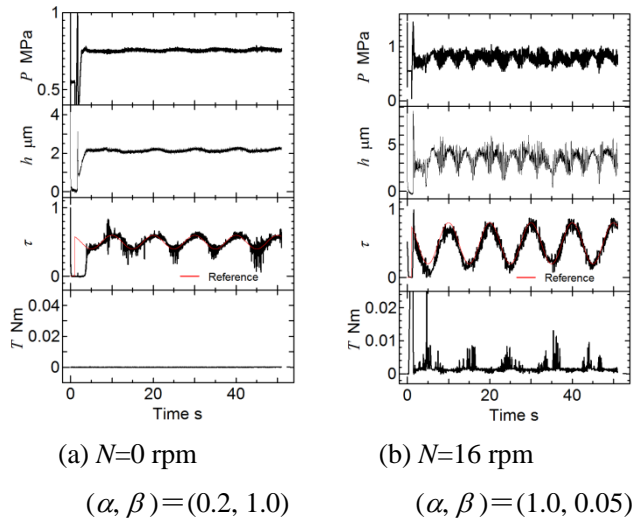


図9 分離度制御の実験結果

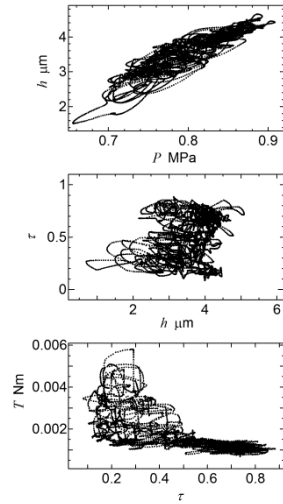


図10 各変数間の関係

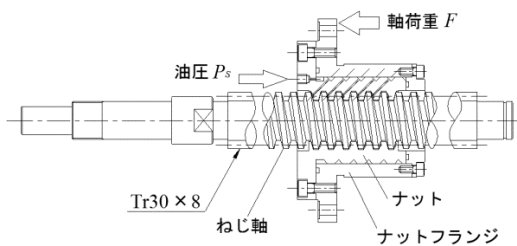


図11 試作した半浮上すべり送りねじ

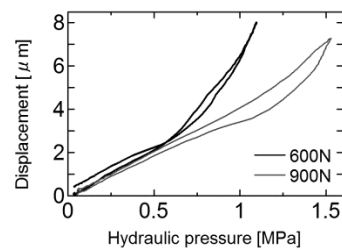


図12 圧力と浮上変位

実機送りねじ性能試験機上で被試験ねじ軸の両端をチャックで固定し、サーボアンプを介してモータを駆動しナットを移動させる。ナットの駆動トルクは、トルク測定器のロードセルによって測定する。またスリップリングを介して接触面の接触電気抵抗による分離電圧を測定し、円筒モデルと同様に分離度を求める。油圧は円筒モデルの実験と同様に直動サーボ弁によって所定の圧力に調整され、接触面に供給される。

② 実験結果と考察：図12に圧力と平均浮上量の関係を示す。油圧と浮上量の間にはやはりヒステリシスが存在しているが、円筒モデルの場合とは異なる傾向を示している。ねじ軸を回転させた場合の駆動トルクと分離度の変化を測定した結果、分離度は油圧だけでなく回転に伴う油の動圧効果によっても変化した。これらの実験結果については今後さらに詳細に分析と考察を行う必要がある。

(4) まとめ

以上により、円筒モデルにおいては、分離度制御ループを主ループとし、圧力制御系と浮上変位制御系を副ループとする三重のカスケード制御系をPID制御動作により構成し、圧力-分離度制御系と浮上変位-分離度制御系を並列して同時に動作させることで、分離度を準静的な正弦波状目標値に追従させることが可能になった。これにより低摩擦と高剛性を両立する半浮上すべり面の能動的制御手法の可能性を示すことができた。また円筒モデルの結果を実機すべり送りねじに展開するために実機半浮上すべり送りねじによる実験を行った。回転速度と荷重を種々に設定して圧力変化に対する駆動トルクと分離度の変化を把握し、圧力増加により駆動トルクが減少することを確認し、圧力操作による駆動トルク制御の効果を確認した。ただし円筒モデルと異なり、現段階ではねじ面のなじみ不足により均一な接触面が現状で十分に得られていないため、分離度特性を把握するまでに至らなかったため、今後さらに実験と検討を継続していく。

<引用文献>

- ① 深田 茂生, 大石 巖: 油圧半浮上すべり面の分離電圧を基準とする接触状態制御の研究 (浮上変位と分離度および摩擦トルクの遷移特性), 2020 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2020-9) p. 263-264.
- ② 深田 茂生, Tran Le Hoai Nam, Le Thi Linh: 油圧半浮上すべり面の分離電圧を基準とする接触状態制御の研究 (浮上変位制御と分離度制御), 2022 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2022-3) p. 375-376.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0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 深田 茂生, 大石 巖	4. 巻 1
2. 論文標題 油圧半浮上すべり面の分離電圧を基準とする接触状態制御の研究（浮上変位と分離度および摩擦トルクの遷移特性）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 263-264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 深田 茂生, Tran Le Hoai Nam, Le Thi Linh	4. 巻 1
2. 論文標題 油圧半浮上すべり面の分離電圧を基準とする接触状態制御の研究（浮上変位制御と分離度制御）	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 375-376
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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0件

〔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
---------	---------