

令和 5 年 4 月 22 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06282

研究課題名（和文）摩擦を動的に変更可能なロボット指先の開発

研究課題名（英文）Development of a robotic fingertip for adjusting friction

研究代表者

村上 剛司（MURAKAMI, Kouji）

九州産業大学・理工学部・教授

研究者番号：80380682

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ロボットハンドの作業能力向上を目指し、接触物体との摩擦係数を変更可能なロボット指先の開発を行った。平行2指ロボットハンドの指先に圧電アクチュエータを装着して微小振動させることで摩擦係数を変更する手法を提案した。実験により、平行2指ロボットハンドで挟み込み把持を行っている円柱に対して、ロボット指先を微小振動させることで、指先表面上で重力などの外力方向へ把持物体を移動させるすべり操作を行えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ロボットハンドの作業能力向上を目指し、指先力や指先姿勢を変更することなく接触物体との摩擦係数を動的に変更可能なロボット指先の開発を行った。摩擦係数を変更可能な独立のパラメータとして新たに手指操作の制御則に組み込めれば、従来は困難であったロボットハンドによるすべりを伴う器用な操作の実現が期待できる。本研究成果は、人間のような高い作業能力を持つロボットハンドの実現へ向けて有益なものである。

研究成果の概要（英文）：I have developed a novel robotic fingertip for adjusting the friction coefficient between the fingertip and an object, in order to improve manipulation skills of a robotic hand. I proposed a method to adjust the friction coefficient by vibration of a robotic fingertip with a piezo-electric actuator. The object manipulation including a slipping process by a robotic hand with two developed fingertips was successfully demonstrated in an experiment.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボティクス ロボットハンド マニピュレーション 摩擦

### 1. 研究開始当初の背景

ロボット技術の発展に伴ってロボットの適用範囲は拡大しており、人間のような高い作業能力を持つロボットの実現が期待されている。高い作業能力の実現には高機能なロボットハンドが必要となるが、人間のように器用な操作を行えるロボットハンドの実現には未だ課題が多い。その課題の一つとして摩擦係数の調節がある。人間が行う手作業では指先を物体表面ですべらせる操作がしばしば行われる。例えば、物体表面での接触を保ちながら指先を移動させる「なぞり操作」や、把持を保ちつつ把持物体を重力などの外力方向へすべらせながら移動させて物体位置姿勢や接触点位置を変更する「持ち替え操作」などがある。人間は摩擦や指先力を繊細に変化させながらこれらの高度な操作を行っている。一方、ロボット指先と把持物体との摩擦係数は双方の材質などにより決定され通常は変更できない。従って、前述の操作をロボットハンドで行うためには、指先位置や指関節トルクなど多数の制御パラメータを含むロボットハンドの制御が必要となり困難である。もしロボット指先と物体との摩擦係数を動的に変更できれば摩擦係数の調節のみでこれらの操作を実現できる可能性がある。

ロボット指先の摩擦係数の変更に関する従来研究としては、接触物体との接触面積に着目した報告がある。ロボット指先の表面形状に曲率を持たせてシリコンなどの柔軟素材で製作し、対象物体へ加える指先力の大きさや指先姿勢に応じて両者間の真接触面積が変化することを利用して摩擦係数の変更を試みている[1]。しかし、摩擦係数の変更のために物体操作中に指先力や指先姿勢を任意に変更することは、把持安定性の確保や、ロボット指の関節自由度などの制限があるため難しい。また、物体操作で摩擦係数の変更機能を利用するには、接触力の大きさと摩擦係数を独立に調整できないという課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、ロボットハンドの作業能力向上を目指し、指先力や指先姿勢を変更することなく接触物体との摩擦係数を動的に変更可能なロボット指先を開発する。把持形態や把持力を変更することなく把持物体との摩擦係数を動的に変更可能なロボットハンドは現状では存在しないが、筆者が提案する手法により実現する。ロボットハンドによる物体把持・操作を考慮し、摩擦係数の調整機能と物体把持・操作機能の両機能を持ったロボット指先を開発する。これにより、ロボットハンドの作業能力の向上が期待でき、人間のような高い作業能力を持つロボットの実現に資すると考える。

### 3. 研究の方法

本研究では、接触物体との接触部位でロボット指先を微小振動させることにより両者間の摩擦係数を変更する手法を提案する。ロボット指先と物体との間に摩擦が生じる要因として接触している領域内の多数の微小部位で生じる凝着が考えられる。指先表面を微小振動させるとロボット指先と物体の接触している領域内の各微小部位では凝着とすべりが繰り返し生じるとして、ロボット指先を微小振動させる事によって生じる凝着とすべりの頻度を摩擦係数と関連付けて摩擦係数の変更を試みる。提案手法では、摩擦係数の変更機能をロボット指先内に実装でき、指先力と独立に摩擦係数の変更を行う点に利点がある。関連研究において、摺動部へ振動を加えることにより移送時の金属間の摩擦力を低減する手法が提案されているが、装置のサイズが大きいため、そのままではロボット指への適用は難しい[2]。

提案手法の妥当性を確認するため、ロボットハンドの指先に小型の圧電アクチュエータを装着して微小振動させることで摩擦係数の調節を行った。開発するシステムの概要を Fig.1 に示す。平行 2 指ロボットハンドで物体を安定把持した状態から指先表面を微小振動させる事により摩擦係数を低減させる。Fig.1 の と の矢印は振動方向を表しており、 を垂直方向の振動とし、 を水平方向の振動とする。本研究では垂直と水平の 2 方向の振動について摩擦係数との関係を調査した。

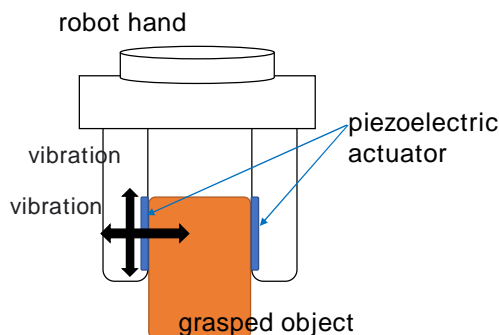


Fig.1 提案手法の概要

まず、振動方向が摩擦係数の変更に与える影響を調査した。圧電アクチュエータには、垂直方向の振動用と、水平方向の振動用をそれぞれ選定した。垂直方向用は、TDK製のPiezo Haptic Actuators - PowerHap Z63000で、その寸法は $26 \times 26 \times 1\text{mm}$ で変位量は $200 \mu\text{m}$ である。水平方向用には、TDK製のMultilayer Piezo Actuators B58004を使用した。そのサイズは $5.2 \times 5.2 \times 30\text{mm}$ で変位量は $59 \mu\text{m}$ である。また、これらの圧電アクチュエータを駆動するアンプとして、BOREAS TECHNOLOGIES社のBOS1901を使用した。圧電アクチュエータの振動により静止摩擦係数が変化するかを調査するためFig.2の実験装置を製作して実験を行った。装置は2つの電動スライダで構成されており、各スライダにフォースゲージが装着されている。上下方向用のスライダのフォースゲージに圧電アクチュエータを固定して台車に一定の法線力を加える。その後、水平方向用のスライダのフォースゲージで台車を押すことで接線力を加える。台車の接触部はPOM樹脂で製作している。このときの最大の接線力を法線力で除した値を静止摩擦係数として求めた。実験では法線力を10Nと20Nとし、圧電アクチュエータの振動周波数を1.0, 8.0kHzとして比較した。法線力が10Nの場合に限り0.3, 0.5kHzの振動周波数についても計測を行った。

法線方向の振動の結果をFig.3に、水平方向の振動の結果をFig.4に示す。両図の縦軸は推定した静止摩擦係数で横軸は振動周波数を表している。また、0kHzの値は振動させなかった場合の結果を示している。Fig.3より、法線方向の振動の場合は振動の有無による静止摩擦係数の変化量は小さかった。一方、Fig.4より、水平方向の振動の場合は振動を加えることで最大0.04程度の摩擦係数の低減がみられた。このとき、法線力の大小による摩擦係数の低減量の違いはあまりみられなかった。一方、振動周波数が大きいほど摩擦の低減量は大きくなったが、振動周波数を上げていくと一定値以下には下がり飽和した。追加実験として、水平方向の振動の方向と、接線力を加える方向の角度的なずれが与える影響を調査したところ、外力である接線力の方向と振動方向にずれがある場合は静止摩擦係数の低減量が小さくなった。

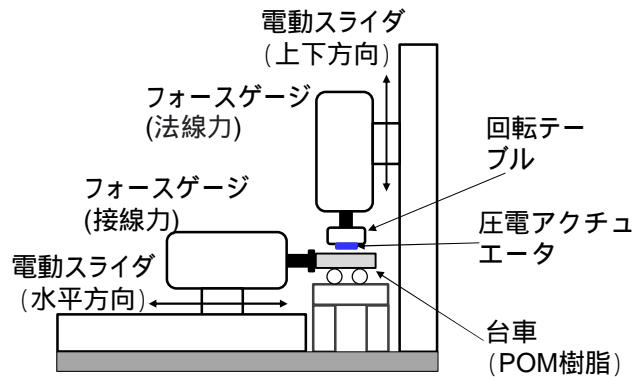


Fig.2 静止摩擦係数の計測装置

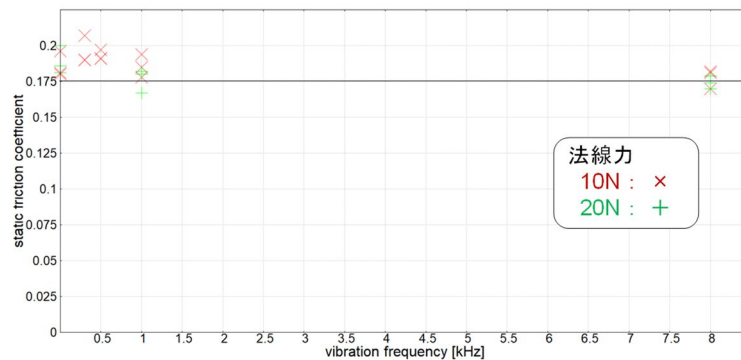


Fig.3 法線方向の振動の実験結果

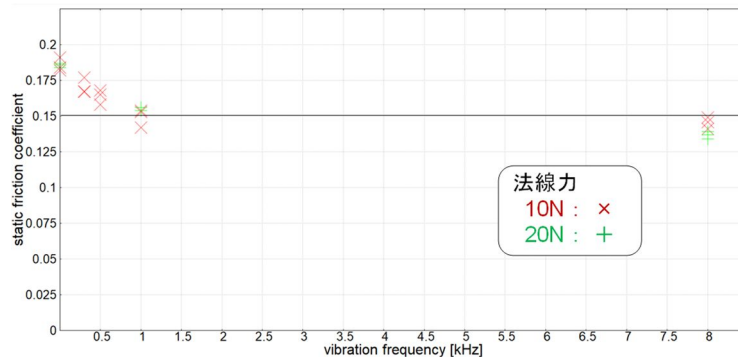


Fig.4 水平方向の振動の実験結果

振動による摩擦係数の変更が可能であることを確認できたため、指先に振動機能を持つ平行2指ロボットハンドを開発した。ロボット指先に装着する圧電アクチュエータは、先の実験と同じものを使用した。3DプリンタによりPLA樹脂で造形したロボット指に各圧電アクチュエータを装着して振動機能を持つロボット指先を開発した。開発したロボット指の外観を Fig.5 に示す。図の左側が垂直方向の振動を、右側が水平方向の振動を加えるロボット指である。同じロボット指を対向させて配置して指先に振動機能を持つ平行2指ロボットハンドを構成した。水平方向の振動を与えるロボットハンドの外観を Fig.6 に示す。

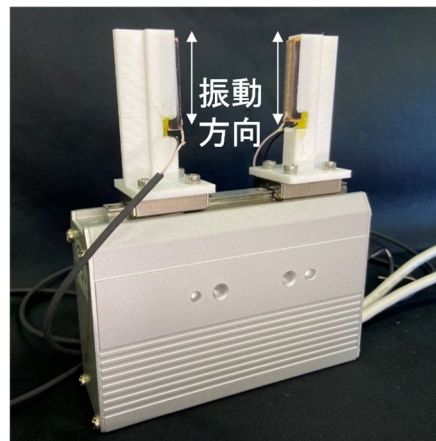
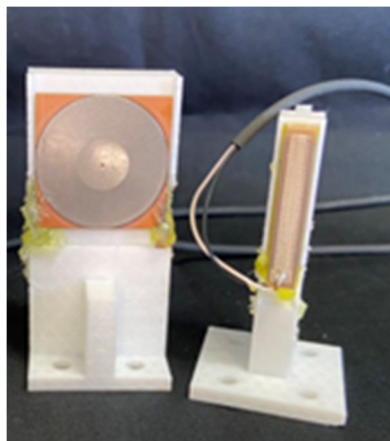


Fig.5 振動機能を持つロボット指先

Fig.6 指先に振動機能を持つ平行2指ロボットハンド

開発した平行2指ロボットハンドを用いて摩擦係数を変更する実験を行なった。把持物体が重力などの外力方向へ指先表面上を移動するすべり操作を摩擦係数の変更により行えることを示す。実験ではロボットハンドに一定の力で物体を把持させ、安定に把持して十分な時間が経過したのち、圧電アクチュエータを駆動して振動させる。そのときに把持物体とロボット指先との摩擦係数が変化することをすべりの発生の有無によって確認する。実験の様子を Fig.7 に示す。すべりに伴う把持物体の降下量はロボットハンドの下方に設置したレーザ変位センサ Panasonic HL-G125 で計測した。その分解能は  $20\ \mu\text{m}$  である。把持物体は直径47mm、長さが100mm、重さが244gのPOM製の円柱で、把持力は使用した平行2指ロボットハンドの最小把持力である11Nとし、圧電アクチュエータの振動周波数は0.3 kHzとした。

水平方向の振動を与える平行2指ロボットハンドによる実験結果を Fig.8 に示す。図の縦軸は距離センサで計測した距離センサと把持されている円柱のすべり量を表し、横軸は時間を表している。その計測周期は50msであり、図の5秒の時点で圧電アクチュエータの振動を開始している。実験結果より、振動開始前は安定に把持しているが、振動開始後にロボット指先ですべりが発生していることが確認できる。

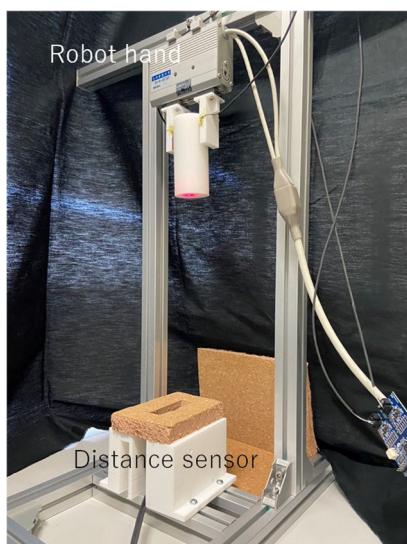


Fig.7 物体すべり操作

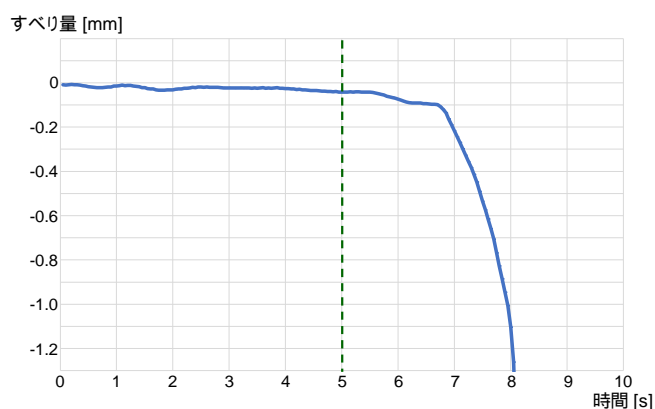


Fig.8 すべり量



#### 4. 研究成果

本研究では、ロボットハンドの作業能力向上を目指し、接触物体との摩擦係数を変更可能なロボット指先を開発した。まず、平行2指ロボットハンドに圧電アクチュエータを装着して振動させることで摩擦係数を調節する手法を提案した。次に、実験により、圧電アクチュエータの振動方向が摩擦係数の調節機能に与える影響を調査した。平行2指ロボットハンドにおいて、ロボット指と把持物体との接触面における法線方向と水平方向の2通りの振動方向における、摩擦係数の低減量の違いについて比較実験を行った。実験結果より、水平方向に振動させた方が法線方向へ振動させたときよりも相対的に摩擦係数の低減量が大きくなった。水平方向に振動させた際の条件と摩擦係数の低減量について以下のことが分かった。まず、押しつけ力の大小による摩擦係数の低減量の違いはあまりみられなかった。一方、圧電アクチュエータの振動周波数が大きいほど摩擦の低減量は大きくなったが、振動周波数を上げていくと一定値以下には下がらず飽和した。また、外力の方向と振動方向にずれがある場合は静止摩擦係数の低減量が小さくなった。これらの結果を通して、振動により摩擦係数を変更する際に影響を与える主なパラメータが振動方向と振動周波数であることを明らかにした。最後に、平行2指ロボットハンドで挟み込み把持を行っている円柱に対して、ロボット指先の微小振動による摩擦係数の変更のみで重力などの外力方向へ指先表面上を移動させるすべり操作を行えることを確認した。この実験では、物体の表面上で接触を保ったままロボット指先を外力方向へ移動させるすべり操作を摩擦係数の調節のみの制御で簡便に実現できた。提案手法による摩擦係数の調節は、物体形状の接触計測や、物体の把持を行いながらの持ち替えなど多くの作業での活用が期待できる。以上により、研究目標を達成することができた[3]。

#### <引用文献>

- [1] 村上剛司、長谷川勉、器用な多関節多指ロボットハンドのための柔軟被覆と爪を有する指先、日本ロボット学会誌, vol.22, No.5, pp.616-624, 2004
- [2] V.C. Kumar and I.M. Hutchings, Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration, Tribology International, Vol.37, pp.833-840, 2004.
- [3] 出見篤史, 田中颯, 村上剛司, 摩擦を変更可能なロボット指先の開発, 日本機械学会九州支部第76期総会・講演会, G31,2023

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 K. Tsuruta, T.Ojiro, N. Ushimi, K.Murakami, T.Sakaki	4. 巻 no
2. 論文標題 Rehabilitation Controller using Brain Illusion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE Int. Conf. on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 pp.1-6
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 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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村上剛司
2. 発表標題 摩擦を変更可能なロボット指先の開発
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第76期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kouji Murakami
2. 発表標題 Concept, results and future topics for the Human Robotics Research Center at Kyushu Sangyo University
3. 学会等名 Workshop on AI rehabilitation robot systems
4. 発表年 2018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
---------	---------