

# 局所滑りセンサを用いたマスタ・スレーブシステムにおける把持力制御

## Grasping Force Control in Master-Slave System with Partial Slip Sensor

○非 香田祐太 (慶大院) 正 前野隆司 (慶大)

Yuta KODA, Keio University, y10700@educ.cc.keio.ac.jp  
Takashi MAENO, Keio University, maeno@mech.keio.ac.jp

This paper discusses the development and control of the master-slave system capable of grasping an object with unknown coefficient of static friction. Partial slip information is known to be essential for conducting stable grasping in a teleoperating system. The developed sensor contains strain gages in several ridges placed on the curvature contact surface. By measuring strain velocity of each ridge, the vibration which occurs due to a partial slip can be detected. We developed the master-slave system with the slave robot which uses the developed sensor to detect a partial slip and automatically controls grasping force. Through the grasp manipulation experiment, the validity of the developed system was confirmed.

**Key Words:** Partial Slip Sensor, Grasping Control, Maser-Slave System

### 1. 背景と目的

マスタ・スレーブシステムはヒトの動作をロボットが再現するシステムである。ロボットハンドにマスタ・スレーブシステムを適用することで、器用な把持・操り作業が可能である。また、ロボットフィンガと対象物体との間に生じる局所滑りのセンシングは、物体を滑り落とさずに安定した把持を行う上で重要であることが知られている。このため、触覚センサを用いたロボットフィンガによる局所滑りの検出および把持戦略に関する研究が行われている[1]。しかし、これらの研究はロボット単体での把持行動を対象としているため、マスタ・スレーブシステムにおける有効性については言及されていない。また、局所滑りを検出するために一定速度で物体を持ち上げる必要があり、把持動作中に物体の質量が変化した際に物体を把持し続けることができないという問題がある。そこで本研究では、持ち上げ速度が不特定な把持動作においても局所滑りが検出可能なセンサを製作する。また製作したセンサを用いて局所滑りを検出し、スレーブ装置が自律的に把持力制御を行うことで、安定した物体把持を実現可能なマスタ・スレーブシステムを構築する。

### 2. 局所滑りセンサ

#### 2.1 設計および製作

佐藤らはヒト指の生理学的知見に基づき局所滑りの検出に適したセンサ形状を提案している[2]。本研究ではこれらの知見を基に以下に示す特徴を有するセンサを設計・製作した。また、把持の対象となる物体は平板状の剛体とした。

- シリコンゴム(ヤング率 0.22MPa)により成型
- センサ表面は巨視的な曲面形状
- センサ表面に複数の突起を配置
- 突起内部にひずみセンサを設置
- センサ基底部に2軸力センサを設置

製作したセンサを Fig. 1 に示す。ひずみゲージは Fig. 1(a)に示す5つの突起内部にそれぞれ設置した。また突起の詳細形状およびひずみゲージの位置を Fig. 1(b)に示す。

#### 2.2 局所滑り測定実験

製作したセンサを用いて局所滑り測定実験を行った。実験では、xy軸自動ステージの駆動部にセンサを設置した装置を用いた。実験方法を以下に示す。はじめにx軸ステージを駆動し、センサに加わる法線力が4Nに達するまでセンサをアクリル平板に押し付ける。次に、y軸ステージを駆動し、センサとアクリル平板に相対的な変位を与える。このとき、y軸方向の移動速度を1,5,20mm/sに設定した。相対的な変位がある一定量を超えたとき、センサとアクリル平板の間には局

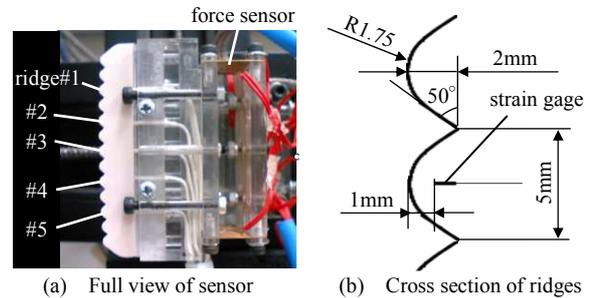


Fig.1 Developed partial slip sensor

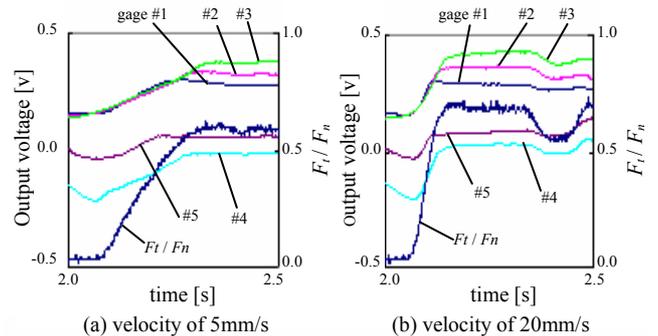


Fig.2 Signal of strain gages and  $F_t / F_n$

所滑りが生じる。この際、センサ内部のひずみゲージの出力およびセンサに加わった接線力  $F_t$  と法線力  $F_n$  の比をそれぞれ計測した。センサの移動速度を5, 20mm/sに設定した際の実験結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、各移動速度においてセンサ端部に位置するひずみゲージから順に出力電圧が平衡状態に移行していることがわかる。また、センサ中央に位置するひずみゲージ3の出力が平衡状態になる時刻と同時に、接線力と法線力の比が平衡状態に移行している。これはセンサ端部から徐々に局所滑りが発生し、最後に中央の突起が滑ることで全体滑りに移行しているためだといえる。以上の結果より、本研究では、センサ内部のひずみゲージ出力の速度成分が、ある閾値を越えたかどうかを指標として局所滑りを検出した。

### 3. マスタ・スレーブシステムの構築

#### 3.1 システム概要

スレーブ装置として局所滑りセンサを設置した自動ステージを、マスタ装置として SensAble 社製の力覚提示装置である PHANToM Premium を用いてマスタ・スレーブシステム

を構築した。構築したスレーブ装置を Fig. 3 に示す。構築したシステムは 1 指のみのため、母指および把持対象物体に相当する装置を構築した。物体把持の際、母指は他指に対して対向しているため、他指によって加えられる把持力を受け止める役割を果たす。そこでセンサに対して平行にアルミ製の支柱を設置し母指の機能を代替させた。また、支柱に設置したリニアスライダに把持対象物体としてアクリル平板を取り付け、 $y$  軸方向に移動可能にした。さらに外乱要素として、把持対象物体の底部と支柱をコイルばねで固定した。対象物体を持ち上げることでばね力が物体に加わる。

### 3.2 制御系の構築

スレーブ装置は局所滑り情報を元に自律的に把持力制御を行う。このため、通常力帰還型バイラテラル制御では、スレーブ装置が把持力を増加させた際の反力が、マスタ装置に予期せぬ外乱として提示されることになる。そこで、Fig. 3 の  $x$  軸方向に対して Yamano らが提案した切り替え型ユニラテラル制御系を用いた[3]。なお、 $y$  軸方向の制御に関しては力帰還型制御系を用いた。切り替え型ユニラテラル制御系では、スレーブ装置が対象物体に対して接触時および非接触時において制御則を切り替える。非接触時には、マスタ装置の位置指令を目標値とした位置制御を行う。接触時においてマスタ装置では、接触した際のマスタ装置の位置と現在の位置との差に剛性に相当するゲインをかけた力を提示する。一方、スレーブ装置では、マスタに提示された力を目標値とする力制御を行う。切り替え型ユニラテラル制御系の特徴は、スレーブ装置に加わる力を陽にマスタ装置に帰還させないため、安定であるという点である。ただし、接触点が反力提示方向に移動してしまう場合、接触点の位置が変わるため本制御系を用いることはできない。しかし、通常の把持動作では物体は母指によって拘束されているため、本制御系を用いることが可能である。

次に、スレーブ装置の自律制御系について述べる。スレーブ装置は把持時に把持物体とセンサの間に滑りが生じないように把持力を調節する。本研究では、製作した局所滑りセンサによって局所滑りが検出された時刻  $t$  における接線力  $F_t[t]$  と法線力  $F_n[t]$  の比を目標値とし、 $F_t / F_n$  を目標値以下にするよう  $F_n$  を制御する。以上のアルゴリズムによって計算された自律制御系出力は抑制器を通して、切り替え型ユニラテラル制御系の出力と足し合わされ、スレーブ装置に入力される。抑制器は改良型ユニラテラル制御系の出力に応じて自律制御系出力を抑制するため

$$F_{ss} = F_{sa}(1 - \text{sigmoid}(F_m - \alpha, \beta)) \quad (1)$$

により出力を決定する。ただし、 $F_{ss}$  は抑制器の出力、 $F_{sa}$  は自律制御系出力、 $F_m$  は切り替え型ユニラテラル制御系出力、 $\alpha$  および  $\beta$  は抑制の度合いを調節する定数である。

### 4. 物体把持実験

構築したマスタ・スレーブシステムの有効性を検証するため、物体把持実験を行った。タスクとして Fig. 3 に示すアクリル平板を把持し、一定の高さまで持ち上げ再び下ろすという動作を行った。なお局所滑りセンサ表面にベビーパウダを塗布した場合と何も塗布しなかった場合の 2 通りの条件で実験を行った。結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) および (b) より、接線力の増加に伴い法線力が増加し、 $F_t / F_n$  がつねに静止摩擦係数以下になっていることがわかる。ただし、静止摩擦係数は実験前に予め計測したものであり、把持力制御ではこの値は用いていない。以上の結果より、構築したシステムを用いることで、静止摩擦係数が未知の物体を滑り落とさずに把持できることが示された。

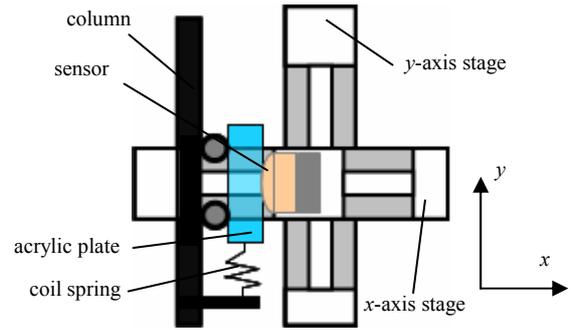
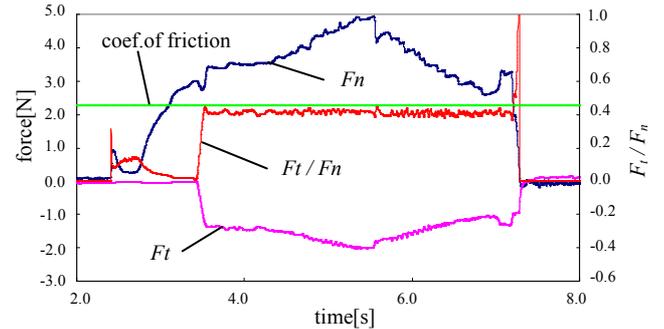
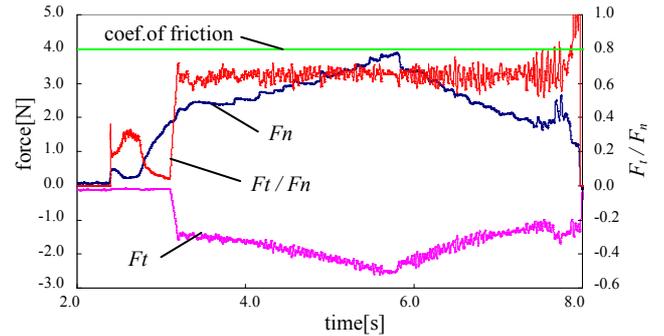


Fig.3 Overview of slave robot



(a) object with powder



(b) object without powder

Fig.4 Result of grasp experiment

### 5. 結論および今後の課題

持ち上げ速度が不特定な把持動作時において局所滑りが検出可能なセンサを製作した。製作したセンサを用いてスレーブ装置が自律把持力制御を行うマスタ・スレーブシステムを構築した。物体把持実験を行い、構築したシステムの有効性を示した。

本稿で示した把持実験において、自律把持力制御の目標値となる  $F_t[t] / F_n[t]$  が試行ごとに一致しなかった。これは、操作者が能動的に加えた把持力によって生じる振動と局所滑りによって生じる振動を分離しきれていないためだと考えられる。今後、センサ出力より局所滑り情報のみを抽出するアルゴリズムを検討する必要がある。

### 文献

- [1] T.Maeno, S.Hiromitsu, T.Kawai : Control of Grasping Force by Detecting Stick/Slip Distribution at the Curved Surface of an Elastic finger, Proc. IEEE. ICRA 2000, pp.3895-3900, 2000
- [2] 佐藤英成 : 突起と層構造を有する滑り検出フィンガの開発, 慶應義塾大学修士論文, 2003
- [3] I.Yamano, K.Takemura, K.Endo, T.Maeno : Method for Controlling Master-Slave Robots using Switching and Elastic Elements, Proc. IEEE. ICRA 2002, pp.1717-1722, 2002