

加速度情報を利用した遠隔操作システムの操作性向上

186700 金山 泰樹
指導教員 佐々木 健 教授

A master/slave hand for remote control that utilizes acceleration information to improve tactile feedback is proposed. By using this device and bilateral control, a dedicated tactile display device will no longer be required. An accelerometer and strain gauge that detects the physical information of a contact is fitted on the slave hand. By changing a part of the conventional bilateral control system and adding this signal, it presents touch and slip vibration. A robot hand equipped with a tactile sensor was created, and the sensor output of grasping and releasing an object was investigated. As a result the experiments, the proposed method presented vibration without affecting the position information.

Key words: haptics, master/slave manipulation, tactile display, bilateral control, motion control

1 緒言

近年、人間が作業現場で直接作業できないような場所にマニピュレータを設置し、作業現場から離れた場所で操作する遠隔操作技術の研究が盛んである。これは危険物処理や海中作業、手術支援などにも応用されている¹⁾。他にも人間の細胞操作や高収積化が進む電子回路設計の様なマイクロ分野への利用が期待されている。

遠隔操作システムとは操作者の腕や指の運動をそのまま作業現場のマニピュレータが再現するマスタ・スレーブ型のマニピュレータが多く、その操作性の良否は運動の自由度や運動伝達の正確性とともにより操作性の向上となる。この操作性の向上というものは人間の五感の中でも特に視覚、触覚で再現されている。視覚は3D映像に代表される視覚情報提示技術に関する研究が多く進められており、3Dディスプレイなど実用化されているものも多い。触覚が物体を操作する上で極めて重要な情報であることは我々の日常生活からも容易に想像することができる。これは遠隔操作システムにおいても同様であり、触覚情報を操作者へ伝えることは操作性の向上につながる。

遠隔操作における操作性向上の手法は大きく二つに分類することができる。一つは既存の制御系の中にあるパラメータを用いて対象物の状態を推定し、その推定値を利用してフィードバックを行う方法。もう一つは新たなセンサを搭載して実際の情報量を増やしフィードバックを行う方法である。既存の制御系パラメータを利用する方法として外乱オブザーバ²⁾や反力推定機能³⁾を利用するものがある。他にもスライディングモードベースの加速度制御⁴⁾が強力な手法として知られている。これらの利点としてアクチュエータにセンサが不要となることである。しかし、これらの多くは制御系を構築することが主であり触覚に言及しているものは少ない。

新たなセンサを搭載するもの方法は数多くの研究がなされている。搭載されるセンサも圧力やひずみ、振動、位置、角度、カメラによる画像解析などがある。圧力センサを利用する例として把持物体の滑りを検出するものがあり、Gunji⁶⁾らは圧力中心触覚センサを使用して把持中のスリップ検出を行っている。同様に滑りを検出するにもひずみゲージを使用するものも存在する⁷⁾⁸⁾。しかしこれらは検出が主であり、操作者へフィードバックを行うものは

少ない。

そこで本研究では操作性の向上を目標に、従来のバイラテラル制御で再現可能な力覚情報の他に、操作性の向上を増すことができると思われる触覚情報を触覚センサで取得し加工したものをマスタ側の制御に加える制御系の構築を目指す。特に接触開始と滑りに着目し、それらの検出にひずみゲージと加速度センサを使用して、ロボットハンドの力と加速度を計測して行う。触覚センサを装着したロボットハンドを作成し、物体を掴む、離す動作のセンサ出力傾向を調査する。ここで実験装置の製作および基礎実験の結果について述べる。本研究で提案する制御法を Fig.1 に示す。

2 遠隔操作マスタ・スレーブ装置

本研究では市販の力覚提示デバイスをマスタハンドとして用いることはせず、別にアクチュエータを用いた2自由度のグリップ型のマスタハンドを作成する。駆動アクチュエータには3.5インチ型HDDのボイスコイルモータ(VCM)を使用しダイレクト駆動として、電流制御によるトルク制御と高速応答、低摩擦と良好なバックドライバビリティと遠隔操作システムに適した特性を実現する。マスタハンドの開きはハサミと同程度の約9cmとした。閉操作時にはマスタハンド先端が閉じることが望ましい。3.5インチ型HDDのボイスコイルモータには読み取り用の磁気ヘッドが存在し、およそ30度回転動作を行うことが可能である。これを利用し望む開閉動作を実現するには回転中心からおおよそ9.5cmの長さが必要となる。しかし磁気ヘッドの長さはこれを満たさないためアルミ板で延長し望む運動範囲を確保した。回転角度を検出するために回転軸にポテンションメータ(緑測器, CP-2UTX)を利用した。また、スレーブハンドも同様のものを使用する。

2.1 実験システムの設計

本研究の実験システムの全体の構成を Fig.2 に示す。バイラテラル制御系は対称形、力逆送形、力帰還形、力順送形という分類があるが、位置の情報を送りあう対称形を基に制御を行う。装置は主にマスタハンド、スレーブハンド制御装置である sBOX II で構成される。マスタハンド、スレーブハンドは制御装置へハンドの位置情報を送り、制御装置は両ハンドの位置情報から制御指令値を計算し、それをマスタハンド、スレーブハンドへ送る。これに加え、ス

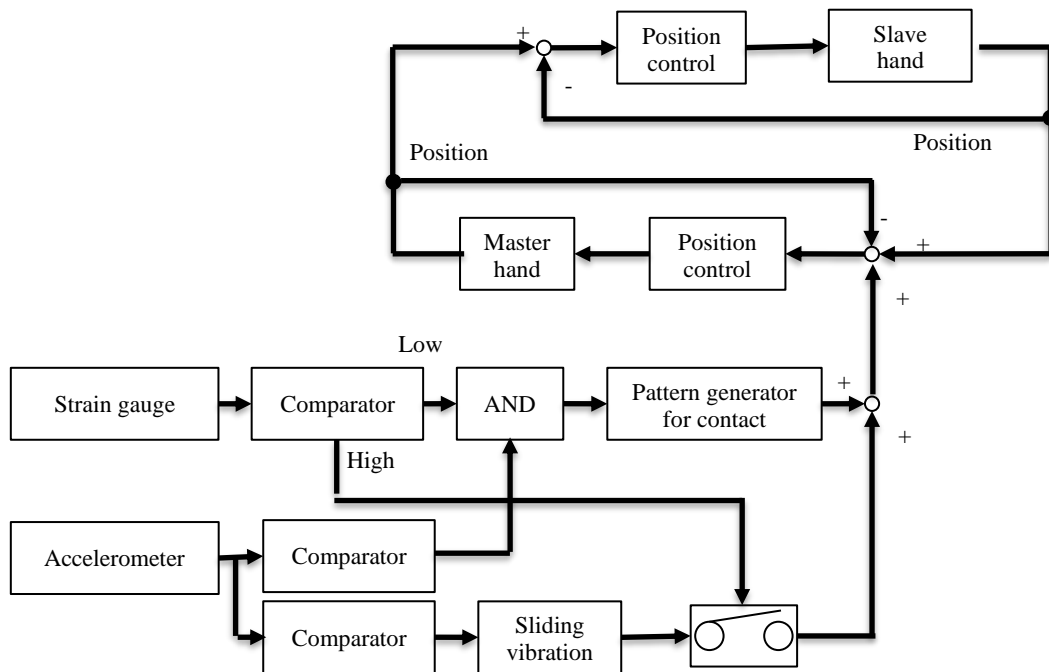


Fig.1 Bilateral control system with strain gauge and accelerometer signal

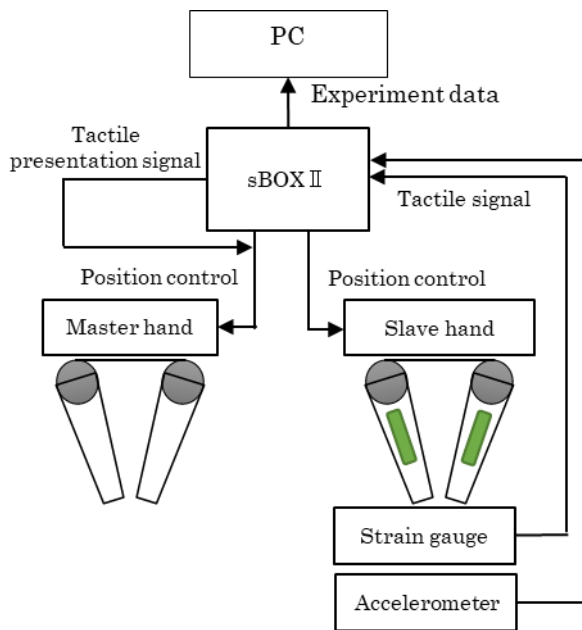


Fig.2 Experimental system with tactile sensor

スレーブハンドに搭載したひずみゲージと加速度センサから、スレーブハンドに生じるひずみと加速度を計測する。これらは制御装置へ送られスレーブハンドと対象物との接触状態を判別し、それに応じた触覚提示信号をマスターハンドへ付加する。制御装置は両ハンドの位置制御を2[kHz]で行うと同時に、Ethernet接続されたパーソナルコンピュータ(PC)へ位置情報やひずみ、加速度といった計測データを送信する。Fig.3は各種センサを取り付けたスレーブハンドである。

3 位置と力と加速度の計測と接触、滑りの検出

3.1 位置の計測

ポテンションメータは無段階の素子であり、30度回転

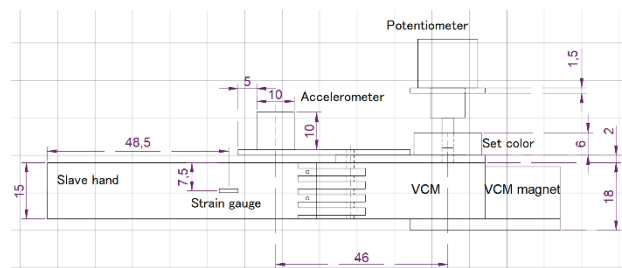


Fig.3 Slave hand with tactile sensor

したとき電圧は0.3[V]変化する。使用する制御装置であるsBOX IIはAD16bit、±10[V]を搭載しており、分解能はおよそ0.3[mV]である。測定範囲より十分細かく、ハンドの動作を約45[μm]で観測することが可能である。

3.2 力の計測

本研究で使用するアクチュエータであるVCMは、最大でおよそ1[N]の力を出力する。スレーブハンドと対象物が接触するとき、対象物は静止状態であることが殆どである。そのため力の計測範囲は0-1[N]であるが、ある程度の余裕をもって0-2[N]の範囲を計測する。Fig.3のようにひずみゲージを取り付けたとき、発生するひずみの最大値はおよそ $2.51 \times 10^{-4} \text{ST}$ となる。また、このときのひずみ測定器(Sanei STRAIN AMPLIFIER 6M82)の出力電圧はおよそ6.3[V]である。

3.3 接触の検出

スレーブハンドが物体に接触する瞬間、スレーブハンドにはほとんど力が生じないが、加速度は大きな出力が生じる。一定速度 v 運動しているハンドが物体に接触し静止する場合を考える。このとき速度は v から0になり加速度が生じる。一方ハンドと対象物はどちらも静止しているため力が釣り合っている。これらを式で表すと以下のようになる。

$$\alpha = \frac{v}{t}, F_{\text{hand}} = F_{\text{object}} \quad (3.1)$$

α : 加速度, t : 接触した時間, F : 生じている力
また、力の計測に用いるひずみゲージはハンドのひずみを計測し制御装置で力に換算している。このひずみはスレーブハンドの制御指令値によって決定し、制御指令値はマスタハンドとスレーブハンドの位置の差によって決定される。これらは次式のように関係する。

$$F_{\text{hand}} = E\epsilon a \beta (X_m - X_s) \quad (3.2)$$

E : ヤング率 (縦弾性係数), ϵ : ひずみ, a : 断面積,
 β : 装置比例係数 (電圧電流変換比, 制御指令値係数),
 X_m : マスタ位置, X_s : スレーブ位置

これより、スレーブハンドで観測される力が小さいとき、スレーブハンドは物体に触れていないまたは、触れた直後であり、マスタハンドとの位置差は小さいと考えられる。このとき瞬間的に発生する大きな加速度は接触によるものと考えられる。

3.4 滑りの検出

スレーブハンドで把持している対象物が滑り動作を行うと考える。スレーブハンドが滑り方向に垂直に把持しているとすると、対象物が滑らないとき以下の不等号が成立する。

$$\mu F_{\text{hand}} > F \quad (3.3)$$

μ : 静止摩擦係数, F : 対象物を滑らせようとする外力

この状態から対象物が滑り出した場合不等号が逆転する。しかしどの場合であってもスレーブハンドで検出される力のみでは、対象物の状態を把握することが困難である。加速度について考えてみる。スレーブハンドで対象物を把持した状態から対象物が滑り動作を行う。滑り動作中もスレーブハンドと対象物が触れている場合、対象物表面をスレーブハンドがなぞる形となり振動することが予想される。この振動は人間が物体に触れる際にも生じるものである。この振動を提示することで対象物の滑り動作を操作者へ伝えられると考えた。この振動はポテンションメータでは観測されないほど小さいが、瞬間的に左右に振れようとしている、すなわちごく短い時間で静止と移動を繰り返しているため加速度として大きな値が出力される。

したがってスレーブハンドに比較的大きな力が観測されているとき、加速度に一定時間持続する大きな出力が存在する場合、その加速度は振動によるものと仮定できる。本研究ではこの加速度をマスタハンドの制御信号に重畳することで操作者へ滑りに伴う振動を提示する。

4 マスタ・スレーブ間の位置誤差と感覚提示用信号の影響

4.1 実験方法

提案手法によってスレーブで生じる滑りに伴う振動をマスタで再現できているか確認した。マスタハンドにスレーブで使用しているものと同様に加速度センサを取り付

け振動の確認を行った。手順としてマスタハンドを操作してスレーブハンドを対象物と接触させる。金属製のブロック (50mm×55mm×60mm) を対象物としてそれをスレーブハンドの接戦方向に約 1 秒かけてゆっくり引く。同様に対象物を接戦方向に約 1 秒かけてゆっくり押す。これを何度か繰り返しマスタハンド、スレーブハンド両方の加速度を観測した。制御系の更新周波数 2[kHz], AD 変換 2[kHz]であり、ここではスレーブの加速度が 10[m/s²]以上のときその加速度をマスタの制御指令値に加算した。

4.2 実験結果

対象物を滑らせた結果を Fig.4 に示す。Fig.4 の上図がマスタハンド、スレーブハンドの位置を周方向の長さで示しており、下図が各ハンドの加速度である。青線がマスタの位置と加速度を表し、橙線がスレーブの位置と加速度を表す。下図において 1.5[s]から 4.5[s]の間対象物を滑らせた。対象物が滑っている時間に±20[m/s²]程度の加速度が生じている。この生じた加速度が滑りに伴う振動であると考えられる。時刻 2[s]周辺に顕著であるが、橙線のスレーブ加速度が発生してから青線のマスタ加速度が発生している。このことからスレーブで観測された振動がマスタへ提示されたと考えられ、提案手法による期待した動作を確認した。

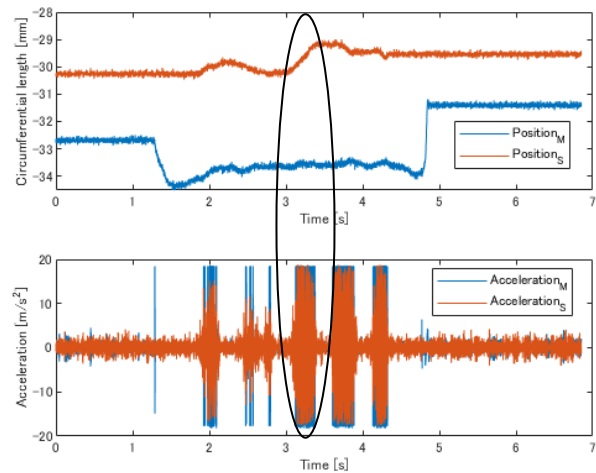


Fig.4 Relationship between position and acceleration in the proposed method

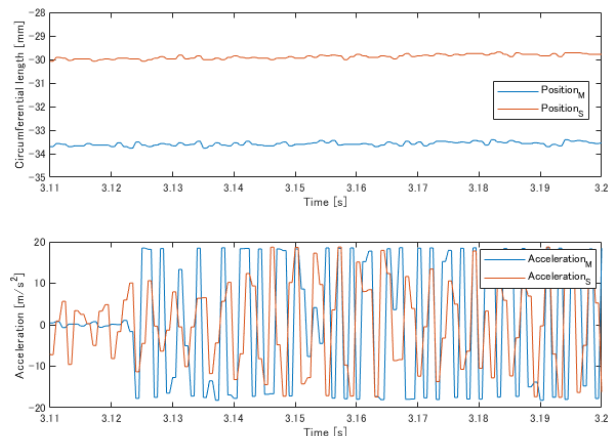


Fig.5 Zoom Fig.4 around 3.15 second

Fig.5 は Fig.4 の時刻 3.15[s]周辺を拡大したものである。

る。3.11[s]から 3.12[s]までスレーブ加速度が存在するがマスタの加速度はほとんど変化していない。時刻 3.12[s]を過ぎたとき-10[m/s²]の加速度がスレーブに生じ振動を開始した。これとほぼ同時刻にマスタの加速度が観測されている。これによってスレーブに加速度が生じ、その振動に合わせてマスタに加速度が生じ振動していることが確認できる。

Fig.6は同じ条件のもと従来制御法である対称形バイラテラル制御を実行したときの位置と加速度であり、Fig.7は時刻 1.85[s]周辺を拡大したものである。Fig.5において振動が開始した時刻 3.12[s]前後でマスタ・スレーブそれぞれの位置は変化していない。また、Fig.6においてスレーブ加速度が 10[m/s²]以上で振動が生じていると考えられる時刻 1.82[s]でも、フィードバックがないためマスタ加速度は変化していない。加えて、この時刻の位置はマスタ・スレーブどちらも変化していない。これより、提案手法によってスレーブに生じた振動と思われる加速度をマスタへフィードバックしても位置制御に影響を与えない。従って、提案手法によって従来手法で求められる位置追従と、加速度による滑りに伴う振動情報の提示が両立可能であることが分かる。これは提案している手法の基本的な動作として期待した動作を行っている。

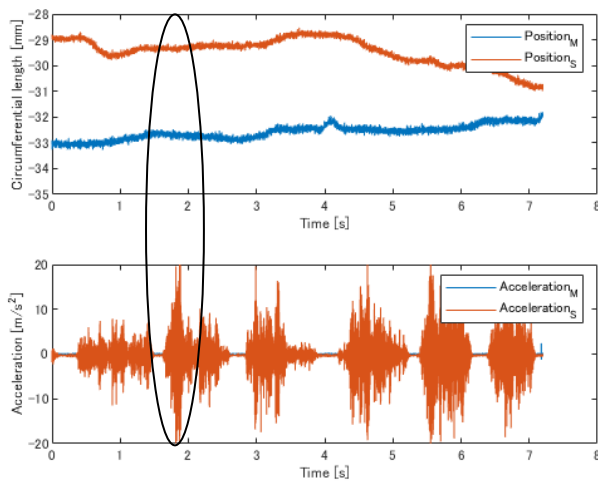


Fig.6 Relationship between position and acceleration in the symmetric bilateral control

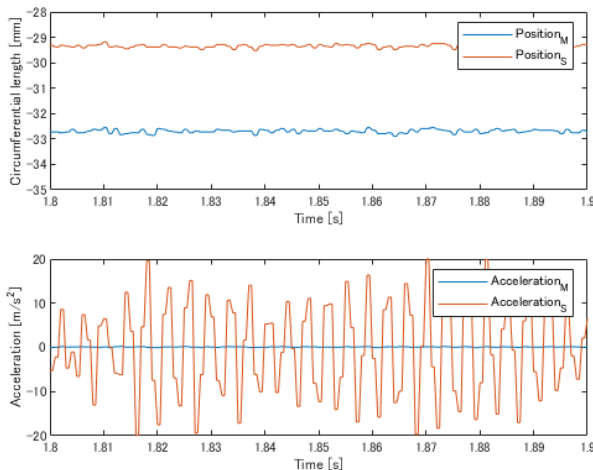


Fig.7 Zoom Fig.6 around 1.85 second

5 結言

本研究では近年盛んに研究されている遠隔操作システムにさらなる臨場感を与えるため、また、触覚提示の根本的な問題点に対する解決策を提示・実証する。その方法として触覚センサを用いて触覚情報をマスタ側の制御情報に加えるものである。1:1のマスタ・スレーブハンドを作成し、触覚センサとしてひずみゲージと加速度センサを使用した。ひずみゲージは環境や対象物との接触や出力する力を計測し、加速度センサは滑りに伴う振動を検知した。今回は滑りに伴う振動をマスタへ提示可能であるかを確認した。スレーブハンドで実験対象物を把持し、対象物を接戦方向に動かすことで滑りを発生させた。その結果マスタハンドへ振動が提示され、かつマスタハンドの位置はほとんど変化しなかった。これはマスタハンドが追従できない速度で振動を与えることで、位置の変化なく操作者へ振動を提示できると考えられる。これによって従来の対称形バイラテラル制御に触覚情報を加え制御することが可能であると判明した。今後は振動以外の触覚情報を与え、同様に制御可能であるか、また、マイクロなものへ対応できるかとしてマスタ・スレーブのサイズ比を変更することでどのような影響があるかを検討する。

文献

- 1) 菅野高皓: "触力覚通信の応用事例," 電子情報通信学会誌, 第 1136 号, vol.102, no.1, pp.69-73, Jan.2019.
- 2) K. Ohnishi, N. Matsui, Y. Hori: " Estimation, identification, and sensorless control in motion control system," in Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, pp. 1253-1265, Aug. 1994.
- 3) T. Murakami, F. Yu, K. Ohnishi: "Torque sensorless control in multidegree-of- freedom manipulator," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, April 1993.
- 4) Y. Yildiz, A. Sabanovic, K. Abidi: " Sliding-Mode Neuro-Controller for Uncertain Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 3, pp. 1676-1685, June 2007.
- 5) A. Hace, K. Jezernik, A. Sabanovic: " SMC With Disturbance Observer for a Linear Belt Drive," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 6, pp. 3402-3412, Dec. 2007.
- 6) D. Gunji, Y. Mizoguchi, S. Teshigawara, A. Ming, A. Namiki, M. Ishikawa, M. Shimojo: " Grasping force control of multi-fingered robot hand based on slip detection using tactile sensor," 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, 2008, pp. 2605-2610.
- 7) C. Melchiorri: " Slip detection and control using tactile and force sensors," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5, no. 3, pp. 235-243, Sept. 2000.
- 8) Y. Koda, T. Maeno: " Grasping Force Control in Master-Slave System with Partial Slip Sensor," 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006, pp. 4641-4646.