

スレーブ側のベースの運動を考慮したバイラテラル制御

47-206710 吉本 理
指導教員 佐々木 健 教授

The objective of this study is to compensate for the inertial force generated in the slave hand and to present a realistic force tactile sensation to the operator even under such circumstances, when the stage stand itself supporting the slave has movement due to the force received from the external environment by the slave side mechanism in bilateral control. In order to calculate the inertial force, an acceleration sensor is attached to the stage stand of the slave hand, and its motion is observed. The inertia force is corrected to the command value of the slave side after adding the position control and the force control. The amplitude of the vibration of the master output is evaluated, and the amplitude of the vibration can be reduced in the proposed method, so that a realistic tactile sensation can be fed back to the operator.

Key words: Bilateral control, haptic, acceleration control, accelerometer, teleoperation

1 緒言

バイラテラル制御とは遠隔操作の方法の一つである。遠隔操作は水中での作業、危険物の取扱いなどで広く使用される。一般に遠隔操作において、マスタ側の動きがスレーブ側にコピーされる。マスタからスレーブへの通信だけではなく、逆方向にスレーブ側からマスタ側にも動きが伝えられる制御法をバイラテラル制御と呼ぶ。遠隔操作における究極の目標は操作者にまるで直接操作しているかのようなフィードバックを与えることである。フィードバックの種類には視覚、聴覚などの感覚があげられるが、本研究では触覚を対象としている。本研究は実験室での危険物の遠隔操作、繊細な感覚を必要とする遠隔手術で使用することを目的として行っている。基本的なバイラテラル制御の一つは両側で位置制御を行うことである。これにより位置同期がなされるが、これは位置情報のみが通信されているので操作者が感じる力は必ずしもスレーブ側の受ける力ではない。それぞれの力情報を同期するためにカフィードバックまたはカフィードフォワードが導入することがよくある。これらには多くの制御方法があるが¹⁾²⁾、全体的なパフォーマンスは位置、速度、加速度、力の制御に依存する。

バイラテラル制御において力情報の同期を行うための手法の一つである加速度制御³⁾は外乱オブザーバを利用して、迅速な応答と正確な力制御を実行できるロバストな制御である。この制御方法では位置または速度を微分して加速度の値から力を推定する。加速度センサを設置し直接加速度値を取得する方法もある⁴⁾。

遠隔操作の利点として、人間が作業するには困難な環境においてもロボットを向かわせての作業を可能とさせることがあげられる。特に海上や水中での作業を遠隔操作によって実現しようとする研究も存在する。その中で、遠隔側におけるスレーブ機構が外部環境から受ける力により操作者にフィードバックされる力触覚情報の不安定感が指摘されている。

本研究では、バイラテラル制御においてスレーブ側機構が外部環境から受ける力により、スレーブを支えるステージ台そのものが運動を持った場合において、スレーブハンドに発生する慣性力を補正し、そのような状況下でも操作者にリアルな力触覚を提示することを目的とする。

2 本研究における制御法

2.1 バイラテラル制御

本研究においてバイラテラル制御で触覚を再現するとき、位置制御による出力と力制御による出力を足し合わせて合成し、それをモータ指令値としている。

2.2 位置制御

マスタ、スレーブの位置についての PID 制御を行っている。これにより位置追従は実行され、摩擦などの外乱の影響も抑えることができる。位置情報はマスタとスレーブそれぞれに取り付けられたリニアエンコーダのセンサ出力から得られる。双方向での同期がなされるため、マスタはスレーブの動きに、スレーブはマスタの動きに相互追従する。

2.3 力制御

力制御は位置が定まっておらず、力が定まっている運動を表す。力制御をするにあたり対象から受ける反作用力を推定する必要がある。本研究では外乱オブザーバを用いた力情報の推定が行われる。反力を推定するのに必要な加速度情報は、本研究では位置情報の二階微分から取得している。微分時に発生するノイズはローパスフィルターを通して除去される。このフィルターのカットオフ周波数は 16[Hz]である。

2.4 ステージ台に発生する加速度の補正

これまでの制御方法においては上の位置制御と力制御を足しあわせてマスタスレーブへの指令値としていたが、本論文ではステージ台に生じる運動による慣性力を補正する。慣性力を計算するにあたりスレーブ側のステージ台に加速度センサを取り付け、その運動を観測する。位置制御、力制御を足し合わせたうえでスレーブ側の指令値にこの慣性力の補正を行っていることを表しているブロック線図を図 1 に示す。

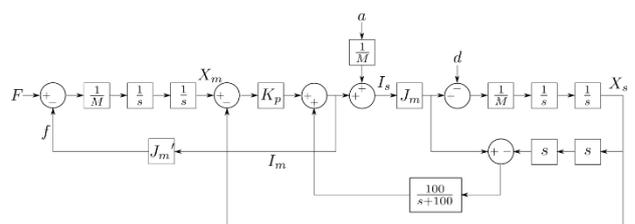


Fig. 1 Block diagram of acceleration control based bilateral control using accelerometer (slave side)

この図における a がセンサにより取得されるステージ台の加速度である。

このブロック線図による制御を行う場合、マスタハンドにつながるアクチュエータへの電流指令値 I_m は、式(1)のようになる。

$$I_m = K_p(X_s - X_m) - s^2 X_s \frac{100}{s + 100} \quad (1)$$

式(1)のうち第1項は位置制御を、第2項は力制御を表しており、これは従来の制御方法と同じものである。

一方、スレーブハンドのアクチュエータへの電流指令値 I_s は、従来法ではマスタへの電流指令値を反転させた式(2)である。

$$I_s = -I_m \quad (2)$$

本研究において新規手法として提案する制御系においては図1から

$$I_s = -I_m - \frac{a}{M} \quad (3)$$

となる。この第2項のうち、 a はステージ台の加速度、 M はスレーブハンドの重さを表している。これにより慣性力の補正を行う。

3 実験

3.1 装置

2自由度バイラテラル制御装置を作成し結果を検証する。装置は直線方向に自由度を持ち、可動域は2[cm]である。駆動力にはボイスコイルモータ、位置情報の取得にはリニアエンコーダを使用する。装置は5[kHz]で動作し、約2Nの発生力がある。スレーブの受ける反作用力はマスタ側に設置されたモータを介して操作者に伝えられる。操作者は持ち手に親指と人差し指を入れて幅を狭める、あるいは広げるように操作し、そこについているモータ出力から力触覚を感じる。スレーブ側機構についてはモータの駆動力を通じて狭めたり広がったりでき、狭めることにより、物体をつかむことのできる把持機構を持っている。またスレーブを支えるステージ台には車輪がついており、外乱を加えることにより運動を起こす。この運動はステージ台に取り付けられた加速度センサにより観測される。

3.2 実験手法

操作者がマスタハンドを親指と人差し指でつかんだ状態で操作を行う。この操作中に車輪付きのステージを手で押し引きすることでスレーブの台に外乱が与えられる。すべての実験の条件をなるべく等しくするため、ステージ台にはできるだけ同じ振幅、周期の振動を加えるようにする。

実験は(a)従来法と(b)新規手法の二つの異なる制御法を比較するが、様々なマスタハンドの操作の条件によって実験を実施することで多くの角度から評価する。

まず、標物体を操作によって把持して台が運動する場合を行う。目標対象物は操作によって形状が変形しないよう十分硬い物体である木でできており形は一辺25[mm]の立方体である。この操作において、スレーブハンドはマスタハンドに追従するようになっており操作

者はマスタハンドに指を通して動作を加えることでスレーブハンドを動かせる。スレーブハンドの間に目標物体を設置し、操作者は遠隔操作によってその物体を把持する。この把持している操作中にステージ台に外乱を加え、運動を持たせる。操作者はマスタハンドのモーター出力により力触覚を受け取る。このときスレーブは物体を同じ力で把持し続けているので、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である

次に、この結果をもとにマスタスレーブの出力する力の拡大比を変えて行う。比率を1/3, 1/2, 2, 3倍にしたときについての結果を求めて、力の拡大、縮小による違いについて検討する。このときスレーブは物体を拡大あるいは縮小された力で把持し続けているので、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。

最後に、目標物体を柔らかいものとしスレーブハンドの出力によって変形を起こすものを把持した場合を検討する。素材はスポンジであり、形は一辺25[mm]の立方体である。把持している最中にステージ台に外乱を加え運動を持たせる。操作者はマスタハンドのモーター出力により力触覚を受け取る。このときスレーブは物体を同じ力で把持し続けているので、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。また、スレーブと物体の間の作用力がステージ台の運動にかかわらず一定であり、柔らかい物体の形状変化させないことが理想である。

3.3 評価手法

遠隔操作における力触覚を伝えることであるという目的のもと、スレーブハンドと目標物体との間に発生する作用反作用力がマスタに提示されるモーター出力として伝わっているかを評価する。実験においてステージ台に加えられた外乱による慣性力の影響によりマスタスレーブ出力が振動を起こすが、新規手法においてその振幅をどれくらいの割合で減少させることができたかにより定量的な評価を行う。振幅について、波形に対して局所的最大値、局所的最小値を計算しそれらのピーク値の差分を振幅とする。

4 結果

4.1 目標物体を操作によって把持して台が運動する場合

操作者が目標物体を把持している時にステージ台に外乱が加わり運動を起こした時の結果を示す。図2, 3には操作中におけるマスタスレーブ出力を表している。

異なる二つの制御法で行われ図2が(a)従来法による制御、図3(b)新規手法によるものの結果である。

図2,3の赤線を見るとスレーブ側は約1.5[N]の出力となっており、この力を把持力として、目標物体を把持していることがわかる。また、図2についてマスタ出力の青線部分はスレーブ側と反転関係にあり、スレーブ台に運動が

生じると振動が出てくる。一方、図3においてマスタ出力の青線は慣性力を補正した結果図2に比べて振動の振幅は少ないことがわかる。

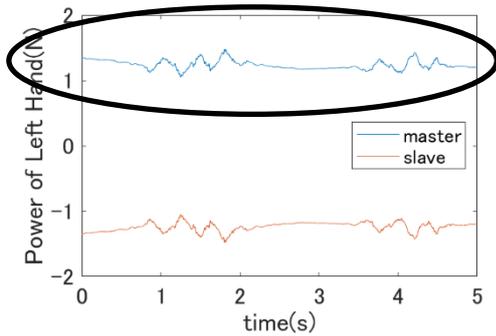


Fig2. Power of Master and Slave Hands by using conventional method

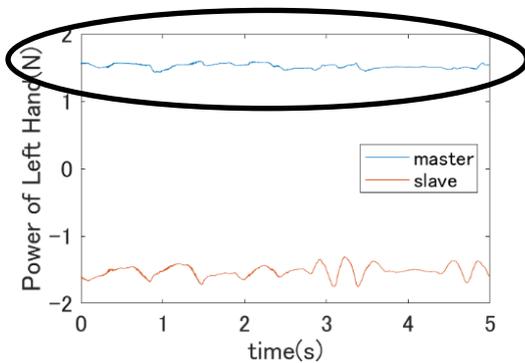


Fig 3. Power of Master and Slave Hands by using proposed method

操作者は同じ力で物体を把持し続けるような操作を実行している。そのためスレーブと物体間の作用力は一定であり、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。つまり慣性力による振動は少なく操作者に力触覚として提示したいという観点のもと、図2、3の黒丸で囲われたマスタ出力を拡大表示したものが図4、5となる。

図4は(a)従来法の拡大図、図5は(b)新規手法の拡大図となっている。また図4、5の両方に局所的な最大値、最小値であるピーク値が赤と黒の三角で示されている。

赤と黒の三角からマスタ出力において振動している部分の振幅を計算する。図4から操作者が受けとる力触覚は従来法で0.21[N]ほどの振幅、図5から新規手法では0.071[N]ほどの振幅となっており、振動振幅は小さいほうがよいという観点から精度として振動が66%減少に改善したと評価できる。

4.2 マスタスレーブの力の拡大比を変えた場合の比較

4.1 節において行った実験内容をマスタスレーブの出力する力の拡大比を変えて行う。マスタスレーブの力の拡大比率を1/3, 1/2, 2, 3倍にしたときについての結果について、4.1 節同様に操作者に提示される力触覚の振動の振幅が少ない方がよいという評価を行う。それぞれについて計

算を行った結果が表1にまとめられている。

新規手法によって振動振幅は減少させられるが完全にはなくしてはならない。力の拡大を行う場合、この小さな振動の力を含めて拡大してスレーブハンドに伝送している。よって振動も同時に拡大してしまうため力の拡大を行ったときの、新規手法による振動振幅の減少率は、力が等倍での制御に比べ小さくなった。一方、力の縮小を行っている場合は振動も同時に縮小して伝送するため振動振幅の減少率は高い結果が得られている。このことから力を拡大した場合においても同程度の改善率を実現しようとしたら、慣性力による影響を完全に近く補正することが必要である。

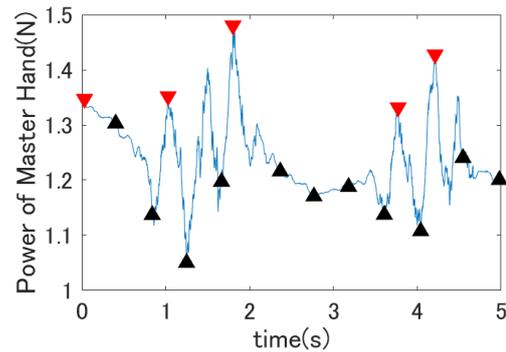


Fig 4. Magnified view of the Power of master and the peak value by using conventional method

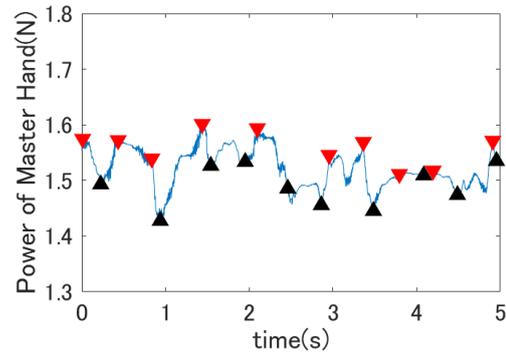


Fig 5. Magnified view of the Power of master and the peak value by using proposed method

Table1. Relationship between expansion ratio and amplitude of vibration and rate of decrease by using conventional method and proposed method

拡大比率 κ [倍]	(a)従来法 [N]	(b)新規手法 [N]	減少率 [%]
1/3	0.332	0.073	78
1/2	0.421	0.042	90
1	0.211	0.071	66
2	0.156	0.095	38
3	0.372	0.281	24

4.3 柔らかい目標物体を把持して台が運動する場合

4.1 節において行った実験内容を目標物体を柔らかい物

体ものに変えて行う。

4.1 節同様に操作者に提示される力触覚の振動の振幅が少ない方がよいという評価を行う。その結果、(a)従来法での振幅は $0.149[\text{N}]$ 、(b)新規手法での振幅は $0.072[\text{N}]$ であったため、振動振幅が 51% 減少したことになった。今回の目標物体は柔らかいものであり、力を加えると変形する性質を持っていた。そこで、操作中における物体の形状に着目して解析を行う。

上の図 6, 7 は操作中におけるマスタスレーブの位置情報を表したもので図 6 は従来法、図 7 は新規手法によるものである。この図中におけるスレーブハンドの間には今回の目標物体が挟まっている。つまり、スレーブハンドの間の距離を計測することで目標物体の厚さの時間変化がわかる。

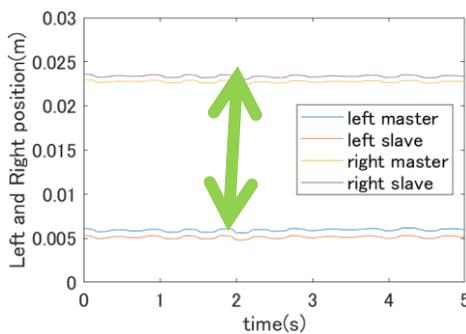


Fig 6. Left and Right position of master and slave hands by using conventional method

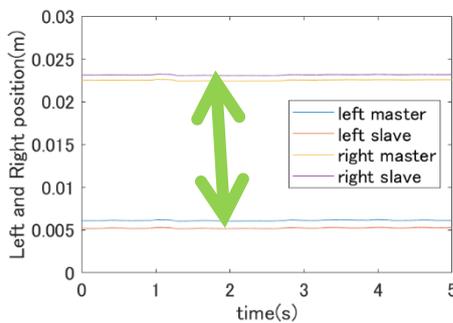


Fig 7. Left and Right position of master and slave hands by using proposed method

そこで緑の部分の差分を計算し図に表したもので図 8 は(a)従来法のいるもの図 9 は(b)新規手法によるものとなる。

図 8, 9 はスレーブ側における左ハンドと右ハンドの距離を表したものになっている。もし物体が変形していないままで把持されている場合、この距離は $25[\text{mm}]$ となる。この図よりスレーブのモータ出力によって約 $7[\text{mm}]$ スポンジは押しつぶされていることがわかる。

この図においてスポンジは押しつぶされて、もとに戻るという変形を周期的に繰り返している様子がわかる。この周期における局所的最大、最小値を赤と黒の三角で示している。そこから振幅を計算すると (a)従来法では $0.081[\text{mm}]$ 、(b)新規手法では $0.0427[\text{mm}]$ となっている。

これは台の運動から受ける慣性力とそれを受ける操作

者の影響でスポンジの形状が変化しているが、実験中の操作者の意図は把持しているだけであるため、スポンジの形状変化は意図しないものである。そこで、上で計算された形状変化がなるべく少ない方がよいという観点から(b)新規手法にすることで振動振幅が 47% 減少し改善されたと評価することができる

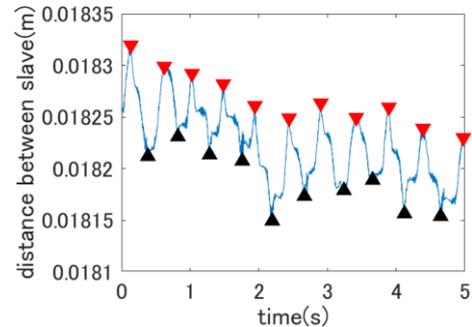


Fig 8. Change in thickness and peak value of the target object by using conventional method

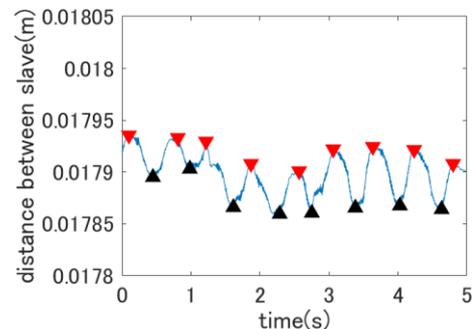


Fig 9. Fig 8. Change in thickness and peak value of the target object by using proposed method

5 結論

本研究で新規手法として利用した制御方法では、スレーブ側機構の加速度情報をもとに、スレーブハンド出力から慣性力分の力を引くことで補正している。これにより実験中の相対偏差が従来法よりも小さくなることで、マスタ出力の振動振幅も小さくなり、制御方法による改善が見られた。

また、今回ステージ台の運動によるスレーブハンドとの間に発生する相対偏差を小さくすることで慣性力を補正することを行ったが、マスタハンド出力から慣性力分の力引くことで、慣性力の補正を行うことも今後可能であると考えられる。

文献

- 1) Peter Hinterseer: IEEE Trans. Signal Process. 56. 2. (2008) 266-276
- 2) Nikhil Chopra: IEEE Trans. Robotics. 22. 4. (2006) 861-866
- 3) Toshiyuki Murakami, Fangming Yu, and Kouhei Olmishi: IEEE Trans. Industrial Electronics. 40. 2.
- 4) Satoshi Yoshimoto, Ken Sasaki: ICPE (2020)