

位置追従性を考慮した対称型テレオペレーション

河田久之輔 滑川 徹 (金沢大学)

Symmetric Impedance Matched Teleoperation with Position Tracking

* Hisanosuke Kawada and Toru Namerikawa (Kanazawa University)

Abstract— In this paper, we propose a new passivity-based teleoperation architecture for bilateral force and position tracking control problem. It has the passivity-based symmetric impedance matched architecture with a virtual damping. The new teleoperation can solve the problems of position tracking. Lyapunov stability methods are used to establish the range of position control gains on the master and slave side. Then the controller is designed considering a trade-off between operationability and position tracking performance. Experimental results show the effectiveness of our proposed symmetric impedance matched teleoperation compared with the conventional teleoperation.

Key Words: Teleoperation, Symmetric impedance matched architecture, Passivity, Position tracking

1 はじめに

バイラテラルテレオペレーションでは、マスタロボットとスレーブロボットが通信路によって結合されるため、通信遅延によりシステムが不安定化するという問題がある¹⁾²⁾。通信遅延による不安定化に対して従来法では、受動性に基づくスキュアリング変換を用いたテレオペレーションに、明示的な位置制御を追加する手法が行われている³⁾。これにより、マスタロボットとスレーブロボットの速度誤差の漸近安定性が示され位置誤差が有界となる。しかし、この手法には次の2つの問題がある。1つ目は波反射⁴⁾の影響で位置追従性が劣化することであり、2つ目は安定となる位置制御ゲインがシステムの有する弾性係数によって制限され、任意に設定できないことである。

本研究では従来法に対して、仮想的な粘性摩擦を持つ対称型テレオペレーションを提案する。これにより、従来法の問題点を解決し良好な位置追従性を実現できる。提案するテレオペレーションに対して、リアプノフの方法に基づく設計法を用いることでシステムが安定となる位置制御ゲインの条件を導く。最後に、制御実験を行うことで提案法の有効性を示す。

2 従来法のテレオペレーション

スキュアリング変換を用いた従来法のテレオペレーションを Fig. 1 に示す。従来法では、スキュアリング変換を用いたことで通信遅延を持つ通信路の受動性を保証している。さらに、明示的な位置制御をマスタ側とスレーブ側に追加することで、位置追従性を向上させている。しかしながら、従来法では以下の二つの問題点がある。1つ目の問題点は、波反射が発生

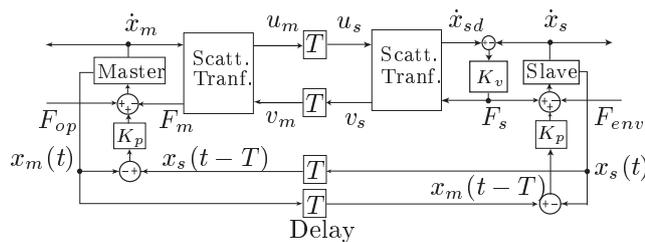


Fig. 1: Conventional teleoperation

することである⁴⁾。スレーブ側のスキュアリング変換からの目標速度は以下ようになる。

$$\dot{x}_{sd}(t) = \dot{x}_m(t-T) + \frac{1}{2}\dot{x}_s(t) - \frac{1}{2}\dot{x}_s(t-2T) \quad (1)$$

ただし、 K_v に対してインピーダンスマッチングを行っている。下線部は $2T$ 遅延したスレーブの速度信号であり、これは位置追従性を劣化させる原因となる。

2つ目の問題は、位置制御ゲインが制限されていることである。安定となる位置制御ゲイン K_p の上限は以下のように与えられる。

$$K_p^2 T^2 < B_m B_s \quad (2)$$

ここで B_m, B_s は、マスタおよびスレーブの有する粘性摩擦係数、 T は通信遅延時間である。位置制御ゲインは、システムの有する粘性摩擦係数とシステムの安定条件に依存している。そのため、任意に設計することができない。そこで次節では、上述の二つの問題点を解決した新しいテレオペレーションを提案する。

3 対称型テレオペレーション

提案するテレオペレーションを Fig. 2 に示す。これは、仮想的な粘性摩擦を持つ対称型テレオペレーションである。簡単のためにマスタおよびスレーブを1自由度系とすると運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{cases} M_m \ddot{x}_m(t) + B_m \dot{x}_m(t) = F_{op}(t) - F_{mr}(t) + F_{back}(t) \\ M_s \ddot{x}_s(t) + B_s \dot{x}_s(t) = F_{sr}(t) - F_{env}(t) + F_{feed}(t) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 M_m, M_s は、マスタおよびスレーブの慣性係数である。添え字 m はマスタロボット、 s はスレーブ

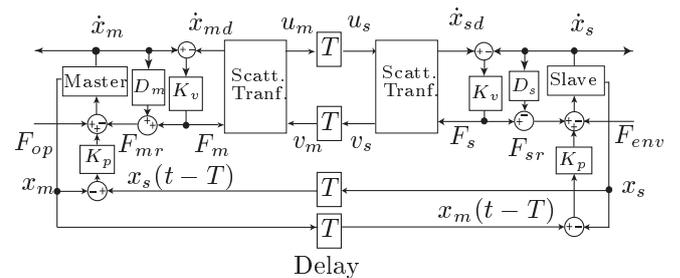


Fig. 2: Symmetric teleoperation

ロボットを意味する． F_{op} は操縦者からの力， F_{env} は環境からの反力である．速度制御器は以下のように与えられる．

$$\begin{cases} F_{mr}(t) = K_v(\dot{x}_m(t) - \dot{x}_{md}(t)) + D_m\dot{x}_m(t) \\ F_m(t) = K_v(\dot{x}_m(t) - \dot{x}_{md}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_{sr}(t) = K_v(\dot{x}_{sd}(t) - \dot{x}_s(t)) - D_s\dot{x}_s(t) \\ F_s(t) = K_v(\dot{x}_{sd}(t) - \dot{x}_s(t)) \end{cases} \quad (5)$$

ここで， \dot{x}_{md} ， \dot{x}_{sd} はマスタおよびスレーブの目標速度， K_v は速度制御ゲイン， D_m ， D_s は仮想的な粘性摩擦である．位置制御器は以下ようになる．

$$\begin{cases} F_{back}(t) = K_p(x_s(t-T) - x_m(t)) \\ F_{feed}(t) = K_p(x_m(t-T) - x_s(t)) \end{cases} \quad (6)$$

ここで， $x_s(t-T)$ ， $x_m(t-T)$ は T [s] だけ遅延したマスタおよびスレーブの位置， K_p は位置制御ゲインである．従来法のテレオペレーションと提案する対称型テレオペレーションの違いは，スキッタリング変換を対称な構造とすることで，マスタ側にも速度制御器 K_v が存在することである．さらに，仮想的な粘性摩擦係数 D_m ， D_s がマスタ側とスレーブ側の両方に追加されている．

スキッタリング変換は以下で与えられる⁴⁾．

$$\begin{cases} u_m(t) = \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_m(t) + b\dot{x}_{md}(t)) \\ v_m(t) = \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_m(t) - b\dot{x}_{md}(t)) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_s(t) = \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_s(t) + b\dot{x}_{sd}(t)) \\ v_s(t) = \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_s(t) - b\dot{x}_{sd}(t)) \end{cases} \quad (8)$$

ここで， b は特性波インピーダンスである．初期エネルギーを零と仮定すると通信路に蓄積されたエネルギーは以下ようになる．

$$\begin{aligned} \int_0^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau &= \int_0^t \{F_m(\tau)\dot{x}_{md}(\tau) - F_s(\tau)\dot{x}_{sd}(\tau)\}d\tau \\ &= \frac{1}{2} \int_{t-T}^t \{u_m^2(\tau) + v_s^2(\tau)\}d\tau \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

よって，通信路は通信遅延時間 T の大きさとは独立に受動的となる．

目標速度 \dot{x}_{sd} は以下ようになる．

$$\begin{aligned} \dot{x}_{md}(t) &= \frac{b-K_v}{K_v+b}\dot{x}_{sd}(t-T) \\ &\quad + \frac{K_v}{K_v+b}\dot{x}_s(t-T) + \frac{K_v}{K_v+b}\dot{x}_m(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{sd}(t) &= \frac{b-K_v}{K_v+b}\dot{x}_{md}(t-T) \\ &\quad + \frac{K_v}{K_v+b}\dot{x}_m(t-T) + \frac{K_v}{K_v+b}\dot{x}_s(t) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで， \dot{x}_{sd} ， \dot{x}_{md} はお互いに依存している．そのため，波反射の原因となり位置追従性が劣化する⁴⁾．そこで， $K_v = b$ としてインピーダンスマッチングを行うことで以下ようになる．

$$\begin{cases} \dot{x}_{md}(t) = \frac{1}{2}\dot{x}_s(t-T) + \frac{1}{2}\dot{x}_m(t) \\ \dot{x}_{sd}(t) = \frac{1}{2}\dot{x}_m(t-T) + \frac{1}{2}\dot{x}_s(t) \end{cases} \quad (12)$$

速度制御入力は以下のように導くことができる．

$$\begin{cases} F_{mr}(t) = \frac{b}{2}(\dot{x}_m(t) - \dot{x}_s(t-T)) + D_m\dot{x}_m(t) \\ F_{sr}(t) = \frac{b}{2}(\dot{x}_m(t-T) - \dot{x}_s(t)) - D_m\dot{x}_s(t) \end{cases} \quad (13)$$

上式は $2T$ [s] 遅延した速度成分が無く良好な制御が行える．

4 安定性解析

提案する対称型テレオペレーションの安定性解析を行う．まずはじめに，以下の仮定を置く．

- 1) オペレータおよび遠隔環境は受動的なシステムである．
- 2) オペレータおよび遠隔環境からの力は，マスタおよびスレーブ速度の既知な関数に制限されている．
- 3) 全ての信号は \mathcal{L}_{2e} に属している．
- 4) $\dot{x}_m(t)$ ， $\dot{x}_s(t)$ は $t < 0$ のとき零である．

また，位置誤差を以下のように定義する．

$$\begin{cases} e_m(t) = x_m(t-T) - x_s(t) \\ e_s(t) = x_s(t-T) - x_m(t) \end{cases} \quad (14)$$

上述の仮定の下で以下の定理が導かれる．

定理 1 (3),(4),(5),(8),(7),(12) 式で記述されたシステムを考える．ゲイン K_p がある範囲 ($0 < K_p < K_p^*$) のとき，信号 \dot{x}_m ， \dot{x}_s ， \dot{e}_m ， \dot{e}_s は原点へ漸近安定である．

証明：システムに対する正定関数 $V(x)$ を以下のように定義する．

$$\begin{aligned} V(x) &= \frac{1}{2} \{M_m\dot{x}_m^2(t) + M_s\dot{x}_s^2(t) + K_p(x_m(t) - x_s(t))^2\} \\ &\quad + \int_0^t F_{env}(\tau)\dot{x}_s(\tau)d\tau - \int_0^t F_{op}(\tau)\dot{x}_m(\tau)d\tau \\ &\quad + \int_0^t \{F_m(\tau)\dot{x}_{md}(\tau) - F_s(\tau)\dot{x}_{sd}(\tau)\}d\tau \end{aligned} \quad (15)$$

1 項目は， M_m ， M_s ， K_p が正であるため正定である．2,3 項目は，仮定 1) より準正定である．4,5 項目は，スキッタリング変換 (9) 式により準正定である．従って，リアプノフ関数の候補 $V(x)$ は正定関数である．次に，システムの軌跡に沿った (15) 式の微分を行うことで以下ようになる．

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= -(B_m + D_m)\dot{x}_m^2(t) - (B_s + D_s)\dot{x}_s^2(t) \\ &\quad - K_v(\dot{x}_m(t) - \dot{x}_{md}(t))^2 - K_v(\dot{x}_{sd}(t) - \dot{x}_s(t))^2 \\ &\quad + K_p(x_s(t-T) - x_s)\dot{x}_m + K_p(x_m(t-T) - x_m)\dot{x}_s \end{aligned} \quad (16)$$

ここで，インピーダンスマッチング $K_v = b$ を行うことで (12) 式を代入して以下ようになる．

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= -(B_m + D_m)\dot{x}_m^2 - (B_s + D_s)\dot{x}_s^2 - \frac{b}{4}\dot{e}_m^2 - \frac{b}{4}\dot{e}_s^2 \\ &\quad + K_p(x_s(t-T) - x_s)\dot{x}_m + K_p(x_m(t-T) - x_m)\dot{x}_s \end{aligned} \quad (17)$$

さらに，以下のような関係式

$$x_i(t-T) - x_i(t) = - \int_0^T \dot{x}_i(\tau-T) d\tau ; i = m, s \quad (18)$$

を用いて、区間 $[0, t_f]$ で積分を行うと以下ようになる。

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f} \dot{V}(x) dt &\leq -(B_m + D_m) \|\dot{x}_m\|_2^2 - (B_s + D_s) \|\dot{x}_s\|_2^2 \\ &\quad - \frac{b}{4} \|\dot{e}_m\|_2^2 - \frac{b}{4} \|\dot{e}_s\|_2^2 \\ &\quad - K_p \int_0^{t_f} \left\{ \dot{x}_m \int_0^T \dot{x}_s(t-\tau) d\tau \right\} dt \\ &\quad - K_p \int_0^{t_f} \left\{ \dot{x}_s \int_0^T \dot{x}_m(t-\tau) d\tau \right\} dt \quad (19) \end{aligned}$$

ここで、 $\|\cdot\|_2$ は区間 $[0, t_f]$ 上での信号の \mathcal{L}_2 ノルムである。任意の定数 $\alpha_1 > 0$ と、ヤングの不等式およびシュワルツの不等式を用いることで以下ようになる。

$$\begin{aligned} &\int_0^{t_f} \left\{ \dot{x}_m \int_0^T \dot{x}_s(t-\tau) d\tau \right\} dt \\ &= \int_0^{t_f} \underbrace{\left\{ \dot{x}_m \sqrt{\alpha_1} \frac{1}{\sqrt{\alpha_1}} \int_0^T \dot{x}_s(t-\tau) d\tau \right\}} dt \\ &\leq \frac{\alpha_1}{2} \|\dot{x}_m\|_2^2 + \frac{1}{2\alpha_1} \int_0^{t_f} \left\{ \int_0^T \dot{x}_s(t-\tau) d\tau \right\}^2 dt \\ &\leq \frac{\alpha_1}{2} \|\dot{x}_m\|_2^2 + \frac{1}{2\alpha_1} \int_0^{t_f} \left\{ \int_0^T \underbrace{1}_{\leq 1} \dot{x}_s(t-\tau) d\tau \right\}^2 dt \\ &\leq \frac{\alpha_1}{2} \|\dot{x}_m\|_2^2 + \frac{T}{2\alpha_1} \int_0^T \left\{ \int_0^{t_f-\tau} \dot{x}_s^2 dt \right\} d\tau \\ &\leq \frac{\alpha_1}{2} \|\dot{x}_m\|_2^2 + \frac{T^2}{2\alpha_1} \|\dot{x}_s\|_2^2 \quad (20) \end{aligned}$$

同様に、 $\alpha_2 > 0$ を用いることで以下ようになる。

$$\begin{aligned} &\int_0^{t_f} \left\{ \dot{x}_s \int_0^T \dot{x}_m(t-\tau) d\tau \right\} dt \\ &\leq \frac{\alpha_2}{2} \|\dot{x}_s\|_2^2 + \frac{T^2}{2\alpha_2} \|\dot{x}_m\|_2^2 \quad (21) \end{aligned}$$

従って、(19) 式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f} \dot{V}(x) dt &\leq - \left\{ \hat{D}_m - K_p \left(\frac{\alpha_1}{2} + \frac{T^2}{2\alpha_2} \right) \right\} \|\dot{x}_m\|_2^2 \\ &\quad - \left\{ \hat{D}_s - K_p \left(\frac{\alpha_2}{2} + \frac{T^2}{2\alpha_1} \right) \right\} \|\dot{x}_s\|_2^2 \\ &\quad - \frac{b}{4} \|\dot{e}_m\|_2^2 - \frac{b}{4} \|\dot{e}_s\|_2^2 \quad (22) \end{aligned}$$

ここで、 $\hat{D}_m = B_m + D_m$, $\hat{D}_s = B_s + D_s$ である。(22) 式が準負定となるための条件は以下ようになる。

$$\begin{cases} K_p \left(\frac{\alpha_1}{2} + \frac{T^2}{2\alpha_2} \right) < \hat{D}_m \\ K_p \left(\frac{\alpha_2}{2} + \frac{T^2}{2\alpha_1} \right) < \hat{D}_s \end{cases} \quad (23)$$

(23) 式をお互いに掛け合わせ、ヤングの不等式を用いると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{K_p^2 T^2}{4} \left(\frac{\alpha_1}{T} + \frac{T}{\alpha_2} \right) \left(\frac{\alpha_2}{T} + \frac{T}{\alpha_1} \right) &< \hat{D}_m \hat{D}_s \\ K_p^2 T^2 &< \hat{D}_m \hat{D}_s \quad (24) \end{aligned}$$

上述の不等式は任意の定数遅延に対して解を持つことができる。よって、 K_p が (24) 式を満たすように選ぶことで、(22) 式が準負定となり、システムはリアプノフの意味で安定となる。さらに、 $\int_0^{t_f} \dot{V}(x) dt$ は下に有界でありその微分 $\dot{V}(x)$ が一様連続であるため、Barbalat's Lemma⁵⁾ を適用することで $t \rightarrow \infty$ で $\dot{V}(x, t) \rightarrow 0$ となる。従って、 $\dot{x}_m, \dot{x}_s, \dot{e}_m, \dot{e}_s$ は零に漸近収束する。□

命題 1 (14) 式で記述された位置誤差 e_m, e_s は有界である

証明: (14) 式で定義された位置誤差は以下のように書くことができる。

$$\begin{cases} e_m(t) = x_m(t) - x_s(t) - \int_{t-T}^t \dot{x}_m(\tau) d\tau \\ e_s(t) = x_s(t) - x_m(t) - \int_{t-T}^t \dot{x}_s(\tau) d\tau \end{cases} \quad (25)$$

\dot{x}_m, \dot{x}_s は有界であるため、位置誤差 e_m, e_s も有界である。□

注意 1 定常状態において、環境からの反力 F_{env} がマスタ側に正確に伝達することを示す。以下のような定常状態を仮定する。

$$\ddot{x}_i(t) = 0, \dot{x}_i(t) = 0, x_i(t) = x_i, \text{ for } i = m, s \quad (26)$$

このとき、 $F_{sr}, F_{mr} \rightarrow 0$ となり、マスタおよびスレーブの運動方程式 (3) は以下ようになる。

$$\begin{cases} F_{op} = -F_{back} = -K_p(x_s - x_m) \\ F_{env} = F_{feed} = K_p(x_m - x_s) \end{cases} \quad (27)$$

上述の方程式は以下ようになる。

$$F_{op} = K_p(x_m - x_s) = F_{env} \quad (28)$$

定常状態において、 $F_{op} = F_{env}$ となり良好な力追従性を保証する。また、スレーブから環境に与える力は、位置誤差を K_p 倍した値となる。

注意 2 提案法は K_p を任意の値に設定できることから、良好な位置追従性が期待できる。しかし、 K_p を大きくするためには仮想的な粘性摩擦 D_m, D_s を大きくする必要がある。これは、操作性を劣化させることになる。従って、提案するテレオペレーションは操作性と位置追従性のトレードオフを考慮しなければならない。

5 制御実験による検証

実験は Fig.3 のような 2 台の SICE-DD アームの 2 軸を固定して、1 自由度系として行った。マスタおよびス



Fig. 3: Experimental setup

Table 1: Controller gain of conventional teleoperation

b	K_v	K_p
2	2	0.63

Table 2: Controller gain of symmetric teleoperation

b	K_v	\hat{D}_m	\hat{D}_s	K_p
2	2	2	2	3.99

レープロボットのパラメータは以下ようになる．

$$M_m = M_s = 0.45 \text{ [kgm}^2\text{]}, B_m = B_s = 0.317 \text{ [Nms]}$$

全ての実験は $T = 0.5$ [s] の通信遅延が発生した状態で行う．従来法のテレオペレーションと提案する対称型テレオペレーションのコントローラのパラメータ値を Table 1, Table 2 のように設定する．

従来法では B_m, B_s により位置ゲイン K_p は小さな値となる．しかし，提案法では位置ゲイン K_p を適切な値に設定することができる．制御実験は，自由空間での応答と硬い環境との接触応答の2種類を行った．実験結果の比較を容易にするために，通信遅延時間だけスレーブの信号を左にシフトさせた図を示す．

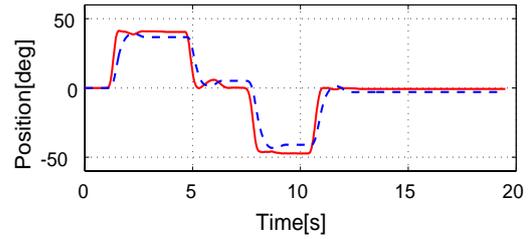
Fig. 4 は，自由空間での従来法と提案法の実験結果である．従来法のスレーブの応答にはオーバーシュートが見られる．一方，提案法ではそれが見られず良好な応答である．Fig. 5 は，環境と接触させた実験結果である．従来法では位置誤差に対する発生力が (28) 式により拘束され非常に小さいため，環境の情報を正確に知ることが困難である．また，位置誤差の収束も非常に遅いことが確認できる．一方，提案法では発生力が十分な大きさであるため環境の情報を正確に知ることが可能である．また，位置誤差の収束も良好である．

6 おわりに

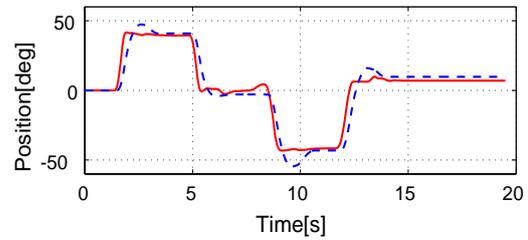
本研究では，仮想的な粘性摩擦を持つ対称型テレオペレーションを提案した．提案する対称型テレオペレーションに対して，リアプノフの方法に基づく設計法を用いることで，システムが安定となる位置制御ゲインの条件を導いた．結果として，提案するテレオペレーションは「操作性」と「位置追従性」のトレードオフを考慮して設計しなければならない．制御実験により提案する対称型テレオペレーションの有効性を示した．

参考文献

- 1) R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.34, No.5, pp.494-501, May 1989.
- 2) R. Lin and T. Namerikawa, "Robust Control of M, "Robust Control of Master-Slave Robot System Considering Environmental Uncertainties," Proc. IEEE/ASME, July 2005.
- 3) N. Chopra, M. W. Spong, R. Ortega and N. E. Barabanov, "On position Tracking in Bilateral Teleoperation," Proc. ACC, Boston, June 2004.
- 4) G. Nimeyer and J. J. E. Slotine, "Telemanipulation with Time Delays," The Int. J. of Robotics Research, Vol 23, No. 9, pp.873-890, Sep. 2004.
- 5) H. K. Khalil, "Nonlinear Systems second edition," Prentice-Hall, 1996.

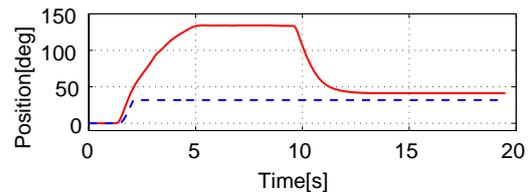


(a) Symmetric teleoperation

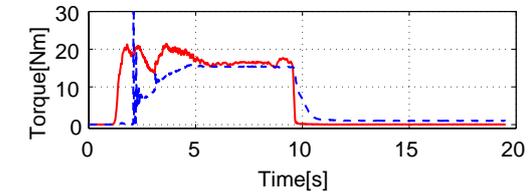


(b) Conventional teleoperation

Fig. 4: Experiment 1: Free Space (Solid line: Master, Dashed line: Slave)



(a) Symmetric teleoperation



(b) Conventional teleoperation

Fig. 5: Experiment 2: Contact with environment (Solid line: Master, Dashed line: Slave)