

複数の協調ロボットを用いたテレオペレーションによる物体把持

Grasping Object by Teleoperation with Multiple Cooperative Robots

山科 勇輔 (金沢大学), 正 滑川 徹 (慶応義塾大学)

Yusuke YAMASHINA, Kanazawa University, Kakumamachi, kanazawa, Ishikawa, 920-1192

Toru NAMERIKAWA, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223-8521

Abstract: This paper deals with a passive-decomposition based control a bilateral teleoperation between a single master robot and multiple cooperative slave robots with time varying delay. At first, we decompose the dynamics of multiple slave robots into two decoupled dynamics by using passive-decomposition: the Shape-system describing dynamics of the cooperative works, and the Locked-system representing overall behavior of the multiple slave robots. Second, we propose the PD control method for bilateral teleoperation to guarantee the asymptotical stability of the system for time varying delay. Finally experimental results show the effectiveness of the proposed teleoperation.

Key Words: Single Master Multi Slave System, Passive-Decomposition, Object Grasping, Time varying Delay

1. はじめに

テレオペレーションシステムとは、遠隔地等に対して人間の操作能力や感覚を拡張するロボットシステムである。一般に、テレオペレーションシステムは「操縦者」と操縦者が直接操作する「マスタロボット」、マスタロボットから送られてくる信号をもとに遠隔地等で実際に作業を行う「スレーブロボット」、「遠隔環境」とロボット間の「通信路」で構成される。スレーブロボットが遠隔環境と接触した際に接触した情報を操縦者にフィードバックするバイラテラル制御を行うことで、操縦者が直接環境と接しているような感覚で操作を行うことができ、作業能力を向上させることができる⁽¹⁾。テレオペレーションの制御における重要な問題は、ロボット間の通信路に通信遅延が存在する場合、遅延によりシステム全体が不安定化してしまうことである。さらに、インターネットなどの安価な通信路を用いた場合には、通信遅延が時間によって変化する。したがって、定数の遅延だけでなく時変の通信遅延に対しても安定性を保証しつつ制御目的を達成する必要がある。また、通常、テレオペレーションシステムは1台のマスタロボットと1台のスレーブロボットとで構成されるが、1台のスレーブロボットで行える作業は限られており、重量物のハンドリングや、システムの剛性を上げて作業を行う必要がある場合、複数台のスレーブロボットを協調させて行う組み付け作業など、作業によっては複数台のスレーブロボットが必要となってくる。しかし、操縦者が作業に必要なスレーブロボットと同じ数のマスタロボットを操作することは、それぞれのスレーブの動きを制御するばかりでなく、作業に必要な力など、さまざまな状態を同時に制御しなければならず容易なことではない。このような問題を解決するために1台のマスタロボットで複数台のスレーブロボットを操作する Single Master Multi Slave (SMMS) システムが提案されている^(2,3)。

SMMS システムによって、複数台のスレーブロボットを協調させる手法としては Passive-Decomposition を用いた手法が提案されている⁽⁴⁾。Passive-Decomposition によって、複数台のスレーブロボットのダイナミクスを作業を行うダイナミクス (Shape-System) と操縦者からの指令値に従うダイナミクス (Locked-System) とに分解することで1台のマスタロボットで複数台のスレーブロボットを操作している。しかし、文献⁽⁴⁾では、通信遅延に対して安定化させるためスキャタリング変換を用いた手法が用いられており、位置誤差の収束と力の伝達が保証されていない。一方で、文献^(5,6)では、スキャタリング変換を用いずに PD 型制御則を用い、最大往復遅延に依存した制御ゲインを設計することで、通信遅延に対して安定となることを示している。

本稿では、文献^(4,5)の手法を基にして時変の通信遅延を有する SMMS システムに対して、漸近安定性を保証した制御則を提案する。その際、スキャタリング変換は用いずに時変の通信遅延に対して安定となる PD 型制御則を用いる。提案制御則の個々のゲインはマスタとスレーブで異構造を想定し、独立に設計することで、力のスケールリングを任意の大きさに設定することができる。さらにテレオペレーションが通信遅延とは独立に漸近安定となり、マスタとスレーブの位置誤差が零になること、遠隔環境と接触した時の静的な反力が操縦者に伝達されることを示す。最後に制御実験により「複数台のスレーブロボットが自律的に対象物の把持を行い、操縦者の指定する位置に運ぶ」という作業を行い提案制御手法の有効性を確認する。

2. 問題設定

2-1. テレオペレーションのダイナミクス 本節では、1台のマスタと N 台のスレーブで構成される SMMS システムを取り扱う。マスタ、スレーブロボットのダイナミクスは一般的なロボットアームの運動方程式で表すことができ、 m 自由度のマスタのダイナミクスと i 番目の n_i 自由度のスレーブのダイナミクスは次式のように表される⁽¹³⁾。

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m = \tau_m + J_m^T(q_m)F_{op} \quad (1)$$

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i = \tau_i + J_i^T(q_i)F_i \quad (2)$$

ここで、添え字 m はマスタを表しており、 $i = 1 \sim N$ である。 $q_m \in \mathcal{R}^{m \times 1}$ 、 $q_i \in \mathcal{R}^{n_i \times 1}$ は関節角度、 $\tau_m \in \mathcal{R}^{m \times 1}$ 、 $\tau_i \in \mathcal{R}^{n_i \times 1}$ は入力トルク、 $F_{op} \in \mathcal{R}^{m \times 1}$ 、 $F_i \in \mathcal{R}^{n_i \times 1}$ は操縦者からの力と i 番目のスレーブに加わる対象物からの力である。 $M_m(q_m) \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 、 $M_i(q_i) \in \mathcal{R}^{n_i \times n_i}$ は慣性行列、 $C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m \in \mathcal{R}^m$ 、 $C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i \in \mathcal{R}^{n_i}$ はコリオリ力及び遠心力、 $J_m(q_m) \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 、 $J_i(q_i) \in \mathcal{R}^{n_i \times n_i}$ はヤコビアンである。ただし、スレーブの自由度はマスタの自由度より大きい ($n_i \geq m$) とし、ヤコビアンに関しては次の仮定を置く。

仮定 1. ヤコビアン J_m, J_i は正則である範囲で操作を行う。

本稿では、マスタとスレーブで構造が異なる異構造テレオペレーションの制御を想定しており、異構造テレオペレーションでは構造の違いにより、関節角を変位とする関節空間による制御が行えない。そのため、関節角度を追従させるのではなく、作業を行う手先効果器の位置を追従させるようにマスタ、スレーブのダイナミクスを直交座標系における手先位置を変位とす

る作業空間における表現への変換を行う。ロボットアームの関節角度 q_m, q_i と手先位置姿勢 x_m, x_i はヤコビアンにより, $\dot{x}_k = J_k \dot{q}_k, \ddot{x}_k = J_k \ddot{q}_k + \dot{J}_k \dot{q}_k$ ($k = m, i$) のように関係づけることができ、マスタ、スレーブのダイナミクスは次式のように書きなおすことができる。

$$\begin{aligned} \widetilde{M}_m(q_m) \ddot{x}_m + \widetilde{C}_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{x}_m &= J_m^{-T}(q_m) \tau_m + F_{op} \quad (3) \\ \widetilde{M}_i(q_i) \ddot{x}_i + \widetilde{C}_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{x}_i &= J_i^{-T}(q_i) \tau_i + F_i \quad (4) \end{aligned}$$

ただし, $\widetilde{M}_k = J_k^{-T} M_k J_k^{-1}, \widetilde{C}_k = J_k^{-T} \{C_k - M_k J_k^{-1} \dot{J}_k\} J_k^{-1}$ ($k = m, i$) であり, x_i は複数のスレーブで共通した座標系での各スレーブの手先位置である。 N 台のスレーブの総自由度を, $n := \sum_{i=1}^N n_i$ とし N 台のスレーブのダイナミクスをまとめて以下のように書き換える。

$$\widetilde{M}(q) \ddot{x} + \widetilde{C}(q, \dot{q}) \dot{x} = \tau + F \quad (5)$$

ここで, $x := [x_1^T, \dots, x_N^T]^T \in \mathcal{R}^n, \tau := [\tau_1^T J_1^{-T}, \dots, \tau_N^T J_N^{-T}]^T \in \mathcal{R}^n, F := [F_1^T, \dots, F_N^T]^T \in \mathcal{R}^n$ であり, 慣性行列とコリオリ力及び遠心力は $\widetilde{M}(q) := \text{diag}[\widetilde{M}_1(q_1), \dots, \widetilde{M}_N(q_N)] \in \mathcal{R}^{n \times n}, \widetilde{C}(q, \dot{q}) := \text{diag}[\widetilde{C}_1(q_1, \dot{q}_1), \dots, \widetilde{C}_N(q_N, \dot{q}_N)] \in \mathcal{R}^{n \times n}$ で与えられる。作業空間でのダイナミクス (3), (5) 式は仮定 1 の下で次の特性を有する。

特性 1. $\widetilde{M}_k(q_i)$ ($k = m, i$) は正定対称行列となり, 適当な定数 m_{k1}, m_{k2}, c_k が存在して, 次の関係が成り立つ⁽⁷⁾。

$$\begin{aligned} 0 < m_{k1} \leq \|\widetilde{M}_k\| \leq m_{k2} \\ \|\widetilde{C}_k\| \leq c_k \|\dot{x}_k\| \end{aligned} \quad (6)$$

特性 2. $\widetilde{N}_k = \dot{\widetilde{M}}_k(q_k) - 2\widetilde{C}_k(q_k, \dot{q}_k)$ ($k = m, i$) は次式のような歪対称行列となる⁽⁷⁾。

$$z^T \widetilde{N}_k z = 0 \quad (7)$$

特性 3. \dot{x}_k, \ddot{x}_k ($k = m, i$) が有界であるならば, $\dot{\widetilde{M}}_k, \dot{\widetilde{C}}_k$ は有界となる⁽⁸⁾。

通信路と操縦者, 遠隔環境に対して, 次の仮定を置く。

仮定 2. マスタとスレーブ間の通信遅延 $T_m(t), T_s(t)$ は時間に関して微分可能な連続関数であり, 次式を満たす。

$$0 \leq T_h(t) \leq T_h^+ < \infty, \quad |\dot{T}_h(t)| < 1 \quad h = m, s \quad (8)$$

ここで, $T_h^+ \in \mathcal{R}$ は遅延の最大値を表す。また, 通信路の最大往復遅延時間 $T_{ms}^+ = T_m^+ + T_s^+$ は既知であるとする。

仮定 3. 全てのスレーブ間での遅延は十分小さく無視出来る。

2-2. 制御目的 本稿では, Fig. 1 に示すような SMMS システムによって行う作業として「複数台のスレーブが自律的に対象物の把持を行い, 操縦者の指令値に従い, 指定する場所へ搬送する」ことを考える。よって制御目的を以下のように設定する。

制御目的 1. (マルチスレーブによる自律的な把持) 本稿では, 把持の達成を「各スレーブのエンドエフェクタの相対位置関係が, ある指定した形になること」と定義し, 次式が成り立つとき把持が達成されるとする。

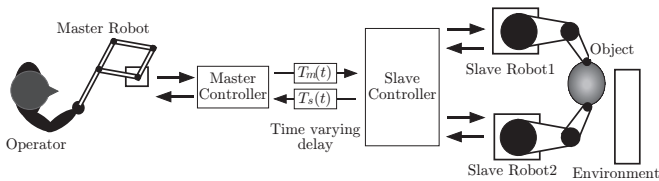


Fig. 1 SMMS Teleoperation System

$$x_S = x_S^d \quad (9)$$

ここで, $x_S \in \mathcal{R}^{n-m}$ は, エンドエフェクタの相対位置関係であり, $x_S^d \in \mathcal{R}^{n-m}$ は x_S の目標値であり, 所望の距離を表す。

制御目的 2. (把持した対象物の移動) 把持が達成されているとき, スレーブ間の中心位置は対象物の中心位置と等しいとし, 次式が成り立つとき, 対象物の移動が達成される。

$$x_L = x_m \quad (10)$$

ここで, $x_L = \alpha x_{L0} - C$ であり, $x_{L0} \in \mathcal{R}^m$ はエンドエフェクタの中心位置, $\alpha \in \mathcal{R}$ は位置のスケーリング要素, $C \in \mathcal{R}^m$ は平行移動を表す。つまり x_L はスレーブ間の中心位置をマスタの手先位置にスケーリング, シフトした値となっている。

制御目的 3. (スケーリングされた静的な力の伝達) テレオペレーションが静止している状態 $\dot{x}_j = \ddot{x}_j = 0, (j = m, L)$ を仮定する。次式が成り立つときスケーリングされた静的な力の伝達が達成されるとする。

$$F_{op} = \beta F_L \quad (11)$$

ここで, F_L はスレーブが遠隔環境などの外部から受ける力であり, $\beta > 0 \in \mathcal{R}$ は力のスケーリング要素である。

3. 制御系設計

本節では, 上述の制御目的を達成するための制御則を提案する。

3-1. Passive-Decomposition

まず, Passive-Decomposition により, 複数台のスレーブのダイナミクスを「把持するための運動」を表す Shape-System と「マスタからの指令値に従った運動」を表す Locked-System とに分ける。まず, Passive-Decomposition を行うために複数台のスレーブの手先速度を次式のようにそれぞれのシステムでの手先速度に分解する。

$$\dot{x} = S^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_S \\ \dot{x}_L \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで, $x_S \in \mathcal{R}^{n-m}$ と $x_L \in \mathcal{R}^m$ はそれぞれ Shape-System, Locked-System での速度, S は分解行列である。分解行列 S は Shape-System と Locked-System の非干渉化のために, 正則であり, 次式のように $S^{-T} \widetilde{M} S^{-1}$ の非対角項が 0 となる必要がある。

$$S^{-T} \widetilde{M} S^{-1} =: \begin{bmatrix} M_S & 0 \\ 0 & M_L \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで, $M_S \in \mathcal{R}^{(n-m) \times (n-m)}, M_L \in \mathcal{R}^{m \times m}$ はそれぞれ Shape-System, Locked-System の慣性行列である。つまり, (13) 式を満たすように x_S, x_L を定義, またはインピーダンス整形などのローカルな補償をする必要がある。また, Shape-System, Locked-System に対する制御入力, 環境からの反力は, もとのスレーブのダイナミクスへの制御入力, 環境からの反力に対して以下のように関係づけることできる。

$$\begin{bmatrix} F_S \\ F_L \end{bmatrix} = S^{-T} F, \quad \begin{bmatrix} \tau_S \\ \tau_L \end{bmatrix} = S^{-T} \tau \quad (14)$$

上式と次の定義,

$$\begin{bmatrix} C_S & C_{SL} \\ C_{LS} & C_L \end{bmatrix} := S^{-T} \widetilde{M} \frac{d}{dt} (S^{-1}) + S^{-T} \widetilde{C} S^{-1} \quad (15)$$

により (5) 式は, 以下のように Passive-Decomposition を行うことができる。

$$M_S(q) \ddot{x}_S + C_S(q, \dot{q}) \dot{x}_S + C_{SL}(q, \dot{q}) \dot{x}_L = \tau_S + F_S \quad (16)$$

$$M_L(q) \ddot{x}_L + C_L(q, \dot{q}) \dot{x}_L + C_{LS}(q, \dot{q}) \dot{x}_S = \tau_L + F_L \quad (17)$$

ここで、添え字の S は Shape-System を表し、 L は Locked-System を表す。上式のダイナミクスには、干渉項 $C_{SL}(q, \dot{q})\dot{x}_L$, $C_{LS}(q, \dot{q})\dot{x}_S$ が含まれていることがわかる。しかし、人間による遠隔操作にかかわらず、スレーブが自律的な把持を行うためには、Shape-System と Locked-System は非干渉化されていることが望ましい。そこで、以下のように干渉項を補償する制御入力を与える。

$$\tau_S = C_{SL}(q, \dot{q})\dot{x}_L + \tau'_S \quad (18)$$

$$\tau_L = C_{LS}(q, \dot{q})\dot{x}_S + \tau'_L \quad (19)$$

ここで τ'_L, τ'_S は新しい制御入力である。(18), (19) 式を (16), (17) 式に代入すると以下が得られる。

$$M_S(q)\ddot{x}_S + C_S(q, \dot{q})\dot{x}_S = \tau'_S + F_S \quad (20)$$

$$M_L(q)\ddot{x}_L + C_L(q, \dot{q})\dot{x}_L = \tau'_L + F_L \quad (21)$$

このように、二つのダイナミクスは非干渉化される。

これらのダイナミクスは通常のリボットのダイナミクスと同様の形式であり、以下の特性を有している。

特性 4. $M_p(q)$ ($p = S, L$) は正定対称行列となり、適当な定数 m_{p1}, m_{p2}, c_p が存在して次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} 0 < m_{p1} \leq \|M_p\| \leq m_{p2} \\ \|C_p\| \leq c_p \|\dot{x}_p\| \end{aligned} \quad (22)$$

特性 5. $\dot{M}_p(q) - 2C_p(q, \dot{q})$ ($p = S, L$) は歪対称行列。

特性 6. \dot{x}_p, \ddot{x}_p ($p = S, L$) が有界であるならば \dot{M}_p, \dot{C}_p は有界となる。

Proof. 特性 4, 6 については、 M_p, C_p ($p = S, L$) はそれぞれ、(13), (15) 式により定義されるため、 S の正則性と特性 1, 3 よりわかる。

特性 5 については、まず次式を考える。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{M}_S - 2C_S & -2C_{SL} \\ -2C_{LS} & \dot{M}_L - 2C_L \end{bmatrix} \\ = \frac{d}{dt}(S^{-T}\tilde{M}S^{-1}) - 2S^{-T}\tilde{M}\frac{d}{dt}(S^{-1}) - 2S^{-T}\tilde{C}S^{-1} \end{aligned} \quad (23)$$

上式に $\tilde{M} - 2\tilde{C}$ の歪対称性、 \tilde{M} の対称性を用いることで

$$\begin{bmatrix} \dot{M}_S - 2C_S & -2C_{SL} \\ -2C_{LS} & \dot{M}_L - 2C_L \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{M}_S - 2C_S & -2C_{SL} \\ -2C_{LS} & \dot{M}_L - 2C_L \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

を示すことができる。上式が歪対称行列であることは $\dot{M}_S - 2C_S, \dot{M}_L - 2C_L$ が歪対称であることと等価である。

□

この特性 4 ~ 6 は典型的なロボットの運動方程式と同様の特性であり、過去の豊富なロボットの制御則を適用することができる。

ここで、後述の安定解析のために、(1), (20), (21) 式のダイナミクスに対して以下の仮定を置く。

仮定 4. すべての信号は拡張 \mathcal{L}_2 空間に属している。

仮定 5. 操縦者と Locked-System に対する環境、対象物からの力は速度 \dot{x}_m, \dot{x}_L を入力、出力を F_{op}, F_L とした受動的なシステムとしてモデル化できる。また、それらの力はマスタおよび Locked-System の速度の関数によって制限されている。

仮定 6. $t < 0$ において $\dot{x}_m = \dot{x}_L = 0$ である。

3-2. 提案制御則 まず、Shape-System ((20) 式) の制御を考える。このシステムに対する制御目的は $x_S = x_S^d$ であるので、目標軌道に追従させる次式のような制御則を与える。

$$\begin{aligned} \tau'_S = M_S\{\ddot{x}_S^d(t) - K_d^S(\dot{x}_S - \dot{x}_S^d(t)) - K_P^S(x_S - x_S^d(t))\} \\ + C_S\dot{x}_S - F_S \end{aligned} \quad (25)$$

この制御則を (20) 式に適用すると以下の閉ループ系が得られる。

$$\begin{aligned} \ddot{e} + K_d^S\dot{e} + K_P^Se = 0 \\ e = x_S - x_S^d \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、 K_P^S, K_d^S は正定対角な制御ゲインである。

注意 1. 本稿の制御側では、位置を制御することで把持を行うので対象物の情報が必要となる。また、扱う対象物としては、(9) 式を満たすような硬すぎない物であり、力の伝達を行うために、柔らかすぎない物を想定している。

次に、Locked-System とマスタの結合制御則について考える。このシステムでの制御目的は、 $x_L = x_m$ であるので次式の制御則を与える。

$$\tau'_L = -K_d^L\dot{x}_L - K_P^L(x_L - x_m(t - T_m(t))) \quad (27)$$

$$\tau_m = J_m^T\{-K_d^m\dot{x}_m - K_P^m(x_m - x_L(t - T_s(t)))\} \quad (28)$$

この制御則を Locked-System(21) とマスタのダイナミクス (3) に代入すると以下の閉ループ系が得られる。

$$\begin{aligned} \tilde{M}_m(q_m)\ddot{x}_m + \tilde{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{x}_m \\ = -K_d^m\dot{x}_m - K_P^m(x_m - x_L(t - T_s(t))) + F_{op} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} M_L(q)\ddot{x}_L + C_L(q, \dot{q})\dot{x}_L \\ = -K_d^L\dot{x}_L - K_P^L(x_L - x_m(t - T_m(t))) + F_L \end{aligned} \quad (30)$$

ただし、 K_P^j, K_d^j ($j = m, L$) は次式が成立するように設定する。

$$\begin{cases} K_P^m = k_m K_P \\ K_P^L = k_L K_P \end{cases} \begin{cases} K_d^m = k_m K_d \\ K_d^L = k_L K_d \end{cases} \quad (31)$$

ここで、 $K_P \in \mathcal{R}^{n \times n}, K_d \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定対角な制御ゲインであり、 $k_m > 0, k_L > 0$ はマスタとスレーブ側でゲインを別々に設計するためのスカラーの定数ゲインである。

4. 安定性解析

4-1. Shape-System の安定性 Shape-System に関して次の定理が成り立つ。

定理 1. Shape-System の閉ループ系 (26) と仮定 5 を考える。このとき、次式が成立し、スレーブ間距離の相対位置関係は目標値に収束する。

$$e = x_S - x_S^d \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (32)$$

Proof. (26) 式は次式のように書きなおすことができる。

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix} = \phi \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad \phi = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_P^S & -K_d^S \end{bmatrix} \quad (33)$$

上式において、 K_P^S, K_d^S は正定対角行列であるので ϕ の固有値がすべて負となる。よって次式が成り立つ。

$$e = x_S - x_S^d \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (34)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_S - \dot{x}_S^d \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (35)$$

つまり、制御目的 1 が達成され、マルチスレーブによる自律的な把持が達成される。 □

4-2. Locked-System の安定性 ここで, (29), (30) 式のダイナミクスに対して次の定理が成り立つ.

定理 2. (29), (30) 式に示されたテレオペレーションシステムを考える. 仮定 1~7 が成立し, 制御ゲイン K_p, K_d が次式を満たすとする.

$$K_p < \frac{2}{T_{ms}^+} K_d \quad (36)$$

このとき, マスタとスレーブの速度は原点に漸近収束し, 位置誤差は有界となり, システムは漸近安定となる.

Proof. 状態ベクトル $x(t) = [\dot{x}_m^T \dot{x}_L^T x_e^T]^T$ を用いて, システムのリアプノフ関数を次式のように定義する.

$$\begin{aligned} V(x(t)) &= k_m^{-1} \dot{x}_m^T(t) M_m \dot{x}_m(t) + k_L^{-1} \dot{x}_L^T(t) M_L \dot{x}_L(t) \\ &\quad + \dot{x}_e^T(t) K_P \dot{x}_e(t) - 2k_m^{-1} \int_0^t F_L^T(\xi) \dot{x}_L(\xi) d\xi \\ &\quad - 2k_L^{-1} \int_0^t F_{op}^T(\xi) \dot{x}_m(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (37)$$

ここで, M_m, M_L, K_P は正定行列であり, $k_m, k_L > 0$ である, また, 仮定 5 より, 環境と操縦者は受動的であるので, $V(x(t))$ は正定関数となる. 次に, (29), (30) 式の解軌道に沿って V を時間微分し, 特性 2, 5 を用いて整理すると次式となる.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -2\dot{x}_m^T K_d \dot{x}_m + 2\dot{x}_m^T K_P (x_L(t - T_s(T)) - x_L) \\ &\quad - 2\dot{x}_L^T K_d \dot{x}_L + 2\dot{x}_L^T K_P (x_m(t - T_m(T)) - x_m) \end{aligned} \quad (38)$$

ここで, 次の Leibniz-Newton の公式

$$x_i(t - T_h(t)) - x_i = - \int_0^{T_h(t)} \dot{x}_h(t - \xi) d\xi, \quad (h = m, s) \quad (39)$$

を (38) 式に代入し次式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -2\dot{x}_m^T K_d \dot{x}_m - 2\dot{x}_m^T K_P \int_0^{T_s(t)} \dot{x}_L(t - \xi) d\xi \\ &\quad - 2\dot{x}_L^T K_d \dot{x}_L - 2\dot{x}_L^T K_P \int_0^{T_m(t)} \dot{x}_m(t - \xi) d\xi \end{aligned} \quad (40)$$

(40) 式の右辺 2 項目に注目すると次式のように変形できる.

$$-2\dot{x}_m^T K_P \int_0^{T_s(t)} \dot{x}_L(t - \xi) d\xi = - \sum_{j=1}^n K_{Pj} 2\dot{x}_{mj} \int_0^{T_s(t)} \dot{x}_{Lj}(t - \xi) d\xi \quad (41)$$

ここで, $\dot{x}_{mj}, \dot{x}_{Lj}, K_{Pj}$ はマスタおよびスレーブの j 番目の軸の速度と対応する位置制御ゲインである. (41) 式にヤングの不等式, シュワルツの不等式を用い, $T_s(t) \leq T_s^+$ を代入することで次の不等式を得る.

$$\begin{aligned} -2\dot{x}_{mj} \int_0^{T_s(t)} \dot{x}_{Lj}(t - \xi) d\xi &\leq T_s^+ \dot{x}_{mj}^2 + \frac{1}{T_s^+} \left\{ T_s \int_0^{T_s(t)} \dot{x}_{Lj}^2(t - \xi) d\xi \right\} \\ &\leq T_s^+ \dot{x}_{mj}^2 + \int_0^{T_s^+} \dot{x}_{Lj}^2(t - \xi) d\xi \end{aligned} \quad (42)$$

よって (41) 式は次式となる.

$$\begin{aligned} -2\dot{x}_m^T K_P \int_0^{T_s(t)} \dot{x}_L(t - \xi) d\xi \\ \leq \sum_{j=1}^n K_{Pj} \left\{ T_s^+ \dot{x}_{mj}^2 + \int_0^{T_s^+} \dot{x}_{Lj}^2(t - \xi) d\xi \right\} \\ = T_s^+ \dot{x}_m^T K_P \dot{x}_m + \int_0^{T_s^+} \dot{x}_L^T(t - \xi) K_P \dot{x}_L(t - \xi) d\xi \end{aligned} \quad (43)$$

同様に (40) 式の右辺 4 項目も書き換え, (40) 式は次式となる.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -2\dot{x}_m^T K_d \dot{x}_m - 2\dot{x}_L^T K_d \dot{x}_L \\ &\quad + T_s^+ \dot{x}_m^T K_P \dot{x}_m + \int_0^{T_s^+} \dot{x}_L^T(t - \xi) K_P \dot{x}_L(t - \xi) d\xi \\ &\quad + T_m^+ \dot{x}_L^T K_P \dot{x}_L + \int_0^{T_m^+} \dot{x}_m^T(t - \xi) K_P \dot{x}_m(t - \xi) d\xi \end{aligned} \quad (44)$$

ここで, 上式の両辺を $[0, t]$ で積分する.

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{V} d\tau &\leq -2 \int_0^t \dot{x}_m^T K_d \dot{x}_m d\tau - 2 \int_0^t \dot{x}_L^T K_d \dot{x}_L d\tau \\ &\quad + \int_0^t T_s^+ \dot{x}_m^T K_P \dot{x}_m d\tau + \int_0^t T_m^+ \dot{x}_L^T K_P \dot{x}_L d\tau \\ &\quad + \int_0^t \int_0^{T_s^+} \dot{x}_L^T(\tau - \xi) K_P \dot{x}_L(\tau - \xi) d\xi d\tau \\ &\quad + \int_0^t \int_0^{T_m^+} \dot{x}_m^T(\tau - \xi) K_P \dot{x}_m(\tau - \xi) d\xi d\tau \end{aligned} \quad (45)$$

ここで, 右辺 4 項目と 6 項目について簡単な計算により次のように変形することができる.

$$\begin{aligned} \int_0^t \int_0^{T_s^+} \dot{x}_L^T(\tau - \xi) K_P \dot{x}_L(\tau - \xi) d\xi d\tau \\ \leq T_s^+ \int_0^t \dot{x}_L^T(\tau) K_P \dot{x}_L(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \int_0^t \int_0^{T_m^+} \dot{x}_m^T(\tau - \xi) K_P \dot{x}_m(\tau - \xi) d\xi d\tau \\ \leq T_m^+ \int_0^t \dot{x}_m^T(\tau) K_P \dot{x}_m(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (47)$$

よって, (46), (47) 式より (45) 式は次式となる.

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{V} d\tau &\leq - \int_0^t \dot{x}_L^T \{ 2K_d - T_{ms}^+ K_P \} \dot{x}_L d\tau \\ &\quad - \int_0^t \dot{x}_m^T \{ 2K_d - T_{ms}^+ K_P \} \dot{x}_m d\tau \end{aligned} \quad (48)$$

よって, (36) 式を満たすように K_P, K_d を選択することで, (48) 式は準負定となる. 以上より, $\dot{x}_m, \dot{x}_L \in \mathcal{L}_2$ となる. また, 閉ループ系のダイナミクスは (29), (30) 式に対して, 特性 1, 4 及び仮定 5 を用いることで, $\ddot{x}_m, \ddot{x}_L \in \mathcal{L}_\infty$ を得ることができる. 従って文献⁽¹¹⁾の補題を用いることで, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_L = 0$ となる. さらに, 特性 3, 6 を用いることで, $\ddot{x}_m, \ddot{x}_L \in \mathcal{L}_\infty$ となることを示すことができる. 従って, Barbalat の補題⁽¹²⁾より, \ddot{x}_m, \ddot{x}_L は一様連続であることが分かる. また, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_L = 0$ であるので, やはり, Barbalat の補題⁽¹²⁾より, $\lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}_L = 0$ となりシステムは漸近安定となる. \square

さらに, 上述の定理より次の 2 つの系を導くことができる.

系 1. 定理 1 を満足するようなテレオペレーションシステム (3), (21) を考える. このとき $F_L = 0$ ならば, 次式が成り立ちマスタとスレーブの位置誤差は零に収束する.

$$x_e = x_m - x_L \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (49)$$

Proof. $F_L = 0$ のとき, (30) 式より,

$$K_P(x_L - x_m(t - T_m(t))) = 0 \quad (50)$$

となり, Leibniz-Newton の公式を用いると次式を得る.

$$K_P \left\{ x_e - \int_{t-T_m}^t \dot{x}_m dt \right\} = 0 \quad (51)$$

ここで, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_m = 0$ であり, K_P は正定対称行列であることから,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_e = 0 \quad (52)$$

となり, マスタとスレーブの位置誤差は零となり, 制御目的 2 が達成される. \square

系 2. 定理 1 を満足するようなテレオペレーションシステム (3), (21) を考える. このとき次式が成り立ちスレーブが遠隔環境から受ける反力がスケーリングされ操縦者に伝わる.

$$F_{op} = -\beta F_L \quad (\text{ただし, } \beta = \frac{k_m}{k_L}) \quad (53)$$

Proof. 定理 1 より, $\lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{x}_L = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_L = 0$ となることから (29), (30) 式より次式を得る.

$$\begin{cases} F_{op} = K_P^m(x_m - x_L) = k_m K_P(x_m - x_L) \\ F_L = K_P^L(x_L - x_m) = -k_L K_P(x_m - x_L) \end{cases} \quad (54)$$

この 2 式より以下が得られる.

$$F_{op} = -\beta F_L \quad (\text{ただし, } \beta = \frac{k_m}{k_L}) \quad (55)$$

従って, スカラの設計パラメータ k_m, k_L によってパワースケーリングされ, 静的な反力伝達が達成される. つまり制御目的 3 が達成される. \square

5. 制御実験による検証

5-1. インピーダンス整形 本稿では 2 台の 2 自由度直列リンク型アームをスレーブロボットとして用い, SMMS システムを構成した. ので, x_S, x_S^d, x_L を以下のように定義した.

$$x_S := x_1 - x_2 = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$x_S^d := \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$x_L := \alpha \frac{x_1 + x_2 - C}{2} = \frac{\alpha}{2} \begin{bmatrix} x_1 + x_2 - c \\ y_1 + y_2 \end{bmatrix} \quad (58)$$

ここで, $C = [c \ 0]^T$ であり, (56), (58) 式より

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_S \\ \dot{x}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 - \dot{x}_2 \\ \frac{\alpha}{2}(\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -I \\ \frac{\alpha}{2}I & \frac{\alpha}{2}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (59)$$

となるので, 分解行列 S は次式となる.

$$S = \begin{bmatrix} I & -I \\ \frac{\alpha}{2}I & \frac{\alpha}{2}I \end{bmatrix} \quad (60)$$

しかし, この分解行列 S では, (13) 式が満たされずに非対角項が残ってしまう. そこで, 次式のようにインピーダンス整形によるスレーブの線形化を行う.

$$\tau_i = J_i^T \{ M_i H_0^{-1}(\tau_i' + F_i) + F_i + C_i \dot{x}_i \} \quad (i = 1, 2) \quad (61)$$

ここで, T_i' は新しい制御入力, H_0 は望みの慣性行列である. (13) 式を満たすためには, 簡単な計算により, スレーブ 1 と 2 で同じ慣性行列でなければならないことがわかる. よって,

$M_1 = M_2 = H$ として, (61) 式をスレーブのダイナミクス (5) 式に代入すると以下が得られる.

$$\begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1' \\ \tau_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (62)$$

このとき (13) 式より,

$$\begin{aligned} S^{-T} M S^{-1} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}I & -\frac{1}{2}I \\ \frac{1}{\alpha}I & \frac{1}{\alpha}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}I & -\frac{1}{\alpha}I \\ \frac{1}{2}I & -\frac{1}{\alpha}I \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}H & 0 \\ 0 & \frac{2}{\alpha^2}H \end{bmatrix} \\ &:= \begin{bmatrix} M_S & 0 \\ 0 & M_L \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (63)$$

となり, (13) 式が満たされるので, Shape-System と Locked-System の非干渉化が可能となることがわかる.

(62) 式に Passive-Decomposition を行うと次式となる.

$$\begin{bmatrix} M_S & 0 \\ 0 & M_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_S \\ \ddot{x}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_S' \\ \tau_L' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_S \\ F_L \end{bmatrix} \quad (64)$$

したがって, 上記の x_S, x_L の定義の下では, インピーダンス整形を行うだけで Shape-System と Locked-System とが非干渉化される.

5-2. 制御実験による検証 本節では, 制御実験により提案手法の有効性を検証する. 実験では, Fig. 2 に示すように 2 自由度平行リンク型アームをマスタとして, 2 自由度直列リンク型アーム 2 台をスレーブロボットとして, SMMS システムを構成した. 把持対象物として, Fig. 3 に示すような筒状の把持対象物を用いた. 操縦者が加える力 F_{op} , 遠隔環境に加える力 F_L は力覚センサを用いて直接計測した. ロボットの制御則は, dSPACE 社の DS1104 制御ボードに実装した. サンプルングタイムを 1[ms] とし, 通信遅延は次式のように時変の遅延を制御ボード内で意図的に発生させた.

$$\begin{cases} T_m(t) = 0.1 \sin t + 0.14 \\ T_s(t) = 0.05 \sin t + 0.1 \end{cases} \quad (65)$$

上式より最大往復遅延は 0.39[s] となる. コントローラのゲインは (36) 式を満足するように $K_P = \text{diag}(30, 35)$, $K_d = \text{diag}(6, 7)$, $k_m = 1$, $k_L = 10$, $K_P^S = \text{diag}(400, 400)$, $K_d^S = \text{diag}(50, 50)$ と設定した. 実験状況として次を考えた.

Case1: 把持対象物が遠隔環境と接触しない遠隔操作

Case2: 把持対象物が遠隔環境と接触する遠隔操作

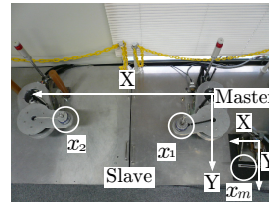


Fig. 2 Experimental Setup

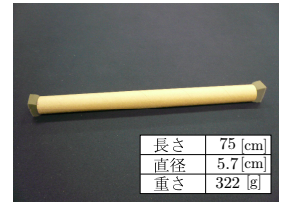


Fig. 3 Grasping Object

なお, 本実験でのシステム構成では, マスタ側とスレーブ側で完全な時刻同期が困難であるため, 位置に関するデータについては, スレーブ側で, 受信したマスタのデータとスレーブ側で測定したスレーブのデータを比較している. また, 力のデータに関しては, データの送受信をしていないため, やむを得ずそれぞれで測定した値を用いている. そのため, 力のデータに関しては, 時間軸のずれが生じていると考えられる. また, マスタに用いた, 平行リンク型アームには, 力センサを搭載していないため, F_{op} に関しては, 入力トルクより推定した値 ($F_{op} = J_m^{-T} \tau_m$) を用いて

いる。

Case 1 の実験結果を Figs. 4 - 6 に示す . Fig. 4 に Shape-System の手先位置の時間応答を, Fig. 5 にマスタと Locked-System の手先位置の時間応答を示す . Fig. 4 より, スレーブ間の相対位置関係が目標軌道に追従していることから対象物の把持が行えていることが確認できる . また, Fig. 5 より, スレーブ間の中心位置がマスタの手先位置に追従していることから対象物の搬送が行えていることが確認できる . 対象物の把持を行っている際, 偏差が残っているが, これは, スレーブ間距離が狭まる時, スレーブ 1, 2 で狭まる量が異なり, スレーブと対象物で閉リンクを構成してしまっているからだと考えられる . また, このときの Shape-System と Locked-System に加わる力を Fig. 6 に示す . Fig. 6(b) より, 遠隔環境と接触していないのに力が加わっているのは対象物を運ぶ際の慣性だと考えられる .

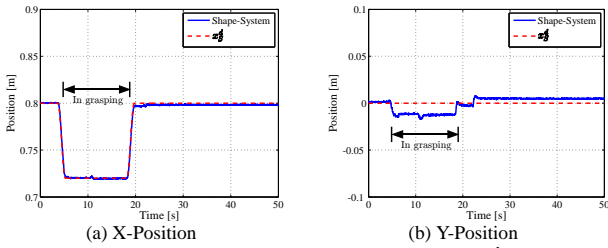


Fig. 4 Positions of Shape-System and x_S^d

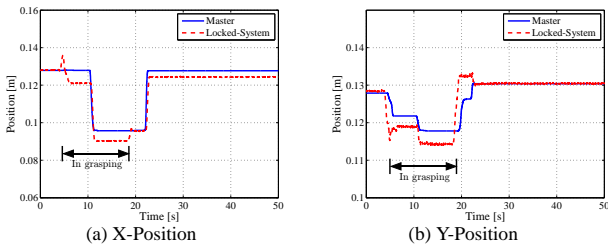


Fig. 5 Positions of Master and Locked-System

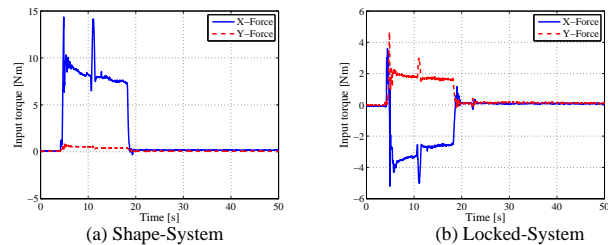


Fig. 6 Force

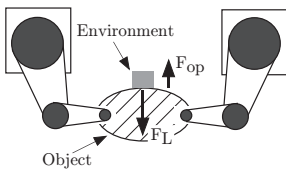


Fig. 7 Experimental Setup in Case2

Case 2 の実験結果を Figs. 8, 9 に示す . 遠隔環境とは, Fig. 7 に示すように Y 軸方向に垂直に接触させた . Fig. 8 にマスタと Locked-System の手先位置の時間応答を, Fig. 9 に操縦者と環境から反力の時間応答を示す . Fig. 9 より, 把持対象物が環境と接触し, マスタとスレーブが定常状態になっているときに $F_{op} = -\beta F_L$ ($\beta = 1/10$) となっており, スケーリングされた環境からの反力が操縦者に伝わっていることがわかる .

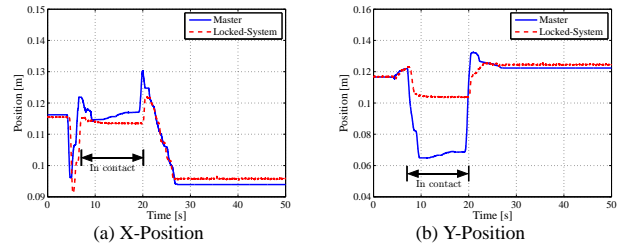


Fig. 8 Positions of Master and Locked-System

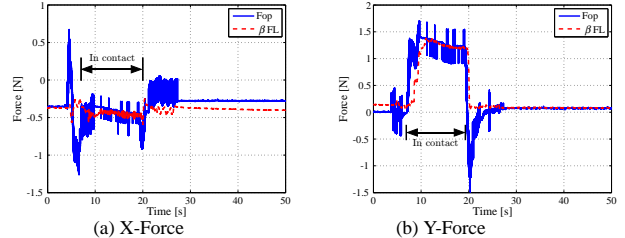


Fig. 9 Force of Operator and scaled Locked-System

6. おわりに

本論文では, 時変の通信遅延を有する, SMMS システムに対して, 漸近安定性を保証した制御則を提案した . 提案した制御手法は複数台のスレーブのダイナミクスを作業を行うダイナミクスと操縦者の指令値に従うダイナミクスとに分解する Passive-Decomposition に PD 制御則を適用させたもので, 時変の通信遅延に対してもシステムが漸近安定となることをリアプノフの安定定理を用いることで示した . また, 制御実験により, 提案制御則により, マルチスレーブによる対象物の自律的な把持, 対象物の搬送が行えることを示した . 本稿では, 位置を制御することで対象物の把持, 搬送を行っているので, 把持対象物の情報が必要となっているが, 力を制御することで対象物の把持を行うことができれば未知の対象物でも把持を行うことができ, 設計の幅が広がると考えられる .

参考文献

- (1) P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation : A historical survey," *Automatica*, Vol.42, No. 12, pp. 2035-3695, 2006.
- (2) 小菅一弘, 石川潤, 古田勝久, 鈴木和夫, 酒井勝, "シングルマスタ・マルチスレーブ・マニピュレータシステムの Tsak-Oriented 制御," 計測自動制御学会論文誌, vol. 34, No.7, 1994.
- (3) 小菅一弘, 吉田英博, 福田敏男, 蟹谷清, 酒井勝, 鈴木和夫, "インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御," 日本ロボット学会誌, vol. 13, No.3, pp. 404-410, 1995.
- (4) D. Lee and M. W. Spong, "Bilateral Teleoperation of Multiple Cooperative Robots with Time Delayed Communication : Theory," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 362-367, 2005.
- (5) 滑川徹, 河田久之輔, 藤田裕之, "通信遅延の変化率に依存しないテレオペレーション制御," 第 8 回計測自動制御学会部門大会, 2008.
- (6) 河田久之輔, 滑川 徹, "時変の通信遅延を有する非線形テレオペレーションのバイラテラル制御," 計測自動制御学会論文誌, Vol. 45, No. 1, pp. 18-26, 2009.
- (7) C. C. de Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds), *Theory of Robot Control*, Springer, 1996.
- (8) D. Lee and M. W. Spong, "Passive Bilateral Teleoperation With Constant Time Delay," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp.269-281, 2006.
- (9) M. W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, 2006.
- (10) 小林, 他, *ロボット制御の実際*, コロナ社, 2003.
- (11) Gang Tao, "A Simple Alternative to the Barbalat Lemma," *IEEE Trans. on Automation Control*, Vol. 42, No. 5, pp. 698, 1997.
- (12) J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, 1991.
- (13) M. W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, 2006.