リーダーフォロワーシステムにおける仮想力に基づくバイラテラル動作補正

○田中 連（九州大） 有田 輝（九州大） 中嶋 一斗（九州大） 田原 健二（九州大）

1. はじめに

近年，様々な作業の現場において，バイラテラル制御に基づくリーダーフォロワーシステムの実用化が進んでいる．リーダーフォロワーシステムとは，操作者が扱う「リーダー」と，その動きに追従する「フォロワー」，一対のロボットからなるシステムのことであり，特にフォロワーにかかる接触力を力覚としてリーダーへフィードバックする「バイラテラル制御」は，高い操作性を提供し，直感的な作業を可能にする．

しかし，従来のバイラテラル制御において，リーダーとフォロワー間で相互に共有される情報は位置・力情報に限られている [1]．そのため操作者は作業環境の認識が不十分なままリーダーの操作を強いられることとなり，結果としてフォロワーが未知の環境障害物や周辺作業者に衝突，または作業対象物に対して過大な衝撃力を与え，重大な事故を招く恐れがあった．

本研究では，フォロワー側で取得される周辺の環境情報をバイラテラル制御に組み込むことにより，上記の課題の解決策を提示する．具体的には，システムの形態を問わず比較的容易に実装が可能であり，かつ高速な応答を得ることができる近接覚センサをフォロワーに導入する．これによって得られる近接覚情報に基づき，作業環境上の物体の近傍においてフォロワーの動作補正を行い，物体と接触した際の衝撃力を緩和する．

また，フォロワー側で得られた近接覚情報を力覚としてリーダーにフィードバックすることで，より正確な作業環境の認識を操作者に促し，周辺物体との意図しない接触を防止する．フォロワーが作業対象物と接触してからは，操作者の意図した力が，そのまま接触力として発揮できるように設定する．

以上の観点をもとに，本研究の主目的を以下の 3 点に設定した．

- 物体接触時の衝撃力を緩和するようフォロワー側の動作を補正する
- 近接覚情報を力覚としてリーダーにフィードバック，周辺物体の存在を操作者に知らせる
- 接触後に所望の接触力を発揮する

上記の機能の典型的な実装例として，フォロワーと周辺物の距離にしきい値を設定して挙動を切替・制限する手法が考えられる．しかし不連続な制御では，制御切替時における不安定化の懸念や操作性への悪影響が生じる．また，リーダーとフォロワーいずれかの挙動を制限するだけでは，両者の位置と力の状態が一致しているというバイラテラル制御の特徴を損なうこととなる．そのため，既存のバイラテラル制御に対する後付けとして近接覚情報による制限を加えるのではなく，リーダーとフォロワーの対応関係の中に近接覚情報を矛盾なく導入することが可能なフレームワークを設計する必要がある．

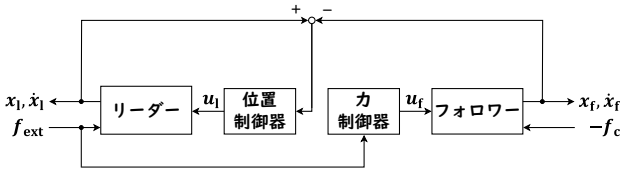


図 1: 力順送型制御

本研究では，センサ情報に基づいて目標軌道を連続的に補正することが可能な Arita らの Multiple Virtual Dynamics-based Control (MVDC)[2] を組み込んだ，新たなバイラテラル制御フレームワークを提案する．このフレームワーク内に近接覚情報を導入することで，リーダーフォロワーシステムとしての操作性を損なうことなく，単一制御によるフォロワーの衝撃緩和・接触力制御，およびリーダーへの近接覚情報の提示が可能となる．以降では本提案手法の詳細および実機実装の結果を報告する．

2. 提案手法

2.1 力順送型 MVDBC フレームワーク

MVDC は，Fujiki らによる直列アドミッタンス・インピーダンス制御 [3] をもとに，あらゆる感覚情報を力情報とみなすことができる「仮想力」の概念を導入し，Arita らが一般化したものである [2]．MVDC は複数の仮想ダイナミクスの多層的な組み合わせによって構成され，入力された目標軌道はそれぞれの層に設定された仮想力により次々と補正を受ける．これにより，単一制御の中に複数の感覚情報および挙動の特性を共存させることができる．本稿では，力順送型バイラテラル制御 [4] に対して MVDC を導入し，新たな制御フレームワークを構築している．

金岡らが提案した力順送型バイラテラル制御 [4] は，フォロワーがリーダーの力情報を，リーダーがフォロワーの位置情報を参照して動作する（図 1）．他の代表的なバイラテラル制御形式（対称型・力逆送型 [5] および力帰還型 [6]）と比較した特徴として，フォロワーが力制御されるため，リーダーに与えられた操作力が，フォロワーにおいて正確に再生される．また，リーダーが位置制御されるため，フォロワーが物体と接触した際にも挙動が不安定とならない．

特に「操作力のフォロワーにおける再現性」という利点から，力順送型制御をベースとしてフォロワー制御部に MVDC を導入，「力順送型 Multipul Virtual Dynamics-based Bilateral Control(MVDBC)」とした．図 2 にそのフレームワークを示す．

以下，リーダーおよびフォロワーロボットを，それぞれ次式に従う 1 自由度系としてモデル化する．

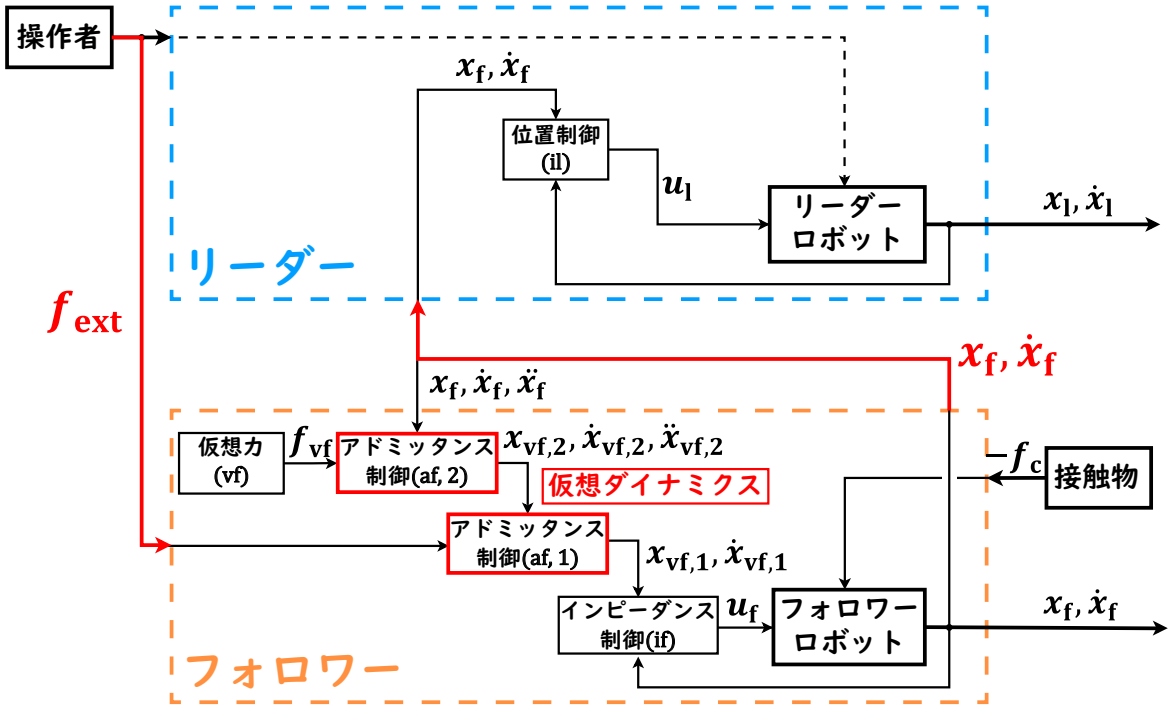


図 2: 力順送型 MVDBC フレームワーク

$$m_l \ddot{x}_l = u_l + f_{ext} \tag{1}$$

$$m_f \ddot{x}_f = u_f - f_c \tag{2}$$

添え字 l はリーダー，f はフォロワーを表し，u_l および u_f はそれぞれの駆動力を表す．m_l および m_f はそれぞれの質量である．f_{ext} は操作者がリーダーに外力として与える操作力，f_c はフォロワーが物体に与える接触力を表す．

リーダーの駆動力 u_l は以下の式に従う．

$$u_l = D_{il}(\dot{x}_f - \dot{x}_l) + K_{il}(x_f - x_l) \tag{3}$$

以下，フォロワーの制御式である．式 4 および式 5 は，仮想ダイナミクス (後述) による動作補正を担う．これらによって導出される目標軌道 $x_{vf,1}$ に基づき，フォロワーの駆動力 u_f は式 6 に従う．

$$\begin{aligned} M_{af,2}(\ddot{x}_{vf,2} - \ddot{x}_f) + D_{af,2}(\dot{x}_{vf,2} - \dot{x}_f) \\ + K_{af,2}(x_{vf,2} - x_f) = f_{vf} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} M_{af,1}(\ddot{x}_{vf,1} - \ddot{x}_{vf,2}) + D_{af,1}(\dot{x}_{vf,1} - \dot{x}_{vf,2}) \\ + K_{af,1}(x_{vf,1} - x_{vf,2}) = f_{ext} \end{aligned} \tag{5}$$

$$u_f = D_{if}(\dot{x}_{vf,1} - \dot{x}_f) + K_{if}(x_{vf,1} - x_f) \tag{6}$$

ここで新たに導入された仮想力 f_{vf} は，種々の感覚情報から目的に応じて自由に設定可能な，仮想の力情報である．

図 2 に示すように，フォロワー制御部において多層的に接続されたアドミッタンス制御部（添え字 af, 1 および af, 2）が，MVDC を構成する仮想ダイナミクスにあたる．M はそれぞれの制御層における仮想質量，D は仮想粘性係数，K は仮想弾性係数である．

第 2 層の仮想ダイナミクスにおいて (式 (4))，フィードバックされた実軌道 x_f は仮想力 f_{vf} に基づく補正を受け，第 2 層のフォロワー仮想物体の軌道 $x_{af,2}$ が生成される．続いて第 1 層の仮想ダイナミクスにおいて (式 (5))，リーダーに加えられた操作力 f_{ext} を実現するための目標軌道 $x_{vf,1}$ が生成される．これに基づくインピーダンス制御層（添え字 il）によりフォロワーが駆動し，その際の実軌道が x_f である．リーダーは，位置制御層（添え字 if）においてフォロワーの実軌道 x_f に追従するよう制御される．

ロボットは最終的に式 (1),(2) に従い駆動する．ここで，各仮想ダイナミクス層およびインピーダンス制御層に設定されたゲインが等しいとき（$M_{af,2} = M_{af,1} = m_f$, $D_{af,2} = D_{af,1} = D_{if}$, $K_{af,2} = K_{af,1} = K_{if}$），以下の式が成り立つ．

$$f_{ext} = M_{af,1}\ddot{x}_{vf,1} + f_c - f_{vf} \tag{7}$$

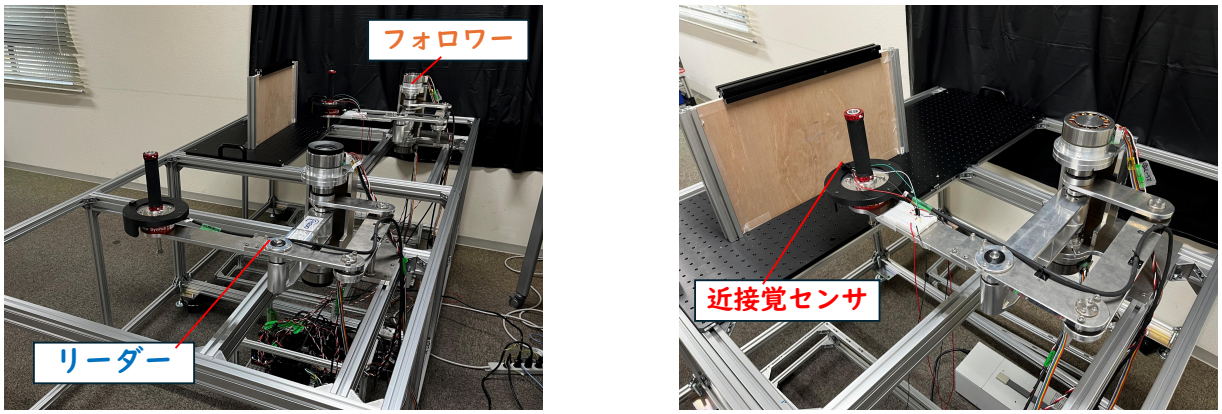
すなわち操作者は，リーダーを通じ，フォロワーに対して設定された第 1 層の仮想ダイナミクスを感じることができる．また，物体接触時の反力 $-f_c$ とともに，仮想力 f_{vf} が力覚として操作者に提示される．

式 7 では簡単のため，仮想力による動作補正を行う第 2 層の仮想ダイナミクスと，操作力 f_{ext} に基づく力制御を担う第 1 層の仮想ダイナミクスのパラメータが同一となるよう設定した．しかしこれらは本来，それぞれ独立したパラメータ設計が可能である．

表 1: 制御パラメータ

$M_{\mathrm{af},2}$	$D_{\mathrm{af},2}$	$K_{\mathrm{af},2}$	$M_{\mathrm{af},1}$	$D_{\mathrm{af},1}$	$K_{\mathrm{af},1}$
1 kg	80 N·s/m	1600 N/m	1 kg	120 N·s/m	3600 N/m

D_{il}	K_{il}	D_{if}	K_{if}	D_{p}
200 N·s/m	10000 N/m	120 N·s/m	3600 N/m	1.8 N·s



(a) リーダーフォロワーシステム　(b) フォロワー側の環境

図 3: 実験装置

これにより，リーダーフォロワーシステムとしての操作性は維持したまま，導入する仮想力の種類や性質，理想とする力覚提示の度合いに応じて，最適なパラメータを自由に選択することができる．

2.2 近接覚による仮想力の設定

Arita らの手法 [2] と同様に，近接覚による仮想力 f_{vf} を以下のように与える．

$$f_{\mathrm{vf}} = -D_{\mathrm{p}}\frac{\dot{\xi}}{\xi} \tag{8}$$

これは，近接覚センサの信号 ξ の変化率 $\frac{\dot{\xi}}{\xi}$ をフォロワーと周辺物の相対速度とみなす仮想粘性力であり，D_{p} は仮想粘性係数である．

リーダー操作時，仮想力 f_{vf} が操作者に力覚提示される．フォロワーが対象物と接触した時点以降は近接覚センサの出力変化率は 0 となるため，$f_{\mathrm{vf}} = 0$ であり，操作者にはフォロワー側の反力 $-f_{\mathrm{c}}$ のみが力覚として提示される．

3. 実機実験

3.1 実験装置

力順送型 MVDBC フレームワークを実機に導入して性能評価を行う．実験装置は図 3(a) に示すように，同様の構造を持つ 2 自由度のリーダー/フォロワーロボット，およびその両者を制御する共通のコントローラからなるリーダーフォロワーシステムである．それぞれのロボット手先部には力センサが取り付けられており，これにより，操作者がリーダーに与える操作力 f_{ext}，およびフォロワーが物体に与える接触力 f_{c} が取得可能である．本提案手法では f_{ext} のみを制御に用い，f_{c} については性能評価のためにデータを取得する．

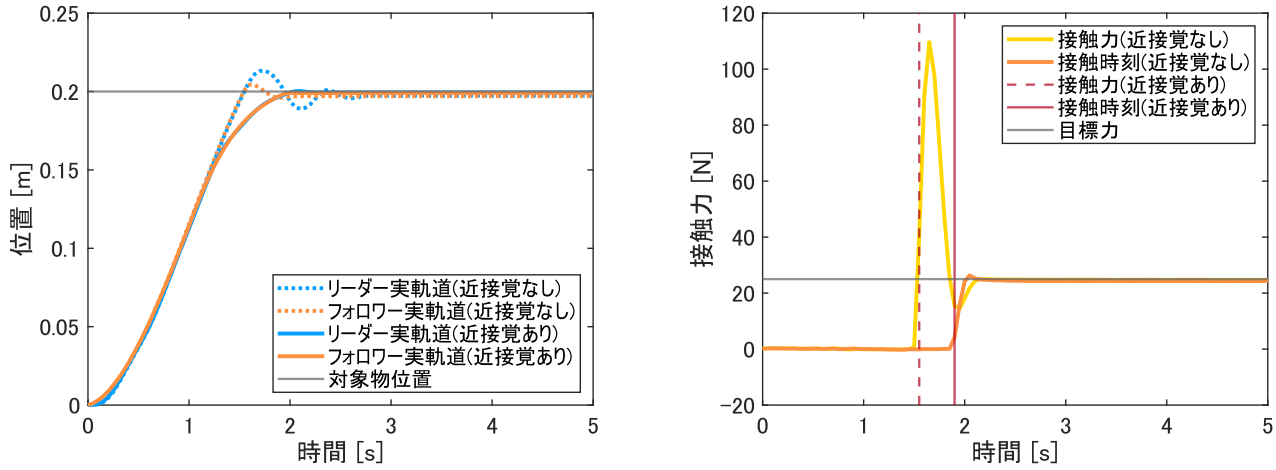
図 3 (b) に示すように，フォロワー手先部の初期位置から 0.20 m 前方には，接触対象物として平板が固定されている．フォロワー手先部には図 3(b) のように，初期姿勢において平板と垂直の向きに近接覚センサが取り付けられている．

3.2 実験条件

本研究では平板に対する垂直方向の接触を評価するため，2 自由度を持つリーダー/フォロワー実機を実質的な 1 自由度系として駆動する．リーダーに与えられる操作力 f_{ext} を一定とするため手動での操作は行わず，$f_{\mathrm{ext}} = 25$ N をセンサ情報としてコントローラに入力することでフォロワーロボットを駆動させ，近接覚なし/ありの場合におけるリーダー/フォロワーロボットの実軌道，およびフォロワーが平板に与える接触力の比較を行う．各制御パラメータは，表 1 に示す通りである．

3.3 実験結果

図 4(a) に示す通り，近接覚なしの場合，フォロワーは加速を続け接触対象物に衝突している．一方で近接覚ありの場合，フォロワーは対象物付近で減速し，低速で接触している．また，その際のフォロワー実軌道がリーダーへとフィードバックされることにより，リー



(a) リーダー/フォロワーの実軌道　(b) フォロワーが平板に与える接触力

図 4: 実験結果

ダーもまた減速するため，結果として近接覚による仮想力の力覚提示を実現している．

図 4(b) は対象物接触時，フォロワーが平板に与える接触力の遷移である．近接覚なしの場合，接触初期に 110 N の衝撃力が生じた後，目標力である 25 N に遷移している．一方で近接覚ありの場合には過大な衝撃力が発生せず，最大接触力は 26.4 N となり，接触初期から目標力 25 N に近い値で遷移している．これにより，接触時の衝撃力緩和・接触力制御を達成していることがわかる．

4. おわりに

本研究では力順送型バイラテラル制御に MVDC および近接覚情報を導入することにより，当初の目的である

- 物体接触時の衝撃力を緩和するようフォロワー側の動作を補正する
- 近接覚情報を力覚としてリーダーにフィードバック，周辺物体の存在を操作者に知らせる
- 接触後に所望の接触力を発揮する

の達成を確認することができた．

謝　辞　本研究は，株式会社人機一体との共同研究により行われたものであり，実験装置の一部は人機一体により設計・製作されたものである．

参　考　文　献

[1] G. S. Gupta, S. C. Mukhopadhyay, C. H. Messom and S. N. Demidenko, ”Master–Slave Control of a Teleoperated Anthropomorphic Robotic Arm With Gripping Force Sensing,” in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 55, no. 6, pp. 2136-2145, Dec. 2006.

[2] H. Arita, H. Nakamura, T. Fujiki, and K. Tahara: “Smoothly connected preemptive impact reduction and contact impedance control,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 39, no. 5, pp. 3536-3548, 2023.

[3] T. Fujiki and K. Tahara: “Series admittance-impedance controller for more robust and stable extension of force control,” *Robomech J.*, vol. 9, no. 23, 2022.

[4] 金岡，“マスタスレーブシステムおよびその制御方法”，特許第 5105450 号，2012.

[5] R. C. Goertz, J. R. Burnett, and F. Bevilacqua, ”Servos for Remote Manipulation,” Argonne National Laboratory, Lemont, IL, USA, Rep. ANL-5022, Mar. 1953.

[6] R. C. Arzbaecher, ”Servomechanisms with Force Feedback,” Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA, Tech. Rep. ANL-6157, May 1960.