

人間と機械の協調制御による遠隔操作ロボットの研究

Research of a Remote-Operated Robot Based on Human-Machine Cooperative Control

2041902



研究代表者

千葉大学大学院 工学研究科

准教授

並 木 明 夫

[研究の目的]

近年、危険作業などの用途でマスタ・スレーブ型の遠隔操作ロボットの重要性が増している。一方、マスタ・スレーブ間の動作の通信遅れの影響やロボットのダイナミクスの影響などから、従来の開発されたシステムでは、作業の速度が低速となってしまうことが多かった。

実用化のためには、作業のもたつきをなくしスムーズに作業ができるように作業速度を高速化することが必要となる。そこで、本研究では、スレーブロボット側の自律アシスト制御を導入することで、作業速度の高速化を目指す。

[研究の内容、成果]

1. 遠隔操作ロボットシステムの開発

本研究に用いるマスタ・スレーブシステムの構成図を図1に示す。

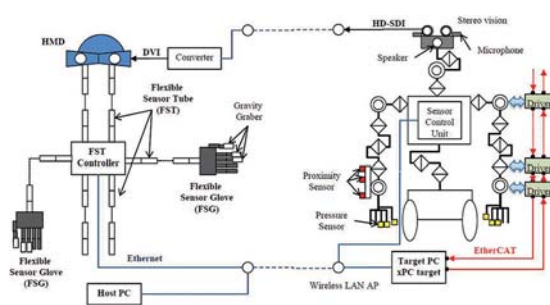


図1 システム構成図



図2 マスタ



図3 スレーブ

本研究では、マスタ装置としてFST (Flexible Sensor Tube) システム (図2) を使用する。このシステムでは、手先と頭部の位置姿勢をFSTと呼ばれる多関節チューブ型センサによって計測するとともに、指関節の形状計測と触感提示のためのデータグローブ、視聴覚提示のためのヘッドマウントディスプレイを統合することで、操作者の直接的な操作を可能とする。

一方、スレーブロボットは、図3に示すような上半身型ヒューノイドロボットであり、7自由度双腕アーム、5本指多指ハンドを持つ。人間と同等のサイズであるが、アームの肘部分と胴体の干渉を防ぐために、胴体部が細くなるように改造した。

アーム手首には6自由度力トルクセンサ、ハンド指先には圧力センサを備え、加えてハンド指先と前腕部に衝突回避のための近接覚センサを備えている。頭部には視覚提示用のGbit Ethernet カメラ2台とロボットの動作制御用

の 500 Hz 高速カメラ 2 台が備えられている。

マスタ側からスレーブ側へ 5 ms のレートで操作者の手先位置姿勢、手形状と頭部の姿勢が送られる。スレーブ側では送られた目標位置姿勢を逆運動学計算によりロボットアームに適した位置姿勢に制御する。ハンド形状、頭部位置姿勢についてもロボットの構造を考慮して最適な位置姿勢に制御する。一方、スレーブ側の視覚センサ、力センサ、非接触センサは自律制御に用いることができ、操作者の操作をアシストする。ただし、単純に自律的な制御フィードバックを加えるだけでは、操作制御と自律制御が干渉して使いづらくなるため、下記に述べるようなリーチング動作対応のアシスト制御法を開発した。

2. リーチング動作のアシスト制御の開発

マスタ・スレーブロボットでは、スレーブのダイナミクスの違いや通信の遅れから、操作に遅れが生じる。また、スレーブとマスタの身体構造の差異から、操作の位置姿勢の誤差も生じる。この「遅れ」と「位置姿勢誤差」は、操作性を著しく損なってしまう。そこで、操作者の手の動きを予測し、スレーブロボット側で遅れを補償しマスタとスレーブで動作の「同期」させる。同時にスレーブの視覚センサや力センサにより、マスタとスレーブ間の位置姿勢誤差を自動補償する。具体的な処理は下記ようになる。

① 前画像処理による把持候補対象物体の検出

スレーブ側ロボットにより、把持対象候補物体をあらかじめ検出する。

② 把持対象および把持動作検出

操作者の手の動きを検出し、確率フィルタによる動作方向予測の確率分布と、把持対象候補の確率分布を合成することで、把持動作と把持対象を検出する。

③ 把持動作軌道、把持時間の推定

躍度最小モデルにより操作者の把持動作軌道を予測・推定する。

④ リーチングのアシスト制御

操作者の把持動作予測軌道に応じて、ロボットのアシスト制御軌道を生成する。

⑤ プリシェーピング制御

把持対象の形状に合わせて、ロボットハンドの形状をあらかじめ変化させる。まず、把持対象を円柱形か球形かに判別し、対象物体の向き、大きさに合わせて、リーチング動作中に最適な把持形状にロボットハンドの形状を変化させる。

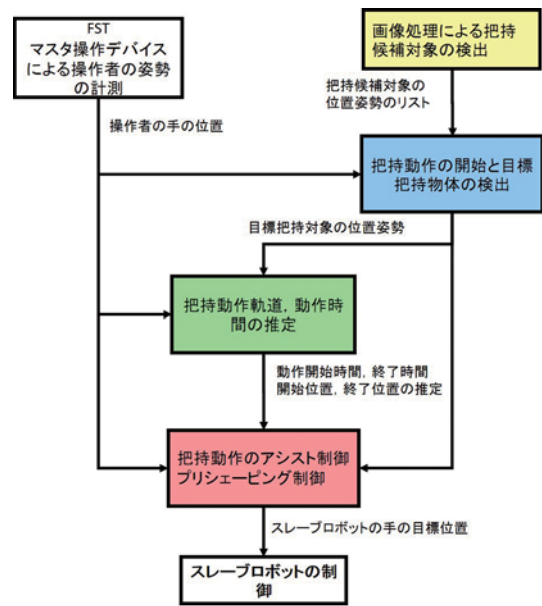


図4 処理の流れ

2.1 把持対象および把持動作検出

操作者の動作予測は、人間の動作が2階差分トレンドモデルに別途加速度による補正項を付与した形で表せるとしてパーティクルフィルタを用いて行う。リーチング判定は予測粒子と物体間の距離を評価することで行う。リーチング判定のための評価値は次式で表される。対象物体 $\mathbf{p}_{obj}$ と k ステップ先の各粒子の予測位置 $\mathbf{p}_{pre}^{(i)}$ との距離 $d^{(i)}$ を用いて評価値 $q^{(i)}$ を計算し、その総和 Q_2 が閾値を超えたらリーチングと判定する。

$$Q_2 = \sum_{i=1}^N q^{(i)} = \sum_{i=1}^N v_M^{(i)} \exp \left\{ -\frac{d^{(i)2}}{2\sigma_{d^2}} \right\}$$

ここで,

$$v_M^{(i)} = \begin{cases} |v_M^{(i)}| & \text{if } \cos\theta^{(i)} > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

であり, $v_M^{(i)}$ は現在の手先位置を表す各粒子 $p_M^{(i)}$ の速度粒子の速度, $\theta^{(i)}$ は $p_{\text{obj}} - p_M^{(i)}$ と $p_{\text{pre}} - p_M^{(i)}$ のなす角度である。さらに, この評価値に視線方向の評価も加えることで予測精度を上げる。

2.2 把持動作軌道, 把持時間の推定

次式の躍度最小モデルを操作者の手先軌道にフィッティングすることでリーチング終了時刻を予測する。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + (6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3)(\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_0)$$

ただし, $\mathbf{r}_0$ と $\mathbf{r}_f$ はリーチング開始時と終了時の手先位置を表す。また, $\tau = \frac{t - t_0}{t_f - t_0}$ であり, t_0 および t_f はそれぞれリーチングの開始時刻と終了時刻を表す。フィッティングには最小二乗法を用いて, 操作者の手先軌道と躍度最小モデルとの位置, 速度, 加速度の誤差を最小にするように躍度最小モデルのパラメータを決定する。リーチングの初期段階では予測結果が実際とずれやすいため, フィッティングは1回のみではなくリーチングが終了するまで逐次的に行う。

2.3 リーチングのアシスト制御

フィッティングにより操作者のリーチング動作の開始時刻 t_0 と終了時刻 t_f が予測される。ロボットがこの時間に合わせてリーチング動作を終了させるためには, 軌道を補正する必要がある。本研究では軌道補正を, 躍度最小モデルを用いて行うこととした。まず, 時刻 k に予測されたリーチングの開始・終了時刻 $t_{0,k}$, $t_{f,k}$ と目標物体の位置 $\mathbf{r}_f = \mathbf{r}_{\text{obj}}$, 1サンプル前にスレーブに与えていた手先目標値 $\mathbf{r}_{\text{mod},k-1}$ を用いて, ロボット側でリーチングが開始されたと推定される位置 $\mathbf{r}_{0,k}$ を求める。

$$\mathbf{r}_{0,k} = \frac{\mathbf{r}_{\text{mod},k-1} - \mathbf{r}_f(6\tau_k^5 - 15\tau_k^4 + 10\tau_k^3)}{1 - (6\tau_k^5 - 15\tau_k^4 + 10\tau_k^3)}$$

これより, スレーブに与える手先目標値 $\mathbf{r}_{\text{mod},k}$ が次式で算出される。

$$\mathbf{r}_{\text{mod},k} = \mathbf{r}_{0,k} + (6\tau_{k+1}^5 - 15\tau_{k+1}^4 + 10\tau_{k+1}^3)(\mathbf{r}_{f,k} - \mathbf{r}_{0,k})$$

3. 実験結果

操作者がリーチング後, 素早く手を引き上げる実験を行い, その時にマスタとスレーブの動作のタイミングが合っているかを確認する。まず, 図5に操作者のリーチング軌道とフィッティングされた躍度最小モデルを示す。縦の一点鎖線は躍度最小モデルのリーチング開始時刻と終了時刻を表す。躍度最小モデルは操作者のリーチング軌道に対してよくフィッティングしており終了時刻が予測できていることがわかる。

図6に操作者の手先軌道と補正軌道を示す。2つの軌道をつなぐ一点鎖線は同時刻の位置同士をつなぐものである。また, x軸は上下方向, z軸は左右方向を表す。一点鎖線がほぼ水平になっていることから引き上げるタイミングがマスタとスレーブで合っていることがわかる。これはリーチング終了時刻を予測しそれまでに軌道補正を終わらせたことで次の動作にスムーズ

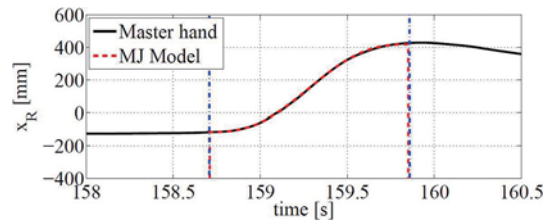


図5 操作者の手の軌道と躍度最小モデル

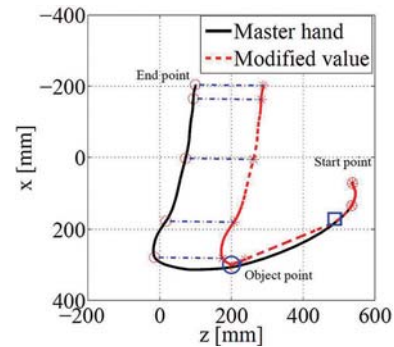


図6 操作者の手の軌道と修正軌道

に入れたことを表している。リーチング終了時刻を予測することでリーチングと次の動作をスムーズにつなげられることが確認できた。実験時の連続写真を図7に示す。

図8に3次元空間におけるリーチング軌道を示す。図中の丸は物体の位置、四角はリーチング判定の瞬間を表す。操作補助が入らないと正確に物体に対しリーチングできていないが、補正によって物体に正確にリーチングできていることがわかる。

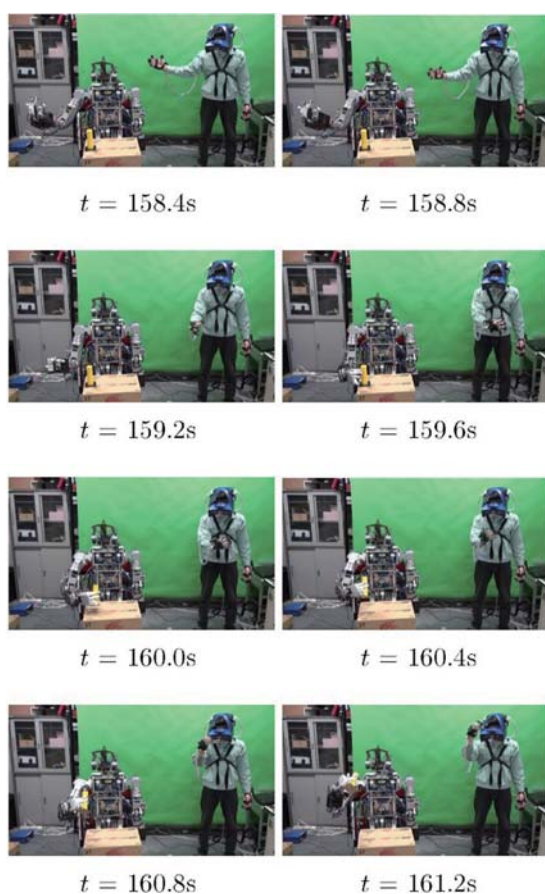


図7 リーチング動作の連続写真

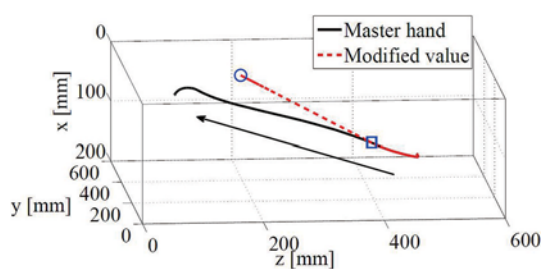


図8 リーチング動作の修正軌道

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、マスタ・スレーブにおいて高速動作を実現することを目標として、リーチング動作に対し操作補助を導入し、その有効性を示した。今後の課題として、①スレーブロボットにおける把持候補対象の自動抽出、②操作アシストにおける修正軌道の最適化、③4リーチング以外の各種作業へのアシスト制御を導入、が挙げられる。

[成果の発表、論文等]

1. Yosuke Matsumoto, Akio Namiki, and Kenta Negishi, Operation assist for a teleoperated robot system controlled with a lightweight and high-operable master device, 2015 IEEE/SICE Int. Symp. System Integration, pp. 552-557
2. Akio Namiki, Yosuke Matsumoto, and Kenta Negishi, Development of Real-Time Control System for a Remote-Controlled Robot with a Lightweight and High-Operable Master Device, The 2015 Int. Conf. Real-time Computing and Robotics
3. 根岸健多, 松本庸佑, 高橋史泰, 並木明夫, マスタ・スレーブ制御における操縦者の意思を考慮した視覚フィードバックによる操作補助, 第20回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 512-519, 2015
4. 松本庸佑, 根岸健多, 見上慶太郎, 並木明夫, 軽量・高操作性マスタ装置を備えた遠隔操作ロボットのための実時間制御システムの開発, 第20回ロボティクスシンポジウム講演論文集 pp. 520-525, 2015
5. 見上慶太郎, 松本庸佑, 根岸健多, 並木明夫, 物体中心座標の操り制御を導入したマスタ・スレーブシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015/5/18