

令和元年6月3日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06427

研究課題名(和文) ネットワーク遠隔サービスロボットの安全性・安定性向上のための接触予見制御の研究

研究課題名(英文) Contact-predictive control for improving safety and stability of network-remote service robot

研究代表者

内村 裕 (Uchimura, Yutaka)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：00416710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：対象物との接触を伴う時間遅れ制御系においては、制御対象の構造が不連続に切り替わるうえに、切り替え後の状態量が遅延して制御器に伝わるため、接触を予見することが不可欠である。そこで、本研究では通信遅延を有する遠隔操作システムにおいて、ロボットと対象物との相対位置関係をリアルタイムに計測し、相対運動の推定により接触を予見しながら、通信遅れを補償するように操作者側に伝達することで、接触時の安定性、安全性を向上するシステムを提案した。また、ロボットマニピュレータ2台を、遅れを有する通信で接続して実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の時間遅れ系の制御系設計の多くは、遅延を前提として安定化する問題設定となっているが、接触を伴う系の場合、接触する前に対処しなければ手遅れとなるため、本研究では予測による積極的な制御を実現している。また、遠隔側(プラント側)の環境計測と運動推定によって構造の切り替えを予測推定する点が、従来のモデル予測制御とは異なる点である。本制御の適用により、人と共存する生活空間で使われるサービスロボットにおける適用はもとより、極限環境における遠隔操作や、遠隔手術ロボットなど時間遅れを有する遠隔作業における安全性の向上が期待される。

研究成果の概要(英文)：In the time delay control system with the contact with the object, it is indispensable to predict the contact, because the state quantity after the switching is transmitted to the controller by the delay in addition to the discontinuous switching of the structure of the control object. This study proposed a system to improve stability and safety at contact by measuring relative distance between a robot and an object at real-time, to transmit it to an operator side so as to compensate communication delay, while predicting contact by estimation of relative motion. Experiments conducted by connecting two robot manipulators with time delay confirmed effectiveness of the proposed method.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：遠隔操作 予測制御 時間遅れ系

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化が急速に進む我が国においては、介護・生活支援分野などで不足する労働力の代替・補完としてのサービスロボットの早期実用化が急務であるが、複雑な状況判断を含む全ての作業を自律ロボットによって置き換えることは困難であるため、状況に応じた人間の柔軟な判断によるロボットの遠隔操作が必要となる。遠隔操作による操作性を向上するには、動作をロボットに単に指令するだけでなく、動作の結果を操作者に提示することが極めて有効である。特に、作業対象との接触を伴う場合は、接触力のフィードバックが操作性の向上に大きく寄与する。このようなロボットの制御に関わる情報をネットワークを介して伝送することで、世界中から遠隔操作が可能となるが、ネットワーク経由の情報伝送を行うと、通信遅延に起因する問題に直面する。

接触を伴う遠隔操作において通信遅延が生じると、システムの安定性・安全性が大きく損なわれる恐れがある。具体的には、ロボットが対象物に接近し接触した後も、接触したことが通信遅延によって操作者に伝わらず、未だ接触していないと誤認して更に力を付加してしまい、対象物が脆弱な場合は破損の危険性につながる。接触力のフィードバックを含むシステムにおいては、接触動作が振動的になることも実験によって確認されている。

対人サービスを提供するロボットの場合、接触時の不安定な挙動は人に危害を及ぼす恐れがあるため絶対に回避すべきである。こうした状況下では、遠隔側における接触の情報も、操作者側には遅れて伝わるため、接触した情報を受け取ってから対処するのでは手遅れであり、接触する前に適切な対応を図る必要がある。

2. 研究の目的

本研究では通信遅延を有する遠隔操作システムにおいて、ロボットと対象物との相対位置関係をリアルタイムに計測し、相対運動の推定により接触を予見しながら、通信遅れを補償するように操作者側に伝達することで、接触時の安定性、安全性を向上するシステムの実現を目指す。接触現象においては、制御対象の構造が不連続に切り替わるうえに、切り替え後の状態量が遅延して制御器に伝わる。従来の時間遅れ系の制御系設計の多くは、遅延を前提として安定化する問題設定となっているが、接触を伴う系の場合、接触する前に対処しなければ手遅れとなるため、本研究では予測による積極的な制御に取り組む。また、遠隔側（プラント側）の環境計測と運動推定によって構造の切り替えを予測推定する点が、従来のモデル予測制御とは異なる点である

3. 研究の方法

(1) 接触予見のためのシステム構成

時間遅れを有する系において、対象物との接触を予見するため、対象物とマニピュレータ間の距離を測定するセンサをスレーブ側に配置する。センサで読み取った距離を用いて、モデル予測制御に新たな制約を設け、さらにマスターの位置制御において、スレーブと対象物の距離に基づく可変ダンパを加えることを提案する。

図1に制約条件を設けたモデル予測制御器、可変ダンパ、マスター側の制御器からなる提案システムのブロック線図を示す。

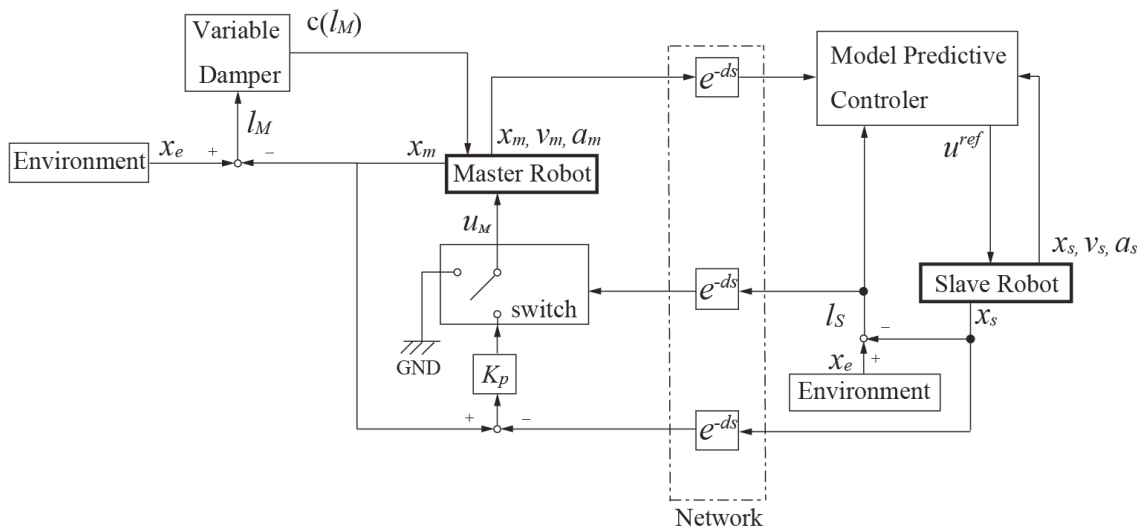


図1 提案システムのブロック線図

(2) 予見モデルの設定

マスターの運動モデルを等加速度運動として以下のように定式化する。

$$x_M[k+1] = x_M[k] + v_M[k]T_s + \frac{1}{2}a_M[k]T_s^2 \quad (1)$$

ただし  $x_M$  はマスターの位置,  $v_M$  は速度,  $a_M$  は加速度,  $T_s$  は1ステップあたりのサンプリングタイムである。また, 予測ホライズン長を  $N_p$  とした。  $k$  ステップ時における  $k+1$  ステップから  $k+N_p$  ステップまでの  $x_M$  の予測位置  $X_M[k]$  を(2)式に示す

$$X_M[k] = \begin{bmatrix} x_M[k+1] \\ x_M[k+2] \\ x_M[k+3] \\ \vdots \\ x_M[k+N_p] \end{bmatrix} = \Sigma_{xm} x_M[k] + \Gamma_{xm} v_M[k] + \Theta_{xm} a_M[k] \quad (2)$$

ただし,

$$\Sigma_{xm} = [1 \quad \cdots \quad 1]^T, \quad \Gamma_{xm} = [T_s \quad 2T_s \quad \cdots \quad N_p T_s]^T, \\ \Theta_{xm} = \left[ \frac{1}{2}T_s^2 \quad \frac{2^2}{2}T_s^2 \quad \cdots \quad \frac{N_p^2}{2}T_s^2 \right]^T \quad (3)$$

である。

スレーブはモデル予測制御によって決定した入力によって動作するため, 運動モデルの状態方程式は(4)式のように与えられる。ここで,  $x_{Sl}$  をスレーブの状態,  $x_s$  をスレーブの位置,  $v_s$  を速度,  $a_s$  を加速度とした。

$$x_{Sl}[k+1] = [x_s[k+1] \quad v_s[k+1] \quad a_s[k+1]]^T \\ = Ax_{Sl}[k] + Bu^{ref}[k|k] \quad (4)$$

ただし,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T_s & \frac{1}{2}T_s^2 \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$y_{Sl} = C_x x_{Sl}, \quad C_x = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (5)$$

ここで, 制御入力  $u^{ref}[k|k]$  は1ステップ前の制御入力  $u^{ref}[k-1]$  と, モデル予測計算によって得られた現在のステップの入力値の増減量  $\Delta u^{ref}[k|k]$  によって決まるため, (6)式で求められる。

$$u^{ref}[k+N_p-1|k] = u^{ref}[k+N_p-2|k] + \Delta u^{ref}[k+N_p-1|k] \\ = u^{ref}[k-1] + \sum_{i=1}^{N_p} \Delta u^{ref}[k+N_p-i|k] \quad (6)$$

$k$  ステップ時における  $k+1$  ステップから  $k+N_p$  ステップまでの  $x_s$  の予測位置行列  $X_S[k]$  は(7)式で与えられる。

$$X_S[k] = C_X \begin{bmatrix} x_{Sl}[k+1] \\ x_{Sl}[k+2] \\ x_{Sl}[k+3] \\ \vdots \\ x_{Sl}[k+N_p] \end{bmatrix} = C_X \begin{bmatrix} Ax_{Sl}[k] + Bu^{ref}[k|k] \\ Ax_{Sl}[k+1] + Bu^{ref}[k+1|k] \\ Ax_{Sl}[k+2] + Bu^{ref}[k+2|k] \\ \vdots \\ Ax_{Sl}[k+N_p-1] + Bu^{ref}[k+N_p-1|k] \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $C_X$  は  $C_x$  を対角要素とする対角行列である。

更に、(7) 式に(6) 式を代入すると(8)式が得られる。

$$X_S[k] = \Sigma_{xs} x_{Sl}[k] + \Gamma_{xs} u^{ref}[k-1] + \Theta_{xs} \Delta U[k] \quad (8)$$

$$\Sigma_{xs} = C_X \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^{N_p} \end{bmatrix}, \Gamma_{xs} = C_X \begin{bmatrix} B \\ AB+B \\ A^2B+AB+B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} A^i B \end{bmatrix}, \Theta_{xs} = C_X \begin{bmatrix} B & O & \cdots & O \\ AB+B & \cdots & O & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} A^i B & \cdots & B & \end{bmatrix}, \Delta U[k] = \begin{bmatrix} \Delta u^{ref}[k|k] \\ \Delta u^{ref}[k+1|k] \\ \vdots \\ \Delta u^{ref}[k+N_p-1|k] \end{bmatrix}$$

### (3) モデル予測制御の定式化と制約条件

スレーブへの入力を決めるモデル予測制御の評価関数と制約条件を(9)式に示す。一般的なモデル予測制御での追従では、マスターとスレーブの位置の偏差に応じてスレーブへの入力を決定するが、提案手法では、時間遅れによってマスターからの指令が遅れ、スレーブが対象物に接触してもなお力を加え続けることを回避するよう制約条件式を設けた。

$$\min_{\Delta U[k]} J[k] = (X_M[k-d] - X_S[k])^T Q_1 (X_M[k-d] - X_S[k])$$

$$\text{subject to } :L_S[k] \geq O \quad (9)$$

提案手法では各ステップにおけるマスタースレーブの位置偏差と制御入力値のノルムを評価指標としている。モデル予測計算は(9)式を最小化する入力値をステップ毎に計算し、スレーブのアクチュエータに与える。図1に示すようにモデル予測制御器はスレーブ側に存在し、マスターの情報に時間遅れ  $d$  だけ遅れて伝達されるため、マスタースレーブの位置偏差は  $X_M[k-d] - X_S[k]$  となる。また、重み行列  $Q_1, Q_2$  は要素を以下のように定義する。

$$Q_1 = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & q_1 \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & q_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

制約条件の行列  $L_S$  は(11)式で与えられる。

$$L_S[k] = \begin{bmatrix} l_s[k+1] \\ \vdots \\ l_s[k+N_p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s[k] \mp (x_s[k+1] - x_s[k]) \\ \vdots \\ l_s[k] \mp (x_s[k+N_p] - x_s[k]) \end{bmatrix} \quad (11)$$

(12) 式は、スレーブと対象物の距離  $l_s$  が、スレーブモデルの全ての予測ステップにおいて0以上になるように制約する。以上の設定のもとで、(10)式の  $J$  は  $\Delta u^{ref}[k|k]$  について凸であるので、 $L_S[k]$  の制約条件の下で適切な最適化ソルバの実装により、 $J$  を最小化する  $\Delta u^{ref}[k|k]$  を逐次算出できる。

### (4) マスターの制御と可変ダンパ

本制御では、スレーブ側の計測結果に基づく対象物との距離  $l_m = x_e - x_m$  に依存する可変減衰係数  $C_m(l_m)$  を導入し、マスターが対象物に接近するとより大きな減衰力が作用することで、対象物からの行き過ぎを抑制する。可変ダンパの減衰係数  $C_m$  を(13)式に示す。

$$C_m(l_m) = C_0 e^{-\gamma l_m} \quad (13)$$

スレーブ側の計測結果に基づく対象物との距離  $l_m = x_e - x_m$  に依存する可変減衰係数  $C_m(l_m)$  の値は  $l_m$  が 0 に近づくにつれて指数的に増加し、 $l_m = 0$  のとき最大となるよう設定した。

#### 4. 研究成果(実験による検証)

##### (1) 実験条件

提案手法の有効性を検証するため、図 2 に示すパラレルリンク型のマニピュレータ (Novint 社製 Falcon) を 2 台使用し、マスター側マニピュレータを操作者が操作して実験を行った。予測制御の計算を含むサンプリングタイムを 8ms に設定した。

##### (2) 実験結果

表 1 に示した条件をもとに実験を行った。提案手法の実験結果を図 3 に示す。シミュレーションと同様、グラフの縦軸は位置  $x_i$  [mm] ( $i = m, s$ )、横軸は時間 (秒) である。また、赤の実線がマスターの応答であり、青の破線がスレーブの応答である。図 3 に示すように、対象物に接触するまでスレーブはマスターに 1 秒遅れて追従したことがわかる。マスターは、1.3 秒の時点で、対象物近傍に位置しているため、可変ダンパの効果により減速したことがわかる。また、スレーブは 4.2 秒の時点で対象物に接触し、その情報が 1 秒遅れてマスターに伝達される。そのため、マスターは 5.2 秒の時点からスレーブに追従する動作を示した。一方、スレーブはモデル予測制御の制約に従い、減速しながら対象物に接触したことがわかる。本実験結果より、提案手法におけるモデル予測制御および可変ダンパの有効性を確認した。

##### (3) 研究成果まとめ

本研究では、時間遅れ系におけるテレオペレーションシステムの接触時の衝撃緩和を目的とし、モデル予測および可変ダンパによる制御系を導入したテレオペレーションシステムを提案した。また実験により提案手法の有効性を確認した。

本制御の適用により、時間遅れを有する遠隔作業における安全性の向上が期待される。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- [1] 小林 浩司, 内村 裕, "モデルベース予測制御による時間遅れを有する遠隔システムの制御", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, 査読有, Vol. 138, pp. 323 - 329, (2018), DOI: 10.1541/ieejias.138.323
- [2] 法月 広夢, 内村 裕, "時間遅れを有するシステムにおける接触予見制御系の設計", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, 査読有, Vol. 137, pp. 561 - 567, (2017), DOI: 10.1541/ieejias.137.561
- [3] 須原 亨, 法月 広夢, 内村 裕, "ネットワークベース系におけるパケットロスと変動時間遅れを考慮した制御系の設計", 電気学会論文集 D 産業応用部門誌, 査読有, Vol. 137, pp. 87 - 94, (2017),

表 1 実験のパラメータ

|                            | 値                                  |
|----------------------------|------------------------------------|
| Position of the object     | 0.05m                              |
| Time delay                 | $d = 1.0$ s                        |
| Length of horizon          | $N_p = 18$ steps                   |
| Weight values              | $q_1 = 2.0 \times 10^5, q_2 = 3.0$ |
| Controller (master)        | $K(s) = 100 + 500/s + 30s$         |
| Variable dumper parameters | $C_0 = 150, \gamma = 80$           |
| Sampling time              | $T_s = 8$ ms                       |



図 2 実験に使用したマニピュレータ

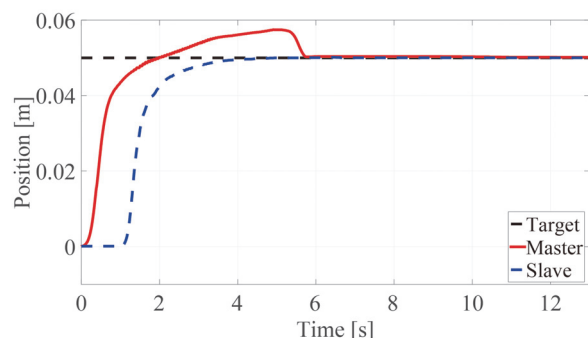


図 3 実験結果

DOI: 10.1541/ieejias.137.87

- [4] 高橋 拓也, 内村 裕, "予測誤差オブザーバを用いたネットワーク予測制御システムの  $H^\infty$  制御器設計法", 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 35, pp. 471 - 478, (2017),  
DOI:  
10.7210/jrsj.35.471
- [5] Yutaka Uchimura, "Stability and Stabilization Scheme for Systems with Time Delay", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 5, pp. 321 - 328, (2016)  
DOI: 10.1541/ieejia.5.321
- [6] Naoya Uematsu, Tooru Suhara, Yutaka Uchimura, "Model-Error Feedback for Systems with Time-Varying Delay Based on Mixed  $H_2/H^\infty$  Control", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 5, pp. 245 - 252, (2016) DOI: 10.1541/ieejia.5.245  
[学会発表] (計 7件)
- [1] K. Kobayashi, A. Minohara, Yutaka Uchimura, "Network-based control with state prediction for time-delayed system", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2018), pp. 982 - 987, (2018. 6) Cairns
- [2] H. Norizuki, Yutaka Uchimura, "Design of Model Predictive Control considering Time Delay in Remote Excavation Work", International Workshop on Advanced Motion Control 2018 (AMC2018), pp. 587 - 592, (2018. 3) Tokyo
- [3] K. Kobayashi, Yutaka Uchimura, "Model based predictive control for a system with long time delay", Int. Workshop on Advanced Motion Control 2018 (AMC2018), pp. 581 - 586, (2018. 3) Tokyo
- [4] K. Kobayashi, Yutaka Uchimura, "Model based predictive control for networked control system with time delay", IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp. 5633 - 5638, (2017.10) Beijing
- [5] T. Suhara, H. Norizuki, Yutaka Uchimura, "Network-based control for a system with long time delay and packet losses", IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics (ISIE2017), pp. 1111 - 1116, (2017. 6) Edinburgh
- [6] H. Norizuki, Yutaka Uchimura, "Contact Prediction Control for a Tele-operation System with Time Delay", IEEE Int. Conf. on Mechatronics, pp. 68 - 73, (2017. 2) Gippsland
- [7] Yutaka Uchimura, H. Norizuki, T. Suhara, "Model-error feedback control for compensating packet loss and time delay", IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp. 6800 - 6805, (2016.10) Florence

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcon.mech.shibaura-it.ac.jp/theme/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内村 裕 (UCHIMURA YUTAKA)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号: 00416710

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 研究協力者

名取賢二 (KENJI NATORI)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 70545607

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。