

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04457

研究課題名(和文) 変動通信遅延を補償する可変長の予測ホライズンを有するモデル予測遠隔制御系の構築

研究課題名(英文) Development of predictive remote control system to compensate time varying delay with variable horizon length

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、変動を有する通信路を介して想定した遅延より早着したパケットに含まれる目標値が制御対象に与えられるべき予定時刻は、到着時刻後(未来)であることに着目し、従来は予定時刻まで待機していた目標値を積極的に活用することで、可変長の予測ホライズンを有するモデル予測制御系(MPC)によって、制御対象側に配置した参照軌道に設定し、最適な制御入力を逐次算出する手法を提案した。同システムを実システムに実装し、従来手法と比較した結果、提案手法の性能向上を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoT技術の進展・普及との相互作用により、任意の場所から、所望の制御対象を操作する技術が大きく前進し、移動を伴うことで失われるエネルギー、コストの削減につながる。この結果、例えば医療現場において実現が望まれている遠隔診療や遠隔手術技術の進展にも貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focused on the fact that the target value contained in a packet that arrives earlier than the assumed delay is scheduled to be given to the control target after the arrival time (in the future). By actively utilizing the target value, which has conventionally waited until the scheduled time, we proposed a method to sequentially calculate the optimal control input by setting it in a reference trajectory placed on the control target side using a model predictive control system (MPC) with a variable-length prediction horizon. The system was implemented in a real system and compared with the conventional method, and the performance improvement of the proposed method was confirmed.

研究分野：制御工学

キーワード：遠隔操作 モデル予測制御 ネットワーク制御 通信遅延

1. 研究開始当初の背景

様々な自然災害が発生する我が国では、二次災害の恐れのある現場や原子力施設などの復旧作業において、離れた場所から重機やロボットなどを遠隔操作して作業を行うことが求められる。また、介護分野等のサービスロボットにおいても、完全な自律化が難しく人間の高度な判断が必要な場合は遠隔操作が必要不可欠であり、通信技術の進展とともにネットワークによる遠隔制御技術は、IoT 技術との融合も含め様々な分野への応用が期待されている。

しかしながら、ネットワークを介した遠隔制御においては通信路上の遅延によって、制御系の性能が劣化することが大きな課題である。特に遠隔操作系では、リモート側の制御対象の状態が遅延して操作者に伝わると、過去の状態をもとに操作指令を生成することになるうえ、同操作指令の送信時にも更に遅れて伝わるなど、全ての対応が後手になって制御系の性能はもとより安定性も懸念される。

このような、制御系に遅延を含む遅れ時間システムに関しては多くの研究が行われているが、遅れ時間システムは無次元のシステムとなるため、固有値解析に基づく安定解析、制御器設計が困難である。このため、正定な Lyapunov-Krasovskii 汎関数の導関数がシステムの解軌道において負となる条件を線形行列不等式 (LMI) に変換して安定解析を行う研究などが広く行われてきた。こうした従来研究の多くは、安定条件の導出や安定化制御器の設計が目的なため、制御器をローカル側に配置し、リモート側には制御対象のみが存在する前提で制御器を設計している場合が多い。こうした設計では、制御対象の過去の情報 (状態量) をもとにしたフィードバック制御を行うことになるため、前述のように対応が後手に回る状況は改善されていない。

系の遅延を根本的に補償するためには、制御対象の動作を予測する必要がある。これを実現するため、ローカル側に用意した制御対象のモデルに対して遅延無く制御を行うと同時に、モデルに対する入力が遅延して制御対象に与えられることで、モデルの動作は相対的に制御対象の未来の動作になる。しかしながら、モデルベース制御においては、遅延時間が変動する場合に、制御対象は単に遅れて動作するのではなく、入力のタイミングのずれ (時系列の不整合) によって想定外の動作となる恐れがある。ネットワーク通信においては遅延が変動する場合、パケットの到着順序が前後する場合もあり、変動遅延を含む系へのモデルベース制御の適用には様々な課題を含む。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「遅延が変動する通信路を含む制御系において、可変長の予測ホライズンを有するモデル予測制御系 (MPC) を提案し、実システムに実装することで性能向上を実現すること」である。変動遅延に対する従来手法としては、受信側に用意したバッファ内で変動を吸収するために遅延時間を加算し、ネットワークへの入力からバッファの出力までの遅延を一定値とする手法が提案されている。同バッファを導入すれば変動遅延に起因する問題は回避できるが、バッファにおける遅延量は想定される変動幅の最大値 (ワーストケース) に設定する必要がある。この結果、実際には多くのパケットは、早着してバッファの中で送出されるのを無駄に待機することになり極めて非効率である。

そこで本研究では、変動を有する通信路を介して想定した遅延より早着したパケットに含まれる目標値が制御対象に与えられるべき予定時刻は、到着時刻後 (未来) であることに着目し、図 1 に示すように、従来は予定時刻まで待機していた目標値を積極的に活用することで、制御対象側に配置したモデル予測制御器 (MPC) への (未来の) 参照軌道に設定し、最適な制御入力を逐次算出する手法を提案する。

パケットの到着時刻からバッファを送出される時刻までの時間 ($d_{\max} - d(t)$) が予測ホライズンに相当するが、同時間が遅延に応じて変動するため予測ホライズンの長さが可変となることが本制御系の特徴的な点である。予測ホライズンの長さは、計算負荷を鑑みて決定することが一般的であるが、本研究では通信変動から予測ホライズンを可変とする点の特徴である。

3. 研究の方法

3.1 提案手法

図 2 に提案するシステムのブロック線図を示す。図中の x_m , x_p は、予測モデル、制御対象 (プラント) の状態であり、 G_p , \tilde{G}_p は、それぞれ実制御対象とモデル化した伝達関数である。本システムでは、リモート側に制御対象のモデル \tilde{G}_p と MPC で構成したシステム G_r を導入し、実制御

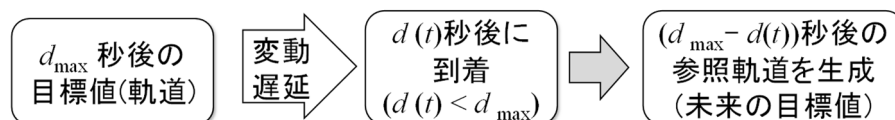


図 1 変動遅延後の目標値から参照軌道を生成

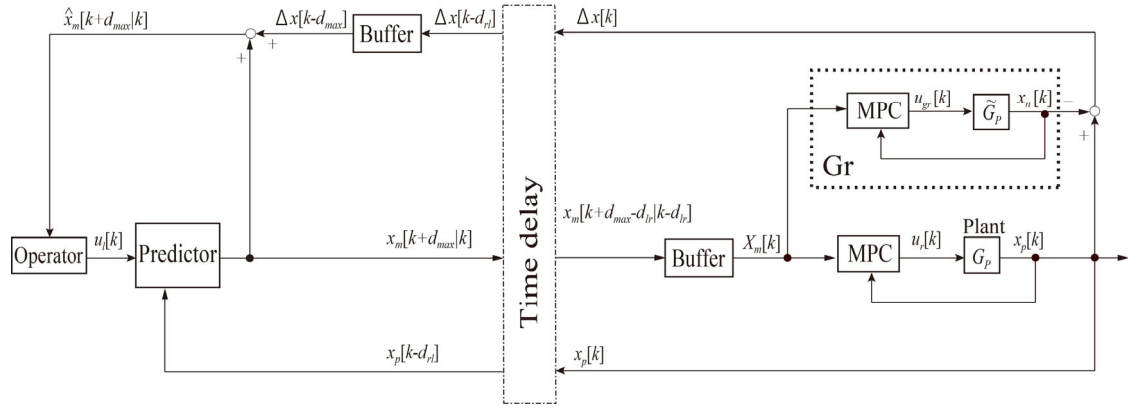


図 2 提案手法のブロック線図

対象の状態 x_p とモデルの状態 x_n との差分をローカル側へ送る。

$x_p - x_n$ は外乱やモデル化誤差による追従誤差を表し、同差分をローカル側の予測モデルに加えることで、操作者に提示する予測モデルの状態にリモート側の制御対象の状態を逐次反映する。なお、図中のバッファでは変動通信遅延を介して受信したパケットの並び替え、参照軌道の生成と補間が行われる。

3.2 MPC の構成

提案手法における入力を算出するための MPC の評価関数を (1) 式に示す。 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{l \times n}$ は制御対象のシステム行列、 $Q[i] \in \mathbb{R}^{l \times l}$, $R[i] \in \mathbb{R}^{m \times m}$ はそれぞれ追従誤差と制御入力の変化量に関する重み行列、 N_p は予測ホライズンである。また、 $\|x\|_Q = (x^T Q x)^{1/2}$ と定義する。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } J[k] \\ & \Delta \hat{u}_r[\cdot] \\ J[k] &= \sum_{i=0}^{N_p-1} \|Cx_m[k+i+1] - C\hat{x}_p[k+i+1]\|_{Q[i+1]}^2 + \|\Delta \hat{u}_r[k+i]\|_{R[i]}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \hat{x}_p[k+i+1] &= A\hat{x}_p[k+i] + B\hat{u}_r[k+i] \\ \Delta \hat{u}_r[k+i] &= \hat{u}_r[k+i] - \hat{u}_r[k+i-1] \\ \hat{u}_r[k+i] &\in U, \quad i = 0, \dots, N_p \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $i=0$ のとき、 $\hat{x}_p[k+i] = x_p[k]$ 、 $\hat{u}_r[k+i-1] = u_r[k-1]$ である。また、 U は制約条件から決定される制御入力の集合である。

各ステップにおいて、評価関数 $J[k]$ の値が最小となる入力変化量群 $\Delta \hat{u}_r[k+i]$, $i = 0, \dots, N_p$ を算出し、 $u_r[k] = \hat{u}_r[k] = \Delta \hat{u}_r[k] + u_r[k-1]$ を制御対象への入力として採用する。

モデル G_r では、(1)、(2) 式の x_p と u_r をそれぞれ x_n と u_{gr} に置き換えたものを用いる。

3.2 ローカル側の予測モデル

ローカル側の予測モデルでは、通信遅延分先の未来の制御対象の状態を推定する。

d_{rl} ステップ前の制御対象の状態と一連の入力値 u_p から、 d_{max} ステップ後の制御対象の状態を (3) 式の状態予測で推定する。

$$x_m[k+d_{max}|k] = A^{d_{rl}+d_{max}} x_p[k-d_{rl}] + \sum_{i=0}^{d_{rl}+d_{max}-1} A^{d_{rl}+d_{max}-1-i} B u_m[k-d_{rl}-d_{max}+i|k] \quad (3)$$

$$u_m[k-d_{rl}-d_{max}+i|k] = u_l[k-d_{rl}-d_{max}+i] + \hat{u}_p[k-d_{rl}-d_{max}+i|k] \quad (4)$$

ここで、 $x_m[k+d_{max}|k]$ は時刻 k において推定した $k+d_{max}$ における制御対象の状態である。また、 \hat{u}_p は、リモート側のコントローラをローカル側にも設置し、リモート側と同様の処理を再現す

ることによって推定する。 $x_m[k+d_{max}|k]$ をリモート側に送り、MPCの参照軌道として利用する。操作者に提示するモデルの状態 \hat{x}_m は(5)式のように算出する。

$$\begin{aligned}\hat{x}_m[k+d_{max}|k] &= x_m[k+d_{max}|k] + \Delta x[k-d_{max}] \\ \Delta x[k-d_{max}] &= x_p[k-d_{max}] - x_n[k-d_{max}]\end{aligned}\tag{5}$$

4. 研究成果

4.1 実オペレータによる実験的評価

実際の人間のオペレータが遠隔操作を行う場合を想定した実験を行った。リモート側の動特性は物理エンジンを搭載したCoppeliaSimによってエミュレートし、CoppeliaSim内に構築した移動ロボット(KUKA youbot)の動力学モデルを、オペレータによる指令値によって遠隔操作した。このCoppeliaSim内のロボットがリモート側のプラントに相当する。実験においてオペレータは、図3に示す予測モデルを見ながら、移動ロボットを画面のスタート位置から、緑のパイロンを避けて赤の矢印で示した経路を走行するよう操作を行った。予測制御の計算を含むサンプリング時間は0.01sec、通信遅延は3.0~4.0secの間で一様に変動するように設定した。外乱として、移動ロボットに $y > 0.5m$ の区間において x 軸に平行な外力を加えた。

また比較のために、従来手法を用いた場合の実験を従来手法として実施した。なお、予測した動作をローカル側でオペレータに提示するためのデータ送受信や、予測モデルの可視化等の実装にはROS(Robot Operating System)を使用した。

4.2 実験結果

図4、5に実験結果を示す。一点鎖線(赤)、実線(青)はそれぞれオペレータに提示した予測モデル、プラント(移動ロボット)の軌跡を示す。

同結果から従来手法よりも提案手法の方がモデルに対して高い追従性を示していることがわかる。従来手法^[1]では、リモート側の追従誤差がローカル側の予測モデルに基づく参照軌道 X_m に反映されるため、往復遅延周期の振動が発生する。外乱の影響を十分軽減するような設計をした場合、この振動現象の減衰が遅くなる。そのため、リモート側のコントローラのゲインを十分に上げることができないため、図のように追従性が低下する。一方、提案手法ではリモート側のモデル x_n との差分 Δx をローカル側に送り、これを直接予測モデルに反映するのではなく、操作者に提示するモデルにのみ反映するため、MPCの重み Q を追従性が十分に向上するよう設計することが可能になり、外乱抑圧性が向上する。表1に予測モデルに対する制御対象の追従誤差の二乗平均による比較を示す。以上の結果より、提案手法が従来手法より通信遅延を含む遠隔制御系に対して有効であることが検証できたと考えられる。

4.2 研究成果まとめ

本研究では制御系に遅延を含む遅れ時間システムに対して、遠隔側の制御対象の状態を予測モデルに適切に反映することで補償手法を提案した。遠隔側システムのモデルを新たに加え、制御対象とモデルの差分を操作者への提示モデルにのみ反映した。これにより、逐次予測モデルには制御対象の状態が反映されると同時に、遠隔側コントローラを十分な追従性が得られるように設計することが可能になった。提案手法の有用性を検証すべく、実験による検証を行った。同検証の結果、提案手法は通信遅延を含む遠隔システムに対して有効であり、従来法に比べ追従性、外乱抑圧性の点で優位であることを確認した。

<引用文献>

[1] Y. Uchimura, K. Kobayashi, H. Norizuki, "Model based predictive control for networked control system with time delay", 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2017), pp.5633-5638, 2017

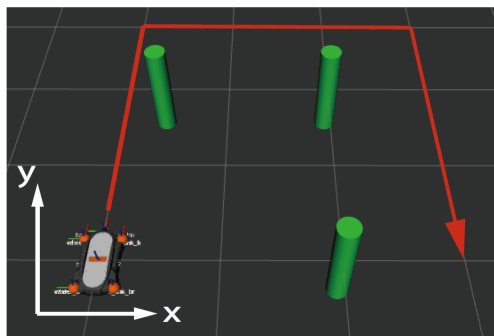


図3 操作者への提示画面

表 1 追従誤差の比較

	conventional ⁽¹⁾	proposed method
RMS	0.0831	0.0482

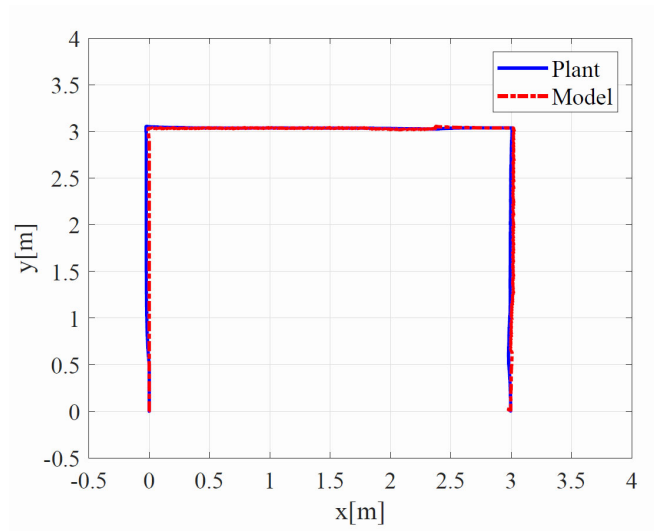


図 4 実験結果 (従来手法)

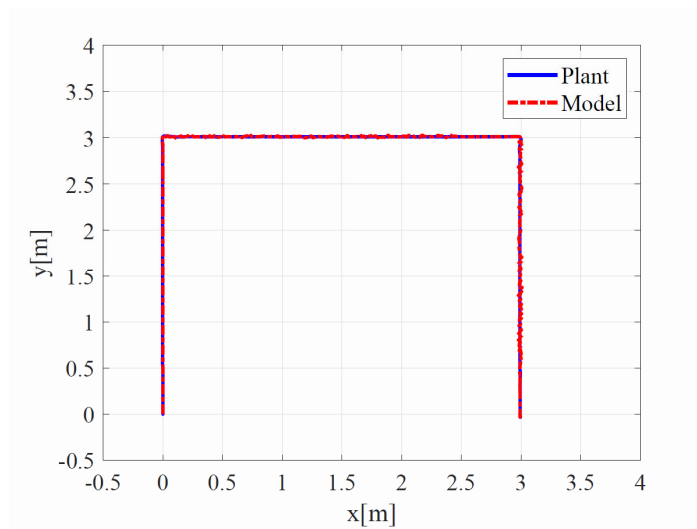


図 5 実験結果 (提案手法)

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Arai Hiroki, Nagakura Hiroki, Uchimura Yutaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Model Predictive Control with Variable Predictive Horizon for Remote Control System including Variable Delay	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 419 ~ 426
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.21005676	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Yuhei Hatori, Hiroki Nagakura, Yutaka Uchimura
2. 発表標題 Obstacle Avoidance and Tele-operation Using Model Predictive Control with Time-varying Delay
3. 学会等名 Obstacle Avoidance and Tele-operation Using Model Predictive Control with Time-varying Delay (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Nagakura, Yuhei Hatori, Yutaka Uchimura
2. 発表標題 Tele-driving including time-varying delay based on MPC with stability constraints
3. 学会等名 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Nagakura, Yuhei Hatori, Yutaka Uchimura
2. 発表標題 Teleoperation with variable and large time delay based on MPC and model error compensator
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Nagakura , Yuhei Hatori , Yutaka Uchimura
2. 発表標題 Model Predictive Control with Variable Predictive Horizon for Remote Control System including Variable Delay
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing , Actuation , Motion Control , and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Nagakura , Yuhei Hatori , Yutaka Uchimura
2. 発表標題 MPC based tele-driving by compensating time-varying delay
3. 学会等名 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Nagakura , Yuhei Hatori , Yutaka Uchimura
2. 発表標題 Variable-horizon based Model Predictive Control for Tele-operation with Time-varying Delay
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Fujiwara , Koji Kobayashi , Yutaka Uchimura
2. 発表標題 Development of Tele-operation Support System for Remote Construction with Large Time Delay
3. 学会等名 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Arai , Yutaka Uchimura
2. 発表標題 Model Predictive Control with Variable Prediction Horizon for a System including Time-varying Delay
3. 学会等名 45 th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長倉広樹, 荒井裕貴, 内村 裕
2. 発表標題 変動遅延を含むシステムのためのMPCに基づく遠隔操作支援
3. 学会等名 産業計測制御 メカトロニクス制御 合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒井裕貴, 藤原和樹, 内村 裕
2. 発表標題 予測ホライズンが可変なモデル予測制御による変動遅延を含む系の制御
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

芝浦工業大学 機械工学科 機械制御工学研究室
<http://www.rcon.mech.shibaura-it.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------