

複数機器無線制御における制御品質向上のための 時分割多元接続手法の一検討

基村 翔大^{1,a)} 小林 健太郎² 岡田 啓² 片山 正昭²

概要: 複数機器のフィードバック制御を行うための無線センサアクチュエータネットワークにおいて、制御品質の向上を目的とした時分割多元接続 (TDMA) 手法を検討する。複数機器の無線制御では、機器ごとの制御目標の違いや各通信路のパケットロスの違いによって、各機器とコントローラとの通信の必要性に差が生じる。本研究では、制御目標と状態情報の差の予測に基づくコスト関数を設定し、コスト関数が最小になるようなタイムスロット割り当て手法を提案する。パケットロスが発生する通信路において提案手法の有効性を示す。

キーワード: 無線センサアクチュエータネットワーク, 無線フィードバック制御, 複数機器制御, 最適タイムスロット割当, TDMA

A Study of Time Division Multiple Access Schemes for Improvement of Control Quality in Wireless Control of Multiple Plants

SHOTA KIMURA^{1,a)} KENTARO KOBAYASHI² HIRAKU OKADA² MASAOKI KATAYAMA²

Abstract: This study discusses time division multiple access schemes to improve control quality in wireless sensor actuator networks for feedback control of multiple plants. In wireless control of multiple plants, there are different target values for the plants and different packet losses on communication channels. This leads to different requirements of communication between the controller and the plants. In this paper, we propose time slot allocation schemes to minimize the cost function on the basis of a prediction of difference between the target value and plant's state information. Then, we show that the proposed schemes can improve the control quality under packet losses.

Keywords: wireless sensor actuator networks, wireless feedback control, control of multiple plants, optimal time slot allocation, TDMA

1. はじめに

工場や農場、医療現場のオートメーション化や、スマートグリッドにおいて、有線制御と比較して利便性の高い無線制御の必要性が高まりつつある [1]。無線制御技術の導入により、有線では困難な移動体、回転体、遠隔機器制御の

容易化、配線除去によるコスト削減、省スペース化、メンテナンスやシステムの組み換えの簡単化などが利点として挙げられる [2] [3]。また産業機器への適用だけではなく、屋内環境の遠隔管理や、人間には危険な環境下でのモニタリングなど様々な分野での応用が期待されている [4]。しかし無線制御では確率的に発生するパケットロスの影響で制御品質が劣化してしまう欠点がある [5], [6]。無線制御のアプリケーションでは、複数ロボットの協調動作などのコントローラと制御対象が 1 対多の場合が考えられる [7], [8]。先行研究では、[9] では、無線通信における同報性を利用して、コントローラからの直接と制御対象を介した間接の複数経路で操作情報を伝送することによりパケットロスの

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻
Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Engineering, Nagoya University

² 名古屋大学 未来材料・システム研究所
Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University

^{a)} skimura@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

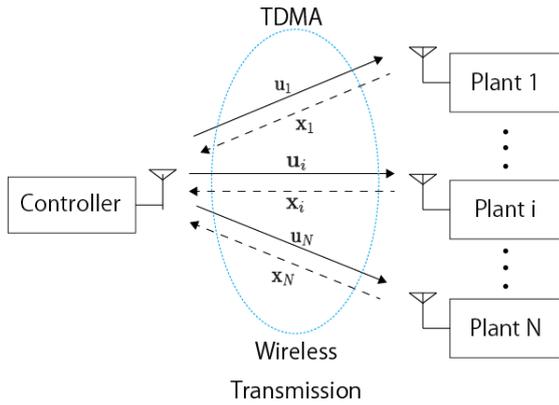


図1 単一コントローラによる複数機器制御

影響を低減している．[10]ではキャリアセンス多元接続方式のバックオフ時間に機器の状態に応じた優先度を設ける手法を提案し制御品質の向上を図っている．また，[11]では，TDMA方式において，任意の機器と通信することができる空きタイムスロットを追加し，そこで制御品質が悪い機器と通信することでパケットロスに対するロバスト性を高めている．

[11]のTDMAを用いた複数機器の無線フィードバック制御では，制御間隔を一定にするためにすべての機器に対して一定の順番でタイムスロットを割り当てていた．しかし機器ごとの制御目標の違いや各通信路のパケットロスの違いによって，各機器とコントローラとの通信の必要性に差が生じる．そのため制御レイヤの情報を利用して柔軟なタイムスロットの割り当てを行うことで系全体の制御品質の向上が期待できる．

本稿では，TDMAを用いた複数機器無線フィードバック制御において，線形モデルを用いた制御目標と状態情報の差の予測に基づくコスト関数を設定し，コスト関数を最小にするようなタイムスロット割り当て手法を検討する．計算機シミュレーションにより，提案手法の有効性とパケットロスが制御品質に与える影響を評価する．

2. 複数機器の無線フィードバック制御システム

TDMAを用いて図1のように1台のコントローラでN台の機器を制御するシステムを考える．機器のフィードバック制御には一定間隔でのサンプリングが必要であり，その必要な時間より小さい時間 T_f を1フレームとする．1フレームN個のタイムスロットに分割する．タイムスロット長 T_s は以下のように定義される．

$$T_s = \frac{T_f}{N} \quad (1)$$

またこの場合，機器の制御周期は T_f とする．各タイムスロットで通信可能な機器は1台で，時刻 $t = kT_s$ において，機器 $i(i \in 1, 2, \dots, N)$ は状態情報 $x_i[k]$ をコントローラに送信する．コントローラは受信した状態情報 $x_i[k]$ から操作情報 $u_i[k]$ を算出し，機器に伝送する．状態情報と操作情報の交

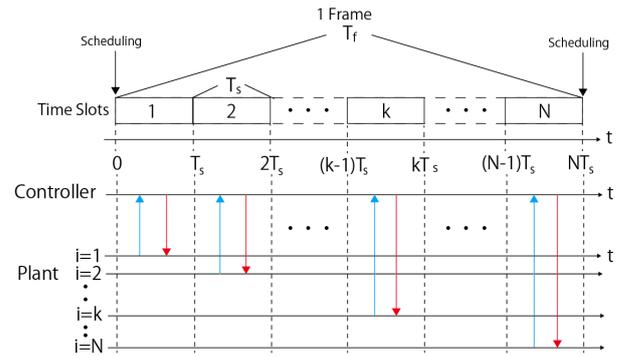


図2 タイムチャート

換は，タイムスロット長 T_s 内で完了する．タイムチャートを図2に示す．コントローラは各フレームごとにスケジューリングを行い各タイムスロットで通信する機器を決定する．機器とコントローラの間には，確率 p でパケットロスが発生する通信路が存在し，時刻 $t = kT_s$ における状態情報 $x_i[k]$ ，操作情報 $u_i[k]$ に対して，通信路通過後の状態情報，操作情報をそれぞれ $\hat{x}_i[k]$ ， $\hat{u}_i[k]$ とする．

機器の状態方程式を以下に示す．

$$\mathbf{x}_i[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}_i[k] + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}_i[k] + \mathbf{w}_i[k] \quad (2)$$

ここで \mathbf{A}, \mathbf{B} は制御対象によって決定される係数行列であり， \mathbf{w}_i は，平均0，共分散行列 \mathbf{W} の加法性外乱である．コントローラではフィードバックされた状態情報 $\hat{x}_i[k]$ と T_s ごとに更新される目標値 $r_i[k]$ から制御情報を以下の式で決定する．

$$\mathbf{u}_i[k] = \mathbf{K}(r_i[k] - \hat{x}_i[k]) \quad (3)$$

ここで \mathbf{K} は下に示す線形二次レギュレータ(LQR)のコスト関数を最小にするフィードバックゲインである[12]．

$$J = E \left[\sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{x}_i[k]^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_i[k] + \mathbf{u}_i[k]^T \mathbf{R} \mathbf{u}_i[k]) \right] \quad (4)$$

ここで \mathbf{Q}, \mathbf{R} は重み行列である．

通信路でパケットロスが発生した場合 $\hat{\mathbf{u}}_i[k]$ は以下のように入力する．

$$\hat{\mathbf{u}}_i[k] = \begin{cases} \hat{\mathbf{u}}_i[k-1] & \text{if packet loss occurs} \\ \mathbf{u}_i[k] & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

各機器は新しい操作情報を受信するまで前回の操作情報を保持する．また，今回は簡単化のため状態情報はパケットロスしないものとしている($\hat{x}_i[k] = x_i[k]$)．

1つのタイムスロットでは1台の機器としか通信できないため，時刻 $t = kT_s$ でコントローラに状態情報を送信できる機器は i のみである．各時刻においてタイムスロットが割り当てられた機器以外の機器 $j(j \neq i)$ の状態情報を知るために，コントローラは，以下の線形モデルを用いて状態情報の予測を行う．

$$\tilde{\mathbf{x}}_j[k] = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_j[k-1] + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}_j[k-1] \quad (6)$$

ここで $\hat{x}_i[k], \hat{u}_i[k]$ はそれぞれ線形モデルを用いた予測値であり、以下の条件に従う。

$$\hat{x}_j[k-1] = \begin{cases} \hat{x}_j[k-1] & \text{if the } (k-1)\text{-th time slot is} \\ & \text{allocated to the plant } j \\ \hat{x}_j[k-1] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{u}_j[k-1] = \begin{cases} \hat{u}_j[k-1] & \text{if the } (k-1)\text{-th time slot is} \\ & \text{allocated to the plant } j \\ \hat{u}_j[k-2] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

3. タイムスロット割当手法

図2に示すように1フレームの最初の時刻にスケジューリングを行い、各タイムスロットで通信する機器を選択する。スケジューリングの時刻を $k_s T_s (k_s = 0, N, 2N, \dots)$ とする。時刻 $k_s T_s$ における1フレームのタイムスロット割当パターンを $\alpha[k_s] = [\alpha[k_s] \ \alpha[k_s+1] \ \dots \ \alpha[k_s+N-1]]$ とする。 $\alpha[k_s]$ は N 個の要素を持ち、 $\alpha[k_s]$ の n 番目の要素 $\alpha[k_s+n-1]$ は1フレームの n 番目のタイムスロットに割り当てられる機器の番号である ($n \in 1, 2, \dots, N$)。最も簡単なタイムスロット割当手法の一つとしてすべての機器に一定の順番でタイムスロットを割り当てる手法があるが、これは $\alpha[k_s] = [1 \ 2 \ \dots \ N]$ となる。

提案手法では以下のコスト関数を定義する

$$J_i[k'] = (\hat{r}_i[k'] - \hat{x}_i[k'])^T \mathbf{Q} (\hat{r}_i[k'] - \hat{x}_i[k']) \quad (9)$$

ここで $k' = k_s, k_s+1, \dots, k_s+N-1$ であり、 $\hat{r}_i[k']$ は $\hat{x}_i[k']$ に基づいて決定される目標値である。操作情報の予測値 $\hat{u}_i[k']$ はタイムスロットが割り当てられた場合 ($\alpha[k'] = i$) でのみ $\hat{u}_i[k'] = \mathbf{K}(\hat{r}_i[k'] - \hat{x}_i[k'])$ によって更新され、それ以外の場合は、 $\hat{u}_i[k'] = \hat{u}_i[k'-1]$ とする。

3.1 1フレームのコスト関数の合計を最小とする割当

提案するタイムスロット割当手法では1フレーム分 $k_s T_s \sim (k_s+N-1)T_s$ までのコスト関数を線形モデルにより予測し、予測したコスト関数を最小にするようなタイムスロット割当パターンを提案する割り当てパターン $\alpha_F[k_s]$ とする。 $\alpha_F[k_s]$ は以下の式で導出される。

$$\alpha_F[k_s] = \arg \min_{\alpha[k_s]} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N J_i[k_s+n-1] \quad (10)$$

これによりどのタイムスロットでどの機器と通信するかが決定される。

3.2 1スロットごとのコスト関数の合計を最小とする割当

1フレームで N 個のタイムスロットを N 台の機器に割り当てるタイムスロット割り当てパターンは N^N 通りある。そのため、4.1節にて提案した1フレームのコスト関数の合計を最小とする割当手法では1回のスケジューリングご

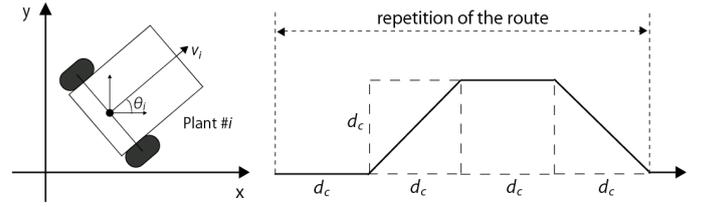


図3 シミュレーションモデル

表1 移動台車の物理パラメータ

Meaning	Symbol	Value
車体の重量 [kg]	M	0.91
タイヤの重量 [kg]	m	0.026
タイヤ半径 [m]	r	0.025
車体重心からタイヤまでの距離 [m]	l	0.094
モータートルク定数 [Nm/A, Vs/rad]	k_T	6.1×10^{-4}
粘性摩擦抵抗	c	1.0×10^{-5}

とに N^N 通りの試行を必要とするため、 N が大きくなった場合計算コストが非常に大きくなってしまふ。そこで計算コストが小さい手法として1スロットごとのコスト関数の合計を最小とする割当手法を提案する。この手法では1スロットずつ順に割当を決めていく。各スロットごとにコスト関数を最小にするようなタイムスロット割当 $\alpha_S[k_s]$ を以下の式で導出する。

$$\alpha_S[k_s+n-1] = \arg \min_{\alpha[k_s+n-1]} \sum_{i=1}^N J_i[k_s+n-1] \quad (11)$$

subject to

$$\alpha[k_s] = \alpha_S[k_s],$$

$$\alpha[k_s+1] = \alpha_S[k_s+1],$$

$$\vdots$$

$$\alpha[k_s+n-1] = \alpha_S[k_s+n-1]$$

1フレームのコスト関数の合計を最小とする割当手法がスケジューリングごとに N^N 通りの計算を必要としたことに対し、1スロットごとのコスト関数の合計を最小とする割当手法では N^2 通りの計算を必要とする。そのため N が大きい場合大幅に計算量を削減できる。

4. 性能評価

4.1 シミュレーション諸元

計算機シミュレーションにより、提案手法の性能評価を行う。制御対象は移動台車を用い、1台のコントローラで複数の移動台車を制御する。移動台車は図3に示されるような2次元座標上の経路を走行する。移動台車の物理パラメータを表1に示す。移動台車の状態量 $x_i[k] = [v_i[k] \ \theta_i[k] \ \dot{\theta}_i[k]]^T$ であり、ここで $v_i[k]$ は移動台車の速度、 $\theta_i[k]$ は x 軸に対する角度、 $\dot{\theta}_i[k]$ は角速度である。操作情報 $u_i[k] = [u_{Ri}[k] \ u_{Li}[k]]^T$ であり、ここで $u_{Ri}[k]$ は移動台車の右モータへの入力電圧、 $u_{Li}[k]$ は左モータへの入力電圧である。移動台車の離散時間状態空間モデルは次式で表現される。

$$\begin{bmatrix} v_i[k+1] \\ \theta_i[k+1] \\ \dot{\theta}_i[k+1] \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} v_i[k] \\ \theta_i[k] \\ \dot{\theta}_i[k] \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_{Ri}[k] \\ u_{Li}[k] \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、係数行列 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} は以下の式で定義される。

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_c T_s} \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}_c \tau} d\tau \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \frac{-2c}{(M+2m)r^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-2c}{(M+2m)r^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \frac{k_T}{(M+2m)r} & \frac{k_T}{(M+2m)r} \\ 0 & 0 \\ \frac{k_T}{(M+2m)r} & \frac{-k_T}{(M+2m)r} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで、 M は車体の重量、 m はタイヤ重量、 r はタイヤ半径、 l は車体重心からタイヤまでの距離、 k_T はモータトルク定数、 c は粘性摩擦抵抗である。LQRの重み行列 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} は以下に定義する。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 30.0 & 0 \\ 0 & 0 & 10.0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 60.0 & 0 \\ 0 & 60.0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

制御対象に加わる外乱の共分散行列 \mathbf{W} は以下に定義する。

$$\mathbf{W} = \mathbf{Q}\sigma^2 \quad (19)$$

ここで σ^2 は外乱の大きさを表すパラメータとする。

初期位置は経路上の $(x,y) = (0, 0.1l_i)$ とし、 l_i は1から N のランダムに選ばれる自然数である。移動台車の目標速度 v_i は一定である。移動台車は一定間隔で目標角度を変化させながら走行する。そのため、 $r_i[k]$ は時間で変化するパラメータであり、周期的に変化する。詳細は付録に示す。

シミュレーション諸元を表2に示す。今回、シミュレーションにおいて3つの手法について評価を行う。提案手法としての1フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法と1スロットのコスト関数を最小にする割当手法、そしてすべての機器と一定の順番に通信する手法 ($\alpha[k_i] = [1 \ 2 \ \dots \ N]^T$) である。この3つの手法に対し、外乱のパラメータ $\sigma^2 = 10^{-10}$ の場合と、 $\sigma^2 = 10^{-5}$ の2つの場合についてパケットロスが発生する通信路において、機器の台数が3台、4台、5台の場合の追従誤差を評価する。追従誤差を以下に定義する。

$$E[k] = \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_i[k-1] - \mathbf{x}_i[k])^T \mathbf{Q} (\mathbf{r}_i[k-1] - \mathbf{x}_i[k]) \quad (20)$$

表2 シミュレーション諸元

Meaning	Symbol	Value
制御対象の台数	N	3,4,5
タイムスロット長 [s]	T_s	0.05
パケットロス率	p	0.001 ~ 0.5
外乱パラメータ	σ^2	$10^{-5}, 10^{-10}$
移動台車の目標速度 [m/s]	v_i	0.06
移動台車の初速度 [m/s]	$v_i[0]$	0.0
移動台車の初期角度 [rad]	$\theta_i[0]$	0.0
移動台車と仮想点間距離のパラメータ	β, γ	0.25, 200
経路切り替え間隔 [m]	d_c	1.0
試行時間 [s]	-	1000
試行回数	-	100

4.2 シミュレーション結果と考察

シミュレーション結果を図4,5に示す。実線は1フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法、破線は1スロットのコスト関数の合計を最小にする割当手法、点線はすべての機器と一定の順番に通信するタイムスロット割り当て手法である。

図4の(a)は制御対象が3台,(b)は4台,(c)は5台の $\sigma^2 = 10^{-10}$ におけるパケットロス率に対する追従誤差の平均値を表している。これより提案手法がすべての機器と一定の順番に通信する手法と比較して追従誤差を低減できていることが分かる。また1フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法が1スロットのコスト関数の合計を最小にする割当手法とほぼ同等の性能を示していることが分かる。

図5の(a)は3台,(b)は4台,(c)は5台の $\sigma^2 = 10^{-5}$ におけるパケットロス率に対する追従誤差の平均値を表している。パケットロス率が小さい領域では提案手法が従来より劣化している。これは外乱が大きいことによる予測の不十分さが原因である。しかしパケットロスが大きい領域では提案手法が従来手法より優れている。またパケットロス率が小さい領域では1スロットのコスト関数の合計を最小にする割当手法が1フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法と比較して優れているが、パケットロスの影響が支配的な領域では1フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法が優れている。提案手法のこのような性能を調べるために、以下の外乱を完全に予測できるがパケットロスを予測できないモデルとパケットロスを完全に予測できるが外乱を予測できないモデルを定義する。

$$\tilde{\mathbf{x}}_j[k+1] = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_j[k] + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}_j[k] + \mathbf{w}_j[k] \quad (21)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_j[k+1] = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_j[k] + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}_j[k - \gamma[k]] \quad (22)$$

ここで、 $\gamma[k] \in \{0, 1\}$ は時刻 kT_s におけるパケットロスの有無である。機器の台数が5台の $\sigma^2 = 10^{-5}$ のとき、外乱を予測できるモデルを用いて予測を行った場合の結果を図6の(a)に、パケットロスを予測できるモデルを用いて予測

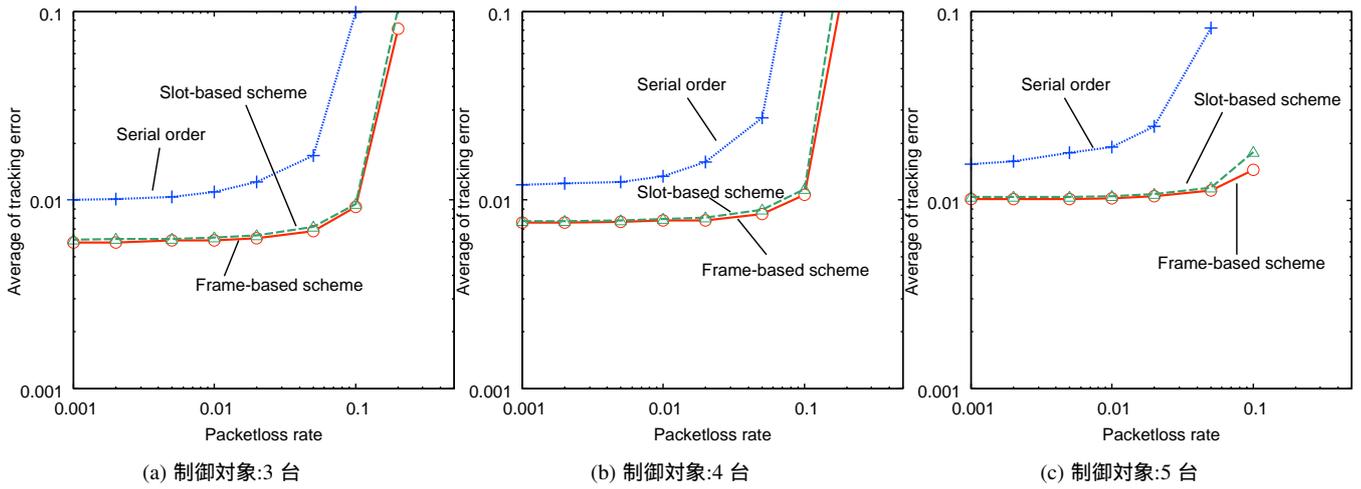


図4 追従誤差の平均値 $\sigma^2 = 10^{-10}$

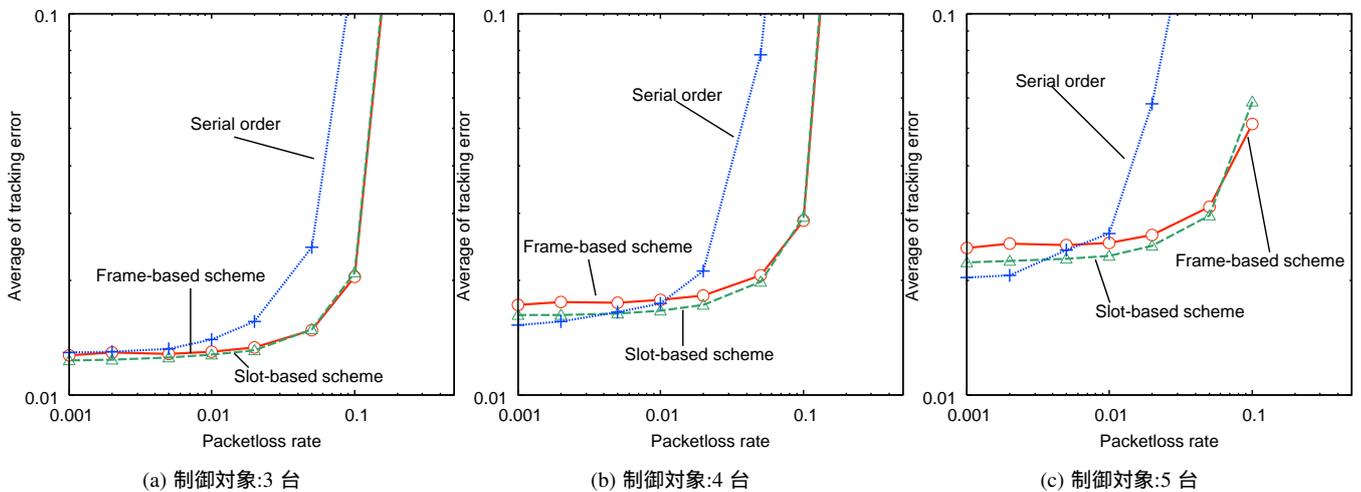


図5 追従誤差の平均値 $\sigma^2 = 10^{-5}$

を行った場合の結果を (b) にそれぞれ示す。図 6(a) より、外乱が予測できる場合外乱が大きい場合でも 1 フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法が 1 スロットのコスト関数の合計を最小にする割当手法より優れていることが分かる。図 6(b) より、パケットロスが予測できる場合は、パケットロス率が大きい領域でも 1 フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法が悪くなっている。これより 1 フレームのコスト関数の合計を最小にする割当手法が外乱の影響により劣化しやすいことがわかる。

5. まとめ

本稿では、TDMA を用いた複数機器の無線フィードバック制御において、線形モデルによる制御目標と状態情報の差の予測に基づくタイムスロット割り当て手法を提案し、シミュレーションによる評価を行った。提案手法はすべての機器と一定の順番に通信する手法と比較して、外乱が小さい場合、追従誤差を低減できることを示した。しかし外乱が大きく、線形モデルによる予測が不十分になる場合、パケットロス率が小さい領域で提案手法が劣化してしまうことが分かった。

謝辞 本研究を進めるにあたり、適切なアドバイスと有意義な議論を頂いた名古屋大学教養教育院山里敬也教授、名古屋大学工学研究科道木慎二教授に感謝する。本成果の一部は、JSPS 科研費 (若手 (B)) [15K21071]、および住友財団環境研究助成を受けて行われたものである。

付 録

移動台車は 2 次元座標上の定められた経路上を動く仮想点に追従することで経路を走行する。各移動台車が追従する仮想点 $(x, y) = (p_i[k], q_i[k])$ を以下に示す。

$$q_i[k] = \begin{cases} 0 & \text{if } 4ad_c \leq p_i[k] \leq (4a+1)d_c \\ s_i[k] - (a+1) & \text{if } (4a+1)d_c \leq p_i[k] \leq (4a+2)d_c \\ d_c & \text{if } (4a+2)d_c \leq p_i[k] \leq (4a+3)d_c \\ d_c - s_i[k] + (a+3) & \text{if } (4a+3)d_c \leq p_i[k] \leq (4a+4)d_c \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

ここで $a (= 0, 1, 2, \dots)$ は整数、 d_c は経路切り替え間隔である。また $s_i[k]$ は以下の式で更新されるパラメータであり [13]、以下の式で更新される。

$$s_i[k+1] = s_i[k] + \dot{s}_i[k]T_s \quad (\text{A.2})$$

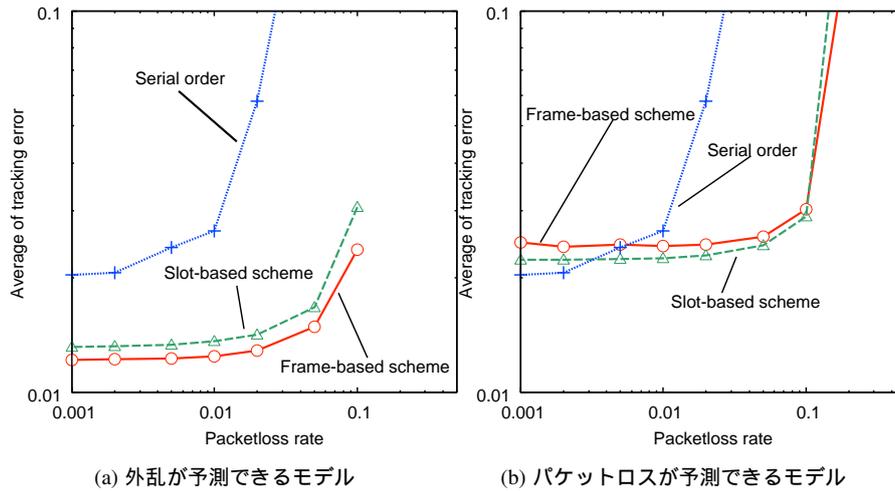


図6 外乱とパケットロスが提案手法に与える影響の評価 (制御対象: 5台, $\sigma^2 = 10^{-5}$)

$$\hat{s}_i[k] = \frac{\beta e^{-\gamma d_i[k]} v_t}{\sqrt{\dot{p}_i^2[k] + \dot{q}_i^2[k]}} \quad (\text{A.3})$$

β, γ は移動台車と仮想点間の距離を一定に保つためのパラメータ, v_t は移動台車の目標速度である. また, $d_i[k] = \sqrt{(p_i[k] - x_i[k])^2 + (q_i[k] - y_i[k])^2}$ は仮想点と移動台車間の距離であり, $(x_i[k], y_i[k])$ は, 移動台車の2次元座標である. 以上より制御目標値 $\mathbf{r}_i[k]$ は以下のように導出される.

$$\mathbf{r}_i[k] = \begin{bmatrix} v_t \\ \phi_i[k] \\ \dot{\phi}_i[k] \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

ここで, 目標角度 $\phi_i[k] = \arctan(\frac{q_i[k] - y_i[k]}{p_i[k] - x_i[k]})$, 目標角速度 $\dot{\phi}_i[k] = (\phi_i[k] - \theta_i[k])/T_f$ である.

参考文献

[1] R. Kohno, M. Katayama, and S. Hara, "Starting a new professional study group on highly reliable robust radio Controlling(RRRC), IEICE Fundamentals review, vol.4, no.2, pp.143-146, Oct. 2010.

[2] L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak, "Network-Induced constraints in networked control systems-A survey," IEEE Trans. Ind. Informat., vol.9, no.1, pp.403-416, Feb. 2013.

[3] V. C. Gerhard, and G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," IEEE Trans. Ind. Electro., vol.56, no.10, pp.4258-4265, Oct. 2009.

[4] 片山正昭, "[基調講演] 高信頼性制御通信研究への招待 -その意義と魅力-, IEICE Technical Report, RCC2014-4, pp.13-16, 2014.

[5] D. E. Quevedo, E. I. Silva and G. C. Goodwin, "Control over unreliable networks affected by packet erasures and variable transmission delays," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 26, no. 5, pp.672-685, May. 2008.

[6] J. Wang, B. X. Shi, J.J. Bai, J. F. Gao, and X. S. Fang, "Stabilization of a wireless networked control system with packet loss and time delay: an ADS approach," Journal of Control Science and Engineering, vol.2012, Jan. 2012.

[7] C. D. L. Cruz, and R. Carelli, "Dynamic model based formation control and obstacle avoidance of multi-robot systems,"

Robotica: Cambridge University Press pp. 1-12. 2008.

[8] B. M. Braum, G. Starr, J. E. Wood, and R. Lumia, "A framework for implementing cooperative motion on industrial controllers," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 20, no. 3, pp. 583-589. June. 2004.

[9] A. Tanaka, K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, "A Study on the Reduction of Synchronization Error using a Relay of Predictive Control Information in Wireless Control of Multiple Plants," IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SP1-I.4, pp.150-154, Dec. 2013.

[10] M. Fujiwara, and S. Hara, "A modest CSMA for control over wireless," 2012 IEEE Int. Conf. Communication Systems(ICCS), pp.373-377, Nov. 2012.

[11] 稲富 優也, 石井 光治, "優先制御を取り入れた時分割無線制御の方法に関する一検討," IEICE Technical Report RCC2014-67, pp.13-18, Jan. 2015.

[12] 佐藤和也, 下本陽一, 熊澤典良, "はじめての現代制御理論", 講談社, 2012

[13] M. Egerstedt, and X. Hu, "A hybrid control approach to action coordination for mobile robots," Autotica, vol.38, issue.1, pp. 125-130. Jan. 2002.