

IEEE 802.15.4 ビーコンモードを用いた 複数機器無線制御の多元接続方式に関する一検討

植松 悠至¹ 小林 健太郎² 岡田 啓² 片山 正昭²

概要: 1 台のコントローラで複数機器を無線通信により制御する場合、共通の通信路を複数の機器それぞれのための通信回線に分割する多元接続技術が必要である。IEEE 802.15.4 のビーコンモードでは多元接続方式に carrier sense multiple access/collision avoidance(CSMA/CA) 方式と time division multiple access(TDMA) 方式を併用している。CSMA/CA 方式によって通信を行う期間 contention access period(CAP) と TDMA 方式によって通信を行う期間 contention free period(CFP) が定められており、無線制御に適用する上で、多元接続方式が異なる 2 つの期間をどのように使うかの検討が必要である。そこで、本稿では、IEEE 802.15.4 ビーコンモードを適用した複数機器無線制御システムにおいて、通信の成否と制御対象の目標値との誤差に基づいて、CAP と CFP に各機器を割り当てる手法を提案し、その有効性を示す。

キーワード: 無線制御, 複数機器制御, IEEE 802.15.4, 多元接続方式

A Study on Multiple Access Schemes for Multiple Plant Control with the IEEE 802.15.4 Beacon-enabled Mode

YUSHI UEMATSU¹ KENTARO KOBAYASHI² HIRAKU OKADA² MASAOKI KATAYAMA²

Abstract: In wireless feedback control systems with multiple plants, a multiple access technique is required. The IEEE 802.15.4 beacon-enabled mode has a contention access period (CAP) and a contention free period (CFP). In the CAP, carrier sense multiple access/collision avoidance (CSMA/CA) is used. In the CFP, time division multiple access (TDMA) is used. To enable wireless control over the IEEE 802.15.4 beacon-enabled mode, it is required to consider how to use the CAP and the CFP. In this paper, we propose two schemes that assign the plants to the CAP and the CFP on the basis of communication success/failure and that of control error between state information and the target value for wireless control over the IEEE 802.15.4 beacon-enabled mode. We show that the proposed schemes improve the quality of an overall plant control.

Keywords: networked control, control of machines, IEEE 802.15.4, multiple access scheme

1. はじめに

工場などのオートメーション化や複数ロボットの制御、スマートグリッドなどにおいて、有線に比べ利便性の高い無線制御の必要性が高まりつつある [1] [2]。また、産業機

器への適用だけでなく、医療、防災、屋内環境制御などの幅広い分野への応用が期待されている [3]。1 台のコントローラで複数の機器を無線通信により制御する場合、多元接続技術が必要である。多元接続方式には様々な種類が存在し、多元接続方式の種類が制御対象全体の制御品質に大きく影響を与えることがわかっている [4] [5]。そのため複数機器の無線制御に適した多元接続方式の検討が必要となる。本研究では、IEEE 802.15.4 [6] を適用した無線制御について検討する。IEEE 802.15.4 は無線 Personal Area Network(PAN) の代表的な通信規格である。IEEE 802.15.4

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

は定期的にセンサで観測したデータの収集やセンサを制御するためのデータの送信に適している．IEEE 802.15.4 の重要な特徴の1つとしてビーコンモードがある．ビーコンモードはスーパーフレームと呼ばれる時間軸構造から構成されており，スーパーフレームはCAPとCFPに分割される．CAPでは，多元接続方式にCSMA/CAを用いており，CFPでは，TDMAを用いている．IEEE 802.15.4 ビーコンモードを無線制御に適用するためには，多元接続方式が異なるCAPとCFPをどのように使用するかの検討が必要である．

IEEE 802.15.4 を無線制御に適用した先行研究はいくつか存在する．[7]では，外乱の影響を抑制するためにコントローラは1台の機器とCAPとCFPの両方で通信を行う手法を提案している．また，[8]では，IEEE 802.15.4 をベースとしたTDMAのみのプロトコルを提案している．これらの手法では，上位層である制御レイヤの情報を用いていない．また，[9]では，通信レイヤと制御レイヤの同時設計を提案している．[10]では，CAPでのCSMA/CAのランダムな待ち時間に制御レイヤの情報に基づいた優先度を与えることで効率的な通信を行なっている．しかしながら，これらの手法では，CAPとCFPをどのように用いるかについては検討していない．

本稿では，IEEE 802.15.4 ビーコンモードを適用した複数機器無線制御において，通信レイヤと制御レイヤの情報を基にしたCAPとCFPに各機器を割り当てる手法を提案する．また，提案手法が制御対象全体の制御品質を向上できることを示し，さらに，通信レイヤを基にした割り当て手法より制御レイヤを基にした手法のほうが制御品質の向上が大きいことを示す．

2. システムモデル

2.1 複数機器無線フィードバック制御システム

複数機器での動作を行うモデルとして，図1のように制御対象が N 台の制御システムを考える．各制御対象は共通の無線通信路を通じて時刻 $t = kT_s (k = 0, 1, 2, \dots)$ における状態情報 $\mathbf{x}_i[k]$ をコントローラへ送信する．ここで， $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ はそれぞれの制御対象を表す．離散時間における制御対象の状態方程式は

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

と表せる．ここで， $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i$ は制御対象によって決定される係数行列である．ただし， $\hat{\mathbf{x}}_i[k], \hat{\mathbf{u}}_i[k]$ は無線通信路通過後の状態情報と操作情報である．

また，各制御対象からコントローラに状態情報がフィードバックされる．コントローラ側では， $\mathbf{r}_i[k]$ と $\mathbf{u}_i[k-1]$ ，制御対象よりフィードバックされた状態情報 $\hat{\mathbf{x}}_i[k-1]$ より $\mathbf{u}_i[k]$ が以下の式により生成される．

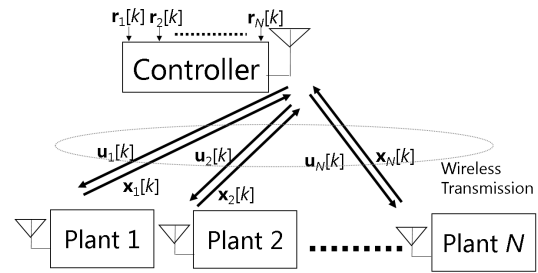


図1 複数機器無線制御システム

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

ここで， \mathbf{K}_i はフィードバックゲインであり，線形2次形式最適レギュレータの手法[11]を用いて以下の目的関数 J を最小にするように決定される．

$$J = E \left[\sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{x}_i[k]^T \mathbf{Q}_i \mathbf{x}_i[k] + \mathbf{u}_i[k]^T \mathbf{R}_i \mathbf{u}_i[k]) \right] \quad (3)$$

ただし， $\mathbf{Q}_i, \mathbf{R}_i$ は制御対象の状態と制御対象の入力に掛かる重み行列である．以上の手順をサンプリング時間 T_s ごとに繰り返す．

複数機器無線フィードバック制御システムでは，コントローラと各制御対象が単一の無線通信路を用いて状態情報と操作情報の送受信を行うため，パケット同士の衝突やパケット到達時間の遅延により T_s 内の操作情報や状態情報の伝送に失敗するが発生する．コントローラが状態情報を T_s 内に受け取れなかった場合，コントローラは前時刻 $k-1$ の値を用いて，制御対象の状態方程式に基づき状態情報を計算する．

$$\hat{\mathbf{x}}_i[k] = \begin{cases} \mathbf{x}_i[k] & \text{if received successfully} \\ \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_i[k-1] + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i[k-1] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

一方，制御対象が操作情報を T_s 内に受け取れなかった場合，制御対象は操作情報の入力を行わない．

$$\hat{\mathbf{u}}_i[k] = \begin{cases} \mathbf{u}_i[k] & \text{if received successfully} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 IEEE 802.15.4 を適用した複数機器無線制御

IEEE 802.15.4 ビーコンモードでは，コーディネータは周期的にビーコンをデバイスに送信する．デバイスはビーコンを受信することによってコーディネータと同期を行う．想定システムでは，コーディネータとデバイスをコントローラと制御対象であるとそれぞれ考える．

IEEE 802.15.4 ビーコンモードでは，スーパーフレームが時間軸で構成されている．図2に示すように，それぞれのスーパーフレームはCAPとCFPから構成されている．スーパーフレーム期間：superframe duration(SD)とビーコン間隔：beacon interval(BI)はsuperframe order(SO)とbeacon order(BO)で決められる．SOとBOは， $0 \leq SO \leq BO \leq 14$

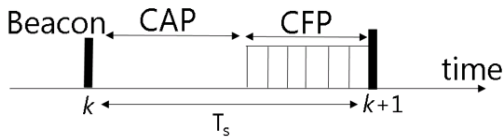


図2 スーパーフレーム構造

の不等式を満足するように設定される．SD の長さ と BI の長さは以下の式により決定する．

$$SD = aBaseSuperFrameDuration \times 2^{S^O} \quad (6)$$

$$BI = aBaseSuperFrameDuration \times 2^{B^O} \quad (7)$$

ここで， $aBaseSuperFrameDuration$ は 15.36 [ms] である．

また，サンプリング (制御) 周期はビーコン間隔と同期させる．つまり，各制御対象はコントローラから送信されたビーコンに同期して操作情報の入力と状態情報の取得を行うものとする．したがって，各制御対象は状態情報の送信と操作情報の受信をビーコン間隔以内に少なくとも 1 回行う必要がある．コントローラはビーコンごとに各機器の CAP と CFP の割り当て方を計算する．割り当て方の情報はビーコンに含まれる．IEEE 802.15.4 規格で決められているように，以下で述べる手順に従って，コントローラは制御対象に操作情報の送信と制御対象から状態情報の受信を T_s 以内に行う．

CAP に割り当てられた機器は CSMA/CA により状態情報の送信を行う．通信を行いたい機器はランダムな待ち時間の後にキャリアセンスを行う．他の機器が通信を行っていないならば通信を開始し，通信が行われていれば再度ランダムな待ち時間を設け，その後もう一度キャリアセンスを行う．その後，状態情報の送信に成功した機器は CSMA/CA により送信要求パケットを送信する．コントローラは送信要求パケットを受信するとすぐに操作情報の送信を行う．また，通信成功時に ACK を返信することでコントローラ・制御対象ともに通信の成否を判断する．ACK が返信されなかった場合は，再度ランダムな待ち時間を設けてからキャリアセンスを行う．状態情報の送信と操作情報の受信を終えた機器は次のビーコンを受信するまではコントローラと通信を行わない．状態情報の送信と操作情報の受信が完了していない機器は再送を繰り返す．

CFP は CAP が終了直後から始まる期間である．CFP に割り当てられた機器は TDMA により状態情報の送信と操作情報の受信を行う．コントローラと機器はそれらに割り当てられたスロット順に状態情報と操作情報の送受信を行う．CFP で利用可能なスロットは最高 7 個までである．CFP に割り当てられた機器は状態情報の送信と操作情報の受信にスロットを 1 つずつ使用する．したがって，CFP に割り当て可能な機器の台数は最高 3 台である．すなわち，CFP で利用するスロットは 6 スロットである．

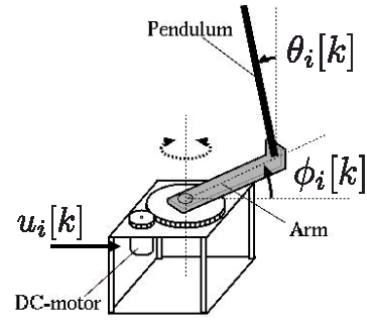


図3 回転型倒立振り子

3. CAP と CFP の割り当て手法

CAP に割り当てられた機器は CSMA/CA を用いているので，コントローラとの通信は不確実である．一方で，CFP に割り当てられた機器は TDMA を用いているので，コントローラとの通信は確実である．各機器の CAP と CFP の割り当て方が，制御対象全体の制御品質へ影響を与えることがわかる．そこで，本稿では CAP と CFP への割り当て手法を 2 つ提案する．1 つは前スーパーフレームの通信の成否に基づく手法で，もう 1 つは制御対象の目標値との誤差に基づく手法である．

3.1 通信レイヤに基づく割り当て手法

通信を失敗した機器は次の CFP でコントローラと確実に通信を行う必要があるという点にこの手法は着目する．時刻 $k-1$ で，操作情報の受信に失敗した機器が生じた場合，そのような機器の内最高 3 台までをコントローラはランダムに選択し，次の時刻 k ではその 3 台の機器を CFP に割り当てる．それ以外の機器は CAP に割り当てられる．

3.2 制御レイヤに基づく割り当て手法

制御対象の誤差が大きい機器は次の CFP でコントローラと確実に通信を行う必要があるという点にこの手法は着目する．コントローラはそれぞれの機器の目標値と時刻 $k-1$ で受信した状態情報との誤差を計算し，比較する．目標値との誤差を $(\hat{x}_i[k-1] - r_i[k-1])^T W_i (\hat{x}_i[k-1] - r_i[k-1])$ として定義する．ここで， W_i は重み行列である．コントローラはその誤差が大きい順から最大 3 台の機器を時刻 k で CFP に割り当て，それ以外の機器を CAP に割り当てる．

4. 数値例

シミュレーションによって提案した割り当て手法の性能評価を行う．本研究では，制御対象の一例として図 3 の回転型倒立振り子を取り上げる．アームを回転させるための DC モータに電圧 $u(t)$ を入力として与えることで，振り子を制御する．状態 $\mathbf{x}(t)$ を

$$\mathbf{x}(t) = [\theta(t) \ \phi(t) \ \dot{\theta}(t) \ \dot{\phi}(t)]^T \quad (8)$$

表1 回転倒立振子のパラメータ

Meaning	Symbol	Value
振り子の質量	m	0.016[kg]
振り子の長さ	l	0.20[m]
アームの長さ	r	0.20[m]
アームの中心回りの慣性モーメント	J	0.0048[kgm ²]
モータトルク直流抵抗	R	8.3[Ω]
モータトルク定数	K_m	0.023[Nm/A, Vs/rad]
ギア比 (アーム : DC-モーター)	K_g	7.5 (120:16)
重力加速度	g	9.81[m/s ²]

表2 シミュレーション諸元

物理層/MAC層	IEEE 802.15.4
SO	1
BO	1
サンプリング (制御) 周期 (T_s)	30.72[ms]
状態情報パケット長	19[byte]
操作情報パケット長	16[byte]
制御対象の台数	5-12[台]
シミュレーション時間	150[s]
試行回数	1000[回]

とすると、振り子の運動方程式は次式となる [12] .

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) \quad (9)$$

ここで、行列 \mathbf{A}_c , \mathbf{B}_c は、

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2g \frac{J + mr^2}{lJ} & 0 & 0 & \frac{2rK_g^2 K_m^2}{RlJ} \\ -\frac{mrg}{J} & 0 & 0 & -\frac{K_g^2 K_m^2}{RJ} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{2rK_g K_m}{RlJ} \\ \frac{K_g K_m}{RJ} \end{bmatrix} \quad (10)$$

である。回転倒立振子の振り上げ棒の質量を m [kg]、振り上げ棒の長さを l [m]、アームの回転軸周りの慣性モーメントを J [kgm²]、アームの長さ r [m]、重力角速度を g [m/s²]、DCモータのトルク直流抵抗を R [Ω]、ギア比を K_g 、DCモータトルク定数を K_m [Nm/A, Vs/rad] とする。これより、離散時間の状態空間モデルは、サンプリング周期を T_s 、状態情報 $\mathbf{x}[k] = \mathbf{x}(kT_s)$ とすると、

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}\mathbf{u}[k] \quad (11)$$

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_c T_s} \quad \mathbf{B} = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}_c \tau} \mathbf{B}_c d\tau \quad (12)$$

となる。

表1, 2に、回転倒立振子のパラメータとシミュレーション諸元をそれぞれ示す。回転倒立振子のパラメータは REALTEC 社製 RTC05 [12] に基づいている。それらのパラメータを用いて、フィードバックゲインの重み行列 \mathbf{Q}_i , \mathbf{R}_i は、

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_i = [0.05] \quad (13)$$

とする。初期状態として、振子を倒立した状態 ($\mathbf{x}_i[0] = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$) とし、振子の倒立を保ちつつアームを目標値に近づけるよう制御する。このとき、離散化された目標値 $\mathbf{r}_i[k]$ は

$$\mathbf{r}_i[k] = [0 \ \Phi_i[k] \ 0 \ 0]^T \quad (14)$$

となる。制御対象のアームの角度の目標値 $\Phi_i[k]$ は

$$\Phi_i[k] = \begin{cases} \pi/2 & (n-1)T \leq kT_s < nT/2 \\ 0 & nT/2 \leq kT_s < nT \end{cases} \quad (15)$$

とし、アームの角度の目標値は5秒ごとに切り替わるとする ($T = 10$ [s])。 N 台の制御対象が同時に同じ動作を行う場合 ($\mathbf{r}_1[k] = \mathbf{r}_2[k] = \dots = \mathbf{r}_N[k]$) を考える。振り子の転倒条件は $|\theta| > \pm\pi/6$ とし、複数台の振り子のうち1台でも転倒した場合はその回の試行を終了する。

制御品質として追従性、安定性について制御対象の台数を変化させて評価を行う。追従性の評価としてアームの位置誤差を用いる。アームの位置誤差とは、各制御対象の通信の失敗がない場合のアームの角度と実際のアームの角度の平均二乗平方根誤差 (RMSE) を N 台全ての制御対象で平均をとったものである。また、安定性の評価として振り子の転倒率を用いる。通信レイヤに基づく提案手法と制御レイヤに基づく提案手法をランダム割り当てと比較して評価する。ランダム割り当てとは、各機器を CAP と CFP にランダムに割り当てるものである。

4.1 通信レイヤに基づく割り当て手法の制御品質評価

図4に追従性の比較評価の結果を、図5に安定性の比較評価の結果を示す。横軸は制御対象の台数である。図4で示されているように、通信レイヤに基づく割り当て手法はランダム割り当てと比較してアームの位置誤差を減少させている。さらに、図5から、安定に制御可能な機器の数が増加していることがわかる。これは提案手法が T_s 以内でのコントローラとの通信に連続して失敗する機器の発生を抑えたためである。したがって、この提案手法によって追従性と安定性が向上することがわかる。

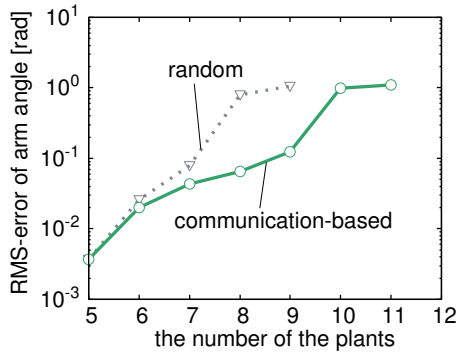


図4 アームの位置誤差

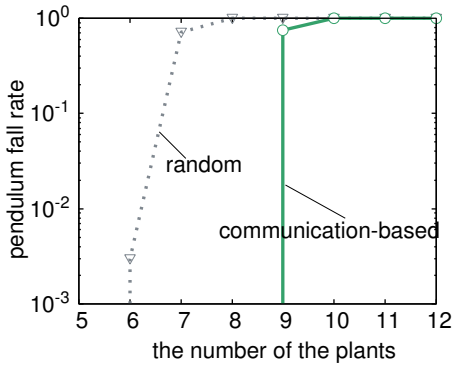


図5 転倒率

4.2 制御レイヤに基づく割り当て手法の制御品質評価

制御レイヤに基づく割り当て手法として2種類の手法を評価する．1つは制御対象の目標値との誤差を $|\phi_i[k] - \Phi_i[k]|^2$ として計算する．すなわち，重み W_i は

$$W_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

とする．また，もう1つは制御対象の目標値との誤差を $|\theta_i[k]|^2$ として計算する．すなわち，重み W_i は

$$W_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

とする．これらをそれぞれアームの角度に基づく割り当て手法と振り子の角度に基づく割り当て手法とする．

図6に追従性の比較評価の結果を，図7に安定性の比較評価の結果を示す．横軸は制御対象の台数である．図6と図7からアームの角度に基づく割り当て手法において追従性・安定性ともに向上は見られなかった．これは最も重要な制御目標はアームを目標値に近づけることではなく，振り子の倒立を保つことだからである．図6から分かる通り，振り子の角度に基づく割り当て手法はランダム割り当てやアームの角度に基づく手法と比較してアームの位置誤差を減少させている．図7から，この提案手法によって安定に

制御可能な機器の台数も増加していることがわかる．振り子の角度に基づく手法では，不安定な機器をCFPで確実にコントローラと通信させることが可能である．したがって，この提案手法によって追従性と安定性が向上している．

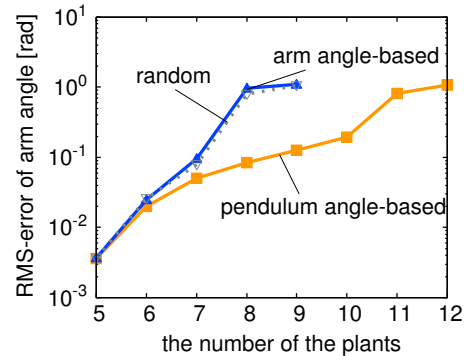


図6 アームの位置誤差

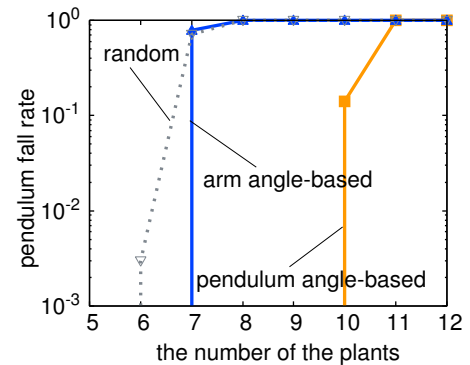


図7 転倒率

4.3 2つの提案手法の比較評価

通信レイヤに基づく割り当て手法と振り子の角度に基づく割り当て手法の制御品質の比較評価を行う．追従性の評価を図8に，安定性の評価を図9に示す．これらの結果から，通信の失敗を補償するよりも制御対象の目標値との誤差を抑えるほうが制御対象全体の制御品質の向上は大きいことがわかる．

5. まとめ

本稿では，IEEE 802.15.4 ピーコンモードを適用した複数機器無線制御について検討し，制御品質を向上させるためにCAPとCFPに各機器を割り当てる手法を提案した．前時刻の通信の成否に基づく割り当て手法と制御対象の目標値との誤差に基づく割り当て手法が制御対象全体の制御品質を向上させることを示した．さらに，後者の制御レイヤに基づく手法の方が通信レイヤに基づく手法に比べて制御品質の向上がより大きいことを示した．

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，

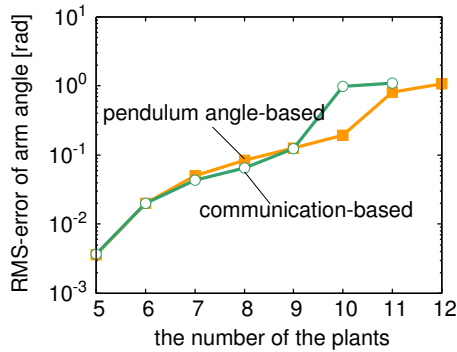


図8 アームの位置誤差

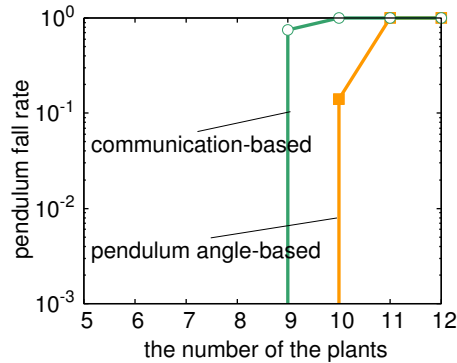


図9 転倒率

- [9] P. Park, J. Araujo, and K. H. Johansson, "Wireless networked control system co-design," in Proc. IEEE Int. Conf. Network. Sens. Control, Apr. 2011, pp.486-491.
- [10] 藤原, 原, "制御における無線通信の利点を利用した CSMA 方式のバックオフ時間制御法," IEICE, RRRC2012-3, pp.S-48-S-49
- [11] N. Ploplys, "Wireless feedback control of mechanical systems," Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Illinois, Champaign, IL, 2003.
- [12] "RealTEC. Rotary Inverted Pendulum RTC05 [Online].," <http://www.011.upp.so-net.ne.jp/realtec/rec05.pdf>

名古屋大学工学研究科道木慎二教授に感謝する。本研究の一部は、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。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems," in Proc. of the IEEE, vol.95, No.1, pp.138-162, Jan. 2007.
- [2] 河野, 片山, 原, "「制御」と「通信」の融合領域における研究開発と産業化をプロモートする「高信頼性制御通信研究会 (RRRC)」発足," IEICE Fundamentals review, vol.2010-4, No.2, pp143-146, 2010 年 10 月
- [3] L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak, "Network-Induced Constraints in Networked Control Systems — A Survey," IEEE Trans. Ind. Infor., vol.9, no.1, pp.403-416, Feb.2013.
- [4] X. Liu, and A. Goldsmith, "Wireless Medium Access Control in Networked Control Systems," in Proc. 2004 American Control Conf., vol.4, pp.3605-3610, Jun. 2004.
- [5] A. Cervin, and T. Henningsson, "Scheduling of Event-Triggered Controllers on a Shared Network," in Proc. 47th IEEE Conf. on Decision Control, pp.3601-3606, Dec. 2008.
- [6] IEEE 802.15.4 Standard-2006 "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANS)," IEEE SA Standards Board, 2006.
- [7] J. Araujo, M. Mazo, A. Anta, P. Tabuada, and K. Johansson, "System Architectures, Protocols and Algorithms for Aperiodic Wireless Control Systems," IEEE Trans. Ind. Informat., vol.10, no.1, pp.175-184, Feb.2014.
- [8] M. Anwar, Y. Xia, and Y. Zhan, "TDMA-Based IEEE 802.15.4 for Low-Latency Deterministic Control Applications," IEEE Trans. Ind. Informat., vol.12, no.1, pp.338-347, Feb.2016.