

制御理論を用いた通信ネットワークの 資源管理技術

—光グリッドとコグニティブ無線—

Resource Management Methods Based on Control Theory for Communication Networks:
Optical Grid and Cognitive Wireless Networks

橘 拓至 Takuji TACHIBANA
中村幸紀 Yukinori NAKAMURA

小木曾公尚 Kiminao KOGISO

アブストラクト 近年、高信頼な遠隔制御をターゲットとした通信技術の確立が重要となっており、制御理論を利用した通信ネットワークの研究が注目されている。特に、パケット損や遅延を考慮したネットワーク化制御の研究や通信品質を考慮したデータ伝送方式に制御理論を活用した研究が行われている。本稿では、光グリッドとコグニティブ無線を対象に、制御理論を利用した資源管理技術を紹介する。光グリッドに対する資源管理技術では、計算機資源と波長資源の有効利用を目標として、PID 制御とモデル予測制御をそれぞれ使用する。一方、コグニティブ無線に対しては、送信電力を調整して無線資源を有効利用できるように、PID 制御とモデル予測制御をそれぞれ使用する。これらの資源管理技術に関して、どのようなモデル化が行われているか、PID 制御とモデル予測制御がどのように利用されているかなどについて説明する。

キーワード 制御理論, 通信ネットワーク, PID 制御, モデル予測制御

Abstract Recently, communication technologies for reliable remote control have become indispensable, and many communication technologies based on control theory have attracted considerable attention. In particular, networked control that considers the packet loss and transmission delay, and control-theory-based data transmission that considers the quality of the service of data transmission have been studied actively. In this paper, we introduce resource management technologies based on control theory for optical grids and cognitive wireless networks. For optical grids, the resource management technologies utilize PID control and model predictive control so that both computer resources and wavelength resources are utilized effectively. For cognitive wireless networks, on the other hand, the resource management technologies adjust the transmission power to utilize wireless resources effectively by utilizing PID control and model predictive control. In terms of the technologies, we explain how each network is modeled and how PID control and model predictive control are utilized.

Key words Control theory, Communication networks, PID control, Model predictive control

1. はじめに

近年、高信頼な遠隔制御を実現する通信技術の確立が重要となっており、制御理論を利用した通信ネットワークの研究が注目されている。特に、パケット損や遅延を考慮したネットワーク化制御の研究や、通信品質を考慮したデータ伝送を実現するために制御理論を利用した通信方式の研究が行われている。このような研究は技術面・実用面での必要性はもちろんのこと、通

信ネットワーク分野と制御分野が融合した比較的新しい領域の研究であるという点からも、今後の更なる発展が期待できる。

筆者らはこれまで、通信ネットワークの資源を効率良く管理するために、制御理論を用いた資源管理技術について研究に取り組み幾つかの成果を挙げてきた。本稿では、これまでに取り組んできた研究のうち、光グリッドとコグニティブ無線に対する制御理論を利用した資源管理技術^{(1) (2)}について紹介する。これらの技術では、PID (Proportional, Integration, Derivative) 制御とモデル予測制御 (MPC: Model Predictive Control) を使用して、計算機資源、波長資源、無線資源などの有効利用を実現する。光グリッドに対する資源管理技術では、計算機資源と波長資源の有効利用を目標として、PID 制御とモデル予測制御をそれぞれ使用する。一方、コグニティブ無線に対しては、送信電力を調整して無線資源を有効利用できるように、PID 制御とモデル予測制御をそれぞれ使用する。これらの資源管理技術に関して、どのようなモデル化が行われているか、PID 制御とモデル予測制御がどのように利用されているかなどについて説明する。

なお、制御理論を利用した通信ネットワークの研究に関して

橘 拓至 正員 福井大学大学院工学研究科

E-mail takuji-t@u-fukui.ac.jp

小木曾公尚 電気通信大学大学院情報理工学研究科

E-mail kogiso@uec.ac.jp

中村幸紀 岡山大学大学院自然科学研究科

E-mail yukinori-n@okayama-u.ac.jp

Takuji TACHIBANA, Member (Graduate School of Engineering, University of Fukui, Fukui-shi, 910-8507 Japan), Kiminao KOGISO, Nonmember (Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Tokyo, 182-8585 Japan), and Yukinori NAKAMURA, Nonmember (Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Okayama, 700-8530 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ

Fundamentals Review Vol.9 No.3 pp.229-237 2016 年 1 月

©電子情報通信学会 2016

は、本会高信頼制御通信（RCC）研究会の招待講演原稿⁽³⁾において数多くの論文が研究テーマごとに紹介されている．本分野の研究に取り組む研究者には、この招待講演原稿が特に参考になるであろう．

本稿は、以下のように構成される．2. では光グリッドの資源管理技術について説明し、3. でコグニティブ無線の資源管理技術について述べる．そして、最後の 4. でまとめを述べる．

2. 制御理論を用いた光グリッドの資源管理技術

2.1 計算機資源と波長資源の処理手順と管理目標

広域に分散した複数の計算機を光パスネットワークを介して利用する光グリッドでは、光パスと呼ばれる専用波長を用いて大容量データを高速に伝送することができる．図 1 は、光グリッドで実行される計算処理手順を示している．この図に示されるように、処理すべきジョブを持つクライアントがゲートキーパにジョブの実行をリクエストすると（図 1(1)）、ゲートキーパがクライアントを認証してジョブマネージャを生成する（図 1(2)）．それから、生成されたジョブマネージャがジョブの管理を開始し、ジョブの処理単位であるタスクが光パス（図 1(3)）を用いて計算サイトへ随時送信される（図 1(4)）．計算サイトに到着したタスクは資源マネージャ内のバッファに一旦蓄積されて、バッファに蓄積されているタスクが計算サイトの計算機で処理される．計算結果はジョブマネージャに返信され（図 1(5)）、ジョブの終了やキャンセルは、クライアントからジョブマネージャに通知された時点で実行される（図 1(6)）．

ここで、光グリッドの計算機資源は複数のクライアントによって共有され、利用可能な計算資源量が時間とともに変動する⁽⁴⁾．そのため、利用可能な計算資源量に応じてタスクの処理遅延が増減してしまい、資源マネージャ内のバッファ内に処理すべきタスクがなく処理が中断したり、バッファ内のタスクが処理されずに増え続けて新たなタスクを蓄積できなくなる場合が生じる．それゆえ、計算機資源を有効に利用してタスクを継続的に処理するためには、資源マネージャ内のバッファに一定量のタスクを常に保持することが期待される⁽⁵⁾．

また、光パスとして使用される波長資源も複数のクライアントで共有されるため、利用可能な波長数の変動に応じて設定可

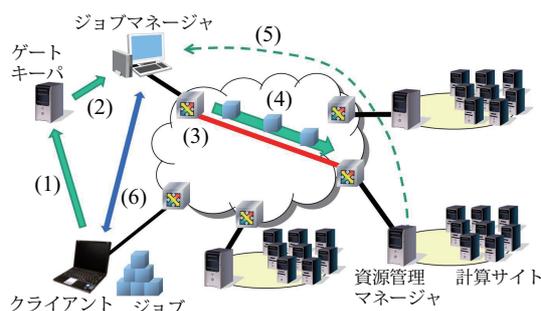


図 1 光グリッドにおける計算処理手順⁽¹⁾

な光パス数が時間とともに増減する．利用可能な光パスが不足している場合はタスクの伝送遅延が増加してしまい、一方で、光パスが余分に設定されている場合は他クライアントの光パス設定を抑制してしまう．したがって、各クライアントは必要最低限の光パスだけを設定・使用する必要があり、伝送したいタスク量を基に光パスを動的に設定・解放して波長資源を有効利用することが期待される⁽⁶⁾．

2.2 システムモデル

本節では、図 2 に示す光グリッドのシステムモデルについて説明する．本システムモデルでは、クライアントによって生成された一つのジョブマネージャが多数のタスクで構成されたジョブの実行を管理し、光パスを使って各タスクを計算サイトの資源マネージャへ送信する．その後、資源マネージャに送信されたタスクはバッファに一旦蓄積され、逐次、計算機資源によって処理される．

今、ステップ間隔を表す時刻 $t \in \mathcal{Z}_+$ (\mathcal{Z}_+ は非負の整数) において、資源マネージャに蓄積されているバッファ内タスク量を $x_b(t) \in \mathcal{R}_+$ (\mathcal{R}_+ は非負の実数) とする．更に、ジョブマネージャからバッファに到着するタスク量を $\tilde{u}(t) \in \mathcal{R}_+$ とし、計算機資源によって処理されるタスク量を $w(t) \in \mathcal{R}_+$ とする．このとき、サンプリング周期を $T > 0$ とすると、 $x_b(t)$ は以下の式で与えられる．

$$x_b(t+1) = x_b(t) + T\tilde{u}(t-1) - Tw(t) \quad (1)$$

ここで、ジョブマネージャからバッファへの伝送遅延は 1 ステップとし、バッファからジョブマネージャへのフィードバック情報は伝送遅延がないとする．

また、ジョブマネージャが伝送したいタスク量を $u(t) \in \mathcal{R}_+$ とし、光パスによって伝送できる最大伝送タスク量を $c(t) \in \mathcal{R}_+$ とすると、式 (1) の $\tilde{u}(t)$ は $c(t)$ に応じて以下のように変化する．

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} c(t), & u(t) \geq c(t) \text{ のとき} \\ u(t), & u(t) < c(t) \text{ のとき} \end{cases} \quad (2)$$

なお、 $c(t)$ は伝送タスク量 $\tilde{u}(t)$ に対する時変の拘束条件となることに注意する．

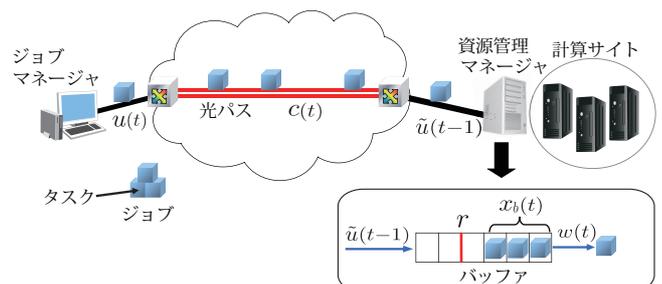


図 2 光グリッドのシステムモデル⁽¹⁾

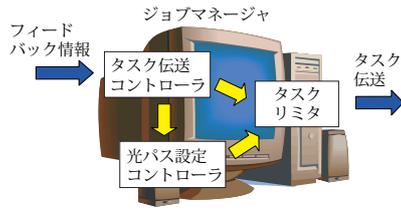


図 3 ジョブマネージャの構成

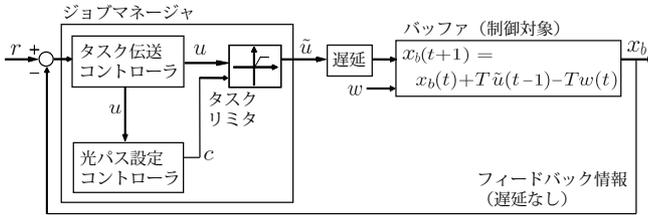


図 4 光グリッドのブロック線図⁽¹⁾

2.3 資源管理問題

2.2 で述べたシステムモデルに対して、以下の項目を満足するための動的な資源管理問題を考える。

- バッファ内のタスク量 $x_b(t)$ を目標量 r に保つことで計算機資源を有効利用する。
- 最大伝送タスク量 $c(t)$ を増加させ過ぎずに波長資源を有効利用する。

この問題を解決するために、制御理論を用いた資源管理技術⁽¹⁾では、タスク伝送コントローラ、光パス設定コントローラ、及びタスクリミタを以下のように使用する(図3)。

- Step 1: ジョブマネージャが、資源マネージャからバッファ内タスク量 $x_b(t)$ のフィードバック情報を受け取る。
- Step 2: ジョブマネージャは、バッファ内タスク量の目標値 $r \in \mathbb{R}_+$ とバッファ内タスク量 $x_b(t)$ をタスク伝送コントローラに転送し、タスク伝送コントローラは $x_b(t)$ と r の差が小さくなるように伝送すべきタスク量 $u(t)$ を決定する。
- Step 3: タスク伝送コントローラは、伝送すべきタスク量 $u(t)$ の情報を光パス設定コントローラとタスクリミタに転送する。
- Step 4: タスクリミタは、 $u(t)$ と最大伝送タスク量 $c(t)$ を比較し、実際に伝送するタスク量 $\tilde{u}(t)$ を決定する。
- Step 5: 光パスコントローラは、伝送すべきタスク量 $u(t)$ に応じて光パスを設定・解放・維持する。

本問題では、制御対象に入力制約が存在しており、入力制約が時不変であれば解析ツール⁽⁷⁾⁽⁸⁾を使ってコントローラを設計することができる。しかしながら、式(2)は時変の入力制約であり、時変の入力制約を含む制御問題は上記のツールなどでは設計することができない。

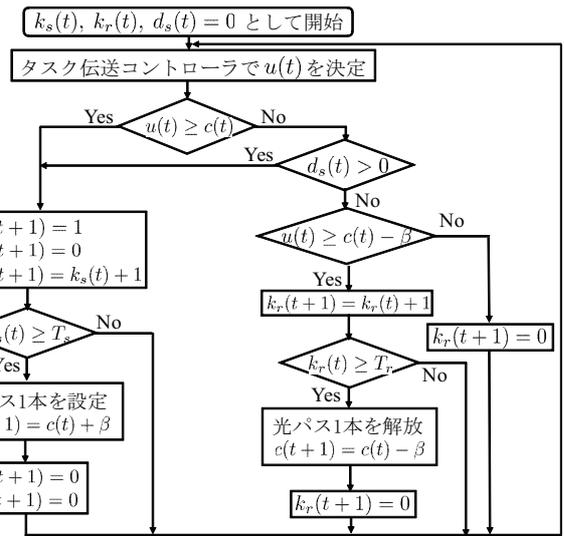


図 5 動的な光パス設定・解放アルゴリズム⁽¹⁾

2.4 制御理論を用いた資源管理技術

2.4.1 PID 制御の利用

前述の制御システムに対して、本節では、PID 制御を用いた光グリッドの動的資源管理方式⁽¹⁾を紹介する。本方式では、計算機サイトのバッファ内に一定量の未処理タスクを蓄積できるように⁽⁵⁾、PID 制御を使って伝送タスク量を決定する。これにより、計算機の遊休・過負荷状態を回避して計算機資源を有効利用できる。また、PID 制御によって決定したタスク量に応じて光パス数を動的に変更し、波長資源の有効利用も実現する。

図4は、PID 制御を用いた資源管理方式のブロック線図を示している。この方式では、バッファ内タスク量 $x_b(t)$ を目標量 r に近づけるために、ジョブマネージャが伝送すべきタスク量 $u(t)$ を以下の式で計算する。

$$u(t) = K_P e(t) + K_I T \sum_{i=0}^t e(i) + \frac{K_D}{T} (e(t) - e(t-1)) \quad (3)$$

ここで、 K_P 、 K_I 、 K_D はそれぞれ比例利得、積分利得、微分利得を表し、 $e(t)$ は以下の式で与えられる。

$$e(t) = r - x(t-1) \quad (4)$$

式(3)のPID制御によって適切なタスク伝送量が導出されるため、計算機資源の有効利用が期待できる。なお、実際に伝送するタスク量 $\tilde{u}(t)$ は、 $u(t)$ と $c(t)$ を基にタスクリミタで決定される(式(2))。

$$\begin{cases} c(t+T_s) = c(t) + \beta, & u(t) \geq c(t) \text{ のとき} \\ c(t+T_r) = c(t) - \beta, & \\ u(t+i) < c(t+i) - \beta, \forall i \in \{0, \dots, T_r - 1\} \text{ のとき} \end{cases} \quad (5)$$

更に本方式では、ジョブマネージャが計算した伝送タスク量 $u(t)$ に応じて光パスを動的に設定・解放する。具体的には、光パスコントローラが図5のアルゴリズムに従って光パスを設定・解

放する．本アルゴリズムでは，光パスの設定処理時間 $T_s \in \mathcal{Z}_+$ とパラメータ $T_r \in \mathcal{Z}_+$ が考慮されており， T_r は頻繁な光パス設定・解放を回避するために使用される．ここで，1本の光パスを使って伝送可能な最大タスク量を $\beta \in \mathbb{R}_+$ とすると，時刻 t での最大伝送タスク量 $c(t)$ は光パス設定・解放アルゴリズムに従って以下の式で決定される．式 (2) 及び (5) から，時変の $c(t)$ が入力 $\tilde{u}(t)$ の拘束条件となることに注意する．

本方式では，PID 制御と光パス設定・解放アルゴリズムによって計算機資源と波長資源に関する二つの目標を達成し，資源の有効利用が実現できる．しかしながら，PID 制御ではバッファ内タスク量のみに基づいて伝送タスク量を決定するため，光パスの設定・解放処理がタスクの伝送に与える影響を考慮できない．

2.4.2 モデル予測制御の利用

本節では，光パス設定・解放処理の特性を考慮して伝送タスク量 $\tilde{u}(t)$ を決定するために，モデル予測制御 (MPC)⁹⁾を用いた二つの資源管理方式¹⁾を紹介する．モデル予測制御では，現時点から有限の時間区間を設定し，制約条件付最適制御問題をサンプル時間ごとに解いて，得られた入力列の最初の値を実際の入力に使用する．

一つ目の方式では，光パスの設定・解放処理を論理命題として記述した後にモデル予測制御を使用する．具体的には，論理命題を含んだ制御問題を混合論理動的 (MLD: Mixed Logical Dynamical) モデル¹⁰⁾として表現し，MLD モデルに対する混合整数二次計画問題 (MIQP: Mixed Integral Quadratic Programming) を解くことで伝送タスク量を決定する．以下では，対象とするクライアントが利用できる最大波長数を 6 とし，MLD モデルを導出するために言語ツール HYSDEL (Hybrid Systems Description Language)¹¹⁾を利用する．

本方式では，光グリッドの MLD モデルを導出するために，最初に論理変数 $\delta \in \{0, 1\}$ と光パスの設定・解放処理を対応付ける．以下の式は，最大波長数が 6 の場合の対応付けを示しており，最大波長数に応じて特に式 (10)，(11)，(12) が変更される．

$$[\delta_1(t) = 1] \leftrightarrow [u(t) < c(t) - \beta] \quad (6)$$

$$[\delta_2(t) = 1] \leftrightarrow [k_s(t) \geq T_s] \quad (7)$$

$$[\delta_3(t) = 1] \leftrightarrow [k_r(t) \geq T_r] \quad (8)$$

$$[\delta_4(t) = 1] \leftrightarrow [d_s(t) \geq 1] \quad (9)$$

$$[\delta_{4+j}(t) = 1] \leftrightarrow [u(t) \geq j\beta] \quad j = 1, \dots, 5 \quad (10)$$

$$[\delta_{9+j}(t) = 1] \leftrightarrow [c(t) \geq j\beta] \quad j = 1, \dots, 5 \quad (11)$$

$$[\delta_{15}(t) = 1] \leftrightarrow [(\delta_5(t) \wedge \delta_{10}(t)) \vee (\delta_6(t) \wedge \delta_{11}(t)) \vee (\delta_7(t) \wedge \delta_{12}(t)) \vee (\delta_8(t) \wedge \delta_{13}(t)) \vee (\delta_9(t) \wedge \delta_{14}(t))] \quad (12)$$

$$[\delta_{16}(t) = 1] \leftrightarrow [x_b(t) > 0] \quad (13)$$

$$[\delta_{17}(t) = 1] \leftrightarrow [x_b(t) \leq X_b^{\max}] \quad (14)$$

HYSDEL では変数同士を比較することができないため，論理変数 δ_5 – δ_{15} を使って $u(t)$ と $c(t)$ を比較し，更に，バッファ内タスク量の上下限 (X_b^{\max} が上限量) を示すために δ_{16} と δ_{17}

を用いる．

これらの論理変数を用いて，各変数の更新則は以下のように表現することができる．

$$c(t+1) = \begin{cases} c(t) + \beta, & \delta_2(t) \text{ のとき} \\ c(t) - \beta, & \delta_3(t) \text{ のとき} \\ c(t), & \text{上記以外} \end{cases} \quad (15)$$

$$k_s(t+1) = \begin{cases} k_s(t) + 1, & \delta_{15}(t) \vee \delta_4(t) \text{ のとき} \\ 0, & \delta_2(t) \wedge \delta_4(t) \text{ のとき} \\ k_s(t), & \text{上記以外} \end{cases} \quad (16)$$

$$k_r(t+1) = \begin{cases} k_r(t) + 1, & \delta_3(t) \wedge \neg \delta_4(t) \text{ のとき} \\ 0, & \delta_{15}(t) \vee \neg \delta_1(t) \vee \delta_3(t) \vee \delta_4(t) \text{ のとき} \\ k_r(t), & \text{上記以外} \end{cases} \quad (17)$$

$$d_s(t+1) = \begin{cases} 1, & \delta_{15}(t) \text{ のとき} \\ 0, & \delta_2(t) \text{ のとき} \\ d_s(t), & \text{上記以外} \end{cases} \quad (18)$$

ここで，“ \neg ” は否定，“ \vee ” は論理和，“ \wedge ” は論理積を表し，変数 d_s は光パスの設定を解放よりも優先的に処理することを示している．

それから，式 (15) から (18) までの変数を用いて状態変数 x を以下のように定義する．

$$x := [x_b, c, k_s, k_r, d_s, x_u]' \in \mathbb{R}_+^6 \quad (19)$$

上式において， x_b は式 (1) で導出されるバッファ内タスク量であり，状態変数 x_u は 1 ステップ遅延の後に時刻 t でバッファに到着するタスク量 ($x_u(t) := u(t-1)$) を示している．

次に，上記の状態変数 x や補助変数 $z(t) = \delta(t)x(t)$ ，更には論理変数や更新則などから，HYSDEL を用いて以下の MLD モデルを導出する．

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + B_1 u(t) + B_2 w(t) + B_3 \delta(t) \\ &\quad + B_4 z(t) \\ y(t) &= Cx(t) \\ E_1 x(t) + E_2 u(t) + E_3 \delta(t) + E_4 z(t) &\leq E_5 \end{aligned} \quad (20)$$

そして，この MLD モデルに対して予測ホライズン N のモデル予測制御を使用し，下記の MIQP を計算して最適な入力列 $\{u_{t+k}^*\}_{k \in \mathcal{N}}$ ， $\mathcal{N} = \{0, 1, \dots, N-1\}$ を導出する．

$$\begin{aligned} \min_{\{u_{t+k}\}_{k \in \mathcal{N}}} J(u_t, x(t)) &= \min_{\{u_{t+k}\}_{k \in \mathcal{N}}} \sum_{k \in \mathcal{N}} \|y_{t+k|t} - y_{ref}\|_{Q_{k,2}} \\ \text{s.t. } x_{t+k+1|t} &= Ax_{t+k|t} + B_1 u_{t+k} + B_2 w_{t+k|t} \\ &\quad + B_3 \delta_{t+k|t} + B_4 z_{t+k|t} \\ y_{t+k|t} &= Cx_{t+k|t} \\ E_1 x_{t+k|t} + E_2 u_{t+k} + E_3 \delta_{t+k|t} + E_4 z_{t+k|t} &\leq E_5, \\ &\quad \forall k \in \mathcal{N} \end{aligned}$$

式 (21) の第一式右辺の重み行列 $Q_k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は半正定であり, $x_{t|t} := x(t)$, $\|x\|_{Q,2} := x'Qx$, $y_{t|t} = [x_b(t), c(t)]'$, $y_{ref} := [r, \beta]'$ である.

最終的に, ジョブマネージャの伝送タスク量 $\tilde{u}(t)$ は, 以下の式で導出できる.

$$\tilde{u}(t) = u_t^* \quad (22)$$

ジョブマネージャは, サンプル周期ごとに上記の最適化問題 (21) を解き, 導出した $\tilde{u}(t)$ に従ってタスクを伝送する.

MIQP による前述の方式では, 光パスの動特性を考慮した式 (21) の計算に膨大な時間が必要になる場合がある. そこで, 伝送タスク量 $\tilde{u}(t)$ に対する拘束条件 $c(t)$ だけを考慮した二つ目の方式¹⁾では, 将来の入力制約 $c(t+s)$ ($s = 1, \dots, N$) が現在の入力制約 $c(t)$ に等しいと仮定することで計算時間の大幅な短縮を実現する. 具体的には, 式 (21) から 17 個の論理変数と補助変数 z を取り除き, MIQP を下記の二次計画問題 (QP) に緩和する.

$$\begin{aligned} \min_{\{u_{t+k}\}_{k \in \mathcal{N}}} J(u_t, x(t)) &= \min_{\{u_{t+k}\}_{k \in \mathcal{N}}} \sum_{k \in \mathcal{N}} \|y_{t+k|t} - r\|_{Q_k, 2} \quad (23) \\ \text{s.t. } x_{t+k+1|t} &= Ax_{t+k|t} + B_1 u_{t+k} + B_2 w_{t+k|t} \\ y_{t+k|t} &= Cx_{t+k|t} \\ 0 \leq u_{t+j} &\leq c(t), \quad \forall k \in \mathcal{N} \\ A &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} -T \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0] \end{aligned}$$

そして, この QP を解くことで最適な入力列 $\{u_{t+k}^*\}_{k \in \mathcal{N}}$ を導出し, 最終的に伝送タスク量 $\tilde{u}(t)$ を式 (22) で計算する. この QP による方式は, MIQP による方式と比べて計算が容易で計算時間の高速化が可能になるが, 目標量への追従性能が劣化してしまう.

3. 制御理論を用いたコグニティブ無線の資源管理技術

3.1 二次システムの電力調整手順と調整目標

コグニティブ無線ネットワークでは, 既存の一次システムが使用している周波数帯域を二次システムも利用することで, 無線資源の有効利用を実現する⁽¹²⁾. このとき, 一次システムの通信が優先であるため, 二次システムは一次システムとの干渉を

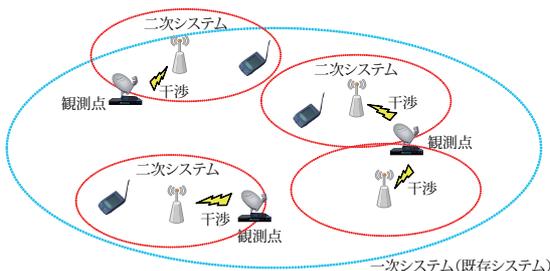


図 6 コグニティブ無線システム

回避しなければならない. 特に, 一次システム内の複数の観測点で二次システムとの干渉を測定している場合には, 各観測点での干渉温度 (無線資源の共有可否を判断するために提案された指標)¹³⁾が最大許容干渉量を下回らなければならない. 図 6 はコグニティブ無線ネットワークの使用例を示しており, 一次システムは, 同じ周波数帯域を使用している四つの二次システムとの干渉を 3 箇所の観測点で測定している.

ここで, 観測点における干渉温度は (二次システムの) 送信機の送信電力や送信機から観測点までの距離によって決定される. それゆえ, 送信機の送信電力を減少させることで一次システムとの干渉を回避することができる. 一方で, 送信電力を減少させると二次システムの通信品質が劣化してしまい, 結果として無線資源を有効利用できなくなってしまう. したがって, 二次システムの通信品質を向上するには, 送信機の送信電力を増加させる必要がある. 以上のことから, 一次システムとの干渉回避と二次システムの通信品質向上を実現するために, 各送信機が送信電力を調整する必要がある.

3.2 システムモデル

本節では, 図 7 に示すコグニティブ無線のシステムモデルについて説明する. 本システムモデルでは, 二次システムに $N_s > 0$ 個の送受信ペアが存在しており, i 番目の送受信機ペアに対して, 送信機 i の時刻 t での送信電力を $p_i(t) \in \mathbb{R}_+$ とする. この送信電力 $p_i(t)$ は, 最大電力が p_{\max} で最小電力が p_{\min} であり ($p_{\min} \leq p_i(t) \leq p_{\max}$), 送信機 i から受信機 j へのチャネル利得を $h_{ij} > 0$ とする. このとき, i 番目の送受信機ペアに対して, 受信機 i での SINR が以下の式で与えられる.

$$\gamma_i(t) = \frac{p_i(t)h_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_s} p_j(t)h_{ji} + \sigma_i^2(t)} \quad (24)$$

式 (24) において, $\sigma_i^2(t)$ は受信機 i での熱雑音⁽¹⁴⁾を示し, 一次システムなどの他の無線ネットワークからの干渉も含むとする.

ここで, 送信機 i の時刻 t における送信電力 $p_i(t)$ と時刻 $t+1$ における送信電力 $p_i(t+1)$ の差を $u_i(t)$ ($-p_{\max} + p_{\min} \leq u_i(t) \leq p_{\max} - p_{\min}$) とすると, $u_i(t)$ は以下の式で計算される.

$$u_i(t) = p_i(t+1) - p_i(t) \quad (25)$$

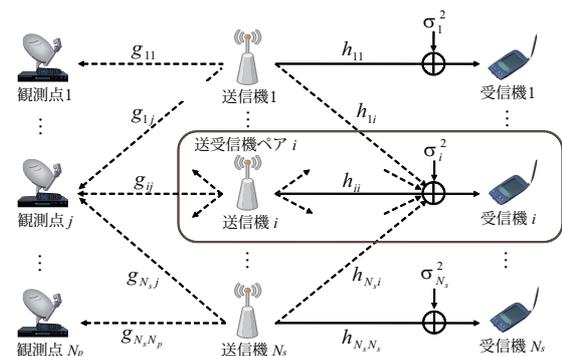


図 7 コグニティブ無線のシステムモデル⁽²⁾

この送信電力に関する差 $u_i(t)$ を SINR に対する入力とすると、式 (24) 及び (25) から、動的な SINR システムが以下で与えられる。

$$\gamma_i(t+1) = \gamma_i(t) + \frac{h_{ii}}{I_i(t)} u_i(t) + \frac{p_i(t+1)h_{ii}\{I_i(t) - I_i(t+1)\}}{I_i(t)I_i(t+1)} \quad (26)$$

$$I_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_s} p_j(t)h_{ji} + \sigma_i^2(t)$$

上式において、1 ステップ経過後に変化する干渉量 ($I_i(t) - I_i(t+1)$) は、変化前後の干渉量の積 ($I_i(t)I_i(t+1)$) よりもはるかに小さいため、 $\{I_i(t) - I_i(t+1)\}/\{I_i(t)I_i(t+1)\}$ は 0 で近似でき⁽¹⁵⁾、結果的に以下の動的システムが得られる。

$$\gamma_i(t+1) = \gamma_i(t) + \frac{h_{ii}}{I_i(t)} u_i(t) \quad (27)$$

一方、一次システムの $N_p > 0$ 個の観測点に対して、二次システムの送信機 i から観測点 j ($j = 1, \dots, N_p$) へのチャネル利得を $g_{ij} > 0$ とする。各観測点では、一次システムと二次システムとの干渉温度は測定結果を基に管理されているとすると⁽¹⁶⁾、観測点 j での平均干渉電力 P_j [W]、帯域 B [Hz]、ボルツマン定数 k_B [J/K] から、観測点 j における干渉温度 $y_j \in \mathbb{R}_+$ が以下の式で計算される。

$$y_j = \frac{P_j}{k_B B} \quad (28)$$

以降では、二次システムの送信機がスペクトル拡散信号を利用する場合を想定しており⁽¹⁷⁾、干渉温度 $y_j(t)$ は以下の式で計算できる。

$$y_j(t) = \sum_{k=1}^{N_s} p_k(t)g_{kj} \quad (29)$$

なお、式 (27) 及び (29) の計算には、全送信機の送信電力が含まれていることに注意する。それゆえ、送信機 i の電力調整は、一次システムへの干渉及び受信機ペア i の通信品質に加えて、他ペア j ($j \neq i$) の通信品質にも影響する。

3.3 電力調整問題

3.2 で述べたシステムモデルに対して、二次システムが以下の項目を満足するための電力調整問題を考える。

- 一次システムの全観測点において干渉を回避する。
- 二次システムの各受信機ペアに対してデータ伝送の通信品質を維持する。

最初の項目に関しては、観測点 j での干渉温度 $y_j(t)$ と最大許容干渉量 D_j から、各時刻 t において以下の不等式が満足されなければならない。

$$y_j(t) \leq D_j \quad (30)$$

それゆえ、式 (29) 及び (30) から、送信機 i は以下の条件を満たすように送信電力 $p_i(t+1)$ を調整する必要がある。

$$p_i(t+1)g_{ij} + \sum_{k=1, k \neq i}^{N_s} p_k(t+1)g_{kj} \leq D_j, \quad j = 1, \dots, N_p \quad (31)$$

なお、一次システム間での干渉は無視できると仮定する⁽¹⁸⁾。

二番目の項目に関しては、事前に設定した SINR の目標値 $\Gamma \in \mathbb{R}_+$ に対して、各受信機 i の SINR $\gamma_i(t)$ が以下の条件を満足することが望まれる⁽¹⁹⁾。

$$\gamma_i(t) = \Gamma \quad (32)$$

それゆえ、式 (24) 及び (32) から、送信機 i は時刻 t において、以下の式を満足するように送信電力 $p_i(t+1)$ を調整すべきである。

$$\frac{p_i(t+1)h_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_s} p_j(t+1)h_{ji} + \sigma_i^2(t+1)} = \Gamma, \quad i = 1, \dots, N_s \quad (33)$$

以上のことから本問題では、式 (25)、(31)、及び (33) に基づいて、下記の式 (33) と (34) を満足するように送信電力の変化量 $u_i(t)$ を決定しなければならない。

$$\frac{\{u_i(t) + p_i(t)\}h_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_s} \{u_j(t) + p_j(t)\}h_{ji} + \sigma_i^2(t+1)} = \Gamma, \quad i = 1, \dots, N_s \quad (34)$$

$$\{u_i(t) + p_i(t)\}g_{ij} + \sum_{k=1, k \neq i}^{N_s} \{u_k(t) + p_k(t)\}g_{kj} \leq D_j, \quad j = 1, \dots, N_p \quad (35)$$

詳細は 3.4.1 で述べるが、本問題も時変の入力制約を含むことに注意する。

3.4 制御理論を用いた資源管理技術

3.4.1 PID 制御の利用

前述の制御システムに対して、本節では、PID 制御を用いた送信電力調整方式⁽²⁾を紹介する。本方式では、二次システムの受信機での SINR が目標値となるように PID 制御を使って送信電力を決定し、更に送信電力の増加量に拘束条件を設定することで一次システムとの干渉を回避する。この拘束条件を動的に変化させることで、一次システムとの干渉と二次システムの通信品質を考慮して送信電力を調整する。

図 8 は、PID 制御を用いた送信電力調整方式のブロック線図を示しており、本方式では、PID コントローラと拘束条件コントローラが用いられる。この図に示されているように、各送信機は、対応する受信機から送られる $\gamma_i(t)$ の情報に加えて、観測点 j から送られる $y_j(t-1)$ ($j = 1, \dots, N_p$) と D_j の情報を利用する。ここで、 $y_j(t)$ ($j = 1, \dots, N_p$) は式 (35) で与えられる。

今、時刻 t の送信電力 $p_i(t)$ を 1 ステップ後に変化させたい量を $z_i(t)$ ($-p_{\max} + p_{\min} \leq z_i(t) \leq p_{\max} - p_{\min}$) とすると、送信機 i は PID 制御を使って希望する変化量 $z_i(t)$ を以下の式で導出する。

$$e_i(t-1) = \left\{ \frac{\Gamma}{\gamma_i(t-1)} - 1 \right\} p_i(t) \quad (36)$$

$$x_i(t-1) = x_i(t-2) + e_i(t-1) \quad (37)$$

$$z_i(t) = K_P e_i(t-1) + K_I x_i(t-1) + K_D [e_i(t-1) - e_i(t-2)] \quad (38)$$

この式において、 K_P 、 K_I 、 K_D はそれぞれ、比例利得、積分利得、微分利得を示しており、 $K_P = 1$ 、 $K_I = 0$ 、 $K_D = 0$ の場合は DPC 方式⁽²⁰⁾と同じになる⁽²¹⁾。上記の式に従って希望する変化量 $z_i(t)$ を導出することで、各送受信ペア i の SINR が目標値 Γ に近づいて通信品質の向上が期待できる⁽²¹⁾、⁽²²⁾。

一方、変化量 $z_i(t)$ の導出では二次システムの通信品質だけを考慮しており、一次システムとの干渉回避は保証できない。そこで新たに、送信電力の変化量 $z_i(t)$ に対して、動的な拘束条件 $c_i(t)$ ($-p_{\max} + p_{\min} \leq c_i(t) \leq p_{\max} - p_{\min}$) を導入する。送信機 i は、式 (38) によって $z_i(t)$ を導出した後、実際に変化させる送信電力量 $u_i(t)$ を以下の式で決定する。

$$u_i(t) = \min\{z_i(t), c_i(t)\} \quad (39)$$

この拘束条件 $c_i(t)$ を適切に設定することによって、一次システムとの干渉を回避しつつ二次システムの通信性能を向上できる。そこで、干渉と通信性能を考慮するために、図 9 に示す拘

束条件 $c_i(t)$ の更新アルゴリズムを使用する。このアルゴリズムでは、一次システムとの干渉を回避するために、以下の変数 $\Theta(t)$ が使用される。

$$\Theta(t) = \frac{\min_j D_j}{y_{\max}(t-1)} \quad (40)$$

この $\Theta(t)$ が 1 以上であれば、送信機 i の送信電力を $p_j(t-1)$ から $\Theta(t)p_j(t-1)$ まで増加させても全ての観測点で干渉が発生しない。また $\eta_i(t)$ は、SINR の目標値 Γ に対する実際の SINR 値の割合を示しており、以下の式で与えられる。

$$\eta_i(t) = \frac{\Gamma}{\gamma_i(t-1)} \quad (41)$$

この $\eta_i(t)$ が 1 より大きければ、送信機 i は SINR γ_i が増加するように送信電力を増加すべきであり、1 より小さければ他の送受信ペアの通信品質を考慮して送信電力を減少すべきである。最終的に、これらの情報を使って、送信機 i は拘束条件 $c_i(t)$ を以下のように更新する。

$$c_i(t) = \begin{cases} \eta_i(t)\Theta(t)p_i(t-1) - p_i(t), & \eta_i(t) \leq 1 \\ \Theta(t)p_i(t-1) - p_i(t), & \eta_i(t) > 1 \end{cases} \quad (42)$$

なお、観測点に対する全てのチャンネル利得が既知の場合には、本アルゴリズムによって一次システムとの干渉が必ず回避される⁽²⁾。

二次システムの送受信機ペア i

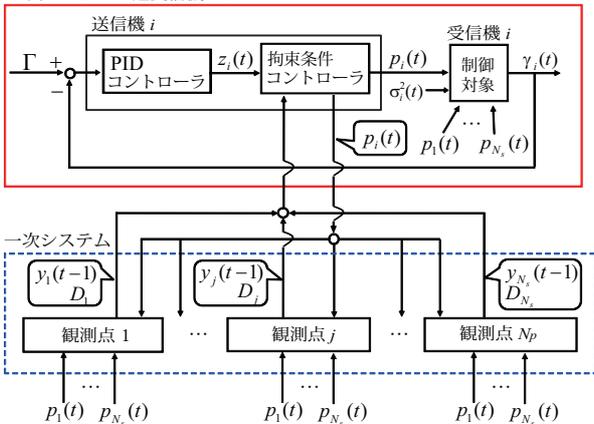


図 8 PID 制御を利用する場合のブロック線図⁽²⁾

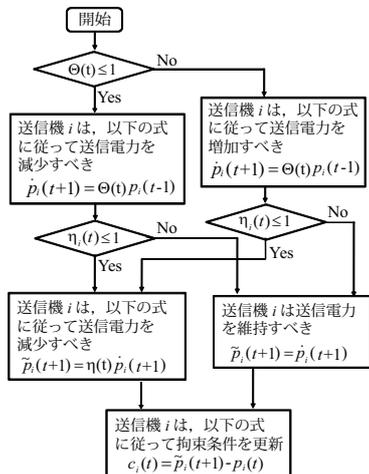


図 9 拘束条件更新アルゴリズム⁽²⁾

3.4.2 モデル予測制御の利用

本節では、3.4.1 とは異なり、一次システムへの干渉も考慮して送信電力の変化量 $u(t)$ を決定するモデル予測制御を用いた電力調整方式⁽²⁾を紹介する。本方式では、変化量 $u_i(t)$ の決定問題を二次計画問題 (QP) で定式化し、希望する変化量 $z_i(t)$ を使用せずに $u_i(t)$ を直接導出する。そのため、拘束条件コントローラは MPC コントローラの内部で使われる (図 10)。

送信機 i で使用する予測ホライズン H ($H \geq 1$) の MPC コントローラは、SINR $\gamma_i(t)$ の値を基に変化量 $u(t)$ を計算する。ここで、式 (27) の h_{ii} 及び $I_i(t-1)$ は送信機 i にとっては未知であるが、 $\gamma_i(t-1)/p_i(t-1)$ は $h_{ii}/I_i(t-1)$ に等しいことから、 $\gamma_i(t)$ を以下の式で得ることができる。

二次システムの送受信機ペア i

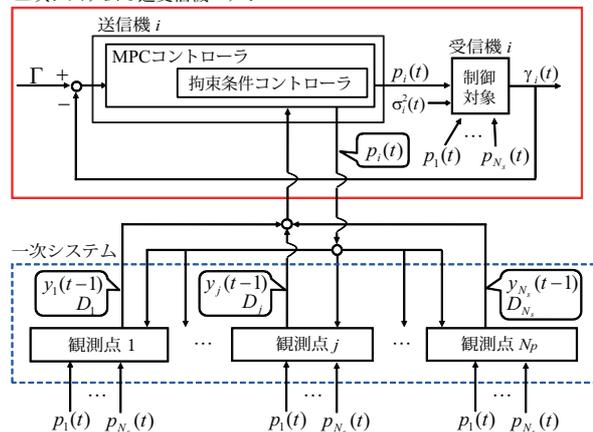


図 10 MPC を利用する場合のブロック線図⁽²⁾

$$\gamma_i(t) = \gamma_i(t-1) + \frac{\gamma_i(t-1)}{p_i(t-1)} u_i(t-1) \quad (43)$$

更に、時刻 $t+k$ ($k = 0, \dots, H-1$) におけるシステム状態を $\hat{\gamma}_i(t+k)$ とし ($\hat{\gamma}_i(t) = \gamma_i(t)$), $\hat{u}_i(t+k)$ ($k = 0, \dots, H-1$) を $\hat{\gamma}_i(t)$ への入力とする。このとき、時刻 t において、 $\hat{\gamma}_i(t+1), \hat{\gamma}_i(t+2), \dots, \hat{\gamma}_i(t+H)$ が以下の式で表される。

$$\hat{\gamma}_i(t+1) = \hat{\gamma}_i(t) + \hat{B}_i(t) \hat{u}_i(t) \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_i(t+2) &= \hat{\gamma}_i(t+1) + \hat{B}_i(t+1) \hat{u}_i(t+1) \\ &= \hat{\gamma}_i(t) + \hat{B}_i(t) \hat{u}_i(t) \\ &\quad + \hat{B}_i(t+1) \hat{u}_i(t+1) \end{aligned} \quad (45)$$

\vdots

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_i(t+H) &= \hat{\gamma}_i(t+H-1) \\ &\quad + \hat{B}_i(t+H-1) \hat{u}_i(t+H-1) \\ &= \hat{\gamma}_i(t) + \hat{B}_i(t) \hat{u}_i(t) + \hat{B}_i(t+1) \hat{u}_i(t+1) \\ &\quad + \dots + \hat{B}_i(t+H-1) \hat{u}_i(t+H-1) \end{aligned} \quad (46)$$

上式において、 $\hat{B}_i(t+k)$ は式 (43) 内の $\gamma_i(t+k)/p_i(t+k)$ に対応しているが、時刻 t で $\hat{B}_i(t+k)$ ($k = 1, \dots, H-1$) の情報は取得できないため、 $\hat{B}_i(t+k)$ を以下のように設定する。

$$\hat{B}_i(t+k) = \frac{\gamma_i(t-1)}{p_i(t-1)}$$

更に、 X, U, X_A , 及び X_B をそれぞれ以下のように定義する。

$$X = \begin{bmatrix} \hat{\gamma}_i(t+1) \\ \hat{\gamma}_i(t+2) \\ \vdots \\ \hat{\gamma}_i(t+H) \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} \hat{u}_i(t) \\ \hat{u}_i(t+1) \\ \vdots \\ \hat{u}_i(t+H-1) \end{bmatrix}$$

$$X_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$X_B = \begin{bmatrix} \hat{B}_i(t) & 0 & \dots & 0 \\ \hat{B}_i(t) & \hat{B}_i(t+1) & \dots & 0 \\ \hat{B}_i(t) & \hat{B}_i(t+1) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \hat{B}_i(t) & \hat{B}_i(t+1) & \dots & \hat{B}_i(t+H-1) \end{bmatrix}$$

なお、上式の X は以下の式で書き直すことができる。

$$X = X_A \hat{\gamma}_i(t) + X_B U \quad (47)$$

以上のことから、SINR の目標値 $\tilde{\Gamma} = [\Gamma, \Gamma, \dots, \Gamma]' \in \mathbb{R}_+^H$ を考慮して、式 (47) に基づく下記の二次計画問題を定式化し、

最適な入力列 $\{u_{i+k}^*\}_{k \in \mathcal{H}}$, $\mathcal{H} = \{0, 1, \dots, H-1\}$ を導出する。

$$\min_U J(U, X) = \min_U \|X - \tilde{\Gamma}\|_{Q,2} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } X &= X_A \hat{\gamma}_i(t) + X_B U \\ -p_i(t) &\leq \hat{u}_i(t+k) \leq c_i(t), \quad k \in \mathcal{H} \end{aligned} \quad (49)$$

ここで、 $Q \in \mathbb{R}^{H \times H}$ は半正定の重み行列を示す。最終的に、送信機 i は導出した入力 $u_i(t) = u_i^*(t)$ に従って送信電力を調整する。なお、式 (49) 内に拘束条件 $c_i(t)$ が含まれているため、入力 $u_i(t) = u_i^*(t)$ は拘束条件を超えないことが保証されている⁽²⁾。

4. ま と め

本稿では、筆者らがこれまでに取り組んできた光グリッドとコグニティブ無線に対する制御理論を利用した資源管理技術を紹介した。これらの技術に対して、問題設定、システムモデル、PID 制御とモデル予測制御による制御方法などについて紹介した。通信ネットワーク技術に対する制御理論の利用は、今後更に多くの通信技術に導入されることが期待される。このような融合領域の研究を進めていく上で、本稿が少しでも読者の皆様の参考になれば幸いである。

文 献

- (1) G. Matsui, T. Tachibana, K. Kogiso, and K. Sugimoto, "Dynamic resource management in optical grid", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 1607–1614, July 2014.
- (2) G. Matsui, T. Tachibana, Y. Nakamura, and K. Sugimoto, "Distributed power adjustment based on control theory for cognitive radio networks," *Comput. Netw.*, vol. 57, no. 17, pp. 3344–3356, Dec. 2013.
- (3) 小林健太郎, "高信頼遠隔制御のための制御と通信のクロスレイヤ設計に関する研究動向," 信学技報, RCC2015-37, NS2015-57, RCS2015-120, SR2015-38, ASN2015-47, pp. 111–118, July 2015.
- (4) Grid Computing: Making the Global Infrastructure a Reality, F. Berman, G. Fox, and T. Hey, eds., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2003.
- (5) H. Osaki, S. Watanabe, and M. Imase, "On dynamic resource management mechanism using control theoretic approach for wide-area grid computing," *Proc. IEEE Conf. on Control Applications 2005*, pp. 891–896, Aug. 2005.
- (6) *IETF RFC 3945*, "Generalized multiprotocol label switching (GMPLS) Architecture", E. Mannie, ed., Oct. 2004.
- (7) E. Gilbert and I. Kolmanovsky, "Nonlinear tracking control in the presence of state and control constraints: A generalized reference governor," *Automatica*, vol. 38, no. 12, pp. 2063–2073, Dec. 2002.
- (8) E. Gilbert and K.T. Tan, "Linear systems with state and control constraints: The theory and application of maximal output admissible sets," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 36, no. 9, pp. 1008–1030, Sept. 1991.
- (9) M. Morari and J.H. Lee, "Model predictive control: Past, present and future," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 667–682, May 1999.
- (10) A. Bemporad and M. Morari, "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints," *Automatica*, vol. 35, no. 3, pp. 407–427, March 1999.

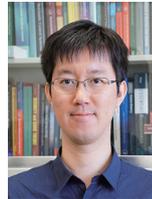
- (11) E.D. Torris and A. Bemporad, "HYSDEL -a tool for generating computational hybrid models," *ETH, Zurich, Switzerland, Tech. Rep., AUT02-03*, 2002. <http://control.ee.ethz.ch/hybrid/hysdel/>
- (12) J. Mitola, "Cognitive radio: Making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- (13) Federal Communication Commission, "Spectrum policy task force," Rep. ET Docket, no. 02-135, Nov. 2002.
- (14) E. Dall'Anese, S.J. Kim, G.B. Giannakis, and S. Pupolin, "Power allocation for cognitive radio networks under channel uncertainty," *Proc. IEEE International Conference on Communications 2011 (ICC 2011)*, pp. 1-6, June 2011.
- (15) S. Koskie and Z. Gajic, "Optimal SIR-based power control strategies for wireless CDMA networks," *International Journal of Information and Systems Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 204-218, Jan. 2008.
- (16) J. Jia and Q. Zhang, "A non-cooperative power control game for secondary spectrum sharing," *Proc. IEEE International Conference on Communications 2007 (ICC 2007)*, pp. 5933-5938, June 2007.
- (17) P.G. Flikkema, "Spread-spectrum techniques for wireless communication," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 26-36, May 1997.
- (18) C.G. Yang, J.D. Li, and Z. Tian, "Optimal power control for cognitive radio networks under coupled interference constraints: A cooperative game-theoretic perspective," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 4, pp. 1696-1706, May 2010.
- (19) S. Koskie and Z. Gajic, "A nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 13, no. 5, pp. 1017-1026, Oct. 2005.
- (20) G.J. Foschini and Z. Miljanic, "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, no. 4, pp. 641-646, Nov. 1993.
- (21) A. Paul, A. Member, M.G. Safonov, and U. Mitra, "Adaptive power control for wireless networks using multiple controllers and switching," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 16, no. 5, pp. 1212-1218, Sept. 2005.
- (22) F. Gunnarsson, F. Gustafsson, and J. Blom, "Pole placement design of power control algorithms," *Proc. IEEE 49th Vehicular Technology Conference*, pp. 2149-2153, May 1999.

(RCC 研究会提案, 平成 27 年 11 月 4 日受付)



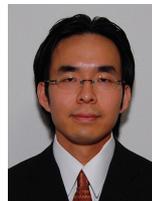
橋 拓至 (正員)

2004 奈良先端大情報科学研究科卒。2004 独立行政法人情報通信研究機構情報通信部門専攻研究員, 2006 奈良先端大情報科学研究科助手。2007 奈良先端大情報科学研究科助教 (名称変更)。2011 福井大大学院工学研究科准教授。通信ネットワーク技術, 制御理論を用いた通信技術, アプリ開発に関する研究に従事。



小木 曾公尚

2004 阪大大学院工学研究科卒。2004 奈良先端大情報科学研究科 21 世紀 COE 研究員。2005 奈良先端大情報科学研究科助手。2007 奈良先端大情報科学研究科助教 (名称変更)。2014 電通大学院情報理工学研究科准教授。拘束システムやハイブリッドシステムの解析と制御, ゲーム理論とその工学応用, 制御セキュリティに関する研究に従事。



中村 幸紀

2008 日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2009 奈良先端大情報科学研究科卒。2009 日本学術振興会特別研究員 (PD)。2009 東京農工大大学院工学研究科助教。2015 岡山大大学院自然科学研究科講師。通信ネットワークを介した制御, メカトロニクス機器の運動制御の研究に従事。