

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656243

研究課題名(和文)無線フィードバック制御システムにおけるビヨンド・コグニティブ無線

研究課題名(英文)Beyond Cognitive Radio in Wireless Feed-back Control Systems

研究代表者

原 晋介(Hara, Shinsuke)

大阪市立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80228618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：無線通信システムのアプリケーションをフィードバック制御に限定すると、無線通信路の時間・周波数資源といった物理環境に加え、情報源と通信先の間でやり取りされるメッセージの内容といった意味環境を理解できるビヨンド・コグニティブ無線が実現することを示した。送りたいパケットの重要度を推定し、それにより決定された優先順位に従ってバックオフ時間を制御するキャリアセンス多重アクセス方式を提案し、回転倒立振子の最適制御を行っている複数の無線システムが1つの空間に共存している環境を計算機の中でシミュレートし、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Limiting the application in a radio communication system within feedback control, it was shown that beyond cognitive radio is realizable, which can understand not only the physical environment of the radio channel but also the semantic environment of the application. A carrier sense multiple access (CSMA) scheme was proposed, which estimates the importance of packet and controls the back-off time according to the priority of the packet determined by the estimated importance. The performance of the proposed CSMA scheme was evaluated by computer simulation, assuming a situation where there were several wireless systems controlling rotational inverted pendulums.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：コグニティブ無線 フィードバック制御 キャリアセンス 有線制御 回転倒立振子

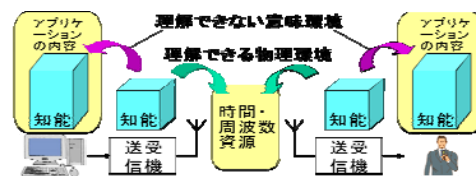
1. 研究開始当初の背景

時間・周波数資源の枯渇から、無線通信システムでは、これらを有効に活用するためのコグニティブ無線の研究が近年盛んになっている。コグニティブ無線に関しては、S. Haykin がその定義を以下のように明確に述べている；コグニティブ無線とは、時間・周波数資源(物理環境)をセンスし、学習によって内部状態を適応的に変更できる知的な無線通信システムのことである。図1(a)に示すように、これまでの一般的な無線通信システムでは、情報源/通信先は、高い知能を持った人間やコンピュータ等だったので、送受信機の知能は、それらの間のアプリケーションの内容(意味環境)は理解不能であるという前提に立っていた。従って、送受信機の知能がセンスできるのは、物理環境だけであり、情報源/通信先の間でやり取りされるアプリケーションの満足度とは関係なく客観的に測れる、データの誤り率や遅延といったサービス品質を表す QoS (Quality of Service) により無線リソース・マネージメントが行われていた。

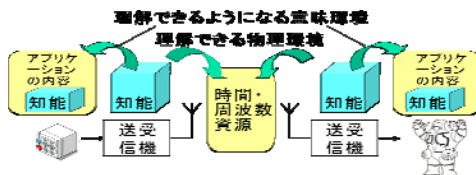
一方、情報源/通信先を、これまでの人間やコンピュータ等から機械に広げる試みが始まっており、機械-機械 (M2M; Machine-to-Machine) 通信と呼ばれている。M2M 無線通信システムでは、情報源/通信先間で制御情報とセンス情報がやり取りされ、これまで以上の信頼性が求められることから、信頼性の向上が大きな研究テーマとなっている。しかし、これを情報源/通信先の知能と送受信機の知能という観点から理解すると大きなパラダイムシフトがあることがわかる。すなわち、図1(b)に示すように、M2M 無線通信システムでは、情報源/通信先の知能が送受信機の知能よりも低くなるので、送受信機の知能が、物理環境に加え意味環境を理解できるようになる。つまり、S. Haykin の定義によるコグニティブ無線の概念を超え、送受信機の知能は、それら2つの環境をセンスしながら、無線リソース・マネージメントができるようになる。これを「ビヨンド・コグニティブ無線」と呼ぶ。

2. 研究の目的

機械をフィードバック制御する場合、そのアルゴリズムは数学によって定義され、コントローラ(機械)とプラント(機械)でやり取りされる制御情報とセンス情報はスカラあるいはベクトルとして数値で表現されるので、それらの内容は観測すればその重要度が理解できる。本研究の目的は、M2M 無線通信システムにおいて、アプリケーションをコントローラとプラント間のフィードバック制御に限定すれば、情報の重要度を使って、言い換えると、アプリケーションが満足いくような QoE (Quality of Experience) により無線リソース・マネージメントができることを示すことである。



(a) 一般的な無線通信システム：送受信機の知能より情報源/通信先の知能が高いため、送受信機の知能はアプリケーションの内容が理解できない。



(b) M2M 無線通信システム：送受信機の知能の方が情報源/通信先の知能より高くなるので、送受信機の知能はアプリケーションの内容を理解できるようになる。

図1 機械-機械 (M2M) 無線通信システムのパラダイムシフト

3. 研究の方法

図2に示すように、工場のような閉じられた空間に、独立な N 個の無線フィードバック制御システムが存在すると仮定する。工場では、レイアウト変更時の配線敷設の簡略化やトラックやカーゴといった移動体の収容等の理由により、M2M 無線フィードバック制御システムに対する強い要望がある。これらのシステムは、単一の無線通信路を共有しており、各システム内のコントローラとプラントは、ある決められたアクセス制御方式によって制御情報とセンス情報をそれぞれパケット化して送受信している。

アクセス制御方式には、大きく分けて、分割多重アクセス制御方式とランダムアクセス制御方式がある。分割多重アクセス制御方式の代表的なものに、周波数を分割して割り当てる周波数分割多重アクセス (FDMA; Frequency Division Multiple Access) と時間を分割して割り当てる時分割多重アクセス (TDMA; Time Division Multiple Access) があり、割り当て制御に関しては、割り当てを管理する制御局を必要とする集中制御が一般的である。無線リソース・マネージメント能力に関しては、制御局が一括して行うので、無線通信路においてパケットの衝突は起こらないが、重要度が低く、送信する必要のないパケット(場合によっては、空データのパケット)にも無線通信路のリソースが割り当てられてしまう。図3 (a)に TDMA 方式を示す。

一方、ランダムアクセス制御方式の代表的なものに、ある無線局(ここでは、コントローラとプラント)が送信したいパケットを持っている場合、まずキャリアをセンスし、無線通信路がビジー(他の無線局から送信されているパケットが聞こえる)の時は、しばら

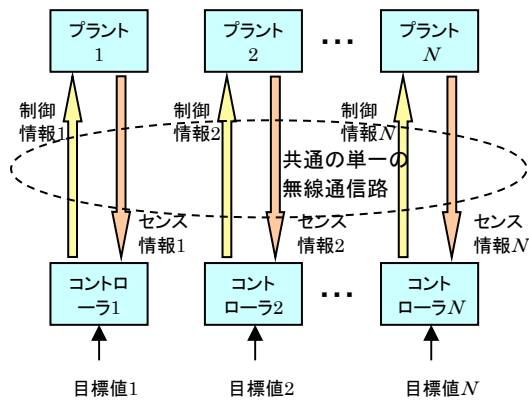


図2 無線フィードバック制御システムモデル

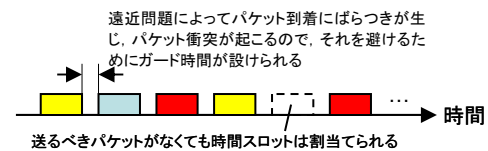
く待つからキャリアを再センスし、無線通信路がアイドルになってからパケットを送信するキャリアセンス多重アクセス (CSMA; Carrier Sense Multiple Access) がある。各無線局が自律分散制御を行うので、制御局は必要としないが、そのために無線通信路においてパケットの衝突が起こるので、無線リソース・マネジメント能力は低い。図3 (b) に CSMA 方式を示す。ただし、CSMA 方式の中で、重要度が高いパケットほど送信される優先度を高めることができれば、無線通信路をより重要度が高いパケットだけで満たすようにできるはずである。

工場のような環境を考えると、自律分散制御が適すと考えられ、実際に、ISA 100.11a や WirelessHART といった工場内での無線制御信号伝送のための標準規格では、自律分散制御である CSMA 方式を基本としたアクセス制御方式が採用されている。従って、本研究では、CSMA 方式の使用を前提とし、制御情報とセンス情報の特徴を使って、より重要度の高いパケットで無線通信路を満たすようにできる方式を考える。

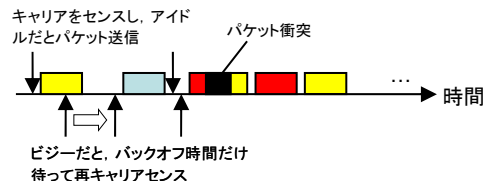
4. 研究成果

(1) CSMA 方式におけるバックオフ時間制御

IEEE 802.15.4 標準規格等で規定されている CSMA 方式では、各無線局がキャリアセンスし無線通信路がビジーだった場合には、ある決められた規則で計算されるバックオフ時間だけ待って、改めてキャリアセンスを行う。このバックオフ時間の長さはキャリアセンスの回数に従って長くなるように通常は設定されている。ここでまず、重要な点は、このバックオフ時間を意図的に制御すれば、自律分散制御で、パケットに優先順位が付けられることである。すなわち、図4 (a) に示すように、重要度が高いパケットを送信する場合、バックオフ時間を短く設定すると、そのパケットは無線通信路にアクセスできる可能性が他のパケットよりも大きくなるので、高い優先順位を付けることができ、逆に、図4 (b) に示すように、重要度が低いパケットを送信する場合、バックオフ時間を長く設定すると、他のパケットに無線通信路にアク

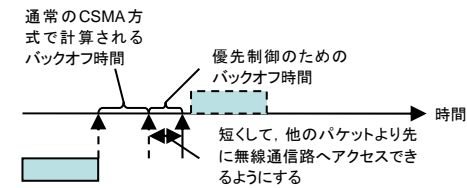


(a) TDMA方式

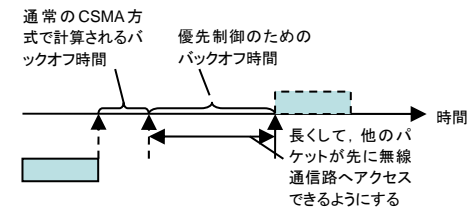


(b) CSMA方式

図3 TDMA方式とCSMA方式



(a) 重要度の高いパケットの送信



(b) 重要度の低いパケットの送信

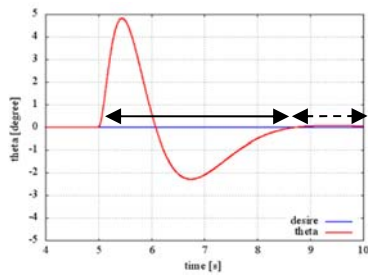
図4 重要度に応じたバックオフ時間の制御

セスする機会を譲ることになるので、低い優先順位を付けることができる。本研究では、CSMA 方式の中で自動的に計算されるバックオフ時間に加え、パケットの重要度に合致したバックオフ時間を設定することを提案する。

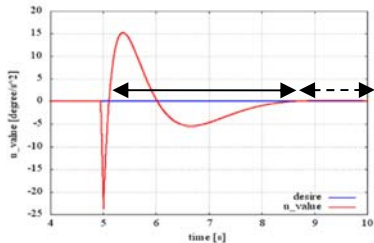
(2) パケットの重要度の推定

制御情報とセンス情報は数値データであるので、パケットの内容を調べ、それらの時間変化を無線局が観測することを考える。これは、データが暗号化されてなければ、容易に行える。現在のパケットのデータと一つ前に送信したパケットのデータの差分を、ここでは簡単のため時間差分と呼ぶことにする。

制御データとセンスデータの時間差分は、コントローラに急な目標値が入力された場合や、プラントが不安定で適切な制御がまだ要求されている場合に大きくなり、これらのデータの重要度は高い。逆に、現在の制御が適切で、プラントが安定である場合、時間差分は小さくなり、これらのデータの重要度は低い。このようなデータは送信する必要がないこともある。例えば、図5は、後述する回転倒立振子を最適フィードバック制御した場合の制御データの時間変化と、あるセンスデータの時間変化を表したものである。図中



(a) 制御データの時間変化



(b) センスデータの時間変化

図5 回転倒立振子のフェードバック制御システムの制御データとセンスデータの時間変化

の実線の時間範囲では、コントローラに目標値が入力されたことにより、制御データとセンスデータが大きく変化していることから、この部分のデータは重要で確実に無線伝送する必要があり、一方、破線の時間範囲では、プラントが安定したので、この部分のデータは重要でなく無理に無線伝送する必要はない。このように、無線局は、送信したいパケット内のデータの時間差分を計算することにより、そのパケットの重要度を推定することができる。

(3) 無線通信の同報性の利用したパケットの優先制御

単一の無線通信路を複数のシステムで共有している場合、各システムは、他システムで送信されているパケットも受信することができる。これを無線通信の同報性と呼ぶ。従って、無線局は、自分が送信したいパケットの重要度はもちろん前述した方法で推定できるが、この無線通信の同報性を利用すると、他システムで送受信されているパケットの重要度も推定できる。

無線通信の同報性を利用したパケットの優先制御では、自システム内で送受信されるパケットの時間差分と、他システムで送受信されるパケットの時間差分を計算し、時間差分の大きさでソートし、まず時間差分テーブルを作成する。そして、各無線局は、より大きい時間差分のパケットに、より短いバックオフ時間、つまり、より高い優先度を与えるような制御を行う。各コントローラは、他のコントローラに新しい目標値が入力されたことはわからないので、過去に送受信されたパケットだけから時間差分テーブルを作成する。ただし、無線通信路では、フェージングによってパケット受信誤りが発生するの

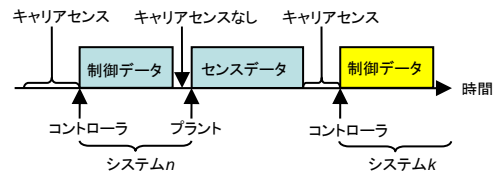


図6 プラントのアクセス制御方式の簡略化

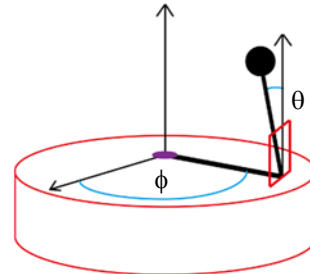


図7 回転倒立振子

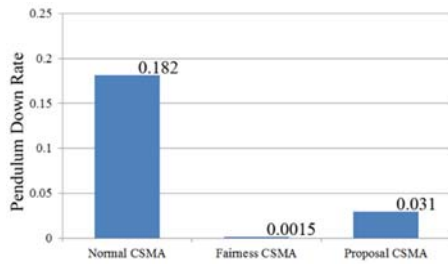
で、各無線局は、領域内で送信されているすべてのパケットを受信できるとは限らない。従って、各無線局の持つ時間差分テーブルは、理想的にはすべて同一であるが、実際には、異なったものとなる。

(4) プラントのアクセス制御方式の簡略化

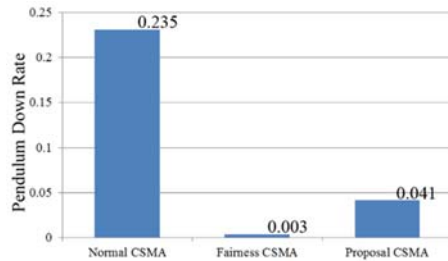
フィードバック制御システムの無線化では、コントローラの無線局をインテリジェント化し、一方、プラントの無線局は単純化することが求められる。プラントの無線局をインテリジェント化してもよいのならば、プラントにコントローラを持ってくればよい。従って、本研究では、プラントの無線局を簡略化する。図6に示すように、提案するアクセス制御方式では、パケットの能動的な送信とキャリアセンスはコントローラだけが行う。プラントはコントローラからの制御情報を受信した時だけ、キャリアセンスを行わず、センス情報をコントローラに受動的に返送する。言い換えると、コントローラがパケットを送信すると、それに続くある一定の時間間隔だけ無線通信路が予約されることとなり、その間には、他システムのコントローラはパケットを送信できなくなる。

(5) 回転倒立振子を前提とした転倒率評価

提案する方式の特性を評価するために計算機シミュレーション実験を行った。ここでは、各無線フィードバック制御システムが、回転倒立振子の最適制御を行うことを考える。回転倒立振子とは、図7に示すように、振子の位置が目標値として入力された時に、振子の鉛直方向からの傾斜角 θ が大きくなって転倒しないように、回転角度 ϕ を制御するものである。本研究は、制御というアプリケーションでの満足度を評価の指標とする必要があるので、傾斜角 θ が15度以上になった場合を転倒と定義し、その転倒率でシステムの特性を評価する。



(a) 目標値入力に偏りが無い場合



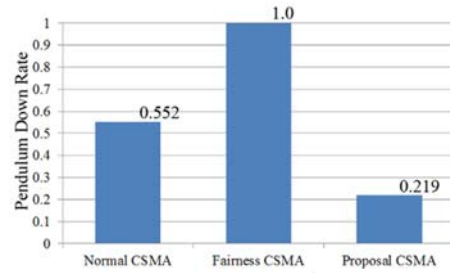
(b) 目標値入力に偏りがある場合

図8 4システムの場合の
転倒率評価

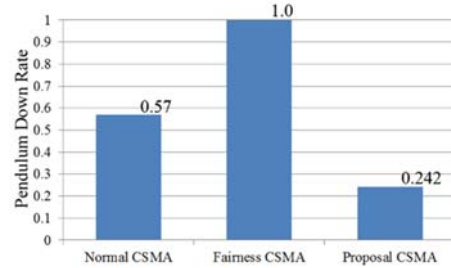
図8に4システムの場合の転倒率を示す。ここで、提案法であるProposal CSMA方式の特性と比較するために、優先制御を行わない通常のNormal CSMA方式と、送信したパケットの個数がシステム間で同等となるようにスケジューリングを行うFairness CSMA方式の特性も示す。同図(a)は、目標値入力の到着がシステム間で同等で偏りが無い場合の特性を示し、一方、同図(b)は1つのシステムだけ目標値入力の到着が多く偏りがある場合の特性を示す。4システムの場合、重要度が低いものから高いものまで、すべてのシステムのトラフィックを収集する余裕が無線通信路の時間リソースにあるため、Proposal CSMA方式はNormal CSMA方式よりも転倒率を小さくすることができるが、目標値入力に偏りがあってもなくても、Fairness CSMA方式よりも転倒率を小さくすることができない。

図9に8システムの場合の転倒率を示す。システム数が増加し、無線通信路の時間リソースに余裕がなくなると、重要度の高い情報に優先度を与えないと、この場合は、不安定なプラントへの制御情報とそれからのセンサ情報に優先度を与えないと、転倒率が大きくなる。従って、Fairness CSMA方式ではすべてのシステムで転倒が発生するが、Proposal CSMA方式では転倒率を小さくすることができる。

以上、計算機シミュレーション結果で示されたように、アプリケーションをフィードバック制御に限定すると、アプリケーションでの満足度を決定する情報の重要度を無線局が時間差分を計算するだけで推定できるようになる。そして、その重要度を用いてCSMA方式のバックオフ時間を制御すると、無線通信路にアクセスできる優先度を制御できる



(a) 目標値入力に偏りが無い場合



(b) 目標値入力に偏りがある場合

図9 8システムの場合の
転倒率評価

ようなる。これはまさに、QoEによる無線リソース・マネージメントができることを示している。

機械学習の研究の進展には目を見張るものがあるので、人間の会話のような高度なアプリケーションであっても、無線局がその意味を理解し、意味から重要度そして優先度を決定し、その優先度に従って無線リソース・マネージメントができる時が近い将来やってくると思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① J. Tomiyama and S. Hara, A QoE-Based Radio Resource Management for Control over Wireless, Proceedings of International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) 2014, in CD-ROM, Phuket, Thailand, 1-4 July 2014, 査読あり.
- ② Y. Tanaka and S. Hara, Block Localization Methods for Robot Tracking and Navigation, Proceedings of IEEE Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC) 2013, pp. 1-6, Dresden, Germany, 20-21 Mar. 2013, 査読あり.
- ③ M. Fujiwara and S. Hara, A Modest CSMA for Control over Wireless, Proceedings of IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS) 2012, pp. 373-377, Singapore, 21-23 Nov. 2012, 査読あり.

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① 富山純一，原 晋介，無線制御における CSMA 方式のバックオフ時間制御について，2014 年電子情報通信学会総合大会，2014 年 3 月 18 日，新潟県新潟市。
- ② 原 晋介，フィードバック制御に適する無線アクセス制御方式について，第 55 回自動制御連合講演会，2012 年 11 月 18 日，京都府京都市。
- ③ 原 晋介，ワイヤレスの信頼性はどうか？向上するのか？強調ノード選択，電子情報通信学会高信頼制御通信研究会，2012 年 6 月 4 日，岐阜県下呂。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.c.info.eng.osaka-cu.ac.jp/projects/dependable-wireless-networking/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 晋介 (HARA SHINSUKE)
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80228618

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし