

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22360152

研究課題名（和文）

協調動作をする複数の機器の同時遠隔無線制御に関する研究

研究課題名（英文）

Wireless Control Systems for Cooperative and Synchronous Motions of Multiple Machines

研究代表者

片山 正昭 (KATAYAMA MASAOKI)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：60185816

研究成果の概要（和文）：

協調して動作する機器を無線制御するようなシステムについて検討した。無線通信の確率性により確率系となる無線制御系のための確率的な品質評価尺度を導入した。特に従来は明確に定義されていない協調動作制御品質の尺度を与えた。また、無線制御システムにおいては、制御層の振る舞いに基づく適応通信や、無線層と制御層の分担・協調による統合最適化が可能であり、またそれらが必要かつ有効であることを具体例により示した。

研究成果の概要（英文）：

Wireless control systems for multiple plants with cooperative and synchronous motions have been investigated. Since wireless channels are stochastic, the overall wireless control systems have to be treated as stochastic systems. For such systems performance measures based on probabilities have been introduced, including measures of synchronicity of motions. The most important result of this research project is the fact that communication adaptive to the behavior/state of controller/plant and total cross layer optimization of control and communication are possible and effective. This fact is represented with evidences based on analysis and experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

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：遠隔制御，無線制御，複数機器制御，高信頼性通信，通信・制御統合最適化，ロボット，電力線通信，可視光通信

## 1. 研究開始当初の背景

### (1)無線制御への期待

無線制御には、応用面から多くの期待が集まっていた。産業機器分野においては、省配線だけではなく、ロボット・無人搬送台車等の移動する機器の制御や、ライン組替の柔軟性の観点からも、通信専用線を必要としない無線制御は重要である。また Smart Grid のような大規模環境システムにおいても利用者側機器（電気自動車の充電や温水/氷蓄熱機器等）の自動制御が必要となっている。

### (2)無線制御研究の状況

主に海外の制御分野の研究者が、制御システムにおける通信品質の影響について検討を始めている。たとえば海外では IEEE の Proceedings も 2005 年、2007 年に二度の特集を組んでいた。しかしこれらの研究の多くは制御分野からのアプローチであった。実際の無線通信系の性質を考慮した研究はほとんど行われていなかった。制御品質向上のための無線部の特性改善も検討されていなかった。

### (3)協調動作研究の欠如

遠隔操作、無線制御が行われる実際の場面では、複数機器が協調して動作するようなシステムがしばしば求められる。複数のロボットによる生産ラインや、Smart Grid における給電側と受電側の制御などである。このように複数の機器が共同作業する場合、各機器の協調動作が不可欠である。しかし協調動作を保証することを意識した無線制御の研究は、通信側からはもちろん、制御側からも、殆ど行われていなかった。

## 2. 研究の目的

多くの制御系では、制御対象である機器と制御装置の間で、制御信号と観測信号（フィードバック信号）をやりとりすることで、機器の動作を制御している。ここで制御信号や観測信号に誤りが無ければ、制御系は、同じ入力に対しては、機器は同じ動作を行う確定系となる。ところが遠隔無線制御では、通信の誤りや遅延（誤り再送制御によるものを含む）は、確率的現象である。そのため、制御系全体を確率系と捉える必要がある。また複数の機器が協調動作を行う場合は、それぞれの機器の動作の正確さだけでなく、機器相互の動作の協調度が重要になる。合奏において、個々の演奏技術だけでなく全体のハーモニーが重要となるのと同様である。

本研究は、無線遠隔制御による複数の機器の協調動作を実現するための方策を、実際の機器と無線回線による実験により明確化することを目的とする。そこでは、今日まで殆ど研究が行われていない遠隔無線制御系の

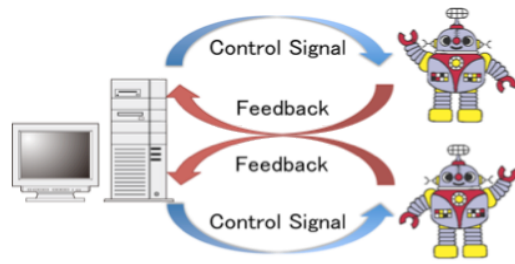


図1 複数機器フィードバック制御

動作と無線通信回線の性質の関係を明らかにする。従来は明確に定義されていない協調動作制御品質の尺度も決定する。さらに、制御（特に協調動作制御）のための無線通信の必要要件や設計指針を明確化する。さらにその成果に基づき、遠隔無線制御された複数機器の協調動作品質の向上手法を提案する。

制御対象としては、次節で述べるように、高速フィードバックを必要とする回転倒立振り子、および無線制御が不可欠である全方位台車(群移動ロボット)を採用する。また通信路としては、通常の無線通信に加え、今後の Smart Grid 等で重要となる電力線通信、および免許が不要で柔軟性に富む可視光通信も対象とする。

## 3. 研究の方法

図1に複数の制御対象のフィードバック制御のイメージを示す。本研究では、このようなモデルについて制御（特に協調動作制御）のための無線通信の必要条件や設計指針の明確化、制御品質の向上手法の検証を行う。図1においてはロボットで表されている制御対象、および図中で矢印で表されている無線回線の具体的な内容について以下で述べる。

### (1) 制御対象

#### ①回転倒立振り子

安定性解析などの制御理論分野でしばしば使われている。回転する腕木の先に、腕木に直交する垂直面内で自由に回転できるような振り子がついている。制御可能なのは腕木角度のみであり、それに対し制御対象は複数（腕木と振り子角度）という劣駆動システムである。入力と出力の関係が複雑であり、また高速フィードバックを必要とする制御系である。観測信号

（フィードバック）は腕木と倒立振り子の位置（角度）、制御信号は腕木の位置（を定めるステッピングモータ動作）である。

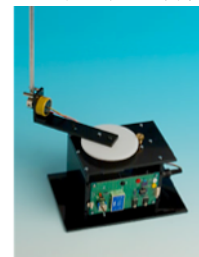


図2 回転倒立振り子

②全方位台車  
全方位台車は、  
制御分野で重要  
な課題でありまた  
無線の利用が  
不可欠である群  
行ロボット  
のチームワーク動

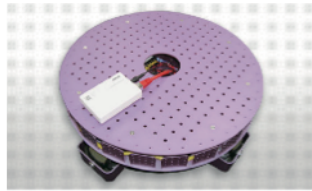


図3 全方位台車

作の実験を行うためのものである。オムニホイールを装備した地上用の全方位走行ロボットで、90度間隔で同心円状に配置した4つの車輪に独立した駆動モータを実装している。約15kgの装置を搭載して1.5km/h程度で移動できる。

## (2)通信回線

### ①無線通信回線

2.4GHz帯に代表される無線通信回線を主たる回線として想定した。特に、従来の無線制御では、あまり考慮されていない無線回線のメリット、即ち、同報性に着目したことは、本研究の独創性である。

### ②可視光通信回線

数MHzまでの周波数の信号で変調されたLED照明光を信号として利用する回線である。電波を用いたシステムと違い信号送出のための免許が不要であり、多様な実験を行うことが可能であることが有利な点である。

### ③電力線通信回線

Smart Grid等において、今後重要性が高まる電力線通信による制御を考えた。回線の品質が、交流電源の瞬時電圧に対応して周期的に変動することが本回線の特徴である。

## 4. 研究成果

### (1)制御と通信の融合

研究目的の項目で、述べたように、申請段階でも、無線回線の確率的現象が無線制御システム全体を確率系とすることは指摘していた。本研究を遂行する上で、この点の考察を更に深める事ができた。その結果としての知見が、本研究課題の重要な成果であると考えられる。そこで、具体的な研究成果の各論に先立ち、本研究で得られた一般的知見を総論として述べる。

#### ①確率系としての無線制御系の品質尺度

確率系として捉える必要がある無線制御系では、その品質も確率的に捉える必要がある。従来の制御理論でしばしば用いられる「安定」も、通信が極めて長時間途絶したり、何度もデータ誤りが発生したりする確率が非零であるからには、絶対的に保証することはできない。そこで、本研究では、たとえば「倒立振り転倒確率」「複数機器の動作ずれ

の二乗平均」のような確率的尺度を提案し使用した。これは制御分野の研究者から、新鮮で有益な尺度であるという評価を得ている。

#### ②制御と通信の統合(Cross Layer)最適化

下位層、すなわち無線伝搬路の状況を観測し、それに応じて通信方式を変化させる適応無線通信方式は、現在、研究が盛んにされているところである。ところが、無線制御では、無線通信の上位層にある制御システム部分が数学モデル化や品質の数値化が可能である。このため、無線通信の下位層だけでなく上位層の状況に基づき、伝送方式や符号化方式を変える手法が可能となる。また品質向上の努力を、通信層/制御層でどのように分担するかの決定も定性的・定量的に行うことができる。このような制御と通信の統合最適化の可能性は、無線制御が、単なる制御への通信応用ではなく、制御と無線の融合分野であることを示している。これは、本研究課題遂行によってえられた重要な知見である。

#### (2)主な具体的成果

本研究の成果の詳細は、次項「主な発表論文等」でリストアップした文献で公開している。そこで本項では、代表的な成果をまとめて示す。

#### ①無線回線の同報性による制御品質向上

無線通信路においては、特定の相手に対して送信された信号も、その近傍では受信可能である。このような無線通信回線の同報性を活かし、制御対象が自分宛の制御器からの信号だけではなく、協調動作する他の制御対象宛の信号も受信して、それを活用することで制御の同報性を向上する手法を提案し、制御系が独立にそれぞれの信号を送受信する場合と比較して、協調動作の同期特性が改善することを示した。さらにこれを進めて、制御対象機器が状態情報を制御器に送信する際に、それが受信した他の制御対象宛の制御情報を付加して送信することで、周辺の他の制御対象の制御情報受信を支援する手法の有効性も示した。このような手法においては、単に、通信部分での処理だけではなく、予測制御の考え方を取り入れること、即ち通信と制御の統一的設計が必要であることも示した。

#### ②制御対象の状態に基づく通信量削減

無線制御で用いられる周波数スペクトルは、有限の資源である。特に多数の機器が無線制御されるような環境を考えると、無線制御においても周波数有効利用は重要な課題である。周波数スペクトルの有効利用のために、制御情報や観測情報の伝送を削減することを考える。具体的には、送信される情報の

一部を省略し、受信側でその値を推測する手法である。しかしながら、単純な送信省略は、当然、制御品質の低下を伴うことになる。そこで、制御対象の状態に適応的に送信情報量を定める方式を考案し、その優位性を示した。さらに、上で述べた無線通信回線の同報性をも活用することで、単純にパケット送信レートを減少させるよりも制御品質を高めることができることを示した。

#### ③制御対象の状態に基づく通信誤り制御

無線通信回線の品質向上手法としては、要求再送方式 (ARQ) と誤り訂正符号方式 (FEC) がある。このうち前者は、正しい情報が受信者に届くまでの時間が不定であり、一定間隔の情報交換が必要な制御システムには不適である。一方、FEC 方式の場合は、情報伝送にかかる時間は一定であることが保証されるが、伝送誤り率の低下のために、伝送レートの低下というコストを支払うことになる。制御システムの品質向上には、伝送誤り率と伝送レートのトレードオフを見定める必要がある。特に複数の品質尺度がある制御対象では、このトレードオフは単純ではない。そこで制御対象の状態の予測に基づき、誤り訂正符号強度を選択し適用する手法を提案し、その有効性を示した。

#### ④電力線通信回線を用いた制御

電力線通信による制御によって機器が動作をするシステムにおいて、電力線通信路におけるパケット損失が、機器の動作に与える影響を明らかにした。制御対象として回転倒立型振子を考え、制御情報の入力と状態情報のフィードバックを電力線通信によって行う。電力線通信では雑音は周期定常雑音になる。周期定常雑音がある通信路と定常雑音がある通信路での制御品質を比較し、周期定常雑音がある通信路の方が有利な状態があることを示した。

#### ⑤可視光通信を用いたロボット制御

白色 LED 等の照明光を高速に変調することで情報伝送を行う可視光通信技術を、室内移動機器制御に用いることを考える。本研究では、複数の移動機器制御を行うためにセルラシステムを採用する。その際、受信機の視野角を適切に定めることでセル間干渉を無視できる領域を大きくできることを示す。但し、受信機の視野角を定めるだけでは、干渉が無視できず通信が困難な領域は存在する。そこで、このような領域に存在する移動機器に対し、隣接する複数の照明器と協力して情報を伝送する協力伝送を提案する。この方式を用いた際の収容可能機器数の増加を示す。

#### 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)

R. Mizutani, K. Kobayashi, H. Okada,  
M. Katayama

Impact of the reduction of transmitted information on the control quality in a wireless feedback control system (査読有)  
IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E96-A, no.5, pp.869-877 2013 年 5 月  
DOI: 10.1587/transfun.E96.A.869

T. Kondo, K. Kobayashi, M. Katayama  
A Wireless Control System with Mutual Use of Control Signals for Cooperative Machines (査読有)

IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E95-A, no.4, pp.697-705 2012 年 4 月  
DOI: 10.1587/transfun.E95.A.697

C. Carrizo, K. Kobayashi, H. Okada,  
M. Katayama

Control Quality of a Feedback Control System Under Cyclostationary Noise in Power Line Communication (査読有)

IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E95-A, no.4, pp.706-712 2012 年 4 月  
DOI: 10.1587/transfun.E95.A.706

[学会発表] (計 31 件)

田中篤史, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
機器間協調動作を目的とする無線フィードバックシステムの制御品質に対する伝送誤りの影響

電子情報通信学会 総合大会,  
AS-3-6, pp.S-32 - S-33 2013 年 3 月 岐阜

服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御における目標値追従性向上のための適応誤り訂正手法

電子情報通信学会 総合大会,  
AS-3-7, pp.S-34-S-35 2013 年 3 月 岐阜

C. Carrizo, K. Kobayashi, H. Okada,  
M. Katayama

Performance Improvement of a Feedback Control System in a Power Line Environment through the use of a Cyclostationary Noise-Adapted Predictive Control Scheme  
IEICE General Conference,

AS-3-8, pp.S-36 - S-37 2013 年 3 月 岐阜

小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭

無線フィードバック制御系における状態オブザーバを利用した最尤判定受信機

電子情報通信学会 総合大会,  
B-19-56, p. 600 2013年3月 岐阜

服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御のための適応誤り  
訂正手法のフェージング環境下における性能評価

電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2012-01, pp. 7-13 2013年1月 横浜

朝倉俊, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
強度変調を用いたセルラ可視光通信のダウン  
リンクにおける協力伝送方式  
電子情報通信学会技術研究報告,  
OCS2012-96, pp. 65-69 2013年1月 愛媛

小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭 無線フィード  
バック制御系における状態予測を利用した最適  
受信機に関する一検討  
第55回自動制御連合講演会,  
2D202, pp. 1111-1116 2012年11月 京都

片山正昭  
[招待講演] 高信頼制御通信研究の学術的・  
産業的意義  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2012-11, pp. 1-8. 2012年10月 福岡

水谷亮太, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
複数機器無線制御における予測制御情報を用  
いた伝送情報量削減に関する一検討  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2012-19, pp. 50-54 2012年10月 福岡

小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御系における最適受  
信機に関する一検討  
電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ  
大会, A-5-15, p. 98 2012年9月 富山

服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御のための状態予測  
に基づく適応誤り訂正手法の性能評価  
電気関係学会東海支部連合大会,  
01-7 2012年9月 豊橋

朝倉俊, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
可視光通信を用いた複数移動機器制御にお  
ける制御可能台数の評価  
電気関係学会東海支部連合大会,  
P4-2 2012年9月 豊橋

服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御のためのパケット  
ロス検出と状態予測に基づく前方誤り訂正  
手法  
電子情報通信学会技術研究報告,

RRRC2012-2, pp. 3-10 2012年6月 岐阜

片山正昭  
[特別講演] 高信頼制御通信研究の意義 -  
その理論と応用 -  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2012-10, p. 12 2012年6月 岐阜

服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御のための前方誤り  
訂正手法に関する一検討  
電子情報通信学会 総合大会,  
AS-4-1, pp. S-38 - S-39 2012年3月 岡山

片山正昭  
[依頼講演] 持続可能な低炭素社会実現のため  
の情報通信技術  
電子情報通信学会 総合大会,  
AI-1-1, pp. SS-79-80 2012年3月 岡山  
M. Katayama  
[Keynote] M2M: System Control via PLC  
the 16th IEEE ISPLC.  
2012年3月 Beijing, China

水谷亮太, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御システムにおける  
パケットロスを考慮した伝送情報量削減手  
法  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2011-19, pp. 13-18 2012年1月 奈良

小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
状態オブザーバを用いた無線フィードバ  
ック制御システムにおける伝送誤りの影響に  
関する一検討  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2011-11, pp. 7-12 2011年11月 北九州

片山正昭  
[チュートリアル] 高信頼性無線制御におい  
て大切なもの -無線の品質≠制御の品質-  
電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ  
大会, AT-2-3, pp. SS-46 - SS-47 2011年9  
月 札幌

水谷亮太, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御システムにおける  
時間的な観点での伝送情報量削減手法  
電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ  
大会, AS-2-6, pp. S-13 - S-14 2011年9月  
札幌

C. Carrizo, K. Kobayashi, H. Okada,  
M. Katayama  
Evaluation of the influence of  
cyclostationary noise in a power line on  
the control quality of a rotary inverted

pendulum  
Engineering Sciences Society Conference  
of IEICE, AS-2-5, pp.S-11 - S-12 2011 年  
9月 札幌

カリソセサル, 小林健太郎, 岡田啓,  
片山正昭  
電力線通信を用いた回転型倒立振子の制御  
における周期定常雑音の影響評価  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2011-6, pp.19-24 2011 年 6月 東京

水谷亮太, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭  
無線フィードバック制御システムにおける  
伝送量削減の影響  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2011-3, pp.13-18 2011 年 6月 東京

T. Kondo, K. Kobayashi, M. Katayama  
A Wireless Cooperative Motion Control  
System with Mutual Use of Control Signals  
IEEE ICIT-SSST2011,  
pp.25-30 2011 年 3月 Alabama, USA

水谷亮太, 小林健太郎, 片山正昭  
無線制御された回転型倒立振子におけるフ  
ィードバック伝送量削減の制御品質への影  
響  
電子情報通信学会 総合大会,  
ABS-1-11, pp.S-96 - S-97 2011 年 2月

近藤継敬, 小林健太郎, 片山正昭  
協調動作する複数機器の無線制御における  
制御信号の相互利用による特性改善手法  
電子情報通信学会技術研究報告,  
RRRC2010-15, pp.27-32 2010 年 11月 名古屋

片山正昭  
スマートグリッドと情報通信技術  
電気関係学会東海支部連合大会 2010 年 8月  
愛知

片山正昭  
特別講演：頼れる無線制御システム実現の鍵  
電子情報通信学会技術研究報告, RRRC2010-7,  
pp101-120, 2010. 2010 年 7月 東京

近藤継敬, 山里敬也, 片山正昭  
協調動作のための無線制御方式における伝  
送誤りの影響と特性改善手法  
電子情報通信学会技術研究報告,  
WBS2010-11, pp.57-62 2010 年 6月 沖縄

片山正昭  
無線制御における通信路特性と制御品質  
第 54 回システム制御情報学会研究発表講演  
会 F443 2010 年 5月 京都

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

片山正昭 (KATAYAMA MASA AKI)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授  
研究者番号：60185816

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし