

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14732

研究課題名（和文）電力パケット伝送ネットワークに基づくロボット運動の創発と制御に関する研究

研究課題名（英文）Research on Emergence and Control of Robot Motion Based on Power Packet Dispatching System

研究代表者

持山 志宇（Mochiyama, Shiu）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：20867866

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、電気エネルギーにより駆動される歩行ロボットを対象に、その歩行動作の生成および制御を担う情報系とエネルギー供給を行う電気系を統合して取り扱う枠組みを与えるものである。電力のパケット化およびそのルーティングの提案をもとに、上記統合を物理層における回路スイッチングの結果として実現する仕組みを提案した。さらに、提案システムの二足ロボット歩行への適用により、その有効性の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、我が国ではサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する Society 5.0 の実現に向け取り組んでいる。中でも、自律移動ロボットの導入とデジタルプラットフォームとの融合は、具体的な実現目標として掲げられている。この目標に対し、本研究の成果は、フィジカル空間の制御において中心的役割を担う物理量である電力の操作と情報システムの融合を、電力のパケット化技術にもとづき実現する枠組みを提示するものである。

研究成果の概要（英文）：This research provides a framework for integrating the information system that generates and controls the walking motion of a robot and the electrical system that supplies energy. Based on the concept of power packetization and its routing, the above integration is realized at the same physical layer as a result of circuit switching. The effectiveness of the proposed system was verified by applying it to a biped walking robot.

研究分野：電気電子回路工学

キーワード：電力パケット 歩行ロボット

1. 研究開始当初の背景

計算モジュールやセンサモジュールの小型化および高性能化を始めとする情報処理技術の発展と、無線通信を始めとする通信技術の発展に基づき、あらゆるタスクの実施において利用可能な情報量は増大している。特に、得られた情報をロボット、乗り物、電力系統など、現実世界の物理システムの制御に利用するための研究が盛んに行われている。これらはサイバーフィジカルシステム(CPS)などの枠組みで、物理と情報の統合技術として議論されている。

しかしながら、従来のアプローチでは、計測やシステム制御などの情報系と、電力変換やアクチュエーションなどの物理を扱う系とは、基本的に独立に研究開発されている。そして両技術の統合においては、一方のシステム構築において他方の動作に一定の仮定を課すなどして全体のバランスをとるといった方法が取られている。

このような方法は、従来技術の延長として比較的容易な統合の実現を可能とする一方、両者とともに安全マージンを確保することを前提とするため、パフォーマンスを最大限に引き出すことは困難である。また、特に物理系において前提とするマージンが確保されない状況が生じた場合、情報系の意図する動作に対応する現実の物理量の存在が保証されない。これは、意図した動作の実現が不可能になるばかりでなく、統合システム全体としての障害につながるおそれがある。

これは特に、移動ロボットのように、予測不可能な状況下で環境変化への速やかな対応を要求される場合や、外部の十分大きな容量の電源から切り離され、利用可能な電力量に制約をもつ場合において顕著となる。例えばロボットの歩容生成タスクにおいては、脚角度などの形で情報処理系が指定した状態を達成するための電力が供給側の容量を上回る場合、想定された動作と実際の動作に乖離が生じる。さらに、その乖離が電力供給のさらなる不均衡を生じさせ、その影響が当該アクチュエータのみならず他の機器への給電にまで波及するおそれがある。

2. 研究の目的

上記の課題に対し、本研究では情報の処理および伝送と物理量の取り扱いを本質的に統合する新たな枠組みの構築を目指す。とくに物理系の具体例として、大小様々なアプリケーションが存在し、情報系との統合の試みも盛んに検討されている、電気エネルギーを媒体とするエネルギーシステムと電動アクチュエーションによる機械系駆動を設定する。中でも、対象として移動型のロボットを設定し、歩行運動の創発と制御に関する情報および電力処理の統合について検討する。

従来、CPGに代表される歩行制御システムと、電力変換を含むエネルギー管理システムは別個に開発されてきた。本研究では、それらを電力のパケット化とそのルーティング技術に基づくアプローチから、物理層で統合することを目指す。

電力パケットとは、パルス状に小分けにされた電力に、電圧波形として情報のタグを付与した伝送単位である(図1)。タグには由来や宛先の情報に加え、電力の利用法に関わる制御情報など、任意の情報を載せることができる。各電力パケットはワイドバンドギャップ半導体を用いた高速低損失な回路スイッチングにより生成される。そして、タグの情報をもとに、ルータと呼ばれるバッファ機能をもつ機器のネットワークを介して、宛先へと伝送される。このとき、異なるパケットを時間領域で区別する(時分割多重伝送)ことで、各パケットはネットワーク上で混ざり合うことなく区別される。

これらの特徴は、従来連続のフローとして回路ポテンシャルの勾配に従い供給されてきた電力が、それぞれ意思を持った単位パルス群が作る動的な時空間分布によって、置き換えられることを示唆する。本研究では、この分布の制御により、CPGで実現される運動目標情報の伝送とそれに必要な電力の伝送を実現することを目指す。

3. 研究の方法

電力のパケット化のロボット応用に向けて、次に示すようにハードウェアおよびソフトウェアの両面から検討を行った。

A. ロボット応用のための電力のパケット化とその伝送およびモータ駆動技術の確立

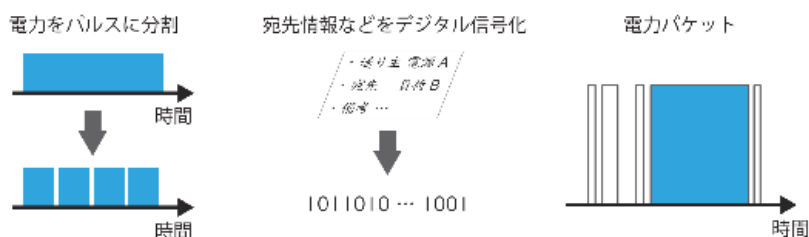


図 1

電力のパケット化を物理層で実現する要素技術はすでに提案され、小容量の系において実証された。電力容量が小さい場合には、用いられる電圧および電流の値が、一般に情報伝送系において用いられる値と近い領域にあった。一方、本検討で対象とするロボット等への応用に適する電力定格帯においては、その差は大きくなる。ここに電力のパケット化技術の物理層における課題が指摘されていた。そこで本研究では、電力パケット化技術を回路および半導体スイッチングの観点から再構築した。とくに、電力パケットのルーティングにおいてはルータ回路において電力と情報の統合と分離を適切に実施する必要がある。電力パケットの転送時はパルス電力に情報タグを付与し、受け取り時はそれらを分離して処理する。これらをロボット応用のための電力帯において実現した。

B. 電力パケットを電力および情報の伝送媒体とする歩行ロボット駆動技術の確立

従来のロボット歩容制御では、情報系は脚の角度や速度を目標値としてパターン生成を行う。また、センサからの計測情報にもとづき、その修正を行う。そして目標値は、配電系に渡され、電力変換によってアクチュエータ入力の調節により物理量として実現される。すなわち、本質的には、情報系は電気エネルギーの消費の時空間分布を生成する役割をもつといえる。本研究では、このエネルギーの時空間分布を、情報タグに基づく時分割多重伝送による電力パケットルーティングにより実現した(図2)。これにより、機械系と周囲環境との関係、および電力の可用性状況の両方にもとづいた、動作司令情報とその実現に必要な電力の時空間分布の制御を、統一的に扱う枠組みを構築した。

4. 研究成果

本研究の主要な成果は、次のようにまとめられる。

A. ロボット応用のための電力のパケット化とその伝送およびモータ駆動技術の確立

提案した回路構成を用いて、ロボット応用に向けて必須となるモータ負荷の電力パケットによる駆動技術を実現した。数kW級のモータを負荷として設定し、複数電源と複数負荷の間の電力伝送を、情報をタグ付けした電力のルーティングにより実現した(図3)。ここで、情報タグには各電力パケットが給電するモータおよびその励磁相のインデックスが付され、モータ直前に配されたルータにおいてその情報に従って電力の受け取りおよび指定相への伝送が行われる。以上の結果より、ロボット応用に向けた電力帯における電力と情報の伝送の物理層における統合が回路技術として実現可能であることを示した。これは、次に示すロボット応用の技術的基盤となるものである。

B. 電力パケットを電力および情報の伝送媒体とする歩行ロボット駆動技術の確立

二足歩行ロボットを対象として設定し、足首および股関節に配されたアクチュエータに電力パ

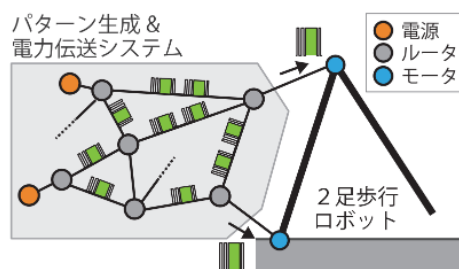


図 2

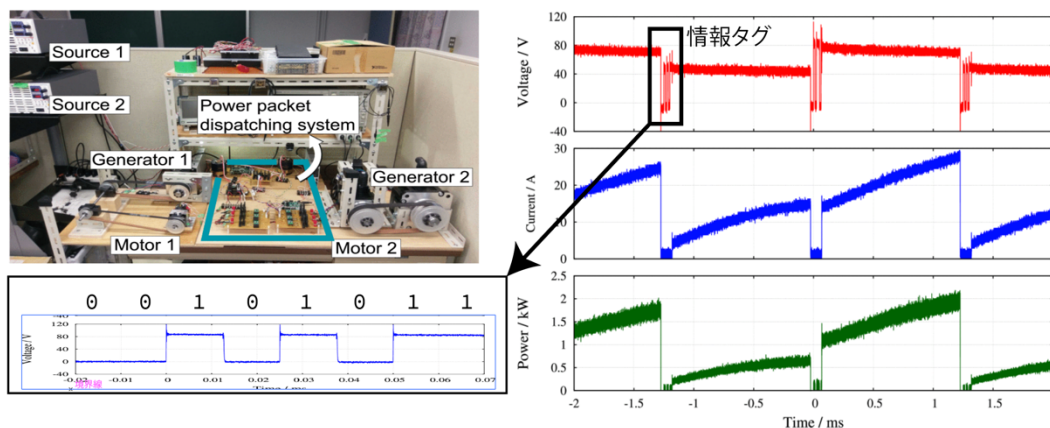


図 3

ケットを印加することで歩行が実現できることを示した。

まず、電力パケット供給による間欠的な入力により安定な歩行が実現できることを確認した (図 4)。さらに、生成される歩容と電力パケット入力との関係について検討を行った。印加するパケットの個数や分配比率を変更することで、歩幅、歩行速度、歩行周期などの点で多様な歩容が実現できることが明らかとなった。

次に、生成された歩容を数値的に解析し、その安定性などの性質や特定の歩行への引込み現象などについて検討した (図 5)。これにより、周囲環境に応じた歩容の動的な選択に向けた指針を与えた。

次に、上記の歩行制御システムと、電力パケットの供給タイミングを制御するパターン生成系との統合について検討した。情報生成系としての CPG の実現にも用いられる、生物模倣型のオシレータ回路を電力パケットの生成および伝送を行うルータに実装し、オシレータの発火に従う電力パケットの伝送により歩行の実現が可能であることを示した (図 6)。隣接ルータにおける発火が生体細胞における膜電位に相当する変数に影響を与え、その値がしきい値を超えると発火と判断し、電力パケットの伝送を行う仕組みを構築した。

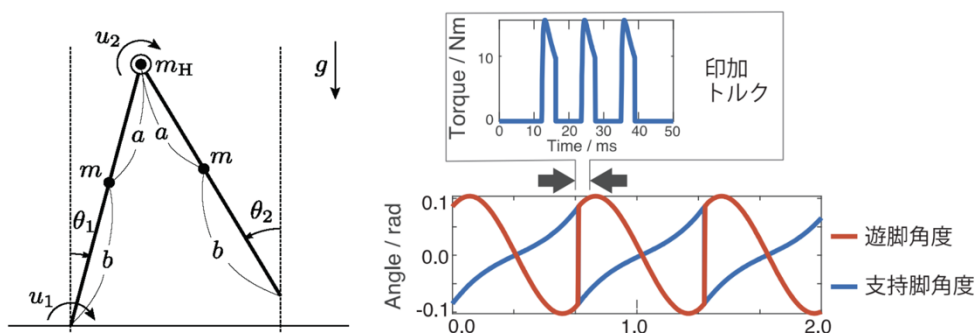


図 5

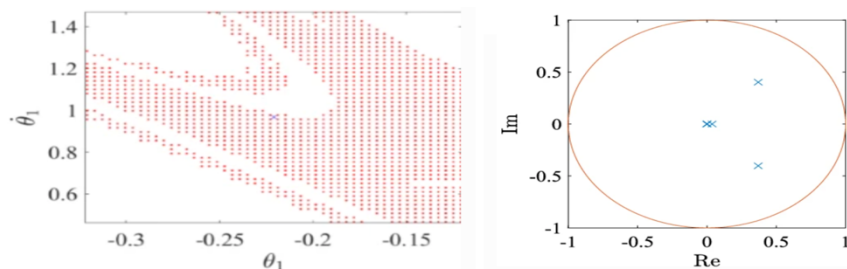


図 6

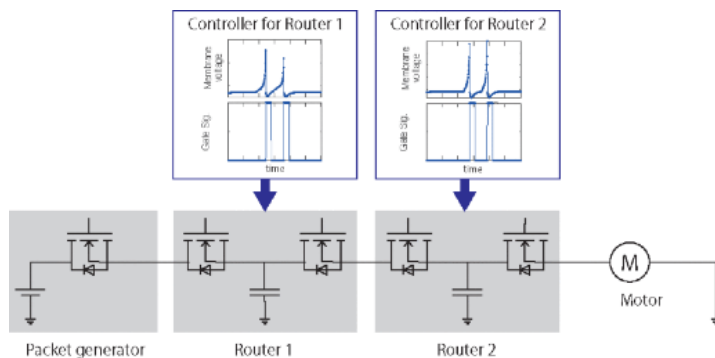


図 4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mochiyama Shiu, Koto Kazuhiro, Hikihara Takashi	4. 巻 13
2. 論文標題 Routing optimization on power packet dispatching system based on energy loss minimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 139 ~ 148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.13.139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Mochiyama Shiu, Okuda Takafumi, Hikihara Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 Power Packet Dispatching With Shared Power Line: Experimental Verification for Industrial Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 164 ~ 172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JESTIE.2020.3043141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mochiyama Shiu, Hikihara Takashi	4. 巻 102
2. 論文標題 Impulsive torque control of biped gait with power packets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 951 ~ 963
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11071-020-05756-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Mochiyama Shiu, Hikihara Takashi
2. 発表標題 Impulsive Torque Control of Biped Gait With Spiking-Oscillator-Controlled Power Packet Dispatching System
3. 学会等名 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mochiyama Shiu, Hikihara Takashi
2. 発表標題 Generation of symmetrical and asymmetrical biped gaits with quantized excitation by power packets
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mamiya Takahiro, Mochiyama Shiu, Hikihara Takashi
2. 発表標題 Motion Control by Wireless Transmission of Power Packets: Experimental Verification with Multi-finger Robot Hand
3. 学会等名 32nd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mochiyama Shiu
2. 発表標題 A PDM-Based Strategy for Power Packet Dispatching on Shared Power Line
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有澤 太喜、持山 志宇、引原隆士
2. 発表標題 電力パケットにより駆動されるコンパス型2脚ロボットの歩容に関する数値的検討
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------