

## 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 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560466

研究課題名（和文） 受動歩行を含む周期運動の解析と制御  
一歩行の本質の解明と作用素論的解析手法の確立

研究課題名（英文） Analysis and Synthesis for Periodic Motions including Passive Walking

研究代表者

平田 健太郎（HIRATA KENTARO）

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：00293902

研究成果の概要（和文）：

本研究では、周期運動というキーワードのもと、受動歩行現象の解明に見られるような制御と物理との結びつきに注目し、主として作用素論的立場から各種理論を構築し、制御工学の境界および可能性を広げることを目指した。結果、当初のターゲットであったアシスト制御以外にも、船舶応用、視覚フィードバック、分布系など多岐にわたるトピック について、極めて有用な成果を得た。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, we investigated the connection between control theory and physics mainly from an operator theoretic viewpoint under the keyword “periodic motion” to widen the border and increase the possibility of the control engineering. Other than the assist control, which was our original motivation, achievements over various application areas e.g. marine vehicle, visual feedback, distributed parameter systems are obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：周期運動，安定解析，作用素論，むだ時間，受動歩行

## 1. 研究開始当初の背景

我々は本提案に先立つ 2 件の科研費研究課題を通じて、周期運動，とりわけ受動歩行現象の遅延フィードバック制御と、その周辺問題に取り組んできた。その過程において、

不連続な軌道をもつハイブリッド系である受動歩行現象を記述する数理モデル，および無限次元系である DFC 下の受動歩行を記述する数理モデルを提案した。これらによって所望の解析が可能になったが、さらに、こ

これらのモデルが新しい知見およびパラダイムを提供するものであることが明らかになりつつあった。

## 2. 研究の目的

本研究では、「周期運動」というキーワードのもとで、上述の成果の一層の深化を図り、受動歩行現象の解明に見られるような、工学の枠を越えた「制御」と「自然科学」との結びつきや、むだ時間を含む無限次元系の制御に見られる、作用素論と制御理論の接点を再考することで、制御工学の境界および可能性を広げていくことを目的とする。これらによって、エネルギー効率に優れた周期運動のための制御理論などの実用的な技術を創出する。

## 3. 研究の方法

物理的観点からのモデリングに基づく現象の本質的な動特性の解明：

受動歩行の安定化機構がある種の最適制御として特徴づけられることが分かってきたが、これらの理論的結果を、エネルギー効率の改善などの工学的な課題の解決にどう結びつけていくかを検討する。歩行現象のPWA近似だけでなく、物理系と関連の深い熱・拡散現象などの分布系のモデリングと制御についても、幅広い視点に立って取り組む。

作用素近似によるむだ時間系の新しい解析手法の確立：

FSFH近似によるむだ時間の安定解析手法を発展させ、萩原らの提案する修正FSFH法や、矩形近似以外の近似積分法の適用を検討する。また、他のむだ時間系の安定判別法(L-K汎関数アプローチ, SOSアプローチ)

についても検討し、相互の関係について考察する。さらには、繰り返し制御系などへの拡張を試みる。

## 4. 研究成果

受動歩行の安定化機構の cheap optimal control としての特徴付けと2周期分岐のシステム論的解釈についてまとめた論文が英文誌に掲載された [7]。また受動歩行のモデリングとフィードバック制御に関して、国際ワークショップにて invited speaker として発表をおこなった (26)。多脚受動歩行における歩容同期のシステム論的な検討を念頭に、メトロノーム同期現象の数理について検討した。Incremental passivity に基づく振動子ネットワークの同期現象の解釈について、指導学生が国内研究会で発表をおこなった (15)。LMI による制御系設計との対比から、通信ネットワークのSDPによる最適化設計についても、分野横断的な研究をおこなっている (5, 6, 7, 9, 14)。周期運動制御のひとつである電動自転車のパワーアシスト制御におけるエネルギー効率改善について、国内大会にて共著の成果を指導学生が発表し (23)、優秀発表賞を受賞した。同結果を国際会議 (21) で発表した後に、論文として出版した [3]。同設計理論の実験による検証についても、国内外の会議 (1, 10) で発表した。バランスアシスト等に関しても、指導学生が国内研究会で発表をおこなった (4, 16)。同様のアイデアは、他の周期運動にも適用可能である。その一例として規則向波中を航行する船舶のエンジン制御への応用を考え、国内大会にて発表した (3)。この結果については現在国内誌に投稿中である。また、周期運動制御の前段階としての可変姿勢倒立ロボットのゲインスケジューリング制御に関して、指導学

生が国内外で発表をおこなった (8, 13, 18).

作用素論的なシステム解析, とくにむだ時間系の安定解析に関して, modified FSFH 法による monodromy 作用素のスペクトル計算法についての共同研究内容を, 国際会議にて共著論文 (32) として発表し, 後に英文誌に掲載された [6]. 上記計算法に対する別のアプローチとして, 非因果的な一次ホールドもしくはエルミート補間によって高精度化する方法について, 国際会議 (31) にて発表した. 現在英語論文としてまとめている最中である. むだ時間を含む視覚フィードバック系のロバスト設計に関する研究 2 件を国際会議 (29, 30) にて発表した. 後にこれらは, 大道芸ロボットの開発に関する論文 [9], および画像歪みに関するロバスト制御系設計に関する [4] として和文誌に掲載された. 関連するトピックとして, 不規則遅延の存在下でのネットワーク制御系の安定性に関連する研究 [8] が, 国内誌に掲載された. また, 駆動系の動作遅れを含む Active Vision と予測機構を組み合わせた移動体の三次元位置計測法に関する研究 (2, 24, 27) の一部を, 国際会議 (20) にて発表した. さらに Backstepping 変換を用いた入出力むだ時間の L-K 汎関数に基づく安定解析法についても検討している. オブザーバ併合系の場合の先行結果に対する反例と正しい証明方法について, 指導学生が国内研究会 (17) で発表をおこない, この結果は後に国内誌に掲載された [5]. 分布系としてむだ時間制御とも関連の深い, 冷却系および伝熱・拡散系のモデリングと解析についても, 各種会議で発表をおこなった (11, 12) (19, 22, 25). これらについても後に国内誌に掲載が決定した [1, 2]. 受動歩行に対する非侵襲的なアプローチとして, 状態にジャンプを有する系に対する遅延フィードバ

ック制御についての研究をかつておこなったが, その双対ともいえる, 状態にジャンプを有する系に対する繰り返し制御について検討した. これについても国内大会 (3) で発表し, 現在, 論文執筆が進行中である.

## 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 9 件)

1. 平田健太郎, 久保田靖之, 加圧炊飯プロセスの数理モデル化に関する検討, システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 6, pp. 152-161, 2012, 査読有 (印刷中)
2. 中川繁政, 平田健太郎, 杉本謙二, 遷移沸騰領域における冷却制御のモデリングと安定性解析, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 4, pp. 207-213, 2012, 査読有
3. 畑田和良, 平田健太郎, 山田晃平, 大谷真司, 周期運動に対するエネルギー効率に優れたパワーアシスト制御法の検討, システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 2, pp. 28-38, 2012, 査読有
4. 平田健太郎, 水野貴志, カメラ設置誤差を許容するバランスタスクの視覚フィードバック安定化, システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 1, pp. 10-18, 2012, 査読有
5. 平田健太郎, 西田将人, 入力むだ時間系に対するオブザーバ併合型状態予測制御の安定解析, システム制御情報学会論文誌, Vol. 24, No. 12, pp. 296-298, 2011, 査読有
6. Tomomichi Hagiwara and Kentaro Hirata, Fast-Lifting Approach to the Computation of the Spectrum of Retarded Time-Delay Systems, European Journal of Control, Vol. 17, No. 2, pp. 162-171, 2011, 査読有
7. Kentaro Hirata, On Internal Stabilizing Mechanism of Passive Dynamical Walking, SICE JCMSI, Vol. 4, No. 1, pp. 29-36, 2011, 査読有
8. 平田健太郎, ネットワーク化制御に関連した安定化問題の漸近的性質についての考察, システム制御情報学会論文誌, Vol. 23, No. 10, pp. 243-245, 2010, 査読有

9. 加藤健一, 平田健太郎, 水野貴志, 山田公平, 視覚フィードバックとロボスタ制御による大道芸「くわえ撥」の実現, 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 10, pp. 530-537, 2009, 査読有

[学会発表] (計 32 件)

1. Kazuyoshi Hatada and Kentaro Hirata, Energy-Efficient Power Assisting Methods for Periodic Motions and its Experimental Verification, 2012 IEEE International Conference on Industrial Technology, 21 March 2012, Athens, Greece.

2. 川尻圭佑, 平田健太郎, PTZ カメラを用いた視覚サーボ系における運動パラメータ推定, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012/3/15, 奈良県文化会館

3. 高橋健太郎, 平田健太郎, 状態に依存してむだ時間長が可変となるような繰り返し制御系の安定解析, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012/3/15, 奈良県文化会館

3. 畑田和良, 平田健太郎, 低燃費を実現する規則向波中における船舶のフィードバックエンジン回転数制御, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012/3/16, 奈良県文化会館

4. 水井俊文, 平田健太郎, 多目的慣性ロータによる二輪車の安定化制御の検討, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012/5/14, 奈良県文化会館

5. 森美華, 橋拓至, 平田健太郎, 杉本謙二, 半正定値計画問題によるネットワーク仮想化に適した物理ネットワークのトポロジ設計法, 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, 2012/3/9, 宮崎

6. 森美華, 橋拓至, 平田健太郎, 杉本謙二, 仮想ネットワークの構築に適した物理ネットワークの設計技術の検討, 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, 2012/1/27, 沖縄

7. M. Mori, T. Tachibana, K. Hirata and K. Sugimoto, Topology Design and Admission Control for Improving Network Robustness in Network Virtualization, The IEEE Global Communications Conference 2011, 8 Dec. 2011, Houston, Texas, U. S. A.

8. Kentaro Hirata, Mayumi Tomida and Kazuyoshi Hatada, Gain Scheduling Control Experiment of Balancing Transformer Robot using LEGO Mindstorms, IIIS DeMset 2011, 30 Nov. 2011, Orland, Florida, U. S. A.

9. 森美華, 橋拓至, 平田健太郎, 杉本謙二, ロバストな仮想ネットワークを提供するための物理ネットワーク設計法の検討, TITRC NWGN 2011, 2011/9/27, みのたにグリーンスポーツホテル

10. 畑田和良, 平田健太郎, 周期運動に対するエネルギー効率に優れたパワーアシスト制御法の検討, 第 55 回 システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 11), 2011/5/17, 大阪大学 吹田キャンパス

11. 中川繁政, 平田健太郎, 杉本謙二, 遷移沸騰領域における冷却制御の制御系設計, 第 55 回 システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 11), 2011/5/17, 大阪大学 吹田キャンパス

12. 久保田靖之, 平田健太郎, 加圧炊飯プロセスの数理モデル化とエネルギー効率の検討, 第 55 回 システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 11), 2011/5/18, 大阪大学 吹田キャンパス

13. 富田麻友美, 平田健太郎, LEGO Mindstorms を用いた可変姿勢倒立ロボットのゲインスケジューリング制御, 第 11 回 SICE 制御部門大会, 2011/3/17, 琉球大学 千原キャンパス

14. 森美華, 橋拓至, 平田健太郎, 杉本謙二, ロバスト性を考慮した仮想ネットワークのトポロジ設計法と受付制御技術の提案”, 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会 (NS2010-174), 2011/3/3, 沖縄コンベンションセンター

15. 河野翔太, 平田健太郎, ネットワーク結合された動的システムの同期現象 - モデリング, 安定解析-, SICE 関西支部若手研究特別発表会, 2011/1/18, 常翔学園大阪センター

16. 北浦寛直, 平田健太郎, 効果的な名自転車の練習に適したバランスアシストに関する研究, SICE 関西支部若手研究特別発表会, 2011/1/18, 常翔学園大阪センター

17. 西田将人, 平田健太郎, 加減速を伴う搬送遅れ系に対する状態予測制御, SICE 関西支部若手研究特別発表会, 2011/1/18, 常翔学

園大阪センター

18. 富田麻友美, 平田健太郎, LEGO Mindstorms を用いた可変姿勢倒立ロボットの検討, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2010/12/24, 東北大学 川内キャンパス

19. 久保田靖之, 平田健太郎, 加圧炊飯プロセスの数理モデル化に関する検討, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2010/12/25, 東北大学 川内キャンパス

20. Kentaro Hirata, Masashi Nakazawa and Naoki Kida, 3D Position Measurement System for Moving Objects Based on Active Vision, IASTED AsiaMIC 2010, 24 Nov. 2010, Phuket, Thailand

21. Kazuyoshi Hatada and Kentaro Hirata, Energy-Efficient Power Assist Control for Periodic Motions, SICE Annual Conference 2010, 20 Aug. 2010, Taipei, Taiwan

22. S. Nakagawa, K. Hirata and K. Sugimoto, SOS Analysis of Cooling Control of Hot Strips in Transition Boiling Region, SICE Annual Conference 2010, 19 Aug. 2010, Taipei, Taiwan

23. 杉本謙二, 中川繁政, 平田健太郎, フィードバック誤差学習の蓄積によるJust-in-time制御, 第54回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010/5/21, 京都リサーチパーク

24. 木田直希, 平田健太郎, 中澤雅志, Active Visionによる位置計測のための予測追従制御, 第54回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010/5/21, 京都リサーチパーク

25. 中川繁政, 平田健太郎, 杉本謙二, 遷移沸騰領域における冷却制御のモデリングとSOS解析, 計測自動制御学会第1回プラントモデリングシンポジウム, 2010/4/16, 電気通信大学, 東京

26. Kentaro Hirata, Modeling and Stability Analysis of Controlled Passive Walking, Symposium on Systems, Control and Signal Processing, 30 Mar. 2010, Kyoto Univ.

27. 木田直希, 平田健太郎, Active Visionによる3次元移動体位置計測の検討, SICE関西支部若手研究発表会, 2010/1/15, 常翔学

園大阪センター

28. 畑田和良, 平田健太郎, 電動自転車のアシスト力制御法とエネルギー効率に関する検討, SICE SI 部門大会, 2009/12/24, 芝浦工大豊洲キャンパス

29. K. Katoh, K. Hirata, T. Mizuno and K. Yamada, Development of Street Performance Robot SOMENOSUKE, IEEE IECON 2009, 4 Dec. 2009, Porto, Portugal

30. K. Hirata and T. Mizuno, H-infinity Synthesis of Visual Feedback Systems under Camera Misalignment, IEEE IECON 2009, 4 Dec. 2009, Porto, Portugal

31. K. Hirata, A. Itokazu and T. Hagiwara, On Numerical Computation of the Spectrum of a Class of Integral Operators via Non-Causal Hold Discretization, IFAC TDS 2009, 2 Sep. 2009, Sinaia, Romania

32. Tomomichi Hagiwara and Kentaro Hirata, Fast-Lifting Approach to the Computation of the Spectrum of Retarded Time-Delay Systems, ECC2009, 26 Aug. 2009, Budapest, Hungary

[図書] (計1件)

1. J. C. Willems, S. Hara, Y. Ohta and H. Fujioka (Ed), Perspective in Mathematical Systems Theory, Control and Signal Processing, Lecture Notes in Control and Information Sciences 398, pp. 253-262, Springer

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 健太郎 (HIRATA KENTARO)  
奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 00293902