

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560056

研究課題名（和文） 宇宙工学，ロボット工学及びナノ技術における力学系理論による新たな工学技術の創生

研究課題名（英文） Creation of new technologies by dynamical systems theory in space engineering, robotics and nanotechnology

研究代表者

矢ヶ崎 一幸 (YAGASAKI KAZUYUKI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40200472

研究成果の概要：宇宙工学，ロボット工学及びナノ技術という重要な工学分野からの問題を取りあげ、力学系理論を応用して、伝統的な方法では困難であった革新的な結果を得ると共に、工学分野における力学系理論の重要性をさらに明らかなものとした。具体的には、力学系理論の手法を用いることにより、低コストで地球から月へ飛行する宇宙ロケットの軌道を設計し、エネルギー消費の低い 2 足歩行ロボット、高精度の測定が可能な原子間力顕微鏡の機構を提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,600,000	0	1,600,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	600,000	4,200,000

研究分野：力学系理論・非線形力学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：数理工学，力学系理論，宇宙ロケット，ロボット，原子間力顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

宇宙ロケット，2 足歩行ロボット及び原子間力顕微鏡に関して、基礎的あるいは準備的な研究を既に行い、その研究成果を論文として発表あるいは投稿していた。

(1) 宇宙ロケットについては、地球から月へ飛行するロケットの運動を平面制限 3 体問題あるいは太陽の影響を考慮した 4 体問題によってモデル化し、ある非線形境界値問題を解の追跡の方法を用いて数値的に解くことにより、低コストで飛行時間の比較的短い遷移軌道を求めていた。また、求められた遷移軌道が不安定なもので、地球と月の間に存在す

る周期軌道の安定多様体と不安定多様体の近傍を通過するというを確認していた。さらに、新たに提案した制御法を用いて、不安定な遷移軌道を小さな制御力により安定化できることも示していた。

(2) 2 足歩行ロボットについては、踝の部分にモーターが取り付けられ、1 組の膝のない脚と足からなるロボットのモデルに対して、ある非線形境界値問題を解の追跡の方法を用いて数値的に解くことによりエネルギー消費の少ない周期的な歩行パターンを求めていた。また、歩行パターンの安定性を解析し、その発生や消滅と分岐現象との関連を調

べていた。

(3) 原子間力顕微鏡については、それまでに報告されている実験結果及び数値解析の結果を理論的に説明することに既に成功していた。その結果、現在使用されている機構のものでは、試料から受ける引力はプローブであるマイクロ・カンチレバーの運動にあまり影響していないことが明らかとなった。

2. 研究の目的

力学系理論はカオスの再発見を契機として急速に発展し、自然科学や工学の各分野に多大な影響を与えている。最近では、これらの分野に関連した問題で起こるカオスや分岐などの非線形現象を調べるだけでなく、カオス制御やカオス通信など、力学系理論で得られた成果を積極的に工学的に応用する試みがなされている。

本研究では、宇宙工学、ロボット工学及びナノ技術という重要な工学分野からの問題を取りあげ、力学系理論を応用して、伝統的な方法では困難である、革新的な結果を得ると共に、工学分野における力学系理論の重要性をさらに明らかなものとする。具体的には、力学系理論の手法を用いることにより、低コストで地球から月あるいは他の惑星へ飛行する宇宙ロケットの軌道を設計し、エネルギー消費の低い2足歩行ロボット、高精度の測定が可能な原子間力顕微鏡の機構を提案する。

3. 研究の方法

(1) 宇宙ロケット、2足歩行ロボット、原子間力顕微鏡のプローブであるマイクロ・カンチレバーのダイナミクスを理解し、応用する上で、ホモ/ヘテロクリニック軌道および安定/不安定多様体は重要な役割を果たす。そこで、高次元系において、これらの軌道や不変多様体を数値的に計算する方法を新たに提案する。

(2) 宇宙ロケット、2足歩行ロボット、原子間力顕微鏡で適切な制御を行うために、数値的ではあるが、最適制御やH_∞制御に対する一般的なアプローチを確立する。この目的のために、あるHamilton系の安定多様体からこれらの制御則が求められるという比較的最近の研究結果に基づき、(1)で提案した計算方法を適用する。

(3) 試料から受ける引力の影響が顕著に現れる、試料表面からの距離が近い場合に対して、(1)の計算法など力学系理論の手法を適用して、原子間力顕微鏡のマイクロ・カンチレバーのダイナミクスを詳細に解析し、どのような挙動が起こるか明らかにする。さらに、これらの結果に基づき、マイクロ・カンチレバーの試料から受ける引力の非線形特性を利用した、原子間力顕微鏡の新しい機構を提案

する。

(4) これまでに取り扱ったものと比較してより単純な機構をもった、2足歩行ロボットのモデルを取りあげる。力学系理論の手法を用いてそのダイナミクスを明らかにし、実際の2足歩行ロボットに対して、このタイプの歩行を実現し、歩行に要するエネルギーの低減化を目指す。

(5) (2)で提案したアプローチを修正して適用し、最適制御を行うことにより、地球から月へ飛行する宇宙ロケットの低コストの遷移軌道を設計する。また、平面制限3体問題において、(1)で提案した方法を用いて、Lagrange点のまわりに存在する不安定な周期軌道の安定/不安定多様体を計算し、これらの不変多様体上の軌道を積極的に利用する。

4. 研究成果

(1) 高次元系、大自由度系に対しても適用可能な、ホモ/ヘテロクリニック軌道および安定/不安定多様体の数値計算法を提案した。具体的な適用例として、Henon-Heiles系、準周期外力を受けるDuffing系、近可積分および非近可積分3自由度ハミルトン系、古典力学の3体問題および球面上の渦運動で現れる運動方程式、Gray-Scott偏微分方程式系を離散化することによって得られる170次元系を取りあげ、提案した手法の有効性を示した。特に、高次元系に対するこのような計算結果はこれまで報告されておらず、本手法は極めて独創的かつ非常に応用性が高く、他に類を見ないものである。本手法により、さまざまな高次元系や大自由度系、さらには格子系や偏微分方程式系などの無限次元系のダイナミクスをより深く理解することが可能になるものと確信する。

図1に球面上の渦運動の支配方程式における安定/不安定多様体、図2にGray-Scott偏微分方程式系の170次元離散化モデルにおける3次元不安定多様体に対する計算結果を与える。

(2) あるHamilton系の安定多様体からそれらの制御則が求められるという結果に基づき、(1)で提案した計算法を用いた、最適制御問題やH_∞制御問題に対する数値的なアプローチを確立した。一般的な非線形系に対してこれらの問題の解決は制御理論・工学の分野においても非常に重要で意義のあることである。このアプローチを倒立振り子や2重振り子に適用し、数値シミュレーションや、倒立振り子に対しては実験を行ってその有効性を確認した。図3に倒立振り子に対して最適制御を行った場合の実験結果を与える。得られた成果をさらに発展させ、目標軌道が周期軌道となる場合など、さまざまな場合の制御問題に拡張することが今後の課題である。

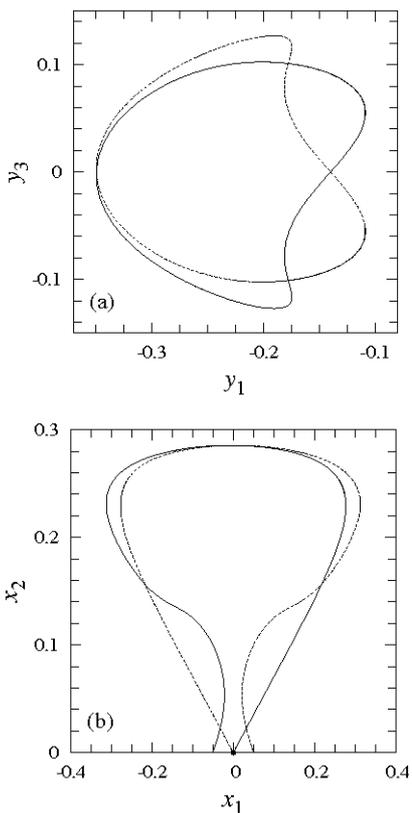


図1 球面上の渦運動の支配方程式における不変多様体に対する安定/不安定多様体 (a) 中心方向の横断的交差 (b) 双曲方向における横断的交差

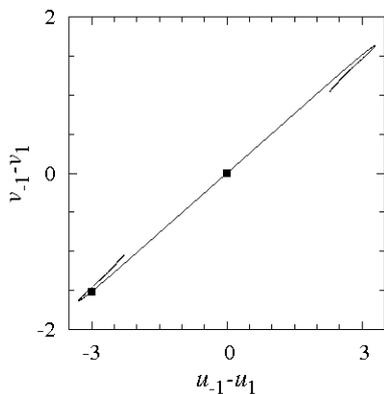


図2 Gray-Scott 偏微分方程式系に対する170次元離散化モデルの3次元不安定多様体の断面

(3) 試料から受ける引力の影響が顕著に現れる、試料表面からの距離が近い場合に対して、(1)の計算法など力学系理論の手法を適用して、原子間力顕微鏡のマイクロ・カンチレバーのダイナミクスを明らかにした。さらに、カオス制御の方法によりマイクロ・カンチレバーの制御を行う、原子間力顕微鏡の新しい機構を提案した。図4に、数値シミュレーションにおいて計算された、マイクロ・カンチレバーの複雑な振動を示す。

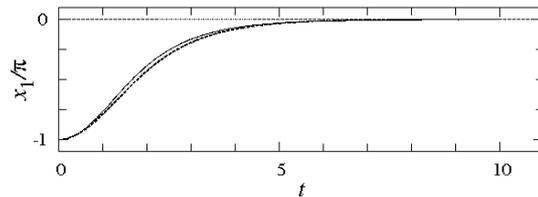


図3 倒立振り子の最適制御に対する実験結果 (x_1 は振り子の角変位を表し、 $x_1 = 0$ が倒立位置である)

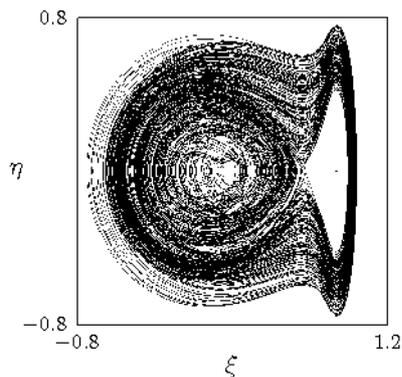


図4 原子間力顕微鏡のマイクロ・カンチレバーの複雑な振動 (横軸は変位、縦軸は速度を表す)

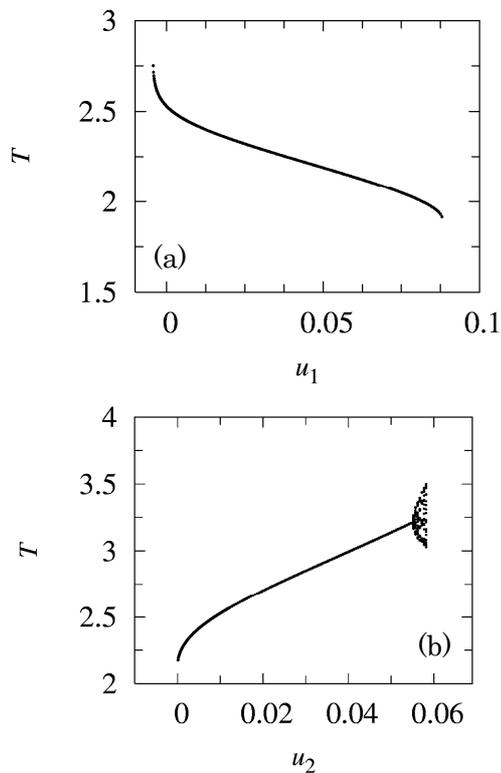


図5 2足歩行ロボットの分岐図: (a) $u_2=0.01$, (b) $u_1=0$

(4) 踵部と腰部に一定の駆動力を生じるサーボモーターが取り付けられた2足歩行ロボ

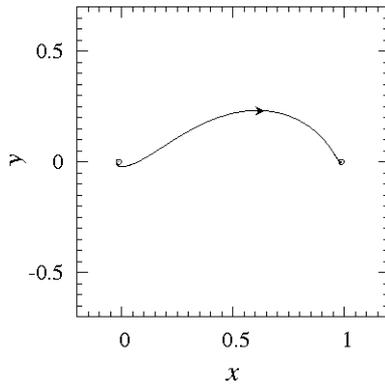


図6 最適制御による，地球から月への低コスト遷移軌道

ットのモデルを考え，力学系理論の手法を用いてそのダイナミクスを明らかにした．図5に水平面を歩行する場合の分岐ダイアグラムを与える．ここで， T は歩行の半周期， u_1 と u_2 は踵部と腰部のサーボモーターの一定トルクを表し，図(a)は $u_2=0.01$ ，図(b)は $u_1=0$ の場合に対する結果である．図5(b)より，踵部にモーターが取り付けられていなくとも，ロボットは水平面を歩行可能であることがわかる．

(5) 平面制限3体問題において，(1)で提案した方法を用いて，Lagrange点のまわりに存在する不安定な周期軌道の安定/不安定多様体を計算し，(2)で提案したアプローチを修正して適用し，最適制御を行うことにより，地球から月へ飛行する宇宙ロケットの低コストの遷移軌道を設計した．図6に求められた遷移軌道の1例を示す．ここで，座標の値は地球と月の距離で無次元化されている．

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)

T. Sakajo and K. Yagasaki, Chaotic motion of the N -vortex problem on a sphere: I. Saddle-centers in two-degree-of-freedom Hamiltonians, Journal of Nonlinear Science, Vol. 18, 485-525, 2008, 査読有

T. Sakajo and K. Yagasaki, Chaotic motion of the N -vortex problem on a sphere: II. Saddle-centers in three-degree-of-freedom Hamiltonians, Physica D, Vol. 237, 222-226, 2008, 査読有

K. Yagasaki, Bifurcations and chaos in vibrating microcantilevers of tapping mode atomic force microscopy,

International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 42, 658-672, 2007, 査読有

[学会発表](計15件)

矢ヶ崎一幸, 2等辺3体問題における3重衝突の正則化と相対周期軌道の存在, 第41回天体力学N体力学研究会, 2009年3月14日, 国立天文台三鷹キャンパス

矢ヶ崎一幸, Henon-Heiles系におけるカオスの存在, 微分方程式の総合的研究, 2008年12月20日, 京都大学

K. Yagasaki, Numerical computation of unstable manifolds of stationary pulses in the Gray-Scott model, SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures, 2008年7月27日, イタリア・ローマ大学

矢ヶ崎一幸, 力学系理論の手法を用いた非線形制御系のハミルトン・ヤコビ方程式に対する数値解析, 第8回計測自動制御学会制御部門大会, 2008年3月7日, 京都大学吉田キャンパス

矢ヶ崎一幸, 非線形制御とハミルトン系のダイナミクス, 2007年度冬の力学系研究集会, 2008年1月6日, 日本大学軽井沢研修所

矢ヶ崎一幸, 非線形制御系のハミルトン・ヤコビ方程式に対する大域域的な摂動法, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2007年12月19日, 福井工業大学福井キャンパス

矢ヶ崎一幸, Gray-Scottモデルにおけるパルス定常解に対する不安定多様体の数値計算, 日本数学会2007年度秋季総合分科会, 2007年9月23日, 東北大学川内北キャンパス

K. Yagasaki, Gap solitons in harmonic superlattices, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, 2007年5月29日, Snowbird Ski & Summer Resort, Snowbird, Utah, USA

矢ヶ崎一幸, 近可積分/非近可積分Hamilton系における不変トーラスのホモ/ヘテロクリニック軌道(応用数学分科会特別講演), 日本数学会2007年度年会, 2007年3月29日, 埼玉大学

矢ヶ崎一幸, Numerical computation of stable and unstable manifolds of normally hyperbolic invariant manifolds, 第9回機械工学における力学系理論の応用に関する研究会, 2007年3月11日, 琵琶湖コンファレンスセンター

矢ヶ崎一幸, 非双曲有界軌道に対するホモ/ヘテロクリニック軌道の数値計算, 2006年度冬の力学系研究集会, 2007年1月8日, 東京大学大学院数理科学研究科

K. Yagasaki, Chaos and diffusion in four-dimensional, non-conservative, reversible systems with saddle-centers, International Conference on Bifurcation Theory of Dynamical Systems and Related Topics, 2006年12月18日, 中華民国・北京大学

矢ヶ崎一幸, 近可積分ハミルトン系の whiskered トーラスに対するヘテロクリニック軌道, 日本数学会 2006 年秋季総合分科会, 2006 年 9 月 19 日, 大阪市立大学

K. Yagasaki, Bifurcations of solitary wave solutions, SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures, 2006 年 9 月 12 日, アメリカ合衆国・ワシントン大学

矢ヶ崎一幸, 研究者からみた非線形力学の今とこれから(基調講演), 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2006, 2006 年 8 月 6 日, 名古屋大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢ヶ崎 一幸 (YAGASAKI KAZUYUKI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 40200472

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし