

令和元年5月25日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249023

研究課題名(和文) 運動量交換やエネルギー交換に基づく衝撃応答制御の体系化と月惑星探査機への応用

研究課題名(英文) Systematization of Shock Response Control Based on Momentum Exchange and Energy Exchange and Its Application to Lunar/Planetary Spacecraft

研究代表者

原進(Hara, Susumu)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40329850

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 41,270,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、機械構造物に発生する衝撃応答制御の問題、特に衝撃を受ける際のリバウンドと加速度(減速度)の抑制に着目した。そして、塑性変形を利用する機構など従来の手法とは異なる、運動量交換型衝撃吸収ダンパに基づく手法と、力学的エネルギーの交換に基づく手法に着目した。月面着陸を始めとした、天体着陸探査機を主な応用対象と考えると、シミュレーションや実験を通じて衝撃応答制御問題のための各種手法と機構の体系化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで機械構造物などにおいて衝撃の影響を抑える場合、粘性減衰や摩擦減衰の性質を有するダンパーや塑性変形するアブソーバの適用がほとんどであった。これらに対して、本研究では運動量交換やエネルギー交換といった全く異なる原理を導入して衝撃応答を制御することに取り組んできた。このような原理であれば機構の劣化も少なく塑性変形と異なり何度でも使用できるなどの良好な特徴を有する。本研究ではこれらの新しい手法と機構について、解析的考察を始め、多くのシミュレーションと実験を通じ、天体着陸探査を主な例とした各種問題に対する最適な適用法を明らかにしてきた。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on rebound prevention and acceleration (deceleration) suppression on the shock response control problems of mechanical structures. Different from conventional methods by means of plastic deformation of absorber, the methods based on momentum exchange impact dampers and dynamic energy exchanging are taken into account. For main applications to astronomical probes such as lunar probes, this study has systematized novel methods and mechanisms on the shock response control problems through simulations and experiments.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：惑星探査 機械力学 制御工学 航空宇宙工学 衝撃

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) Sonらは機械構造物に対する衝撃応答制御問題に対し、玉突きと同様の原理で衝撃振動の影響を低減する運動量交換型ダンパ機構 (Passive Momentum Exchange Impact Damper: PMEID) を提案した。この機構では衝撃の影響を粘性減衰や材料の塑性変形により散逸させるのとは全く異なり、衝撃力により発生する制御対象の運動量を、付加したダンパ質量の運動量に交換することで制御対象の振動を抑制している。研究代表者の原らは、PMEIDのパラメータ変動に対するロバスト性を向上させる目的で、アクティブ併用の運動量交換型ダンパ機構 (Active-Passive-Hybrid Momentum Exchange Impact Damper: HMEID、図1) を提唱し、シミュレーションによる解析とともに実験的にもその有効性を明らかにしてきた。そして月惑星探査機の着陸応答制御問題への応用を検討した。



図1 HMEID機構の一例

(2) 上記研究の過程で、同様の問題のために運動量交換型とは原理が異なる、力学的エネルギー交換に基づく衝撃応答制御機構も発案した。これはばねに吊り下げられた本体と、それを支えるフレームの部分からできており、落下時の運動エネルギーを一度ばねのポテンシャルエネルギーに変換し、ばねが伸びて本体（親機）の速度がほぼ0となった時点で軟着陸を実現する。同時に、ポテンシャルエネルギーは本体上部の飛翔部（子機）の運動エネルギーに再変換する手法である。

(3) これら2種類の手法はそれぞれ着陸探査機への応用に有利な特徴がわかってきたものの、本科研費研究の前の研究（基盤研究(B)）においては、1自由度（1次元）衝撃応答制御システムに関する検討が中心であり、多次元・多自由度の応答制御問題に関する検討、実応用時の仕様への適用は限定的であった。

2. 研究の目的

研究代表者らは、機械構造物に発生する衝撃応答制御の問題、特に衝撃を受ける際のリバウンドと加速度（減速度）の抑制に着目し、本科研費研究の前の研究（基盤研究(B)）で、運動量交換型衝撃吸収ダンパに基づく手法と、力学的エネルギーの交換に基づく手法について検討してきた。本研究では、衝撃エネルギーを粘性減衰や材料の塑性変形により散逸させるのとは全く異なる、これら2種類の新理論に基づいた衝撃応答制御手法を発展させて、従来にはない厳しい仕様を満たす衝撃応答制御に関する体系的な方法論を確立することを目的とした。そして、主な応用対象として月惑星探査機の着陸機構を取り上げた。

3. 研究の方法

(1) 運動量交換型ダンパ機構については、リバウンド抑制のみならず加速度（減速度）低減も考慮して、探査機底部の一部質量の先落しと、衝撃を受けた後のMEIDをあわせて設計する手法について検討した（雑誌論文⑰）。また、運動量が交換された後のダンパ質量が予期せぬ運動をせず、本体の一部に留める機構についても提案した。これはNon-Flying型MEIDと呼んでいる（雑誌論文⑭）。そして、MEID機構では、ダンパ質量を始めとして、いくつかの設計パラメータを、応答の過渡特性やロバスト性を考慮して適切にチューニングしなければならない。そこで、制御対象モデルをある程度単純化して、一般論としての適切なチューニングの方法論についても明らかにした（雑誌論文⑥）。

(2) 本科研費研究の前の研究（基盤研究(B)）における力学的エネルギー交換に基づく手法では、水平面上への着陸を想定している。斜面や段差がある着地面の場合には転倒してしまうため、着地面の形状に対応して左右の脚が伸縮する伸縮脚型のエネルギー交換機構を提案した（雑誌論文⑬、図2）。また、ばねを用いて着陸時に一度蓄えられた弾性エネルギーを解放して、ある程度慣性を有する円盤を回転させることに用い、これにより制御対象本体に発生する反トルクにより制御対象の姿勢を維持する機構についても検討している（雑誌論文④）。



図2 伸縮脚型のエネルギー交換機構

(3) 月惑星着陸探査機への応用のみならず、他の応用、陸上におけるビークルが衝撃を受けた後の姿勢維持にも応用しやすいMEID機構も考えた（雑誌論文⑨⑩）。さらに電磁力を用いたMEID機構など多用途向けの機構も積極的に考案した（雑誌論文③）。

4. 研究成果

(1) 運動量交換型ダンパ機構も力学的エネルギー交換に基づく衝撃応答制御機構もさまざまな問題設定に対応できるように拡張し、並行して単純化したモデルを用いた一般論も議論する

などして、広く衝撃応答制御問題に対する体系化が図られた。最終的には実装を意識して簡単な機構で高性能を達成するための提案を行ったり（雑誌論文②）、2種類の機構の長所を組み合わせた方法論を提案できるに至った（雑誌論文⑧、現在、Acta Astronautica誌に投稿中）。

(2) 月惑星着陸探査のみならず、他の応用についてもいくつかのスピンアウト例を示すことができた。

(3) 以上の成果により研究代表者らは

- ・日本機械学会機械力学・計測制御部門2018年度パイオニア賞
 - ・第19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 SI2018 優秀講演賞
 - ・第16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 SI2015 優秀講演賞
 - ・第15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 SI2014 優秀講演賞
- を受賞した。さらに、本研究の取り組みは業界専門誌や地域タウン誌の取材を受け紹介された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

- ① Susumu HARA, Naoaki SAEKI and Masatsugu OTSUKI, Trajectory Control of Launched Mass for Lunar/Planetary Exploration Spacecraft with Base-Extension Separation Mechanism, Journal of Space Technology and Science, 査読有, Vol. 29, 2019, 掲載決定
- ② 齋藤 聡、原 進、宮田 喜久子、大槻 真嗣、2種類のばねと収縮ロック機構から構成される衝撃応答制御機構と天体着陸探査への応用、計測自動制御学会論文集、査読有、55巻、2019、掲載決定
- ③ 河田 雅至、山田 啓介、原 進、宇津野 秀夫、倉田 純一、村上 佳広、電磁力を用いた運動量交換型衝撃吸収ダンパによる衝撃振動の低減、日本機械学会論文集、査読有、85巻、2019、18-00485
DOI:10.1299/transjsme.18-00485
- ④ Susumu HARA, Satoshi SAITO, Keisuke SUGITA and Takao MAEDA, Planetary Exploration Spacecraft Landing Gear with Three-Dimensional Linear-Rotary-Energy-Conversion Mechanism, Transactions of the JSASS, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 16, 2018, 635-643
DOI:10.2322/tastj.16.635
- ⑤ Kohei YAMAGUCHI and Hiroshi YAMAKAWA, Visualization of Kinetic-Impact Effectiveness for Asteroid Deflection Using Impact-Geometry Maps, Journal of Spacecraft and Rockets, 査読有, Vol. 55, 2018, 1181-1197
DOI:10.2514/1.A33985
- ⑥ Yohei KUSHIDA, Hiroaki UMEHARA, Susumu HARA and Keisuke YAMADA, Momentum Exchange Impact Damper Design Methodology for Object-Wall-Collision Problems, Journal of Vibration and Control, 査読有, Vol. 24, 2018, 3206-3218
DOI:10.1177/1077546317703202
- ⑦ 原 進、柔軟心がみえた研究や教育、日本ロボット学会誌、査読有、36巻、2018、258-261
DOI:10.7210/jrsj.36.258
- ⑧ 原 進、運動量やエネルギーの交換に着想を得た衝撃応答制御技術とビークル制御への応用、計測と制御、査読有、57巻、2018、241-246
DOI:10.11499/sicejl.57.241
- ⑨ 原 進、三島 直子、桑村 航矢、運動量交換を主体とした水平移動体の衝突リバウンド抑制制御、日本機械学会論文集、査読有、83巻、2017、17-00303
DOI:10.1299/transjsme.17-00303
- ⑩ Takao MAEDA, Takeshi OZAKI, Susumu HARA and Shintaro MATSUI, Touchdown Dynamics of Planetary Lander with Translation-Rotation Motion Conversion Mechanism, Journal of Spacecraft and Rockets, 査読有, Vol. 54, 2017, 972-979
DOI:10.2514/1.A33630
- ⑪ Susumu HARA, Takeshi OZAKI and Shintaro MATSUI, Proposal of Novel Hybrid-MEID Mechanism for Shock Response Control -A Method with Time-Difference-Operation of Passive and Active Motions, Journal of International Council on Electrical Engineering, 査読有, Vol. 7, 2017, 205-213
DOI:10.1080/22348972.2017.1345372
- ⑫ 前田 孝雄、原 進、尾崎 岳、松井 慎太郎、大槻 真嗣、並進回転運動変換機構を用いた月惑星着陸機の転倒抑制、計測自動制御学会論文集、査読有、53巻、2017、319-326
DOI:10.9746/sicetr53.319
- ⑬ Naoaki SAEKI, Susumu HARA and Masatsugu OTSUKI, Two-Dimensional Experimental Investigation of Base-Extension Separation Mechanism with Telescopic Gear, Journal of Spacecraft and Rockets, 査読有, Vol. 54, 2017, 169-190

DOI:10.2514/1.A33382

- ⑭ Susumu HARA, Shintaro MATSUI, Naoaki SAEKI, Takao MAEDA and Masatsugu OTSUKI, Proposal of Non-Flying-Type MEID Mechanism for Lunar/Planetary Exploration Spacecraft, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol. 10, 2016, JAMDSM0062
DOI:10.1299/jamdsm.2016jamdsm0062
- ⑮ Takao MAEDA, Masatsugu OTSUKI, Tatsuaki HASHIMOTO and Susumu HARA, Attitude Stabilization for Lunar and Planetary Lander with Variable Damper, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 査読有, Vol. 39, 2016, 1790-1804
DOI:10.2514/1.G000325
- ⑯ 榎田 陽平、渡辺 翼、原 進、大槻 真嗣、運動量交換原理に基づいた月惑星探査機着陸脚の2次元運動における動特性、航空宇宙技術、査読有、15巻、2016、43-52
DOI:10.2322/astj.15.43
- ⑰ 渡辺 翼、原 進、大槻 真嗣、発展型 G-MEID を用いた惑星探査機の着陸応答制御に関する研究、日本機械学会論文集、査読有、81巻、2015、14-00006
DOI: 10.1299/transjsme.14-00006
- ⑱ 原 進、石川 凌、大槻 真嗣、親機子機分離着陸機構を用いた月惑星探査機の2次元応答解析、計測自動制御学会論文集、査読有、51巻、2015、515-517
DOI:10.9746/sicetr51.515
- ⑲ Naoaki SAEKI, Susumu HARA, Masatsugu OTSUKI and Yoji YAMADA, Analytical and Experimental Investigation of Base-Extension Separation Mechanism for Spacecraft Landing, Journal of Spacecraft and Rockets, 査読有, Vol. 52, 2015, 896-916
DOI:10.2514/1.A32956
- ⑳ Naoaki SAEKI, Susumu HARA, Masatsugu OTSUKI, Tsubasa WATANABE and Yoji YAMADA, Base-Extension Separation Mechanism for Planetary Exploration Spacecraft Landing, Transactions of the JSASS, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 12, 2014, Pd_91-Pd_100
DOI:10.2322/tastj.12.Pd_91
- ㉑ Tsubasa WATANABE, Susumu HARA and Masatsugu OTSUKI, Study on Passive Momentum Exchange Landing Gear Using Two-Dimensional Analysis, Acta Astronautica, 査読有, Vol. 105, 2014, 407-416
DOI:10.1016/j.actaastro.2014.10.020

[学会発表] (計 15 件) 国際会議発表と国際または国内の招待講演のみ掲載, 他に国内会議発表 30 件あり。

- ① Susumu HARA, Spacecraft Landing Using Base-Extension Separation Mechanisms, The 6th International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME 2019), 2019, 招待講演
- ② Manato NOZAKI, Kikuko MIYATA, Susumu HARA and Masatsugu OTSUKI, Modeling of Space-Use Actuator System for Drive Timing Improvement, The 32nd International Symposium on Space Technology and Science (32nd ISTS), 2019, 2019-i-04
- ③ Keisuke SUGITA, Kikuko MIYATA, Susumu HARA, Masatsugu OTSUKI and Tadashige IKEDA, Proposal of Feedback Control Systems for Thermal Driven High Power Density Actuator, The 2019 AIAA Thermophysics Conference at the 2019 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (SciTech 2019), 2019, AIAA-2019-2064
- ④ 原 進、運動量やエネルギーの交換に基づく天体着陸探査機の衝撃応答制御、第61回自動制御連合講演会、2018、1721-1723、招待講演
- ⑤ Susumu HARA, Spacecraft Landing Using Base-Extension Separation Mechanisms, The 2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE 2018) and the 2018 5th International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering (ICMEAE 2018), 2018, 招待講演
- ⑥ 原 進、新しい衝撃応答制御の研究、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙科学談話会、2017、第86回、招待講演
- ⑦ Susumu HARA, Satoshi SAITO, Keisuke SUGITA and Takao MAEDA, Planetary Exploration Spacecraft Landing Gear with Three-Dimensional Linear-Rotary-Energy-Conversion Mechanism, The 31st International Symposium on Space Technology and Science (31st ISTS) and the 26th International Symposium on Space Flight Dynamics (26th ISSFD), 2017, 2017-k-36
- ⑧ Takao MAEDA, Takeshi OZAKI, Shintaro MATSUI and Susumu HARA, Simulation and Experimental Validation on Touchdown Dynamics of Lunar and Planetary Lander with Translation-Rotation Motion Converting Mechanism, The 2016 AIAA Space and Astronautics Forum and Exposition (SPACE 2016), 2016, AIAA-2016-5354
- ⑨ Susumu HARA, Takeshi OZAKI and Shintaro MATSUI, Proposal of Novel Hybrid-MEID

Mechanism for Shock Response Control -A Method with Time-Difference-Operation of Passive and Active Motions-, The International Conference on Electrical Engineering 2016 (ICEE 2016), 2016, ID 90037

- ⑩ Naoaki SAEKI, Susumu HARA and Masatsugu OTSUKI, Two-Dimensional Experimental Investigation of Base-Extension Separation Mechanism with Telescopic Gear, The 2016 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC 2016) at the 2016 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (SciTech 2016), 2016, AIAA-2016-1132
- ⑪ Susumu HARA, Shintaro MATSUI, Naoaki SAEKI and Masatsugu OTSUKI, Robust Landing Gear by Means of Non-Flying-Type MEID Mechanism, The 30th International Symposium on Space Technology and Science (30th ISTS), 2015, 2015-d-58
- ⑫ Susumu HARA, Shintaro MATSUI, Naoaki SAEKI and Masatsugu OTSUKI, Non-Flying-Type MEID Mechanism for Lunar/Planetary Exploration Spacecraft Landing, The 4th Korea-Japan Joint Symposium on Dynamics and Control (4th K-J Symposium), 2015, 113-116
- ⑬ Yohei KUSHIDA and Susumu HARA, Dynamics of a Two-Mass-Spring System Which Is Separated by External Input, The IEEE International Conference on Mechatronics 2015 (ICM 2015), 2015, 472-477
- ⑭ 原 進, 近未来の月惑星探査機への実装を目指した新しい着陸機構の研究、日本機械学会機械力学・計測制御部門 (A-TS 10-212) 平成 26 年度東海ダイナミクス・制御研究会、2014、招待講演
- ⑮ Naoaki SAEKI, Susumu HARA and Masatsugu OTSUKI, Application of Telescopic Gear to Lunar/Planetary Exploration Spacecraft with Base-Extension Separation Mechanism, The 65th International Astronautical Congress (IAC 2014), 2014, IAC-14-D2.3.9

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：ボルト破断式アクチュエータの制御装置、制御システム

発明者：宮田 喜久子、原 進、杉田 佳祐、大槻 真嗣

権利者：国立大学法人 名古屋大学、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

種類：特許

番号：特許願 2018-245991 号

出願年：平成 30 年

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等 名古屋大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 制御システム工学研究グループ ホームページ、<http://jupiter.nuae.nagoya-u.ac.jp/index.html>

雑誌論文⑧については下記のように韓国語翻訳転載出版済

Susumu HARA, Shock Response Control Technologies Getting Ideas from Momentum or Energy Exchange and Their Applications to Vehicle Control, 自動化技術 (Automation Systems), 2018 年 9 月号 pp. 84-89 【韓国語翻訳転載出版, 韓国 尖端社 発行】

下記業界専門誌に紹介記事掲載

原 進、衝撃抑制を宇宙分野で生かす 連載「今に花咲き実を結ぶ」、月刊生産財マーケティング、52 巻 10 号 (通巻 627 号)、2015、A-172

地域タウン誌での紹介 授業で学生を夢中にさせたい、タウンニュースてんぱく、No. 752 (2018/6/23)、第 1 面

本研究の内容を題材にした高等学校出前授業を静岡県内の高等学校で 2 回実施 (2016 年 9 月、2017 年 9 月)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：大槻 真嗣

ローマ字氏名：(OTSUKI, masatsugu)

所属研究機関名：宇宙航空研究開発機構

部局名：宇宙科学研究所

職名：助教
研究者番号（8桁）：50348827

研究分担者氏名：山田 陽滋
ローマ字氏名：(YAMADA, yoji)
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：大学院工学研究科

職名：教授
研究者番号（8桁）：90166744

研究分担者氏名：橋本 樹明
ローマ字氏名：(HASHIMOTO, tatsuaki)
所属研究機関名：宇宙航空研究開発機構
部局名：宇宙科学研究所
職名：教授
研究者番号（8桁）：70228419

研究分担者氏名：久保田 孝
ローマ字氏名：(KUBOTA, takashi)
所属研究機関名：宇宙航空研究開発機構
部局名：宇宙科学研究所
職名：教授
研究者番号（8桁）：90211888

研究分担者氏名：山田 啓介
ローマ字氏名：(YAMADA, keisuke)
所属研究機関名：関西大学
部局名：システム理工学部
職名：准教授
研究者番号（8桁）：80456798

研究分担者氏名：前田 孝雄
ローマ字氏名：(MAEDA, takao)
所属研究機関名：中央大学
部局名：理工学部
職名：助教
研究者番号（8桁）：00761149

(2)研究協力者

研究協力者氏名：山口 皓平
ローマ字氏名：(YAMAGUCHI, kohei)

研究協力者氏名：宮田 喜久子
ローマ字氏名：(MIYATA, kikuko)

研究協力者氏名：椿野 大輔
ローマ字氏名：(TSUBAKINO, daisuke)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。