

氏 名 江口 光

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2105 号

学位授与の日付 2019 年 9 月 27 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 滑走による月惑星表面の移動機構に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 坂井 真一郎
教授 澤井 秀次郎
教授 森田 泰弘
教授 能見 公博
静岡大学大学院工学領域
助教 前田 孝雄
中央大学理工学部電気電子情報通信工学科

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 江口 光

論文題目 滑走による月惑星表面の移動機構に関する研究

In recent years, a number of planetary landing missions have been actively conducted. In Japan, ISAS/JAXA is developing, a small lunar lander named “Smart Lander for Investigating Moon (SLIM)”, aiming for frequent touchdown missions in planetary exploration. Development of small landers is expected to be one of the key points to increase the number of landing missions in the future. However, a small lander such as SLIM has difficulties to maintain exploration ability after the landing. Narrow weight restrictions tend to limit the equipment capacities, such as rovers or optical cameras, on board the lander. To solve this problem, a mobility system using skid-sliding to improve exploration ability for a small lander is proposed. The system enables a small lander to move on planetary surface by skid-sliding using skids and thrusters of the propulsion subsystem of the lander. In some cases, including SLIM, this mobility system is advantageous because the lander does not need an additional propulsion subsystem other than the original one. Furthermore, SLIM has planned a special landing approach named “two-step landing method”. In the landing method, the lander is turned over, and lands on planetary surface using legs attached to the side of the lander’s body. This turning motion changes the direction of the main-thruster horizontal to the ground. Therefore, the lander can slide on planetary surface using skids attached on legs and thruster force. In this research, the usability of the mobility system by numerical simulations and experiments is shown.

The steering methods of this mobility system are inspired from conventional skiing theories. In snow ski, a skier slides on the surface in each direction using interaction force by changing ski board attitude and shifting body weight. This research also uses ski techniques such as skid attitude change and weight shifting of the lander for skid-sliding the lander. The skid-sliding methods proposed in the research are “weight loading change turn” and “thruster force turn”. These skid-sliding methods are evaluated by numerical simulations.

In numerical simulations for skid-sliding, a reaction force model between skid and soil is important, because the reaction force directly affects the skid-sliding motion. There are some reaction force models in the research field of exploration rover and snow ski turn. However, since these models are limited to two-dimensional motion and the reaction force model between ski and snow, the applicability is not validated for skid-sliding on soil ground. Therefore, a reaction force model between a skid and soil ground has been developed by an experiment. The guideline for generating the reaction force model is to build a model that has the skid attitude and skid load, which are important parameters in ski turn, as parameters. To meet this requirement, an experimental system with skid attitude and skid load as experiment parameters was built. This experimental system moves a weight loaded aluminum plate on a soil surface and measures reaction

force between the aluminum plate and the soil ground by a load cell attached to the aluminum plate. The aluminum plate is a substitute for the skid and the attitude can be adjusted. From this experiment results, it can be found that the reaction force in the direction of the soil surface is proportional to the load and has the same graph tendency regardless of the load when the plate attitude is the parameter. Furthermore, the reaction force in the direction perpendicular to the soil surface is about the same as the load applied to the plate regardless of the plate attitude. For these reasons, the reaction force model in the direction of the soil surface is expressed as the product of a reaction force function and the reaction force in the direction perpendicular to the soil surface. The reaction force function was obtained by normalizing the reaction force in the direction of the soil surface by plate load and fitting it by polynomial approximation.

A skid-sliding experiment was conducted in order to verify the reaction force model. In the skid-sliding experiment, a small skid-sliding model was slid on a soil surface at a constant speed by pulling the model by an electric cable winch, and a reaction force was measured by a load cell attached to the model's skid. As a result of the experiment, it was confirmed that the reaction force acting on the skid when sliding on the soil surface at a constant speed was in good correlation with the value of the reaction force model. From this experiment, the validity of the reaction force model was shown.

In a skid-sliding simulation by numerical analysis, the simulation and the skid-sliding performance for a small lander was validated. The lander model for the simulation was constructed based on SLIM. In this simulation, we evaluated the turn method proposed in this study and identified the factors for improving the skid-sliding performance. As a result, it was confirmed that the proposed turn methods can turn in the targeted direction, and the effectiveness of the proposed turn methods was shown. Furthermore, the effects of the skid attitude and skid position on the turn were clarified.

In order to verify the skid-sliding simulation program, we performed skid-sliding experiments using the "weight loading change turn" proposed in this study, and then conducted skid-sliding simulations under the experimental conditions. The experimental setup is that a skid-sliding model slides on a sand slope by thrust force of ducted fans. In the experiment, the skid-sliding experiment model was turned by the proposed turn method, and the motion of the skid-sliding was measured by a motion capture system, and the reaction force of the skid was measured by a load cell attached to the skid. In order to compare the experiment with the simulation, we performed skid-sliding simulations under the skid-sliding experiment conditions. By comparing the results of the experiments and the simulations, it was found that the tendency of the skid-sliding motion and the reaction force acting on the skid of the experimental results and the skid-sliding simulations agree well. As a result, the validity of the skid-sliding simulation was shown.

In this study, the mobility system using skids and skid-sliding methods was proposed and its validity was shown by numerical analysis and experiments. Furthermore, the usability of the skid-sliding mobility system as a proposal to improve the exploration ability of a small lander was demonstrated.

博士論文審査結果

氏名 江口 光

論文題目 滑走による月惑星表面の移動機構に関する研究

主査を含めた5名の審査委員が参加し、2019年8月19日に論文審査を実施した。

論文は、月惑星表面での探査を念頭に、新たな移動手段を提案するものである。すなわち、月惑星表面における移動手段として、従来、車輪やクローラによる方法や、浮上や飛行による方法が提案・実現されてきている。それに対して、当該論文ではソリを利用した滑走による移動を提案し、その移動機構の有効性を実験及び解析により検証しているものであり、全6章より構成されている。

第1章は序論であり、研究背景や他の移動手段について整理されている。本論文では、JAXAで開発が進められている小型月着陸実証機 SLIM から着想を得て、主として小型探査機による重力天体表面の移動手段として、ソリ滑走という手法を提案しており、その際の推進力としては、着陸までに使用しているロケットエンジンの利用を前提としている。

第2章はソリ滑走についての考察がなされている。従来から研究が行われている、雪上のスキーターンを参考としつつ、ソリ配置について考察が行われている。雪上のような滑りやすい地面と滑りにくい地面では、ソリの配置によってはターン方向が逆転することもあり得ることを指摘し、地面状態に依存せず所望の方向にターンするようなソリ配置を提案している。

地面状態がソリ滑走に大きな影響を与えることを受けて、第3章では、砂の上を滑走するソリの反力モデルを実験的に構築している。その際、月のレゴリスを簡便に模擬する際に比較的よく使用されている標準砂を使用するなど、将来の実機への応用に配慮した実験が行われている。また、厳密には異なる砂を有する JAXA の宇宙探査実験棟内の宇宙探査フィールドでのモデル検証をし、モデルに一定の普遍性を有することを傍証的に示している。

第4章では、旋回性や直進性といったソリ滑走性を数値シミュレーションにより検討している。ソリ滑走による移動で希望するポイントに移動するには、旋回性・直進性が重要であり、その意味で、本論文で提案する手法が現実的に使用できるかを評価する重要な視点である。第3章で構築した反力モデルをもとに、ソリの姿勢（進行方向に対するスキーの「ボーゲン」的な角度やエッジ角）や機体重心に対するソリ配置をパラメータとして、旋回性・直進性を評価しており、パラメータを適切に選択することによって、実用的な滑走性が得られることを示している。

第5章は、前章のシミュレーションの妥当性を確認するために、自走式のソリ滑走機体を製作し、滑走性の検証実験を行っている。その結果、シミュレーションと検証実験に一致性が見られていることから、シミュレーションが妥当であること、提案するソリ滑走方式が有効である

ことを示している。

最後に、第6章で本論文を振り返り、提案内容とその新規性、有用性が改めて整理され、今後の課題と展望が述べられている。

以上の論文に対して、申請者との質疑を踏まえて、審査委員にて議論をした結果、論文で主張している移動方式は独自性が高く、実験・解析の両面から検討がされていること、また予備審査の際に指摘されていた4件の事項について全てが適切に対応されていることが確認された。更に、本研究内容は、審査制度の確立した学術雑誌への掲載が決定されていることもあわせ、博士論文として妥当であると全会一致にて判断された。