

月面着陸拠点構築に向けた小型移動ロボットによる 排土作業指針の提案とシミュレーション検証

Simulation Study and Preliminary Analysis on Bulldozing Procedure Using Lightweight Small Robot for Lunar Base

〇学 杉浦佳琳 (慶應義塾大) 正 石上玄也 (慶應義塾大)

Karin SUGIURA, Keio University

Genya ISHIGAMI, Keio University

This paper proposes a bulldozing procedure using lightweight small robotic vehicles on lunar surface. The procedure mainly addresses a bulldozing task to fill and level ditches (i.e., craters) with considering earth-working characteristics. The characteristics, such as bulldozing efficiency, working efficiency, and energy margin, are evaluated by dynamic simulation of the robot with varying bulldozing length and depth. The simulation result quantitatively provides an efficient bulldozing scheme for filling a rectangular ditch.

Key Words: Bulldozing robot, Dynamic simulation, Bulldozing efficiency

1 緒言

現在、宇宙探査領域拡大のため、持続的な月面活動を可能にしようとする動きがある [1]。これには定期的な物資輸送の実現が必要であり、その実現のため、月面着陸拠点構築が検討されている。拠点構築の際には、岩石の除去やクレータ埋設、整地作業などが必要となる。月の地表レゴリスは深さ 20 cm 以上では非常に固く圧縮されている [2]。そのため、土木作業のエネルギー効率の観点から、各国での月拠点構築検討では、深さ 20 cm までを掘削可能な範囲とし、整地作業は排土作業（ブルドーzing）によるものを主体としている。

一般にブルドーzingは以下に示す 3 段階から構成される [3]。

1. Design Phase：敷地設計・施工計画を立てる。ただし、このとき設計された地形を設計面と呼ぶ。
2. Leveling Phase：ブレード位置の制御を行いながら走行し、施工を行う。
3. Checking Phase：出来上がった地形が設計面と一致するか確認する。

近年、地球での土工作业について、建設現場における労働環境の改善、作業の高精度化・省力化などを目的として、作業機械を自動化する研究が多くされてきた。しかし、ブルドーザの自動化に関する研究は Leveling Phase のブレード制御に注目したものが大半であり、その他の段階については、センサ類を用いて人の判断をサポートするに留まっている [4]。

そこで、本研究では、月面における整地作業のうち、クレータ埋設作業を想定し、ブルドーzingにおける 3 段階すべてが自動で行われる排土作業の指針を提案する。

2 クレータ埋設作業の概要

2.1 整地におけるクレータ埋設作業の重要性

月面ではクレータの存在を考慮する必要がある。Schultz は一般的な月の海における直径 D m 以上のクレータ密度 N が式 (1) に従うことを示した [5]。

$$\log_{10} N = -2 \log_{10} D - 1.5 \quad (1)$$

近年検討されている着陸機の寸法や重量、着陸性能から、離発着に支障をきたすクレータの直径を 2 m 以上 とすると、クレータ密度は 7905 個/km² と求められる。将来の月面着陸機の着陸精度を考慮し、着陸パッドの大きさを直径 50 m とすると、その中に直径 2 m 以上のクレータは 15 個ある計算となり、それらを埋設する必要がある。

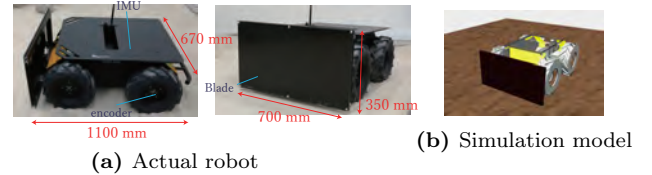


Fig.1: Bulldozing robot

2.2 作業概要と計画手法

埋設作業では、埋設領域と同体積の土を排土・運搬してクレータを埋める。しかし、本研究で用いる排土作業ロボットは地上のブルドーザより極端に小型化されており、排土できる量には限度があるため、本研究ではその限量を考慮した作業指針を提案する。作業指針提案のため、以下の手順でシミュレーション及び検証を行った。

- Step 1：ブレード制御の有効性の検証
- Step 2：最大許容駆動力 F_{dpmax} の決定
- Step 3：排土作業ロボットの作業特性の検証
- Step 4：排土作業指針の提案および提案手法の有効性の検証

3 動力学シミュレーションを用いた排土作業の検討

3.1 排土作業ロボットと実験・シミュレーション環境

月面での作業を想定するため、作業ロボットは、地上の一般的なブルドーザよりも極端な小型化が必要となる。そこで本研究では、地上用試験機として Clearpath Robotics 社の提供する不整地走行車両 Husky[6] に 350 mm×700 mm の板を取り付け、小型のブルドーザ（以下、排土作業ロボット）を作成した（図 1a）。本研究では、地上用試験機を用いた実機実験と作業ロボットを模擬した車両モデル（図 1b）によるシミュレーションを行った。本稿では主にシミュレーション結果に基づいた考察を行う。

シミュレーションには CMLabs 社製の動力学エンジン Vortex[7] を用いた。実機実験の結果と比較するため、走行シミュレーションは重力加速度 9.8 m/s² の地球重力下の環境で行い、走行土壌は実験フィールドと同じ珪砂 5 号による土壌を模擬した。

3.2 ブレード制御の有効性の検証

ブルドーザによる整地では、ブレード位置の上下動が整地後の地形に大きく影響する。そこで、設計面の位置座標 z_{design} と

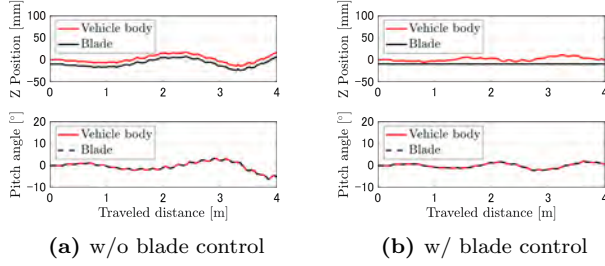


Fig.2: Comparison between with and without blade control

Table 1: Cutting depth used in simulation

Cutting depth: d [mm]	Vehicle mobility
10	Traversable
15	Difficult to drive
20	Immobilized

ブレード下端の位置座標 z が一致するようフィードバック制御を行った。

ブレード制御の有効性と必要性を確認するため、制御の有無のみを変え、平坦な地形上で排土シミュレーションを行った。このときのロボット姿勢の変化を図 2 に示す。制御なしの場合は車体の変動に伴い、ブレードの z 座標に大きな変動が見られたが、制御を行った場合、ブレードの z 座標はほぼ一定値となり、設計面に一致した。以上から、ブレード制御の有効性が検証されたと言え、以降はブレード制御を行うものとする。また、ブレード制御の有無にかかわらず、ピッチ角の変動が見受けられた。

3.3 最大許容駆動力 F_{dpmax}

Shirai ら [8] や Rankin ら [9] らは車両のスリップ率が 60 % を超えると、車輪の沈み込みが急激に増加し、車両の挙動が大きく変化することを発見した。スリップ率とは車輪半径 r 、車輪の各速度 ω 、車体の水平方向速度 v_{xy} を用いて式 (2) で定義される値である。

$$s = \frac{r\omega - v_{xy}}{r\omega} \quad (2)$$

そこで本研究では、安全な走行を「スリップ率 60 % 以下の状態」と定義し、安全な走行を行える最大掘削反力を最大許容駆動力 F_{dpmax} とする。

最大許容駆動力を決定するため、平坦な地形の上を走行可能、走行困難、走行不能となるような 3 種類の差し込み深さで走行させ、排土シミュレーションを行った (表 1)。それらの結果から、掘削反力とスリップ率を抽出したヒストグラムを図 3 に示す。同図から、反力が 430 N を超えると、スリップ率 60 % を超える割合が急増することが分かった。したがって、本研究では最大許容駆動力 F_{dpmax} を 430 N とした。

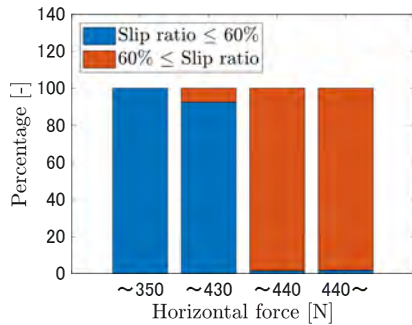


Fig.3: Histogram of horizontal force vs. slip ratio

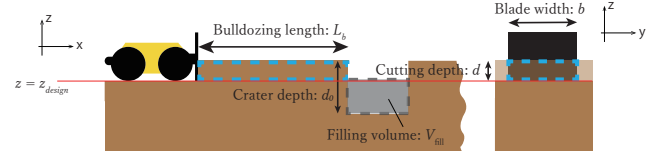


Fig.4: Illustration of filling simulation

Table 2: Bulldozing parameters

Variable	Parameters	Unit
Bulldozing distance	L_b	[m]
Cutting depth	d	[m]
Designed surface height	$z_{design} = -d$	[m]
Blade width	b	[m]
Theoretical value of bulldozed volume	$V_0 = dbL_b$	[m ³]
Actual value of bulldozed volume	V	[m ³]

3.4 作業特性の検証

作業ロボットの進行方向に穴を設置し、穴の手前 L_b [m] の距離から差し込み深さ d [m] で排土作業シミュレーションを行い、穴まで運搬・排土されてきた土の量を計測した (図 4)。その結果から、埋設作業におけるロボットの作業特性について検証を行った。ただし、実際のクレータは円錐形だが、本稿では簡単のため、矩形穴とした。また、作業特性とは、排土距離と差し込み深さに応じた排土量や掘削反力の変化を指す。この作業特性は、作業ロボットが小型であることや埋設作業であること特有のものとなると推測できる。このとき、各パラメータは表 2 のように定義される。

図 5a に示したシミュレーション結果から、排土距離および差し込み深さを変えた場合、穴まで排土された土の量 (排土量 V) は、排土距離が 1 m 以上では減少に転じることが分かった。そこで、3 つの評価指標 (排土効率 η_b 、作業効率 η_w 、エネルギー余裕 η_m) を定義し、これらの値から作業特性について考察を行う。 $\eta_b \sim \eta_m$ は、以下のように定義した。

$$\eta_b \equiv \frac{V - V_0}{V_0} [-] \quad (3)$$

$$\eta_w \equiv \frac{V}{\int_0^{L_b} F dx} [\text{m}^3/\text{J}] \quad (4)$$

$$\eta_m \equiv \left(1 - \frac{\int F v dt}{\int W_{max} dt}\right) [\%] \quad (5)$$

まず、図 5b より、より多くの土を排土できる条件を表す排土効率 η_b は、差し込み深さが一定の場合、排土距離が 0.6 ~ 0.8 m の範囲で最大となった。また、排土距離が一定のときは、排土距離 0.6 m で最大となり、その値から離れるにつれて排土効率も減少したことが分かった。このとき、排土効率が最大となる $L_b = 0.6$ [m] 付近では、穴の手前でロボットのピッチ角が急増し、頭下げ挙動が見られた (図 6a)。一方、排土距離が短いと、ピッチ角が変動する前に穴に到達し、排土距離が長いと、増加した掘削反力から逃げるように頭上げ挙動が起こることが分かった (図 6b)。以上から、穴の手前におけるロボットのピッチ角と排土効率は排土距離に応じて変化する、最適な排土距離は $L_b = 0.5 \sim 0.9$ [m] の範囲に存在すると示唆される。

次に、少ない駆動力でより多くの土を排土できる条件を示す作業効率 η_w と、車両の最大電力と比較した場合の作業時におけるエネルギー余裕 η_m に注目する (図 5c, d)。 $L_b = 0.5 \sim 0.9$ [m] の範囲では、いずれの指標も $L_b = 0.5$ [m] のときに最大となり、

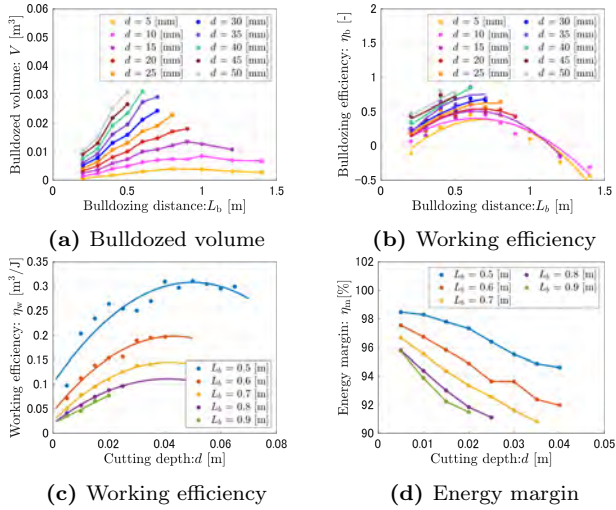


Fig.5: Bulldozing volume and efficiencies

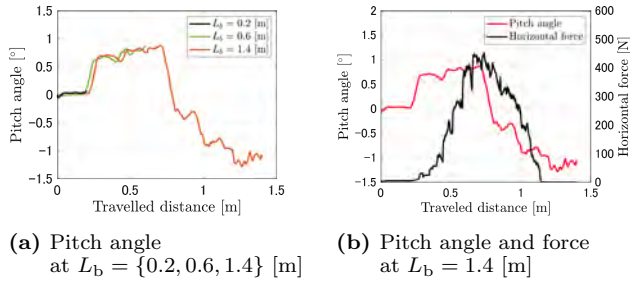


Fig.6: Bulldozing distance vs. pitch angle and horizontal force

排土距離の増加に応じて減少した。また、エネルギー余裕 η_m は、差し込み深さが一定の場合に比べ、排土距離が一定のときのほうが、高い状態で維持できることが分かった。そこで、以降は簡単のため、排土距離を一定とした作業について考える。

4 排土作業指針の提案およびシミュレータによる検証

4.1 適切な排土距離と最大差し込み深さ d_{dpmax}

前節から、排土距離が一定のとき、制約条件と作業特性は次のようにまとめられる。

- 制約条件：
 - スリップ率 $\leq 60\%$,
 - 最大反力 \leq 最大許容駆動力 $F_{dpmax}(= 430 \text{ [N]})$
- 作業特性：
 - 排土効率 η_b ：排土距離 0.6 m で最大となり、離れるにつれて減少する。また、差し込み深さの増加に比例して増加していく。
 - 作業効率 η_w ：排土距離 0.5 ~ 0.9 m の範囲では、排土距離 0.5 m で最大となり、排土距離の増加に伴い減少する。また、 $L_b = 0.5 \text{ [m]}$ では差し込み深さ 50 mm で最大となり、 $L_b \geq 0.6 \text{ [m]}$ では差し込み深さに比例して増加する。

作業特性から、排土距離が 0.5 m または 0.6 m のとき、最も効率よく作業を行えたと分かる。そこで、本研究では、排土距離 $L_b = 0.5 \sim 0.6 \text{ [m]}$ を最適な排土距離とみなす。

次に、ブレードに加わる最大反力が最大許容駆動力以下となる差し込み深さについて考える。3.4 項の作業シミュレーションにおける最大反力の推移を図 7 に示す。同図から、最大反力が最大許容駆動力 430 N 以下となる条件は、 $L_b = 0.5 \text{ [m]}$ のとき $d \leq 55 \text{ [mm]}$ 、 $L_b = 0.6 \text{ [m]}$ のとき $d \leq 30 \text{ [mm]}$ となることが分かった。

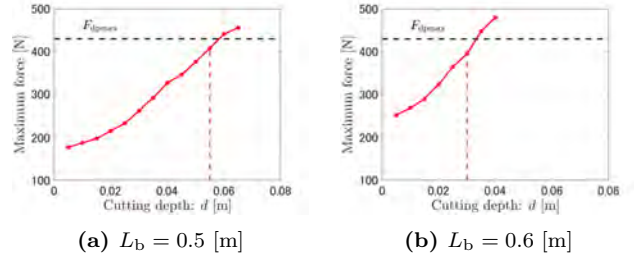


Fig.7: Maximum horizontal force at $L_b = \{0.5, 0.6\} \text{ [m]}$

Table 3: Parameters of α, β at $L_b = \{0.5, 0.6\} \text{ [m]}$

Bulldozing distance: $L_b \text{ [m]}$	α	β
0.5	2.5402	0.1309
0.6	2.6225	0.1170

しかし、 $L_b = 0.5 \text{ [m]}$ の場合は、差し込み深さ 50 mm で作業効率がピークとなることから、安全かつ効率的な作業を行える最大差し込み深さ d_{dpmax} は、 $L_b = 0.5 \text{ [m]}$ で 50 mm、 $L_b = 0.6 \text{ [m]}$ で 30 mm と決められる。

以上から、本稿では、排土距離を 0.5 ~ 0.6 m の間で一定として考え、排土距離が 0.5 m のとき、最大差し込み深さ d_{dpmax} は 50 mm、排土距離が 0.6 m のとき、 d_{dpmax} は 30 mm とする。

4.2 排土量の概算

3.4 項のシミュレーション結果から、排土距離を一定とした場合、排土効率 η_b は式 (6) で近似されることが分かった。ただし、係数 α, β は車両や環境に依存する。排土距離が 0.5 m と 0.6 m における係数 α, β は、表 3 のようになった (図 8)。

$$\eta_b = \alpha d^\beta - 1 \quad (6)$$

このとき、排土量 V は η_b を用いて式 (7) で概算できる。

$$V = (1 + \eta_b)V_0 = \alpha L_b d^{\beta+1} \quad (7)$$

4.3 排土作業指針の提案

第 1 節で述べたブルドーピングにおける 3 段階すべてを自動で行う作業指針について提案する。進行方向に穴がある場合、その穴の設計面以下の領域 ($z \leq z_{design}$) が埋設体積 V_{fill} となる (図 4)。したがって、式 (8) が成り立つとき、穴は埋設されたと言える。

$$V = V_{fill} \quad (8)$$

そこで、図 9 に示すように、式 (7) から求められる排土量 V を用いて、式 (8) の成り立つ差し込み深さ d を求めることで、敷地設計を行うような作業指針を提案する。ただし、 S はクレータ表面積、 d_0 はクレータ深さとする。さらに、差し込み深さ d は

Fig.9: Suggested flow chart

常に $0 \leq d \leq d_{dpmax}$ を満たす。この不等式を満たさない場合は、差し込み深さ d_{dpmax} で施工することで、常に掘削反力が最大許容駆動力を下回るような作業が行える。

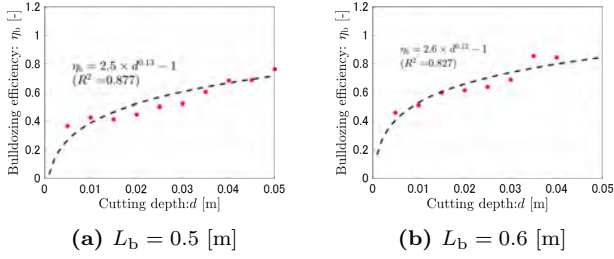


Fig.8: Working efficiency $L_b = \{0.5, 0.6\}$ [m]

Table 4: Results of test simulations at $L_b = \{0.5, 0.6\}$ [m]

Variable	$L_b = 0.5$ [m]	$L_b = 0.6$ [m]
d_{dpmax} [mm]	50	30
Cutting depth: d [mm]	29.7	24.6
Maximum force [N]	24.1	60.6
Maximum slip ratio [%]	12.5	20.0

4.4 提案手法の検証

4.4.1 作業環境

作業ロボットの進行方向に $0.25 \times 0.7 \times 0.125$ [m] の矩形穴を設置し、4.3項で提案した手法に基づき、排土作業シミュレーションを行った。計算結果の妥当性検証のため、式 (8) で算出された差し込み深さに加え、同様の環境下で差し込み深さ $d = \{20, 25, 30, 35\}$ [mm] でもシミュレーションを行った。

4.4.2 排土距離 L_b が 0.5 m または 0.6 m のとき

各排土距離における式 (8) の解 d と、その差し込み深さにおいて作業した結果を図 10 と表 4 に示す。

図 10 は、施工後の地表高さと設計面 z_{design} との差を示す。いずれの排土距離でも、式 (8) の解において設計面との差が最小となり、穴周辺の粗整地が最も高い精度で行われていた。さらに、作業時に加わる最大掘削反力は最大許容駆動力 430 N 以下となり、最大スリップ率も 60 % 以下となることが確認された。以上から、提案手法によって、最適な差し込み深さが算出され、安全で効率の良い作業が提案されたと言える。

4.4.3 排土距離 L_b が 0.55 m のとき

排土量の概算式 (式 (7)) の有効性を検証するため、未知の排土距離 $L_b = 0.55$ [m] において同様のシミュレーションを行った。このとき、係数 α, β は $L_b = 0.5, 0.6$ [m] における排土効率の値から式 (9) と求められた。

$$\alpha = 2.4125, \beta = 0.1079 \quad (9)$$

図 11a から、排土量の概算式と実際の排土量はほぼ一致していたことが分かった。このことから、式 (7) は排土量を正しく表していると言える。また、排土距離が 0.55 m のときも、式 (8) の解において、最も高い精度で粗整地が行われ、最大スリップも 60 % 以下となることが確認された (図 11b, 表 5)。

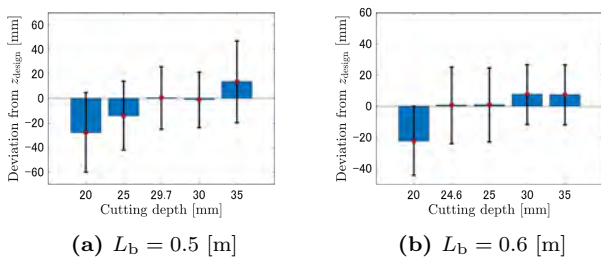


Fig.10: Deviation from designed surface at $L_b = \{0.5, 0.6\}$ [m]

Table 5: Results of test simulations at $L_b = 0.55$ [m]

Variable	$L_b = 0.55$ [m]
d_{dpmax} [mm]	40?
Cutting depth: d [mm]	27.2
Maximum force [N]	42.8
Maximum slip ratio [%]	21.2

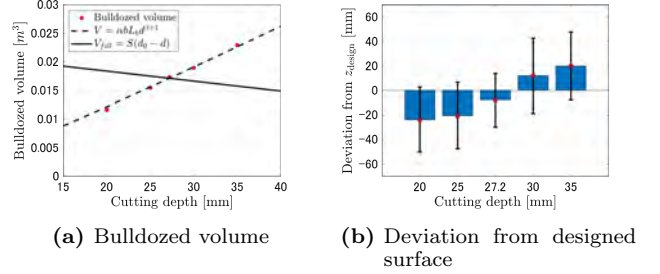


Fig.11: Results of test simulation at $L_b = 0.55$ [m]

5 結言

本稿では、ブレード制御の有効性の検証を行い、次にスリップ率から最大許容駆動力を決定した。そして、作業ロボットの作業特性について検証を行った。最後に、その結果に基づき、排土作業全体を自動で行う作業の指針を提案した。

一方で、本稿では簡単のため、矩形穴を用いたシミュレーションに留まった。また、実機実験は簡易的な実験のみだったことから、今後は、より現実的な環境条件におけるシミュレーションと詳細な実機実験を行うことで、より具体的な排土作業計画の提案手法を提案することを課題とする。

謝辞

本研究は JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 国際宇宙探査協働グループ (ISECG), 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), “国際宇宙探査ロードマップ 追補版 2020 年 08 月 最新月面探査シナリオ”, pp. 21–27, 2020.
- [2] B. Sherwood, “Principles for a practical Moon base”, *Acta Astronautica*, Vol. 160, pp. 116–124, 2019.
- [3] N. Mattivi, “Trimble offers the connected construction site connecting office, people and machines: the way to increase productivity on earthmoving and road construction sites,” *Proceedings of the 1th International Conference on Machine Control & Guidance*, pp. 181–187, 2008.
- [4] Y.-S. Lee, S.-H. Kim, J. Seo, J. Han and C.-S. Han, “Blade control in Cartesian space for leveling work by bulldozer”, *Automation in Construction*, Vol.118, 2020.
- [5] P.H.Schultz, “Interpreting statistics of small lunar craters”, *Proc.Lunar Sci. Conf.8th*, 1977.
- [6] Clearpath Robotics, “Husky Overview”, 2020.
- [7] CMLabs, “Theory Guide:Vortex Software’s Multibody Dynamics Engine.(as of 2020-11-27)”, 2020.
- [8] T. Shirai and G. Ishigami, “Development of in-wheel sensor system for accurate measurement of wheel terrain interaction characteristics,” *Journal of Terramechanics*, Vol.62, pp. 51–61, 2015.
- [9] A. Rankin, M. Maimone, J. Biesiadecki, N. Patel, D. Levine and O. Toupet, “Driving Curiosity: Mars Rover Mobility Trends During the First Seven Years,” *2020 IEEE Aerospace Conference*, 2020.