回転方向によって走行特性の異なる 移動ロボット用車輪の開発と評価

○菊地泰洋 永谷圭司(東北大学)

1. **緒言**

日本は、111 もの活火山を有する世界有数の火山大国 である.これらの活火山の噴火は、近隣地域に大きな被 害をもたらす危険性があるため、噴火の推移の調査が 重要となる.しかし、火山は、一度噴火すると、半径数 キロメートルにおよび立入制限区域が設定されるため、 人手による調査が困難となる.そこで、筆者の属する研 究室では、小型地表移動ロボットを小型飛行ロボットで 運搬し、火口周辺を無人で調査するシステムの開発が行 われてきた [1].

一般に, 地表移動ロボットに用いられる走行性能の高 い移動機構の一つとして, 履帯が挙げられる [2][3]. し かし, 飛行ロボットには可搬重量の制限があるため, 小 型飛行ロボットで運搬される小型地表移動ロボットに は, 履帯に代表される重量の大きい機構を搭載すること ができない. そこで, このような小型地表移動ロボット の移動機構には車輪を採用し, 不整地の走行性能を向上 するため, この車輪には, ラグと呼ばれる突起が搭載さ れている. ラグと走行性能との関係は, これまで, 様々 な研究が行われてきたが [4], ラグ以外の車輪形状の変 更による走行性能の向上については, これまであまり検 討が行われていない.

そこで、本研究では、高い走行性能を実現する、新た な形状を有する車輪の開発を行うこととした.火山地 域での調査に使用される車輪には,様々な走行性能が要 求されるが、本研究では、火山地域での探査ミッション 遂行の確実性の向上を目的とし,要求される走行性能の 中でも特に、振動の抑制と踏破性能に注目する. 上述の ロボットシステムによる火山地域の探査は、オペレータ に送信されるカメラ動画を基にした遠隔操作によって 行われる.しかし,動画の送信に使用される無線は通信 容量が十分確保できないため, 走行時に振動が発生する と動画の乱れが生じる.このため、オペレータがロボッ ト周辺の状態を把握することが困難となり、 ミッション の失敗に繋がる恐れがある.そのため、走行時には、振 動が小さいことが望ましい. 一方, 火山地域には大礫が 多く存在する. そのため. 測定を行う場所への走行を確 実に実現するためには、大礫の乗越えが必要となること が想定される.したがって、大礫を乗越えることのでき る踏破性能が、ロボットの車輪には要求される.以上の 理由から、本研究では、振動を抑制しつつ、踏破性能を 有する、新たな形状の車輪の開発を目指す.

本稿では、振動抑制と踏破性能のトレードオフ関係を 解析的に明らかにし、これらの性能の両立を目的とし て開発した、回転方向によって走行特性の異なる車輪の 提案を行う.また、この車輪について実験的評価を行っ たので、これを報告する.



図 1: 歯車型車輪

回転方向によって走行特性の異なる 移動ロボット用車輪の提案

2.1 提案手法の概要

不整地での車輪型移動ロボットに使用される車輪の 形状の一つとして,歯車型車輪が挙げられる.これまで に本研究グループで扱ってきた歯車型車輪の形状を図 1に示す.歯車型車輪は,外周面によって円形の車輪に 近い走行を行うとともに,障害物の乗越え時には,歯側 面が障害物に接触することによって高い踏破性能を実 現する.

本章では、この歯車型車輪の有する踏破性能と、走行 時の振動抑制との間に存在するトレードオフの関係を、 解析的に明らかにする.その上で、歯車型車輪に代表さ れる従来の車輪では実現不可能であった、これら2つの 性能を1つの車輪によって両立することが可能な、回転 方向によって走行特性の異なる車輪を提案する.

2.2 本研究で扱う範囲,条件

本研究では、まず、歯側面と障害物との接触による乗 越えについて考える.歯車型車輪の障害物乗越え時に は、歯側面が障害物に接触することで、高い踏破性能を 実現する.本研究では、車輪の形状に注目し、幾何形状 と車輪の踏破性能との関係性を確認する.この際、簡単 化のため、対象とする障害物は垂直な側面と上面を持つ 任意の高さの段差であるとし、段差上面と接触し得る歯 側面の長さを、踏破性能の指標として定義する.

次に、車体の振動について考える. 歯車型車輪の走行 では、走行面が平坦であっても、走行面から受ける垂直 抗力の作用線から車輪の重心が外れることにより、車 輪と走行面との接触点が非連続的に切り替わり、振動 が発生する. この非連続的な変化の前後における、車輪



図 2: 接触長さ

の中心と走行面との距離の変化の絶対値が大きいほど, 走行時に発生する振動は激しくなると考えられる.そ こで本研究では,この距離の変化を振動の指標として定 義する.

2.3 歯車型車輪の解析的評価

2.3.1 歯車型車輪のパラメータの定義

本研究で扱う歯車型車輪の形状を図1に示す.この 歯車型車輪の幾何形状を表すパラメータとして,隣り合 う歯の中心線のなす角を θ ,歯厚をt,車輪の外接円の 半径をRとおく.ただし,歯数は3以上とし,歯の高さ は十分高く,走行面や段差が外周面および歯側面以外と 接触することはないものとする.

2.3.2 段差乗越え時の接触長さ

歯側面が段差上面と接する歯車型車輪の様子を図 2 に示す.いま,直線 $A_{n+1}B_{n+1}$ と段差側面がなす角度 は,幾何学的関係により θ である.したがって,歯 n+1 側面の中点である C_{n+1} から段差側面に下ろした垂線 の足 P について,

$$C_{n+1}P = \frac{1}{2}t\sin\theta \tag{1}$$

が成り立つ.また,車輪の中心点 O を通り段差側面と 平行な線への点 C_{n+1} からの垂線の足を Q とすると,

$$C_{n+1}Q = OC_{n+1}\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$
(2)

$$=\sqrt{R^2 - \left(\frac{t}{2}\right)^2 \cos\theta} \tag{3}$$

となる. よって, これらを $l_c = OC_{n+1} - (C_{n+1}P + C_{n+1}Q)$ に代入して整理すると, 段差上面との接触長さである l_c は,

$$l_{\rm c} = (1 - \cos\theta)\sqrt{R^2 - \left(\frac{t}{2}\right)^2} - \frac{1}{2}t\sin\theta \qquad (4)$$

と導出される.

2.3.3 車輪中心と走行面との距離の変化

車輪と走行面との幾何学的関係を図3に示す.ここ



図 3: 車輪と走行面の幾何学的関係

で、1つの歯について注目すると、

$$\phi = \angle \text{AOC}_{n} = \sin^{-1} \frac{t/2}{R} \tag{5}$$

が得られる. これを用いて,

$$\angle A_{n}OS = \frac{1}{2}\theta - \phi \tag{6}$$

となるため, 非連続的な距離の変化後の車輪中心と走行 面の距離 OS は,

$$OS = R \cos\left(\frac{\theta}{2} - \sin^{-1}\frac{t/2}{R}\right) \tag{7}$$

となる. 一方, 非連続的な距離の変化前の車輪中心と走 行面との距離は R であるから, 車輪中心と走行面との 距離の変化を d_f とおくと,

$$d_{\rm f} = {\rm OS} - R$$
$$= \left\{ \cos\left(\frac{\theta}{2} - \sin^{-1}\frac{t/2}{R}\right) - 1 \right\} R \qquad (8)$$

が導出される.なお,この値は,距離の非連続的な変化 後の長さから変化前の長さを減じたものであるから,常 に負の値である.したがって,この値が増加するとき, より振動が抑制されると考えることができる.

2.4 提案する車輪の従来手法との違いおよびメリット

前節で示した式4と式8について, θ を固定して考える. この時, 踏破性能の指標である l_c および振動の指標である d_f は歯厚tの関数である. このtが増加すると, l_c は減少する一方で, d_f は増加する. 同様に,tが減少すると, l_c は増加する一方で, d_f は減少する. 図4に, 歯数n = 8とした時の l_c および d_f のグラフを示す. この図より,振動の大きさと踏破性能とは,トレードオフの関係にあることが見てとれる.

本研究では、回転方向によって走行特性の異なる移動 ロボット用車輪を開発することにより、このトレード オフ関係を解決する車輪の実現を目指す.本研究で提 案する車輪を図5に示す.図5中に示すように順回転 および逆回転を定義し、この車輪を風車型車輪と呼称 する.この風車型の形状は、歯車型の形状を基に、歯の 両方の角を結ぶ直線を接線とし、一方の角を通る半径 r



図 4: 歯厚 *t* と接触長さおよび車輪中心-走行面距離の 変化



図 5: 開発した風車型車輪

の円に沿って歯を除去したものとした.なお,後述の実験で使用した歯車型車輪は,車輪の外接円の半径 Rを 102.5 mm,歯数 nを 8,歯厚 tを 40 mm,車輪幅を 30 mm とし、この歯車が車輪を基に,rを 48 mm として 風車型車輪の外周面および側面を形成した.また,材質 は発泡ポリエチレンフォームとした.

この風車型車輪での順回転での走行は、走行時の振動 の抑制を目的としている. 従来の歯車型車輪は, 高い踏 破性能を実現する一方で,その踏破性能を高めるほど振 動も大きくなる. そこで, 走行時走行面から作用する力 によって, 車輪中心と走行面との距離を減少させる方向 に変形するように、図6に示す切れ込みを施した.図6 中の点 P.Qが一致するように変形が起こると仮定する と、歯の角から車輪の中心との距離は88.8 mm まで減 少する.幾何学的な関係より、この変形が完了するまで に隣接する歯が走行面に接触するため、車輪の中心と走 行面との距離の非連続的な変化は起こらず,理論上 d_f は0mmとなる.これは、式8にパラメータを代入す ることによって得られる、歯車型車輪の車輪中心と走行 面との距離の変化 $d_f = -4.5$ mm と比べ大きい. 以上よ り、車輪の中心と走行面との距離の非連続的な変化によ る振動の抑制が期待できる.

逆回転での走行は、踏破性能の向上を目的としている。 歯厚 t が増加すると接触長さが減少する理由として、 歯側面が段差側面に接触することが挙げられる. そこで、提案する風車型の形状により、 歯と段差側面との 接触までの猶予を増加させることとした. 式4に、本実



図 6: 風車型車輪に施した切れ込み



図 7: 軽量小型車輪型移動ロボット CLOVER-II

験で使用した歯車型車輪のパラメータを代入すると, 接 触長さ *l*_c は 15.9 mm となる.一方で, 風車型車輪の逆 回転時の接触長さ *l*_c は, 幾何学的な関係より, 29.5 mm と算出される.これにより, 従来の歯車型車輪と比較 し, より高い踏破性能を実現できることが期待できる. なお, 風車型車輪の接触長さは, 切れ込みによる変形を 無視して算出したが, 実際の逆回転での走行時には, 変 形が発生する.そこで, 図5中に示すように, 糸による 補強を行い, 外向きの変形が発生しないよう工夫した.

3. 歯車型車輪と風車型車輪との比較実験

3.1 振動評価実験

3.1.1 実験内容

車輪の幾何形状によって,走行時に生じる振動をどの 程度抑制可能であるかを検証することを目的とし,実 機を用いた各車輪の振動評価実験を行った.実機には, 筆者の所属する研究室で開発した小型軽量4輪移動ロ ボット CLOVER-II を使用した. CLOVER-II の外観 を図7に示す.この CLOVER-II に加速度センサを搭 載し,平坦な面の走行時に鉛直方向に生じる加速度を測 定することで振動を評価する.この測定実験を,歯車型 車輪,風車型車輪の逆回転および順回転について,それ ぞれ実施した.

3.1.2 実験結果

測定した直線走行時の z 軸方向の加速度の平均値を 求め, 測定値から平均値を減じて得られた値をプロット したものを, 図 8 に示す. この図から, 歯車型車輪, 風 車型車輪の逆回転, 風車型車輪の順回転の順に, z 軸方







図 9: 実験装置

向の加速度が小さくなる傾向が見てとれる.また,こ れらの値の絶対値の平均は,歯車型では 0.91 m/s² で あった一方で,風車型の逆回転では 0.60 m/s²,順回転 では 0.43 m/s² であった.以上より,歯車型車輪と比較 し,風車型車輪は順回転,逆回転ともに振動を抑制する 能力が高く,特に順回転では,歯車型車輪と比較して振 動の指標とする値がおよそ半分になることが明らかと なった.

3.2 段差乗越え実験

3.2.1 実験内容

歯車型車輪および風車型車輪の順回転,逆回転での踏 破性能を検証するため,段差の高さを変更可能な実験 装置を用いた段差踏破試験を実施した.実験装置を図 9に示す.

本研究では,幾何形状による踏破性能について議論しているため,車輪と段差側面および走行面に低摩擦テー プを貼付し,摩擦による影響が十分無視できるように 工夫した.段差の高さは5mmごとに変化させ,各車輪 がそれぞれの高さによって乗越えが成功するか否かを 観察した.なお,ロボットの前輪が段差上面に乗上がっ た場合を成功と判定した.

3.2.2 実験結果

従来の歯車型車輪が乗越えることのできた最大の段 差高さは 110 mm であったのに対し,風車型車輪の順 回転は,乗越えることのできた最大高さは 75 mm,逆回 転では乗り越えることのできた高さは 140 mm であっ た.以上より,風車型車輪は,歯車型車輪と比較し,逆 回転で走行することで高い踏破性能を示した.

3.3 考察

以上の振動評価実験および段差乗越え実験より,本稿 で提案する風車型車輪は,順回転では歯車型と比較して 振動を抑制することが可能であり, 逆回転では, 歯車型 車輪と比較して, 高い踏破性能を実現可能であること が明らかとなった. 以上より, 本研究で提案した風車型 車輪は, トレードオフ関係にある振動抑制と踏破性能 とを両立可能な車輪であると言える. この性質を利用 し, 乗越える大礫等の障害物が少ない環境での走行で は, 順回転での走行によって振動を抑制し, 障害物の多 い環境では, 逆回転での走行によって, 大きな段差の乗 越えを行うといった運用が可能になると考えられる.

4. 結言

本研究では、振動抑制と踏破性能との間に存在する トレードオフ関係を, 解析的に明らかにすると共に, こ のトレードオフ関係にある振動抑制と踏破性能を1つ の車輪で両立させることを目的とした,回転方向によっ て走行特性の異なる、風車型車輪を開発した.また、こ の風車型車輪と従来の歯車型車輪とを実験的に比較し. 風車型車輪の順回転では振動抑制が, 逆回転では踏破性 能がそれぞれ歯車型車輪と比較して高いことを実験的 に示した.一方、本稿で提案した風車型車輪の形状は、 比較のための歯車型を基にした形状であるため,必ずし も適しているとは言えない.したがって,歯側面の角度 や位置、切れ込みの形状等の検討を行い、これらによっ て踏破性能と振動抑制がどの様に変化するかを明らか とすることが、今後の課題に含まれると考えられる.ま た,実際の火山地域では,様々な地面条件が存在してい る. そのため、本研究で提案した車輪による走行では、 屋内実験では想定していない問題が発生する可能性が ある.したがって,開発した車輪を実際の火山環境で走 行させ、その問題点を明らかにし、改良を行う必要があ ると考えられる.

参考文献

- 山内元貴,秋山健,永谷圭司: "飛行ロボットと小型地表 移動ロボットの複合システムによる火山活動区域の無人 調査",日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 3, pp. 220-225, April 2016.
- [2] 山下淳, 淺間一, 新井民夫, 太田順, 金子透: "ロボットの 移動機構に関する研究動向", 日本ロボット学会誌, vol.21, no.3, pp.282-292, 2003.
- [3] 小柳栄次: "サブクローラを持つレスキューロボット", 日本ロボット学会誌, vol.28 no.2, pp.147-150, 2010.
- [4] 須藤真琢,永谷圭司,吉田和哉: "斜面における車輪型 移動ロボットの走行性能に土壌環境が及ぼす影響の評価",日本機械学会,ロボティクス・メカトロニクス講演 会,ROBOMEC2012,1A2-L06,2012.