

宇宙ロボットアイデア3題

Three Ideas for Innovative Robots for Future Space Application

○吉田 和哉

○Kazuya Yoshida

東北大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻

Department of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku University

キーワード：宇宙ロボット (space robot), 遠隔点検 (remote surface inspection), 月面レゴリスの掘削 (excavation of lunar regolith), 小惑星探査 (exploration of an asteroid), 跳躍ロボット (hopping rover)

連絡先：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉01 東北大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 吉田 和哉

Tel.: (022)217-6992, Fax.: (022)217-6992, E-mail: yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. まえがき

1993年より、宇宙開発事業団、文部省宇宙科学研究所、日本航空宇宙学会、日本機械学会、電子情報通信学会、および日本宇宙フォーラムの主催により「衛星設計コンテスト」が実施されている。

同コンテストは、高専、大学、大学院生を対象に宇宙開発に対する理解を深め、新しいアイデアを発掘することを目的とし、毎年「設計部門」と「アイデア」部門の二つに分けて、それぞれ宇宙開発のプロたちによる厳しい審査が行われ、優秀作品に対して賞が与えられる。

評論家の立花隆は、同コンテストについて「僕は日本の宇宙開発にはぜんぜん展望がないとずっと思っていたんですが、衛星設計コンテストに関係するようになって、いやまだまだ日本の宇宙の未来は捨てたもんじゃないと思いはじめたんです。第一に、若い人たちの意欲のすごさと思いがけないアイデアの豊かさ、それに、それなりに衛星

をまとめられるだけの技術的力量を持った人材がいるということですね。第二に、大型衛星ではアメリカに太刀打ちできないけれど、アイデア勝負の小型衛星なら、まだまだいけるじゃないかと思ったことです。」と評している¹⁾。

第4回～第6回の同コンテストにおいて、筆者の指導する東北大学工学部機械航空工学科自動制御学分野の宇宙ロボット研究グループは3年連続して「アイデア大賞」を獲得するという快挙を成し遂げた。本稿では、アイデア大賞を受賞した3つの宇宙ロボットのアイデアを順に紹介する。

2. The Space Worm (宇宙構造物外壁点検マイクロロボット)

第4回アイデア大賞 (1996)

by 志和 知子, 藤島 幸一, 平岡 忠志

2.1 目的

一度打ち上げられた衛星は、軌道上で何か不具合が生じても見ることができない。特に宇宙空間では、マイクロデブリやマイクロメテオによる外壁の損傷も予想されるが、それがどの程度の影響を及ぼすのか詳しく知られていない。特に宇宙ステーションのように人間が長期間滞在する構造物では、これは安全性に関わる重要な問題である。そこで、軌道上の衛星がどのような状態にあるのか、またマイクロデブリが宇宙ステーションなどの外壁にどのような影響を及ぼすのかを、CCDカメラ、およびレーザーマイクロ스코プで点検することを目的とする、宇宙構造物外壁点検マイクロロボット、「スペースウォーム」を提案する。

2.2 提案するロボットの特徴

我々が提案するロボットは、以下のような特徴をもつ。

自律点検 自律的に衛星表面を歩行・移動して点検を行う。軌道上で衛星のモニターが可能となる。宇宙ステーションにおいては効率的な自動点検が可能である。

静電引力吸盤 静電引力は一般に弱いと思われがちだが、自重を支える必要のない微小重力環境においては有効である。特に小型で軽量のマイクロロボットでは静電気力は効果的に利用できる。

フィクスチャ不要 静電引力吸盤を使うため、専用の構造物なしに自由に張り付くことができ、既存の衛星の設計を変更する必要がない。

2.3 ロボットの構成

2.3.1 全体構成

このロボット「スペースウォーム」の概略をFig.1に示す。このロボットは全長が30[cm]から70[cm]

の範囲で伸縮し、幅・高さともに10[cm]である。

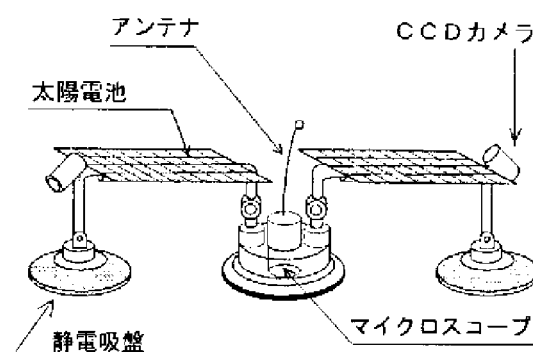


Fig. 1 スペースウォームの概略図

2.3.2 重量・電力配分

このロボットの重量、および電力配分をTable 2に示す。

Table 1 ロボットの仕様

構成部品	個数	質量 [g]		消費電力[W]	
		単品	合計	稼働時	計測時
脚(2本)・機体					
静電引力吸盤	3	10	30	0.1	0.1
機体	1	50	50		
小計			80		
アクチュエータ					
モーター	6	7	42	1.5 *1	
ギヤボックス	6	9	54		
直動機構	2	15	30		
小計			126	1.5	
カメラ・通信系					
CCDカメラ	2	3	6		5 *2
レーザー					
マイクロカメラ	1	30	30		5 *2
通信機器	1	100	100	3	
小計			136		
太陽電池・バッテリー				発電電力[W]	
シリコン太陽電池	64	0.26	17	5.1	
Li1次電池	3	47	141		
小計			158		
合計		500 [g]		5.1 [W]	

*1 同時に2箇のモーターを駆動させる

*2 同時には使用しない

2.3.3 吸着の原理

基本的な回路構成をFig.2に示す。図のように吸盤と外壁が誘電体をはさんで電荷を蓄えコンデンサとなり、これら2つのコンデンサからなる閉回路が構成されて静電気力を発生するものである。

このようにして得られる静電気力の大きさを、以下に試算する。条件は以下のものとする。

静電吸盤の直径 10[cm]

電源電圧 100[V]

この場合に得られる力の大きさと、ロボットをひきはがすために必要な加速度の大きさは、

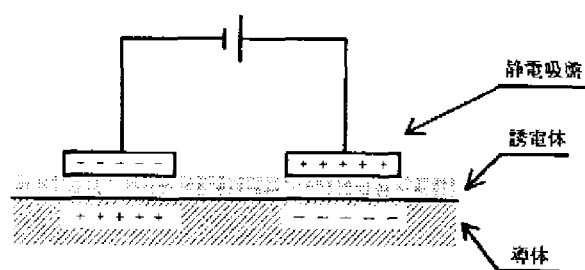


Fig. 2 静電吸盤を構成する回路

吸着力 4.46[N]

引きはがし加速度 $6.37[m \cdot s^{-2}] = 0.65[G]$

以上のことから宇宙ステーション上に想定される程度の外乱加速度ではロボットが外壁から離れることはないことがわかる。

2.4 ミッションの概要

2.4.1 運用の手順

このロボット・ミッションの手順は以下の通りである。

- (1) 衛星の場合、打ち上げ時に搭載する。このときはロンチロックが必要である。
- (1') 宇宙ステーションの場合、ロボットアーム、もしくは有人船外活動により外壁表面に設置する。
- (2) 表面上を自律的に移動し、CCDカメラとレーザマイクロ스코プで点検を行う。
- (3) 情報を衛星もしくは宇宙ステーションに送信する。直接地上に送る必要がないため、アンテナ出力は小さくてよい。

2.4.2 移動シーケンス

このロボットが直進するシーケンスをFig.3に示す。静電気力を使うため、常に2つの吸盤で吸着した状態で残りの足を移動し、尺取虫のように一步一步ゆっくり歩く。スペースウォームという名前は、この歩行に由来する。

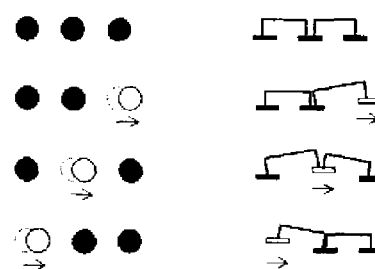


Fig. 3 スペースウォームの移動シーケンス

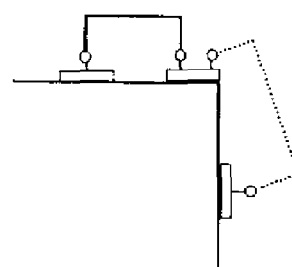


Fig. 4 面を移る場合の移動シーケンス

また、Fig.4のように面から面へ移動することも可能である。

2.4.3 予想される成果

このロボットに取り付けられたCCDカメラ、およびレーザマイクロ스코プから得られる画像は、以下のFig.5のようなものであると予想される。

衛星の場合、太陽電池パドル、アンテナ等の展開の様子がモニターでき、信頼性向上に貢献する。また、マイクロデブリによるマイクロクレータ等に関する知見が得られる。

3. The Antlion (ありじごく型惑星掘削ロボット)

第5回アイデア大賞(1997)

by 工藤 拓, 小田 光範, 黒須 明英

3.1 目的

月・惑星表面を探索しサンプルを採集することとは、その天体の地質、あるいは資源化の可能性を探るための重要な手段である。しかし、表面を

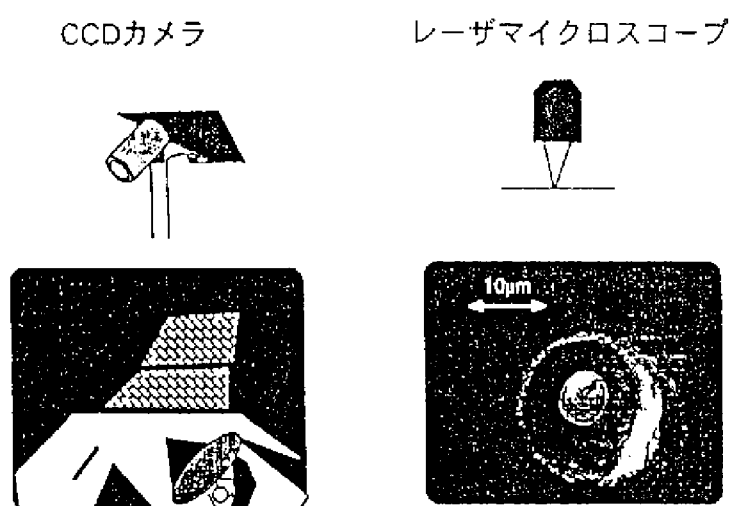


Fig. 5 CCDカメラおよびレーザマイクロスコブからの映像（予想図）

探るだけでなく、穴を掘って下層の情報を得ることは天体内部構造を知り、誕生プロセスや有用鉱物の存在を解明するためにより重要であると言われている。遠い宇宙の月や惑星上では、ボーリングのような大がかりな掘削方式を用いることは困難であり、そのために簡単な方式で効率よく下層の情報を得ることのできる新しい手法による掘削探査が強く求められている。

ここでは新しい掘削方法のアイデアとして「ありじごく型ロボット」を提案する。例えば「月の海」と呼ばれる部分は厚さ約10mのレゴリスが堆積し、その下に固い岩盤があると考えられている。ここで提案するロボットはこのようなレゴリス層を最下層まで掘り進み岩盤に到達し、さらにペネトレータ型弾丸によって岩盤サンプルを採集することを目的とする。

3.2 ロボットの概略

提案する「ありじごく型ロボット」の概略をFig.8に示す。また、基本的な仕様はTable 2に示すとおりである。

このロボットは表面に切刃のついた下向きの円錐台形状をしており、内部の振動子を往復運動さ

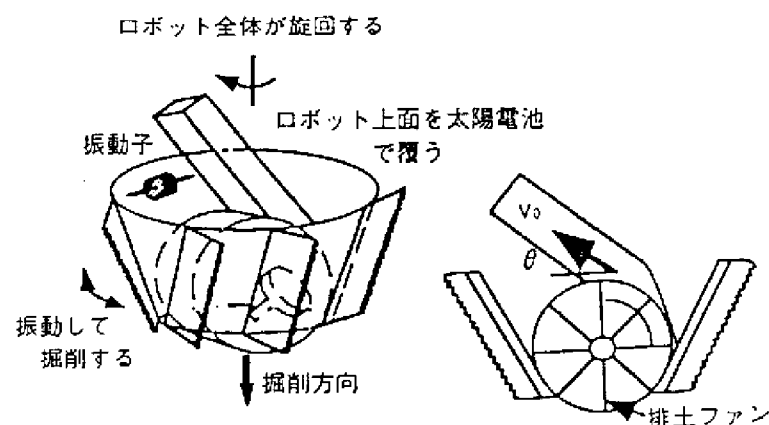


Fig. 6 ありじごく型ロボットの概略図

せることによりロボット全体が振動し、レゴリスを削る。切刃の隙間を通してロボットの下に集まったレゴリスは、排土ファンによって上方へ投げ出される。排土ファンの投げ角 θ と投げ出し速度 v_0 をコントロールすることにより、レゴリスは穴の外に排出される。切刃の摩擦力の違いにより、ロボット全体はゆっくりと旋回しつつ穴を掘り進んでいくので排出されたレゴリスは穴の周りにドーナツ状に積み上げられていく。また掘削地点までローバーによって運搬されることを考えて、ロボット全体の質量は10[kg]程度の軽量化を目指す。

Table 2 ロボットの仕様

全長	ϕ 50[cm]×30[cm]
質量	10[kg]
電源	太陽電池（最大 120[V],0.2[A],24[W]）
消費電力	最大 15[W] 程度

3.3 ロボットの詳細

3.3.1 掘削と排土

提案する「ありじごく型ロボット」は月・惑星のレゴリス層に円錐形の穴を掘削する。土砂傾面の傾斜角は安息角と呼ばれ、重力によらずに土砂の特性（比重、摩擦力、凝集力）に依存する。ここでは、レゴリスの安息角 ϕ を35度と仮定する。図2のように座標系を設定し、レゴリスの投げ出

し初速度を v_0 、時間を t 、重力加速度を g とすると、高さ h 、距離 a のところに到達させるための v_0 と θ は、

$$v_0 = \sqrt{hg + g\sqrt{h^2 + a^2}} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left\{\frac{1}{a}(h + \sqrt{h^2 + a^2})\right\} \quad (2)$$

となる。

次に、微小体積を V_y のレゴリスを初速度 v_0 で高さ h 、距離 a まで排出するためのエネルギー E を求める。レゴリスの密度を ρ とすると、

$$E = \frac{\pi}{8 \tan^2 \phi} \left(1 + \frac{\sec \psi}{\tan \psi}\right) \rho g h^4 \quad (3)$$

となる。いま掘削時間 T はレゴリスの排出エネルギーによって律速されたとすると、体積 V のレゴリスを排出するエネルギー E を排土用モータの瞬時電力 Q で割ることにより全掘削時間 T が求められる。

$$T = \frac{E}{Q} \quad (4)$$

では次に、実際掘削するのにどの程度のエネルギーと時間が必要なのか、具体的に計算してみる。いま月面レゴリス層に深さ 10[m] の穴を掘る場合を想定し、各パラメータを以下のように仮定する。

- レゴリス層の厚さ: $h = 10$ [m]
- レゴリス層の密度: $\rho = 2000$ [kg/m³]
- 安息角: $\phi = 35$ [deg.]
- レゴリス投出し距離: $a = 20$ [m]
- 月面上の重力加速度: $g = 1.6$ [m/s²]
- モータの電力: $Q = 10$ [W]

排出エネルギー E 、掘削時間 T は、

$$E = 8.3 \times 10^7 [J] \quad (5)$$

$$T = 96 [days] \quad (6)$$

となる。

3.3.2 岩盤サンプルの採集

切刃先端が地下岩盤に到達すると、ロボットの振動だけではもはや掘り進むことはできない。そこで排土ファンを停止し、火薬によりプロジェクターを発射する。このプロジェクターの弾丸を中空のペネトレータカプセルとしておくことにより、弾丸内部にサンプルが詰め込まれる。また同時に岩盤表面が打ち砕かれることも期待できる。プロジェクタ発射後、再び排土モータを回転させることによりペネトレータカプセルを地表へ投げ上げる。カプセルにはサンプルを汚染しないような方法（例えば、特定の波長の電波、もしくは光に感應する素材）で目印をつけておけば、地表でのローバーによる回収が容易となる。

3.4 ミッション構成

提案する「ありじごく型ロボット」は小型、軽量となるよう設計することにより移動探索ローバーによって複数個搬送できるものとする。Fig.7 にミッション中の各状態を示す。

- (1) ローバーは走行探索の結果、興味深い地点に「ありじごく型ロボット」を設置する。
- (2) 「ありじごく型ロボット」は掘削を開始し、レゴリスを次々と投げ出していく。ローバーは掘削されたレゴリス下層のサンプルを回収する。
- (3) ロボットはレゴリスの最下層の岩盤へ到達する。ペネトレータカプセルを打ち込むことにより岩盤のサンプルを得る。
- (4) 岩盤のサンプルの入ったカプセルを排土ファンによって地上へ投げ出す。そしてローバーはカプセルについている目印を感知し回収する。
- (5) ローバーと「ありじごく型ロボット」を組み合わせ (1)~(4) のような掘削、回収を複数

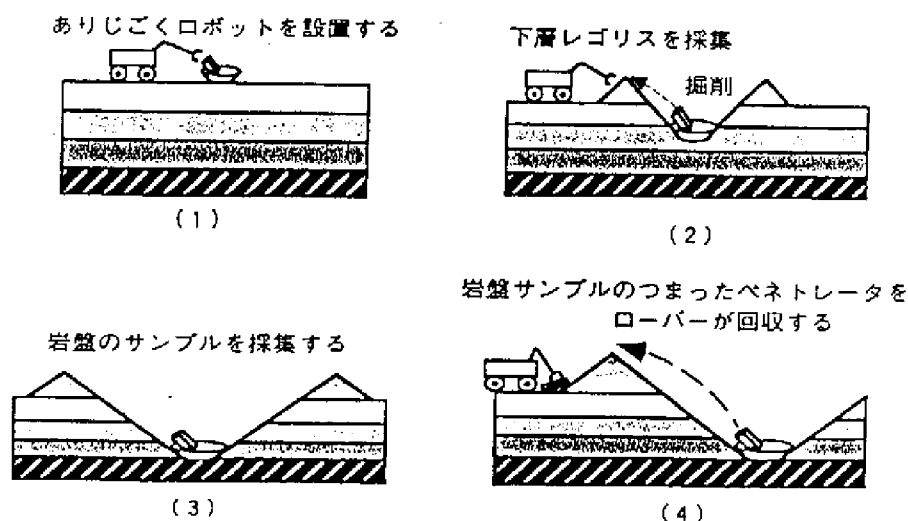


Fig. 7 ありじごく型ロボットによる月面の掘削探査

点で行うことにより、天体の地質構造に関して非常に多くの情報を得ることができる。

レーションにおいては、脚と地面との接触・摩擦のモデル化を重点的に考察する。

4. The Jumping Turtle (微小重力環境上を移動探査するロボット)

第6回アイデア大賞(1998)

by 浅井 央章, 久宮 美穂

4.1 目的

月、火星へと太陽系内天体の探査が広がっていく中で、小惑星や彗星、木星・土星の衛星などのような小さな天体への関心も高まりつつある。ここでは小惑星に代表される、重力の小さい小天体の表面を移動探査する小型ロボットの概念設計を行なう。

超小型の探査ロボットとして、JPLでは「NANOローバー」と呼ばれる車輪による移動ロボットを開発中であるが、重力の小さい天体上では、地面への接地力が小さくなり、車輪が生み出す接線方向の力が極めて小さくなるため、移動には適さない可能性がある。

そこで、本提案では単純化した脚機構を用いることにより、重力の大きさによらず確実に移動が可能なロボットを考え、微小重力環境下での挙動をシミュレーションにより明らかにする。シミュ

4.2 ロボットの構成

宇宙機には重量や大きさ、電力、ミッション要求、耐熱、耐宇宙放射線等、さまざまな厳しい制約条件が与えられる。現時点で想定される小惑星探査機(MUSES-C)の搭載能力を考え、ここでは大きさ10cm角程度、質量550g以下のロボットを考える。探査対象小惑星は日心距離1AU程度、重力加速度 $0.01m/s^2$ と仮定する。この条件をもとにして設計した移動探査ロボットの構成をFig.8, Table 3, 4に示す。

このロボットは四角錐形をしており、底面の各頂点付近に回転式の脚が取り付けられている。この4脚の回転に伴う地面への反力を利用して推進する。1G環境では4足歩行ロボットとして移動し、微小重力環境では跳ねるように飛び上がって移動することができる。また四角錐の頂角にはアンテナを兼ねた起き上がり用の腕が一本伸びており、どんな姿勢で着地してもこの腕を回すことで、ちょうどカメが首を使って起き上がるようにして、姿勢を元に戻すことができる。

脚の回転の方向や回転速度、4脚の位相を制御することで最適な移動方向や移動距離を実現していく。

ここではカメラによって画像を得ることを探査ミッションの主目的と仮定するが、X線マイクロ

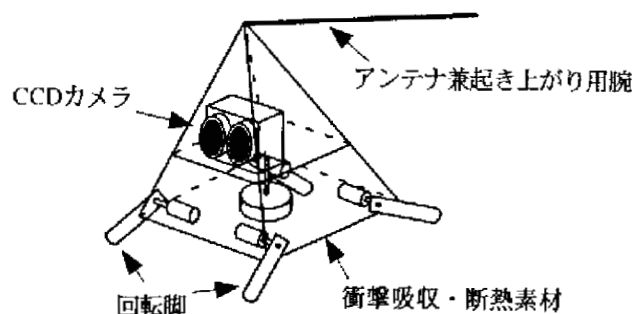


Fig. 8 ロボットの概略図

アナライザ等のミッション機器を搭載することもあるであろう。カメラによる全周の撮影を可能とするために、四角錐の上部は脚の取り付けられた下部とは別に、1軸周りに回転できるように設計する。この回転は上述のように転倒時の姿勢復帰動作においても使用する。

4.3 機能

4.3.1 歩行・跳躍

この探査ロボットは4脚の回転速度、回転の位相を制御することで対象天体の表面を蹴り、目的に応じた距離を跳躍するように移動する (Fig.9)。

4.3.2 姿勢復帰

四角錐の側面で接地している場合には、頂角に取り付けられている腕を回すことで、姿勢を復帰させることができる (Fig.10)。

4.4 駆動の力学

Fig.11 に示す力学モデルを考える。

ロボットの質量を m 、脚の長さを L とし、また対象天体の重力加速度を g と仮定する。

脚に、歩行のためのトルク τ を加えるとき、 τ によって脚が面を蹴る力 F の大きさは

$$F = \tau / L$$

である。

Table 3: 小惑星探査マイクロローバーの仕様

寸法	120[mm]×120[mm]×90[mm]
質量	533[g]
電源	太陽電池 (有効面積 324[cm ²])
消費電力	最大 2880[mW] 程度

Table 4: 重量の内訳

要素名	コンポーネント名	重量 [g]
構造・機構系	構造部材, 緩衝材等	158
	脚	4
	モータ・ギア	49
	エンコーダ	25
	モータ制御回路	50
制御系	システム制御装置	60
	太陽センサ	10
	温度センサ	1
	ハーネス	35
電力系	太陽電池パネル	20
	太陽電池制御回路	10
通信系	通信機	50
	アンテナ	1
観測系	CCD カメラ	30
	重力センサ	30
合計		533

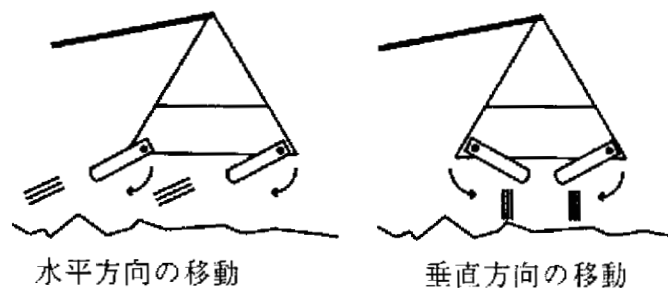


Fig. 9 ロボットの移動

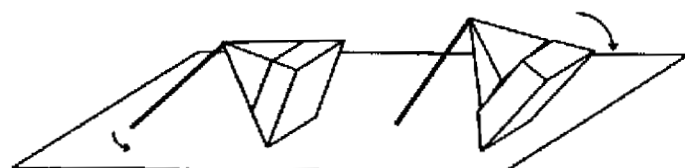


Fig. 10 姿勢復帰動作

脚が面から受ける垂直抗力の大きさは、ロボットに働く重力 mg と F の垂直成分との合力に等しいので

$$N = mg + F \cos \theta$$

となる。

水平方向の推進力 T は摩擦力によって生じる。したがって、接触点があが地面に対して滑っていない場合には

$$T = F \sin \theta$$

が成り立ち、 T が最大静止摩擦力を超え接触点があが地面に対して滑り出した場合には、脚と面との間の摩擦係数を μ として

$$T = \mu(mg + F \cos \theta)$$

となる。

この式は、仮に重力がゼロであったとしても水平方向の推進力 T はゼロにはならないことを示している。一般に車輪による水平方向の推進力は、最大でも μmg であり、 $g = 0$ のときにはゼロになってしまい、移動できない。これが、ここに提案する回転脚と車輪との大きく異なる点である。

4.5 接触・摩擦のモデル化

跳躍のシミュレーションを行うために、脚と地面との接触・摩擦を次のようにモデル化した。

地面を剛性 K_w 、粘性 D_w を持つばね・ダンパ系と仮定する。接触点の位置を (x, y, z) とする。ここで x 軸 y 軸を地面の接線方向とし、 z 軸を法線方向とする。摩擦係数を μ とすると地面からの反力 F は次式となる。

$$\begin{aligned} F_z &= \begin{cases} -K_w z - D_w \dot{z} & (\dot{z} < 0) \\ -K_w z & (\dot{z} \geq 0) \end{cases} \\ F_x &= -\text{sign}(\dot{x}) \mu F_z \\ F_y &= -\text{sign}(\dot{y}) \mu F_z \end{aligned}$$

ここで摩擦力 F_x, F_y は接触点の接線速度を減少させる向きに作用する。しかし数値計算上、逆方

向の接線速度を与えてしまうほど大きな摩擦力が計算される場合がある。そこでそのような不自然な摩擦力を生じない収束計算アルゴリズムを組む。

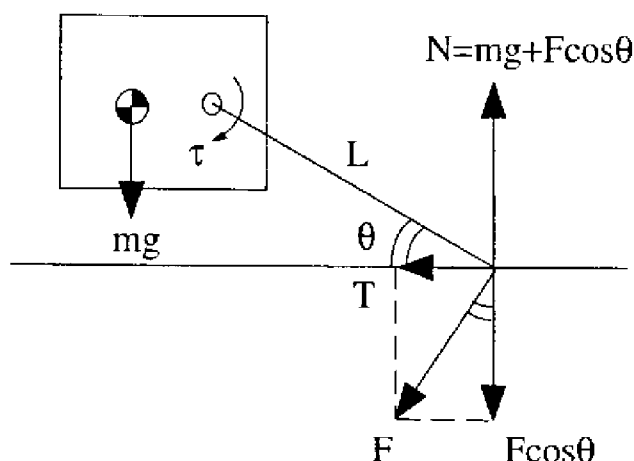


Fig. 11 駆動の力学

4.6 跳躍のシミュレーション

重力加速度 $0.01m/s^2$ における設計したロボットの跳躍のシミュレーションを行なった。ここではすべての脚を同方向に回転させるが、本体の姿勢変動を抑えるために後脚の回転トルクを前脚の 9.5 倍としている。摩擦係数を変化させた時の本体の重心の移動軌跡は Fig.12 に示される。

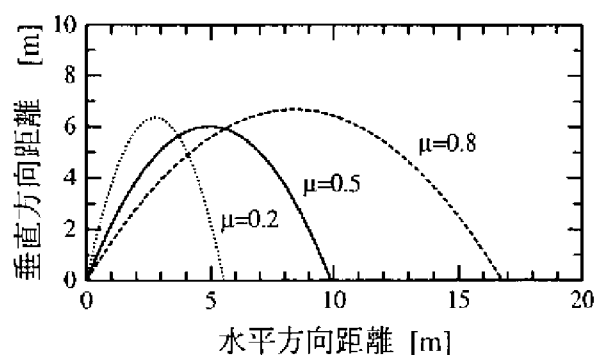


Fig. 12 本体の重心の移動軌跡

本提案では重力の大きさによらず惑星表面上を移動探査できるロボットの概念設計を行なった。その機構・構成は極めて簡単であり、実現可能性が非常に高い。

また、地面との接触における摩擦力のモデル化

を行ない、設計したロボットの微小重力環境下でのミッション遂行能力を確認した。

5. あとがき

衛星設計コンテストの回を重ねるうちに、いつも賞を分け合う常連校が定着してきた。東大、東工大、北大、九大、そして東北大である。これら5校と、衛星開発と打ち上げの実力をもつアメリカの5大学との間で、1998年11月、日米合同のワークショップが開催され、共同プロジェクトが発足した³⁾。

独力で衛星を開発し、打ち上げるだけの経験と総合力をもつ大学は日本には無い。しかし、アメリカやイギリスでは衛星開発能力をもつ著名大学が、いくつか知られている。そしていま、衛星設計コンテストを核として、国際共同へとつながりが拡がりつつある。

東北大学の航空宇宙工学専攻が、衛星や宇宙ロボットの開発能力をもつ大学の一つとして認知されるだけの実力を蓄えるべく、日々努力を続けてゆきたい。

参考文献

- 1) 鯨衛星 宇宙開発に生き残る日本の戦略，対談：林友直，立花隆，中央公論，1999-1月号，pp.168-188, 1999.
- 2) 衛星設計コンテスト実行委員会：衛星設計コンテスト技術資料（改定版）1997.
- 3) 八坂：大学衛星日米共同プロジェクト，日本航空宇宙学会誌，Vol.47, No.543, pp.56-59, 1999.