

2002年12月3日@筑波大学

車輪と地面の相互作用を考慮した 不整地走行ローバーの走行力学と ダイナミクスシミュレーション

*Motion Dynamics of Exploration Rovers:
Modeling of Tire-Soil Mechanics
and
Its Application to Numerical Simulation
and Traction Control*

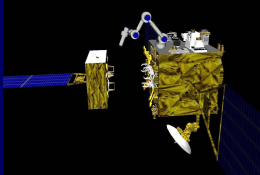
東北大学大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻 助教授
吉田 和哉

講演概要

- 研究の背景
 - ◆ 宇宙ロボットの研究
 - ◆ ローバーの研究
- ローバーの動力学定式化
 - ◆ 多節剛体系のモデリング
 - ◆ 動力学シミュレータ (*The SpaceDyn*)
- 車輪と地面の力学
 - ◆ すべり, 応力, 沈下, 駆動力
 - ◆ 実験によるパラメータ同定
- 制御への応用
 - ◆ すべり制御 (最大駆動力, 最大効率)
 - ◆ すべりのオンライン計測

The Space Robotics Lab.
Dept. of Aeronautics & Space Engineering
Tohoku University
JAPAN
(東北大学 大学院 航空宇宙工学専攻)

Free-Flying Space Robot



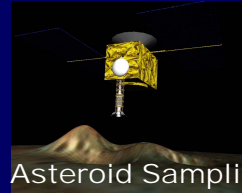
Robotic Systems on ISS



The SPACE
ROBOTICS
Lab.



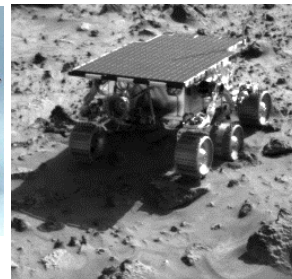
Planetary Exploration Rovers



Asteroid Sampling

月・惑星探査ローバーの研究

- ムーンバギー
Apollo 15 (July 1971)
~ Apollo 17 (Dec. 1972)
- Sojourner ローバー
Mars Path Finder ミッション
(1997)
- SELENE-B 計画
月面探査ローバー
2007年打上げ
日本



© NASA

月探査

これまでの主な月探査ミッション

アメリカ

- ・Apollo計画(1960~70年代)
- ・Clementine / ルナプロスペクター(1990年代)

旧ソ連

- ・ルナ計画(1960~70年代)

日本の月探査

- ・LUNAR-A(2003年予定)
- ・SELENE計画(2004年予定)
- ・SELENE-B(2007年予定)

ローバーによる移動探査を検討



Apollo 17



LUNAR-A計画

Potential Mission Requirements for SELENE-B

- ・ Unmanned mission
- ・ Autonomous landing
- ・ Scientific exploration of a central region of a crater



- Max. 30 deg in slope inclination
- High density of rocks



Schematic cross section of a lunar crater

月探査ローバーの技術課題

- LanderからRoverを降ろす
- 走破性能(登坂能力・移動距離)
- 航法誘導制御(遠隔操縦・自律行動)
- 月面環境適応技術(熱制御・防塵対策)
- サンプル採集, 観測支援
- サンプルレゴリスの除去, サンプル研磨
- 通信(Rover-Lander)
- 電力
- 熱(低温-170 ~ 高温+130)

© NASA

© NASA

月・惑星探査ローバーの基礎研究



1997

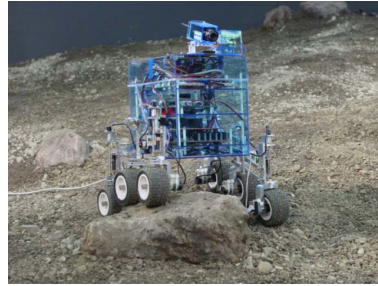


1999

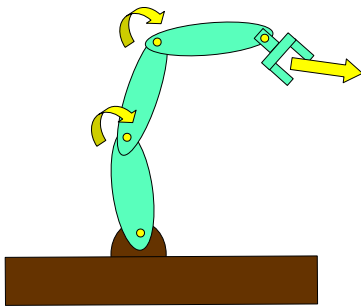
2002

Rover Testbed I

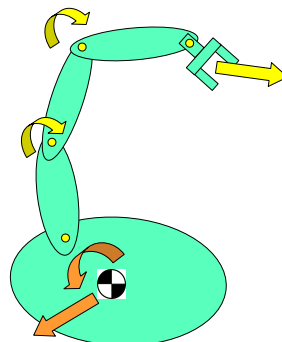
- Uses the Rocker-Bogie type passive suspension
- Independent 6-wheel drive
- Rubber tire from a toy shop, with a diameter of 90 mm
- Dimension in millimeters: 345(l) x 385(w) x 375(h)
- Weighs about 6 kg
- On-board processors for PWM drive of DC motors
- Wired/wireless ethernet communication with a host computer



フリーフライング宇宙ロボットのモデル化



地上固定マニピュレータ



宇宙マニピュレータ

小惑星への
タッチダウン

=

フリーフライングロボット
+
接触力学

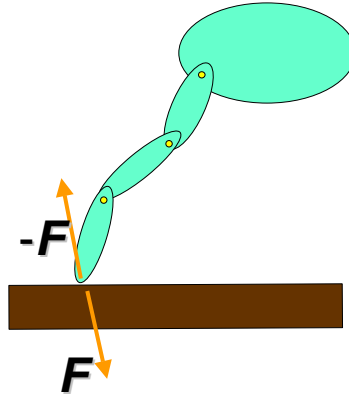
接触 / 衝突問題の取り扱い

- 変形力学モデル

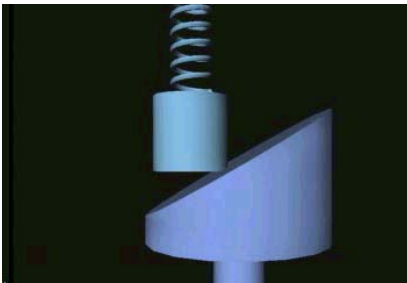
$$H\ddot{\phi} + c = \tau + J^T F$$

- インパルス(力積)モデル

$$H\Delta\dot{\phi} = J^T F \Delta t$$



接触表面での変形力のモデル化



δ : 微小変形量

圧縮応力 (法線方向)

$$F_n = k_n (\delta_n)^s + d_n (\dot{\delta}_n)^t$$

せん断応力 (Stick)

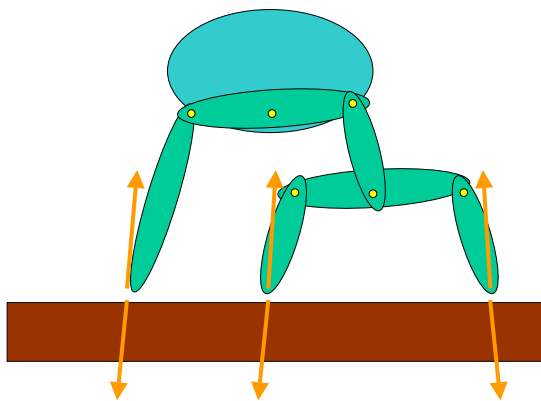
$$F_t = k_t (\delta_t)^s + d_t (\dot{\delta}_t)^t$$

“Stick” and “Slip”
(接線方向)

動(クーロン)摩擦 (Slip)

$$F_t = \mu F_n$$

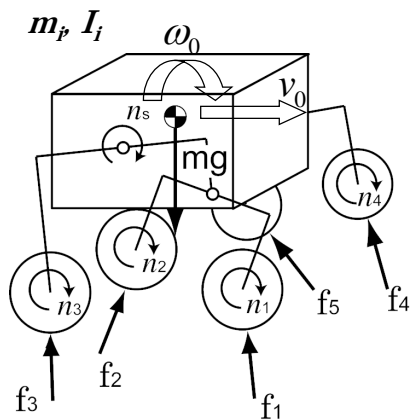
ローバー = 移動ベースをもった
多節リンク系
+ 多点接触, 重力あり



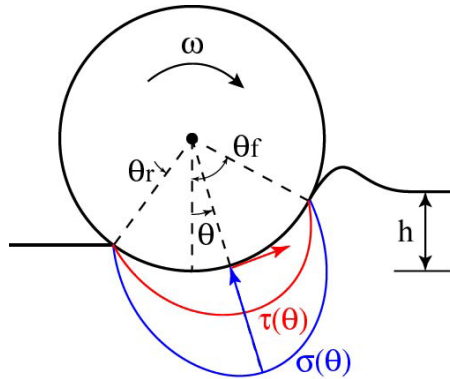
ローバー = 移動ベースをもった
多節リンク系
+ 多点接触, 重力あり

運動方程式

$$H \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{\omega}_0 \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + C = \begin{bmatrix} F_0 \\ N_0 \\ n_w \\ n_s \end{bmatrix} + J^T \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_6 \end{bmatrix}$$



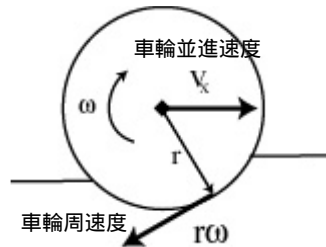
ローバー = 移動ベースをもった
多節リンク系
+ 多点接触, 重力あり



すべり率

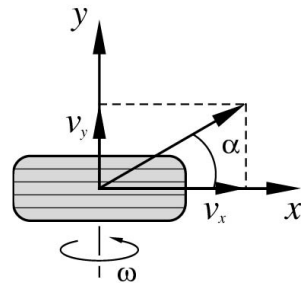
すべり率(進行方向)

$$S_x = \begin{cases} \frac{r\omega - v_x}{r\omega} & (r\omega > v_x) \text{ 駆動状態} \\ \frac{r\omega}{r\omega - v_x} & (r\omega < v_x) \text{ 制動状態} \end{cases}$$



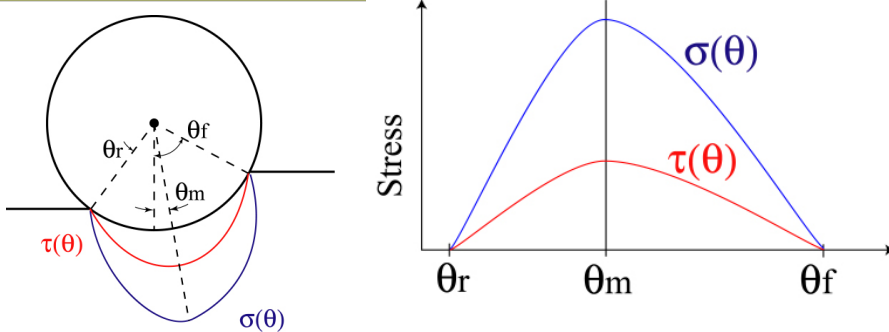
横すべり率(進行方向)

$$S_y = \begin{cases} |\tan \alpha| & (r\omega > v_x) \\ (1 - |s_x|) |\tan \alpha| & (r\omega < v_x) \end{cases}$$



剛性車輪下の軟弱地盤の応力分布

垂直応力 せん断応力分布



の関数として表現可能

$$\sigma = f(\theta) \quad \tau = g(\theta)$$

土と車輪の間の作用力

(Bekker 1956)

水平反力 = Drawbar Pull

$$DP = \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \sigma(\theta) \cos \theta + \tau(\theta) \sin \theta \} d\theta$$

垂直反力

垂直荷重

$$F = \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau(\theta) \cos \theta + \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta = W$$

回転反力

車輪駆動トルク

$$T = \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau(\theta) \} d\theta = N$$

(等速運動時)

仕事率

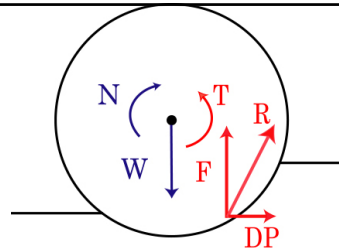
$$P = DP \cdot v_x = DP \cdot R\omega(1 - S)$$

σ : 垂直応力

τ : せん断応力

θ_f : 車輪入射角

θ_r : 車輪離脱角



垂直応力-せん断応力関係

軟弱地盤

$$\tau(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) \left(1 - e^{-j(S, \theta) / k} \right)$$

$$j(S) = r[\theta_f - \theta - (1 - S)(\sin \theta_f - \sin \theta)]$$

c : 土の粘着力

(1961 Janosi, Hamamoto)

ϕ : 内部摩擦角

k : Shear Displacement

r : 車輪半径

r	: $e = 0$ (最大せん断力)
k	: $e = 1$ (せん断力 0)

S, k を変数とした回転反力の変化

$c = 0.005$ [N/m²]

$\phi = 30$ [deg]

$\theta_f = 35$ [deg]

$\theta_r = -5$ [deg]

$r = 0.045$ [m]

$b = 0.03$ [m]

c : soil cohesion stress

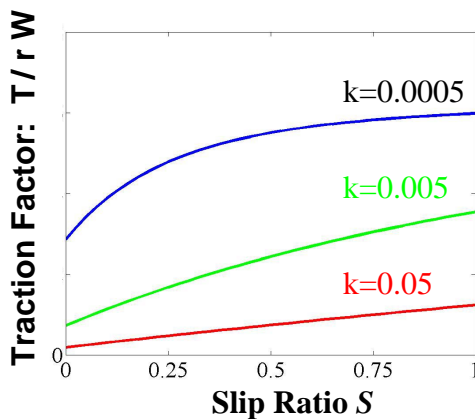
ϕ : internal friction angle

k : share displacement

r : tire radius

b : tire width

k : share displacement



6輪ローバーによる実験同定

Experimental Identification

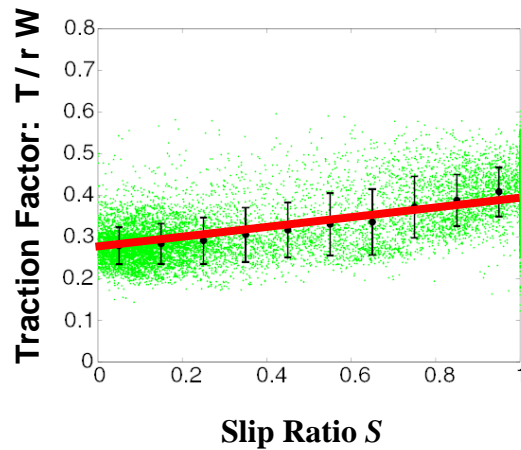
Given

$c = 0.005$ [N/m²]
= 30 [deg]
 $r = 0.045$ [m]
 $b = 0.03$ [m]

Identified

$f = 35$ [deg]
 $r = -5$ [deg]
 $k = 0.05$ [m]

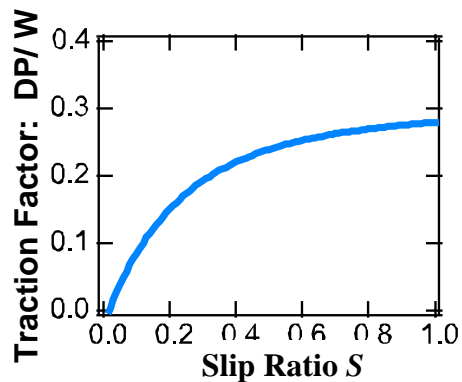
(Yoshida, Hamano, ICRA2002)



DPの推定

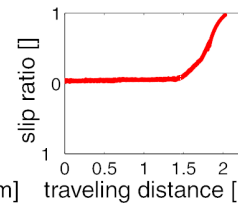
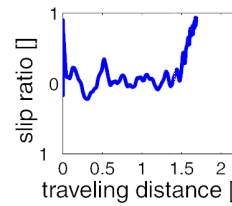
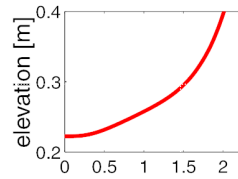
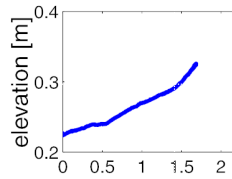
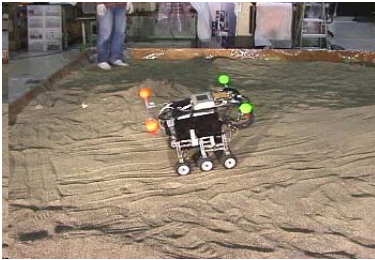
Infeered model for DP
(Net traction force)

$c = 0.005$ [N/m²]
= 30 [deg]
 $f = 35$ [deg]
 $r = -5$ [deg]
 $r = 0.045$ [m]
 $b = 0.03$ [m]
 $k = 0.05$ [m]



Simulation v.s. Experiment

- Verification by comparison with experiments



traveling distance [m]

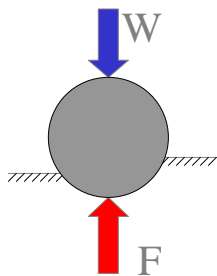
traveling distance [m]

Experiment

Simulation

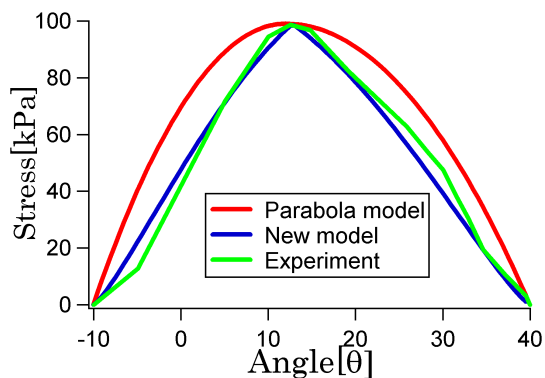
車輪-土壌モデルの細密化

垂直応力分布のモデル



垂直荷重: W	9280 [N]
垂直反力: F (New model)	9270 [N]
垂直反力: F (Parabola model)	11620 [N]

実験結果との照合



Wongの実験結果を利用

車輪入射角・離脱角のモデル化

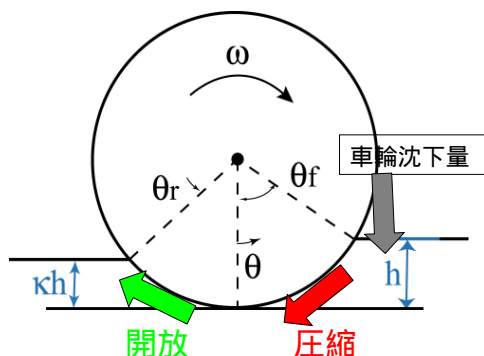
入射角

$$\theta_f = \cos^{-1}\left(1 - \frac{h}{r}\right)$$

離脱角

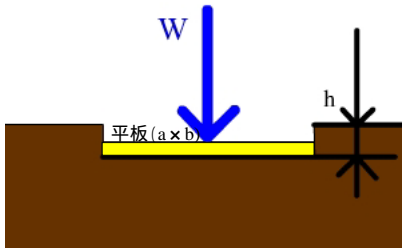
$$\theta_r = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\kappa h}{r}\right)$$

κ : 離脱定数



入射角, 離脱角は, 沈下量 h を用いて表すことができる

静的沈下量



Bekkerの载荷重 沈下量の式

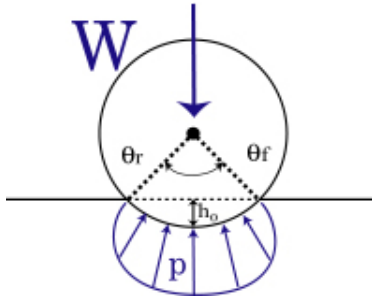
$$W/ab = p = (k_c/b + k_\phi)h^n$$

b : 平板の幅

k_c : 土の変形定数 (粘着成分)

k_ϕ : 土の変形定数 (摩擦成分)

n : 土の変形指数



$$W = \int_0^{h_0} p(h)dh$$

静的沈下量 h_0 の算出

動的な効果を含めた沈下量

すべり沈下現象

最大沈下量

$$h_{\max} = -c_0 S + h_0$$

c_0 : 滑り沈下定数

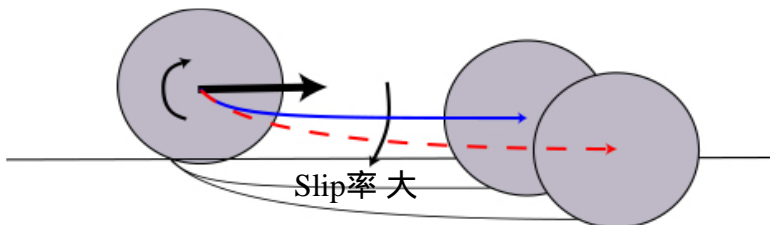
沈下速度 (1973 伊藤)

$$\frac{dh}{dt} = c_1 (h_{\max} - h)$$

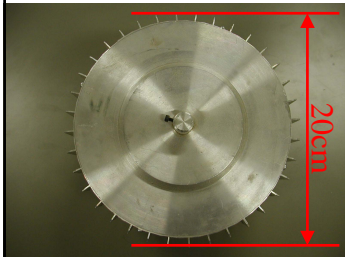
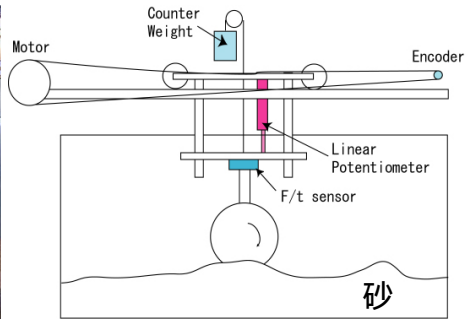
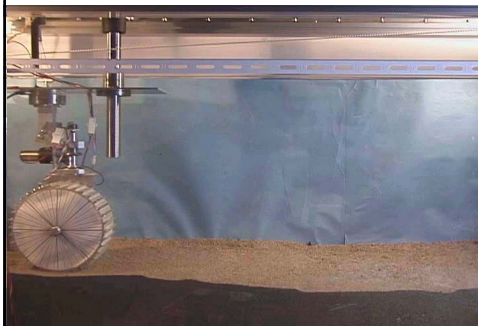
c_1 : 沈下時定数

沈下量

$$h = h_0 + \int c_1 (h_{\max} - h) dt$$

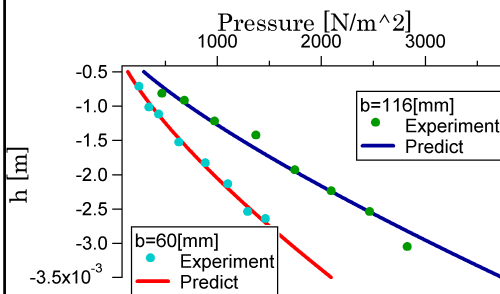


車輪-土壌力学計測装置



駆動力 垂直荷重	6軸力覚センサ
沈下量	直動ポテンショメータ
搬送	ベルトコンベア方式
砂	乾いた川砂

土壌パラメータ(静的沈下量)



Bekkerの載荷重 沈下量の式

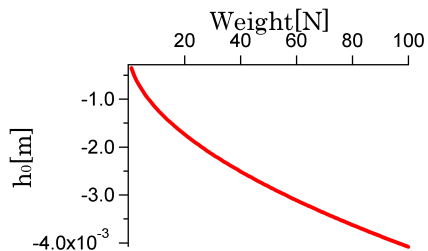
$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) h^n$$

$$k_c = 84200 \text{ [N/m}^{n+1}\text{]}$$

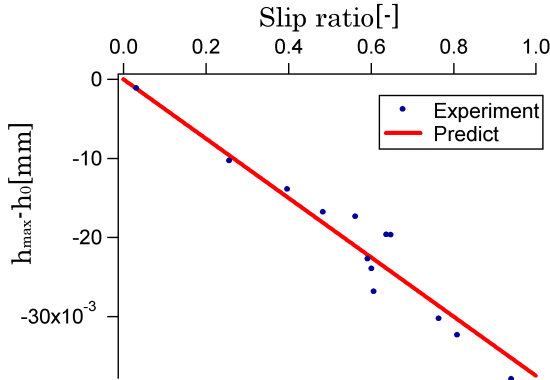
$$k_\phi = 4580000 \text{ [N/m}^{n+1}\text{]}$$

$$n = 1.38$$

R=0.10[m]の車輪を
この土壌においた場合
の静的沈下量



すべり率と最大沈下量

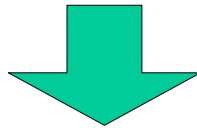


最大沈下量

$$h_{\max} - h_0 = -c_0 S$$

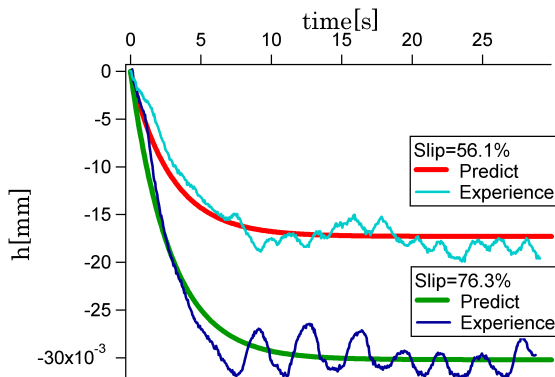
滑り沈下定数

$$c_0 = 0.0375$$



スリップ率 最大沈下量 線形

土壌パラメータ(沈下速度)



沈下速度

$$\frac{dh}{dt} = c_1 (h_{\max} - h)$$

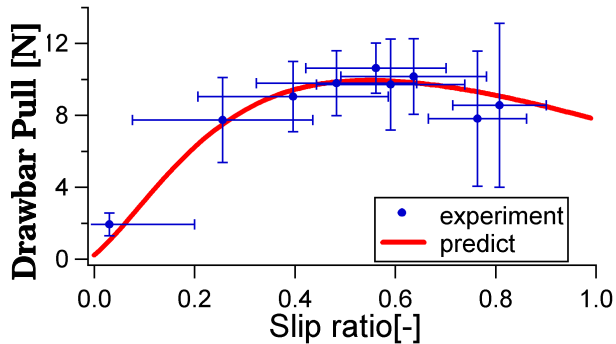
沈下時定数

$$c_1 = 0.25$$



滑り沈下による, 沈下速度は一次遅れ系で表現可能である.

駆動力 (実験値との比較)



$$W = 25.6 [N]$$

$$c \cong 0$$

$$\phi = 27 [\text{deg}]$$

$$k = 13 [mm]$$

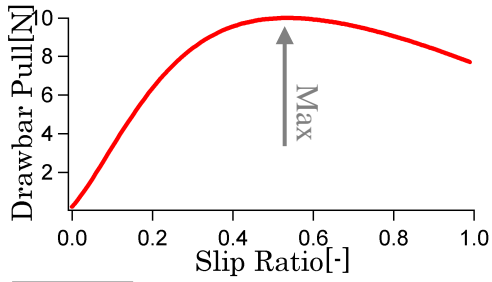
同定されたパラメータ

- 土壌パラメータ
せん断 / 垂直応力: c ,
静的沈下: kc, k, n ,
- 動的沈下
 $c_0, c_1, h(c_0, c_1, S), f, r$
- 車輪パラメータ
 r, b : Given, k : identified

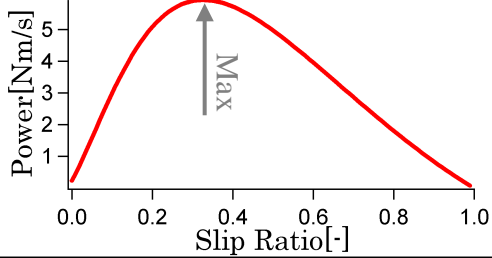
車輪駆動トルク N , 垂直荷重 W , すべり率 S を与えると, 車輪沈下量 h , 正味推進力 DP が求められる。

駆動力・仕事率

駆動力



仕事率



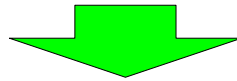
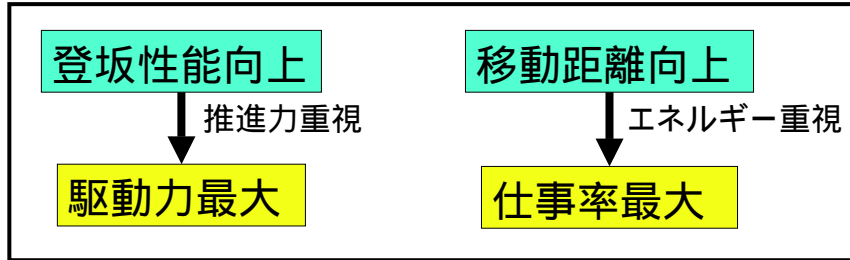
駆動力・仕事率は極値を持ち、最大を示すスリップ率が存在する。

制御法の提案

- 走破性向上のための戦略
- 制御法の提案
- ローバーテストベット



走破性向上のための戦略



目標スリップ率 S_d 決定

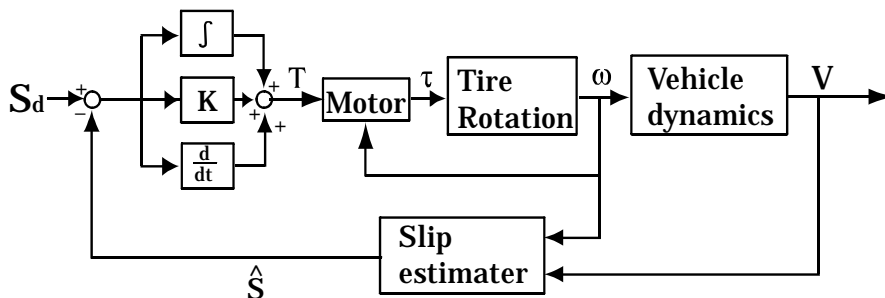
走行制御法の提案

目標スリップ率とローバーのスリップ率を一致させる。



滑り制御

$$T = k_p (S_d - S) + k_d \frac{d(S_d - S)}{dt} + k_i \int (S_d - S) dt$$



すべり率の計測

車体速度の計測

- 加速度計の積分
- GPSデータの微分
- モータ指令値-定常速度モデル
- Video Odometry

Experiment of Slip-Based Traction Control: Result



• *Without* Slip control



■ *With* Slip control

Rover Testbed II

