

SLIMの機体ピッチ角による着陸後の挙動制御に関する検討

中田孝幸, 錦織慎治, 外本伸治(九州大学), SLIM WGメンバー

目的

SLIM着陸直前におけるシーケンス

SLIMは着陸目標地点の上空において、一旦ホバリング状態に入り、その後メインスラスタをOffにして着陸することが想定されている

ホバリング(3m程度)

表面傾斜角の計測/推定
→ SLIM目標姿勢角の決定

転倒解析シミュレーション結果を利用

(落下中に)サブスラスタを用いて姿勢制御

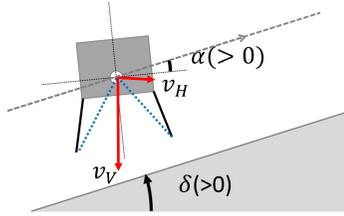
姿勢制御シミュレーション結果より

着陸



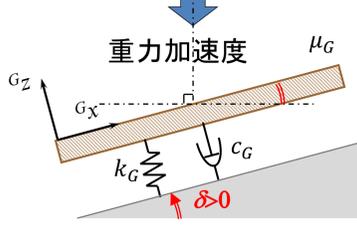
SLIMモデル及び月面モデル(転倒解析)

SLIMモデル



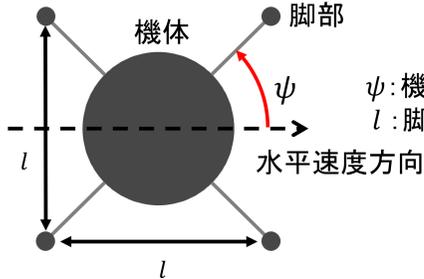
α : 機体ピッチ角
 δ : 月面傾斜角
 v_V : 垂直方向速度
 v_H : 水平方向速度

月面モデル



k_G : 月面弾性係数
 c_G : 月面粘性係数
 μ_G : 月面摩擦係数

SLIMモデル(上面図)



ψ : 機体ヨー角
 l : 脚間距離

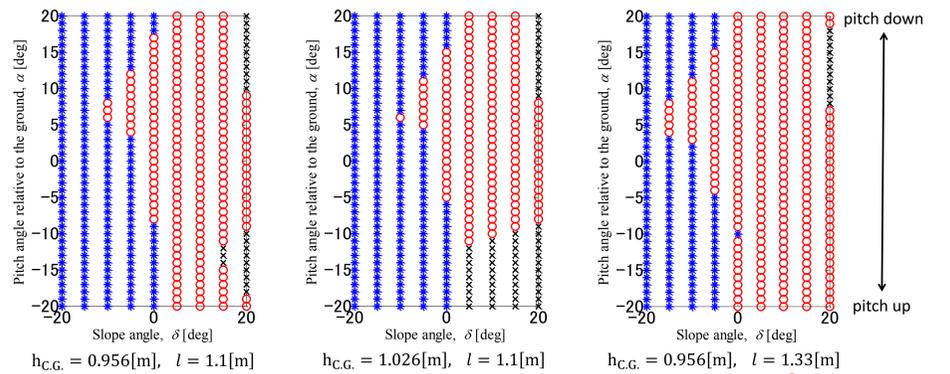
転倒解析シミュレーション

動力学解析ソフトを用いた転倒解析

機体ピッチ角と月面傾斜角をパラメータとして計算シミュレーション(二本脚着陸 $\psi = 45^\circ$ の場合)

シミュレーションにおける諸元

α	機体ピッチ角 [deg]	-20~20	I_G	慣性モーメント [kgm ²]	12.0
δ	月面傾斜角 [deg]	-20~20	k_G	月面弾性係数 [N/m]	0.0
g_m	月面重力加速度 [m/s ²]	1.63	c_G	月面粘性係数 [Ns/m]	10^4
v_H	水平方向速度 [m/s]	1.0	μ_G	月面摩擦係数	0.8
v_V	垂直方向速度 [m/s]	3.0	F_{leg}	脚部強度 [N]	1430
m	機体質量 [kg]	94			



機体ヨー角をパラメータとして計算シミュレーション

機体は慣性系に対して水平とし月面傾斜角と機体ヨー角をパラメータとする

シミュレーションにおける諸元

ψ	機体ヨー角 [deg]	0~45	I_G	慣性モーメント [kgm ²]	34.5
δ	月面傾斜角 [deg]	-20~20	l	脚間距離 [m]	1.266
g_m	月面重力加速度 [m/s ²]	1.63	k_G	月面弾性係数 [N/m]	0.0
v_H	水平方向速度 [m/s]	1.0	c_G	月面粘性係数 [Ns/m]	10^4
v_V	垂直方向速度 [m/s]	3.0	μ_G	月面摩擦係数	0.8
m	機体質量 [kg]	89.5	F_{leg}	脚部強度 [N]	1430

※ 機体ヨー角 $\psi = 0^\circ$ (一本脚着陸時)のとき $l = 1.790$ [m], $\psi = 45^\circ$ (二本脚着陸時)のとき $l = 1.266$ [m]

機体ヨー角 ψ [deg]	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
月面傾斜角 8[deg]	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
月面傾斜角 9[deg]	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
月面傾斜角 10[deg]	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

上記2つの計算例より

- 重心高さおよび重心と接地点のなす角が転倒リスクに大きく影響を及ぼす
- 二本脚or一本脚着陸で結果が異なることもある

姿勢制御シミュレーション

サブスラスタを用いた姿勢制御

姿勢制御系への制約として、

- サブスラスタの推力は小さい(20N)
- 着陸までの短い時間(約2秒)での姿勢変更が要求される
- 制御のサンプリング周期が固定(1/16秒)

さらに、以下の誤差への対応が必要となる

- 初期状態誤差(高度, 速度, 姿勢, 姿勢角速度, の誤差)
- スラスタの非線形性による制御トルクの誤差

(センサによる状態測定誤差は、小さい)

そこで

まず、open loop制御により、姿勢角/角速度を目標値に近傍へ次に、closed loop制御により、姿勢角/角速度を目標値に収束

【計算条件】

$I = 30$ [kgm²] $\tau_c = 14$ [N] $g_M = 1.62$ [m/s²] $h_H = 3.0$ [m]

- スラスタの挙動は理想的とする(非線形性は考えない)
- 目標姿勢角, 初期姿勢角速度誤差に対する open loop制御の結果を調べる(その後、closed loop制御により、誤差は小さくできる)

(1) $\theta_{target} - \theta_0 = 5$ [deg] のとき

	n_a	\bar{t}_a [s]	n_d	\bar{t}_d [s]	$\bar{t}_a + \bar{t}_d$ [s]	θ_{error} [deg]	$\dot{\theta}_{error}$ [deg/s]
$\dot{\theta}_0 = -3$	9	0.563	7	0.438	1.000	0.57	0.34
-2	8	0.500	7	0.438	0.938	-0.57	-0.33
-1	8	0.500	7	0.438	0.938	1.36	0.67
0	7	0.438	7	0.438	0.875	0.12	0.00
1	6	0.375	7	0.438	0.813	-1.23	-0.67
2	6	0.375	7	0.438	0.813	0.70	0.33
[deg/s] 3	5	0.315	7	0.438	0.750	-0.75	-0.34

(2) $\theta_{target} - \theta_0 = 10$ [deg] のとき

	n_a	\bar{t}_a [s]	n_d	\bar{t}_d [s]	$\bar{t}_a + \bar{t}_d$ [s]	θ_{error} [deg]	$\dot{\theta}_{error}$ [deg/s]
$\dot{\theta}_0 = -3$	12	0.750	10	0.625	1.375	0.90	0.34
-2	11	0.688	10	0.625	1.313	-0.24	-0.33
-1	10	0.625	10	0.625	1.250	1.36	0.68
0	10	0.625	10	0.625	1.250	0.44	0.00
1	9	0.563	10	0.625	1.188	-0.90	-0.67
2	9	0.563	10	0.625	1.188	1.03	0.33
[deg/s] 3	8	0.500	10	0.625	1.125	-0.34	-0.34

(3) $\theta_{target} - \theta_0 = 15$ [deg] のとき

	n_a	\bar{t}_a [s]	n_d	\bar{t}_d [s]	$\bar{t}_a + \bar{t}_d$ [s]	θ_{error} [deg]	$\dot{\theta}_{error}$ [deg/s]
$\dot{\theta}_0 = -3$	14	0.875	12	0.750	1.625	0.49	0.34
-2	13	0.813	12	0.750	1.563	-0.65	-0.33
-1	13	0.813	12	0.750	1.563	1.28	0.67
0	12	0.750	12	0.750	1.500	0.04	0.00
1	11	0.688	12	0.750	1.438	-1.31	-0.67
2	11	0.688	12	0.750	1.438	0.62	0.33
[deg/s] 3	10	0.625	12	0.750	1.375	-0.83	-0.34



ホバリング

Open loop 制御
Closed loop 制御

I : 慣性モーメント
 τ_c : (一定の)制御トルク
 g_M : 月の重力加速度
 h_H : ホバリング時の高度
 θ_{target} : 目標姿勢角
 t_s : 制御のサンプリング時間

Open loop制御で、姿勢角速度と姿勢角を目標値に一致させるには

$$\dot{\theta}_0 + at_a - at_d = 0$$

$$\left\{ (\dot{\theta}_0 + at_a) + \dot{\theta}_0 \right\} \frac{t_a}{2} + (\dot{\theta}_0 + at_a) \frac{t_d}{2} = \theta_{target} - \theta_0 \quad \left[\text{ここに } a = \tau_c / I \right]$$

$$t_a = \frac{-2a\dot{\theta}_0 + \sqrt{4a^2\dot{\theta}_0^2 + 2a^2\{2a(\theta_{target} - \theta_0) - \dot{\theta}_0^2\}}}{2a^2}, \quad t_d = t_a - \frac{\dot{\theta}_0}{a}$$

さらに、固定のサンプリング時間でOn-offするために

$$t_a \rightarrow \bar{t}_a = t_s \times n_{da} \rightarrow \bar{t}_d = t_s \times n_{dd} \quad (n_{da} \text{ と } n_{dd} \text{ は自然数})$$

とする

計算例より 3mの落下に要する時間は1.93秒であり、open loop制御後にclosed loop制御を行えば、15度程度の姿勢変更は可能