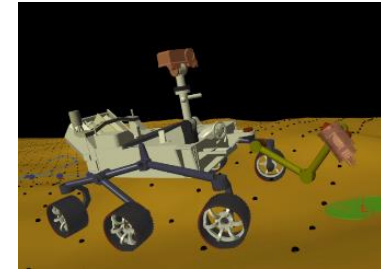


最新宇宙機システム設計セミナー

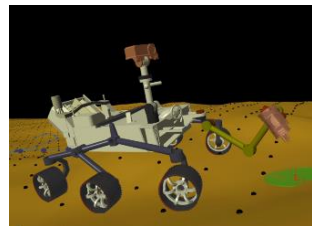
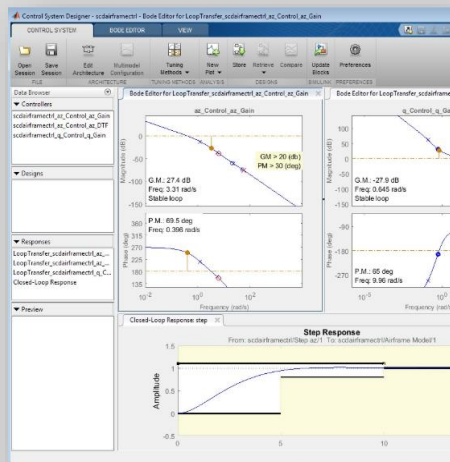
宇宙機システムのプラントモデリングと誘導制御系開発

MathWorks アプリケーションエンジニアリング部

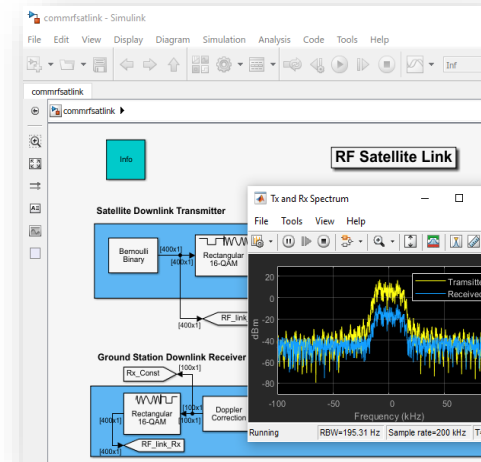


アプリケーション領域

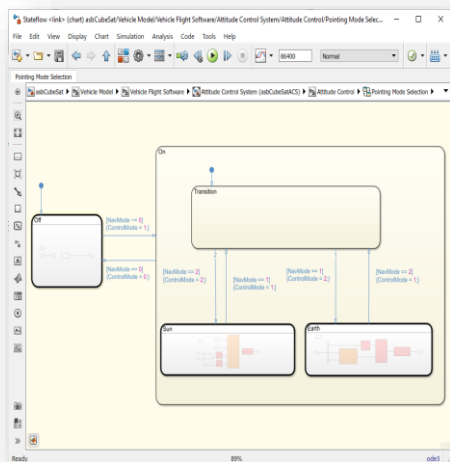
制御(GNC)



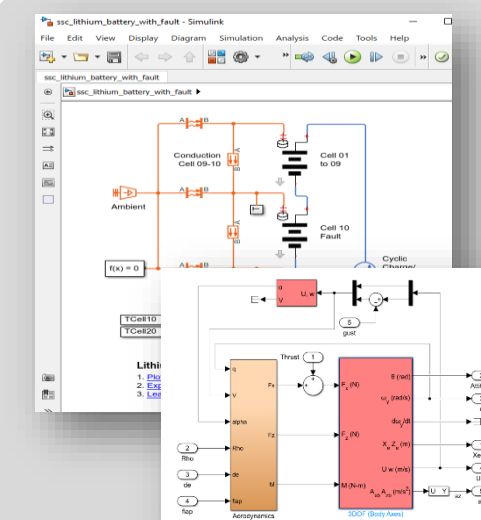
通信



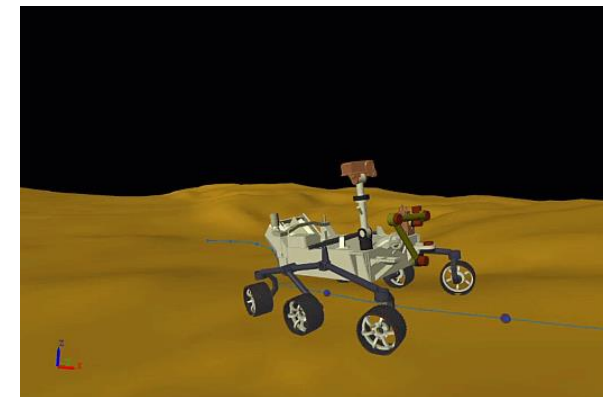
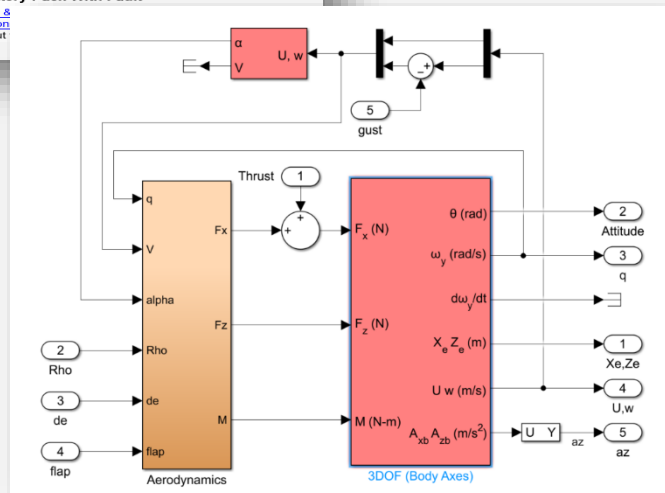
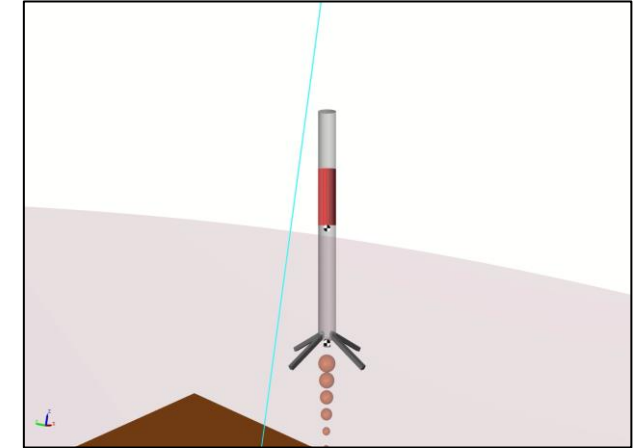
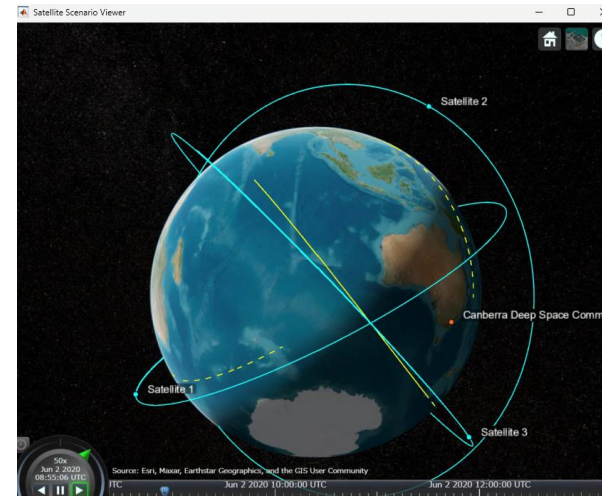
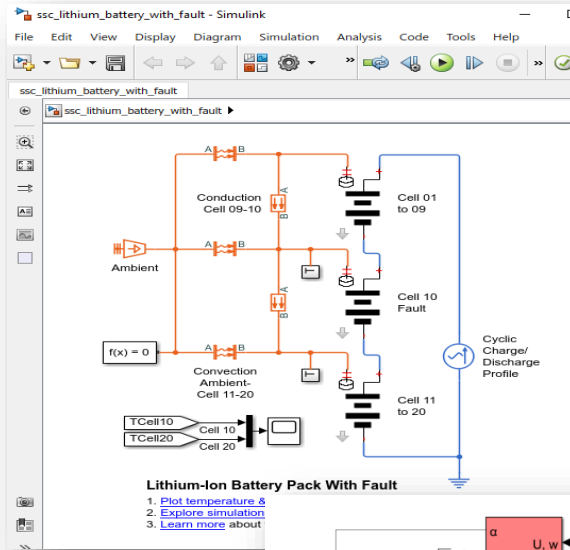
ミッション管理



プラントモデリング
&シミュレーション
解析

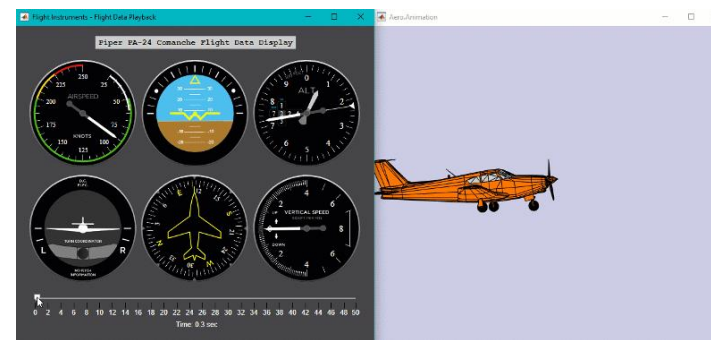
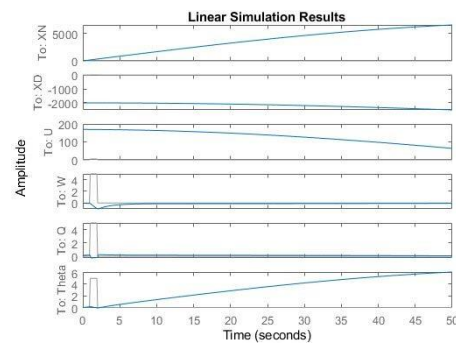


プラントモデリング & 解析シミュレーション

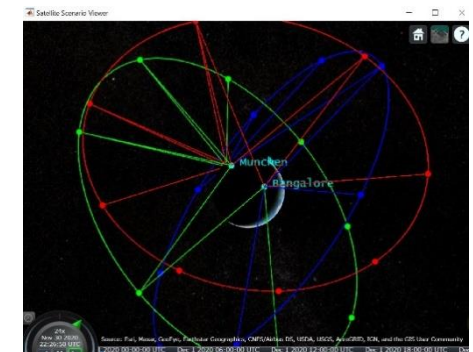
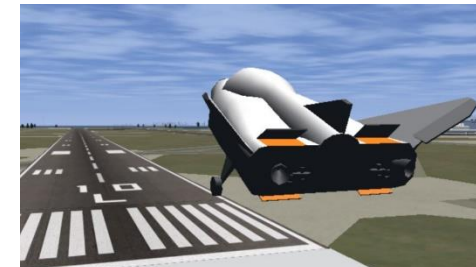
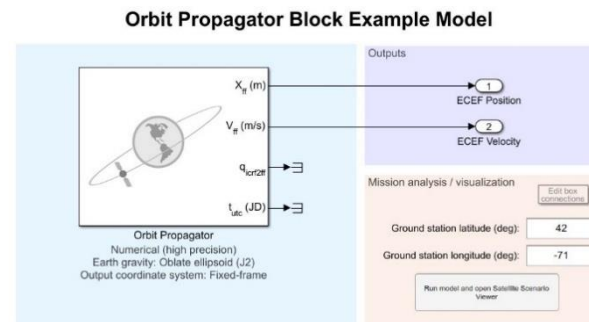
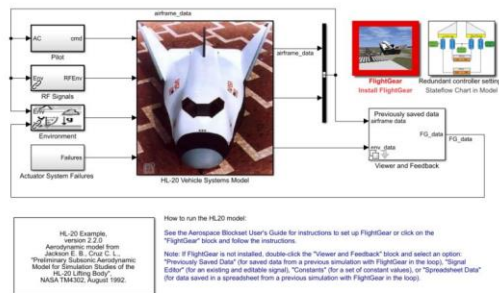


航空宇宙機のモデリング、解析に向けたソリューション

- Aerospace Toolbox**
航空宇宙機の運動を解析および可視化



- Aerospace Blockset**
航空宇宙機の高い忠実度のモデリングおよびシミュレーション



Aerospace Toolbox

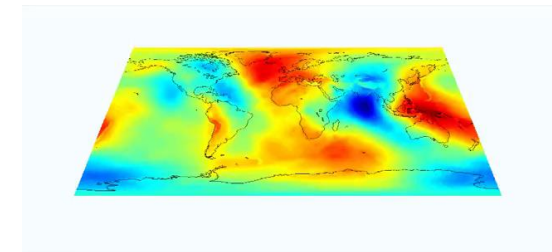
- What's included:

- 航空宇宙機の航法、環境の解析および計器パネル、フライトシミュレーター (Flight Gear※) を使用した飛行の可視化、衛星のシナリオシミュレーション機能を提供

※オープンソースのフライトシミュレーター

- Key Features

- 環境モデル: 重力、大気、風、磁場、天体暦 (エフェリメス)
- 機体軸系、風軸系、慣性軸系などの組み込まれた座標変換計算
- 飛行データを視覚化するための3Dアニメーションと飛行計器類
- 流量比やプラントル-マイヤー膨張波を計算するためのガスダイナミクス関数
- Data Compendium (Datcom) ファイルを利用した空力特性データの取り扱い
- 衛星のミッション解析
 - 軌道6要素
 - エフェリメス、タイムテーブル
 - TLE (Two-Line-Element) etc



- New full description and features at

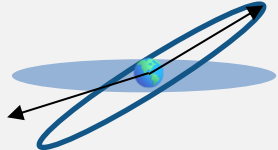
<https://jp.mathworks.com/products/aerospace-toolbox.html>



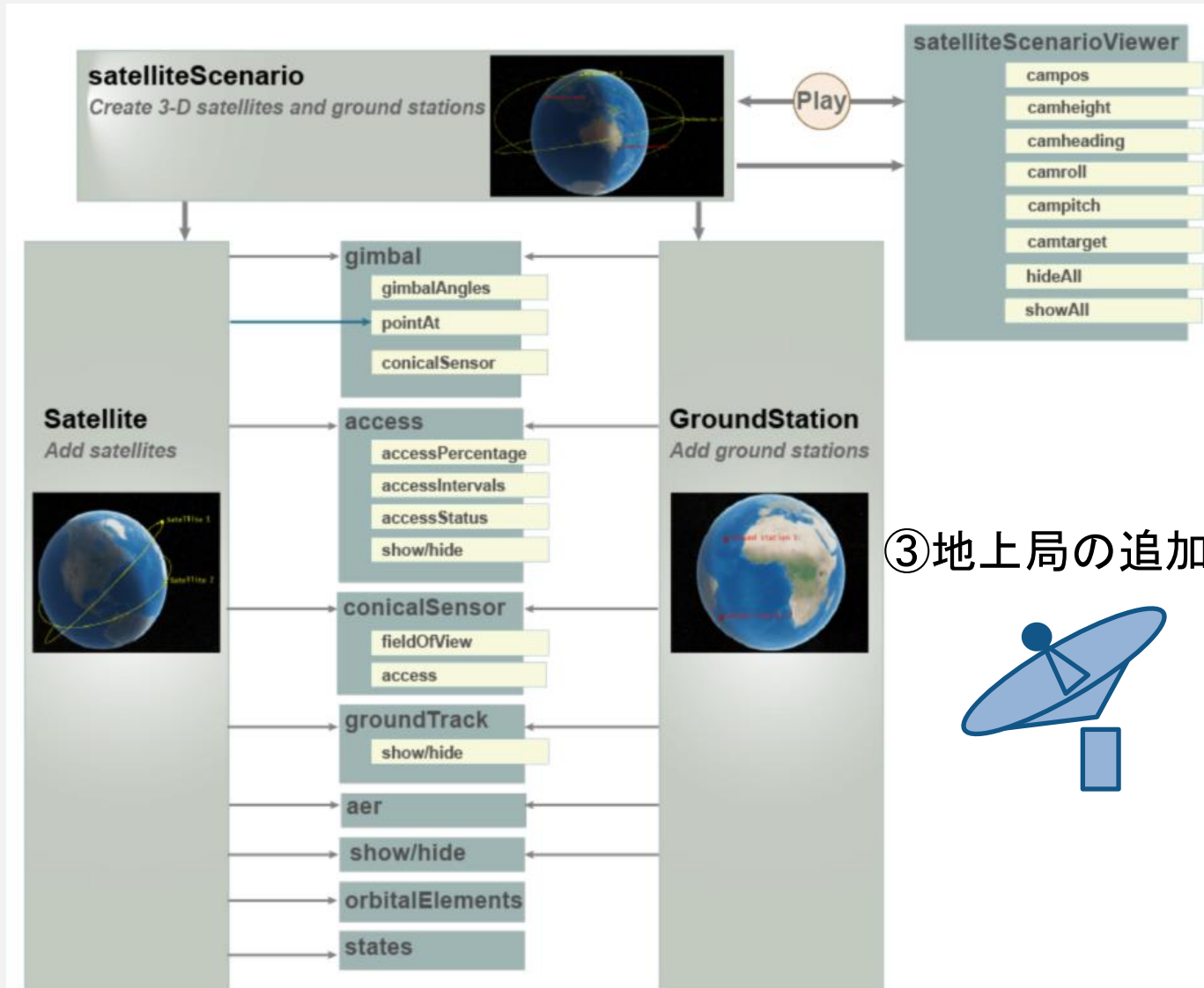
衛星のシナリオ作成と可視化シミュレーション

Aerospace Toolbox

①シナリオ作成



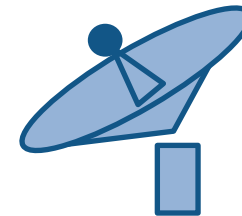
②衛星の追加



④可視化



③地上局の追加



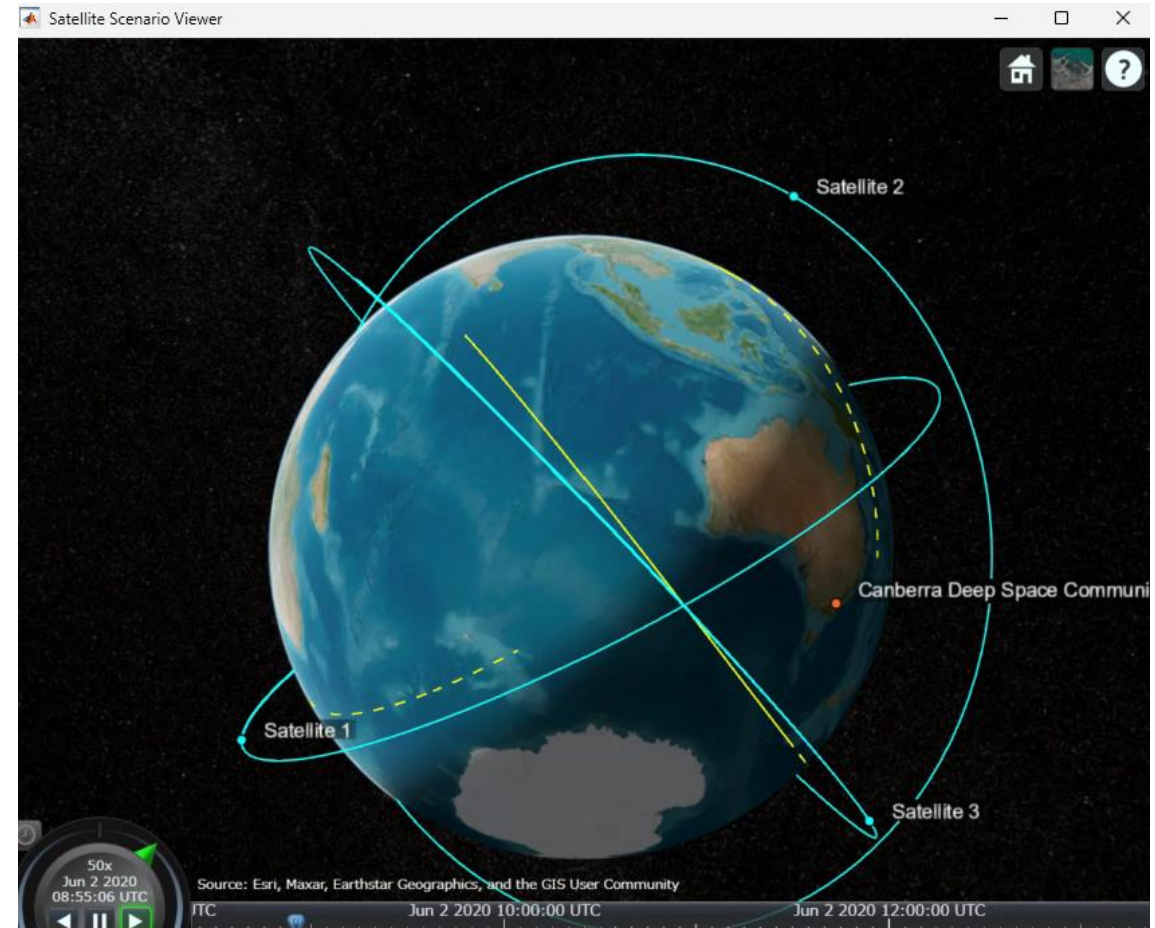
例題 satelliteScenarioを使用した衛星のシナリオ評価

コード例

```
startTime = datetime(2020,6,02,8,23,0);
stopTime = startTime + hours(5);
sampleTime = 60;
sc = satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime);

sat = satellite(sc,"threeSatelliteConstellation.tle");
show(sat)
groundTrack(sat,"LeadTime",1200);
```

- ✓ satelliteScenarioによるシナリオ生成
- ✓ 衛星の軌道伝播としてTLEファイルをインポート
- ✓ シナリオビューアーによる可視化



[Link](#)

Aerospace Blockset

What's included:

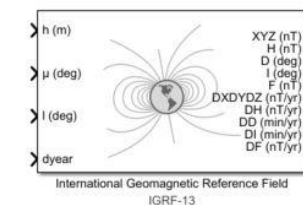
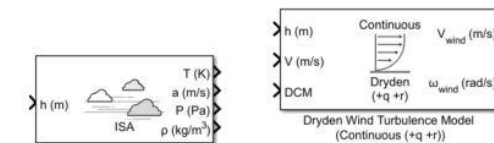
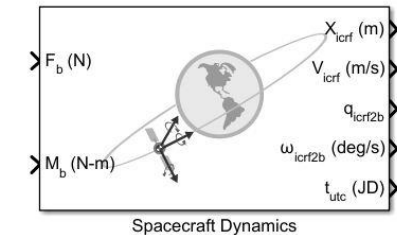
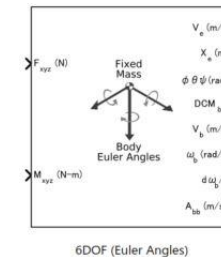
- 航空宇宙機のモデリング、シミュレーション、解析を提供するSimulink® ブロック, 機体のダイナミクス, 風外乱や標準大気などの環境モデル, パイロットモデル, Flight Gear(※1) やUnreal Engine (※2)による3D飛行シミュレーション

※1 オープンソースのフライトシミュレーター

※2 Epic Gamesが提供する3Dゲームエンジンプラットフォーム

Key Features

- 3DOF / 6DOFの運動モデル
- 縦、横方向の飛行状態を検討するための飛行制御解析ツール
- 重力、大気、風、磁場、惑星の天体暦モデル
- 航空宇宙機のライブラリモデル: 誘導航法制御, 推進系, アクチュエータ, パイロットモデル
- 機体軸、風軸、慣性軸などの座標変換行列
- ナビゲーション変数を視覚化するための3Dアニメーションと飛行計器
- Datcomデータを利用した空気力、空力モーメント計算



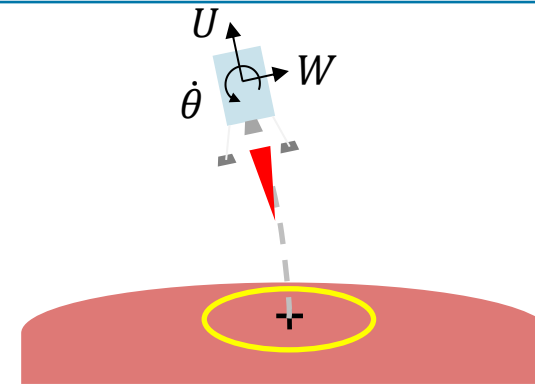
New full description and features at

<https://www.mathworks.com/products/aeroblks.html>



プラントモデリングのイメージ

自由度に応じた適切なプラントモデルを選定する
例. 縦方向($U, W, \dot{\theta}$)のみ考慮→3自由度

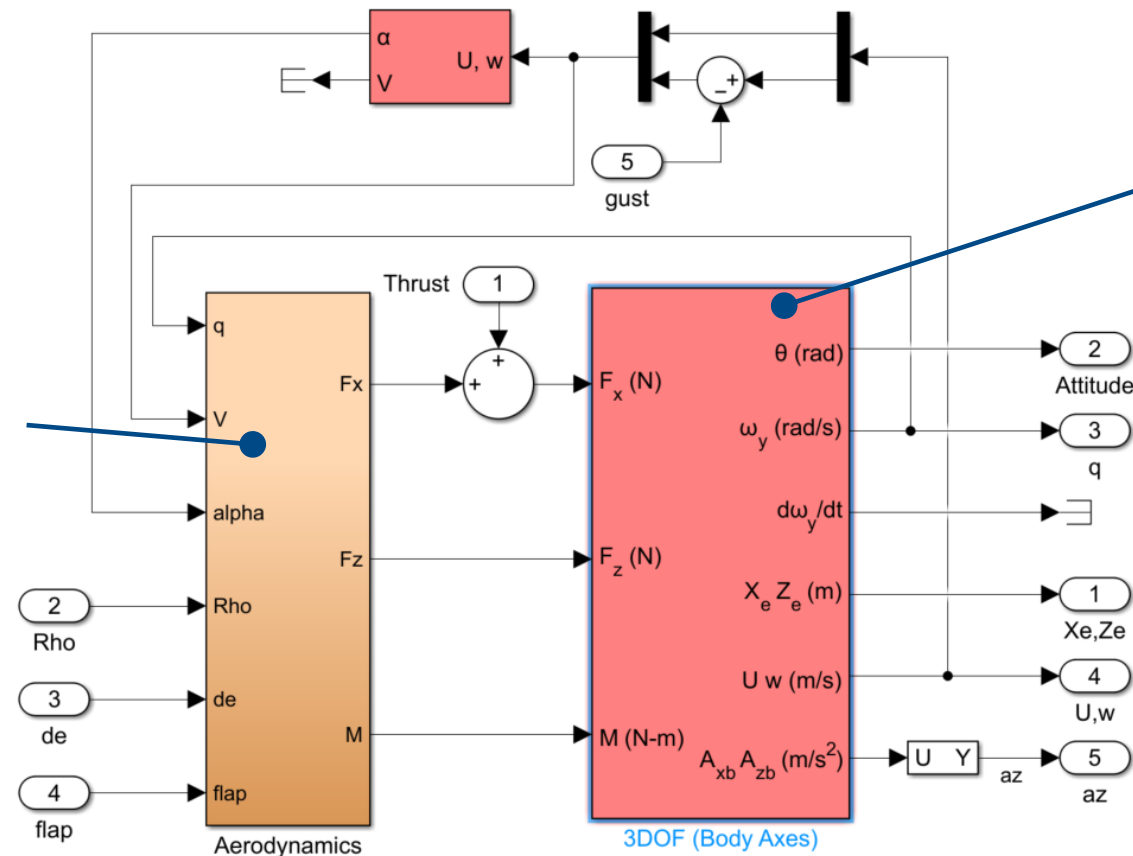


空気力、重力、風、人為的な力
などから生じる各軸方向の力と
各軸回りのモーメントを計算する

例

$$\text{揚力: } L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

$$\text{抗力: } D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$



並進運動:

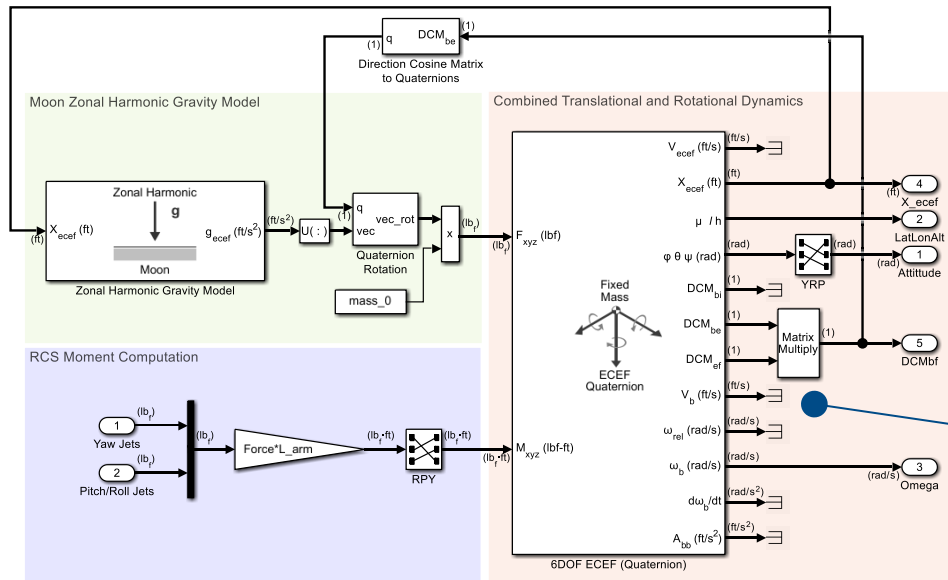
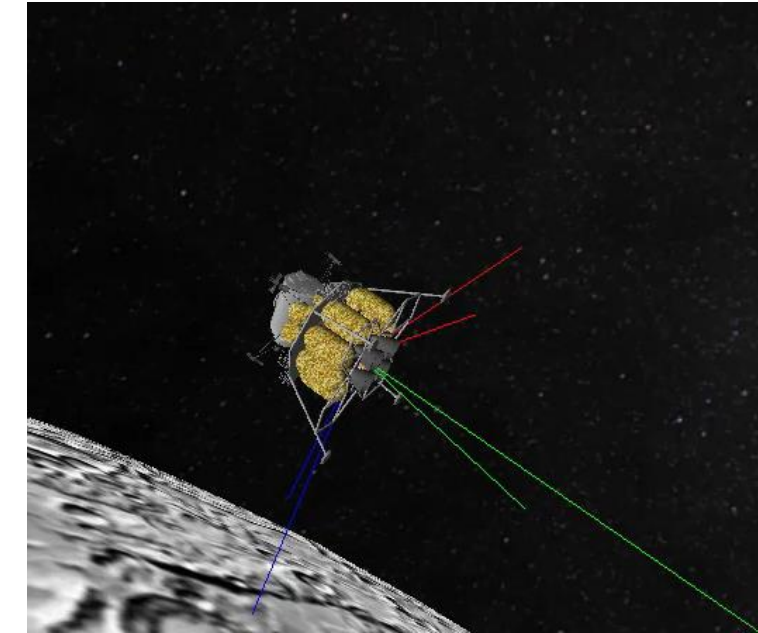
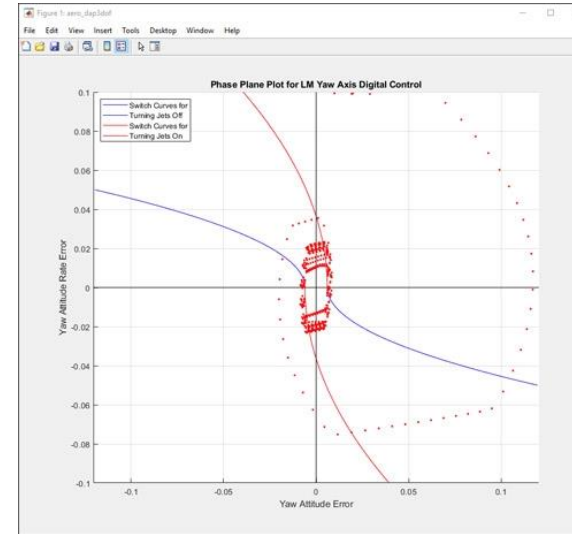
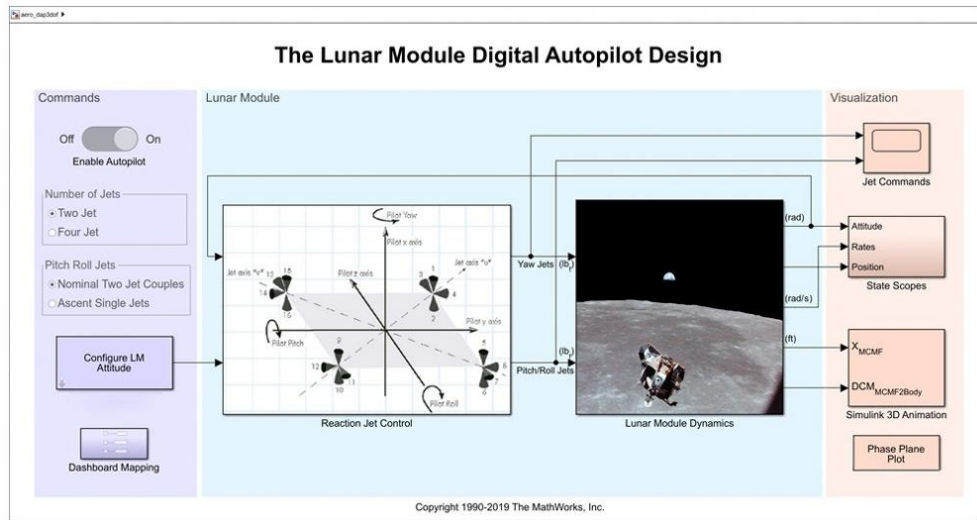
$$ma = F$$

回転運動:

$$I\dot{\omega} = M$$

位置、速度、オイラー角、
角速度など出力

例題 アポロ月面着陸船のGNC設計



1961年当時にもしSimulink及びAerospace Blocksetを使用可能であった場合にどうやって設計できたかを検証するデモ

Aerospace Blocksetによる6自由度の非線形運動モデルを構築



[Link](#)

衛星の軌道及び姿勢の動特性をSimulinkでモデル化

Orbit Propagator & Spacecraft Dynamics

- 解析的及び数値的に衛星の伝播を計算
- 中心体重力(太陽系全惑星と月)
 - 質点
 - J2
 - 球面調和関数モデル (e.g. EGM2008)
- 大気中の空気抵抗 (NRLMSISE-00)
- 重力勾配トルク

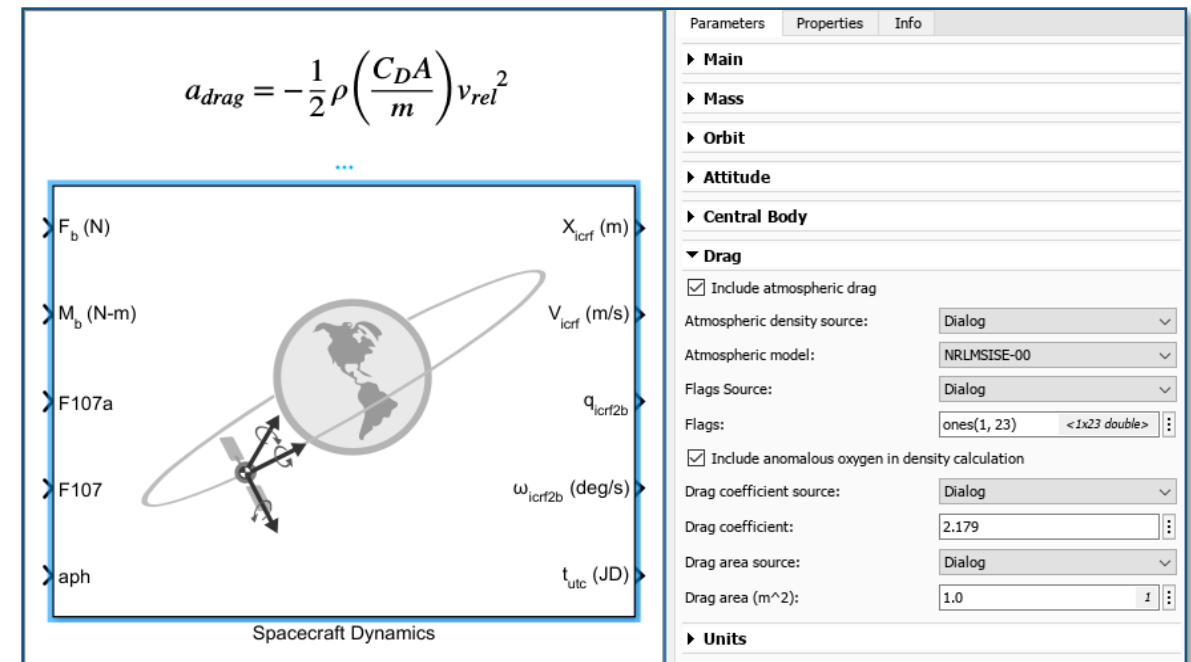
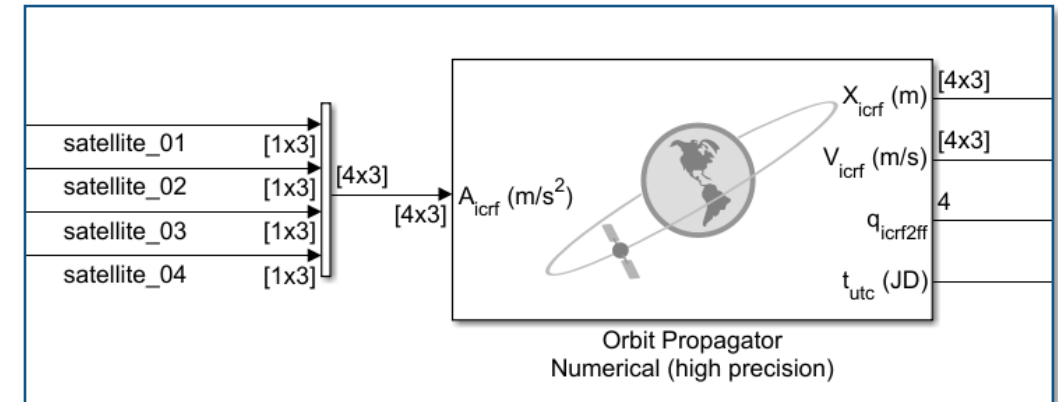


Orbit Propagator

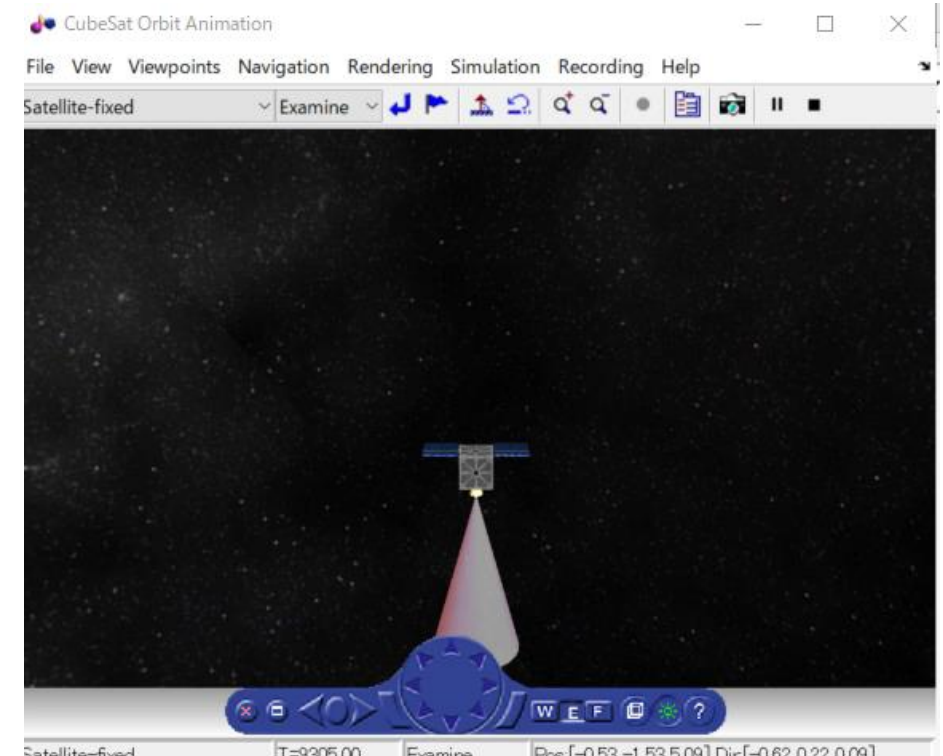
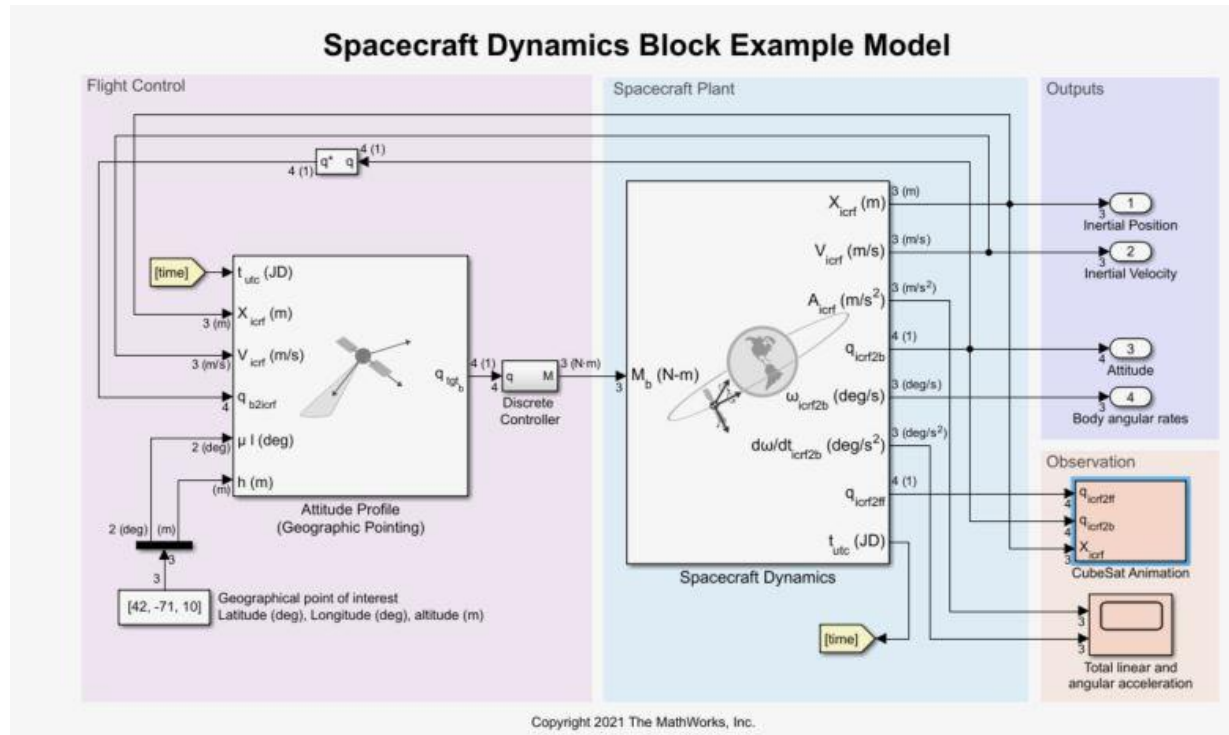
<https://jp.mathworks.com/help/aeroblks/orbitpropagator.html>

Spacecraft Dynamics

<https://jp.mathworks.com/help/aeroblks/spacecraftdynamics.html>



例題 人工衛星の姿勢制御シミュレーション



Point:

- ✓ 6DOFモデル
- ✓ 姿勢制御系を加味
- ✓ Simulink 3D Animation™による3Dアニメーション

Getting Started with the Spacecraft Dynamics Block
<https://www.mathworks.com/help/aeroblks/getting-started-with-the-spacecraft-dynamics-block.html>



Simscape による非因果的モデリング・シミュレーション環境

専門領域
アドオン

複合領域
基本環境

電気

バッテリー

流体

マルチボディ

駆動伝達



Electrical



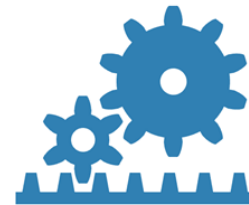
Battery



Fluids



Multibody



Driveline



Simscape

- MATLAB
- Simulink
- Toolboxes
- Blocksets
- Code Generation
- ...

Electrical



電気

Mechanical



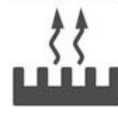
機械

Magnetic



磁気

Thermal



熱

Custom
equations
if $v > v_c$
 $i = f(v)$
else

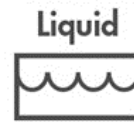
カスタム
(言語)

Hydraulic



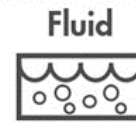
油圧

Thermal
Liquid



熱流体

Two-Phase
Fluid



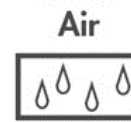
二相流体

Gas



気体

Moist
Air

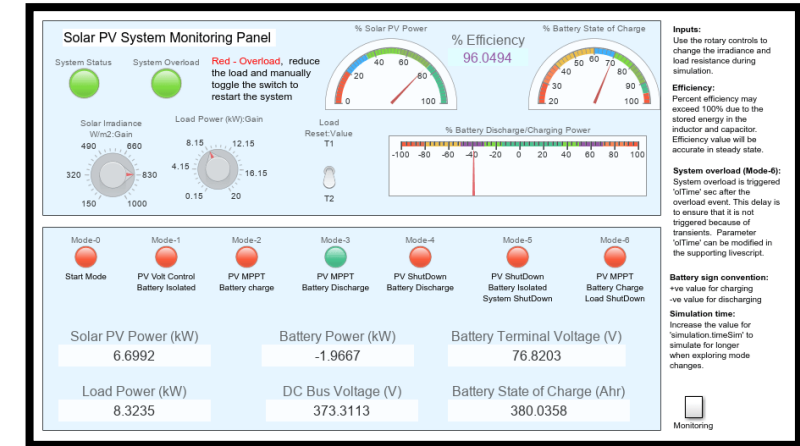
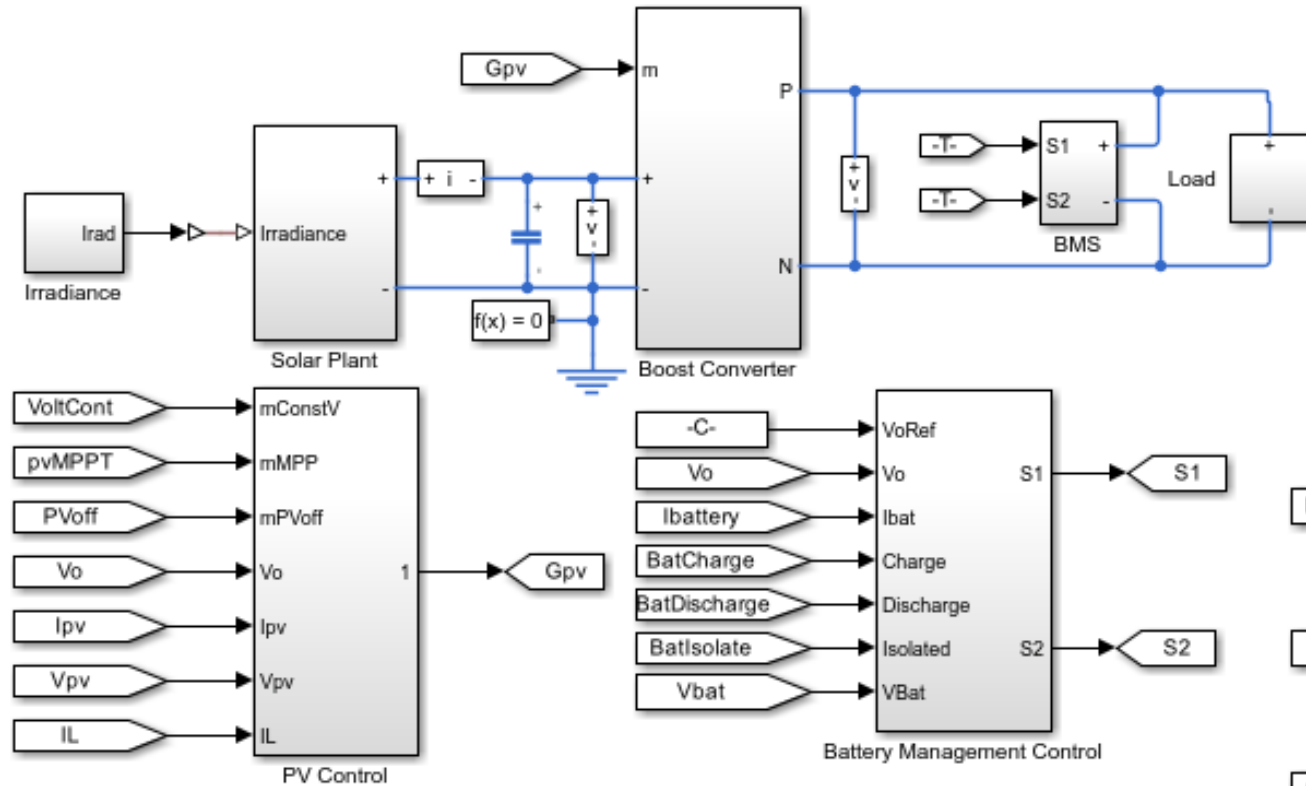


湿り空気

例題 バッテリー バックアップ付きのスタンドアロンのソーラー PV DC 電力システム

電力需要に対するPV & バッテリーの制御シミュレーション

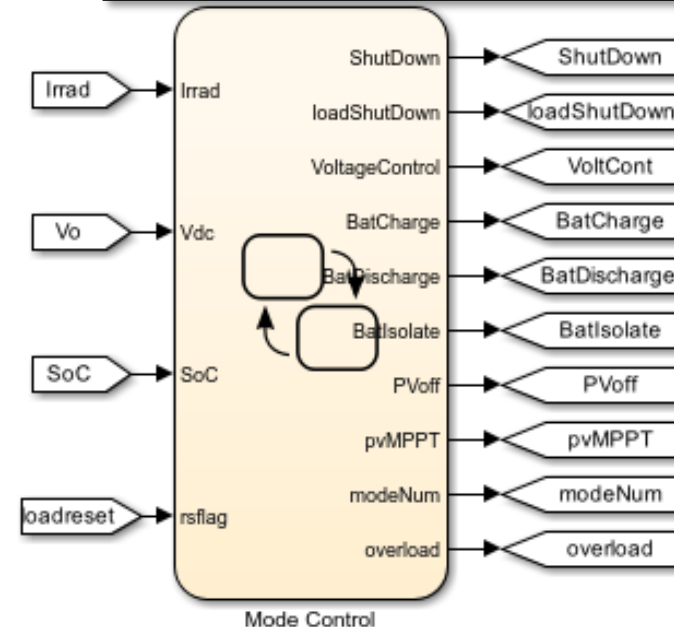
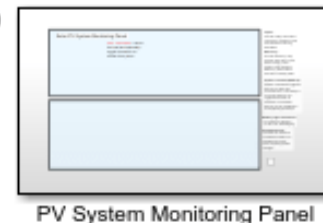
Simscape Electrical



Stand-Alone Solar PV DC Power System with Battery Backup

1. [Open script](#) that inputs values for solar plant (load data)
2. Configure MPPT [P&O](#), [Incremental Conductance](#)
3. [Explore simulation results](#) using [Simscape Results Explorer](#)
4. [Learn more](#) about this example

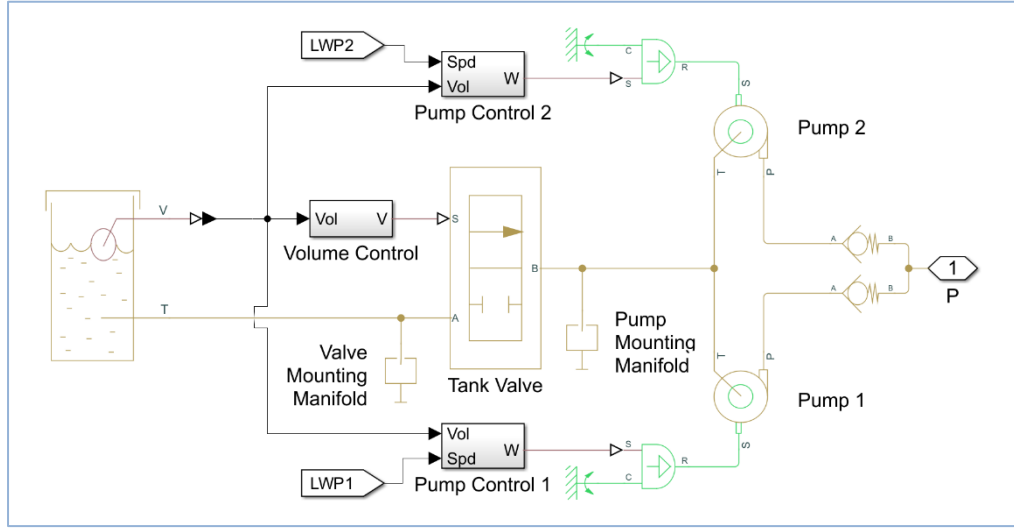
Copyright 2019-2023 The MathWorks, Inc.



[Link](#)

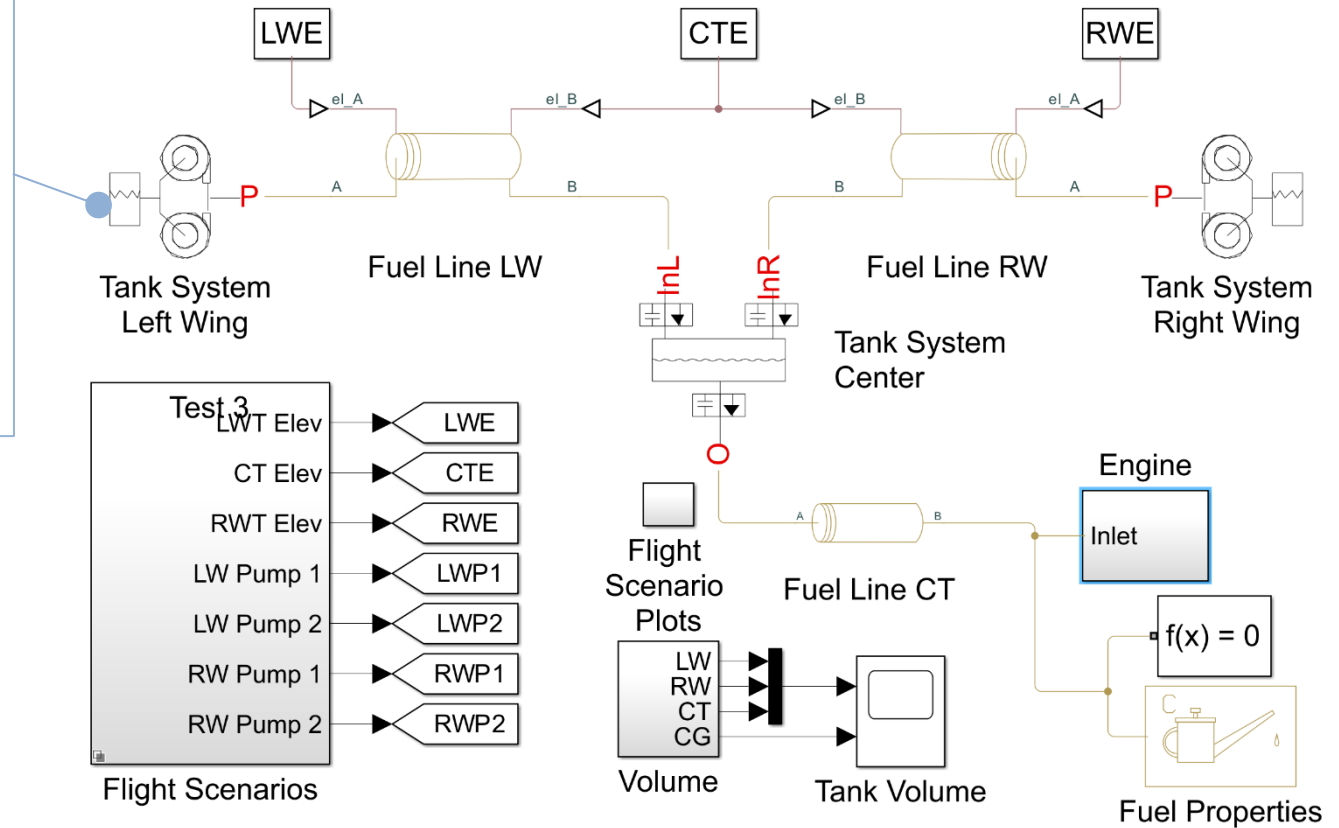
例題 燃料輸送システム

Simscape Fluids



考慮されるコンポーネントの単位

- ✓ 燃料の物性
- ✓ タンク
- ✓ 配管
- ✓ バルブ
- ✓ ポンプ



3つタンクを有する航空燃料の供給システムのシミュレーション

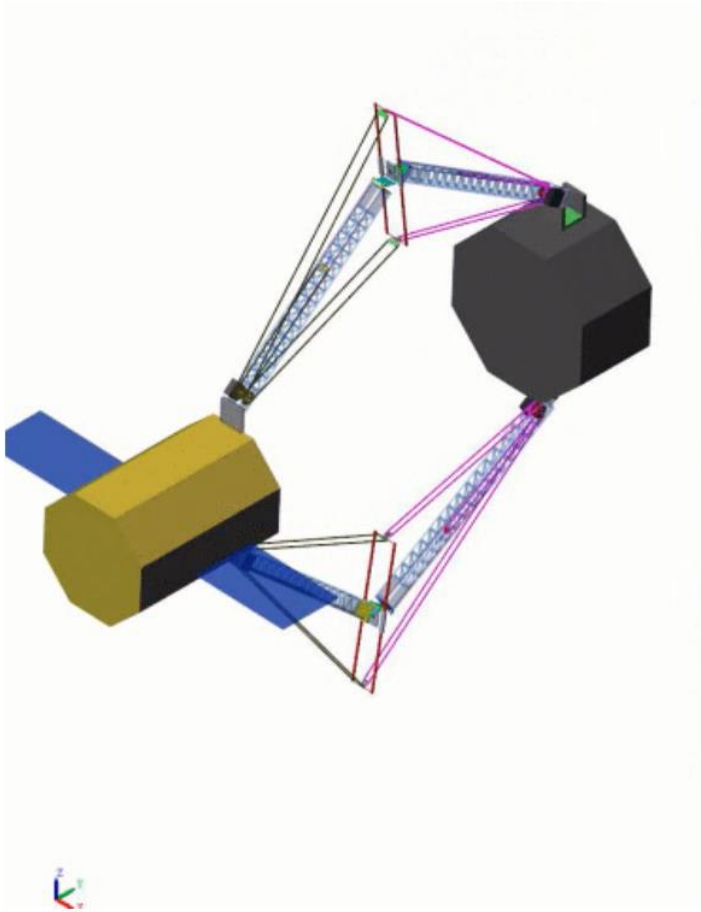


[Link](#)

宇宙機の3D機構モデリング

Simscape Multibody

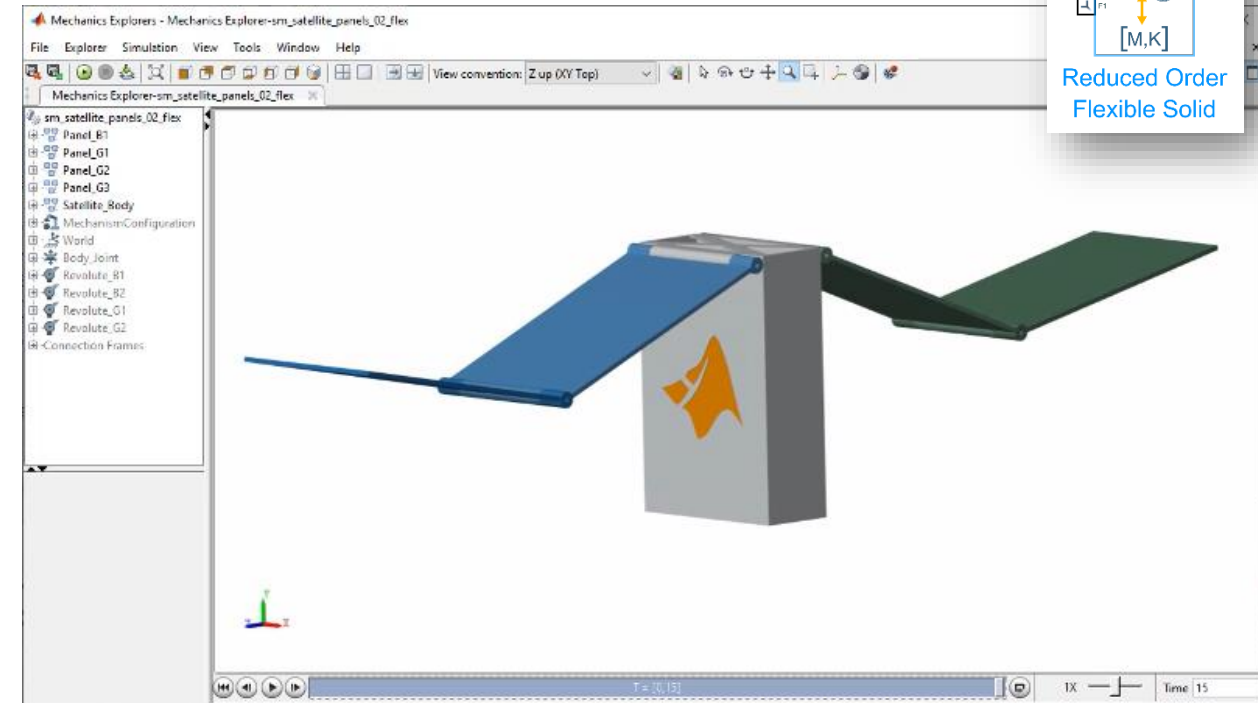
- ・3次元の機構モデリング
- ・順逆運動モデリング
- ・CADインポート
- ・メカアニメーション



- ✓ アームによる物体の把持を考慮したシミュレーション

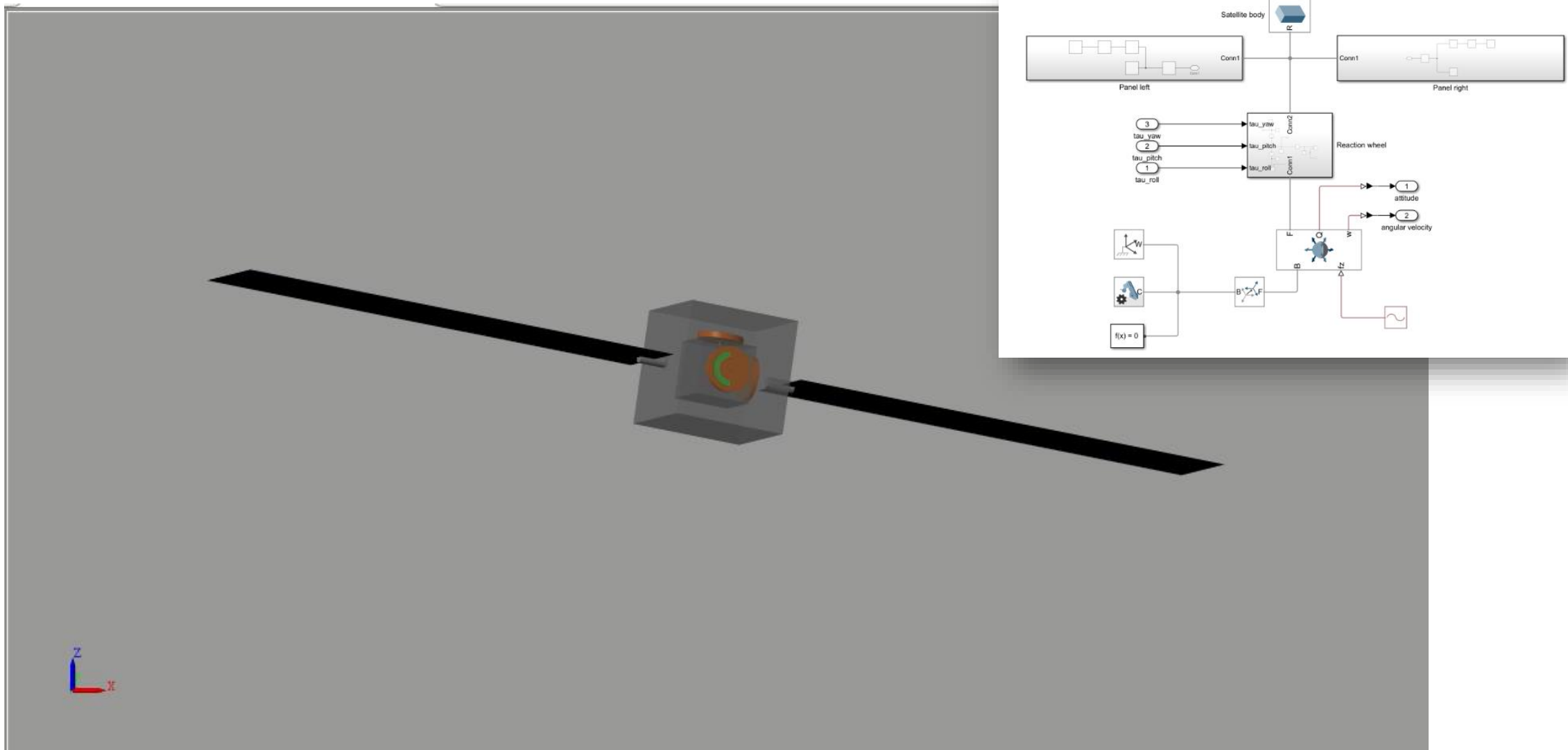


[Link](#)



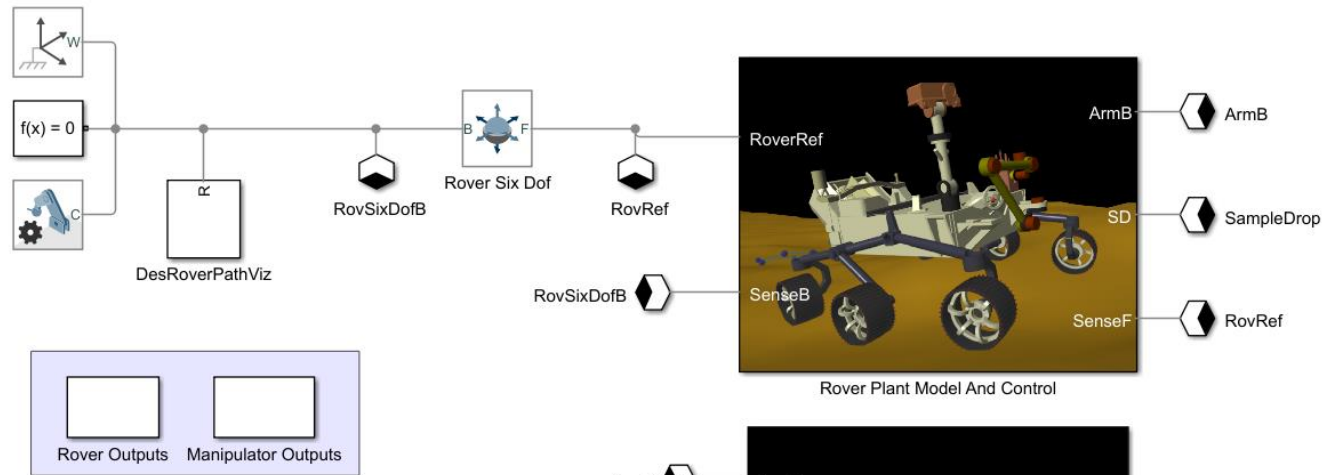
- ✓ パネルの柔軟性を考慮した展開のシミュレーション

例 リアクションホイールによる衛星の姿勢制御シミュレーション



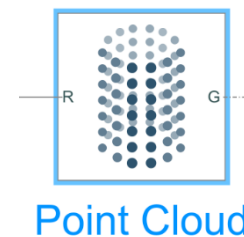
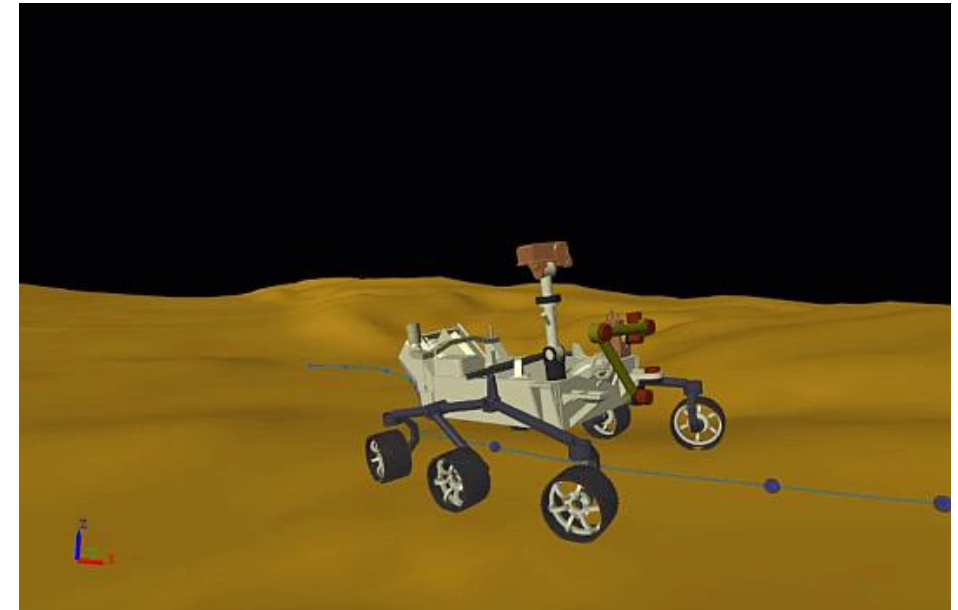
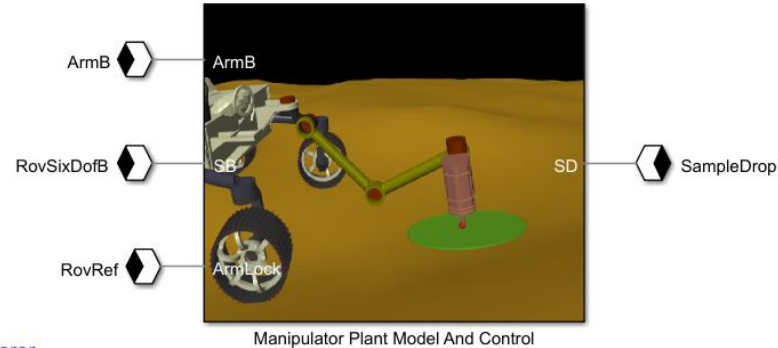
詳細な機構モデルを用いてリアクションホイールによる制御性を評価

例題 火星探査ローバーのシミュレーション

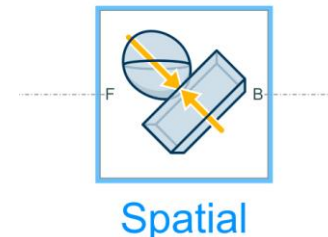


Mars Rover

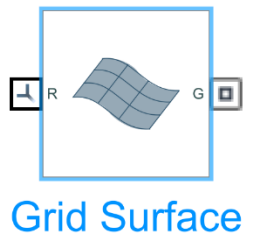
1. [Learn more](#) about this example
2. Select rover path: [Path1](#), [Path2](#)
3. Plot paths: [Rover \(code\)](#), [Arm \(code\)](#)
4. Learn more about the [grid surface](#) block
5. Learn more about [contact modeling](#)
6. Learn more about the [KinematicsSolver class](#)
7. Learn more about [multibody modeling](#)
8. [Explore simulation results](#) using [Simscape Results Explorer](#)



Point Cloud



Spatial
Contact Force



Grid Surface

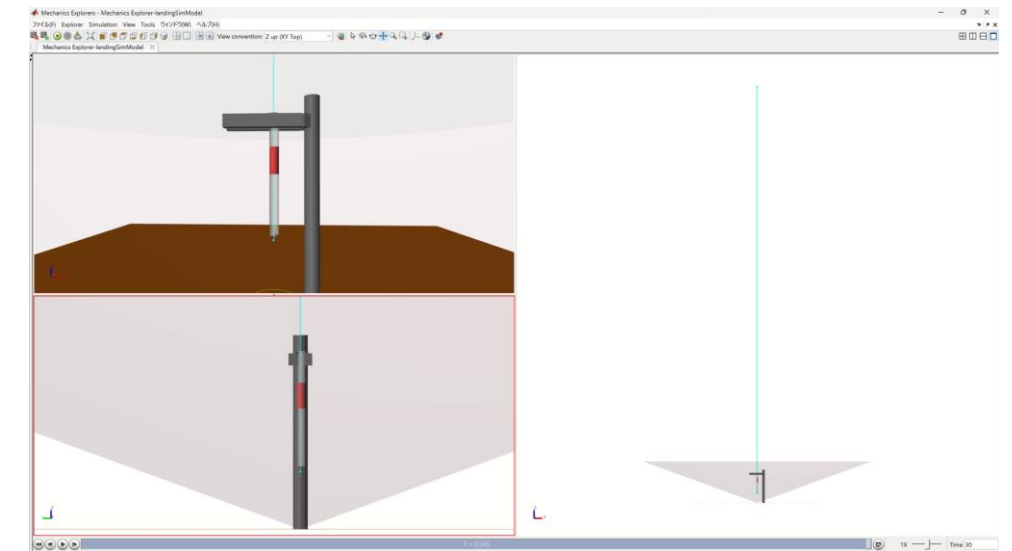
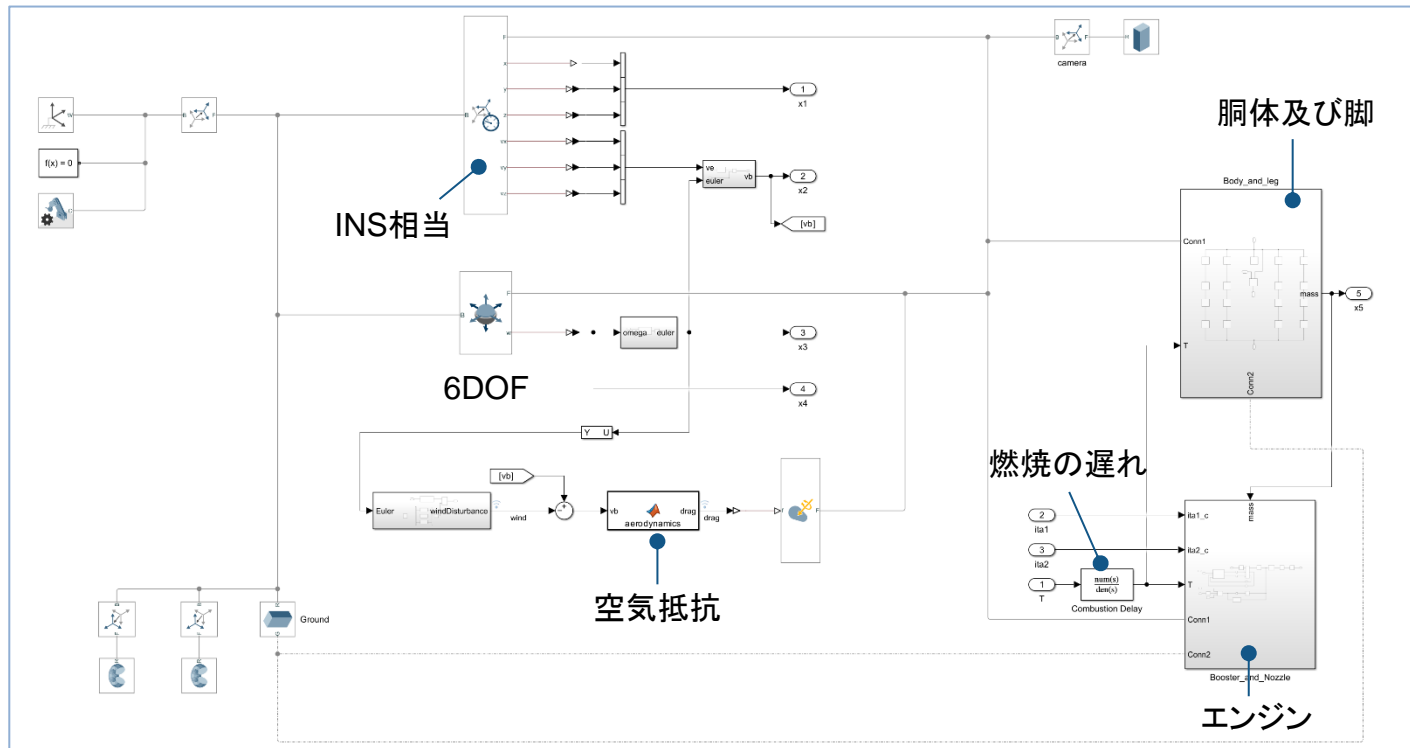
- ✓ ローバー本体モデル & マニピュレーターモデル
- ✓ Pure Pursuitによる経路追従制御
- ✓ KinematicsSolverを使用したアームの軌道計画

- ✓ 地表面とタイヤとの接触を計算

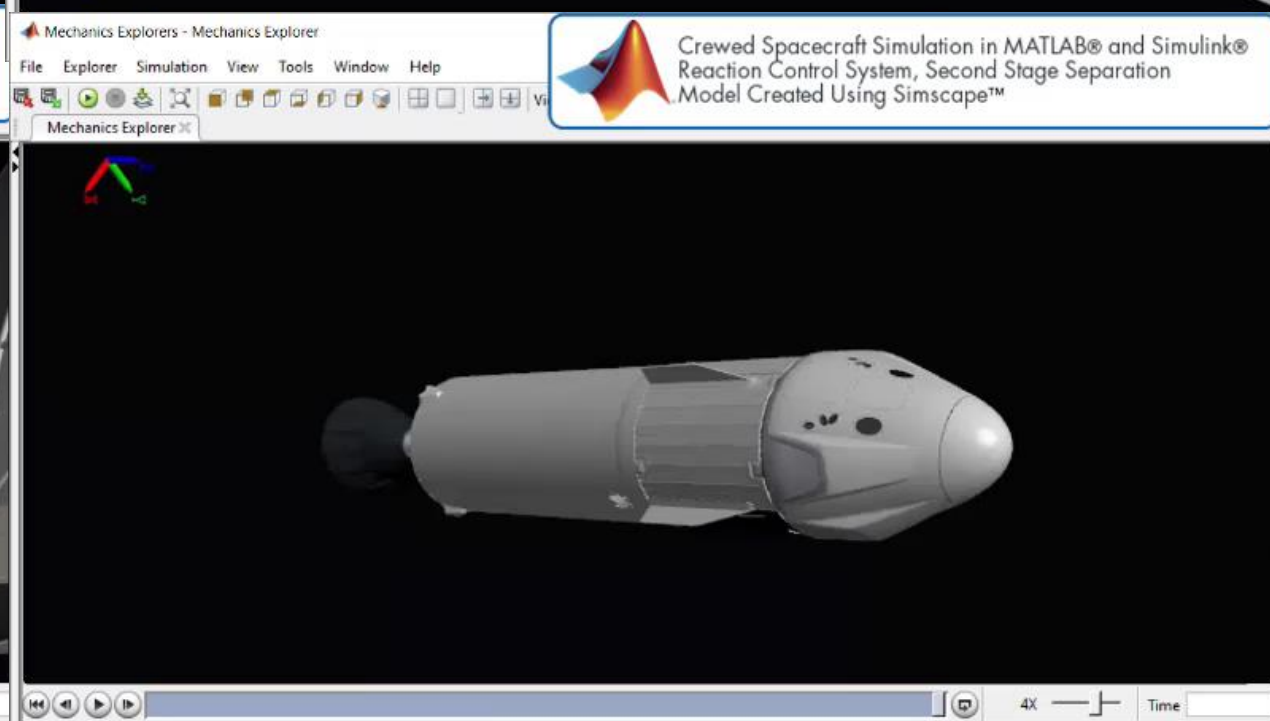
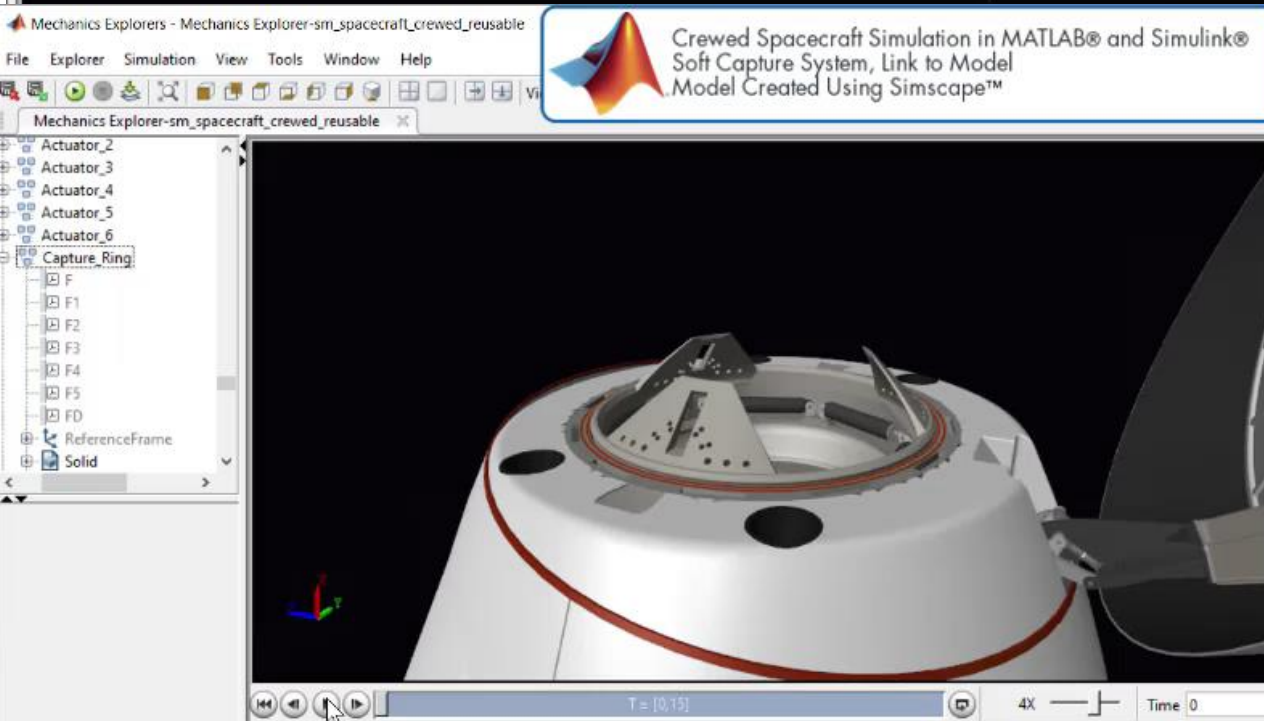
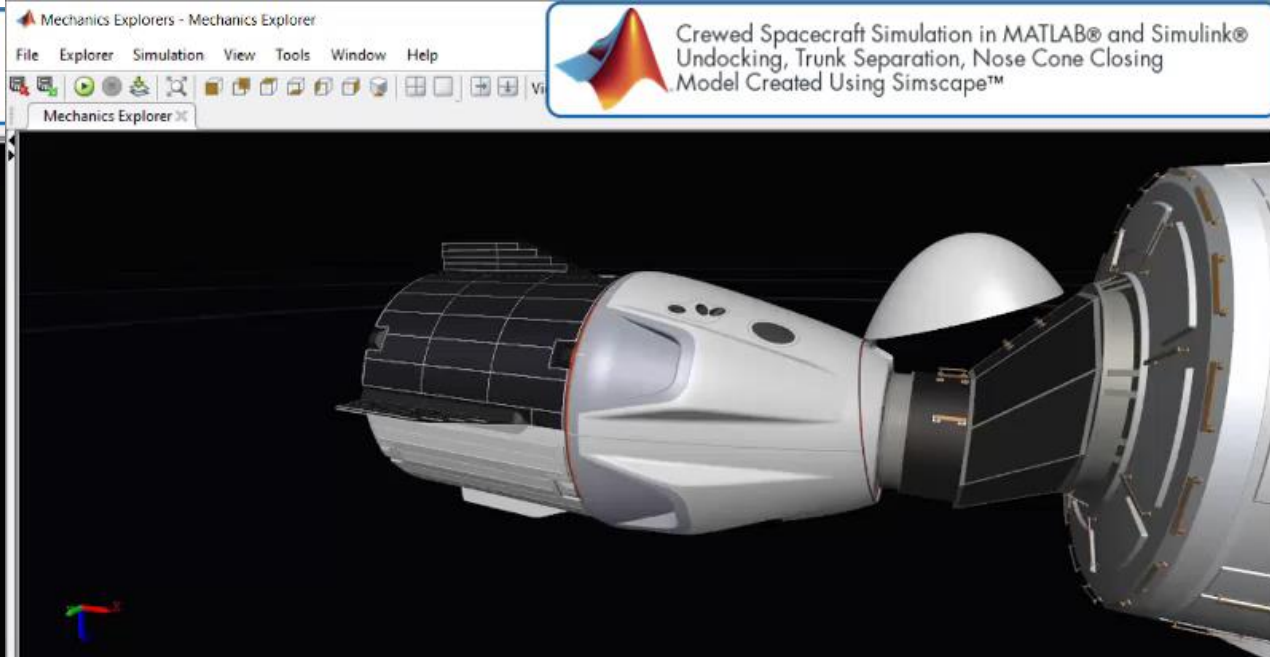
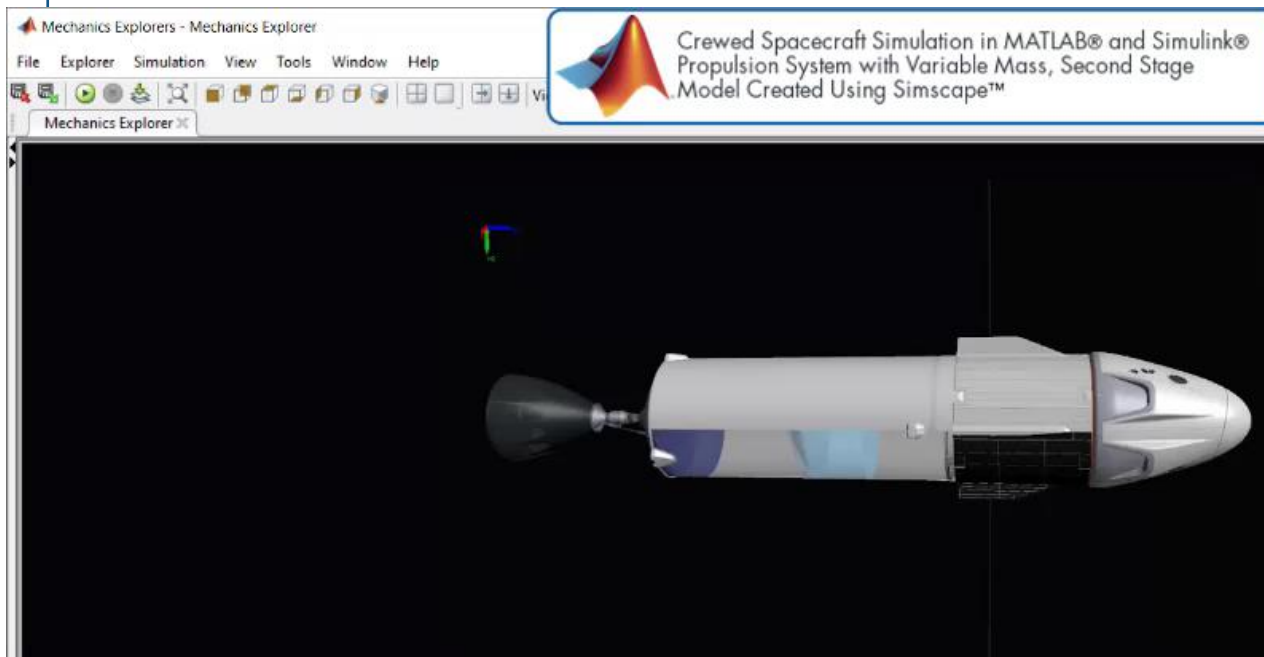


[Link](#)

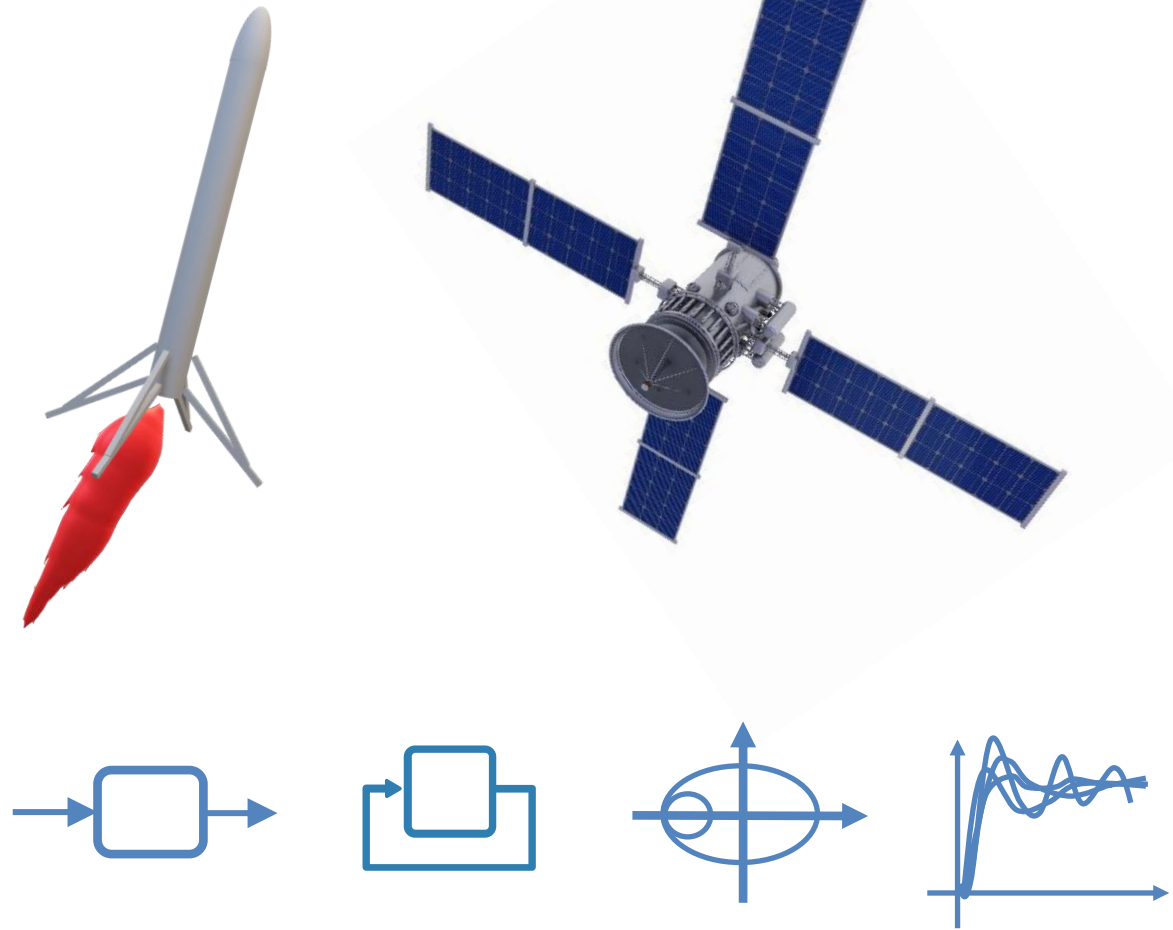
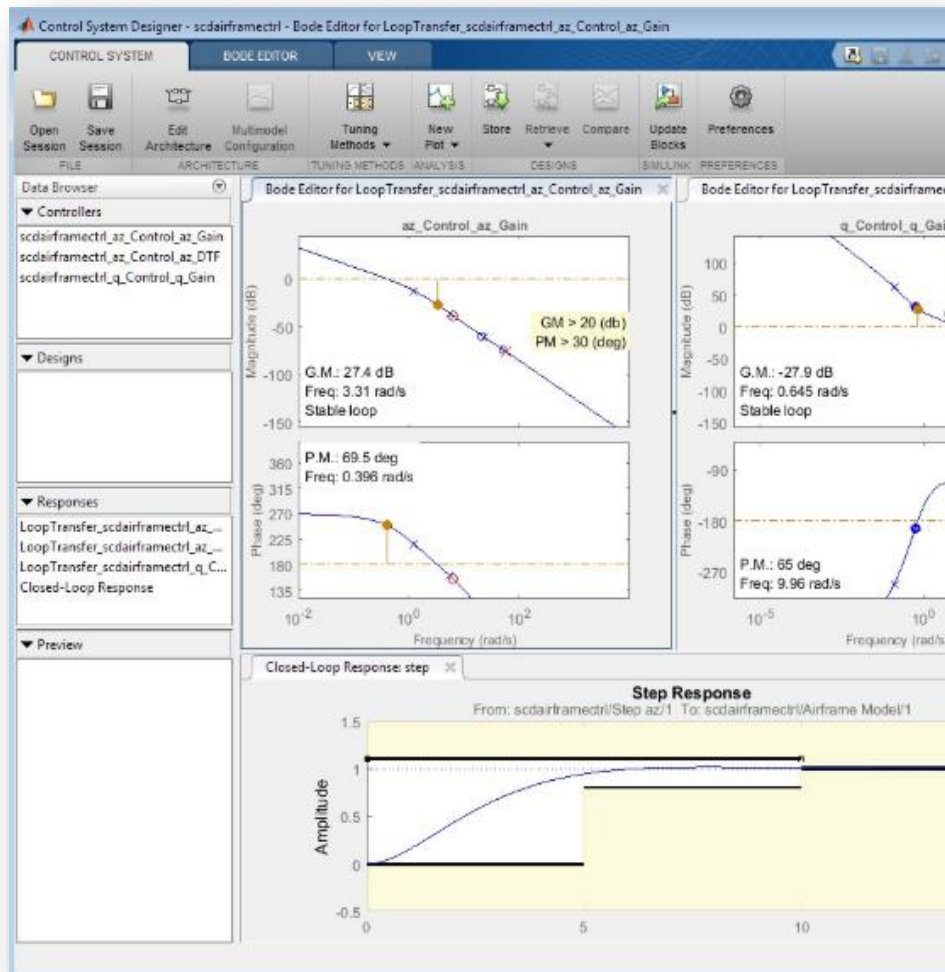
例 再利用ロケットの飛行シミュレーション



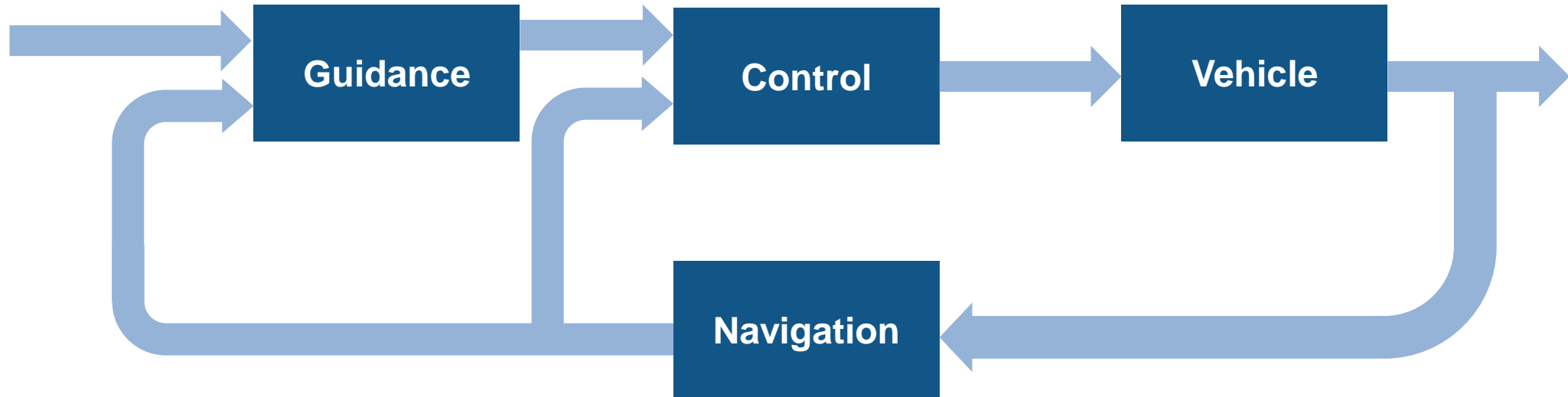
- ✓ 6DOF非線形運動モデル
- ✓ 燃料消費による質量変動を加味したシミュレーション



GNC設計



GNC (Guidance, Navigation and Control)

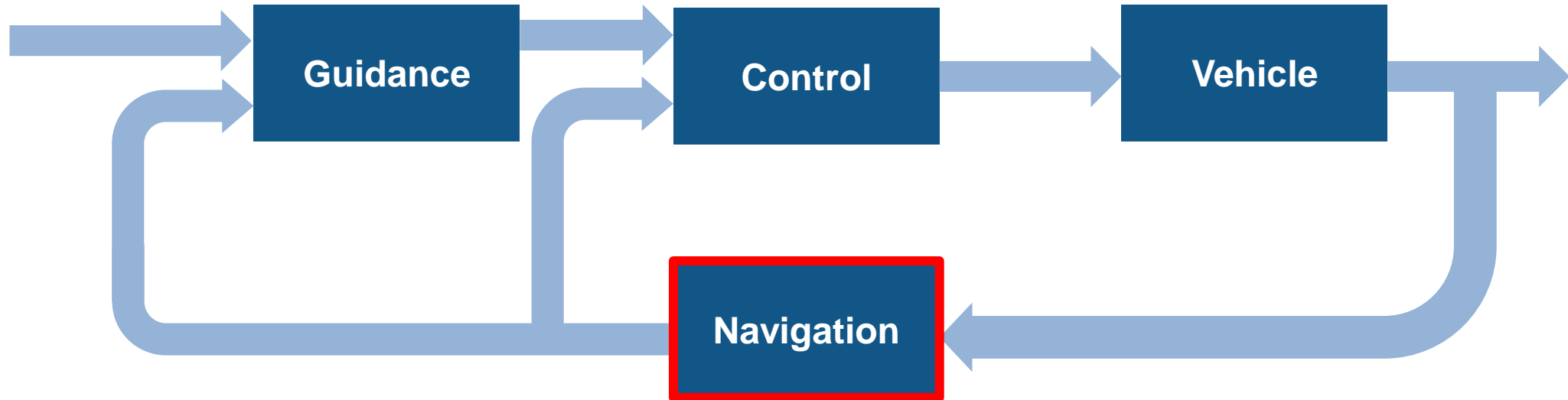


Guidance: 機体を定められた軌道に基づき誘導する

Control: 軌道を実現するための制御と安定性を実現する

Navigation: 機体の現在の飛行状態を計測し航法する

GNC (Guidance, Navigation and Control)



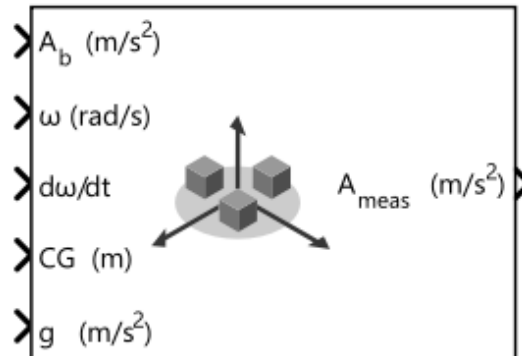
Guidance: 機体を定められた軌道に基づき誘導する

Control: 軌道を実現するための制御と安定性を実現する

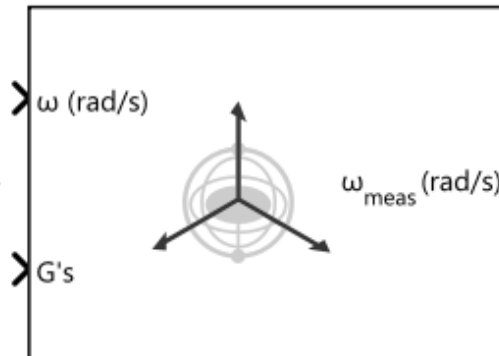
Navigation: 機体の現在の飛行状態を計測し航法する

Navigationのためのセンサモデル

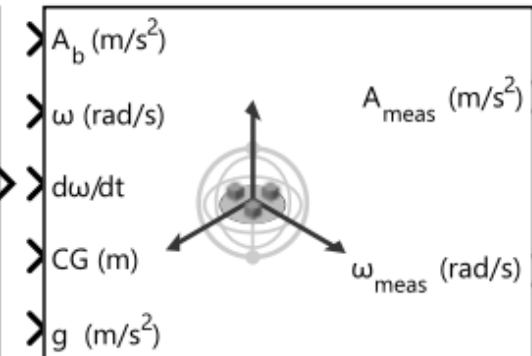
Aerospace Blockset



Three-axis Accelerometer



Three-axis Gyroscope

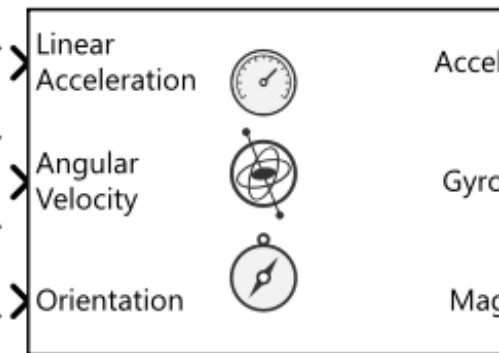


Three-axis Inertial Measurement Unit

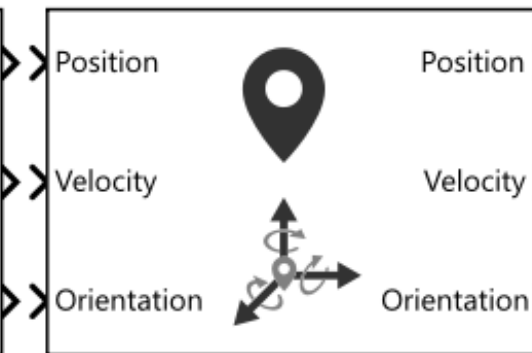
Navigation Toolbox



GPS



IMU

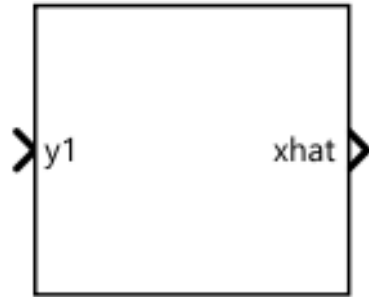


INS

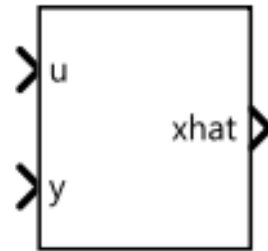
センサ特性をモデル化してシミュレーション上で再現する

Navigationのための推定アルゴリズム

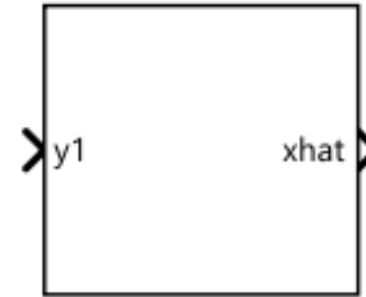
Control System Toolbox



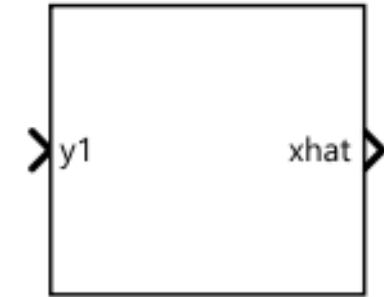
Extended Kalman Filter



Kalman Filter



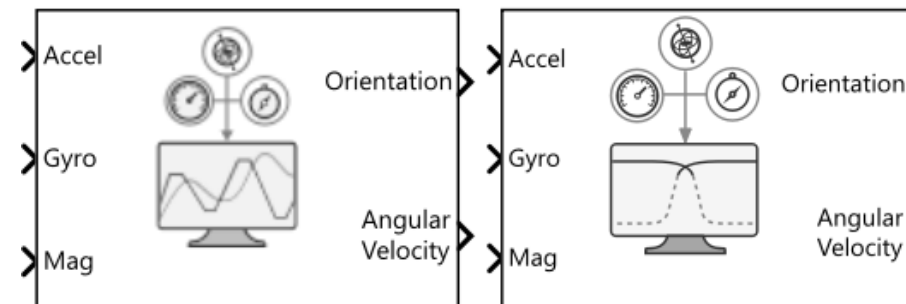
Particle Filter



Unscented Kalman Filter

Simulink Coderによる
コード生成サポート

Navigation Toolbox



AHRS

Complementary Filter

センサ計測値から直接観測できない状態量を推定する

例題 IMU Sensor Fusion with Simulink


[Link](#)

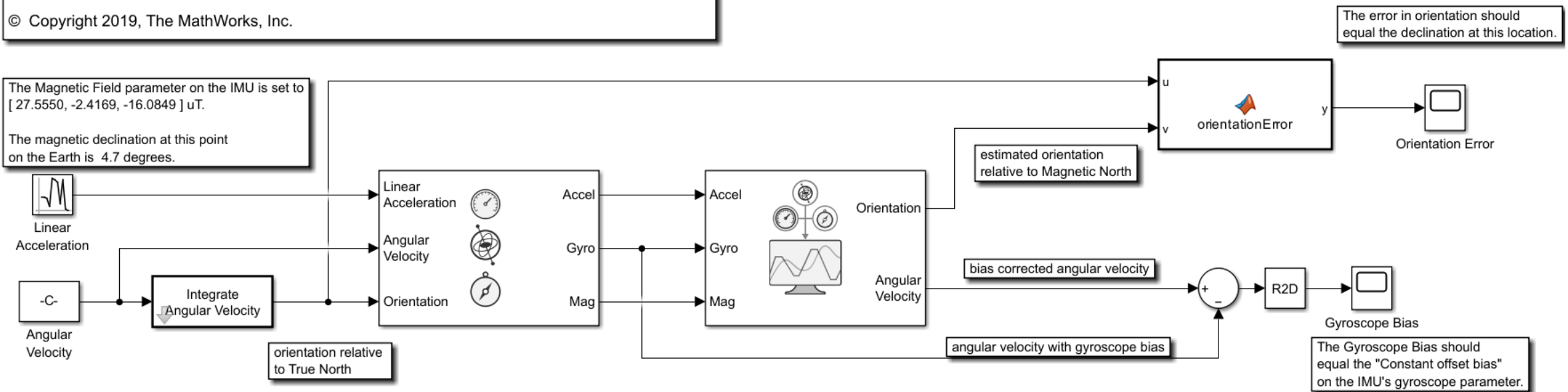
IMU Sensor Fusion With Simulink

This example shows how to generate and fuse IMU sensor data using Simulink®. You can accurately model the behavior of an accelerometer, a gyroscope, and a magnetometer and fuse their outputs to compute orientation.

© Copyright 2019, The MathWorks, Inc.

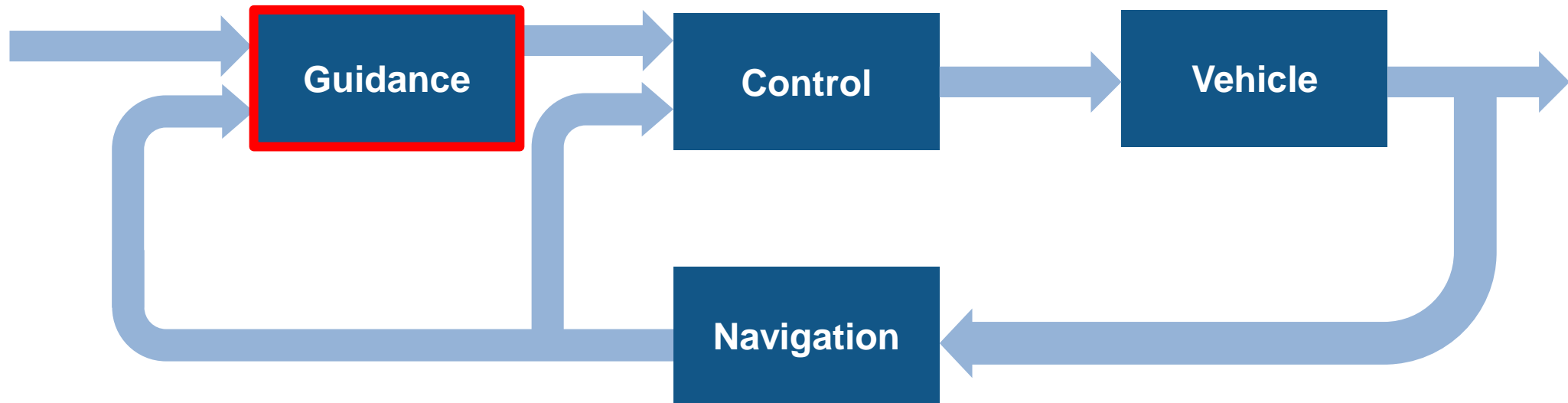
The Magnetic Field parameter on the IMU is set to [27.5550, -2.4169, -16.0849] uT.

The magnetic declination at this point on the Earth is 4.7 degrees.



IMU & AHRSを統合したセンサフュージョンのシミュレーション

GNC (Guidance, Navigation and Control)



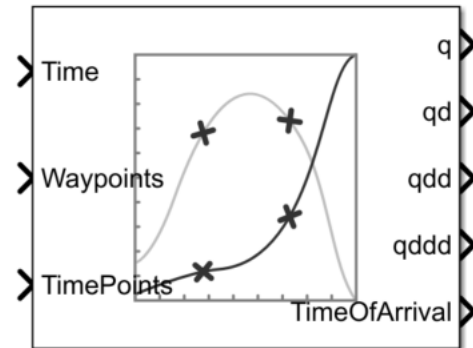
Guidance: 機体を定められた軌道に基づき誘導する

Control: 軌道を実現するための制御と安定性を実現する

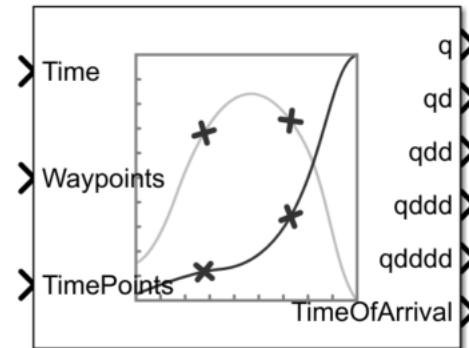
Navigation: 機体の現在の飛行状態を計測し航法する

Guidanceのためのアルゴリズム

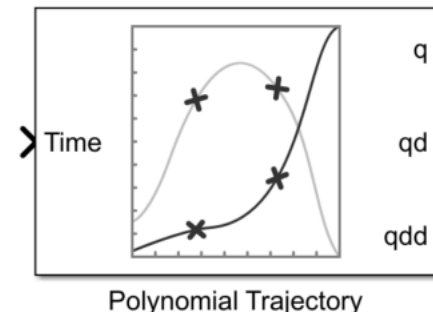
Robotics System Toolbox



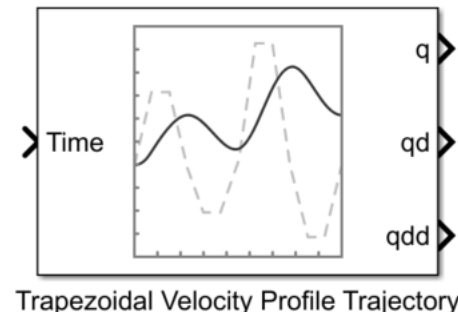
Minimum Jerk Polynomial Trajectory



Minimum Snap Polynomial Trajectory



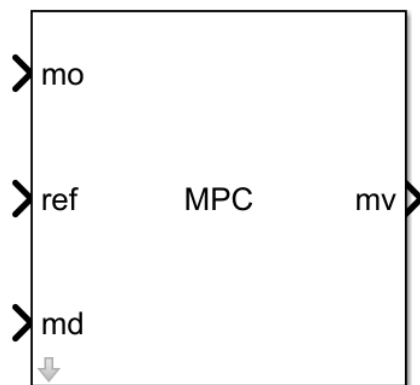
Polynomial Trajectory



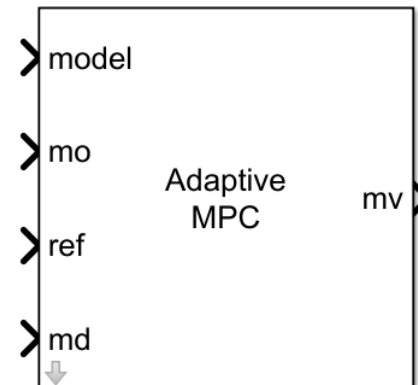
Trapezoidal Velocity Profile Trajectory

多項式に基づく誘導経路生成

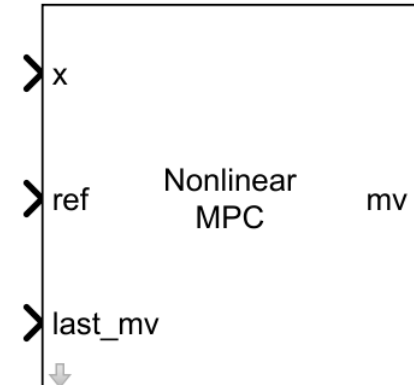
Model Predictive Control Toolbox



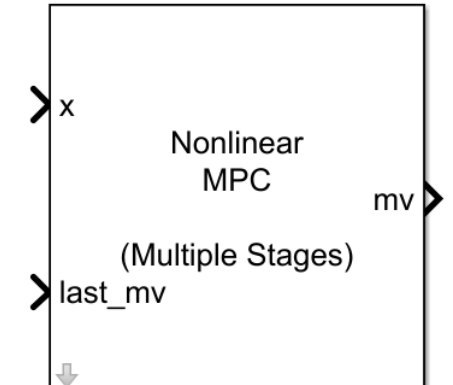
MPC Controller



Adaptive MPC Controller



Nonlinear MPC Controller



Multistage Nonlinear MPC

モデル予測制御(MPC)を用いた実時間最適制御問題

例 燃料最少な着陸軌道的设计

Equation of Motion for Lander

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

T : スラスト

$\eta_{1,2}$: ジンバル角

空気力

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{m(t)} \begin{bmatrix} T \cos \eta_2 \cos \eta_1 \\ -T \cos \eta_2 \sin \eta_1 \\ T \sin \eta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} - \frac{\rho}{2m(t)} \begin{bmatrix} V u S_x C_x \\ V v S_y C_y \\ V w S_z C_z \end{bmatrix}$$

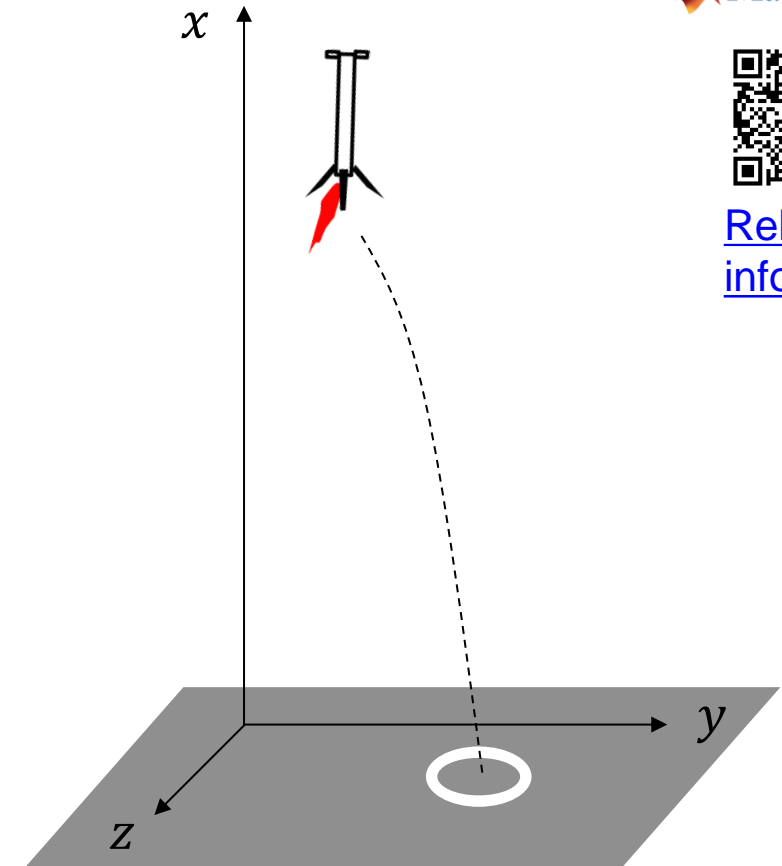
$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

$$\frac{d}{dt} m = -\frac{T}{I_{sp} g} \quad \text{質量変化}$$

着陸船の並進運動 + 質量変化のモデル

Model Predictive Control Toolbox

MPCの予測モデルとして利用



燃料消費量が最少となる軌道
を非線形MPCによって設計

min 燃料消費量

Sub to

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), k) \quad k = 1, 2, \dots, N$$

$$x(1) = x_0$$

$$C(x, u) \leq 0$$



[Related
info Link](#)

非線形MPCを用いた着陸軌道の計算プログラミング例

```
planner = nlmpc(7,7,3);  
planner.Ts = Ts;  
planner.PredictionHorizon = p;  
planner.ControlHorizon = p;
```

非線形MPCのオブジェクト作成と制御周期
予測ホライズンの設定

```
planner.Model.StateFcn = 'plannerRocketStateFcn';
```

着陸船の運動方程式を記述した関数を指定

$$\dot{x} = f(x, u)$$

```
% Thrust Power [N]
```

```
planner.MV(1).Min = 0;  
planner.MV(1).Max = Main_Thrust;
```

```
% Gimbal angle [rad]
```

```
planner.MV(2).Min = -10*pi/180;  
planner.MV(2).Max = 10*pi/180;
```

入力や状態量の上下限、カスタムな等式/
不等式制約を指定

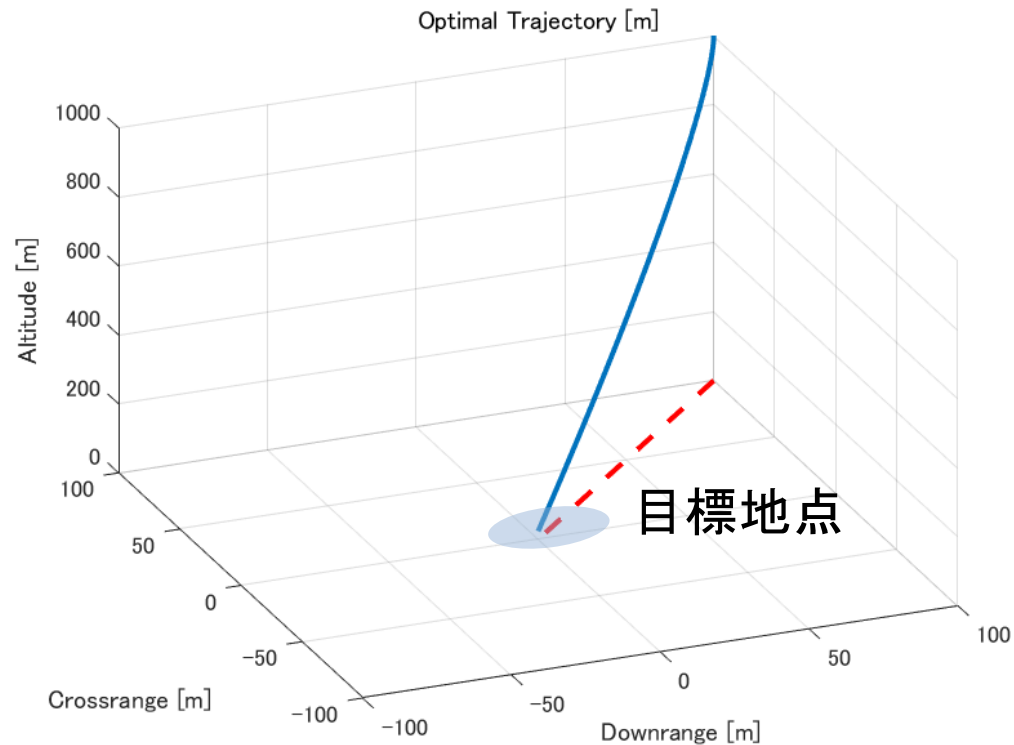
```
% User defined eq/ineq constraints
```

```
planner.Optimization.CustomEqConFcn = 'terminalState';  
planner.Optimization.CustomIneqConFcn = 'glideSlope';
```

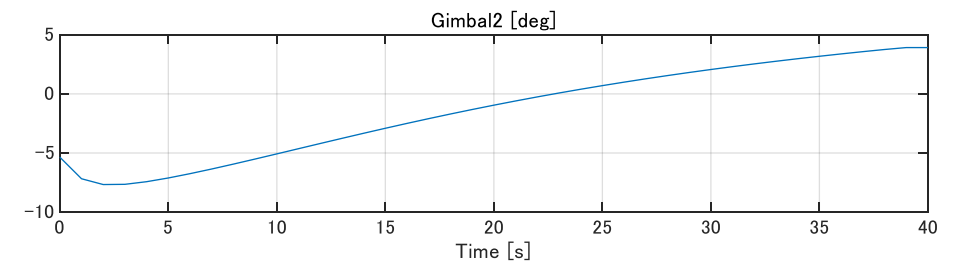
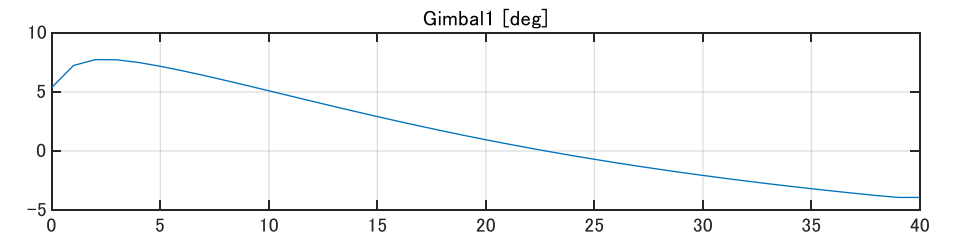
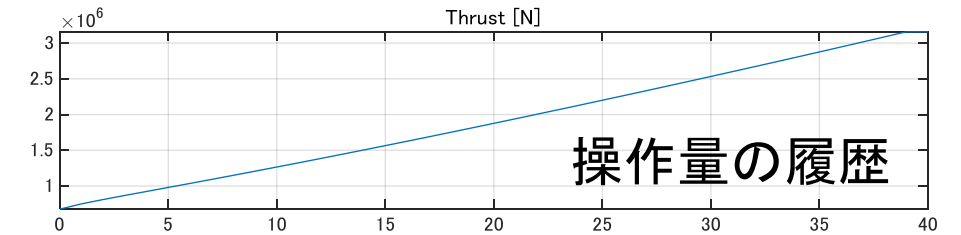
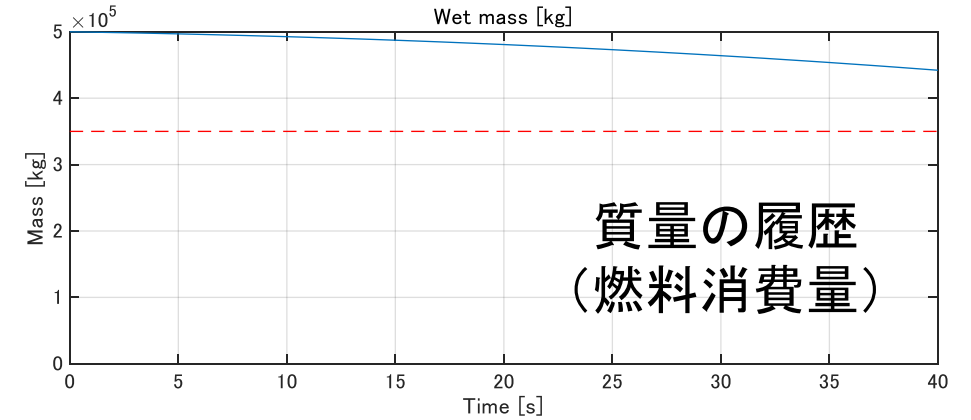
```
[~,~,info] = nlmpcmove(planner,state0,input0);
```

適当な初期値を与えて最適化計算を開始

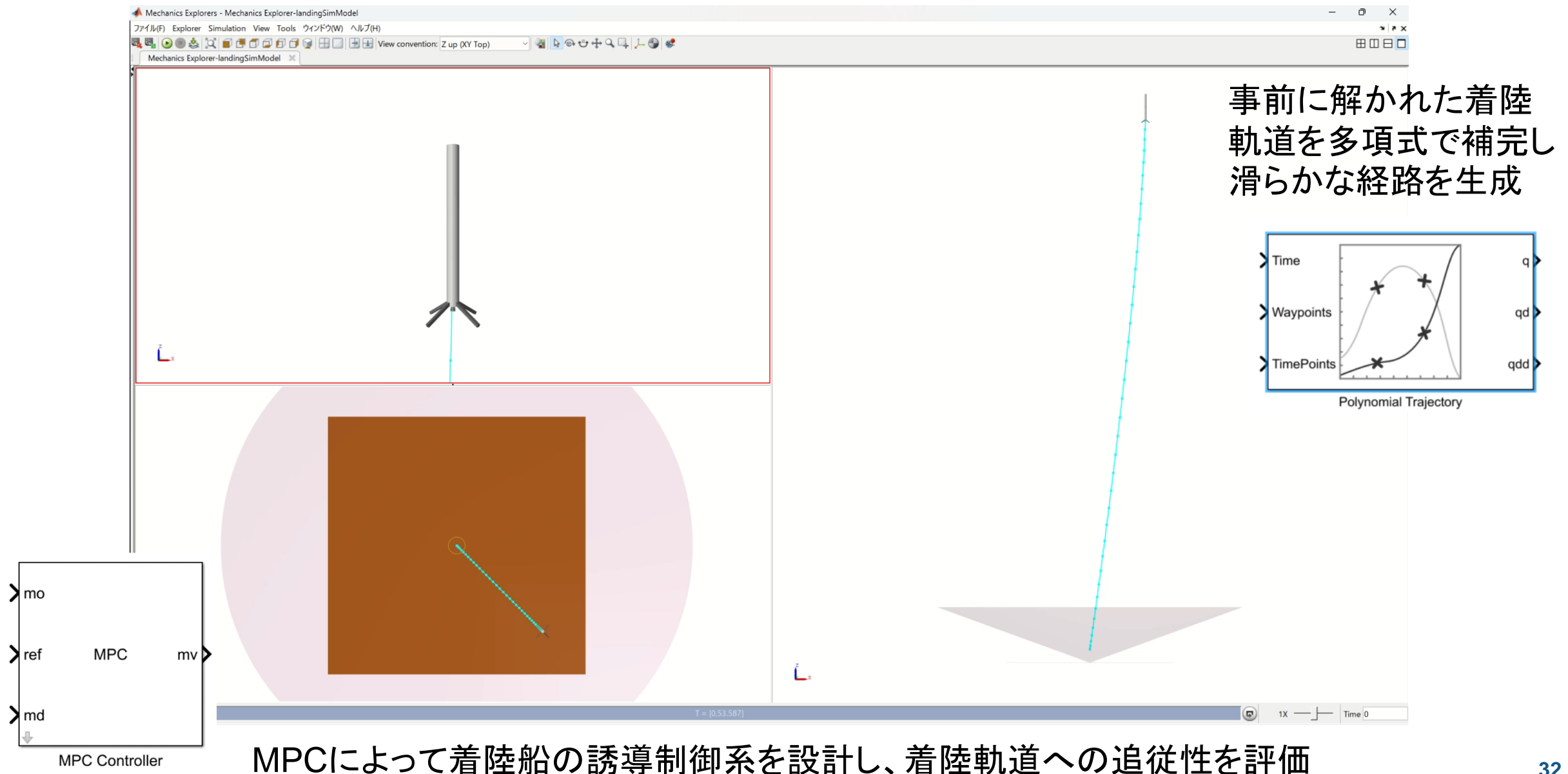
着陸軌道の計算結果



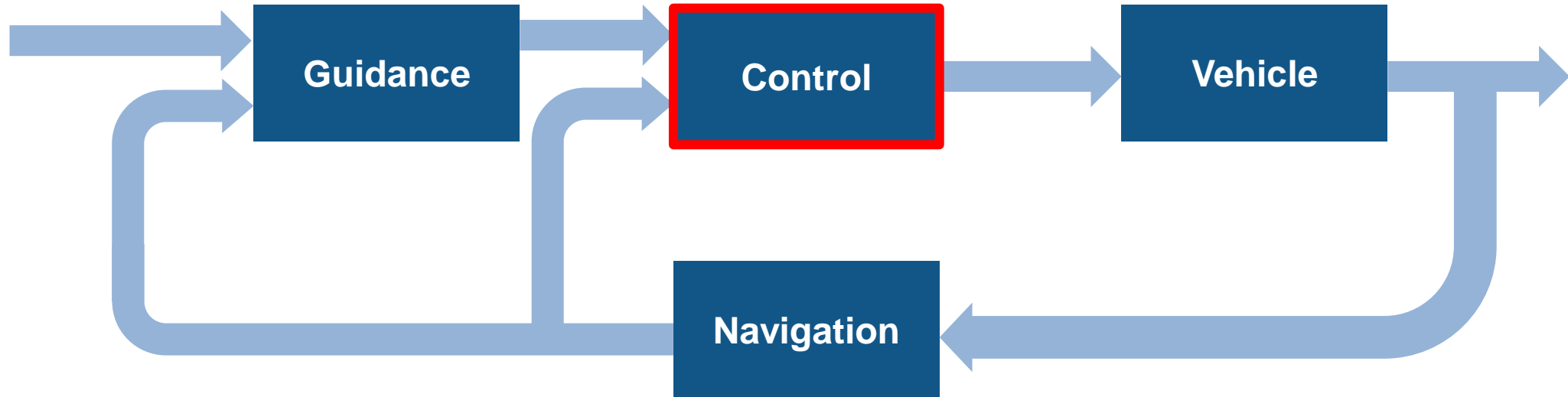
動力降下開始地点から目標地点までの2点境界値問題を構成し、各種制約を考慮した燃料消費量が最少な軌道を設計



Simscape Multibodyを用いた6DOFシミュレーション



GNC (Guidance, Navigation and Control)

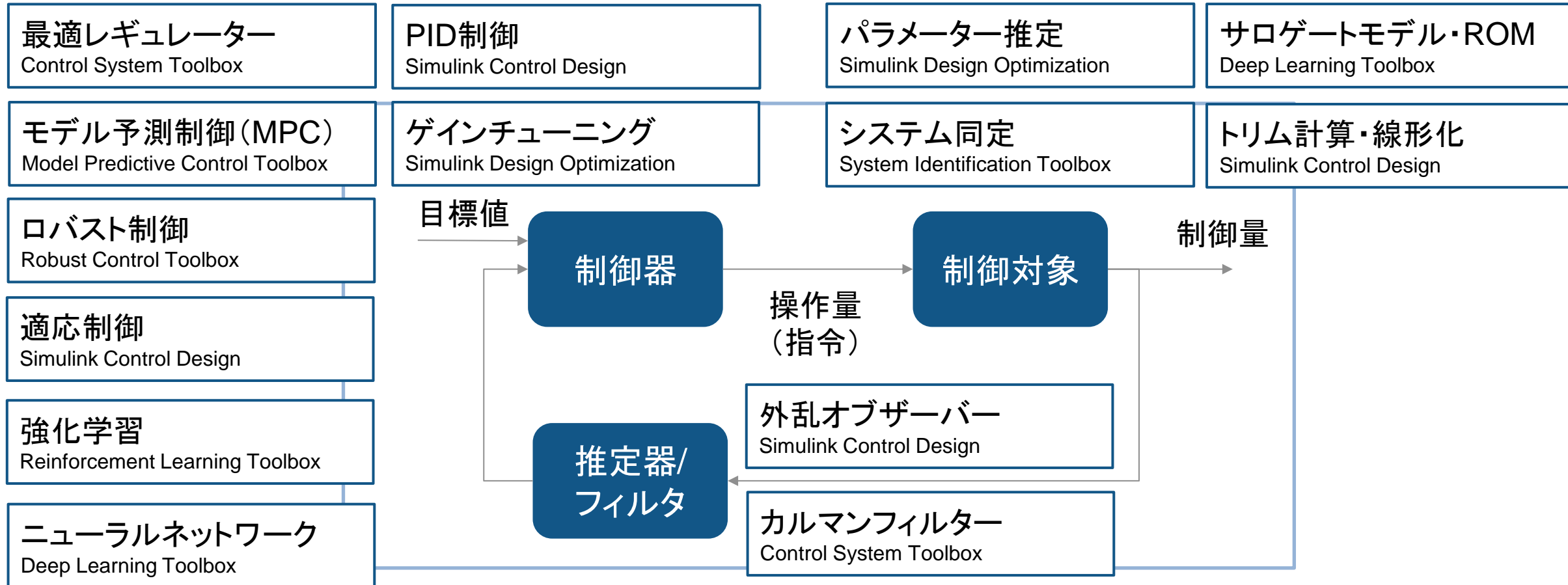


Guidance: 機体を定められた軌道に基づき誘導する

Control: 軌道を実現するための制御と安定性を実現する

Navigation: 機体の現在の飛行状態を計測し航法する

ツールを活用し、制御系を手軽に素早くモデル化

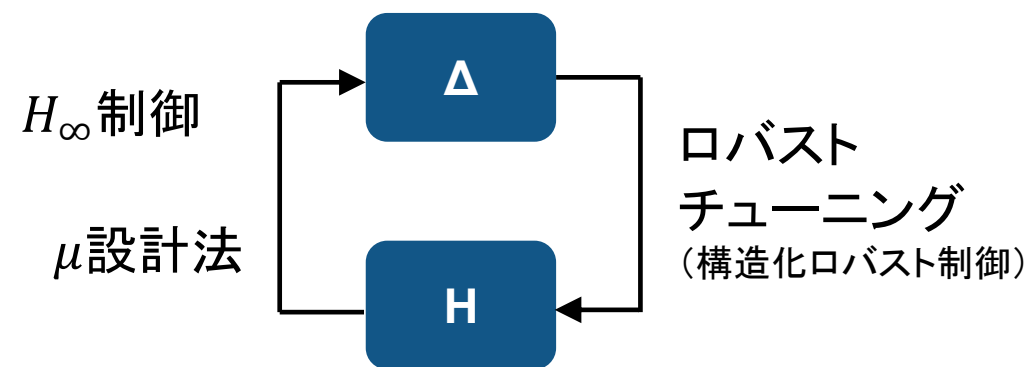
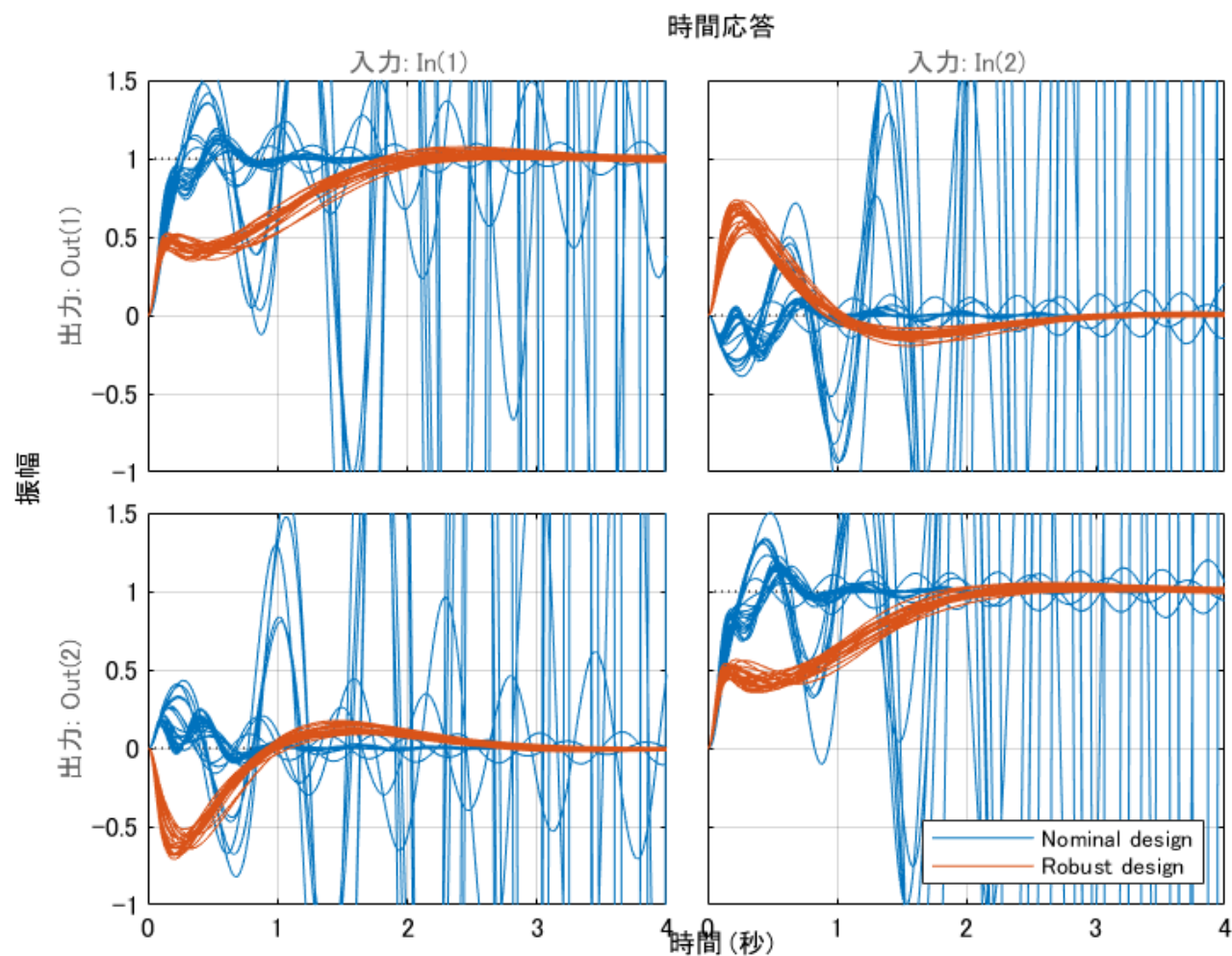


Simulink 標準ライブラリ

基本演算ブロック

例題 ロバスト制御に基づく衛星の姿勢制御系設計

Robust Control Toolbox



制御対象の不確かな変動を考慮した姿勢
制御系をロバスト制御理論をベースに設計

[Link](#)

所有するモデルに自動調整を適用し、工数削減・性能向上を達成する

入力

制御定数指定

モデルパラメータ
(ワークスペース変数)

目標性能仕様

性能仕様定義ブロック

応答オプティマイザ
Simulink Design Optimization

出力

調整結果

- パラメータ値
- 応答性能可視化
- 最適化進行状況レポート

自動調整

使いどころ

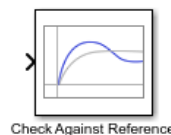
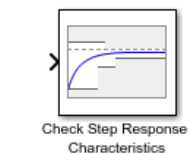
- 制御性能仕様決め
- 制御性能仕様を満足する
制御定数の適合

高速リスタート、並列化にも対応

数値最適化技術

Optimization Toolbox

時間
応答

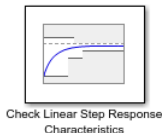
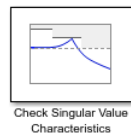
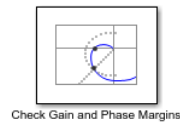
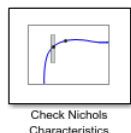
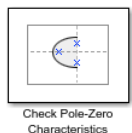
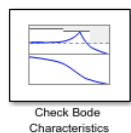


上下限

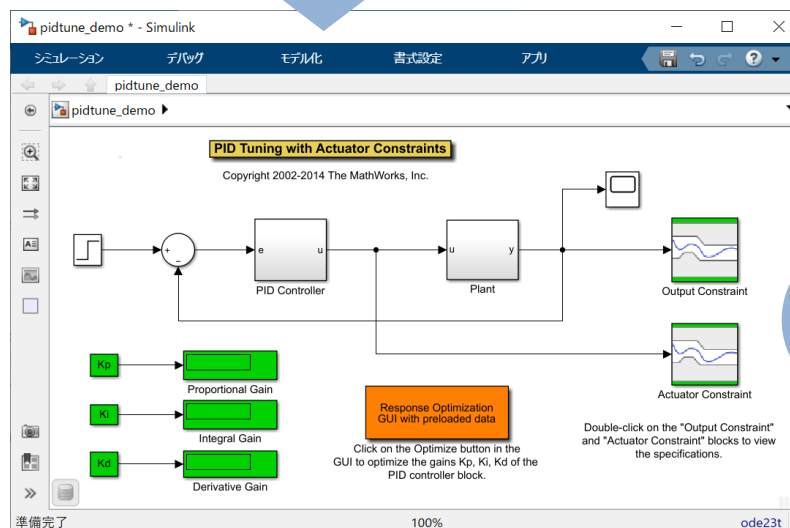
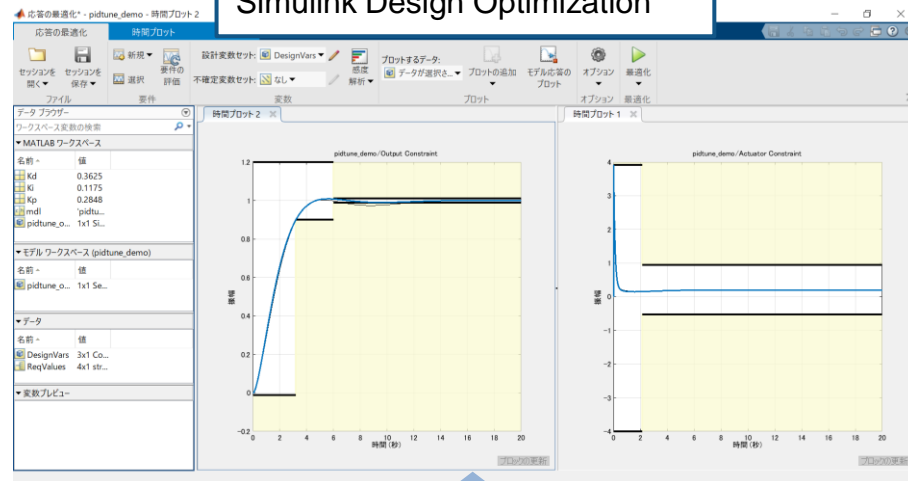
ステップ応答

目標軌道

周波数
応答



ゲイン上限、極配置
安定余裕など



並列計算を利用したSimulinkのモンテカルロシミュレーション

Parallel Computing Toolbox

シナリオに基づきシミュレーション

標本の抽出

評価

成功
or
失敗?

評価を行って次のシミュレーションへ

複数回のシミュレーションを並列計算によって効率的に回す

```
simOut = parsim(in,Name,Value)
```

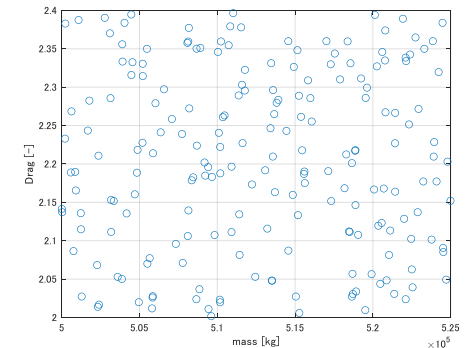
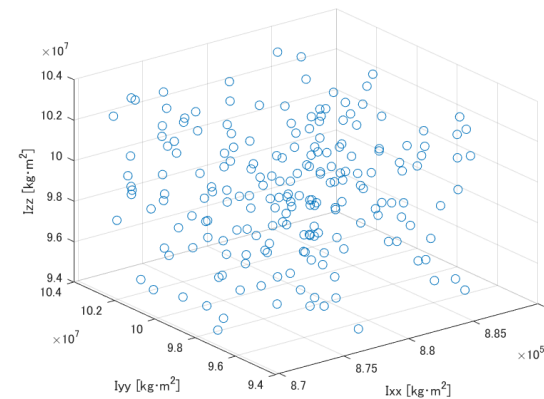
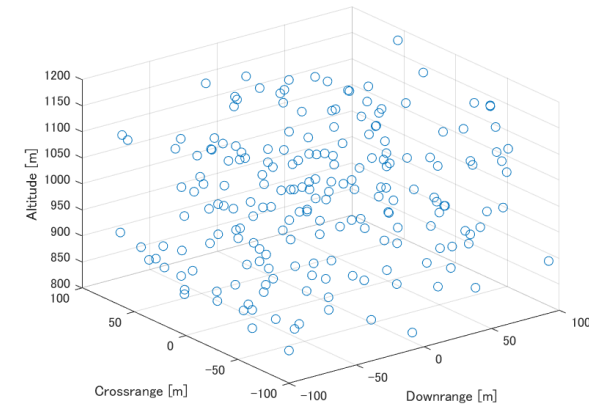
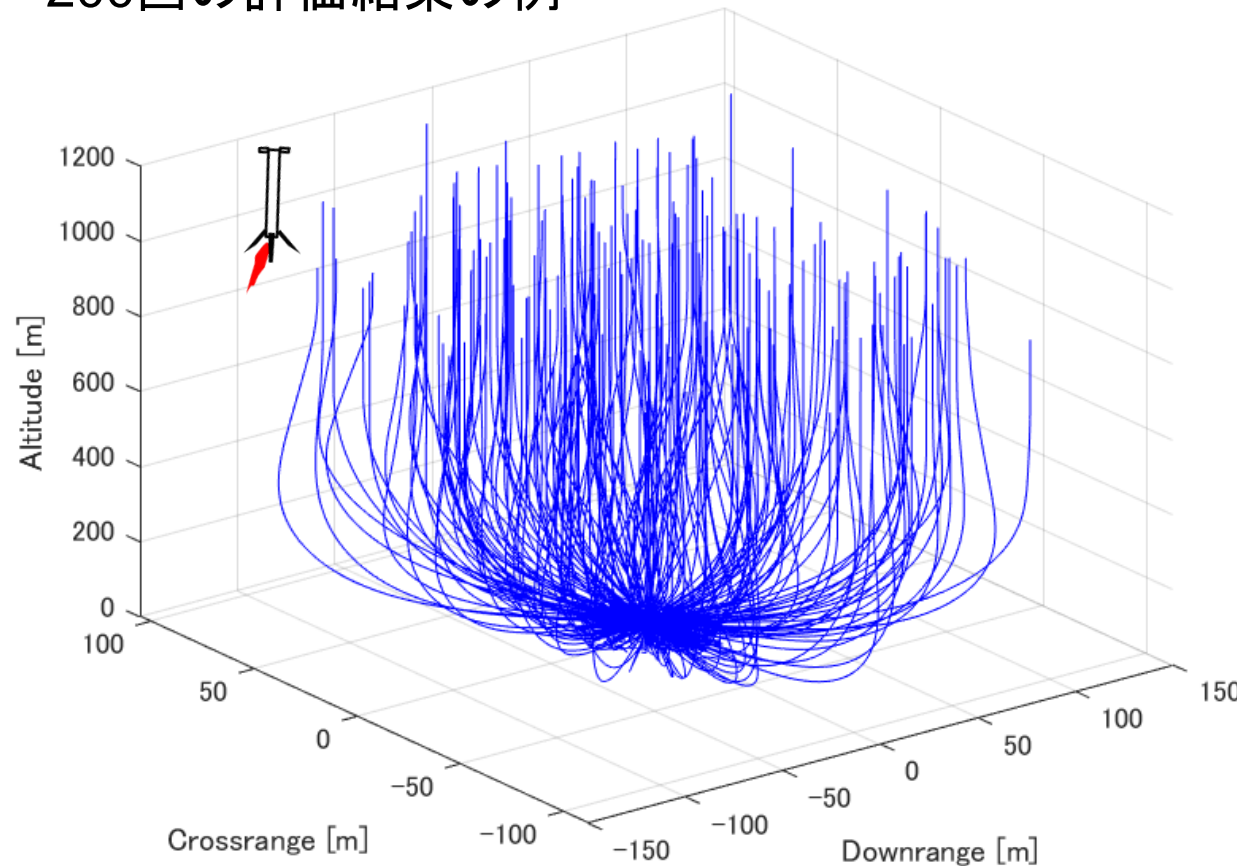


[Help Link](#)

モンテカルロシミュレーション(MCS)によって非線形システム全体のロバスト性やミッションの信頼性を評価

例 MCSによる再利用ロケットの着陸制御の評価

✓ 200回の評価結果の例

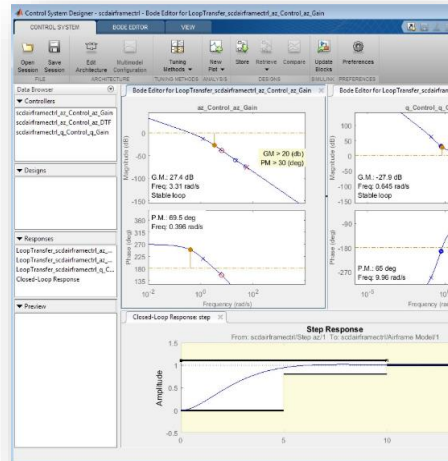


不確定パラメーターの分布

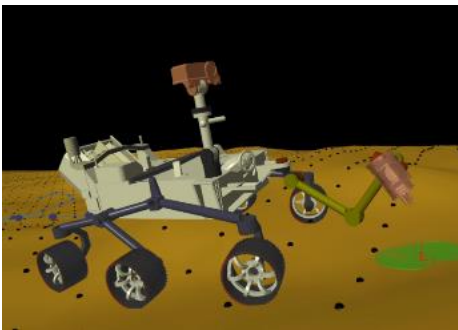
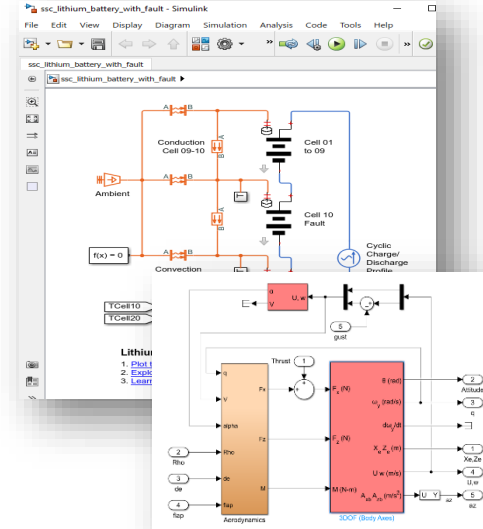
初期位置、速度、姿勢角、慣性モーメント、空力パラメーターなど考えられ得る不確定性を考慮した飛行シミュレーションを多数回実施し、システムの信頼性・堅牢性を統計的に評価する

アプリケーション領域

制御(GNC)



プラントモデリング & シミュレーション解析



MATLAB及びSimulinkは航空宇宙システムのプラントモデリング、誘導制御系の設計をサポートします



Accelerating the pace of engineering and science

© 2024 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.