

2023-5-31



【MATLAB EXPO 2023 Japan】
適度な力制御を実現する空気圧ロボットの
開発とシミュレーション活用

東レエンジニアリング株式会社
開発部門 開発部 杉原洋樹

TRENG

ご報告内容（目次）

1. 会社紹介
2. 炭素繊維テープ材料貼付装置（AFP）の紹介
3. MATLAB[®]／Simulink[®]製品活用の背景
4. モデルベース開発事例の紹介
 - （1）機構開発
 - （2）制御モデル開発
 - （3）装置への実装
5. まとめ

1. 会社紹介

設立 : 1960年

売上高 : 966億円 (2022年3月期)

従業員数 : 1,998人 (2022年3月末現在)

事業内容 : プラント建設、FA、各種製造装置販売

エンジニアリング事業



プラント建設



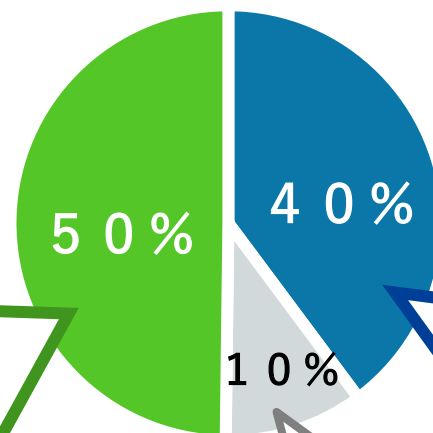
FA



メンテナンス

事業別売上構成

(2022年3月期実績)



その他
海外関係会社等

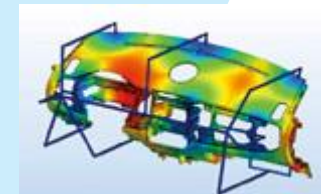
メカトロファインテック事業



FPD・半導体製造設備



フィルム製造・
コンバーティング装置



計測・
ソフトウェア

1. 会社紹介

製品開発：

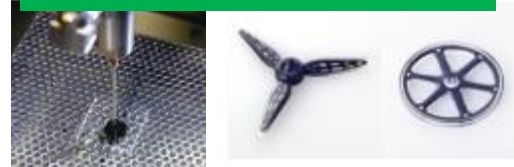
3つの重点分野

①グリーンイノベーション
カーボンニュートラルへの貢献

AFP/ATL装置



複合材3Dプリンター



②ライフイノベーション
健康と福祉の推進に貢献

核酸医薬品
合成装置



手術支援
ロボット



③AI・IoT
新しいものづくり

半導体実装装置

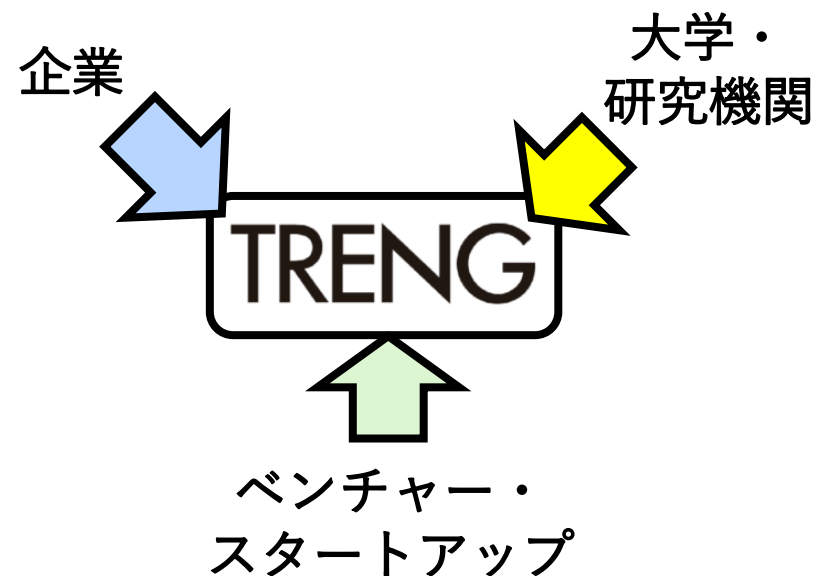


人工知能



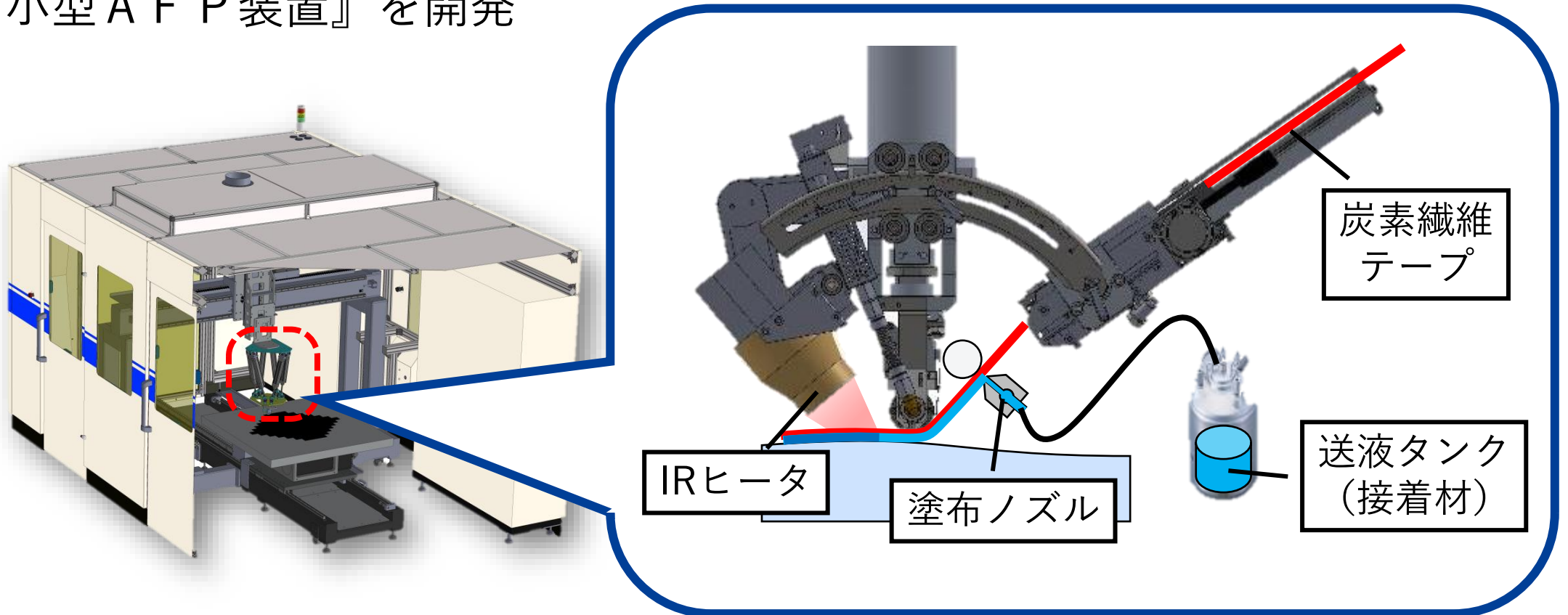
オープンイノベーション

国内外の企業・大学と
連携しながら開発を推進



2. 炭素繊維貼り付け装置（AFP）

- AFP / ATL（Automated Fiber Placement / Automated Tape Layup）
⇒ 炭素繊維で強化したテープ材料などの貼り付け成形技術
- 自動車、新規モビリティ分野などをターゲットとした『小型AFP装置』を開発



2. 炭素繊維貼り付け装置 (AFP)



東京工業大学
Tokyo Institute of Technology



只野准教授

空気圧制御技術

スタートアップ



手術支援ロボット

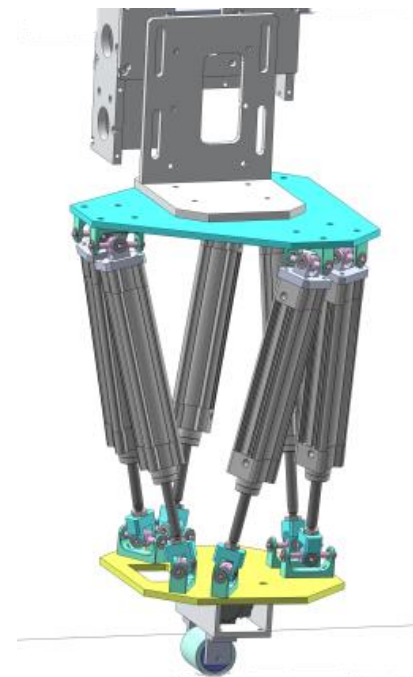


産業用途向け
共同開発

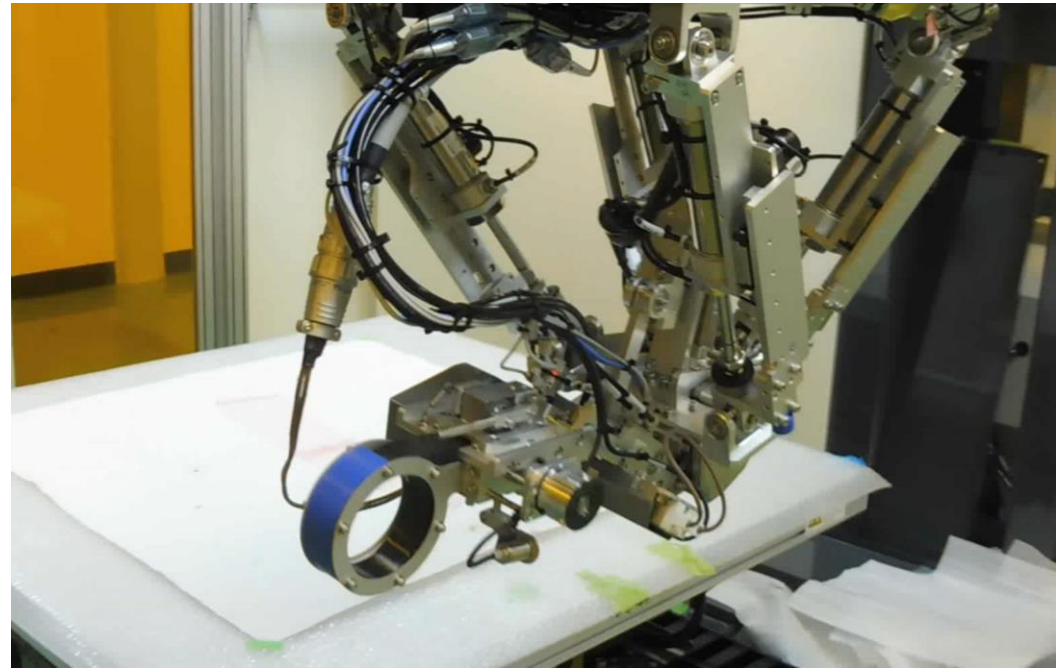
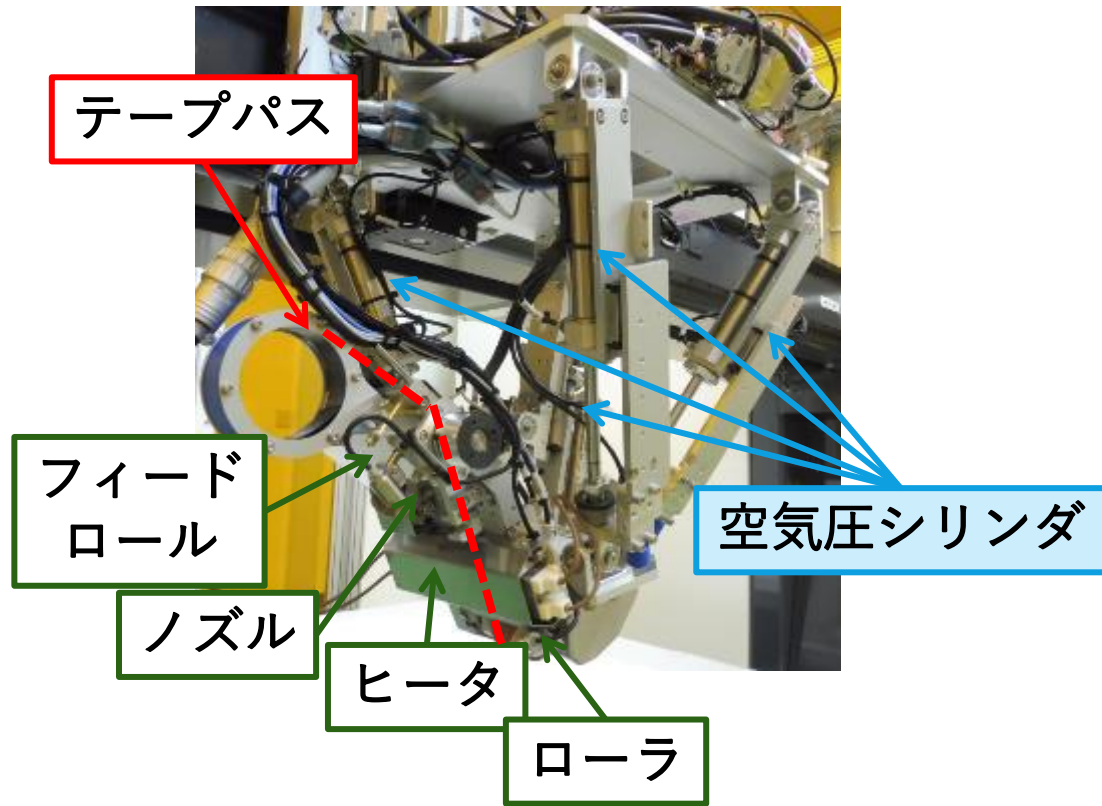
TRENG

出資・
事業化支援

空気圧シリンダ
によるロボット



2. 炭素繊維貼り付け装置 (AFP)



パラレルリンクロボット動作例

空気圧パラレルリンク機構によるロボットを採用することで、
形状に応じた曲面ならい機能を有するテープ貼り付けを実現

3. MATLAB®/Simulink®製品活用の背景

製品開発における課題：



機械担当 A

案件によってシリンダ本数が変わる
設計に自由度を持たせたい



機械担当 B

開発予算・スケジュールから
実機試作は最小化したい…



ソフト担当 C

接触反力も想定した制御設計をしたいので
機構や空気圧のシミュレーションもしたい

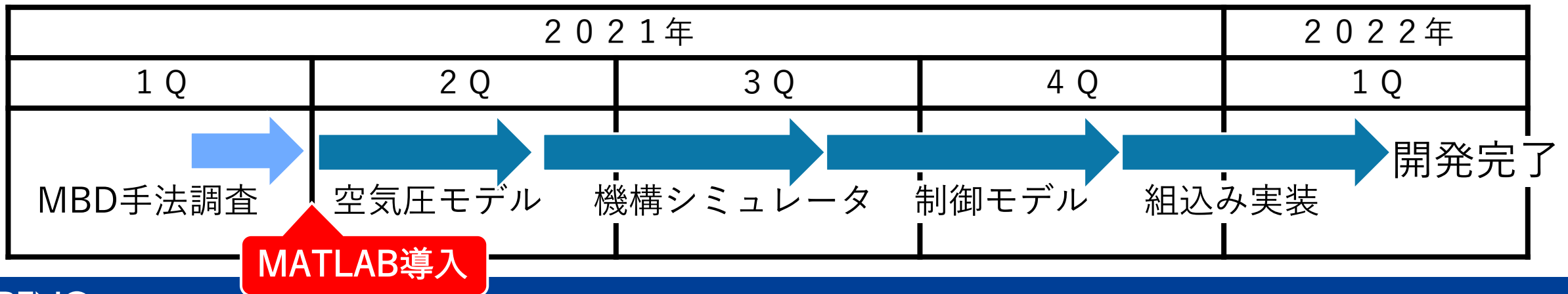
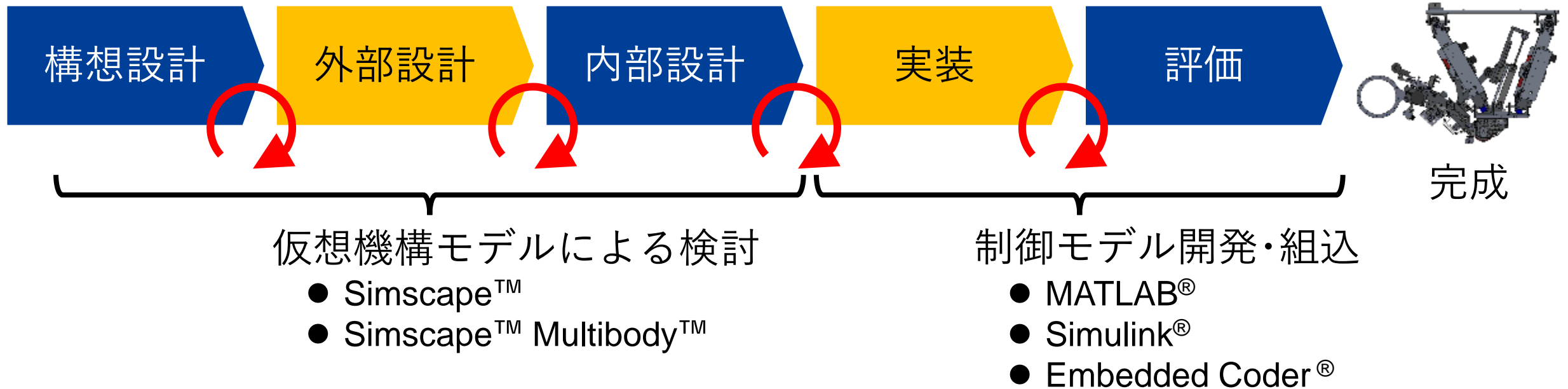


制御担当 D

安全性も考慮してPLCで動かしたい

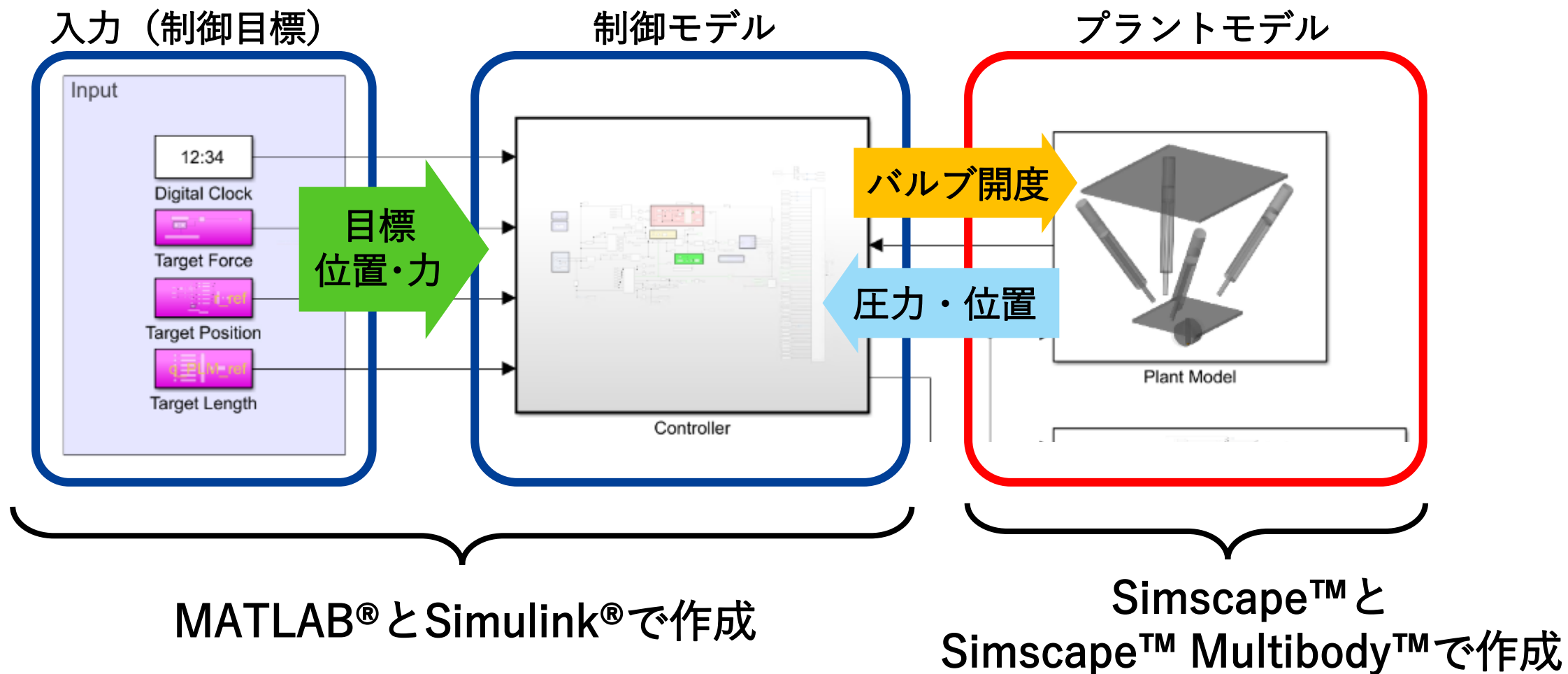


3. MATLAB / Simulink製品活用の背景



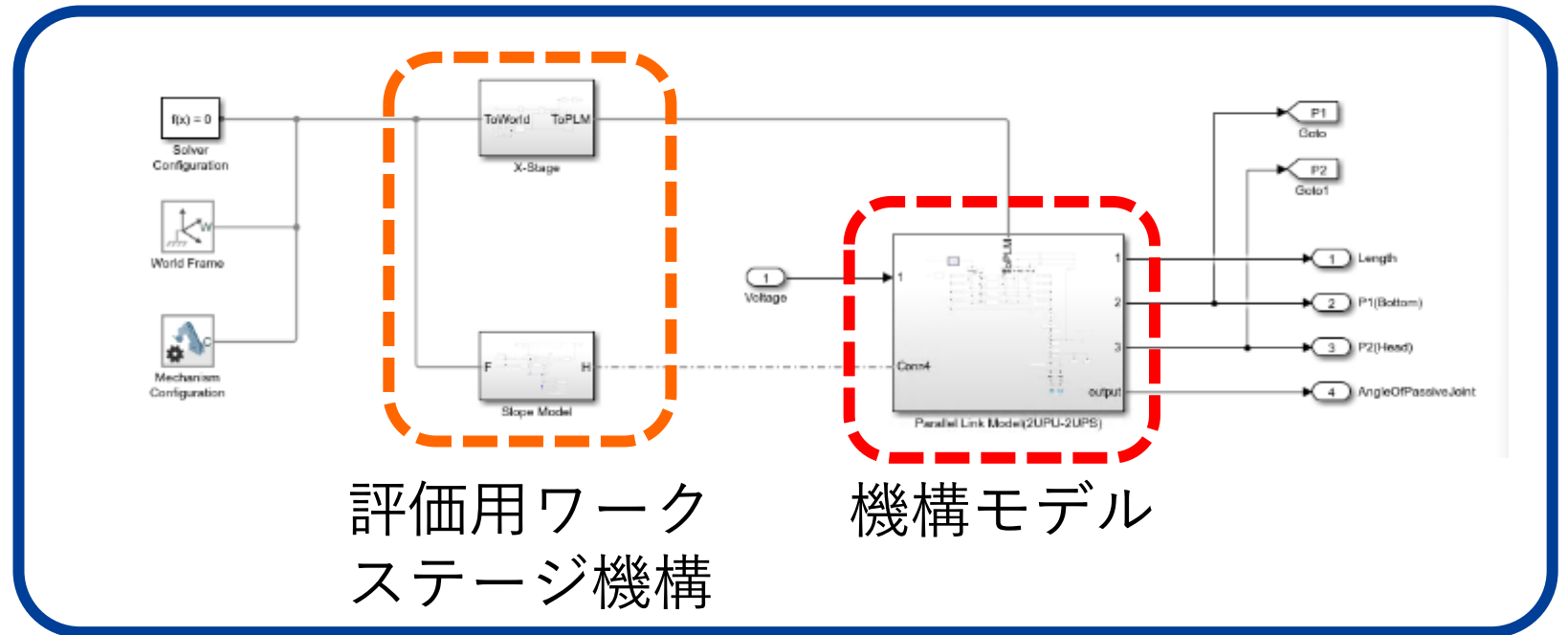
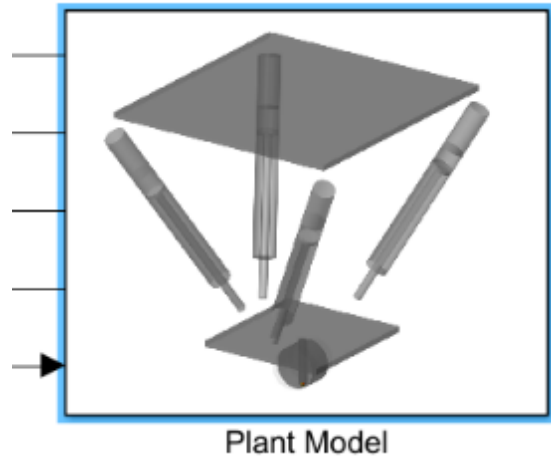
4. モデルベース開発事例

モデル全体



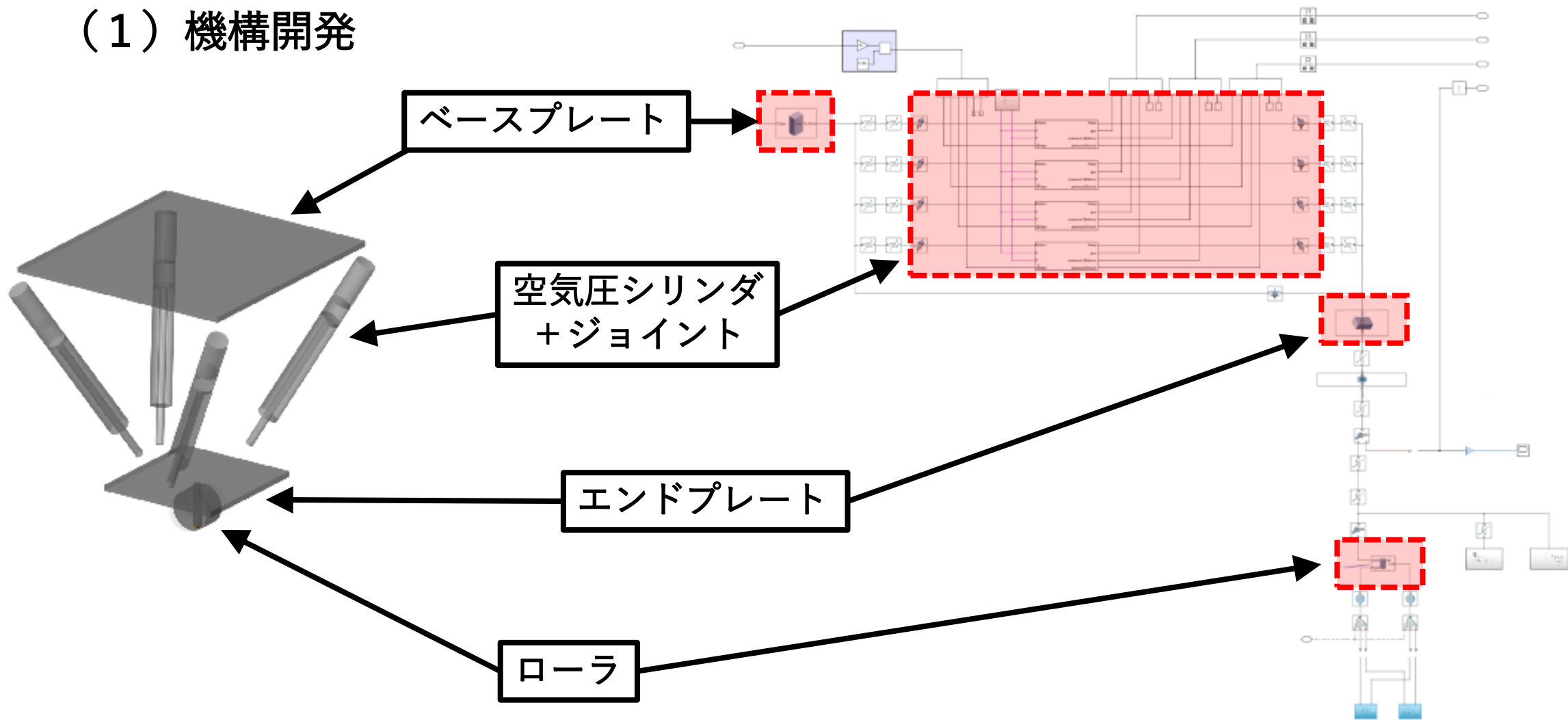
4. モデルベース開発事例

(1) 機構開発



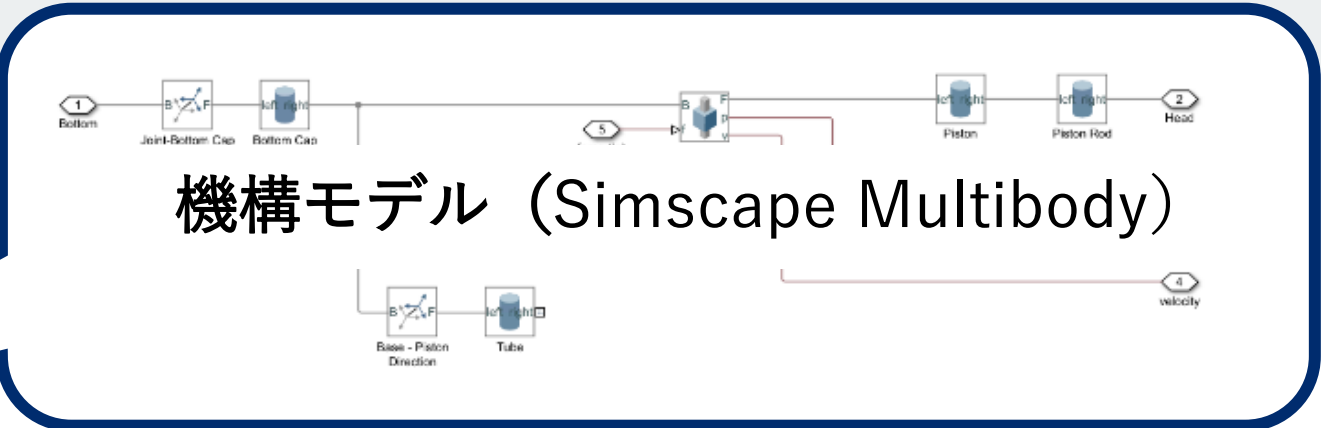
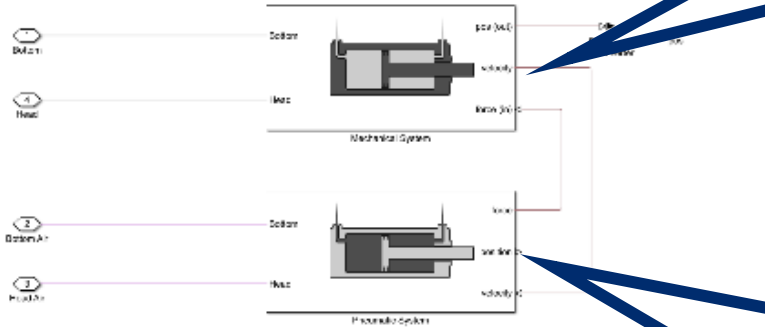
4. モデルベース開発事例

(1) 機構開発



4. モデルベース開発事例

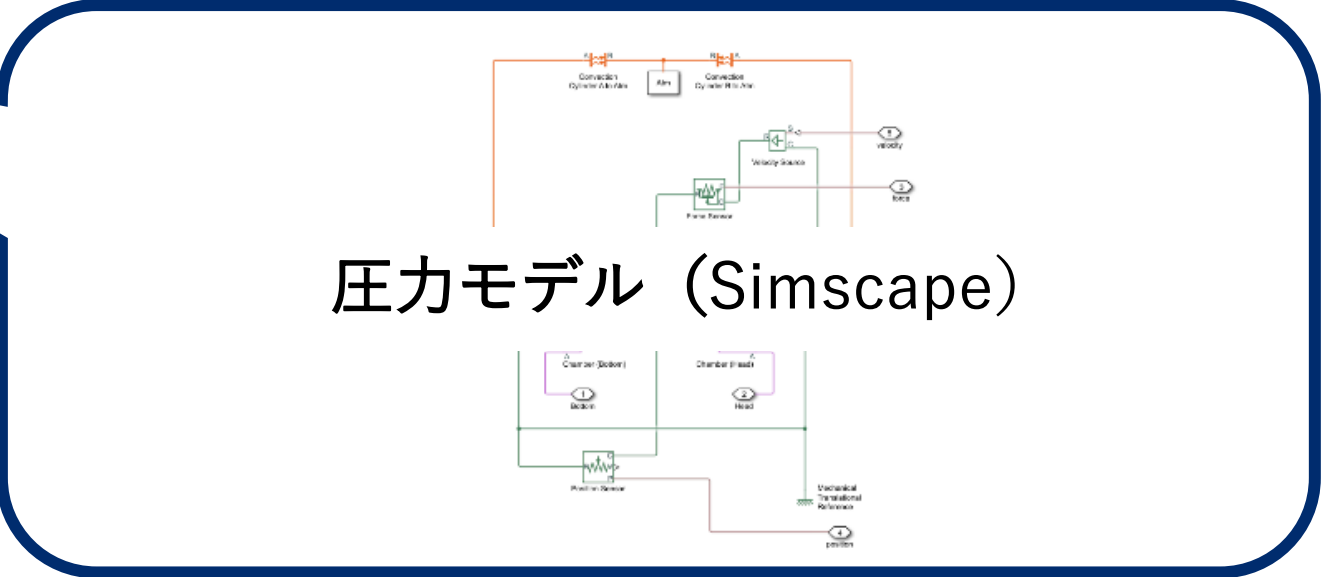
(1) 機構開発



機構モデル (Simscape Multibody)



相互作用を
モデル表現

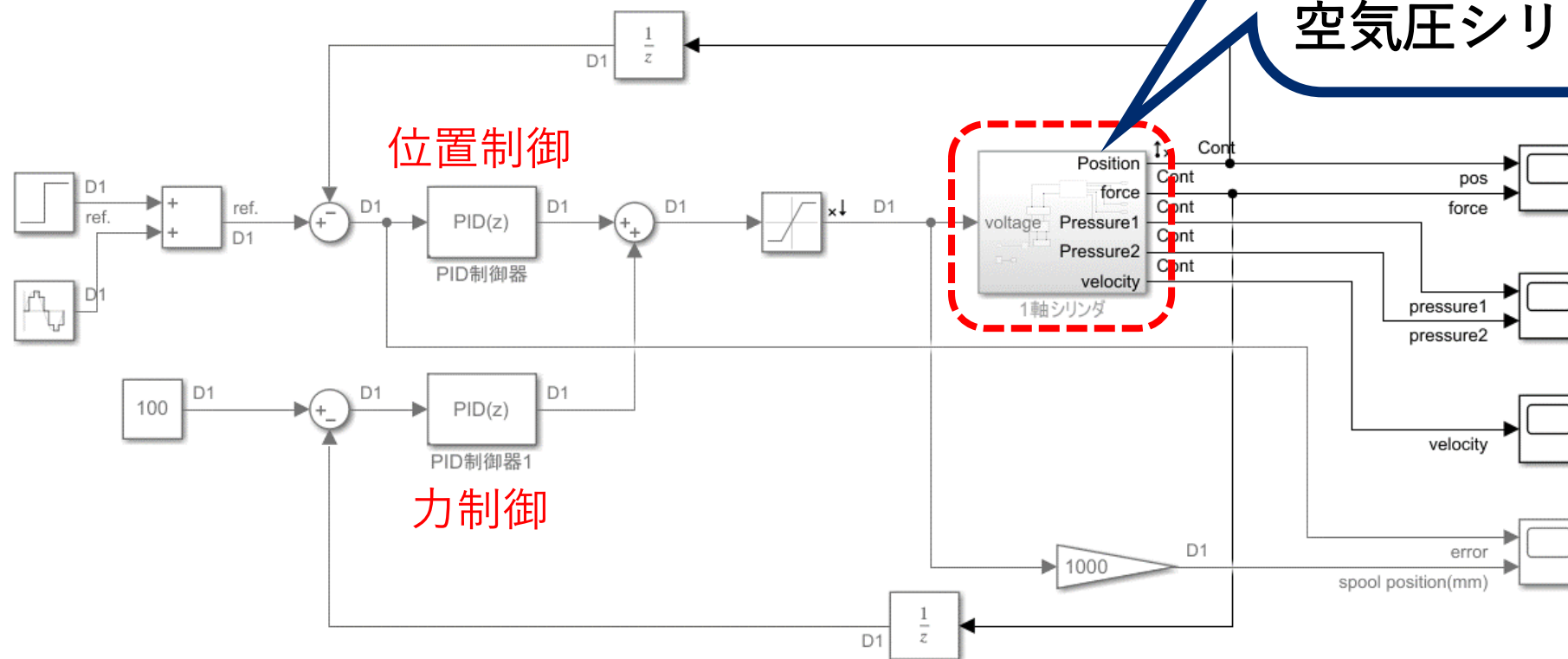
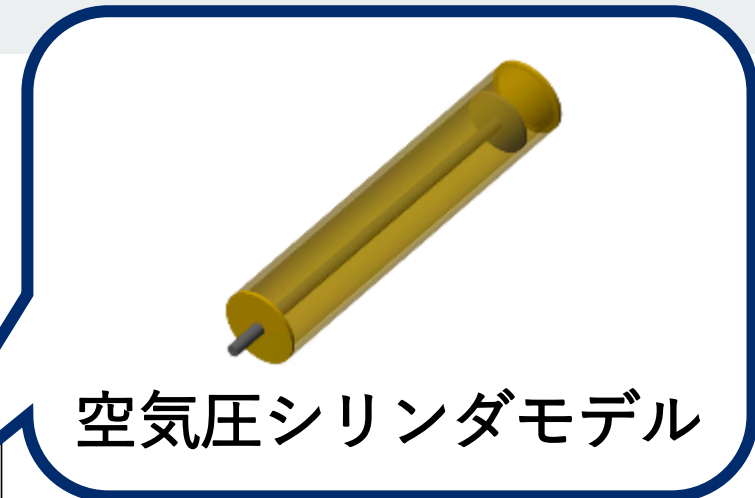


圧力モデル (Simscape)

4. モデルベース開発事例

(1) 機構開発

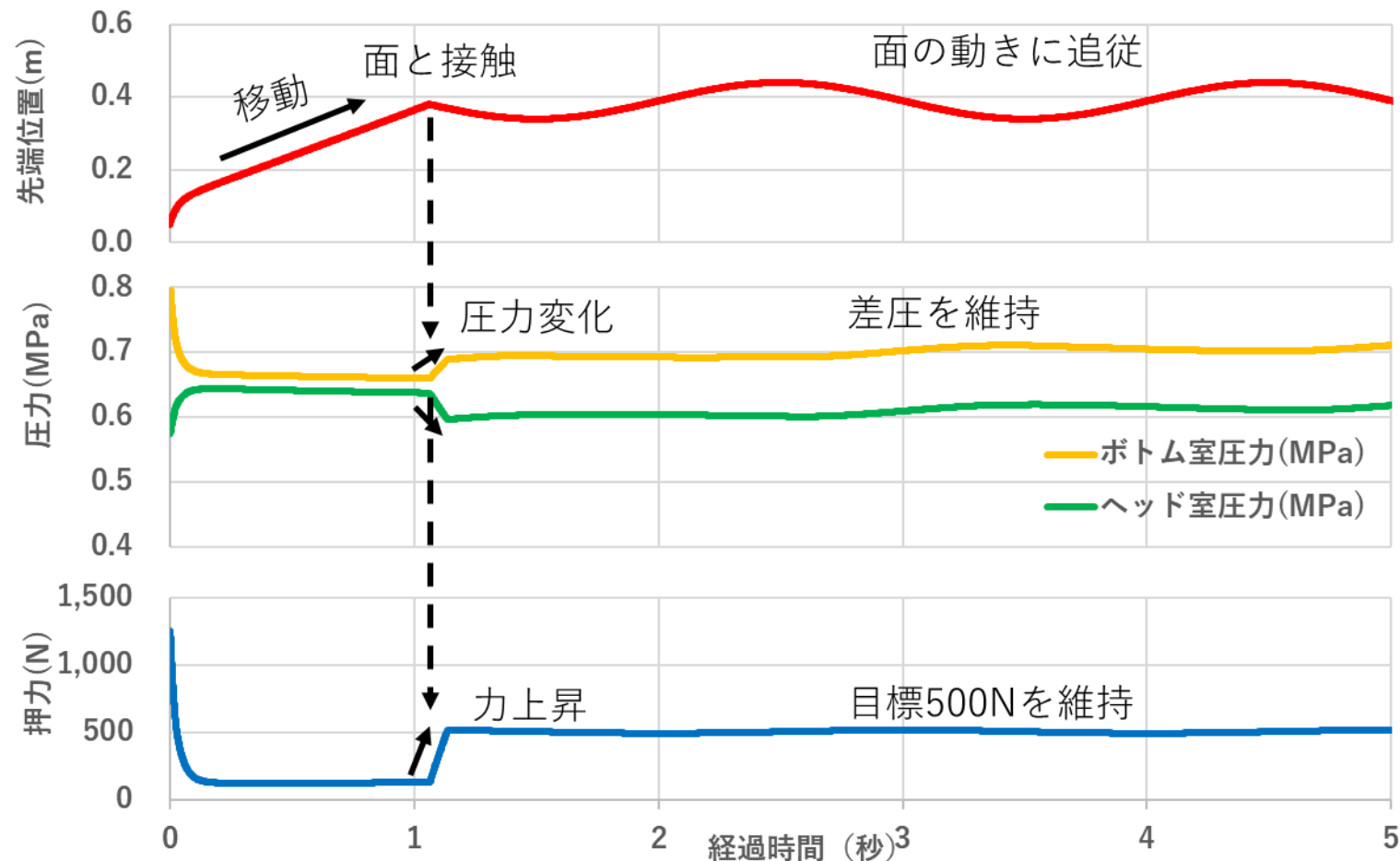
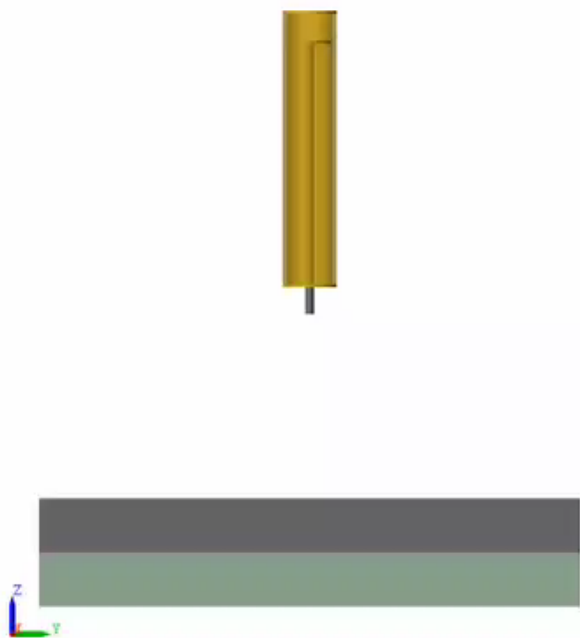
空気圧シリンダ 1 本で
位置と力の制御が実施できるか味見評価



4. モデルベース開発事例

(1) 機構開発

シリンダ1本の基本モデルで動作検証



加工面との接触応答も含めてシミュレーションできると確認

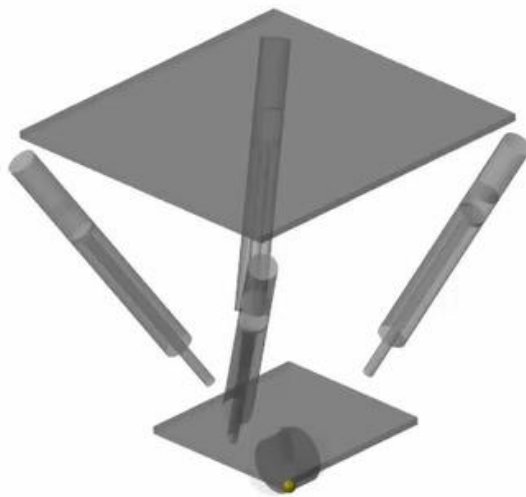
4. モデルベース開発事例

(1) 機構開発

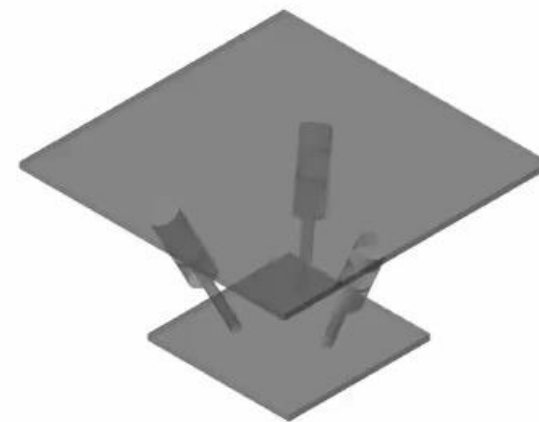
脚の本数を変えた評価の例：



6本脚モデル
(自由度 6)



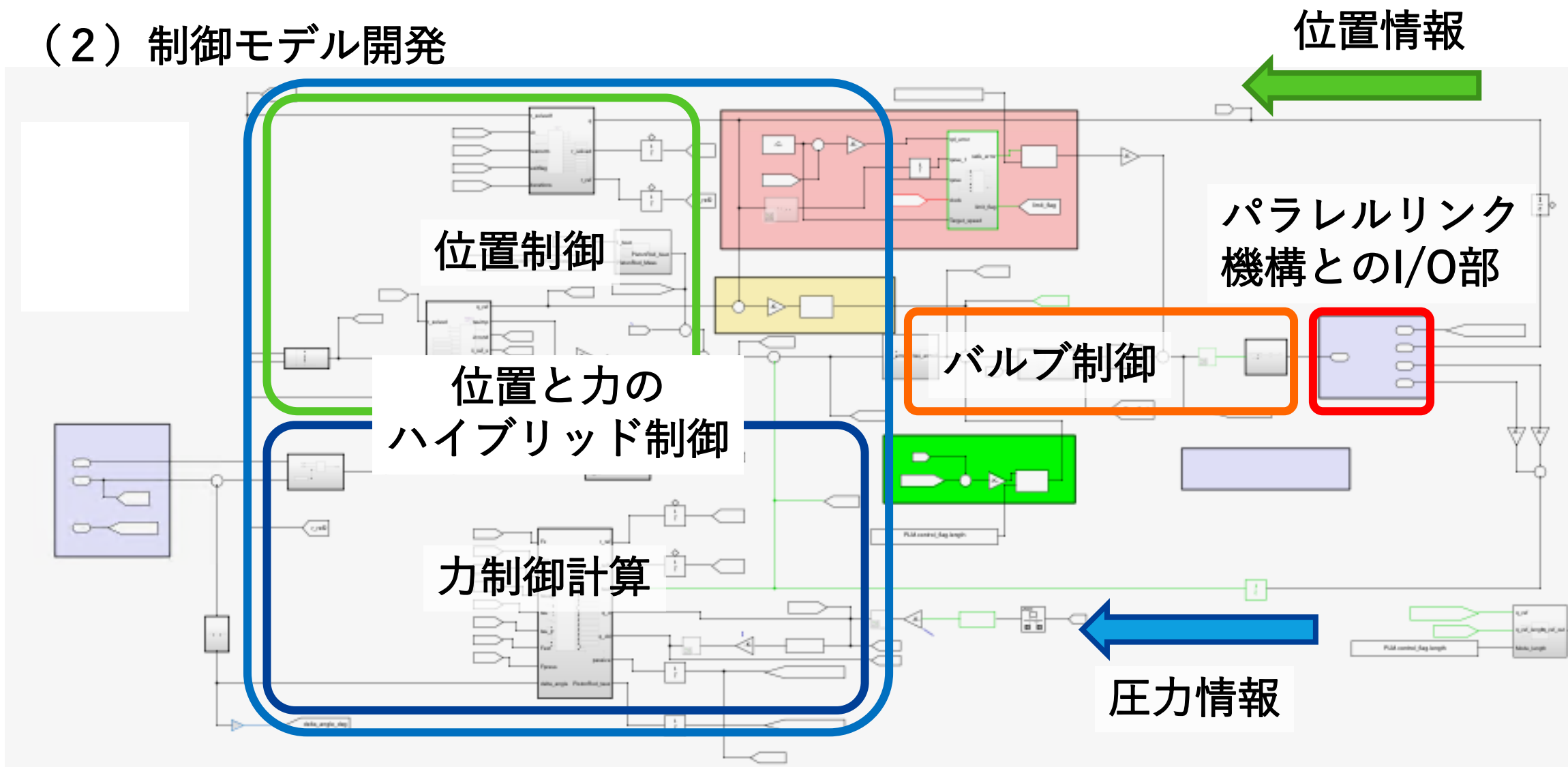
4本脚モデル
(自由度 4)



3本脚モデル
(自由度 3)

4. モデルベース開発事例

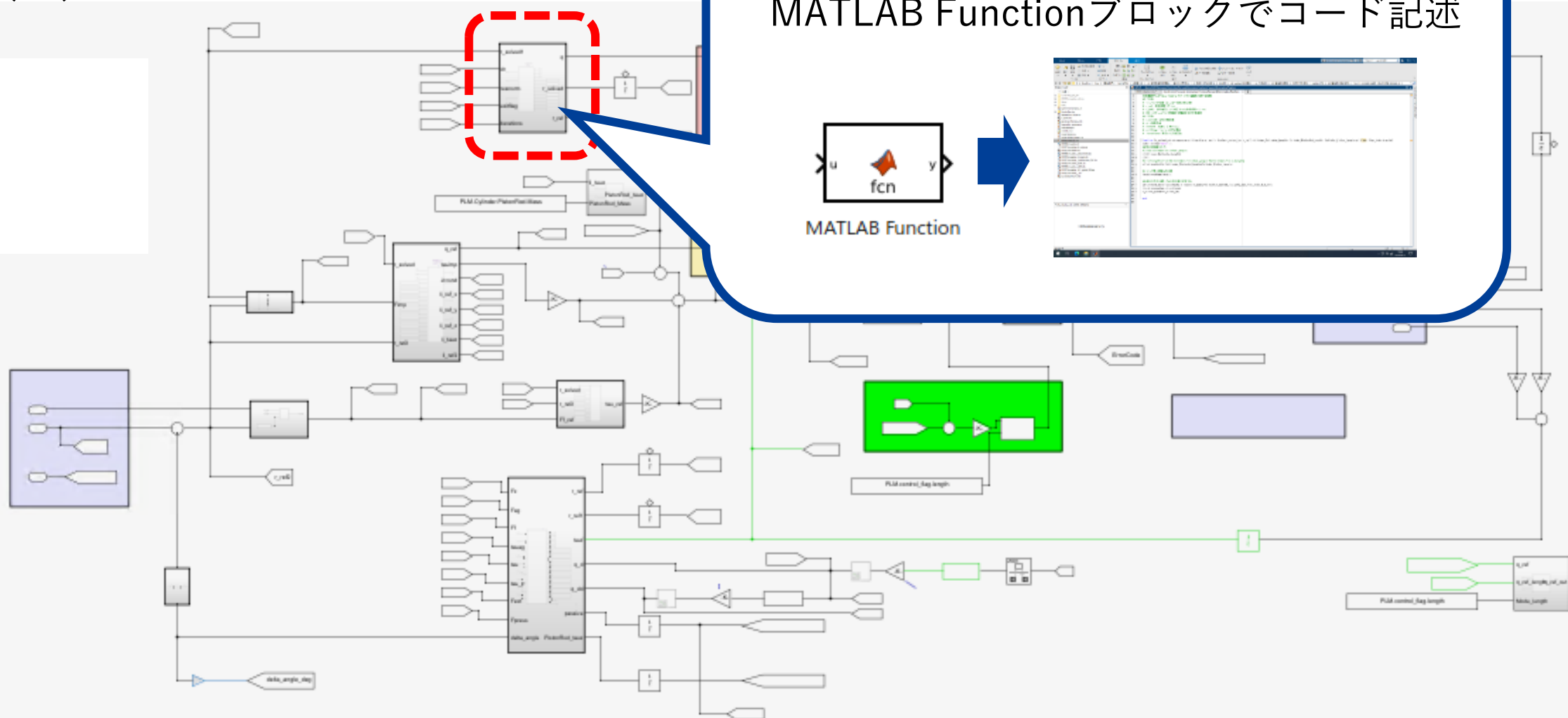
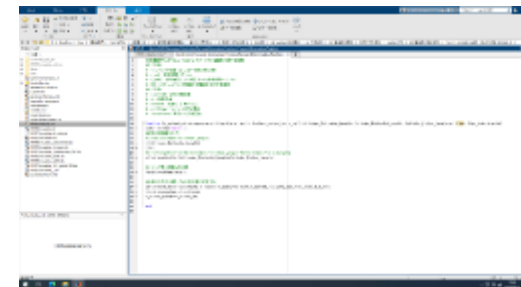
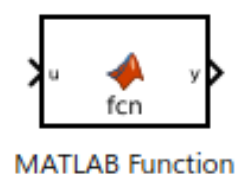
(2) 制御モデル開発



4. モデルベース開発事例

(2) 制御モデル開発

ベクトル計算などの細かいところは
MATLAB Functionブロックでコード記述



4. モデルベース開発事例

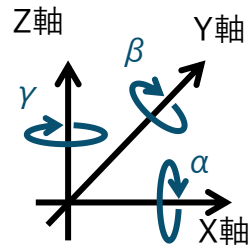
(2) 制御モデル開発

シリンダ長さ・力 \rightarrow 指先の姿勢・力の計算（順運動学）には
制御ループ内でヤコビ行列 J の計算が必要

各シリンダの長さ： $l_1 \sim l_6$

姿勢ベクトル： r は以下で定義

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$



$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial x} & \frac{\partial l_1}{\partial y} & \frac{\partial l_1}{\partial z} & \frac{\partial l_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial l_1}{\partial \beta} & \frac{\partial l_1}{\partial \beta} \\ \frac{\partial l_2}{\partial x} & \frac{\partial l_2}{\partial y} & \frac{\partial l_2}{\partial z} & \frac{\partial l_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial l_2}{\partial \beta} & \frac{\partial l_2}{\partial \beta} \\ \frac{\partial l_3}{\partial x} & \frac{\partial l_3}{\partial y} & \frac{\partial l_3}{\partial z} & \frac{\partial l_3}{\partial \alpha} & \frac{\partial l_3}{\partial \beta} & \frac{\partial l_3}{\partial \beta} \\ \frac{\partial l_4}{\partial x} & \frac{\partial l_4}{\partial y} & \frac{\partial l_4}{\partial z} & \frac{\partial l_4}{\partial \alpha} & \frac{\partial l_4}{\partial \beta} & \frac{\partial l_4}{\partial \beta} \\ \frac{\partial l_5}{\partial x} & \frac{\partial l_5}{\partial y} & \frac{\partial l_5}{\partial z} & \frac{\partial l_5}{\partial \alpha} & \frac{\partial l_5}{\partial \beta} & \frac{\partial l_5}{\partial \beta} \\ \frac{\partial l_6}{\partial x} & \frac{\partial l_6}{\partial y} & \frac{\partial l_6}{\partial z} & \frac{\partial l_6}{\partial \alpha} & \frac{\partial l_6}{\partial \beta} & \frac{\partial l_6}{\partial \beta} \end{bmatrix}$$

偏微分の式を 36 通り全て導出するのは大変...

4. モデルベース開発事例

(2) 制御モデル開発

Symbolic Math Toolbox™で
シンボル計算に対応した関数
jacobianで簡便に記述

→ 今度は処理時間が課題…
制御周期目標 (1 m s) を未達



MathWorksさんに技術相談
→ 関数変換を提案いただき解決

```
sym_J=jacobian(sym_len,sym_r);  
matlabFunction(sym_J,'File','Jacobian.m');
```



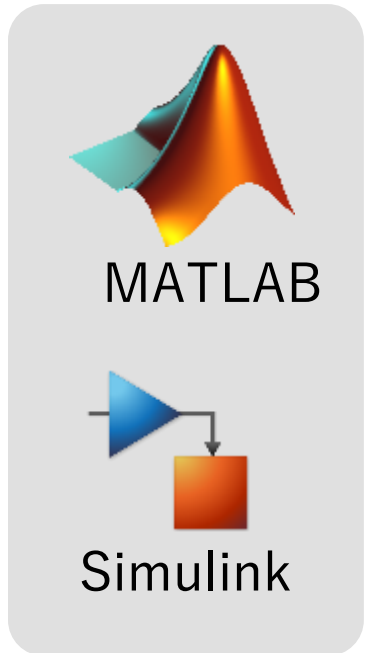
M-file

実行条件	MATLABコンソール	MATLAB コンソール	Embedded Coder®
特徴	シンボリック式で ヤコビ行列を導出	シンボリック式を MATLAB関数に変換	PC/PLC環境向け C++コードに変換
処理時間	× 141 m s	○ 0.033 m s	◎ 0.001 m s

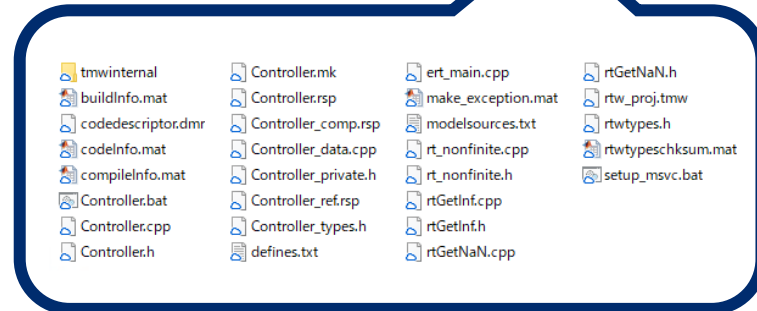
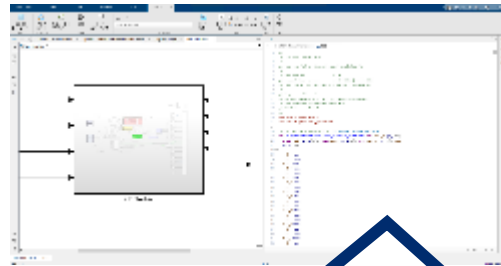
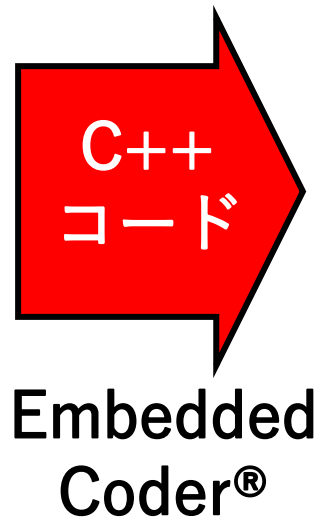
4. モデルベース開発事例

(3) 装置への実装

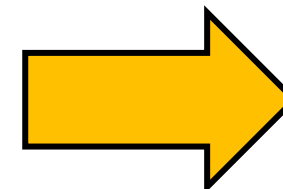
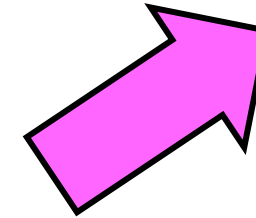
SimulinkモデルからC++コード自動生成
ローコード開発を実現できた



制御モデル



ライブラリ化



組込実装

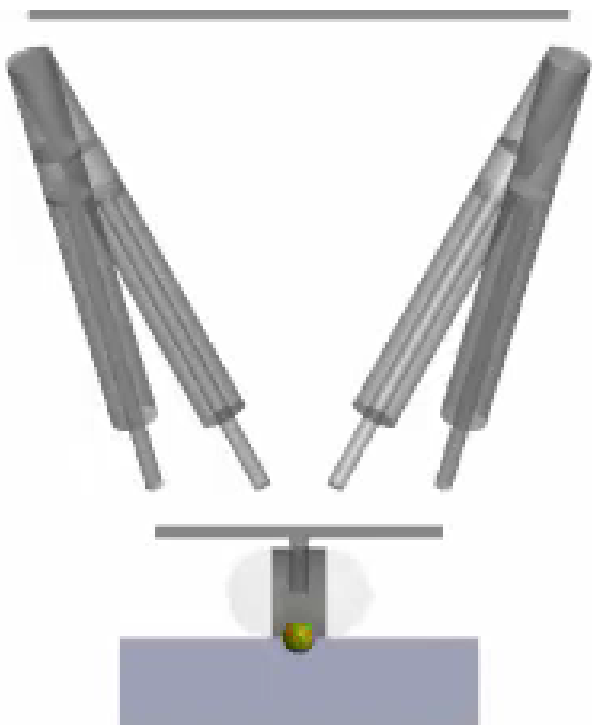


- 変換コードは手動での後修正なし
- PC運用版とPLC運用版とで同じコードで実装できた

4. モデルベース開発事例

(3) 装置への実装

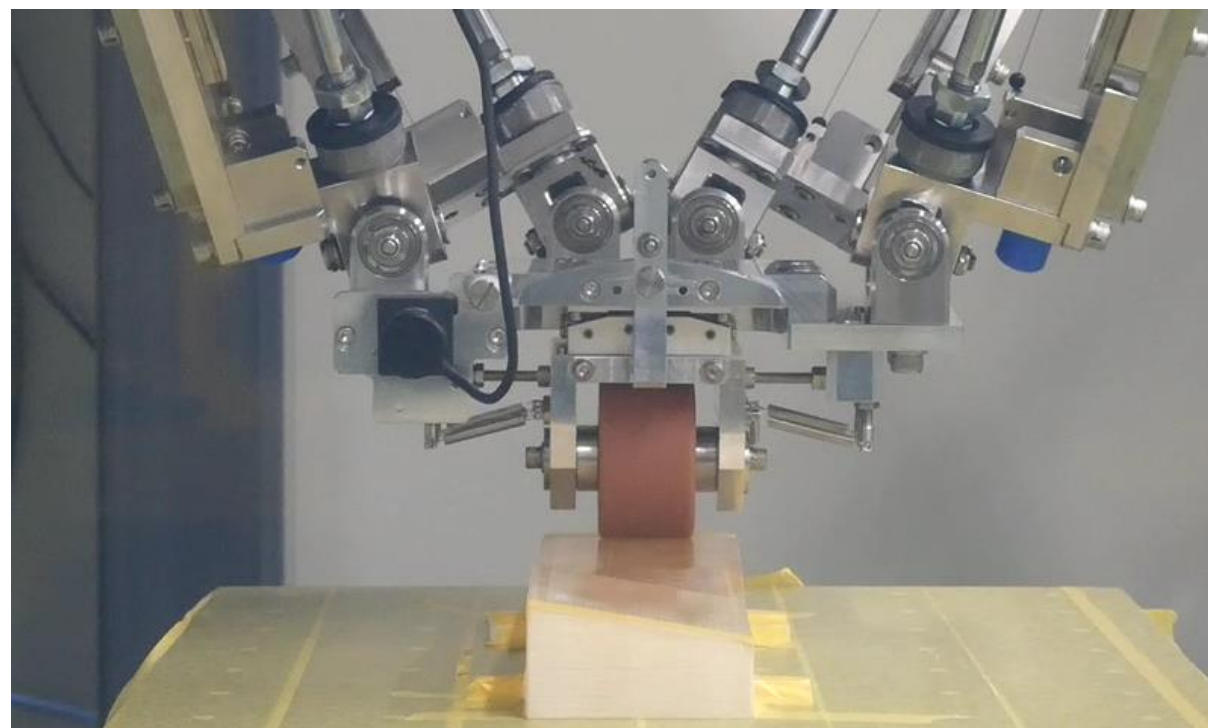
実機とシミュレーションとの結果比較



シミュレーション結果

傾斜板に対する追従試験：

- 傾斜角度 10度
- 搬送速度 100 mm/秒
- 制御目標 法線方向に50 N押付

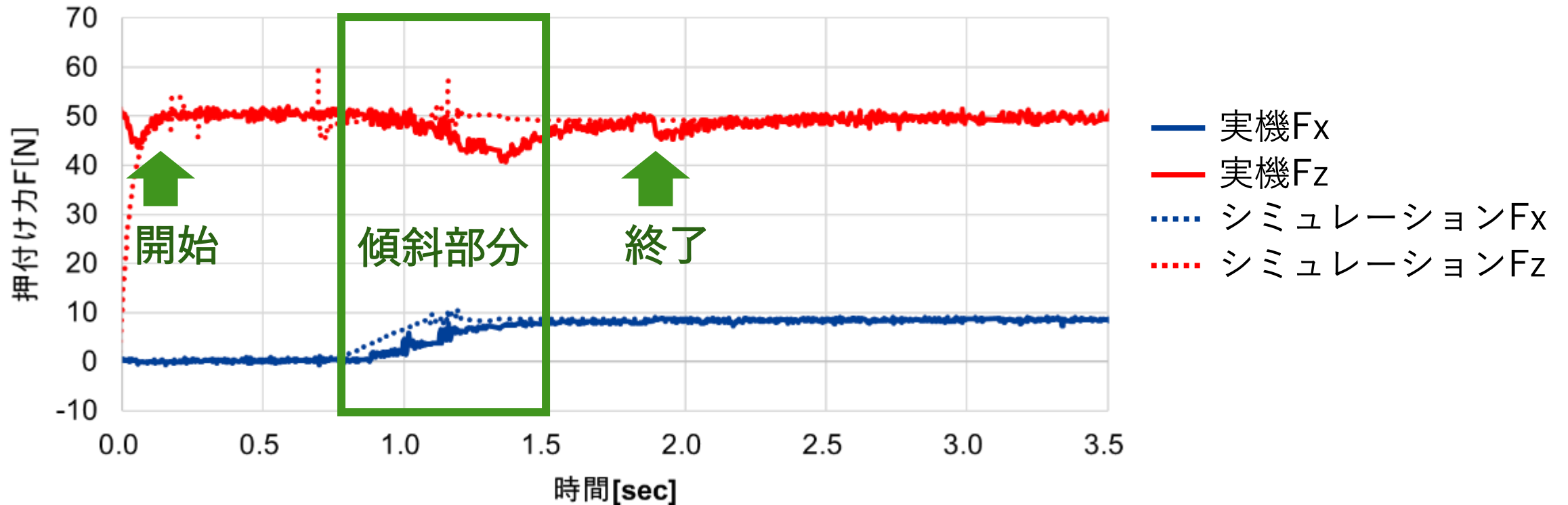


実機結果

4. モデルベース開発事例

(3) 装置への実装

実機とシミュレーションとの結果比較



実機と概ね挙動が一致することを確認できた

5. まとめ

モデルベース開発導入の効果：



機械担当 A

案件によってシリンダ本数が変わる
設計に自由度を持たせたい

Simulinkの活用でシリンダ本数に
依存しない制御モデルを設計できた



機械担当 B

開発予算・スケジュールから
実機試作は最小化したい…

機構の仮想モデルで検討を進め、
MBD導入後は試作 1 回のみとした



ソフト担当 C

接触反力も想定した制御設計をしたいので
機構や空気圧のシミュレーションもしたい

圧力変動や反力も考慮した
制御モデルを完成



制御担当 D

安全性も考慮してPLCで動かしたい

ローコード開発で**PLC**で
動作する制御モデルを実装

5. まとめ

(1) まとめ

- パラレルリンクロボットの開発にMBD手法を導入し、空気圧と機構のシミュレーションを活用することで制御モデル開発を容易にした。
- 実機組込についてもローコード化が実現できた。

(2) やってみて判ったこと

- 制御の専門家ではない報告者でも短期間で完成まで持って行けたのは、MATLABファミリー製品の『使いやすさ』の貢献が大きかった。
- 技術的な課題はMathWorksさんに逐一相談することでひとつずつ解消できた。細やかなサポートを対応頂けたことに、お礼申し上げます。

(3) 今後の展望

- シリンダの電動化対応（環境対応、低消費電力化、クリーン化、真空対応）
- テープ貼り付け装置（AFP装置）以外の新規用途開拓
- 社内で他の開発案件へのMBDノウハウ展開

TRENG

Solution by
Technology,
Engineering &
Know-how

ご清聴ありがとうございました