

MBDを活用した福島第一原子力発電所燃料 デブリ取出しロボットの設計開発



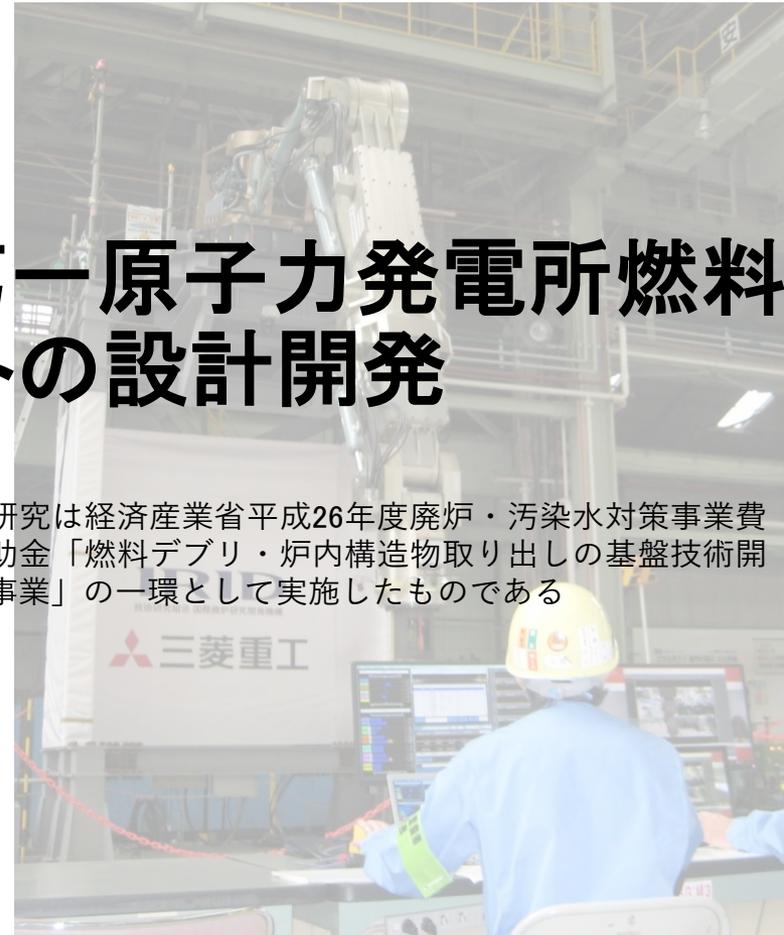
2018.10.30

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

三菱重工業株式会社

ICTソリューション本部 CIS部 制御3グループ グループ長 村田直史

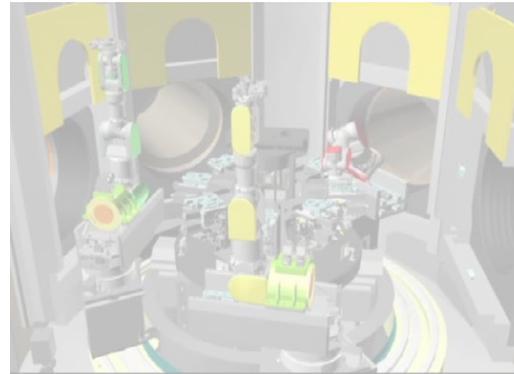
本研究は経済産業省平成26年度廃炉・汚染水対策事業費補助金「燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業」の一環として実施したものである



目次

1. MHIにおける原子力ロボットの開発背景
2. 福島第一原子力発電所の廃止措置
～燃料デブリ取り出しロボット開発～
3. MBDを活用した油圧ロボットアーム開発
 - 3.1 単軸要素試験 (Simulink[®] + A&Dシステム)
 - 3.2 全軸MILS構築 (Simulink[®])
 - 3.3 全軸HILS構築 (Robotics System Toolbox[™])
4. 開発成果

1. MHIにおける原子力ロボットの開発背景



MHIの原子力ロボットの開発背景

➤ 高線量下における保守作業の遠隔自動化を目的に進化

1970 美浜原子力発電所運転開始

1999 東海村JCO臨界事故

2011 東日本大震災



● 検査用ロボット

・蒸気発生器伝熱管 配管検査ロボット
検査装置 MR-Ⅲ



● 水中航行ロボット

・原子炉容器検査装置 A-UT



● メンテナンス用ロボット

・蒸気発生器保守用 SG-USP ・原子炉容器補修用 RV-INLAY



● 極限作業ロボット



● 災害時支援ロボット

・MARS



● 福島第一発電所向けロボット

・MEISTeR



・Super Giraffe



● 汎用マニピュレータ

・PA10



● ホームユース

・wakamaru

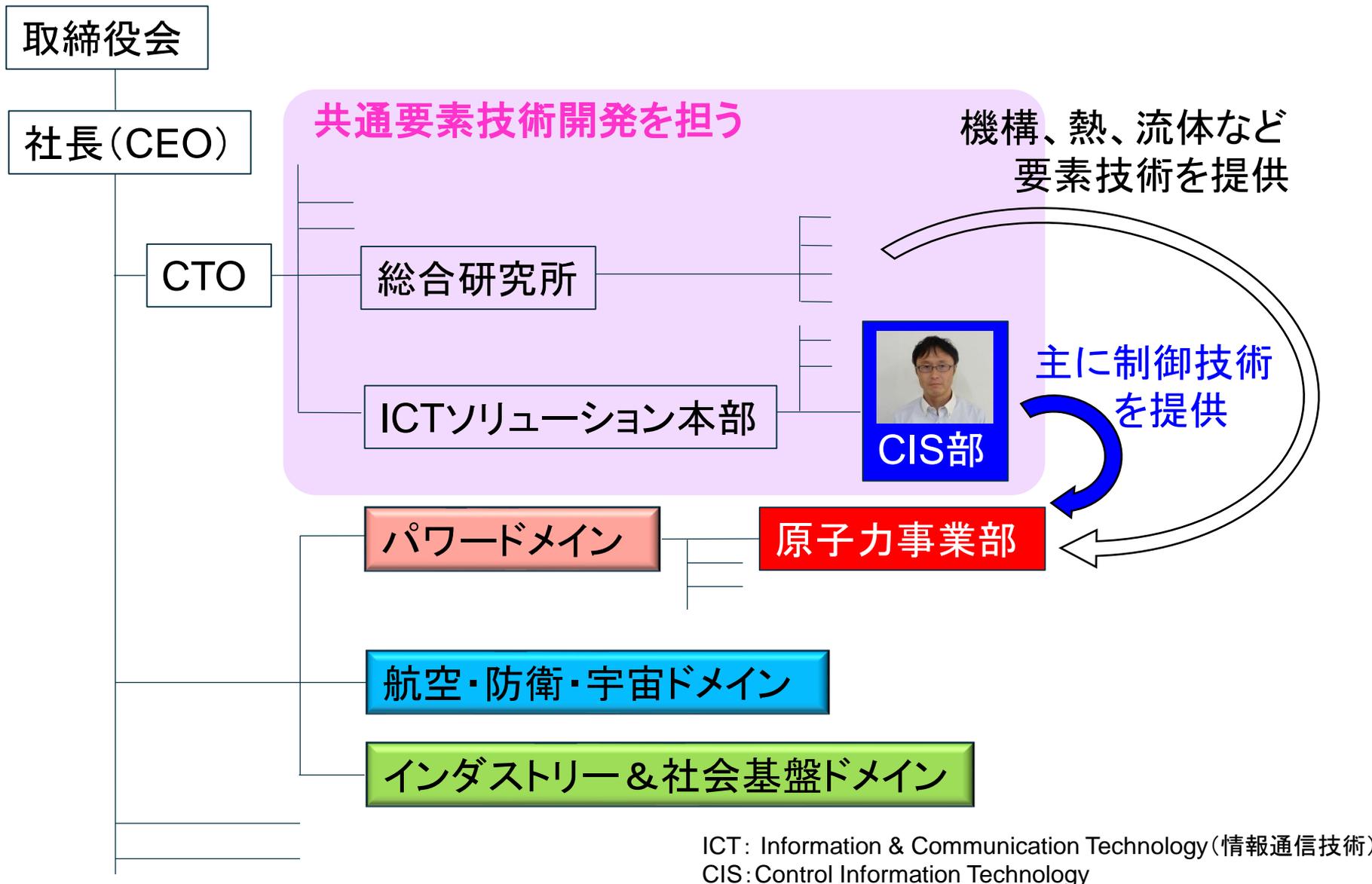


● インフラ対応ロボット

・防爆ロボ ・消防ロボ



原子力用ロボットのMHI開発体制

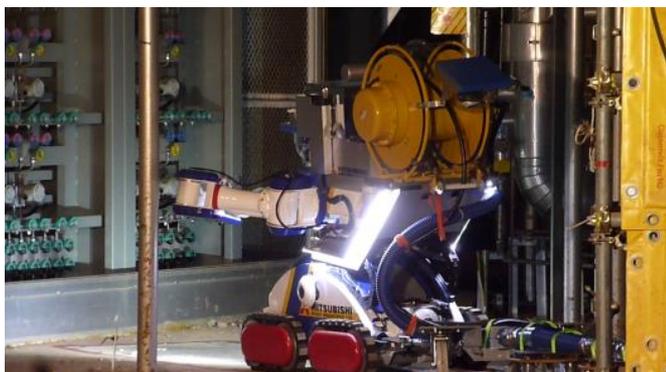


2. 福島第一原子力発電所の廃止措置 ～燃料デブリ取り出しロボット開発～

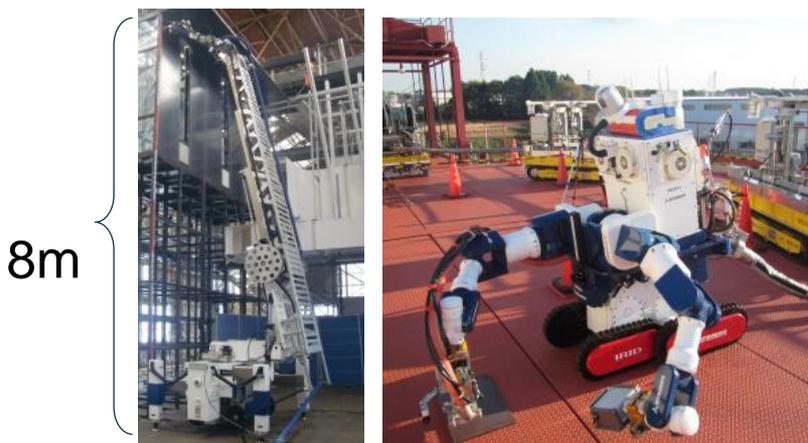


MHIが担う廃炉措置

福島第一発電所に“MEISTeR”を投入し、遠隔で1号機1階、2号機オペフロのコアサンプリングに成功



高所除染ロボット“Super Giraffe”（左）
床面除染ロボット“MEISTeR II”（右）



福島第一原子力発電所の廃炉措置 に向けた中長期ロードマップ

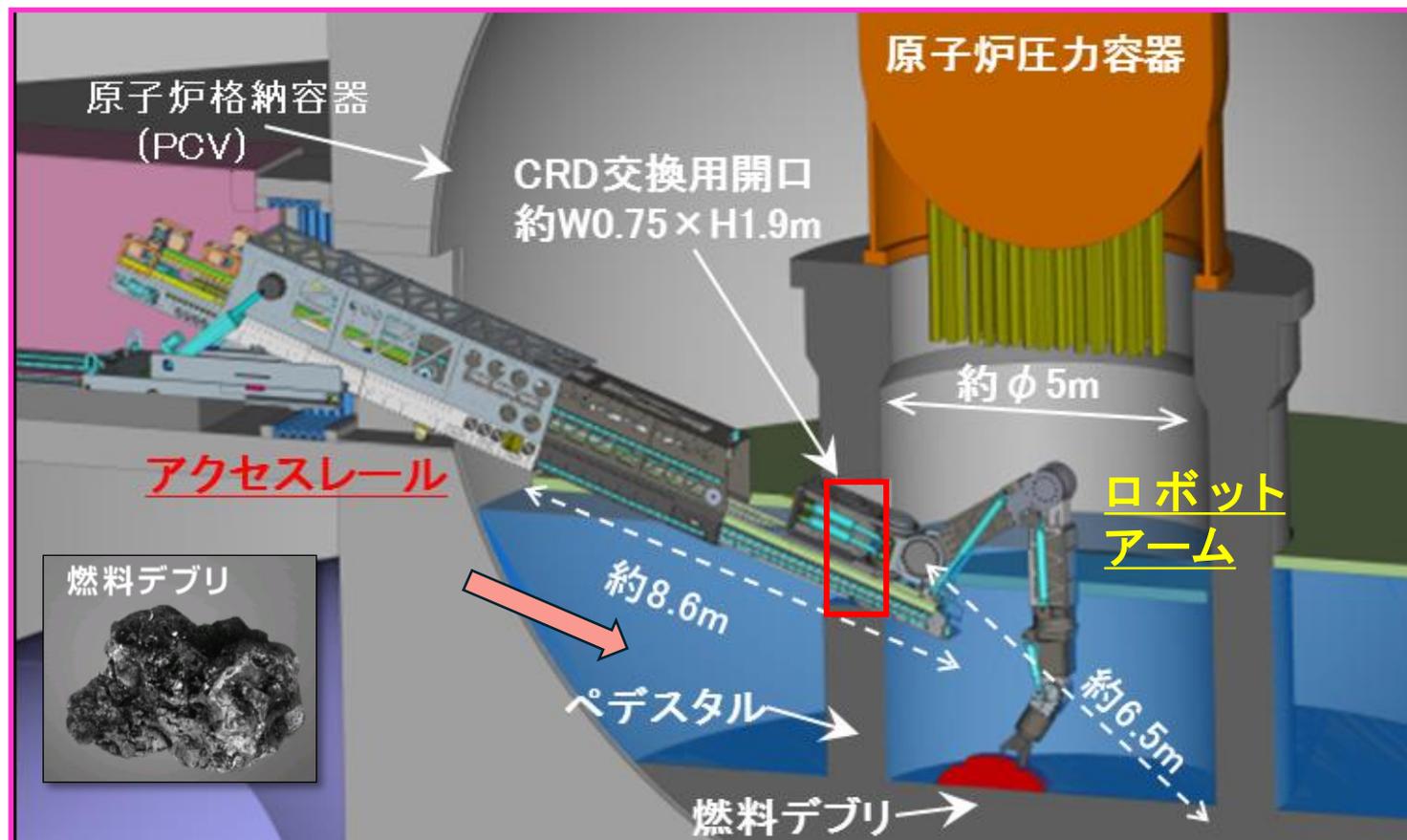


<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025c/genan491.html>
(福島県/廃炉措置に向けたロードマップより抜粋)

燃料デブリの取出し工法案

東京電力は側面の作業口からロボットアームを入れ、デブリを取り出す手法（気中-横アクセス工法）を用いる考え（2018/06/01、福島民報）

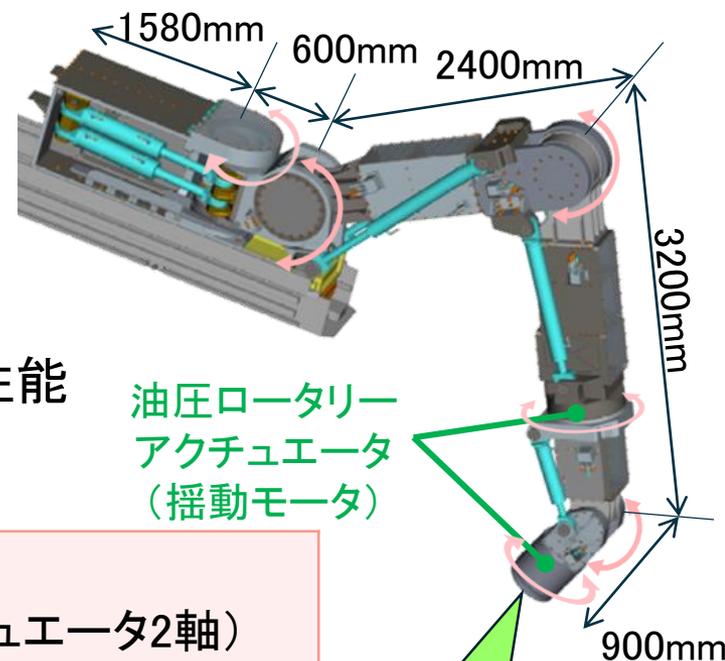
⇒MHIでは、工法の実現に必要な設備、機器装置の開発をおこなっている



CRD: 制御棒駆動装置

デブリ取出しロボットアームの要求機能

- 1) コンパクトな外形寸法 (CRD交換用開口通過制約)
- 2) 広範囲にわたるアクセス性と高い位置決め精度
- 3) 大きな加工反力に耐える高出力、高強度
- 4) 故障してもペDESTAL内から脱出できる耐故障性能



構造	6軸回転構造 (油圧シリンダ4軸、ロータリーアクチュエータ2軸)
寸法	幅700 × 全長7100 × 高さ920mm
質量	約3.8t
手先力	下向き押しつけ力2t
位置決め精度	先端精度 ±10mm以内
耐故障性	油圧シリンダ圧油供給ラインの冗長化 各軸1本のシリンダのみで搬出姿勢へ変更可能



CRD: 制御棒駆動装置

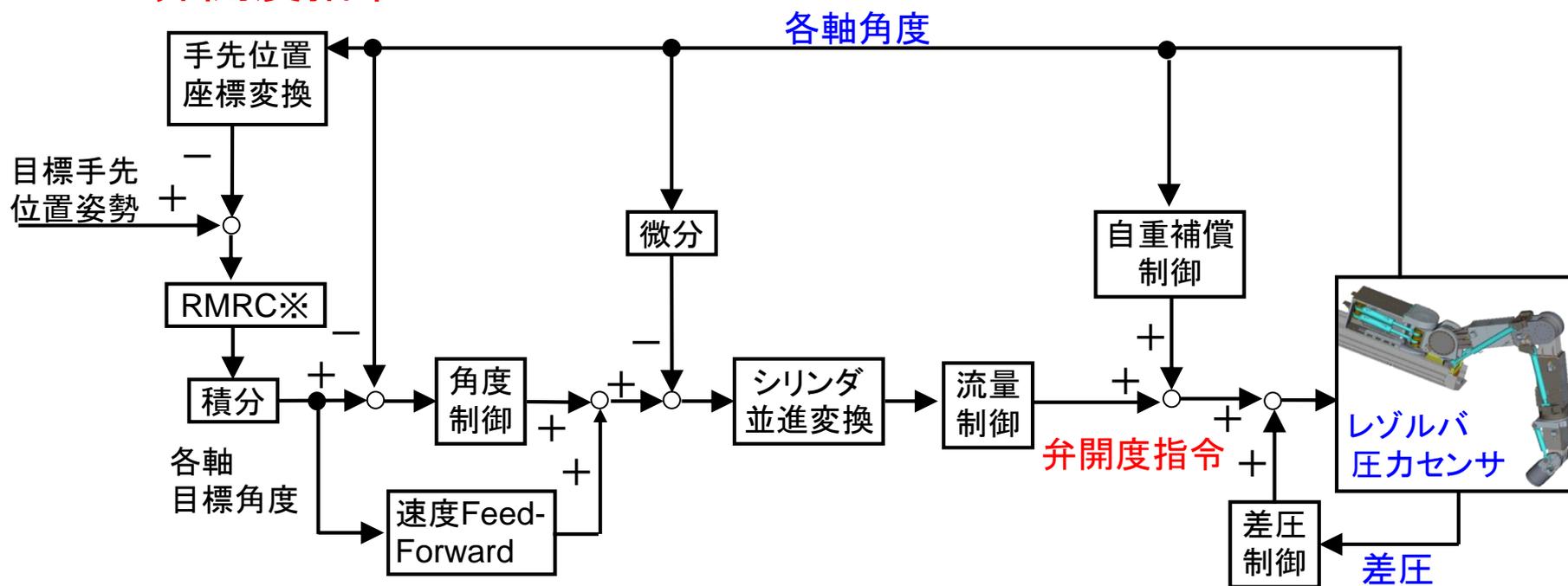
手先位置決め制御ブロック図

【センサ値】

- ・角度(レゾルバから取得)
- ・油圧系のボアおよびロッド圧力(圧力センサから取得)

【制御値】

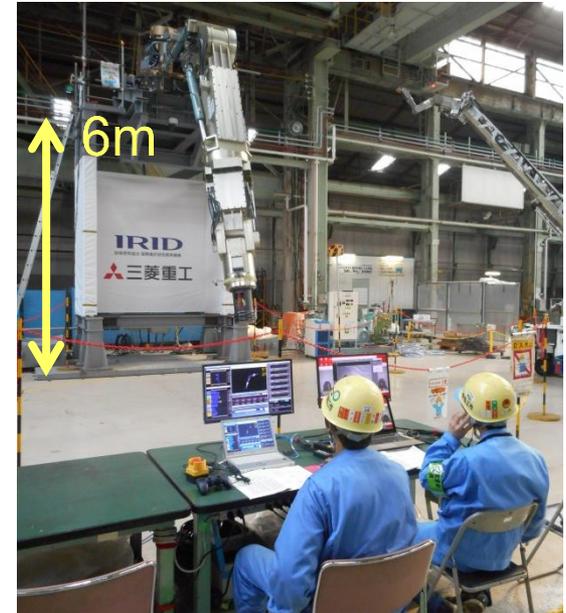
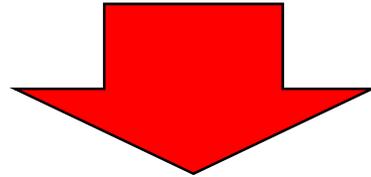
・弁開度指令



※ Resolved Motion Rate Control (分解速度制御)

なぜ試作レス開発が重要なのか？

- ・大型振動台や航空機など、MHIでは油圧制御技術を保有しているが、油圧駆動式ロボットアームは新規開発
- ・開発するロボットアームは大型、高出力であり些細なミスが重大事故を誘発



MBD (Model Based Design) を活用した試作レス開発が不可欠

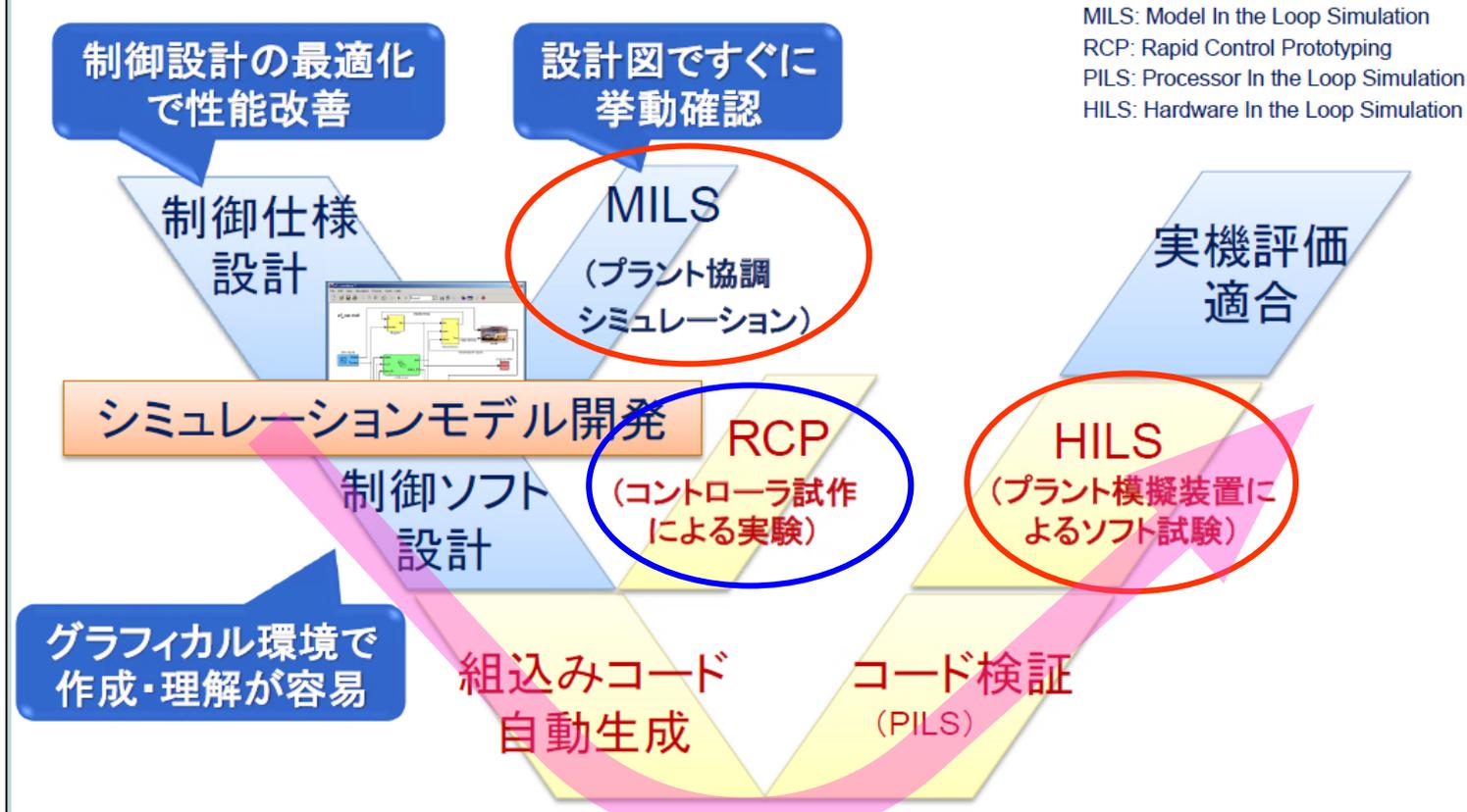
- 1) 性能要求の達成可否を早期に見極め、ハード設計にフィードバック
- 2) 制御アルゴリズムを実装前に性能評価
- 3) ソフトウェアのデバッグ

⇒ 試験の試行回数が減り ①手戻り削減、②工数低減、③重大事故リスク回避

MHIでは、MATLAB®/Simulink®を活用してMBDを実現しています



MBDによる制御開発フローとコード生成製品の活用



※ MathWorks Automotive Conference 2014 in Japan講演資料

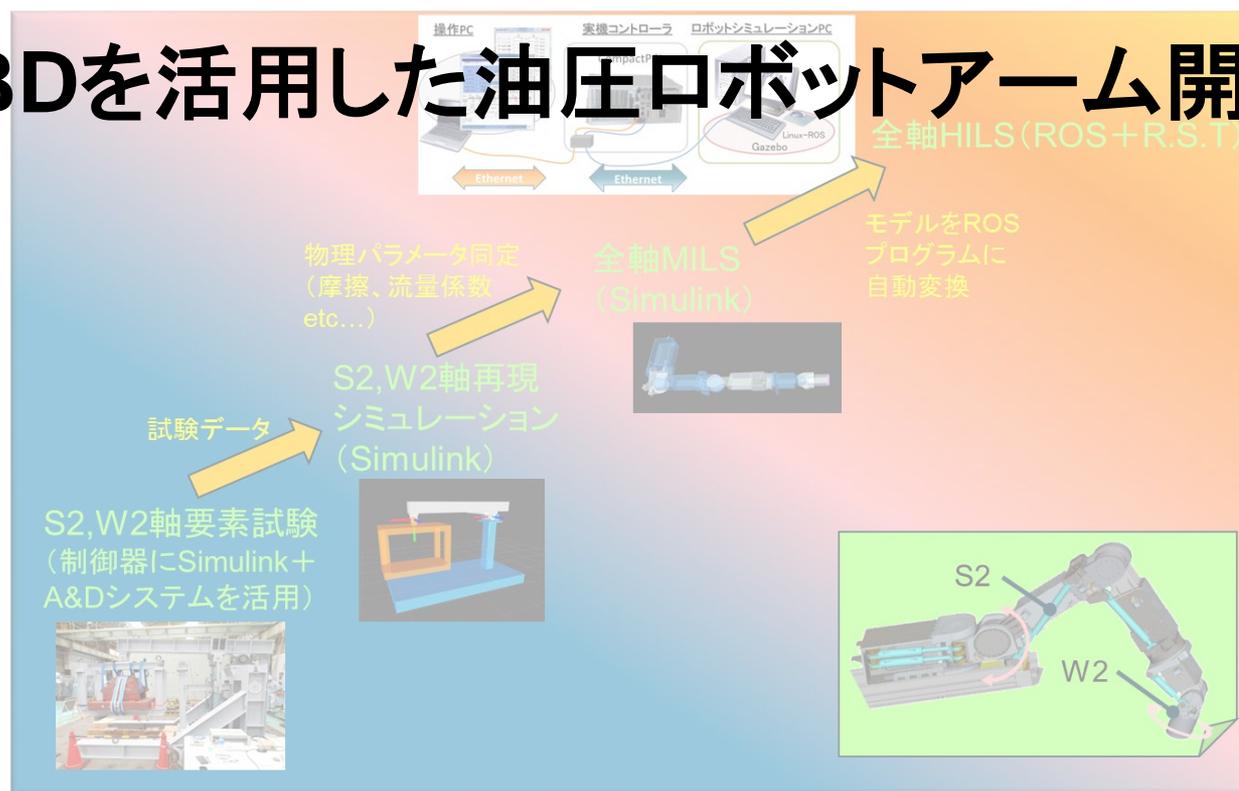


各種シミュレーション手法

手法	動作物・動作環境	主な検証内容
MILS (Model In the Loop Simulation)	<p>コントローラ プラント</p>	制御モデル処理内容の妥当性検証
RCP (Rapid Control Prototyping)	<p>コントローラ プラント</p>	制御仕様のリアルタイム動作検証、 制御周期/パラメータの妥当性検証。 要素試験で適用
PILS (Processor In the Loop Simulation)	<p>コントローラ プラント</p>	コードとオリジナルモデル処理の等価性検証。 ターゲットCPU上で、コントローラのコード部分とコードの実CPU演算、クロスコンパイラ/リンカ設定の影響を評価。 処理時間、メモリ使用量評価。
HILS (Hardware In the Loop Simulation)	<p>コントローラ プラント</p>	プラントモデルをリアルタイムシミュレータで動作させ、ターゲットCPU上で、CPU周辺、実行管理、I/Oドライバを含めたコントローラコード全体のリアルタイム動作を検証。

※ MathWorks Automotive Conference 2014 in Japan 講演資料

3. MBDを活用した油圧ロボットアーム開発



ROSを利用したHILSの構築
制御システムのモデル化
油圧要素のモデル化
多リンクモデルの動力学計算
機構モデルの精緻化(摩擦・減速機効率)

既存技術

○電動アーム
H/Wシミュレータ
用途: H/W設計支援

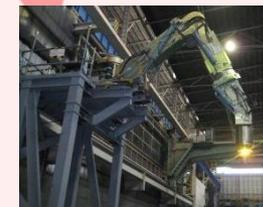
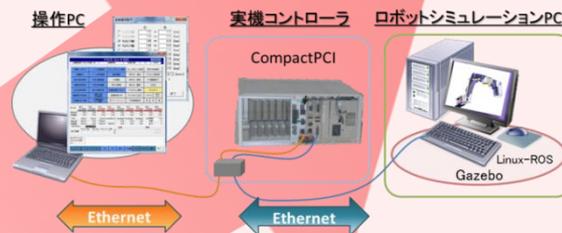


~2015年度

○油圧アーム
H/Wシミュレータ
(アクチュエータモデル)
用途: H/W設計支援



○制御検証シミュレータ
(MILS、HILS)
用途: H/W設計支援
アルゴリズム設計支援
ソフトウェア設計支援



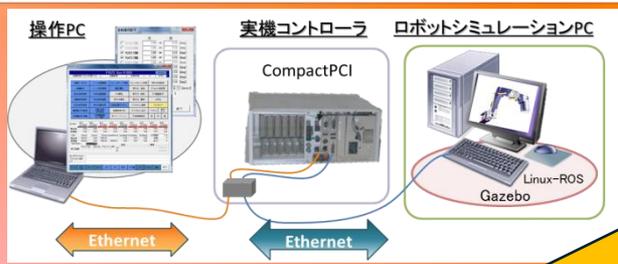
精度目標達成
(2017/1)

新規開発技術

2016年度

油圧ロボットアーム開発におけるMBD

開発進捗

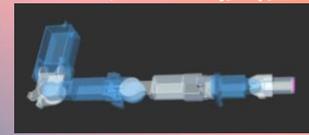


全軸HILS (ROS+R.S.T)
⇒ソフトデバッグ可能
ROS: Robot Operating System

モデルをROS
プログラムに
自動変換

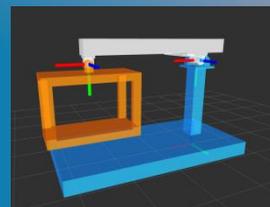
物理パラメータ同定
(摩擦、流量係数
etc...)

全軸MILS
(Simulink)
⇒精度見込み確認可能
アルゴリズム検証可能

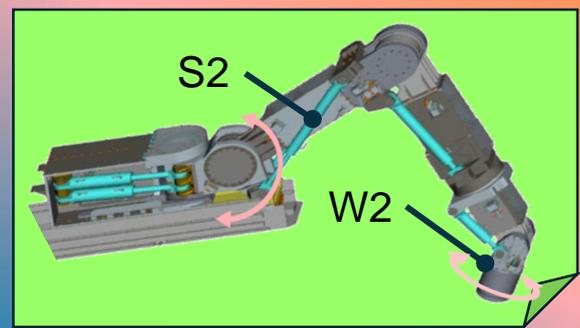


試験データ

S2,W2軸再現
シミュレーション
(Simulink)

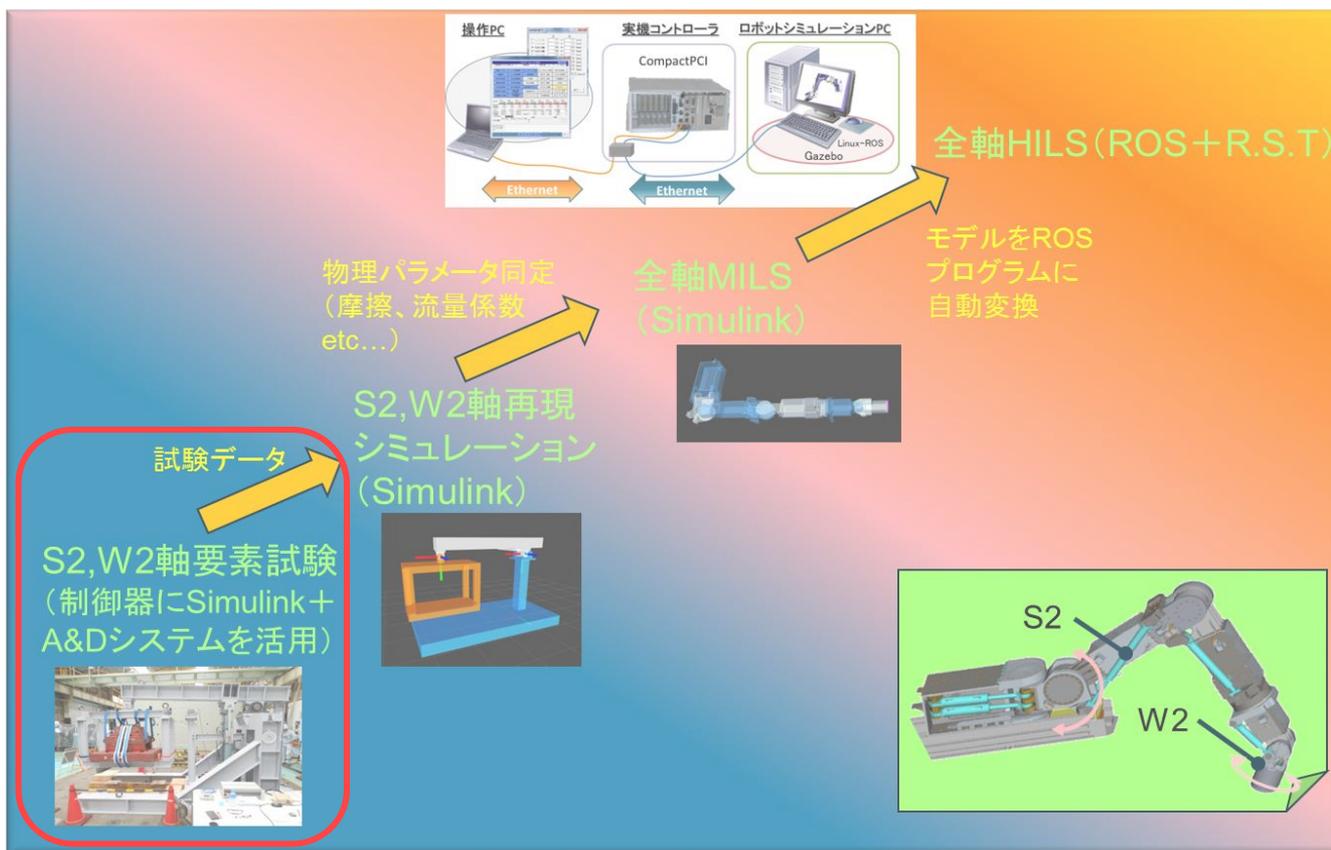


S2,W2軸要素試験
(制御器にSimulink+
A&Dシステムを活用)



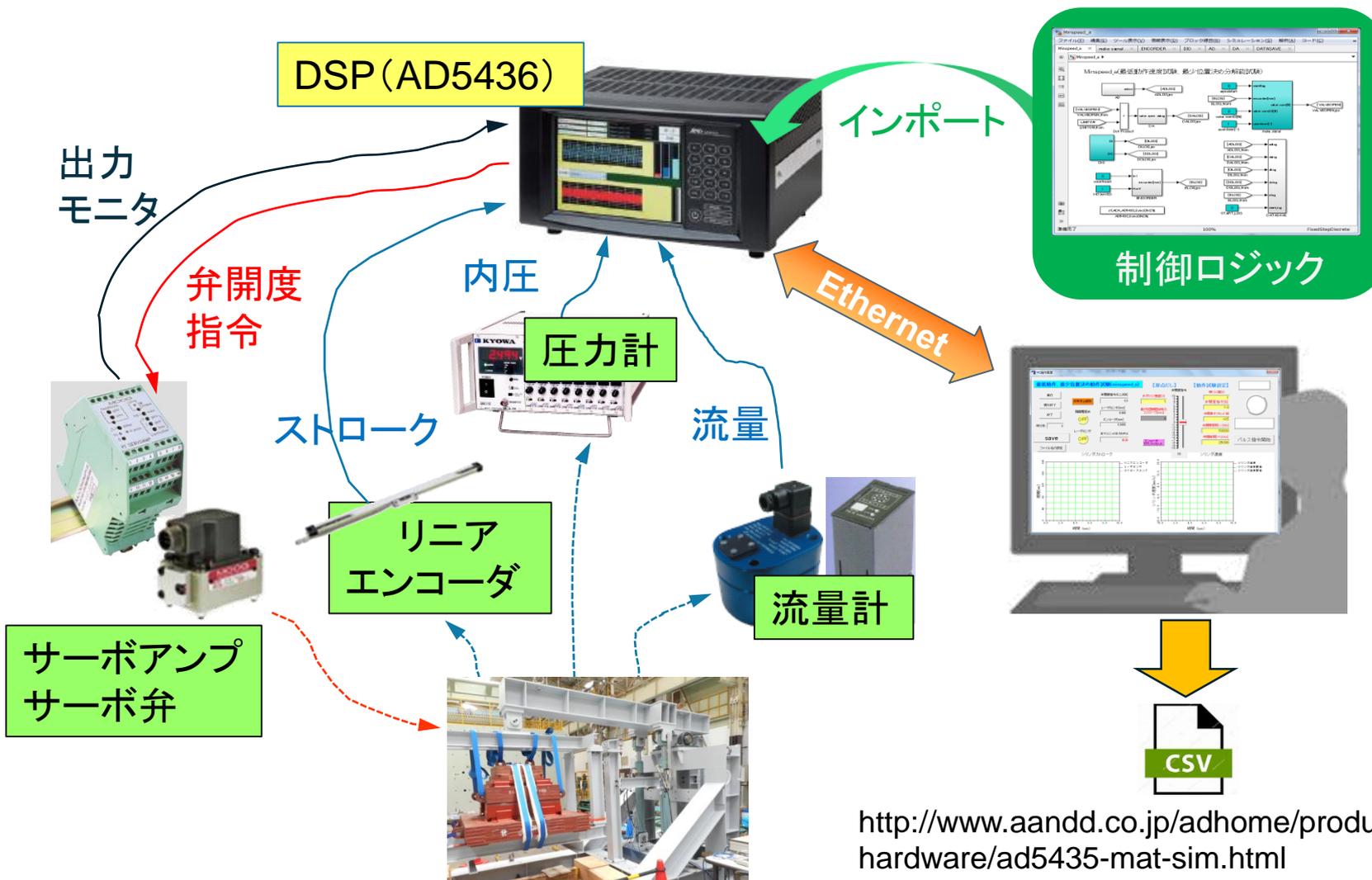
開発時期

3.1 単軸要素試験 (Simulink+A&Dシステム)



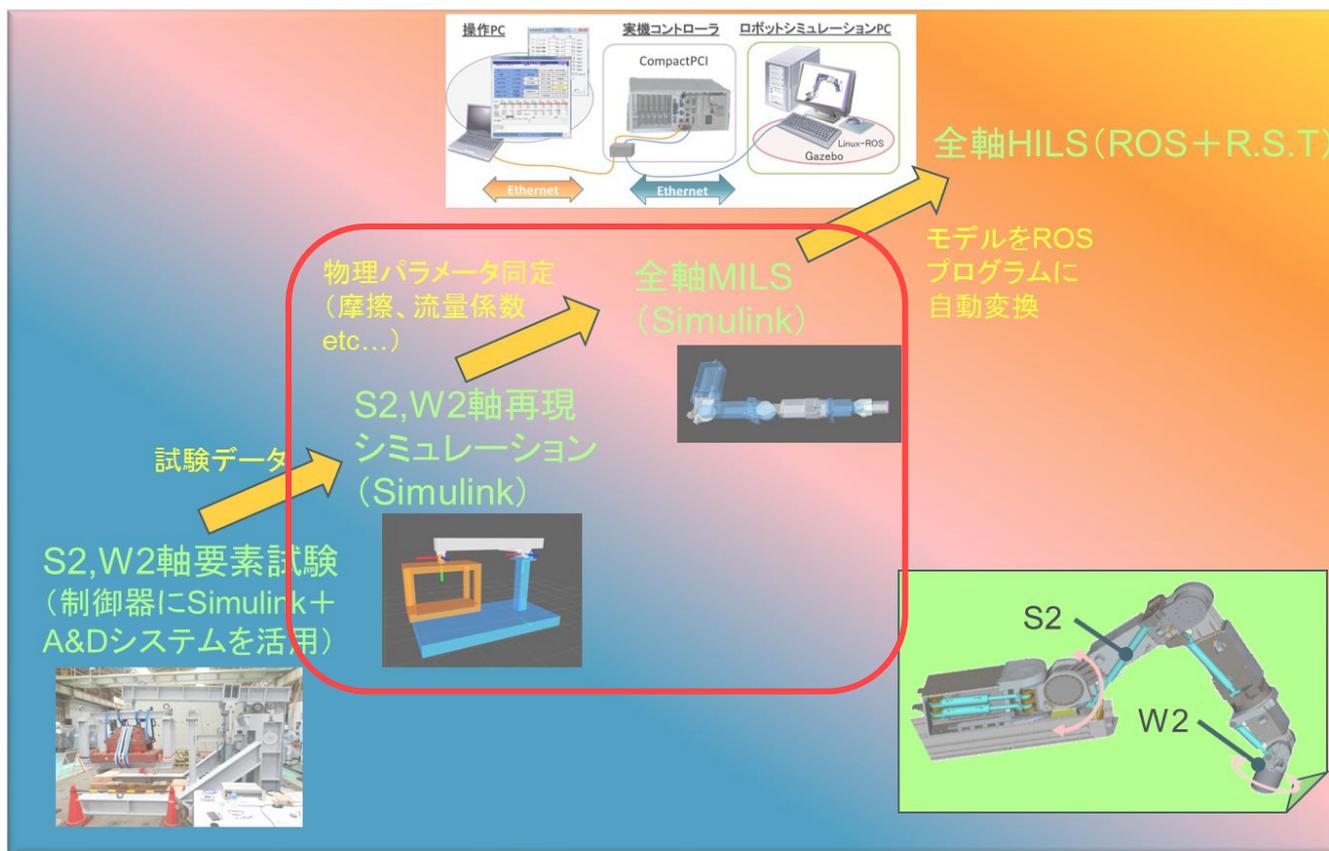
要素試験用制御装置

A&D社のDSPとシステムを利用し、Simulinkで作成した制御ロジックをそのまま実現⇒コーディング作業不要、ソフト製作期間削減、短期開発可能



<http://www.aandd.co.jp/adhome/products/dsp/dsp-hardware/ad5435-mat-sim.html>

3.2 全軸MILS構築 (Simulink)

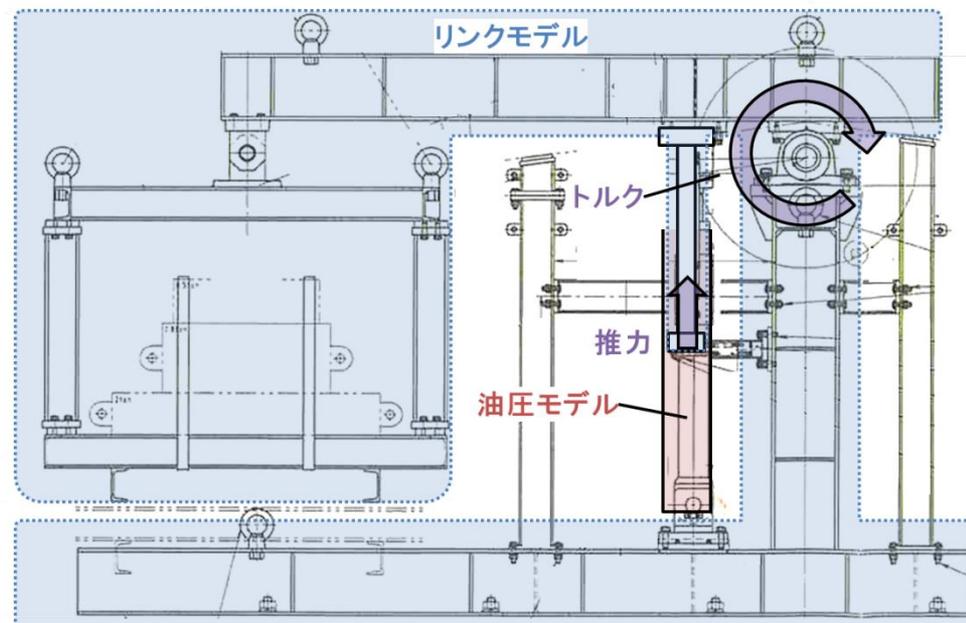


要素試験の再現シミュレーション

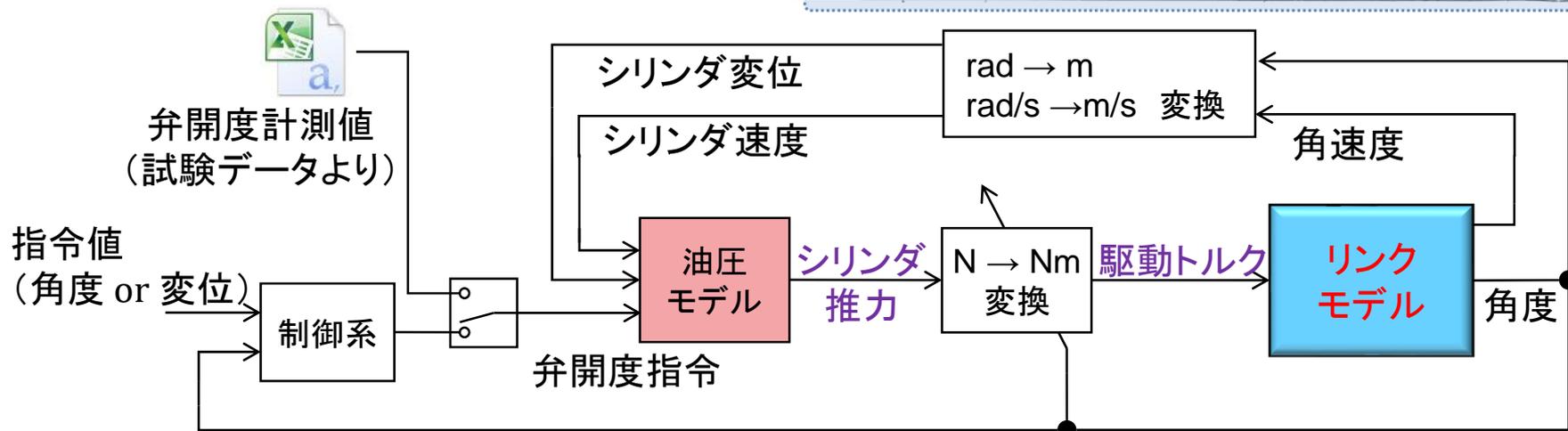
- ・S2軸(直動シリンダ)、W2軸(揺動モータ)のシミュレーションモデルを構築
- ・要素試験結果と突き合わせて
一致性確認



- 1)モデル化方針の妥当性確認
- 2)同定した物理緒元の妥当性確認



【S2軸要素試験のモデリング】

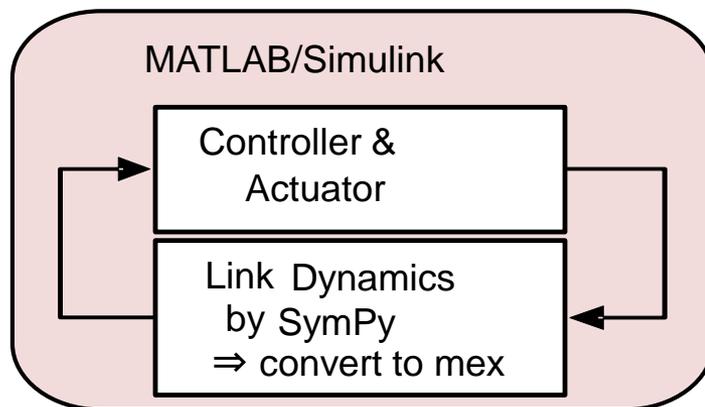


リンク機構をどうやってモデル化する？

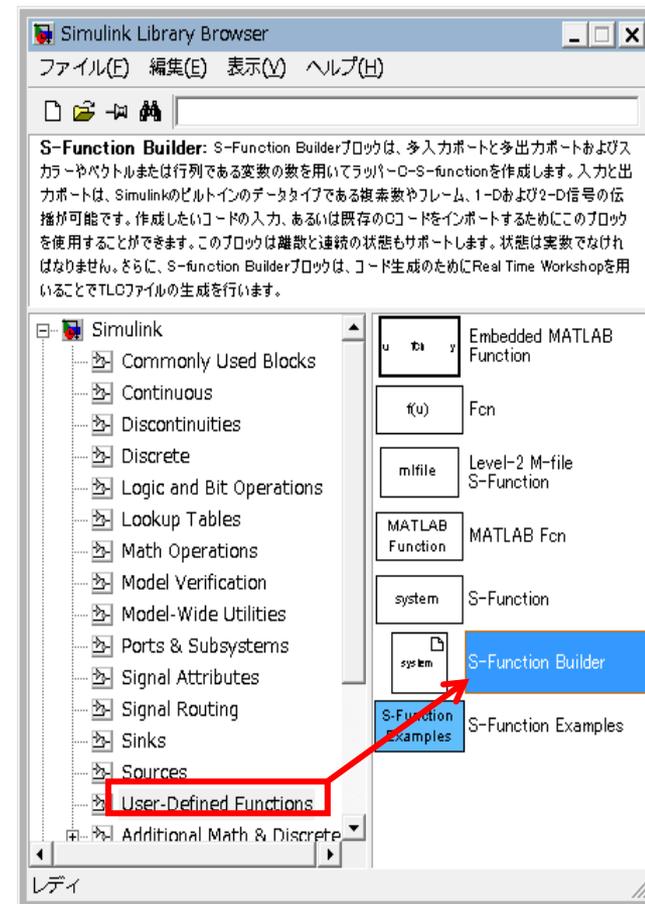
- a) 運動方程式を手で求めS-Function等でモデル化
- b) Simscape™ Multibody™でモデル化
- c) Pythonを活用

⇒ ~~ミス~~のリスク有
⇒ ~~コスト~~がかかる

- ① SymPyBoticsでリンクモデルの運動方程式を導出
- ② Cコード⇒mexファイル化(S-Function Builder使用)



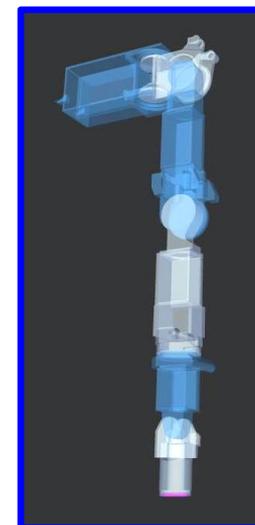
- SymPy...Python の代数計算ライブラリ 
- SymPyBotics...ロボットモデリングなどに有効な、SymPyをベースにしたライブラリ。D-H法に従いリンクパラメータをインプットすることで、ロボットモデルが得られる



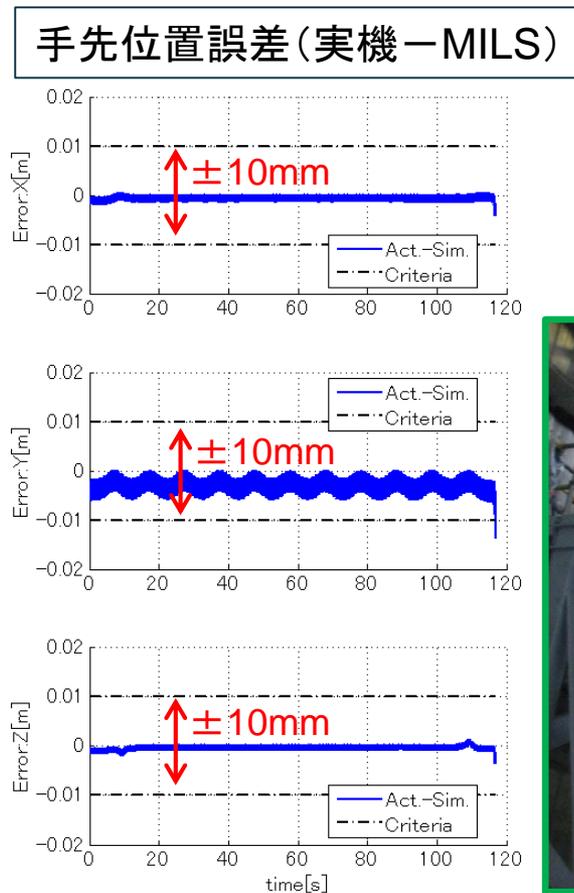
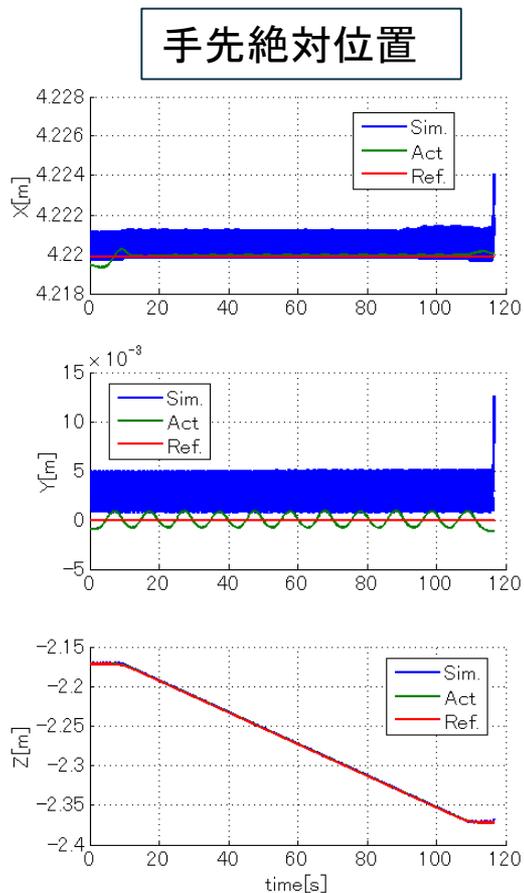
全軸MILSと実機動作の比較

要素試験の結果をもとに、6軸全軸のMILSモデルを構築

- ・手先Z軸方向に-200 mm移動(速度2mm/s)



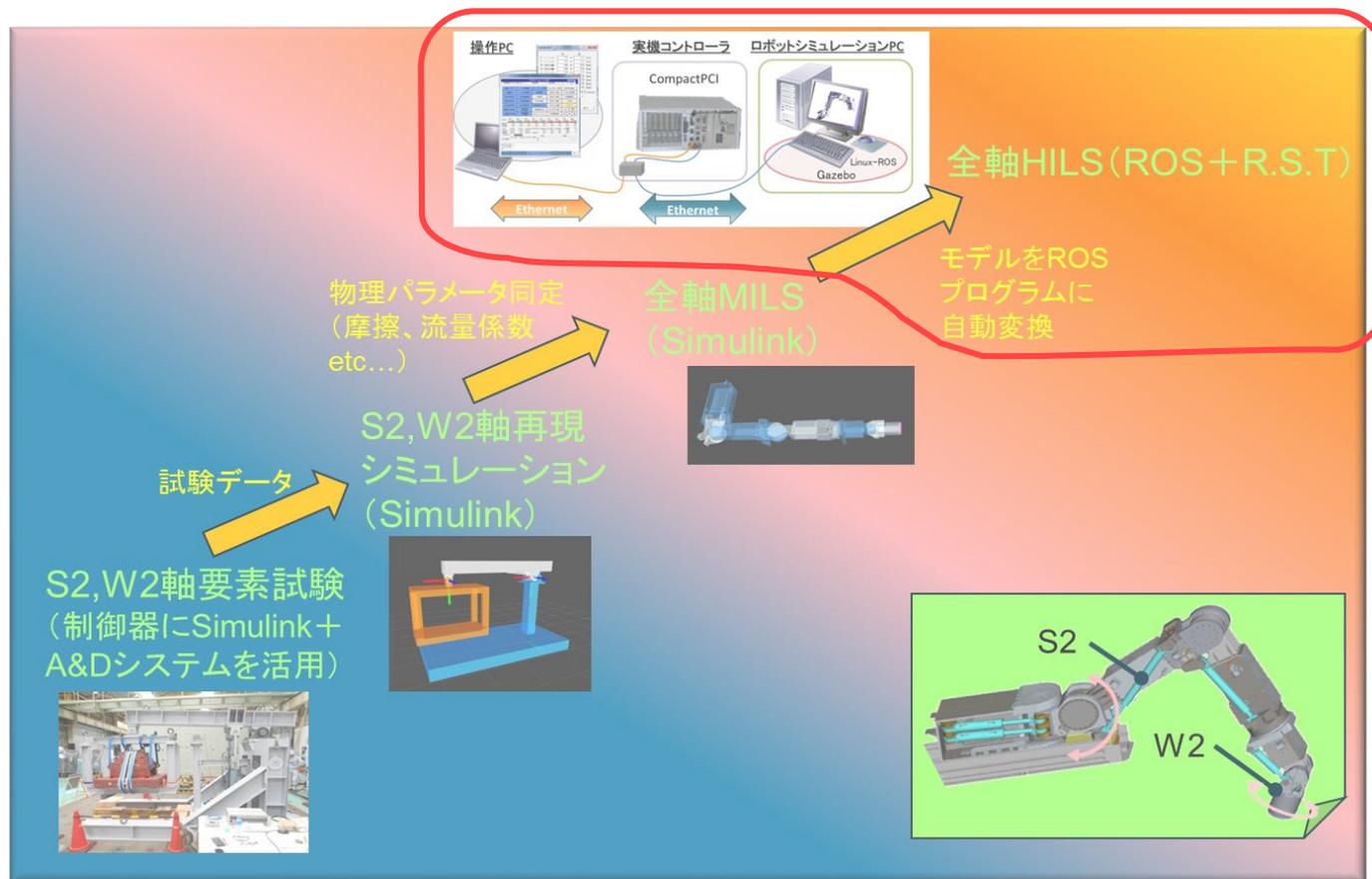
MILSモデル



実機

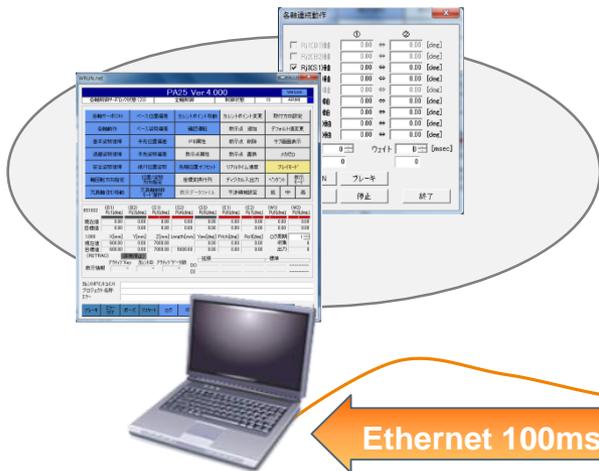
手先座標誤差6mm以内(Y方向)の精度で実機を再現可能

3.3 全軸HILS構築 (Robotics System Toolbox)



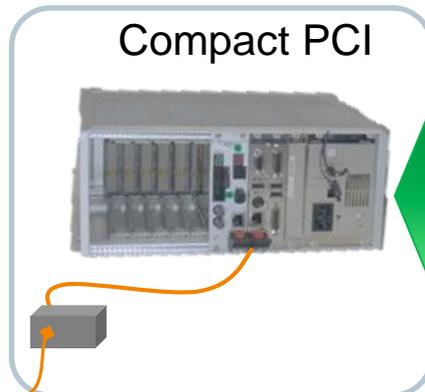
ロボットアームの制御システム構成

操作PC



運動制御ボード

Compact PCI



サーボアンプ ロボットアーム

弁開度指令

D/A
A/D
レゾルバ I/F

角度、圧力

サーボアンプ

レゾルバ

圧力センサ



Ethernet 100ms

【実機制御】

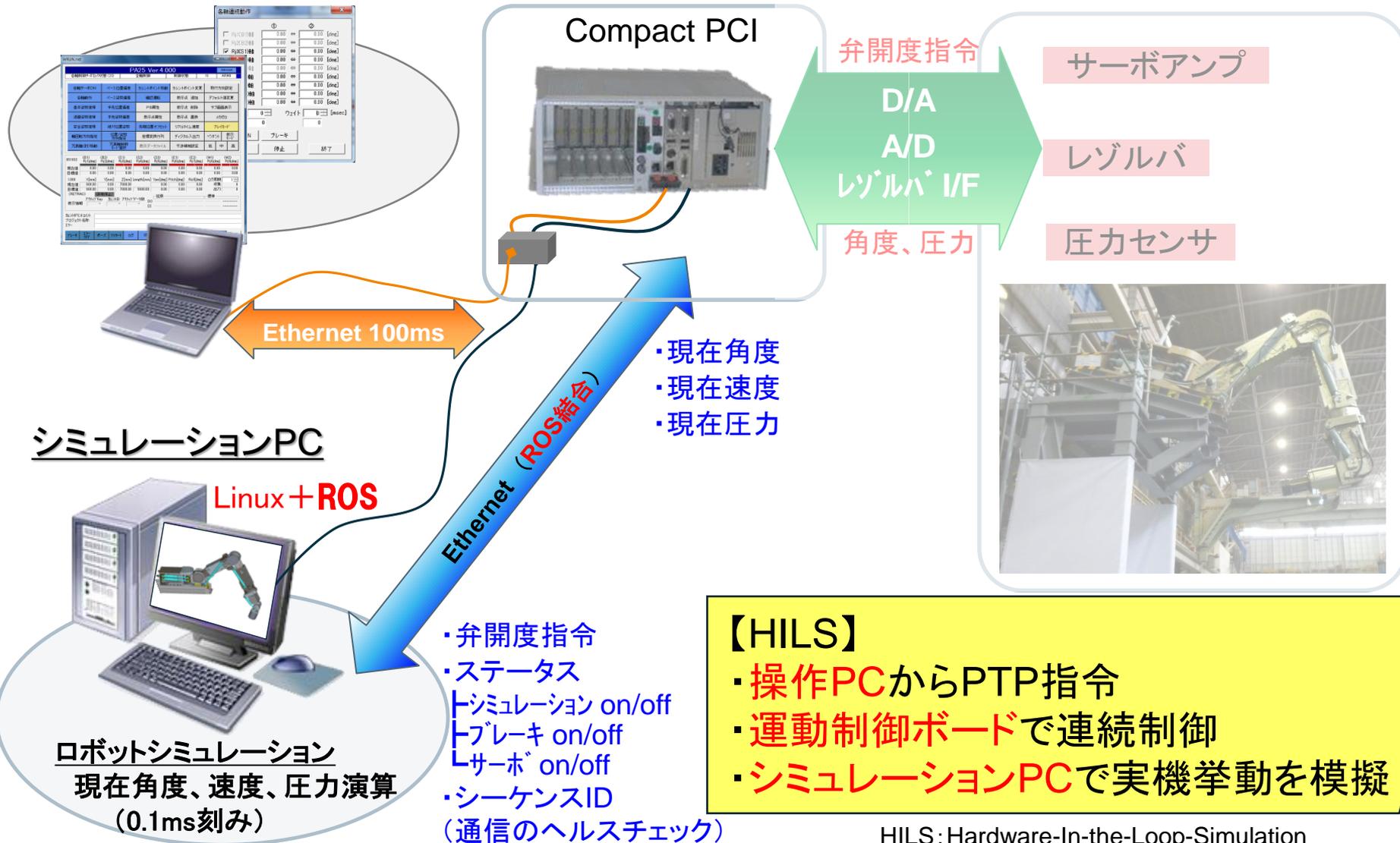
- ・操作PCからPTP (Point-to-Point) 指令
- ・運動制御ボードで連続制御
 - ・PTP指令から連続軌道を生成
 - ・現在角度、現在圧力をフィードバック
 - ・弁開度指令をサーボアンプに指令

ロボットアームのHILSシステム構成

操作PC

運動制御ボード

サーボアンプ ロボットアーム



【HILS】

- ・操作PCからPTP指令
- ・運動制御ボードで連続制御
- ・シミュレーションPCで実機挙動を模擬

HILS: Hardware-In-the-Loop-Simulation

ROSってなに？

ROS (Robot Operating System) とは？ 

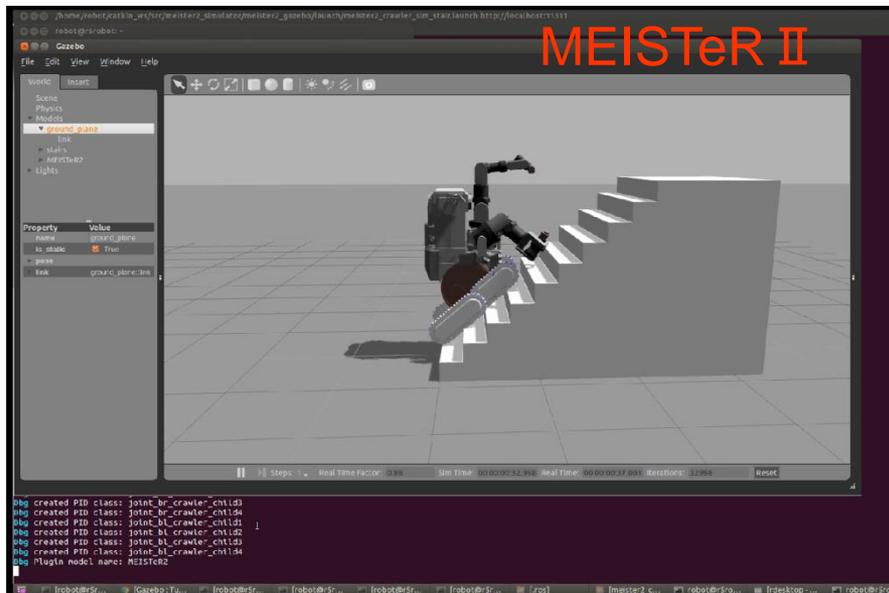
...ロボット等の自律・知能機械の開発において、世界で最も広く普及しているソフトウェアフレームワークの一つ

HILSにROSを利用するメリット

- 1) 制御ボードを介さずに手軽にHILSを構築できる
(サーボアンプなどのハードウェアI/Fは検証できない)
- 2) 開発コストが安い
- 3) 開発に場所を取らない (Ethernet以外のケーブル不要、PCのみで十分)
- 4) 様々な分野の研究者により公開されているアプリケーションを活用可能
- 5) 実センサやアクチュエータなどを動作させるためのドライバが提供されていることが多く、組み込みが容易⇒実センサの検証も可能

ROSで何の数値解析ツールを使う？

- 1) Gazeboなど、ROSで提供されているツールを使用する
 - ×ソルバに制約があり、高精度なシミュレーションは不得手
 - ×GUIが不十分。モデルをコードでベタ書きしなければならない
- 2) MATLAB/Simulinkで構築したシミュレータを使用する
 - MILSモデルを流用可能で一気通貫に開発できる
 - GUIに優れている



Gazeboによるシミュレーション開発事例

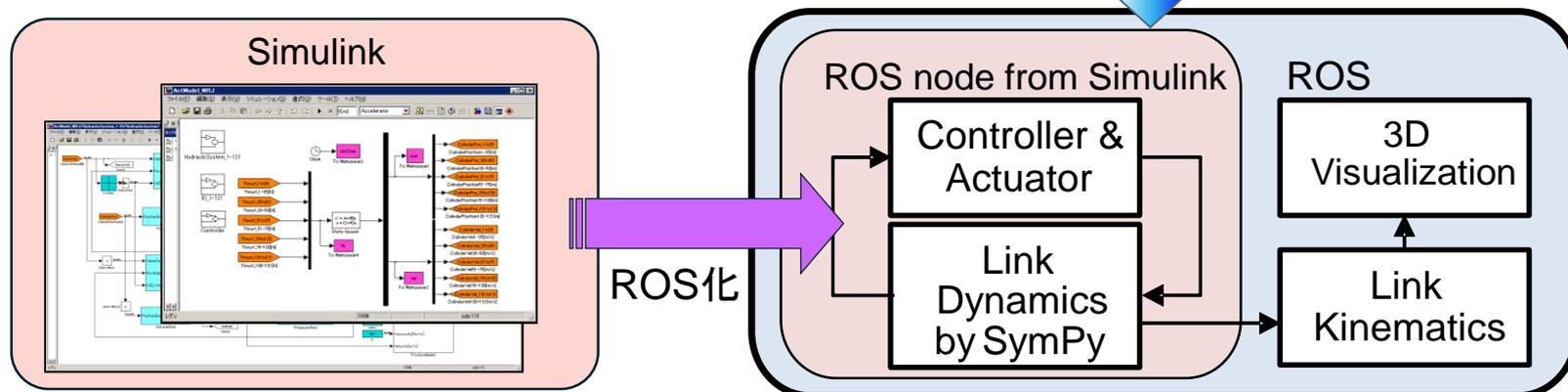
どうやってSimulinkモデルをROSで動かす？

Robotics System Toolbox (R.S.T) の連成機能を活用する

- MATLABは仮想的にROSで動くプロセスの1つとなり、ROSの通信仕様に従って他モジュールとの通信可能
- Simulinkなら、I/Fブロックを配置するだけでROSとのI/Oを取ることが可能
- × 両方のクロックを同期させる標準的な方法が未だない上、データ送受信に要するオーバーヘッドが大きい⇒リアルタイム未補償

改善してほしい！

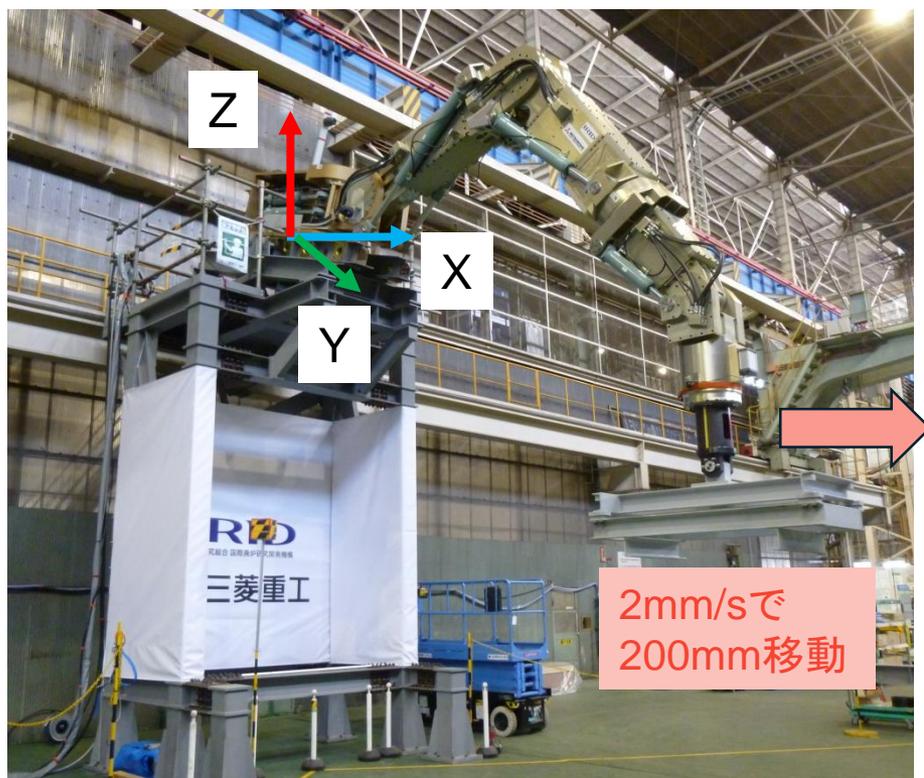
MHIではR.S.Tの機能のうち、Simulinkで作成したモデルを自動でROS化する機能を利用している
(Simulink Coder™、Embedded Coder® 要)



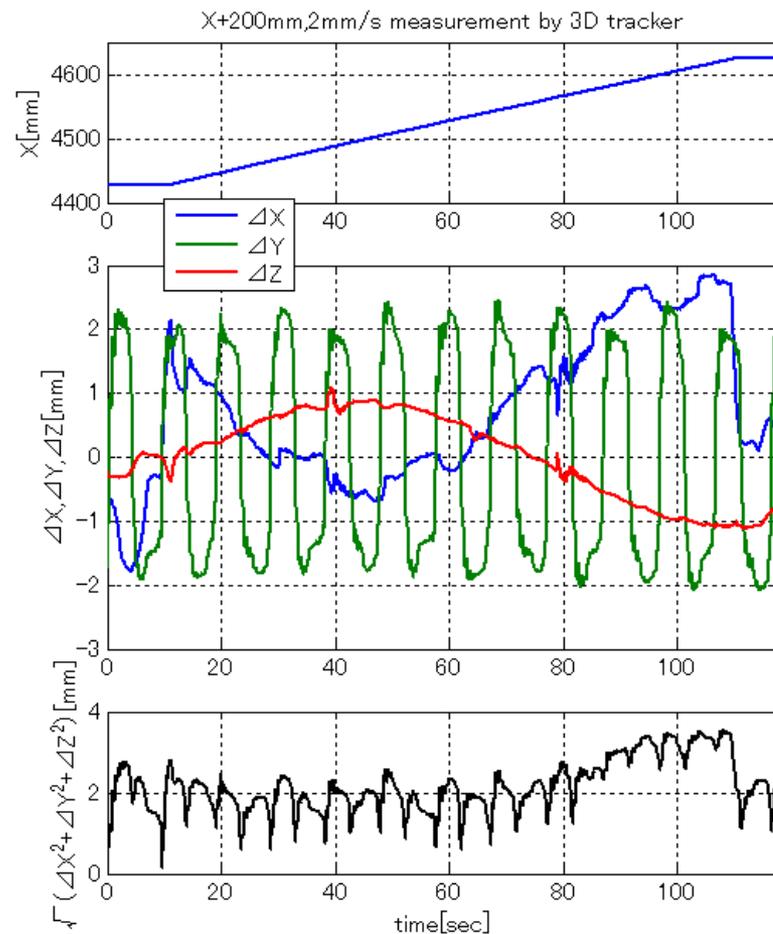
4. 開発成果

手先位置決め試験結果

- ・MBDの活用により、2週間の短期間で制御調整完了
- ・500kgの模擬負荷搭載、移動速度2mm/sで手先軌道偏差5mm以内を達成※
(速度50mm/sでも同様の結果)



※3Dレーザトラッカによる絶対精度計測





<http://irid.or.jp/topics/%E3%83%9A%E3%83%87%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%AB%E5%86%85%E3%82%A2%E3%82%AF%E3%82%BB%E3%82%B9%E8%A3%85%E7%BD%AE%E3%81%AE%E8%A9%A6%E9%A8%93%E3%83%BB%E3%80%8C%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%83%E3%83%88%E3%82%A2/>

まとめ、今後の計画

【まとめ】

- MBDを活用した試作レス開発により、燃料デブリ取出し用の大型油圧ロボットアームの検証試験を3か月の短期間で実現した
- MBDにはMATLABを有効活用し、2週間の短期間で制御調整を終え、手先精度5mm以内を達成
 - 1) 要素試験のコントローラ製作
 - 2) MILSモデリング
 - 3) ROSを利用したHILSの実現

【今後の予定】高リスク開発が続くため、MBDを有効活用していく

- 1) カセンサレス手先反力制御の実現
- 2) アクセスレールと結合して手先位置精度の評価
- 3) 手先効果器を取り付け、模擬デブリの破砕、回収



MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**