

【Japan Machinery Innovation Forum】

「工作機械とデジタルツイン」

金沢工業大学 副学長 教授 森本 喜隆

- 2022年4月 同 副学長（キャリア開発支援担当）
- 1998年 4月 論文賞 日本材料試験技術協会
- 2016年 4月 日本機械学会賞（論文）
- 2019年 9月 精密工学会技術賞 公益社団法人精密工学会
- 2019年 11月 ASME Outstanding Paper Award of IMECE
- 2019年 4月 日本機械学会 日本機械学会 フェロー
- 2020年 3月 精密工学会高城賞 公益社団法人精密工学会

1. 工作機械産業とデジタルツインとの関係
2. デジタル化とモデルベースシミュレーション開発
3. 最近の当研究室の取り組み
4. 解決すべき技術課題
5. おわりに

Mosan's 1. 工作機械産業とデジタルツインと関係 ①

「デジタル」は手段であって目的ではない

工作機械産業

デジタルツインはアナログ世界(人の支配)

物理オブジェクトの正確なデジタル複製

Cyber空間

プロパティと実際の動作を
可能な限り厳密にシミュレート

技術

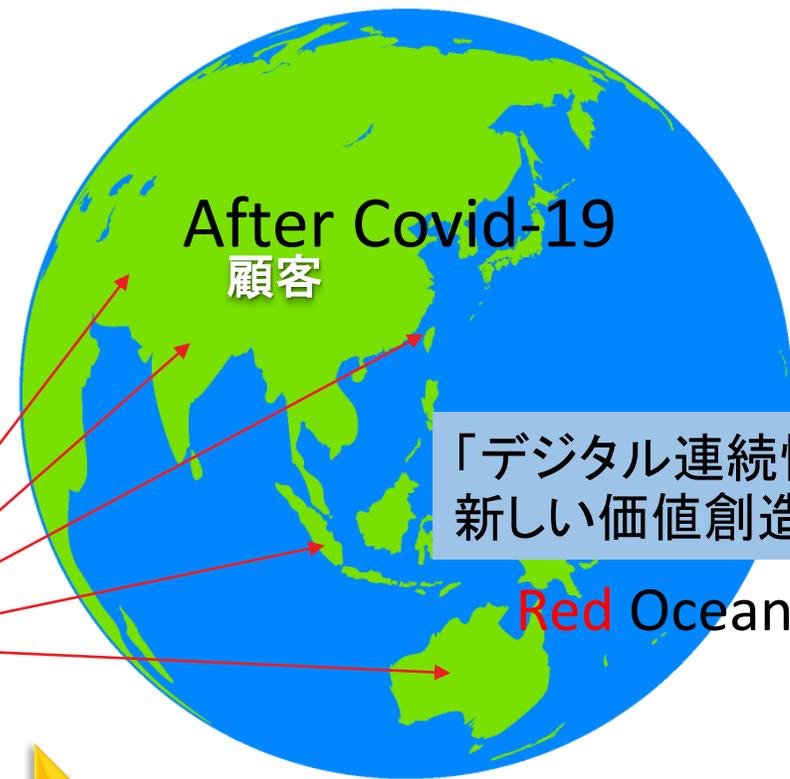
IoT

フィード
バック

営業

Physical空間

性能, 精度を満たした工作機械の製造,
実空間での使用, 生産



「デジタル連続性」を担保した
新しい価値創造チェーンを構築

Red Oceanで生き残る！



生産状況の取得, 加工状況の推定



生産条件, 加工条件の変更指令

MOSAN'S 1. 工作機械産業とデジタルツインと関係 ②

工作機械産業にとっても関心の高いDX, デジタルツイン

① 顧客への提案力

1) メタバース手法の出現により,

あたかもそこにいるかのような環境創出が可能

2) 参加者は顧客, 営業担当, 設計者等の複数が同時に参加可能

3) VR, AR, MR技術により, 臨場感, 一体感, 疑似体験が可能

② 顧客参加型開発の実現

顧客を参加者として招くことは, 開発段階で共同作業が可能となる

③ 効果の検証ツール

稼働後の状況もデジタルツインを用いれば動作の検証が可能

あるいは, 稼働状況, 異常予知にも応用可能

MOSAN'S 1. 工作機械産業とデジタルツインと関係 ③

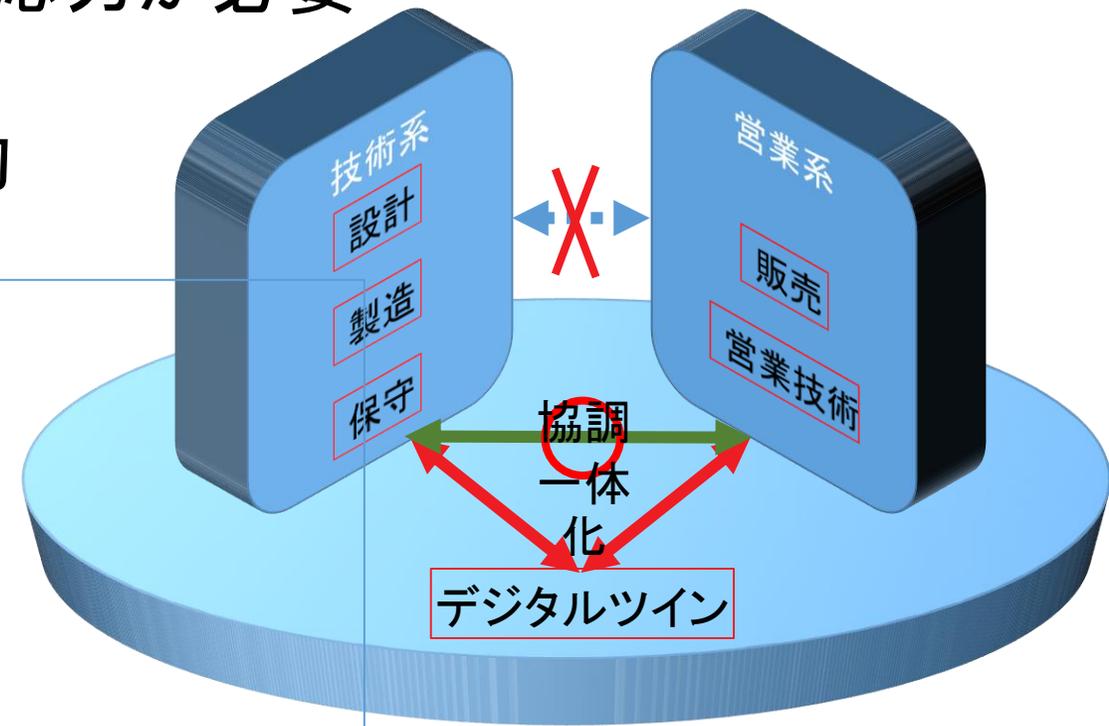
④ 持続的受注の可能性

顧客に分かりやすい生産設備の提案は、
持続的受注につながる。ただし、即応力が必要

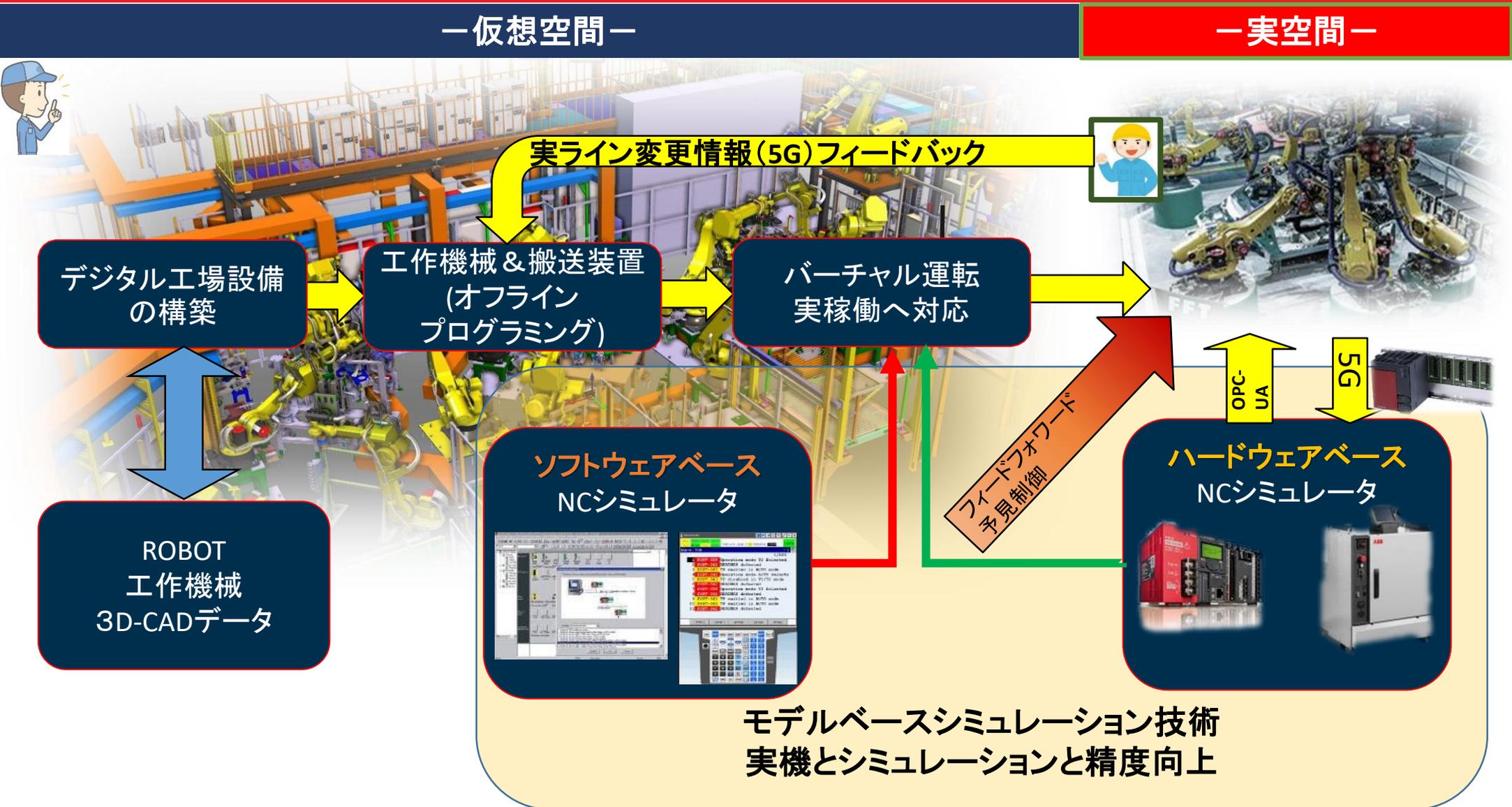
⑤ 誰が担当すべきか

開発担当より営業担当の方が現実的

DXを活用して、
現状の生産システムを超えた
新たな価値を創出、社会に提供。
→デジタルツインだからこそその付加価値
顧客の要望が増大することへの対応
(**できないでは済まされない**)
→カーボンニュートラルからクライメートニュートラルへ



MOSAN'S 1. 工作機械産業とデジタルツインと関係 ④



MOSAN'S 2. デジタル化とモデルベースシミュレーション開発 ①

- ① CAEのツール化はある程度実現している
統合型3D-CADにFEM, CAMを実装
(しかし, 顧客の説明に使う程でもない. カタログにカラー表示するくらい)
- ② 動作させるための個別の工作機械の特徴量が必要
個別別のパラメータセットを活用するも結局作り込みが必要
- ③ 機械単体の動作は表示できる
→ロボット, 工作機械, それらの組み合わせ
- ④ ライン全体(工場全体)の動作を表示できるか
→部品の投入から製造, 検査までモデル化してみたいのが本音
→**仮想CNC, 仮想シーケンサ等**の準備も必要
- ⑤ モデルベースシミュレーションは物理現象を反映
特徴量の取得はエンジニアに能力に依存

実際に運用しているのは数社?(表に出て来ない)

1. 複雑化した機械構成に対応できるか
 - 小ロット生産システムから始める.
 - 対象部品の複雑化は複合加工機ベースの生産システムもあ
 - 顧客の理解が得られるように生産手法を可視化
2. スタンドアロンソフトウェアツールは生き残れない
3.
 - CAD/CAM/CAE/CATのシリーズ結合
 - 1D-CAEの台頭, 物理パラメータのモデル挿入が可能
 - ツール間のデータ互換性, 接続エラー対策がコスト高と遅延を誘発
4. 顧客の要求の高度化
 - 生産の複雑化により, 最終形態を見通すことの困難さ
 - これをDXで可視化することにより視覚に訴え, 信頼感を醸し出す.
5. オールインワンタイプのソフトウェアプラットフォームへの期待

1. IoTの活用によりデータは取得できる。
サンプリング周波数の増加, データサイズ増大にも対応
2. CNCからの情報はどうか
遅い!
→モデルベースの検証には致命的
→多数情報を高サンプリング周波数で一気取得すると破綻
→デジタルツイン化したときに, 「現象再現」に支障
→今後の進展に期待
→あるいは, ユーザが「データ処理を工夫」するか

3. 当研究室の取り組み

①合言葉は

“理論と実践”，“機械は動いてこそその機械”

②研究テーマ

1) 工作機械の運動制御（振動制御，軌跡制御）

- ・送り駆動系のモデルベースシミュレーション
- ・パラレル・シリアルリンク型加工機の精度評価と姿勢制御
- ・デジタルツイン技術開発（VRによる機械操作教育）

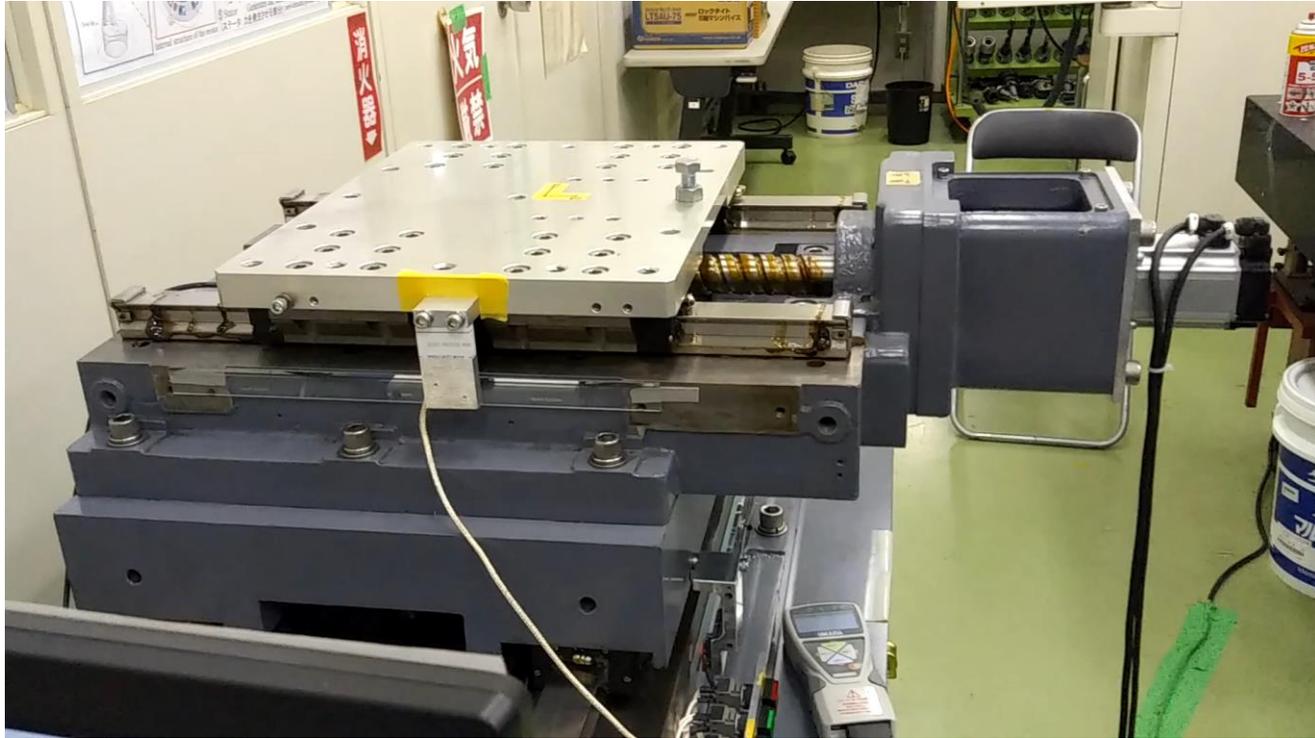
2) 新しい加工方法の提案

- ・非軸対称，三次元曲面の旋削加工

Non-Axisymmetric Curved Surface Turning → NACS Turning

- ・非軸対称，三次元曲面のボーリング加工

Non-Axisymmetric Curved Surface Boring → NACS Boring

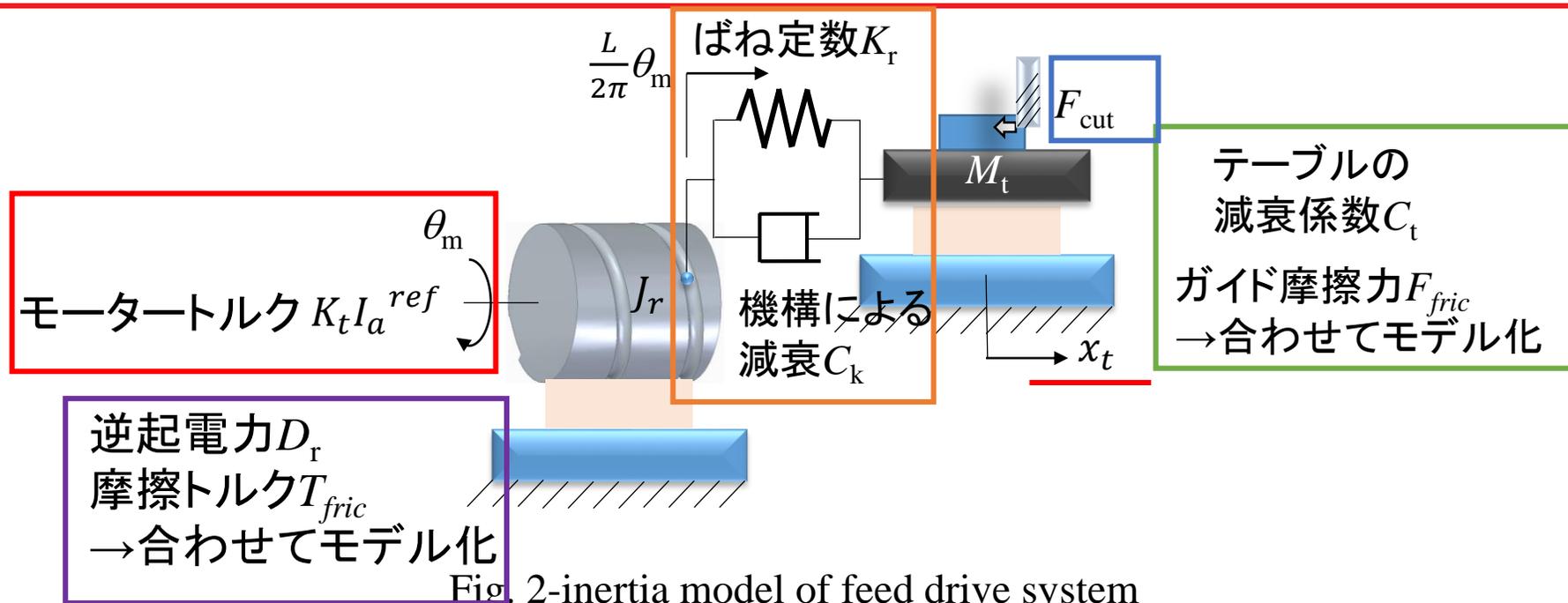


ねらい：
工作機械の送り駆動系をモデル化
→切削抵抗の推定

図 位置決め制御実験(直線, 円弧補間)

3. 当研究室の取り組み

送り駆動系のモデルベースシミュレーション 2



回転系，並進系の運動方程式はそれぞれ以下の(1)，(2)式で表せる

$$J_r \ddot{\theta}_m = K_t I_a^{ref} - D_d \dot{\theta}_m - \frac{L}{2\pi} K_r \left(\frac{L}{2\pi} \theta_m - x_t \right) - \frac{L}{2\pi} C_k \left(\frac{L}{2\pi} \dot{\theta}_m - \dot{x}_t \right) \quad (1)$$

$$M_t \ddot{x}_t = K_r \left(\frac{L}{2\pi} \theta_m - x_t \right) + C_k \left(\frac{L}{2\pi} \dot{\theta}_m - \dot{x}_t \right) - C_d \dot{x}_t - F_{cut} \quad (2)$$

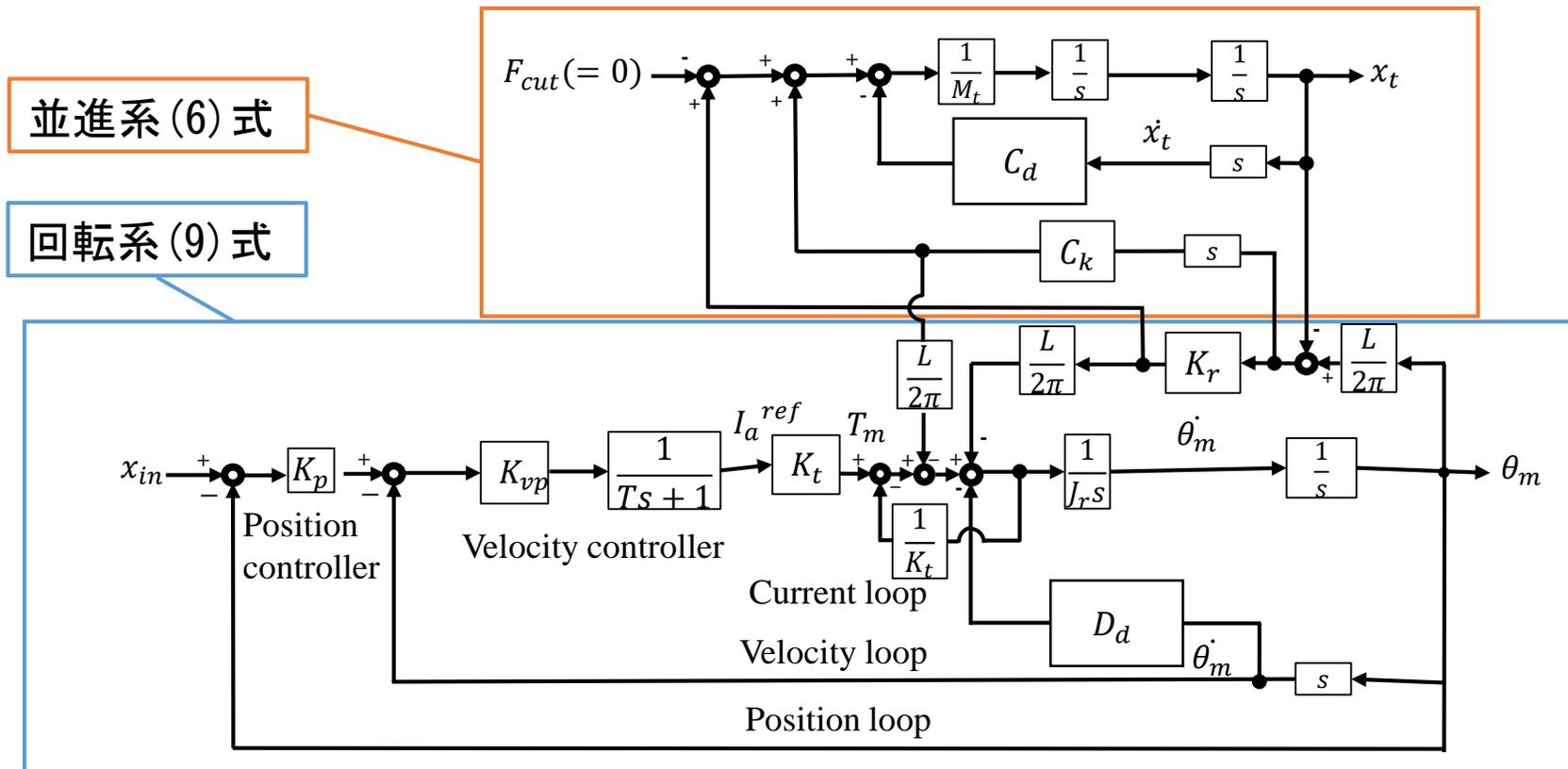
未知
全てのパラメータを把握できれば切削力 F_{cut} の推定可能

3. 当研究室の取り組み

Matlabシミュレーションと送り駆動系のブロック線図

$$M_t \ddot{x}_t = K_r \left(\frac{L}{2\pi} \theta_m - x_t \right) + C_k \left(\frac{L}{2\pi} \dot{\theta}_m - \dot{x}_t \right) - C_d \dot{x}_t - F_{cut} \quad (6)$$

$$J_r \ddot{\theta}_m = K_t I_a^{ref} - D_d \dot{\theta}_m - \frac{L}{2\pi} K_r \left(\frac{L}{2\pi} \theta_m - x_t \right) - \frac{L}{2\pi} C_k \left(\frac{L}{2\pi} \dot{\theta}_m - \dot{x}_t \right) \quad (9)$$



SIEMENS 3Dシミュレータ(NX MCD)によるデジタルツインの構成

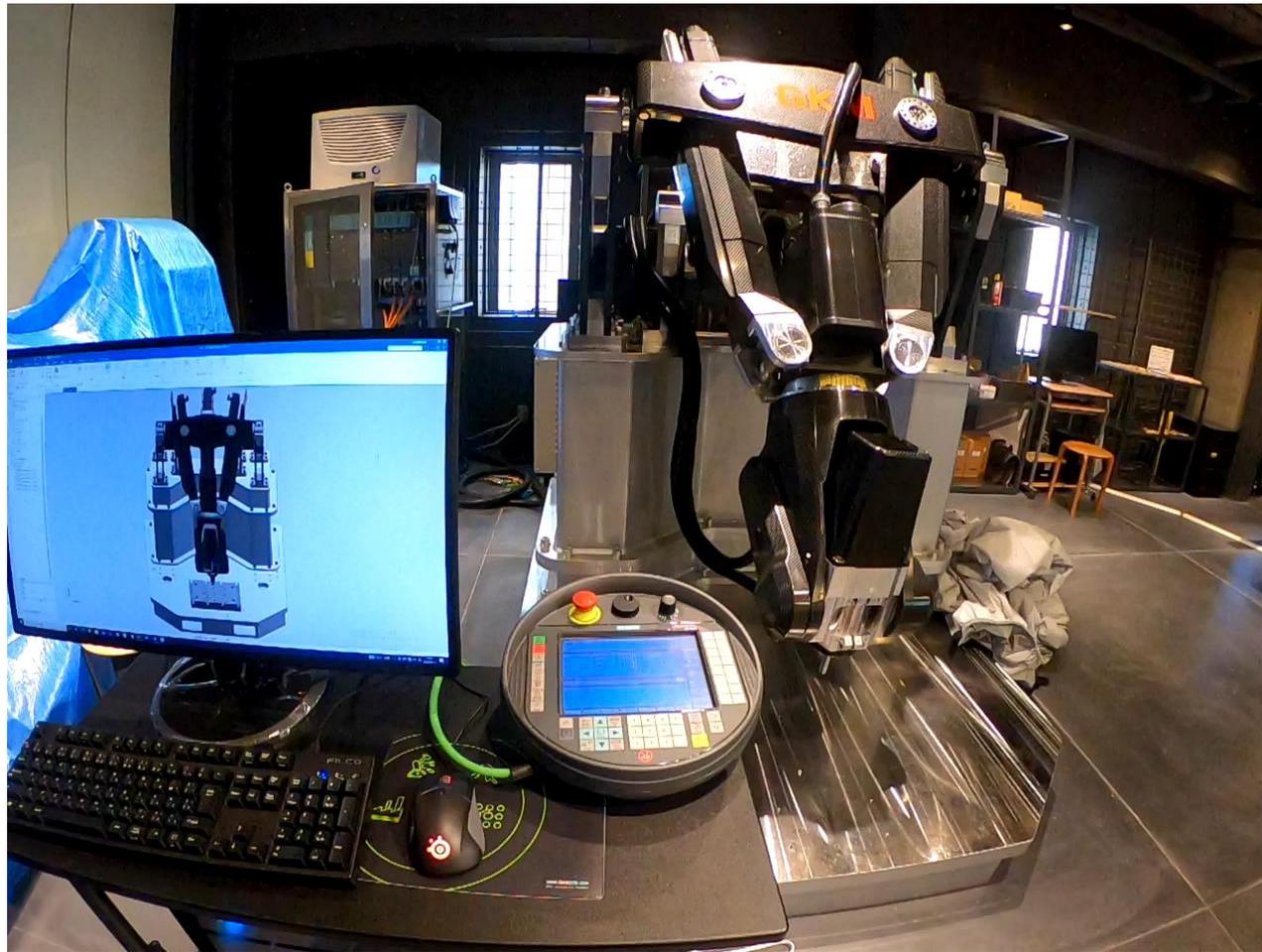


図 コンピュータと実機の同期動作の実現

【Japan Machinery Innovation Forum】

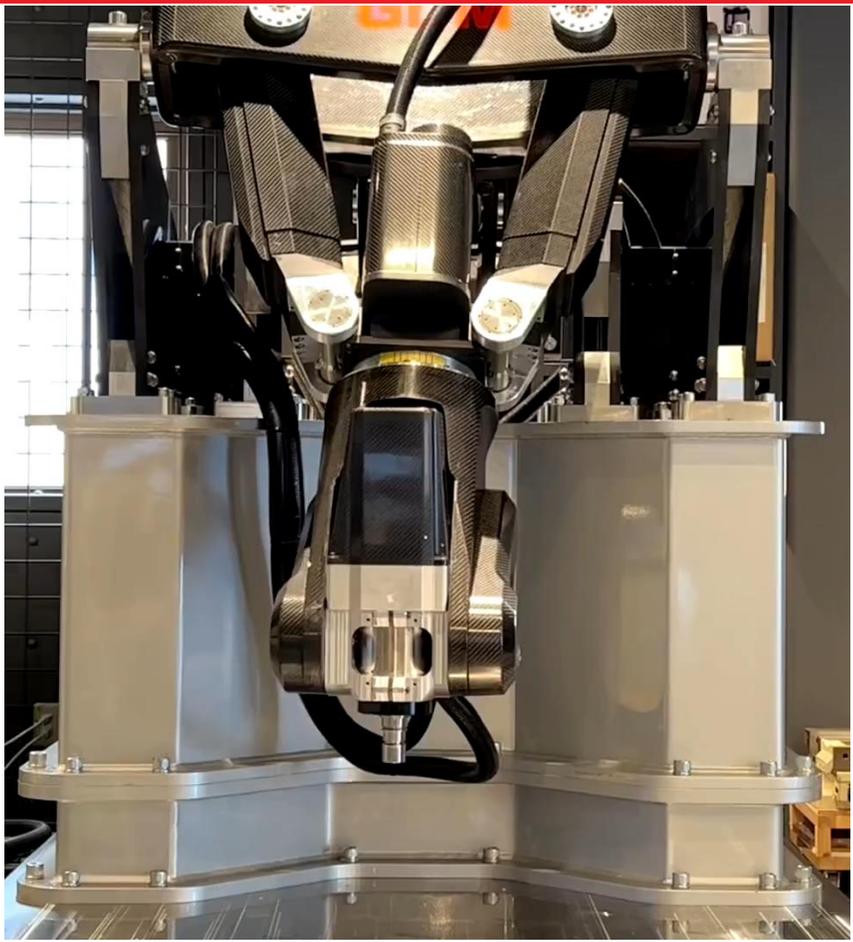


Fig. Demonstration of XMINI

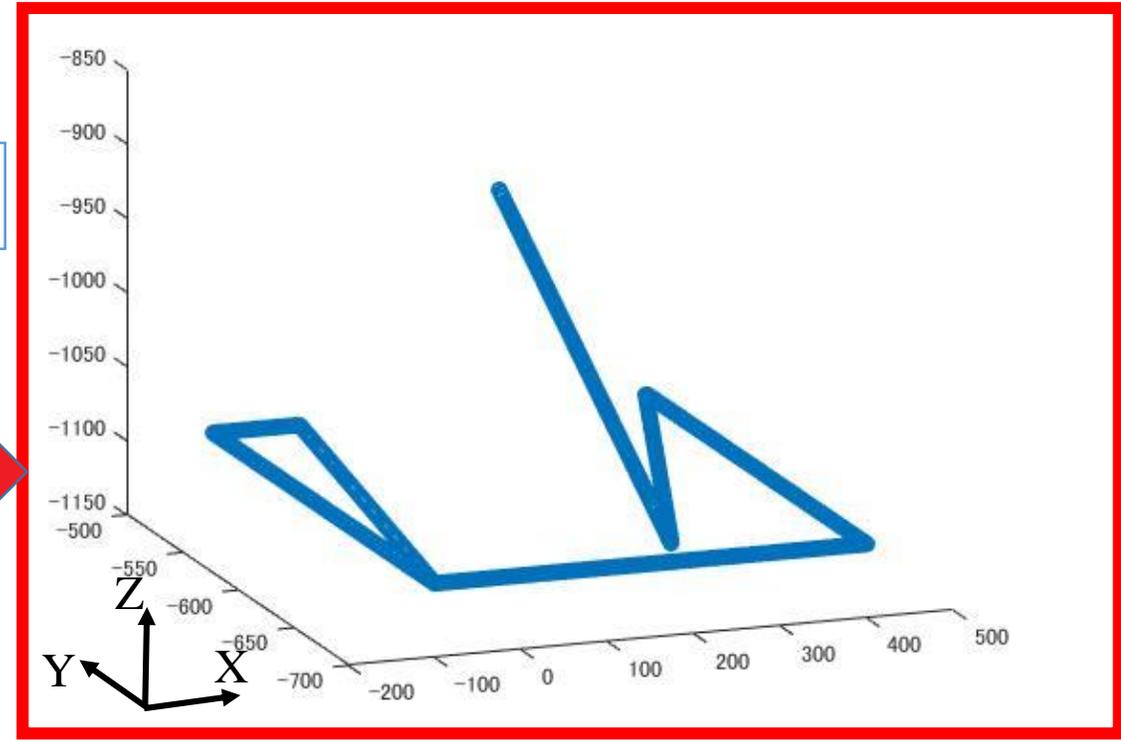
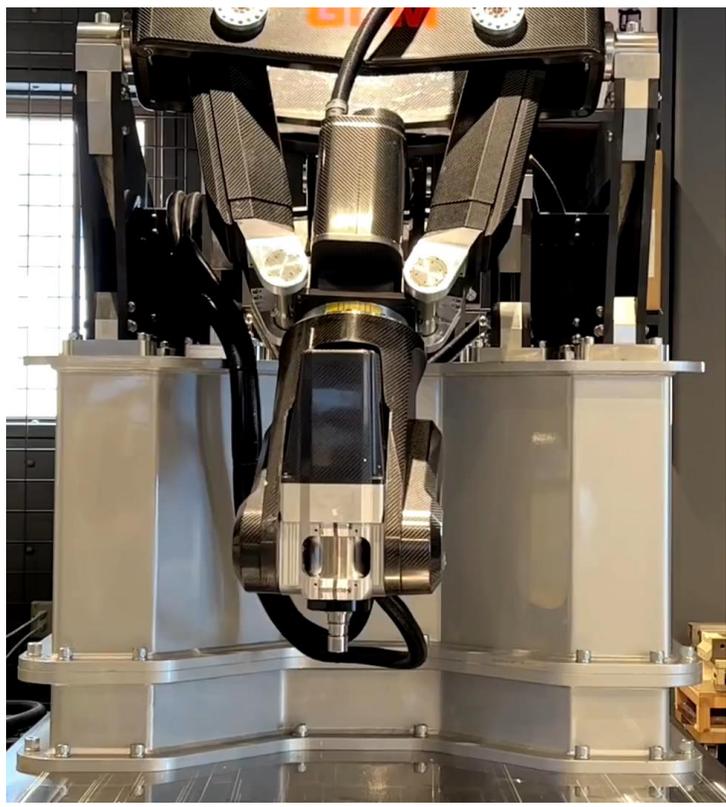


Fig. Calculation result of forward kinematics model

順運動学モデルにエンコーダ情報を入力することで、
工具先端の微小な変位や加工経路の再現が可能となる

MOSAN'S 3. 当研究室の取り組み パラレル・シリアルリンク型加工機の精度評価と姿勢制御 3



工具経路
を入力

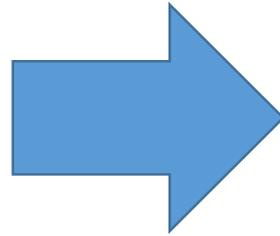
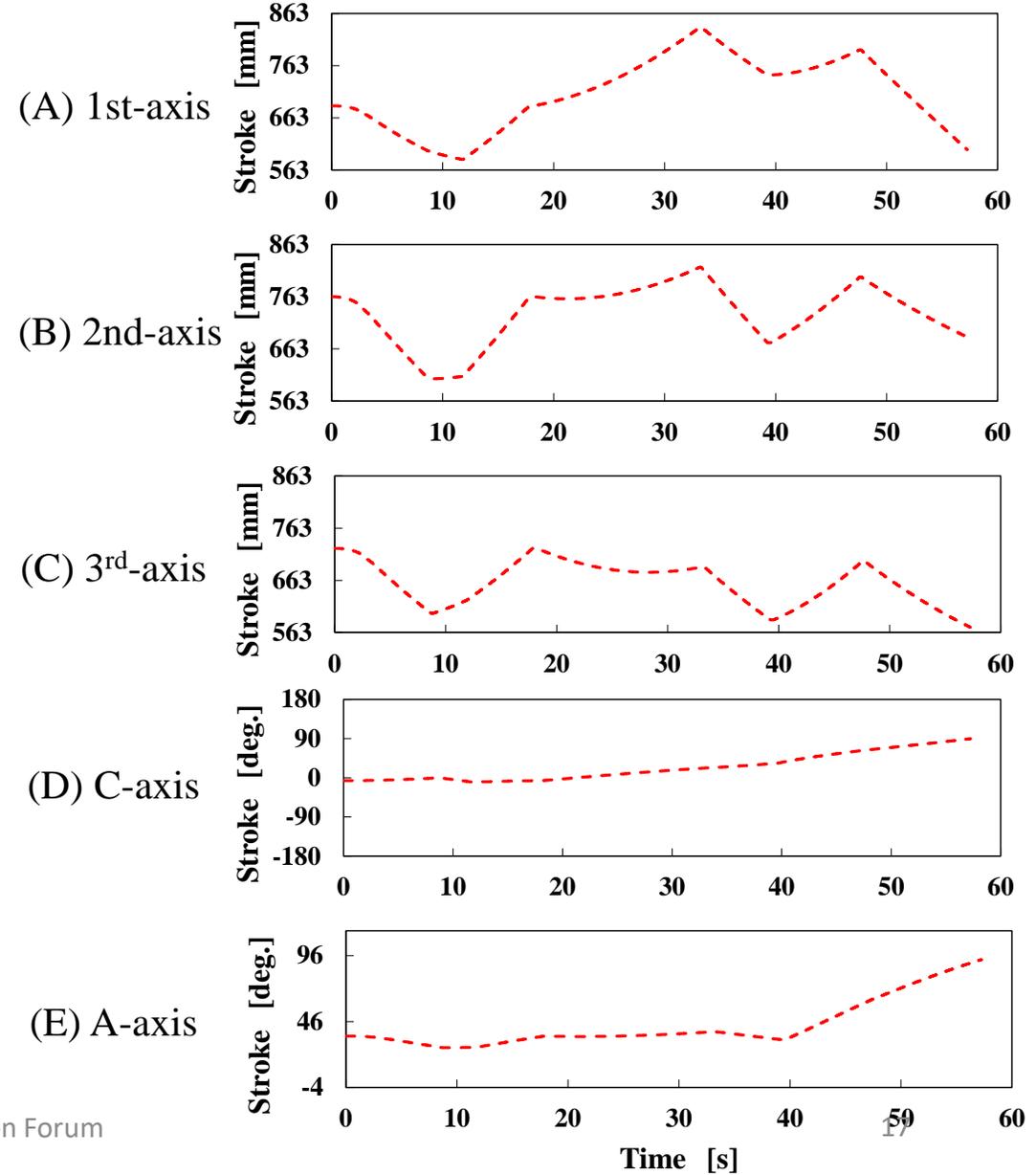


Fig. Demonstration of XMINI

逆運動学モデルに工具経路を入力することで、
駆動軸の理論値の算出や動作範囲の確認が
可能となる



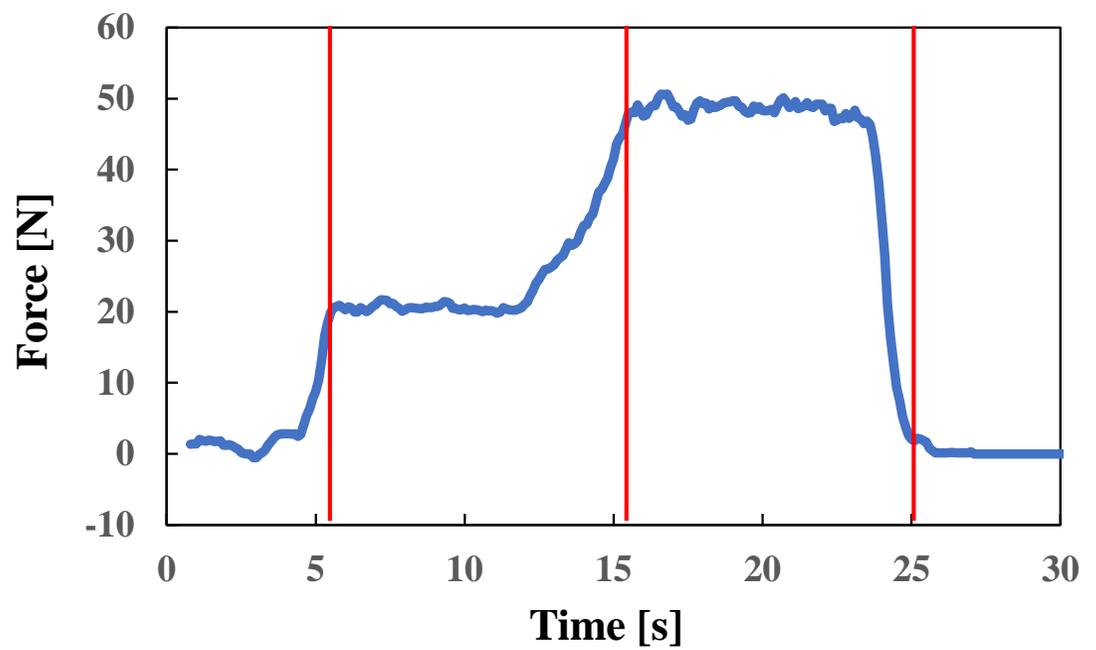


Fig. Measurement result of force logger

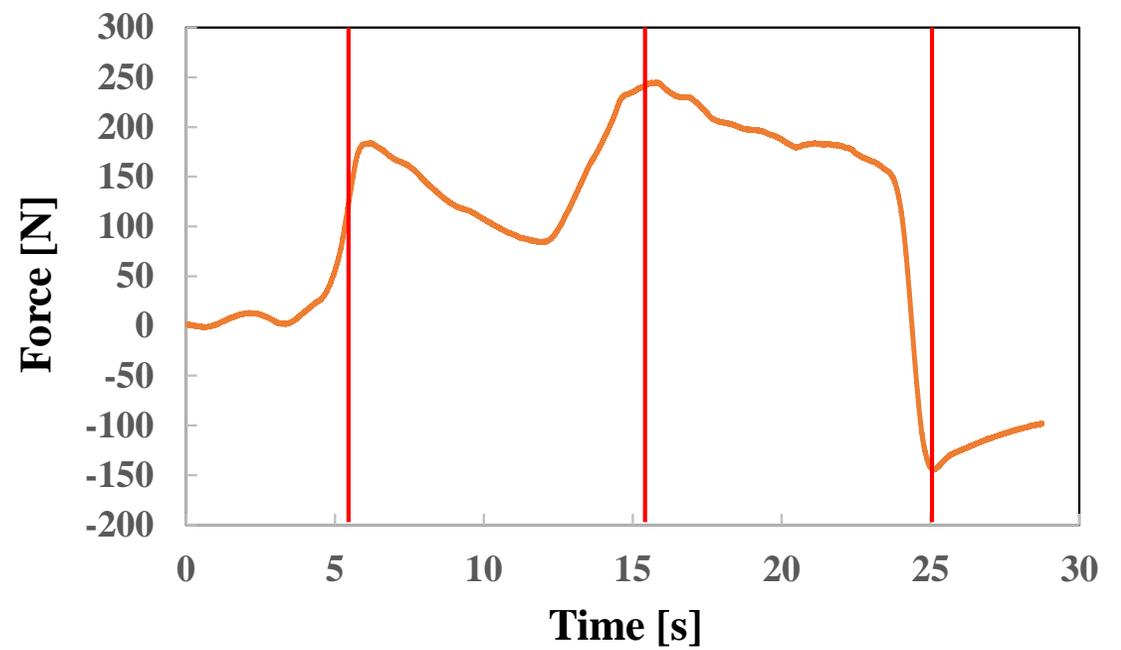
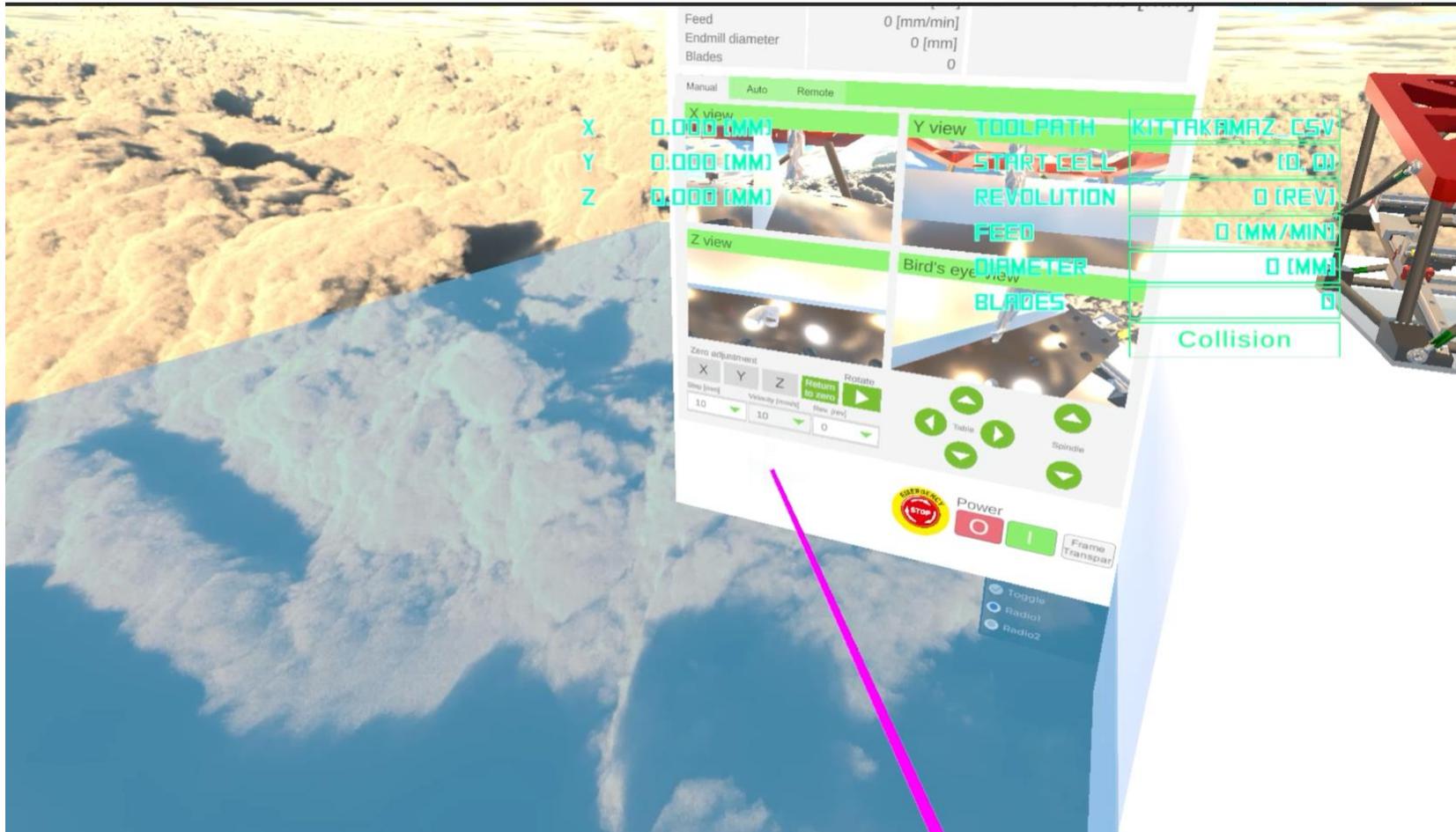


Fig. Jacobian calculation result in X direction

外力(外乱)推定が可能であることを示唆
 (研究中)

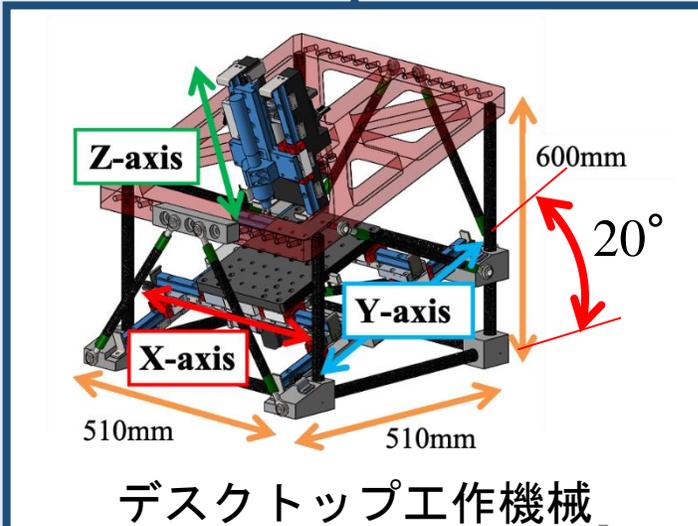
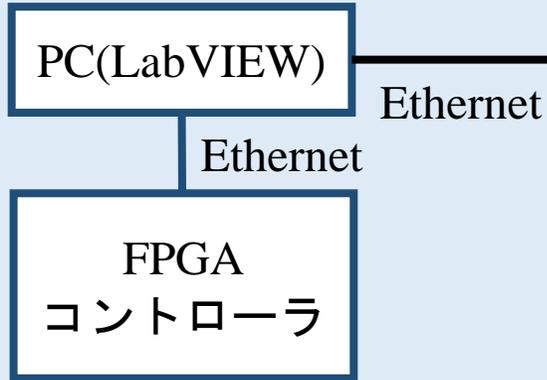
➤ 開発したシミュレータの動画



Movie Developed simulator

3. 当研究室の取り組み デジタルツイン技術開発 (VRによる機械操作教育) 2

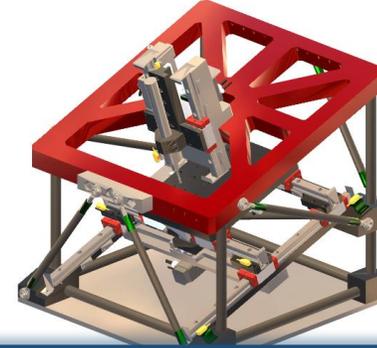
実機側



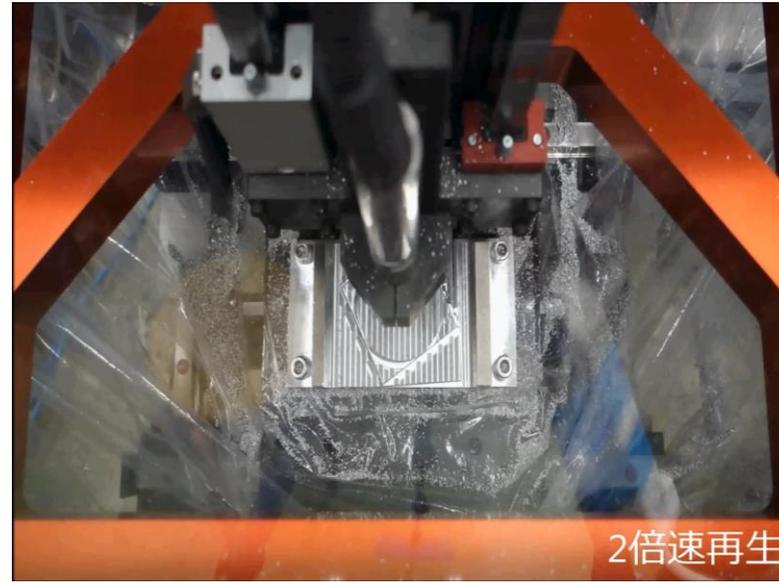
インターネット

VR側

PC(Unity)

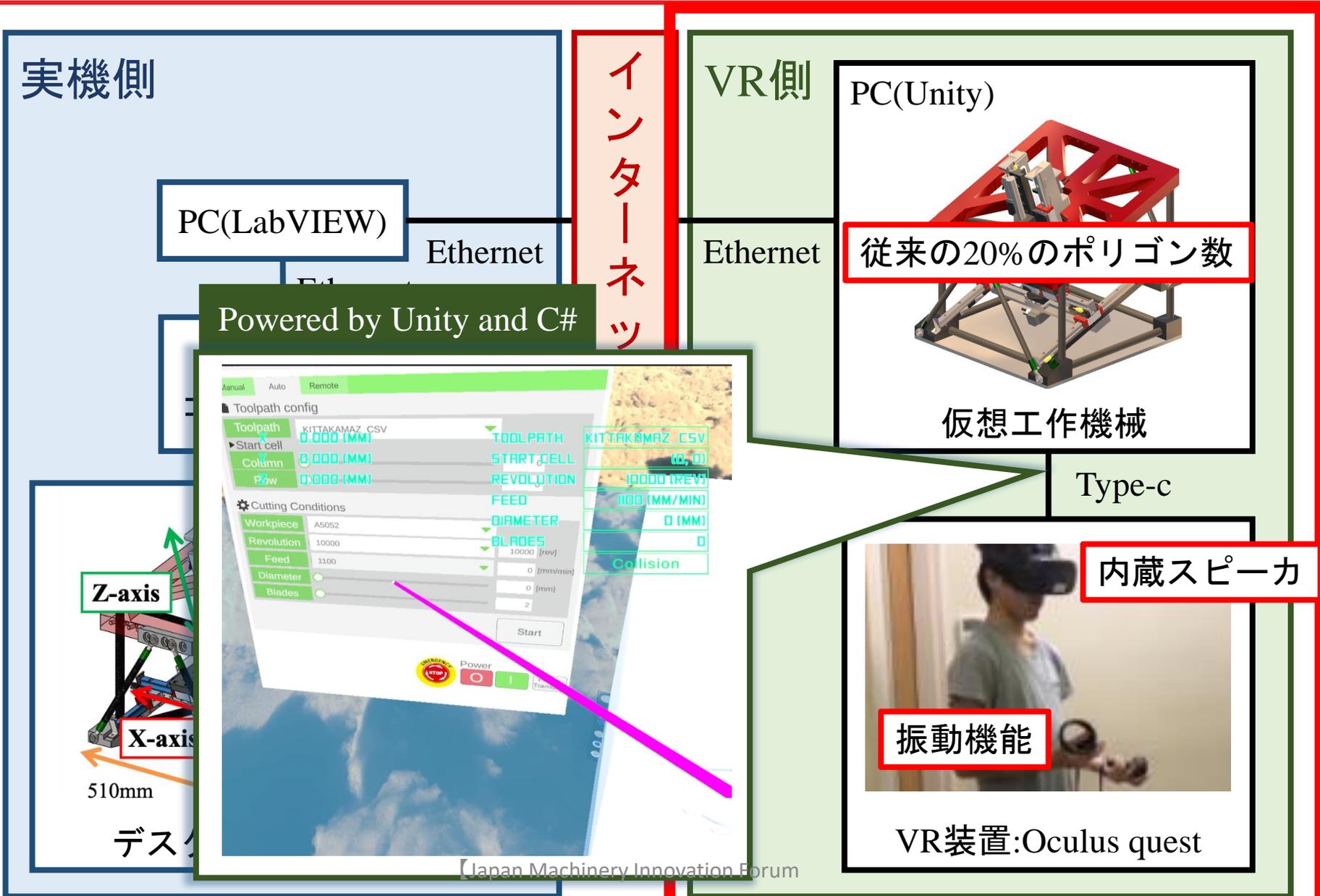


Ethernet

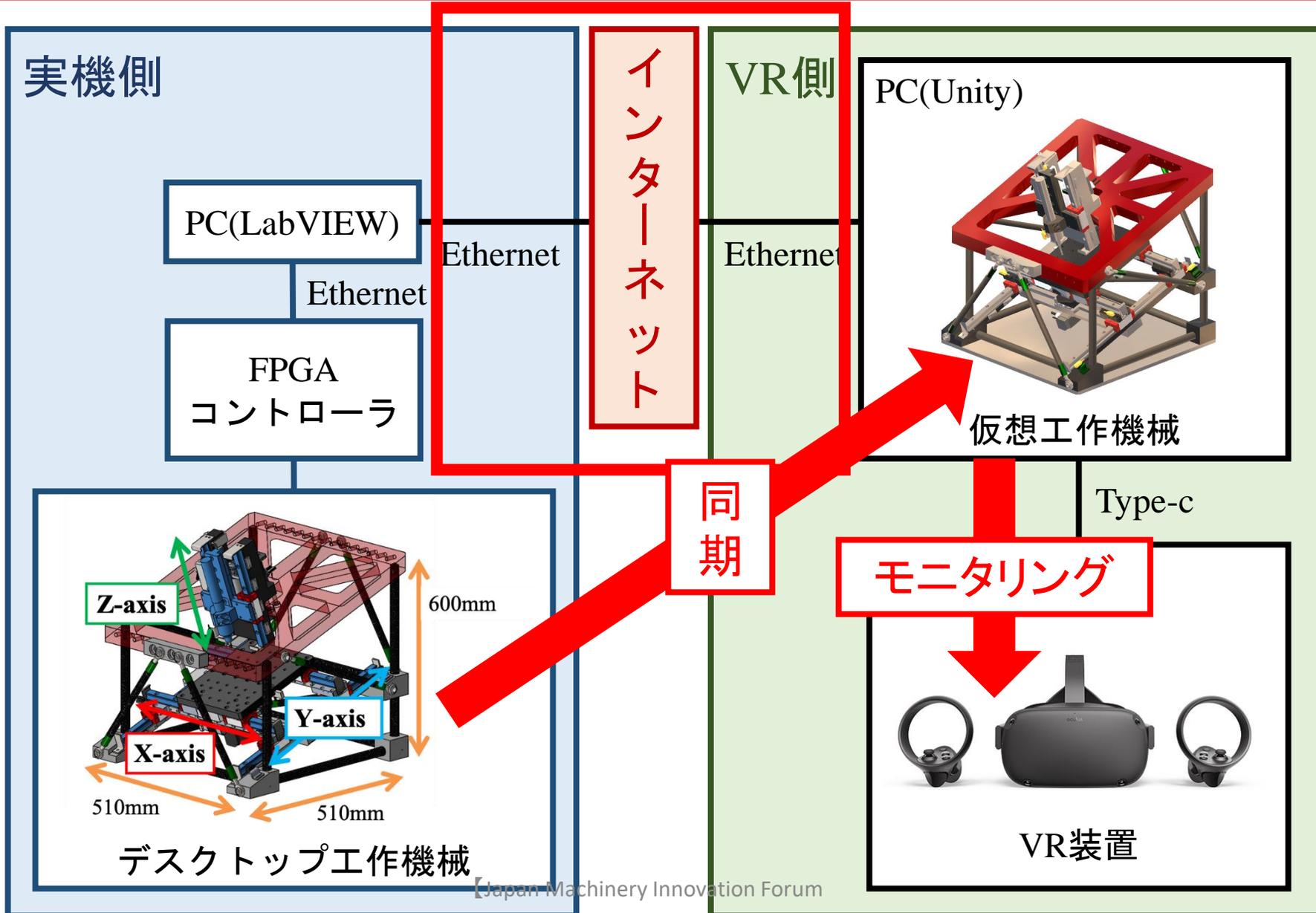


VR表示

3. 当研究室の取り組み デジタルツイン技術開発 (VRによる機械操作教育) 3



3. 当研究室の取り組み デジタルツイン技術開発 (VRによる機械操作教育) 4



3. 当研究室の取り組み デジタルツイン技術開発 (VRによる機械操作教育) 5

➤ デジタルツインのシステム構成

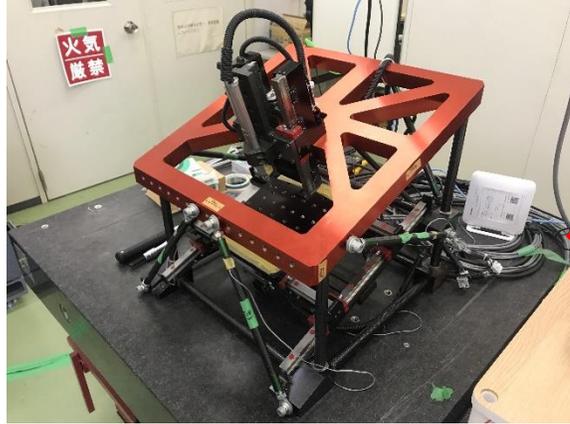


Fig. Actual desktop machine tool

デジタルツイン

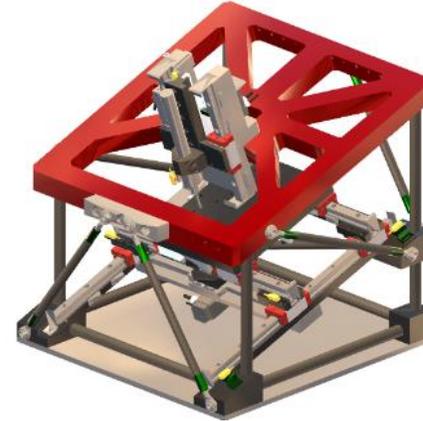
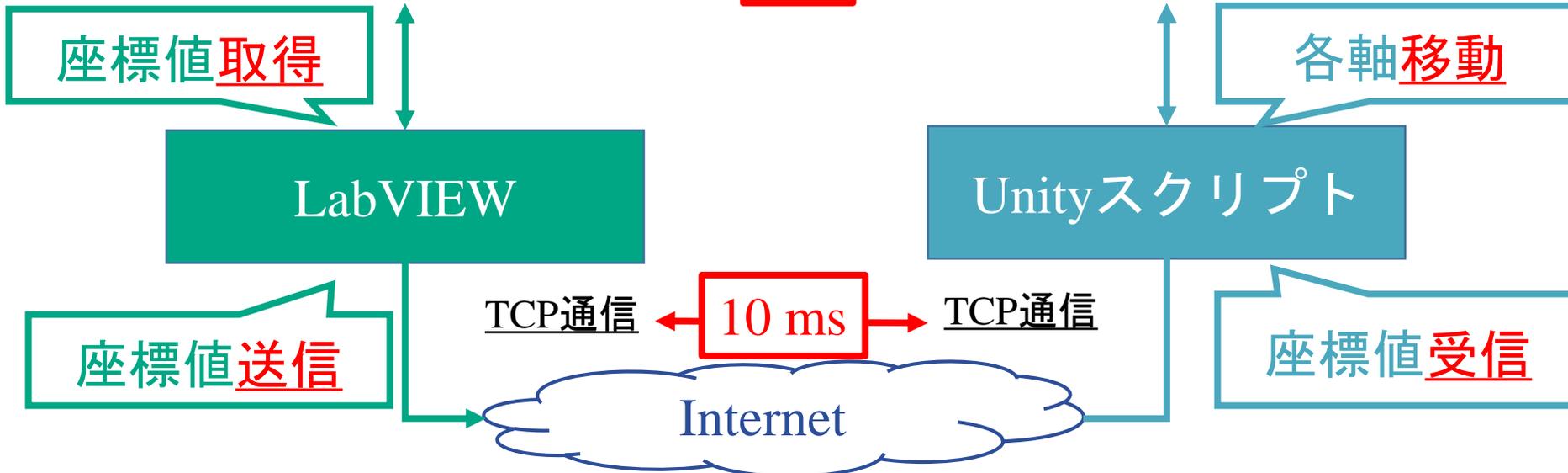


Fig. Virtual desktop machine tool



・非軸対称，三次元曲面の旋削加工

Non-Axisymmetric Curved Surface Turning

→ NACS Turning

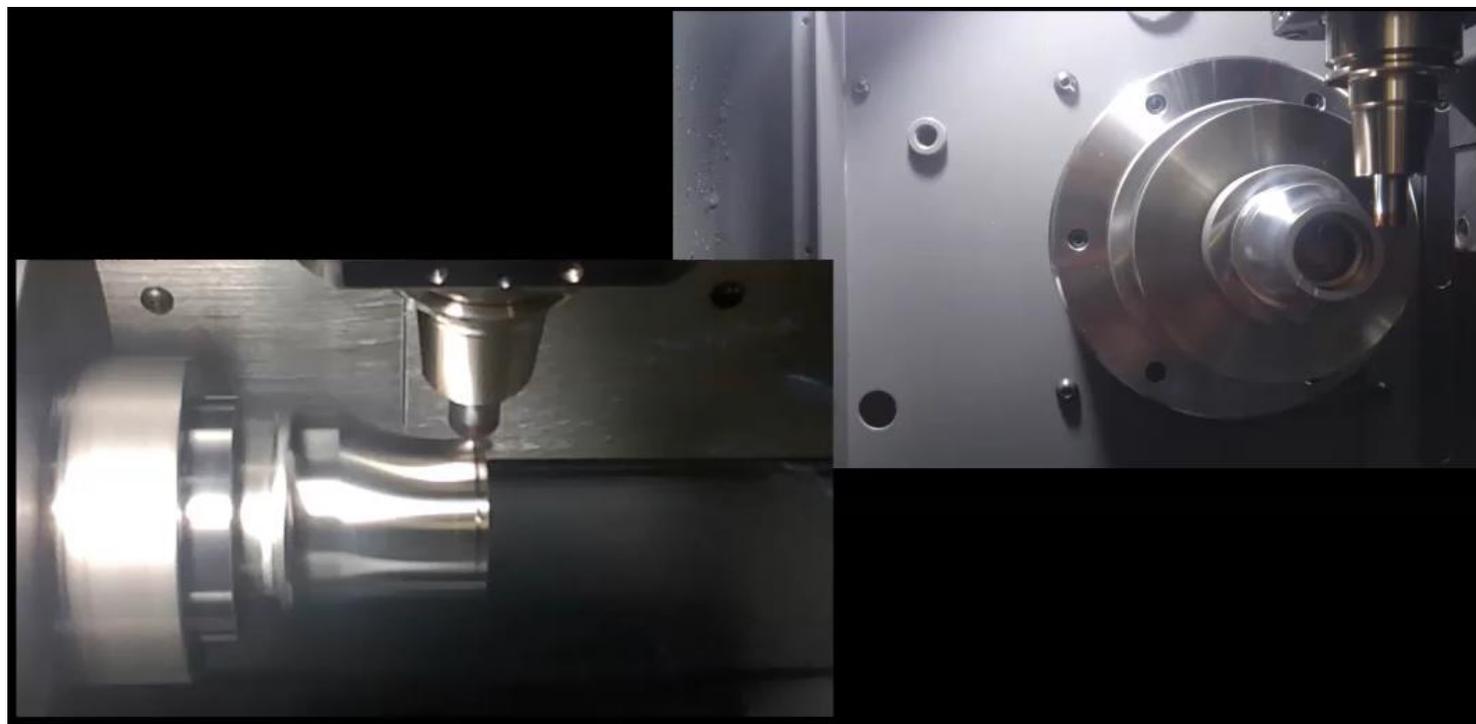
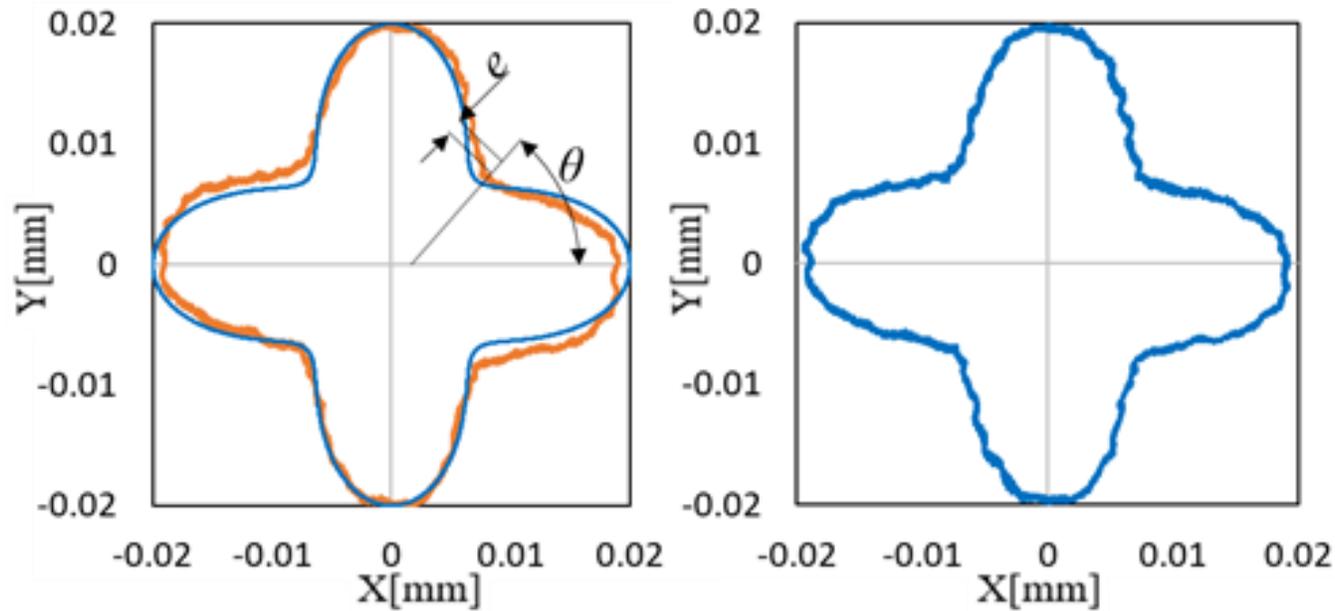


Fig. Proposed turning method

- ・非軸対称，三次元曲面のボーリング加工
Non-Axisymmetric Curved Surface Boring
→ NACS Boring



(A) Without observer (B) With observer

Fig. Displacement with and without disturbance observer

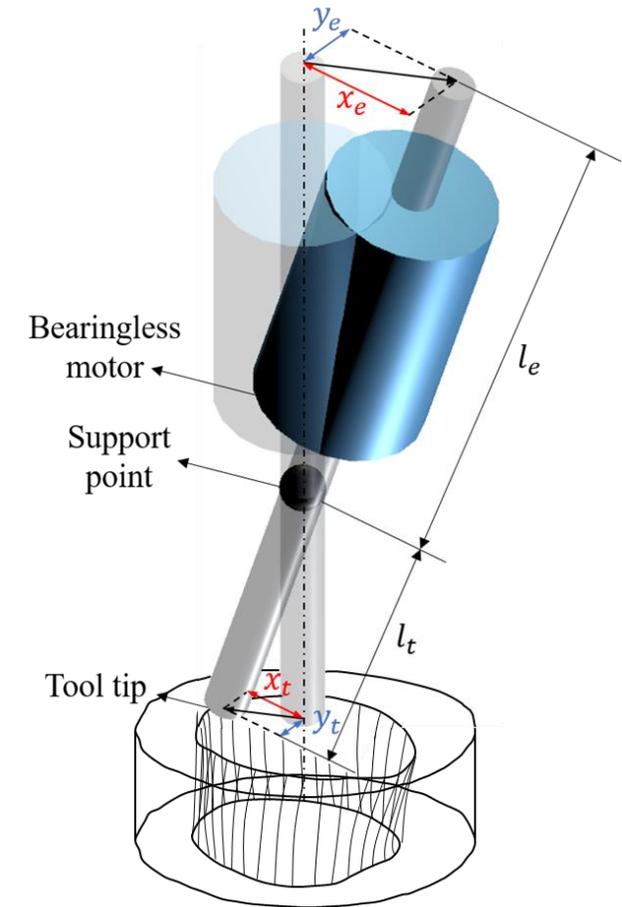


Fig. Proposed boring method

4. 解決すべき技術課題

- ① 顧客層の変化
 - ・生産システムの標準化
 - ・機械部品の複雑化
 - 既存の技術の応用と新技術の創出
 - ・DX化の流れ
 - “精度では負けない”, “技術力がある”を可視化
 - 顧客が変われば, 自身も変わる
 - 視覚に訴える努力
- ② 開発に関するソフトウェアのオールインワン化
 - ・3D-CADを軸としたソフトウェアプラットフォームへの期待
- ③ 技術の進化に伴い技術力の深化
 - ・技術は日進月歩→技術者の能力向上への環境整備
- ④ 顧客を巻き込んだアジャイル(短期的)プロジェクト
 - ・技術, 営業が一体となって顧客と一緒に進む.
 - Blue Ocean開拓も見据える
 - Red Oceanを突き進む.

1. 「大きく考える」→「**小さく始める**」→「今すぐ始める」
2. 「デジタルツインとデジタルコンティニューイティ」,
「デジタルコミュニティ」で実行
3. DXによるイノベーションは勇気と哲学が必要