



22/Sep/2022 @2022 Japan VI-grade ZERO PROTOTYPES Summit

リアルタイム解析を用いた自動車の仮想走行試験

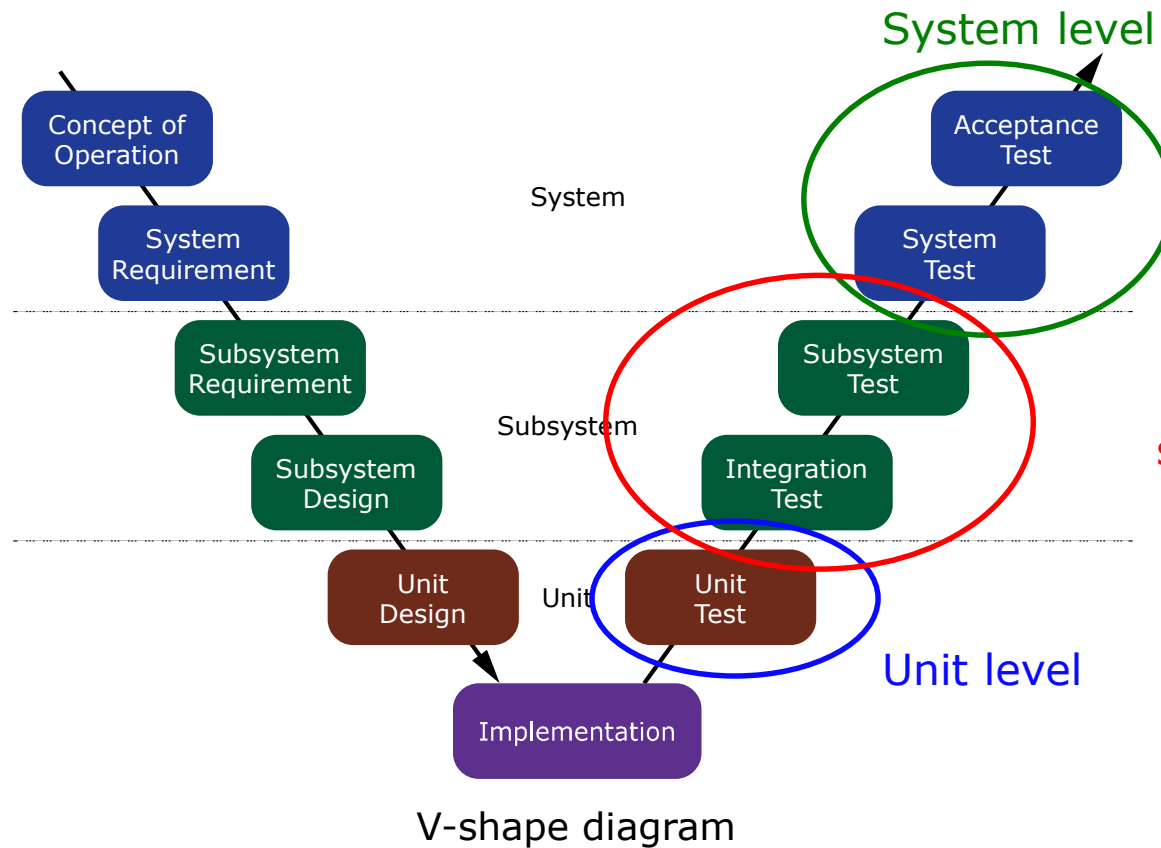
Virtual proving ground with real-time simulation technique



明治大学 椎葉 太一

Taichi SHIIBA, Meiji University

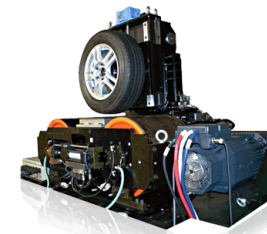
自動車の開発フェーズと性能評価



System level test

- Road test
- Post-rig test
- Wind tunnel test

HILS
subsystem test



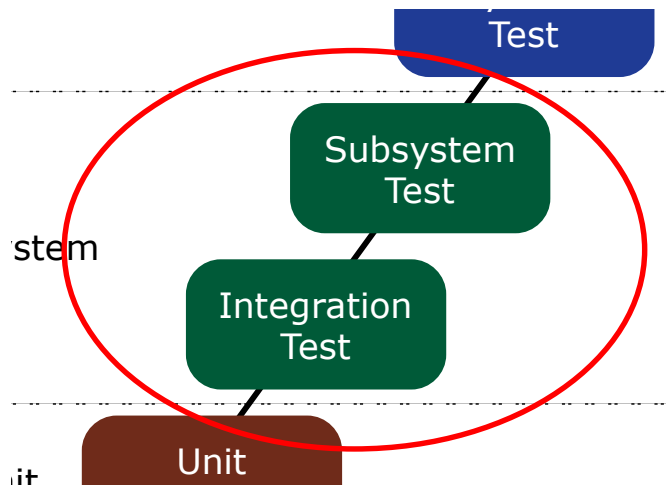
Unit level test

- Strength
- Durability
- Function

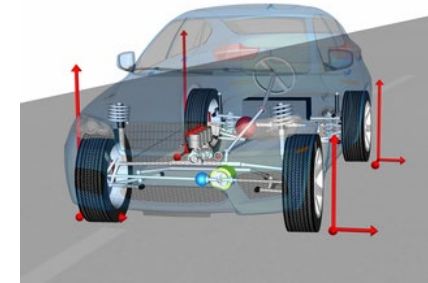
HILS for subsystem



- HILS = リアルタイム解析 + ベンチテスト
 - 様々なHILSシステムが実用化されている
 - パワートレインHILS, ブレーキHILS, ステアリングHILS, タイヤ-サスペンションHILS



HILS
subsystem test



Real-time simulation with full vehicle model

Working conditions
of subsystem



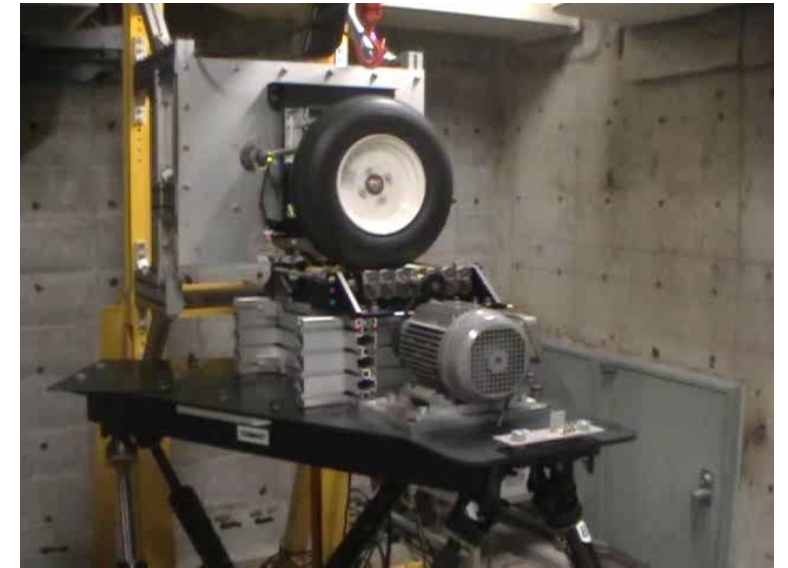
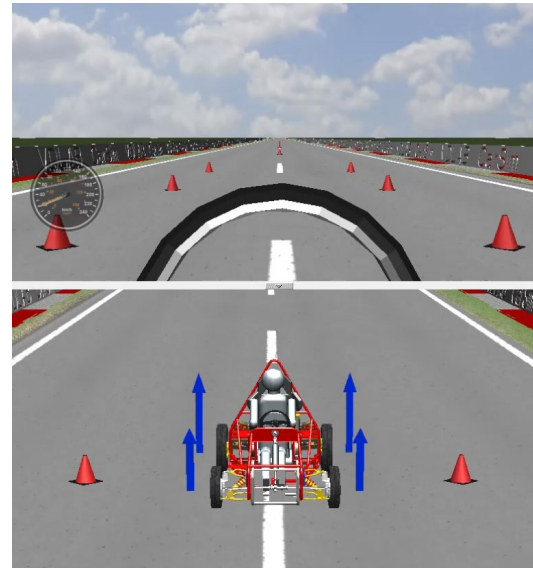
Measurement data
for RT simulation



タイヤ-サスペンションHILS



- Real / Virtual running test

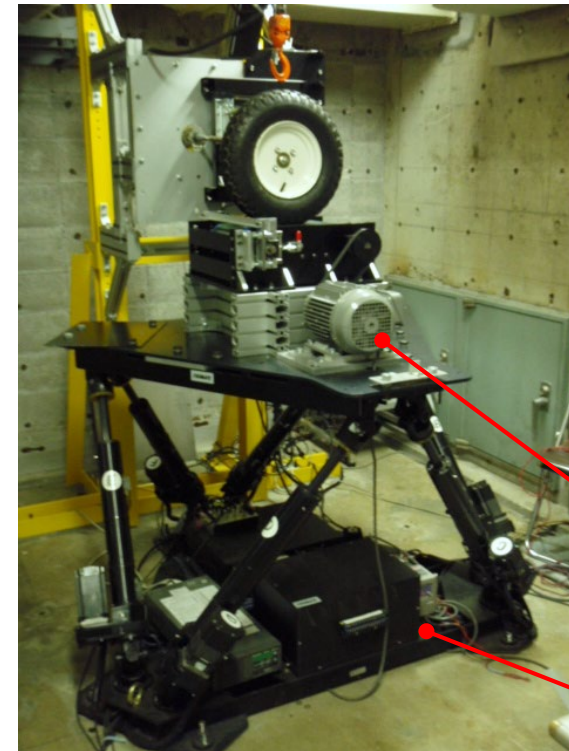
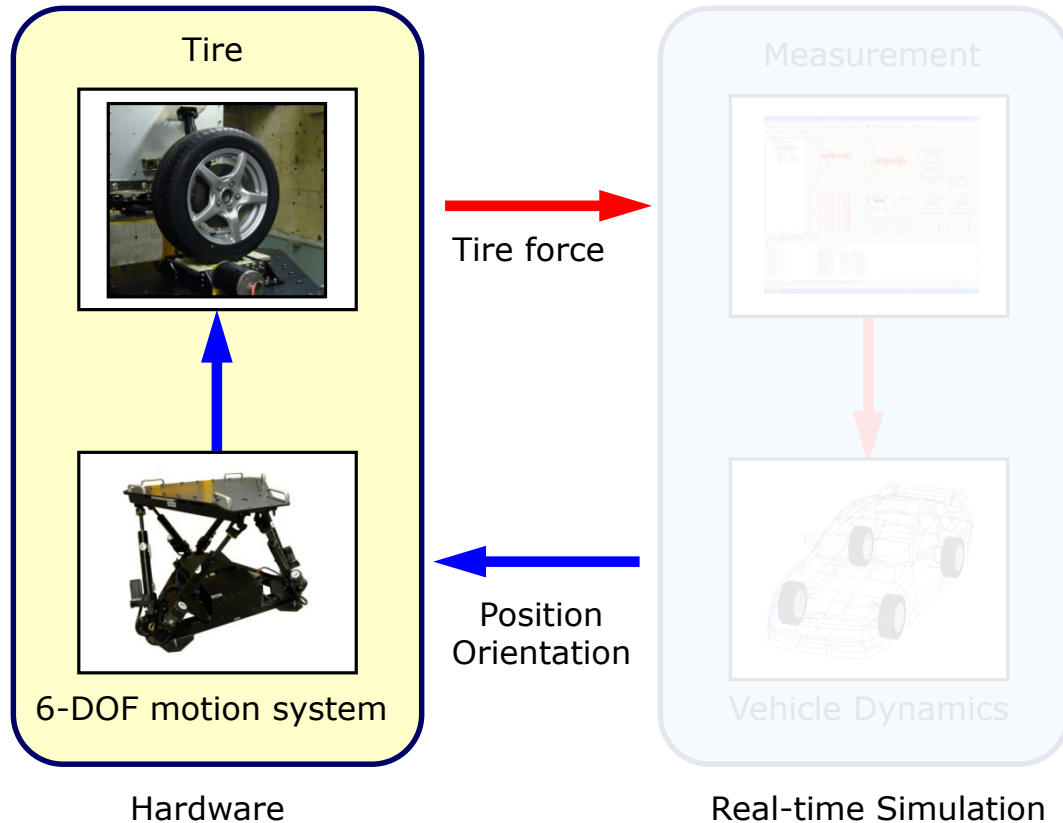


タイヤ-サスペンションHILS

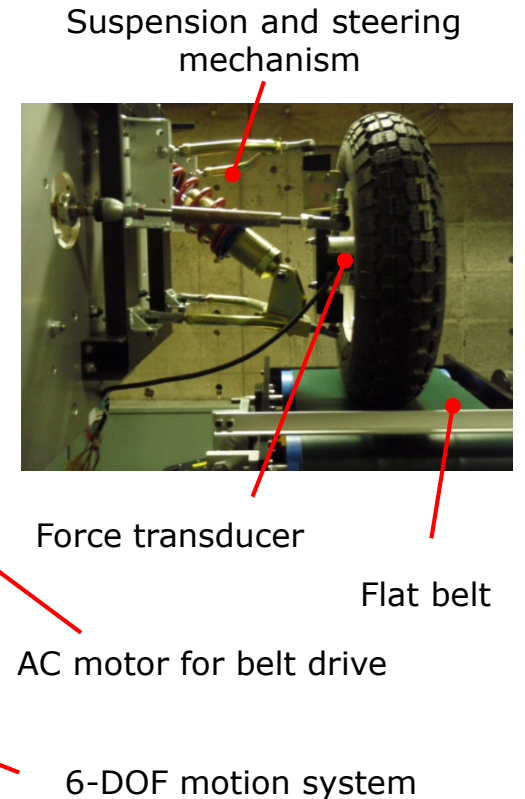


■ タイヤ-サスペンション試験機

- スチュワートプラットフォームを用いて様々な接地状態を再現



Tire-suspension HILS in Meiji University

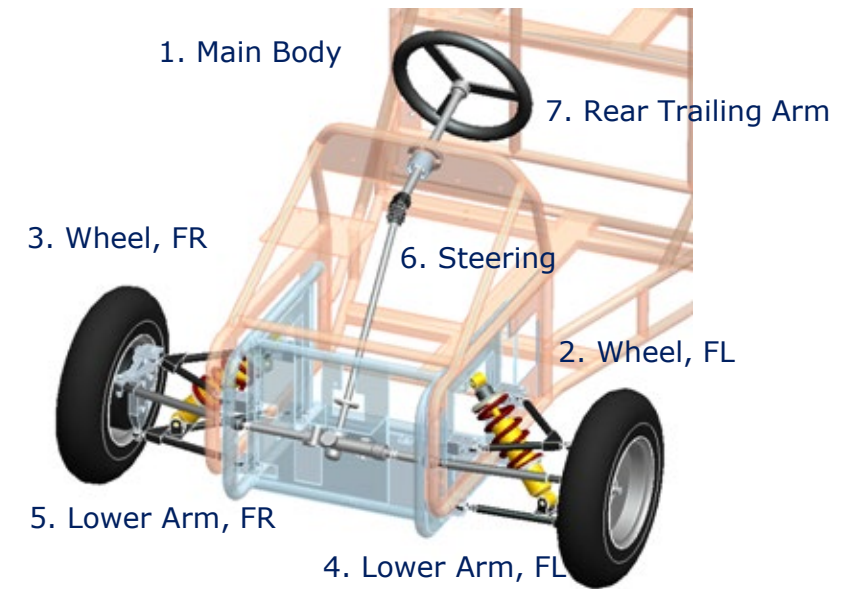
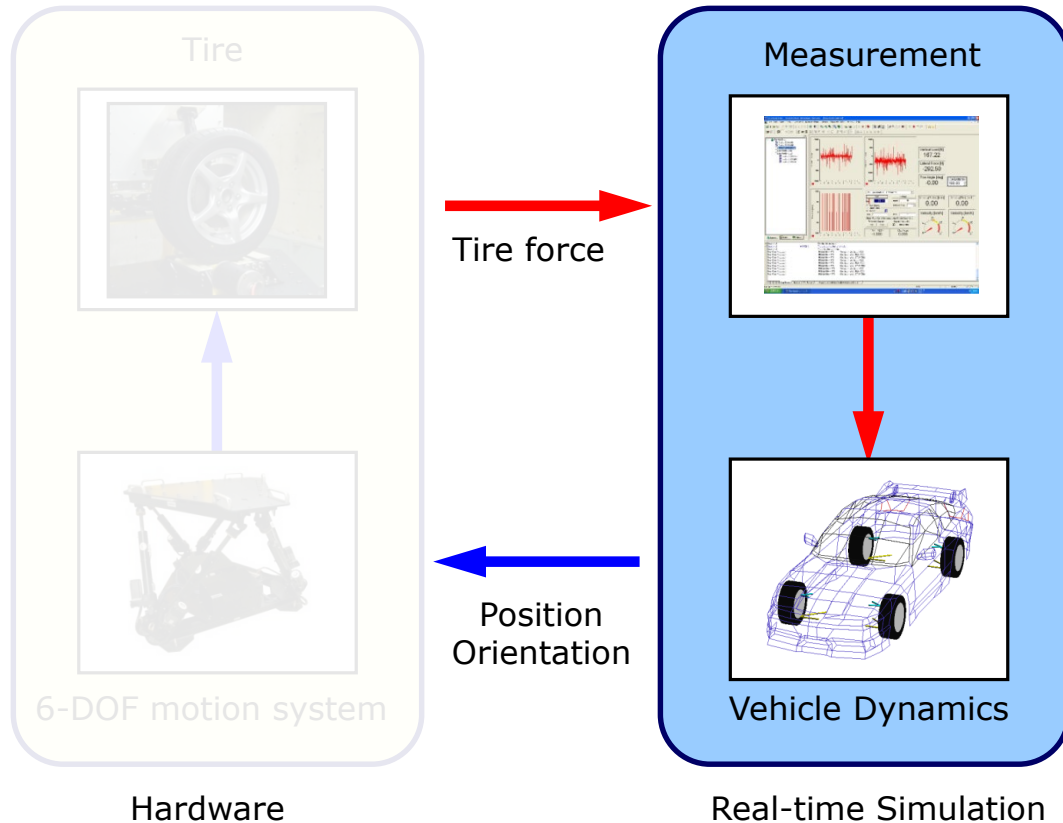


タイヤ-サスペンションHILS



■ マルチボディ車両運動モデル

- リアルタイム解析実現のため、一部のボディはマスレスリンク(拘束条件)に置き換え
- 研究室で開発したマルチボディ解析ソフトウェアによるリアルタイム解析

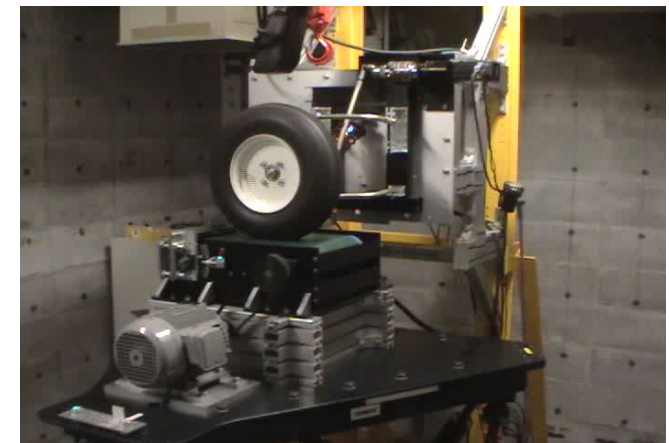
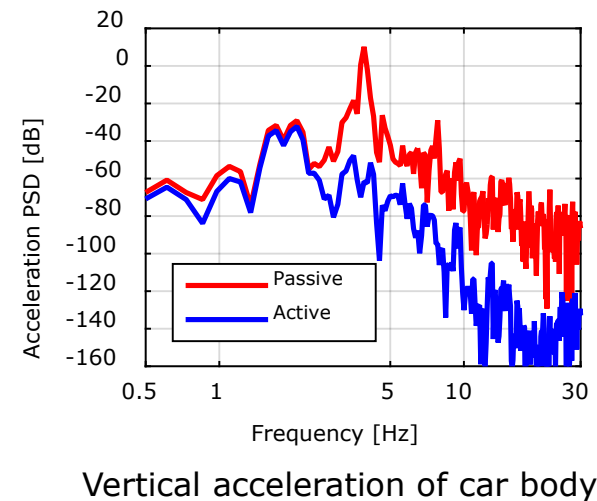
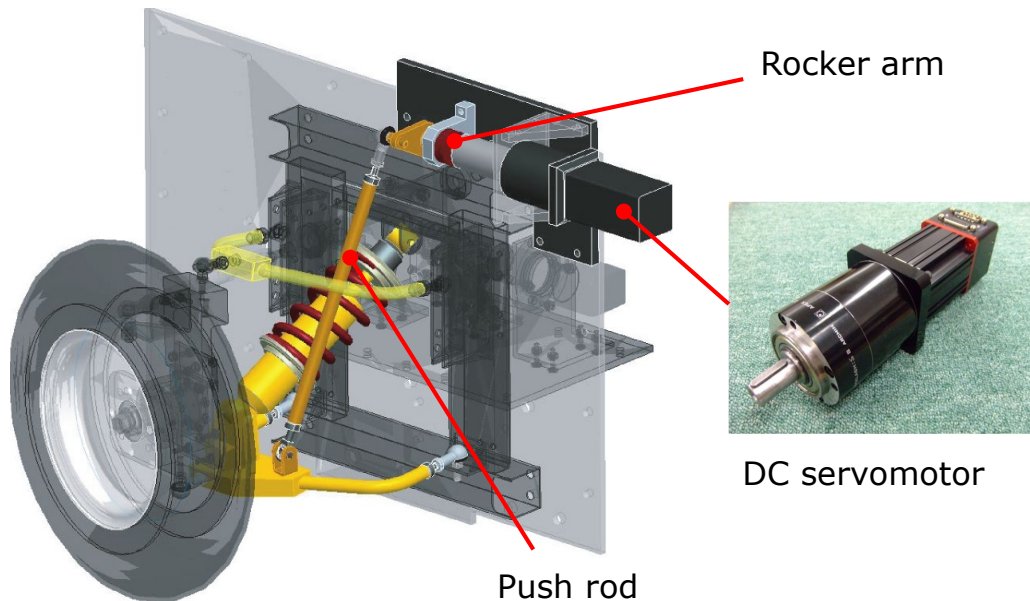


$$\begin{matrix} 74 \\ (= 42+32) \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} 42 \\ 32 \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \Phi_r^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}' & \Phi_{\pi'}^T \\ \Phi_r & \Phi_{\pi'} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}' \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^A \\ \mathbf{n}^A - \tilde{\boldsymbol{\omega}}' \mathbf{J}' \boldsymbol{\omega}' \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix}$$

タイヤ-サスペンションHILS



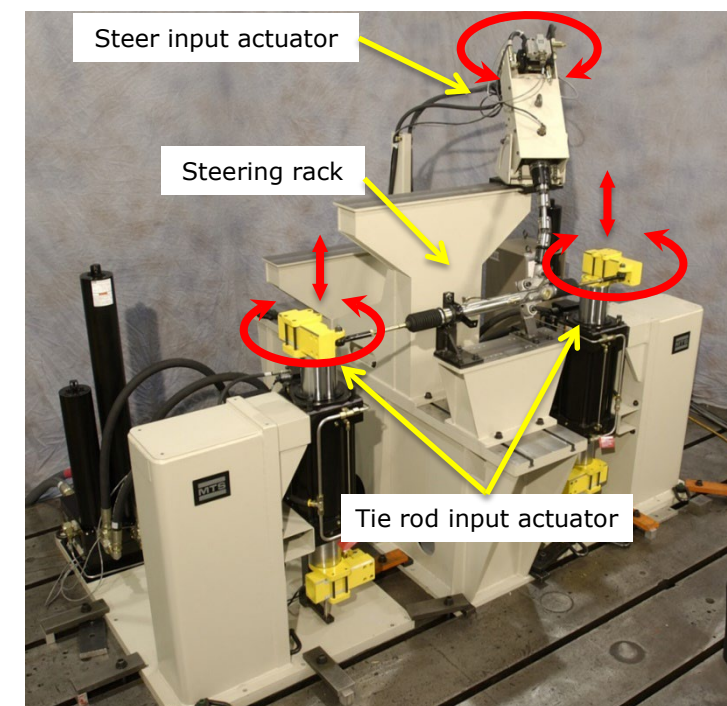
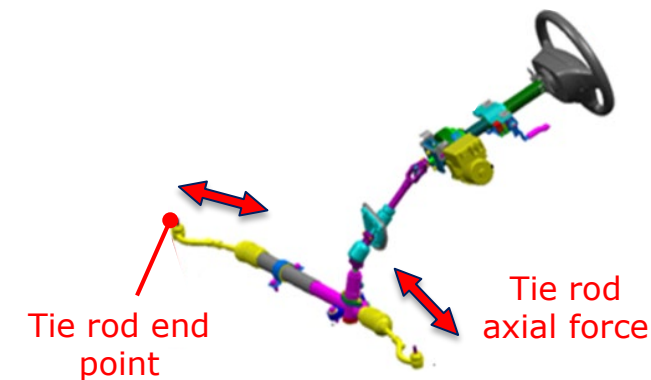
- HILSの利点：さまざまな走行状態を想定してサブシステムを評価することができる
 - 車両運動制御デバイスをサブシステムレベルで評価可能
 - 実際の物理現象として再現
- 例：DCサーボモータを利用したアクティブサスペンション
 - ロッカアームとプッシュロッドを利用してモータのトルクを上下力として利用



ステアリングHILS



- ステアリングシステムの評価
 - EPS (electric power steering), アクティブステア, ステアバイワイヤ
- 制御ステアリングのセッティング評価
 - 車両運動解析のループに実システムを組み込む
- 日産自動車との共同研究



Steering HILS system in Nissan Motor Co. Ltd.



MEIJI
UNIVERSITY

ステアリングHILS



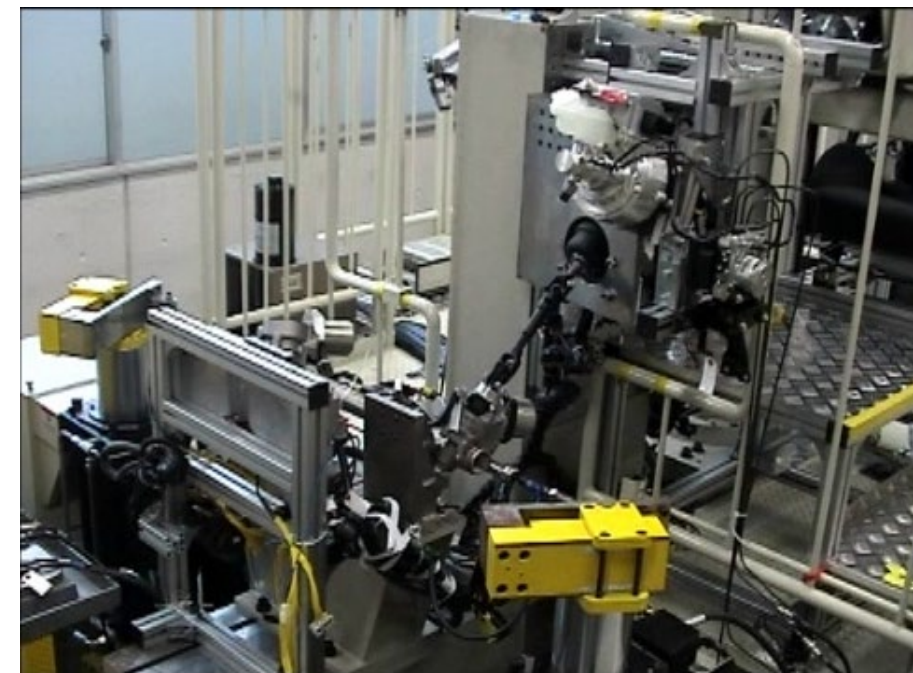
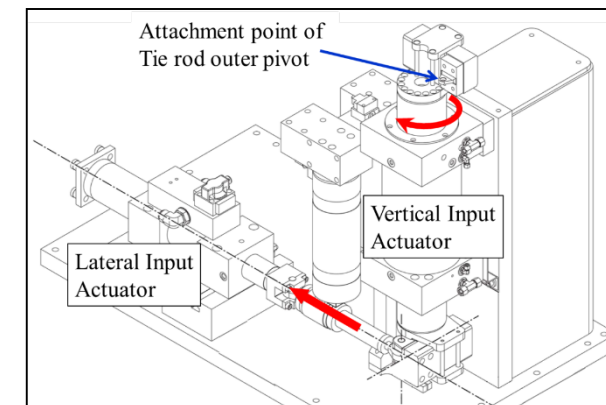
■ ハードウェア部

■ 油圧アクチュエータによる5チャンネル入力が可能

- ステアリングホイールの回転 (角度 or トルク入力)
- 左右タイロッドへの上下入力 (変位 or 力)
- 左右タイロッドへの横方向入力 (変位 or 力)

■ フロー

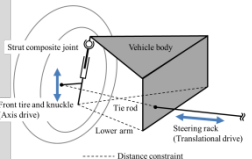
1. アクチュエータ(or 人間) がステアリングホイールを操作
2. ステアリング入力に基づき車両運動解析を実行
3. 解析結果に基づきタイロッドエンドを上下方向に移動
4. 解析結果に基づきタイロッド軸力を力入力により制御

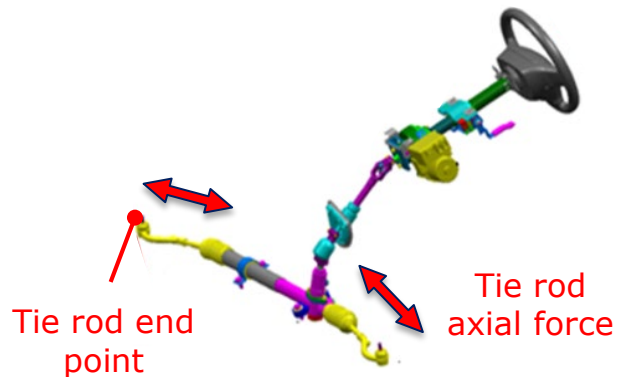


ステアリングHILS



- リアルタイム解析
 - 車両運動計算: CarSim
 - タイロッド力計算: マルチボディキネマティクス解析
 - 研究室で開発したプログラムを利用

Software	Vehicle dynamics simulation	Tie rod force calculation	Real-time simulation
ADAMS  MSC Adams MSC Software	O	O	X For offline simulation
CarSim 	O	X Based on look-up table data	O Real-time simulation for HILS
Kinematics model 	X Only for front suspension	O	O



ステアリングHILS



- 前輪サスペンションのジオメトリ情報に基づくキネマティクス解析(運動学解析)
 - CarSimにより算出されたタイヤ力とホイール上下ストロークを用いる
 - 逆動力学解析によりタイロッド軸力を拘束力として算出

■ Constraint equation

$$\Phi(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0}$$

■ Equation of motion

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q}^A + \mathbf{Q}^C = \mathbf{Q}^A - (\Phi_{\mathbf{q}})^T \lambda$$

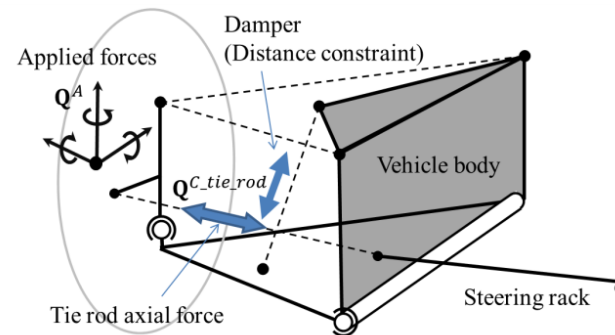
■ Lagrange multipliers

$$\lambda = -(\Phi_{\mathbf{q}})^{-T} (\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{Q}^A) \cong -(\Phi_{\mathbf{q}})^{-T} \mathbf{Q}^A$$

*Inertia term is ignored

■ Tie rod axial force as one of constraint forces

$$\mathbf{Q}^{C_tie_rod} = (\Phi_{\mathbf{q}}^{tie_rod})^T (\Phi_{\mathbf{q}})^{-T} \mathbf{Q}^A$$



$\mathbf{q}$: generalized coordinate

$\mathbf{M}$: mass matrix

$\mathbf{Q}^A$: applied force

$\mathbf{Q}^C$: constraint force

$\Phi_{\mathbf{q}}$: constraints Jacobian

λ : Lagrange multiplier

Element	Definition
Vehicle body	Body1
Steering rack	Body2
Left/Right knuckle	Body3,4
Suspension lower arms	Body5,6
Suspension upper arms	Distance constraint
Steering tie rods	Distance constraint

Input	Constraint	From
Wheel vertical stroke	Axis drive	
Steering rack stroke	Translational drive	

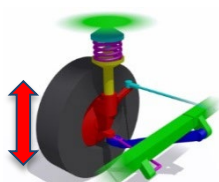
ステアリングHILS



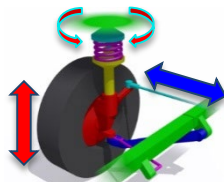
■ Adamsによる解析結果との比較

- External force input
Force/moment of wheels
- Displacement input
Wheel : vertical
Steering rack : lateral
- Simulation mode
 1. Vertical input only
 2. Composite of vertical and lateral input

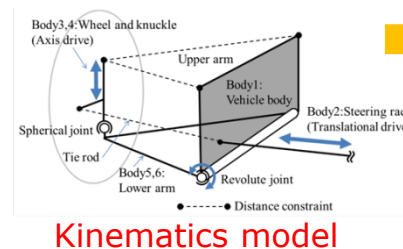
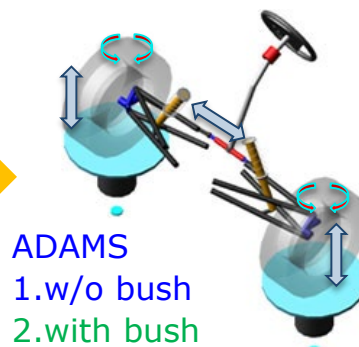
1. Bound stroke



2. Composite



- Calculation of tie rod axial force

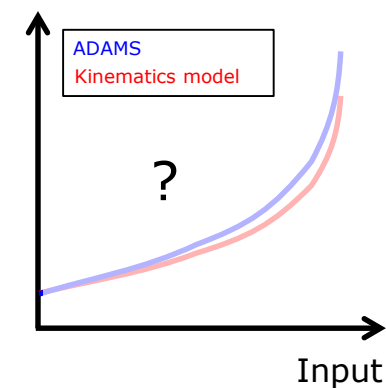


Kinematics model

- Comparison

Use ADAMS result
as a reference data

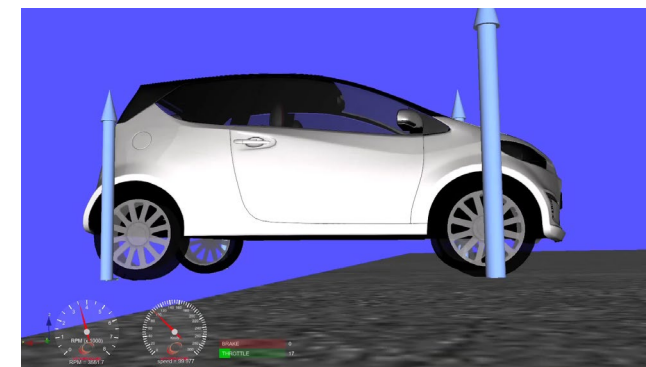
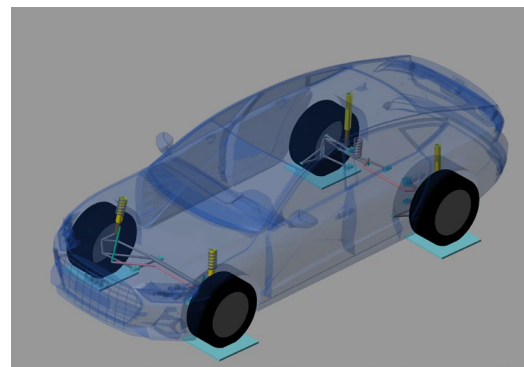
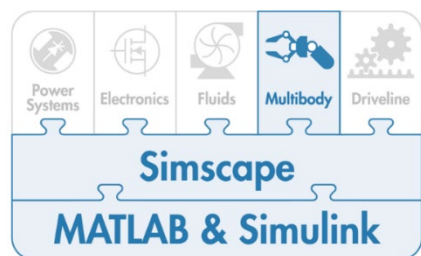
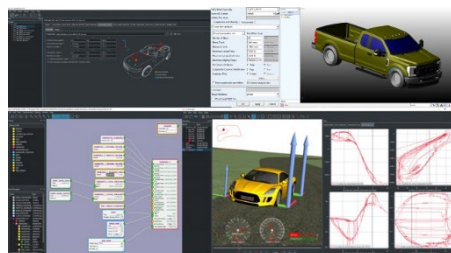
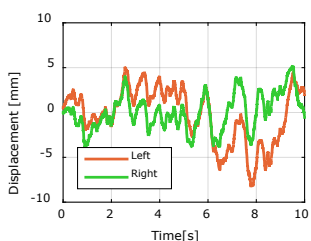
Tie rod axial force



VI-CarRealTimeを利用した研究事例紹介



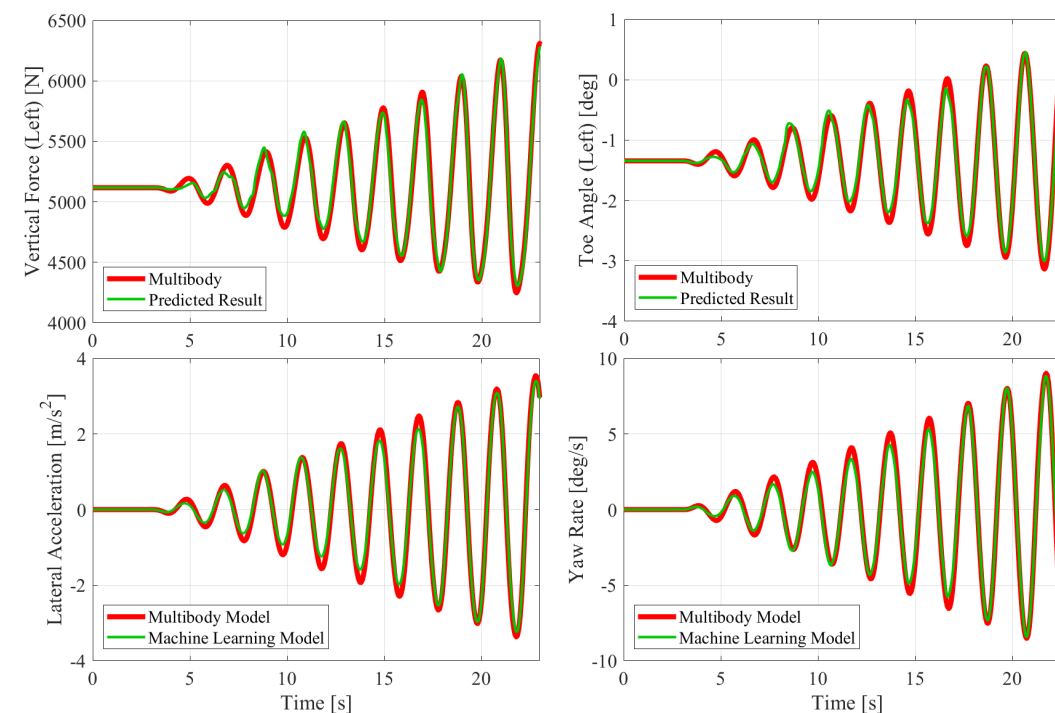
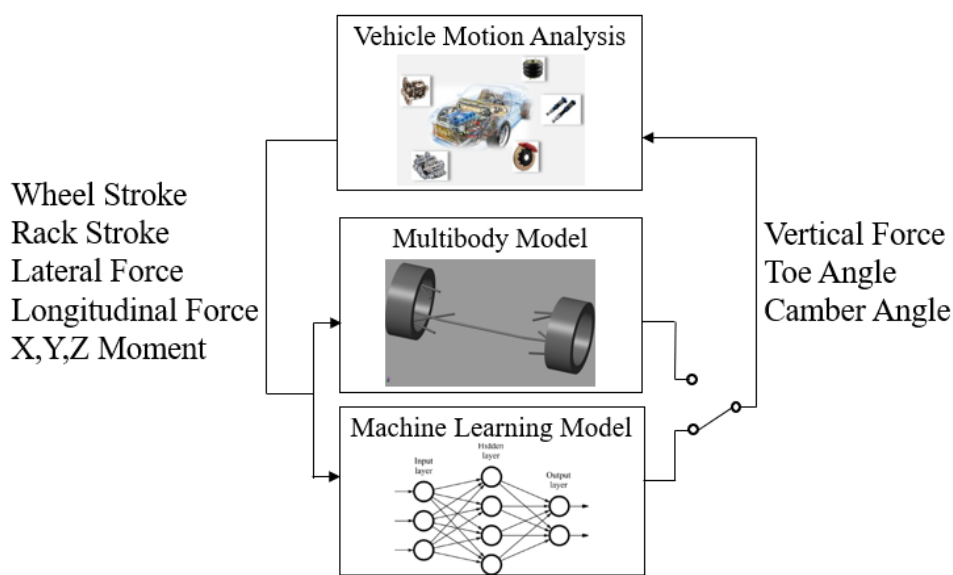
- 路面からの入力を考慮した操舵トルクの再現
 - 操舵トルクシミュレータを用いて路面からの入力を手ごたえとして再現
 - VI-CarRealTime + Simscape Multibody
 - VI-CarRealTimeを用いて車両運動計算
 - Simscape Multibodyを利用してステアリングへの入力を計算
 - OpenCRGを用いた路面定義



VI-CarRealTimeを利用した研究事例紹介



- 機械学習を用いたサスペンションモデルの自動生成
 - VI-CarRealTime + Simscape Multibody >>> VI-CarRealTime + 機械学習モデル
 - ブッシュ特性を考慮
 - 高い固有振動数が含まれるためステップ時間を短くする必要があり、解析時間を要する
 - 33秒のシミュレーションを実行するために要した時間
 - マルチボディモデル: 10分30秒 (ode15s)
 - 機械学習モデル: 18秒 (ode4)



まとめ



■ リアルタイムマルチボディ解析を応用したHILS試験

- タイヤ-サスペンションHILS
- ステアリングHILS

■ VI-CarRealTimeを利用した研究事例紹介

■ その他のトピックス

■ 非線形要素のモデリング

- 摩擦特性のモデリング (Lund-Grenoble model)
- ラバーブッシュなどの粘弾性体モデリング (一般化Maxwellモデル)

■ 数値積分アルゴリズム (一般化alpha法を用いた数値解析)

■ IDCS (Inverse Dynamics Compensation via 'Simulation of feedback control systems')

- 試験機の非線形ダイナミクスモデルを利用したフィードフォワード制御

■ 非線形特性のオンライン同定

■ etc.

