

静止自立する二輪車の 運動特性とその制御

2020/09/30

ヤマハ発動機株式会社 土屋 光生

議題

1. ヤマハ発動機紹介
2. MOTORoID概要
 - AMCES
 - 重心位置制御
3. 開発の流れ
 - 制御系設計の流れ
 - ツールと工程
4. 制御系設計
 - 簡易モデリング, 制御器設計
 - 詳細モデリング, ロバスト制御
 - シミュレーション, 実機評価
5. 当社のMATLAB®
6. まとめ

1. ヤマハ発動機紹介
2. MOTORoID概要
 - AMCES
 - 重心位置制御
3. 開発の流れ
 - 制御系設計の流れ
 - ツールと工程
4. 制御系設計
 - 簡易モデリング, 制御器設計
 - 詳細モデリング, ロバスト制御
 - シミュレーション, 実機評価
5. 当社のMATLAB®
6. まとめ

1. ヤマハ発動機紹介

名称	ヤマハ発動機株式会社
創立	1955年(昭和30年)7月1日
資本金	859億5百万円
売上高	連結決算: 1兆6,731億円 単独決算: 6,772億円
従業員数	連結会社計: 53,977人 ヤマハ発動機単体: 10,614人
本社	静岡県磐田市新貝2500
関係会社	連結子会社134社 持分法適用子会社4社 持分法適用関連会社31社

※2020年2月末現在

代表取締役社長
日高 祥博



1. ヤマハ発動機紹介

- ・海へ、陸へ、空へ、未来へ。大きく広がる、ヤマハ発動機の商品群



発電機



電動車椅子



4輪バギー



モータサイクル



電動アシスト自転車



無人ヘリ



船外機



YAMAHA

Revs your Heart



ボート・クルーザー



マリッジット



電子部品実装関連機器



ゴルフカー



産業用ロボット



乗用車用エンジン



除雪機



スノーモービル

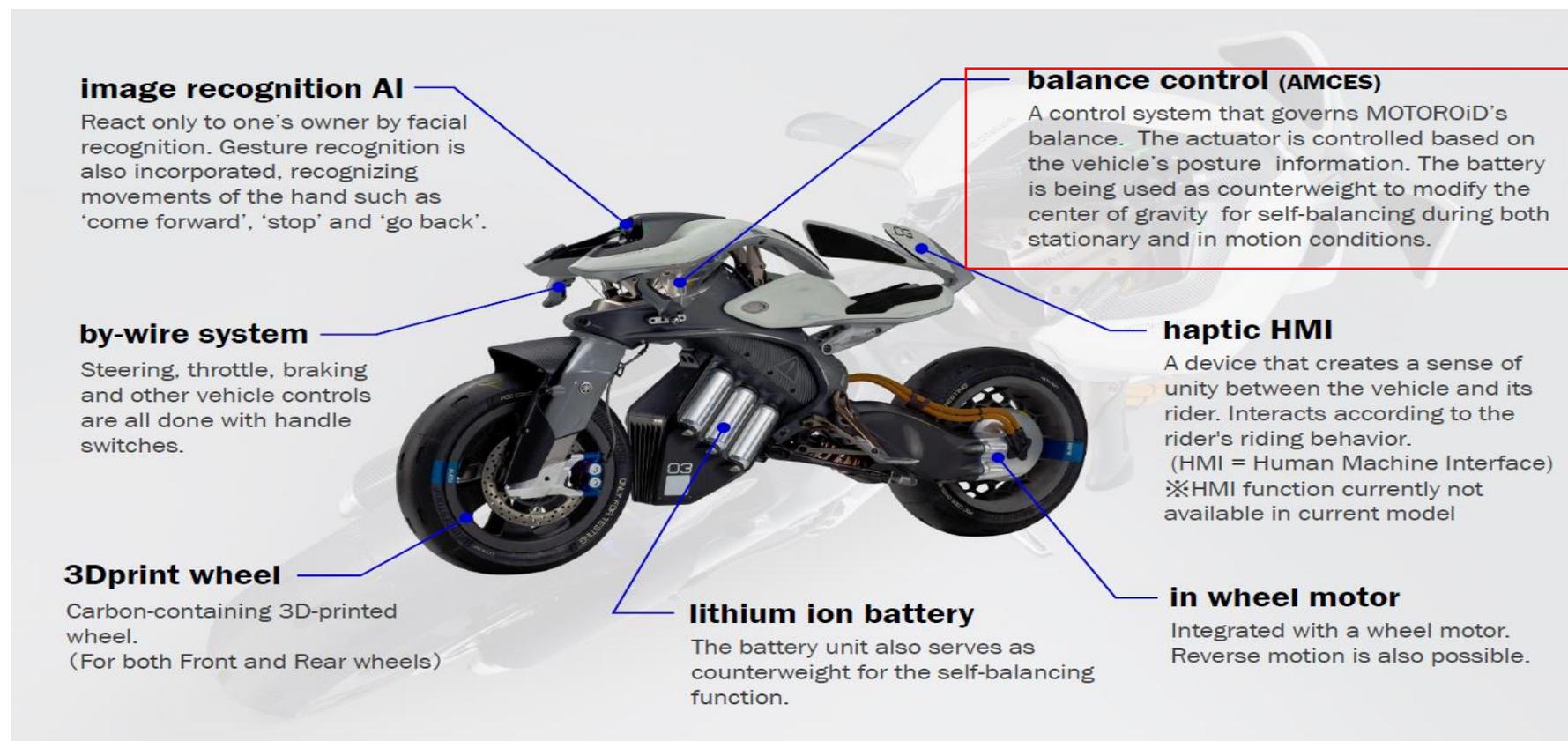


プール

1. ヤマハ発動機紹介
2. **MOTORoID概要**
 - AMCES
 - 重心位置制御
3. 開発の流れ
 - 制御系設計の流れ
 - ツールと工程
4. 制御系設計
 - 簡易モデリング, 制御器設計
 - 詳細モデリング, ロバスト制御
 - シミュレーション, 実機評価
5. 当社のMATLAB[®]
6. まとめ

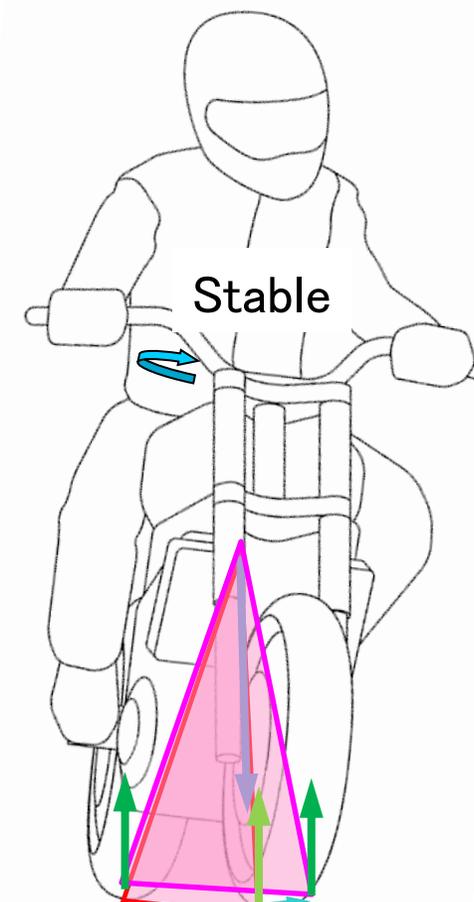
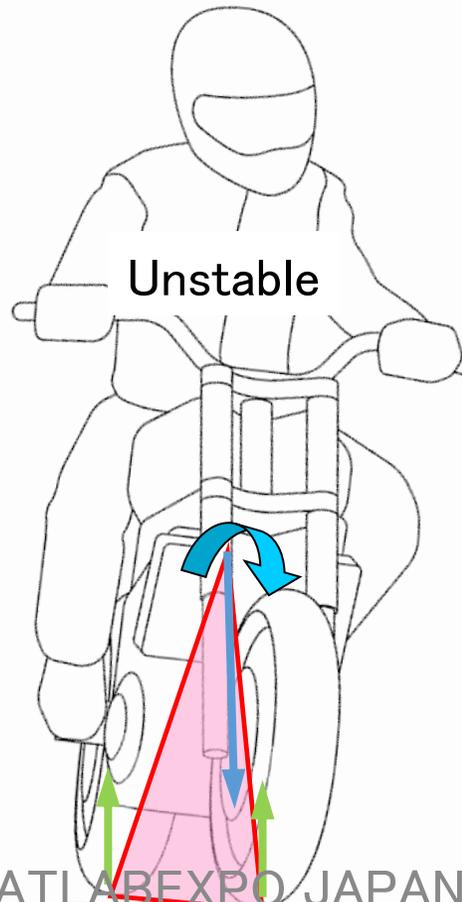
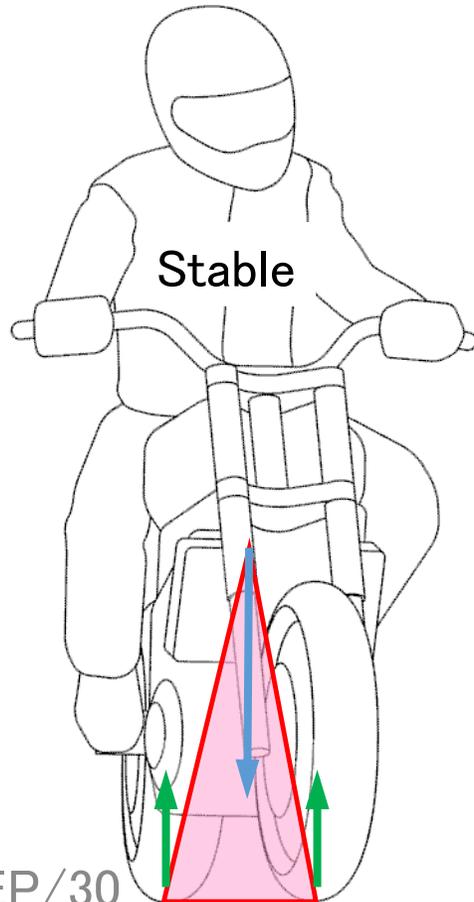
2. MOTOROiD概要

- 車体振じる車体構造(AMCES)を用いて極低速走行でも安定化



2. MOTOROiD概要

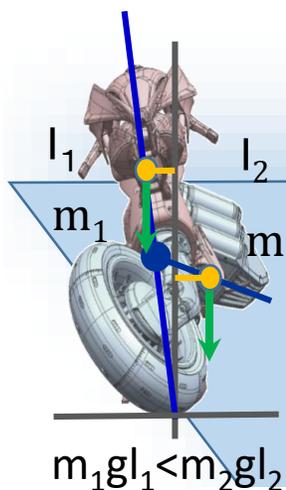
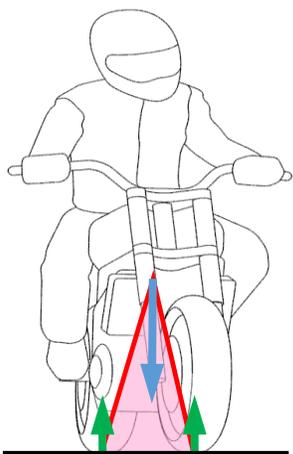
- 前輪と後輪を結ぶ線上に重心点あれば走行速度に寄らず安定



1. ヤマハ発動機紹介
2. MOTORoID概要
 - AMCES
 - 重心位置制御
- 3. 開発の流れ**
 - 制御系設計の流れ
 - ツールと工程
4. 制御系設計
 - 簡易モデリング, 制御器設計
 - 詳細モデリング, ロバスト制御
 - シミュレーション, 実機評価
5. 当社のMATLAB®
6. まとめ

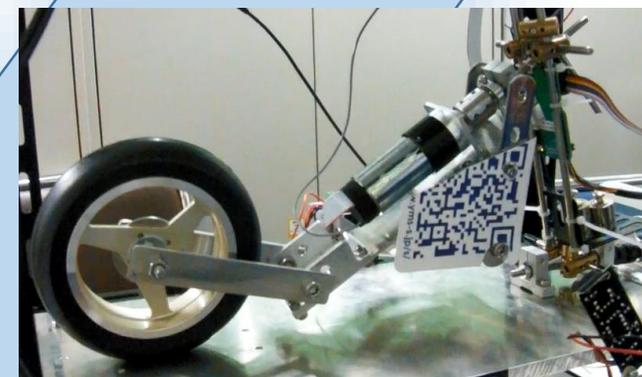
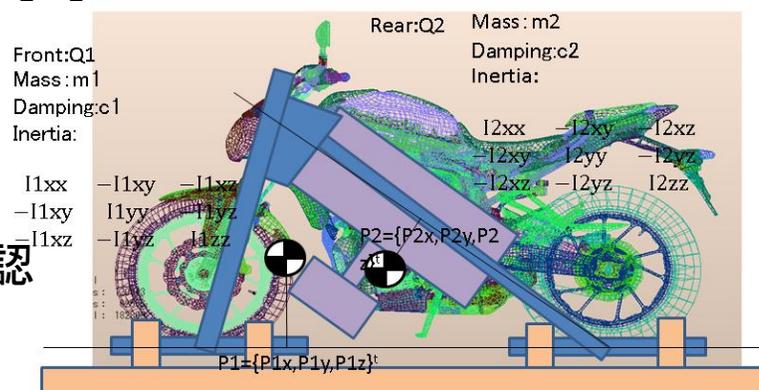
3. 開発の流れ

- シミュレーションと実機を組合わせて開発



- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元

- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御

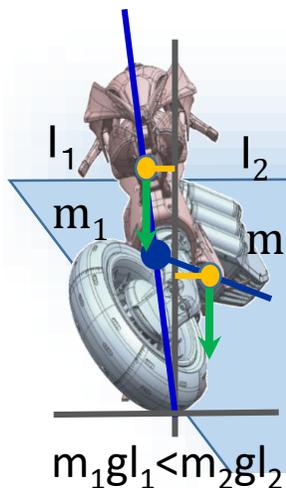
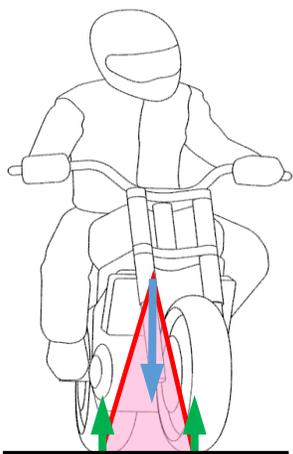


- 原理試作
- 理論と実践の差

- 2自由度で可制御性確認
- 必要モータトルク推定

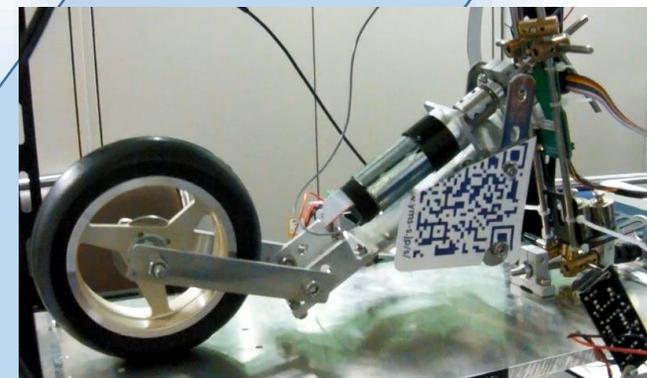
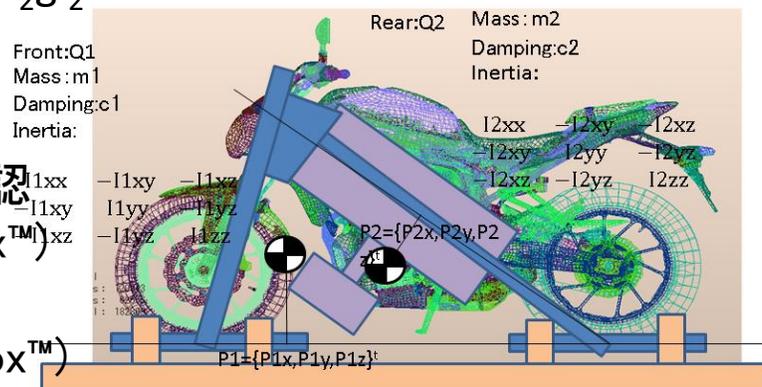
3. 開発の流れ

• MATLAB[®]なければ進み方が遅かった



- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元

- 状態方程式精緻化 (System Identification Toolbox™)
- ロバスト制御 (Control System Toolbox™)



- 原理試作 (Simulink[®])
- 理論と実践の差

- 2自由度で可制御性確認 (Symbolic Math Toolbox™)
- 必要モーメント推定 (Control System Toolbox™)

1. ヤマハ発動機紹介
2. MOTORoID概要
 - AMCES
 - 重心位置制御
3. 開発の流れ
 - 制御系設計の流れ
 - ツールと工程
4. **制御系設計**
 - 簡易モデリング, 制御器設計
 - 詳細モデリング, ロバスト制御
 - シミュレーション, 実機評価
5. 当社のMATLAB®
6. まとめ

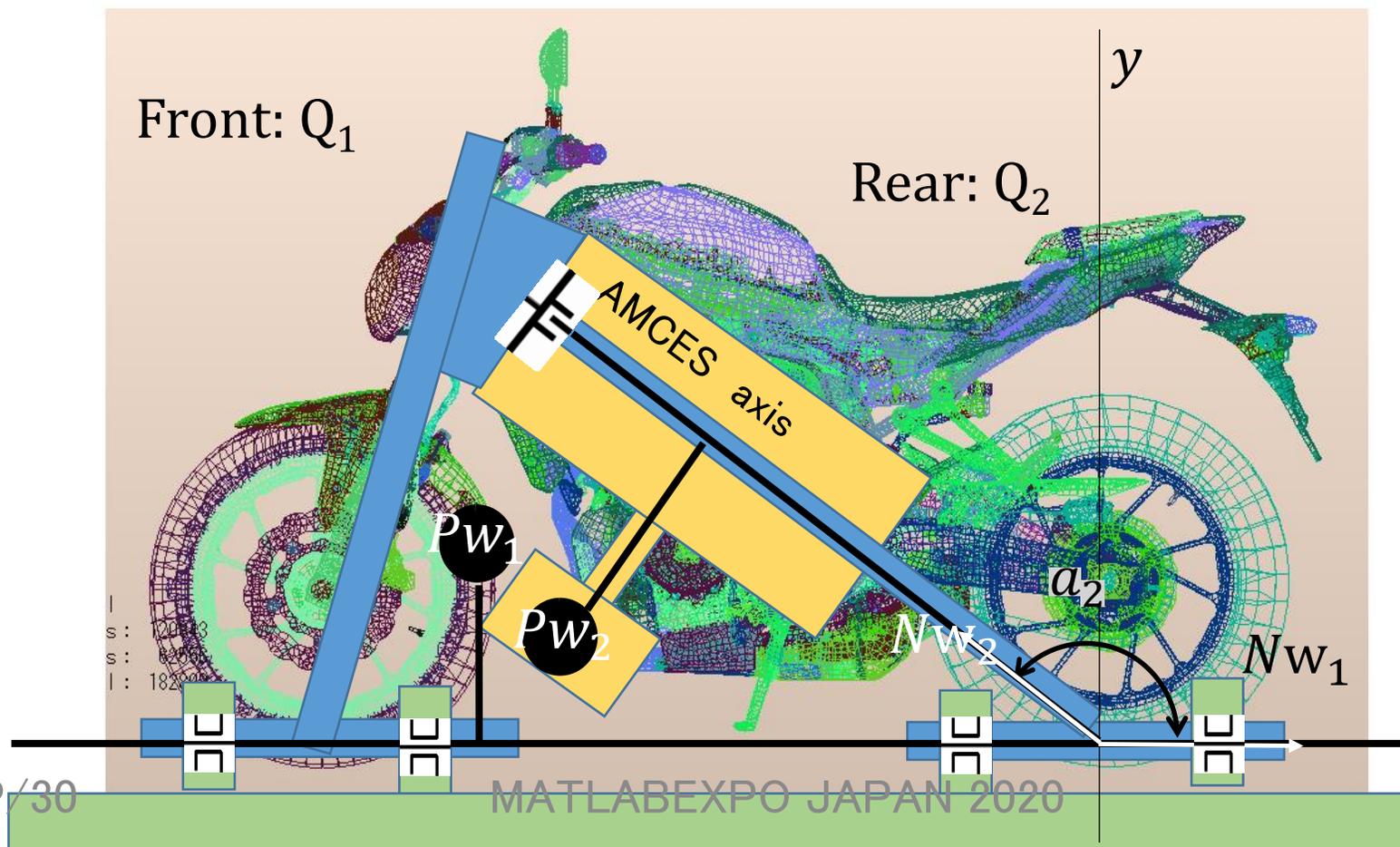
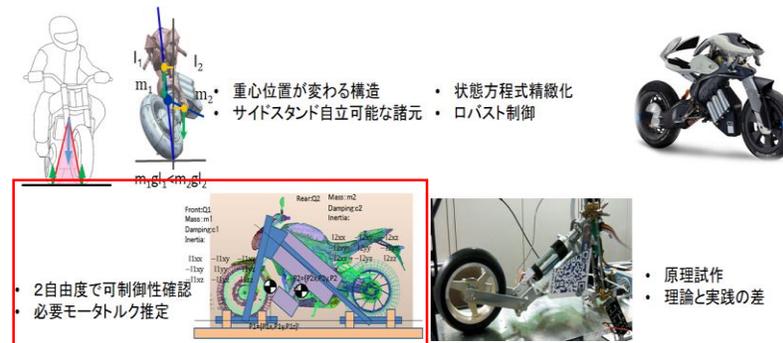
4. 制御系設計

制御系設計

1. 簡易モデリング
2. 制御器設計
3. 詳細モデリング
4. ロバスト制御
5. シミュレーション
6. 実機評価

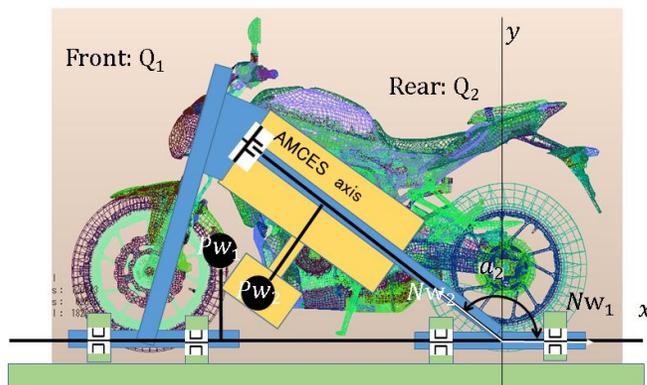
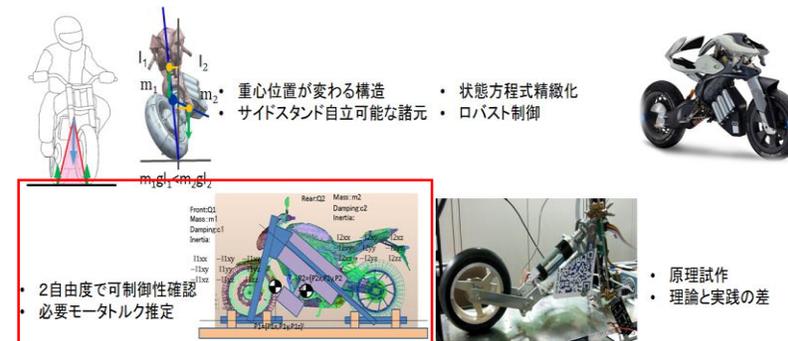
4. 1 簡易モデリング

- AMCES軸で振じる2自由度に簡易化



4. 1 簡易モデリング

• ラグランジアンを用いて運動方程式導出



$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_1} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_2} = u \end{cases}$$

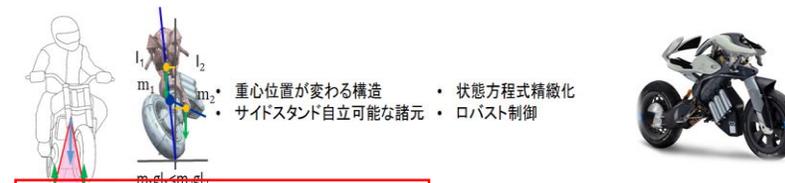
T_i : Kinetic energy of Q_i

U_i : Potential energy of Q_i

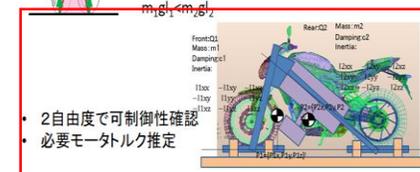
D_i : Dissipated energy of Q_i

$$L = \Sigma T_i - \Sigma U_i, \quad D = \Sigma D_i, \quad u : \text{Torque}$$

4. 1 簡易モデリング

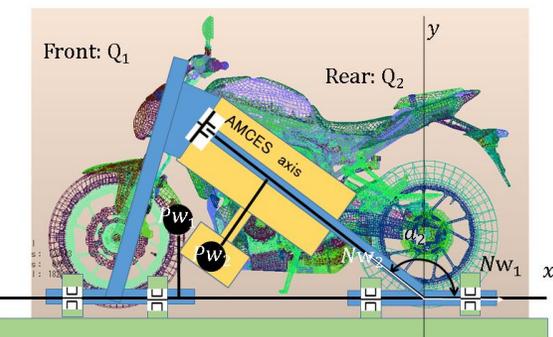


- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元
- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御



- 原理試作
- 理論と実践の差

• $q_1, q_2 = 0$ 回りで展開して線形化



$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & -c_1 & b_{13} & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & b_{23} & -c_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ \dot{q}_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_2 \\ u \end{Bmatrix}$$

$$a_{11} = i_{1xx} + i_{2xx} + m_1 p_{1y}^2 + m_2 p_{2y}^2, \quad a_{12} = i_{2xx} \alpha - i_{2xy} \beta + m_2 p_{2y} (p_{2y} \alpha - p_{2x} \beta)$$

$$a_{21} = a_{12}, \quad a_{22} = i_{2xx} \alpha^2 - 2i_{2xy} \alpha \beta + i_{2yy} \beta^2 + m_2 (p_{2y} \alpha - p_{2x} \beta)^2$$

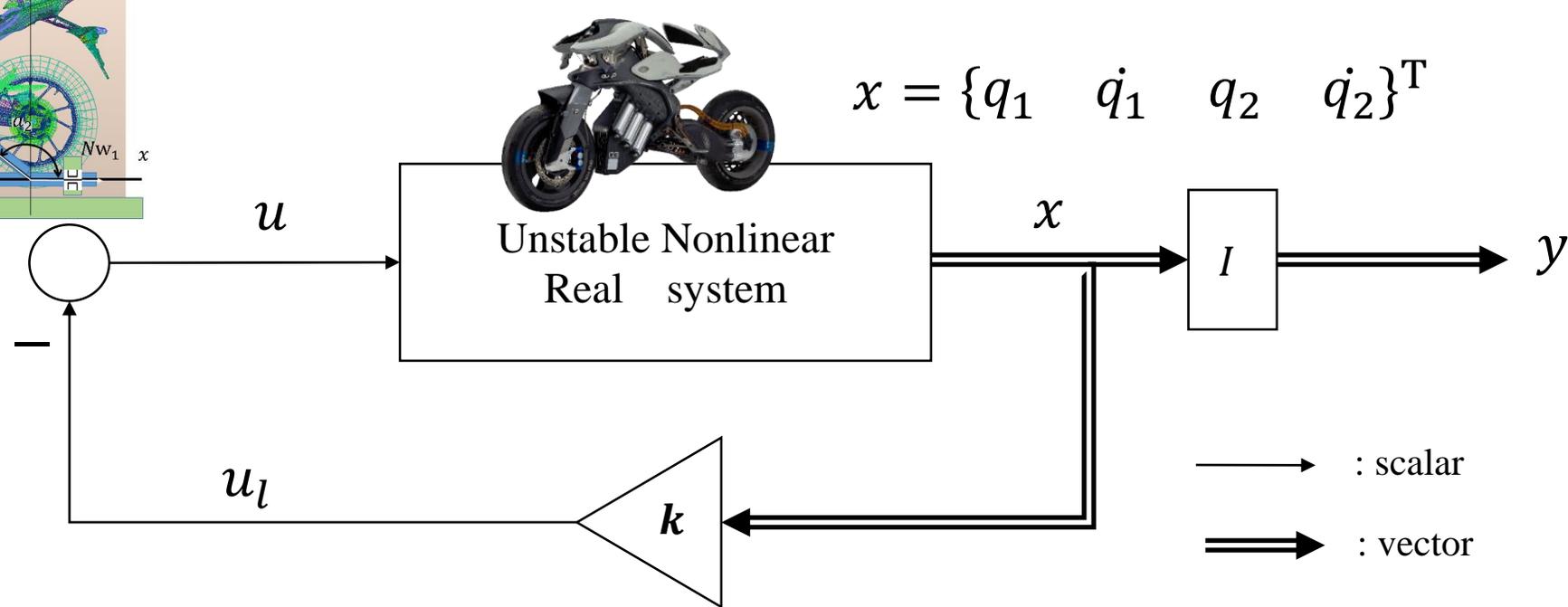
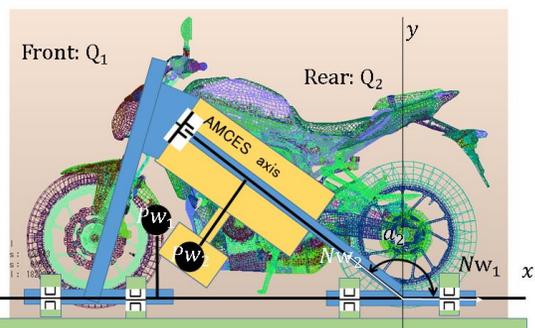
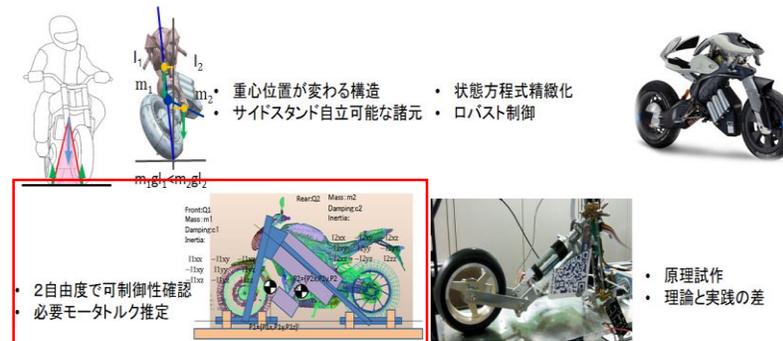
$$b_{11} = m_1 g p_{1y} + m_2 g p_{2y}, \quad b_{13} = m_2 g (p_{2y} \alpha - p_{2x} \beta)$$

$$b_{21} = b_{13}, \quad b_{23} = m_2 g (p_{2y} \alpha - p_{2x} \beta) \alpha$$

$$\alpha = \cos(a_2), \quad \beta = \sin(a_2)$$

4. 2 制御器設計

- 全状態量をフィードバックするPD制御

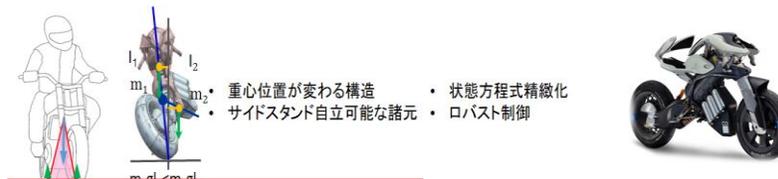


→ : scalar
⇒ : vector

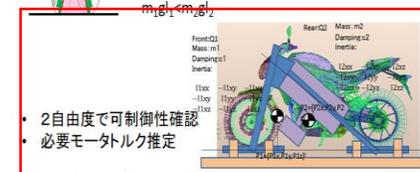
PD control(for stable)

4. 2 制御器設計

- 可制御性確認, モータ必要トルク推定



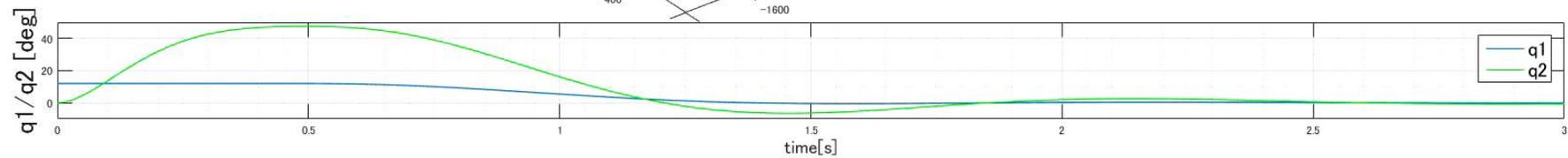
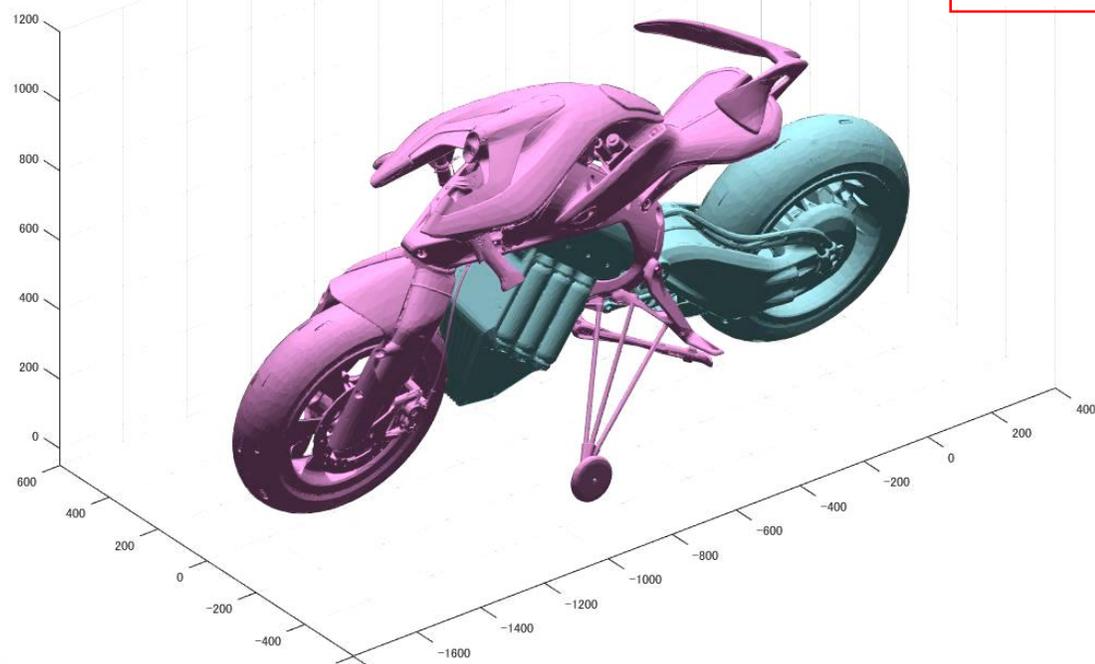
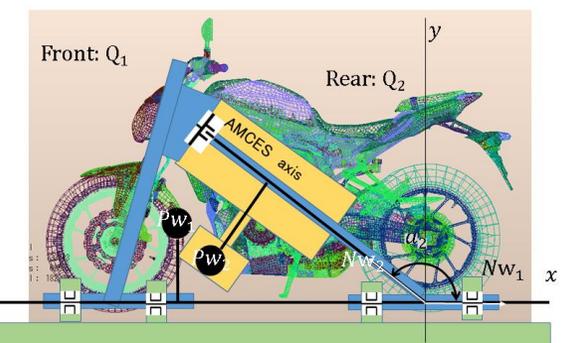
- 重心位置が変わる構造
- 状態方程式精緻化
- サイドスタンド自立可能な諸元
- ロバスト制御



- 2自由度で可制御性確認
- 必要モータトルク推定



- 原理試作
- 理論と実践の差



4. 2 制御器設計

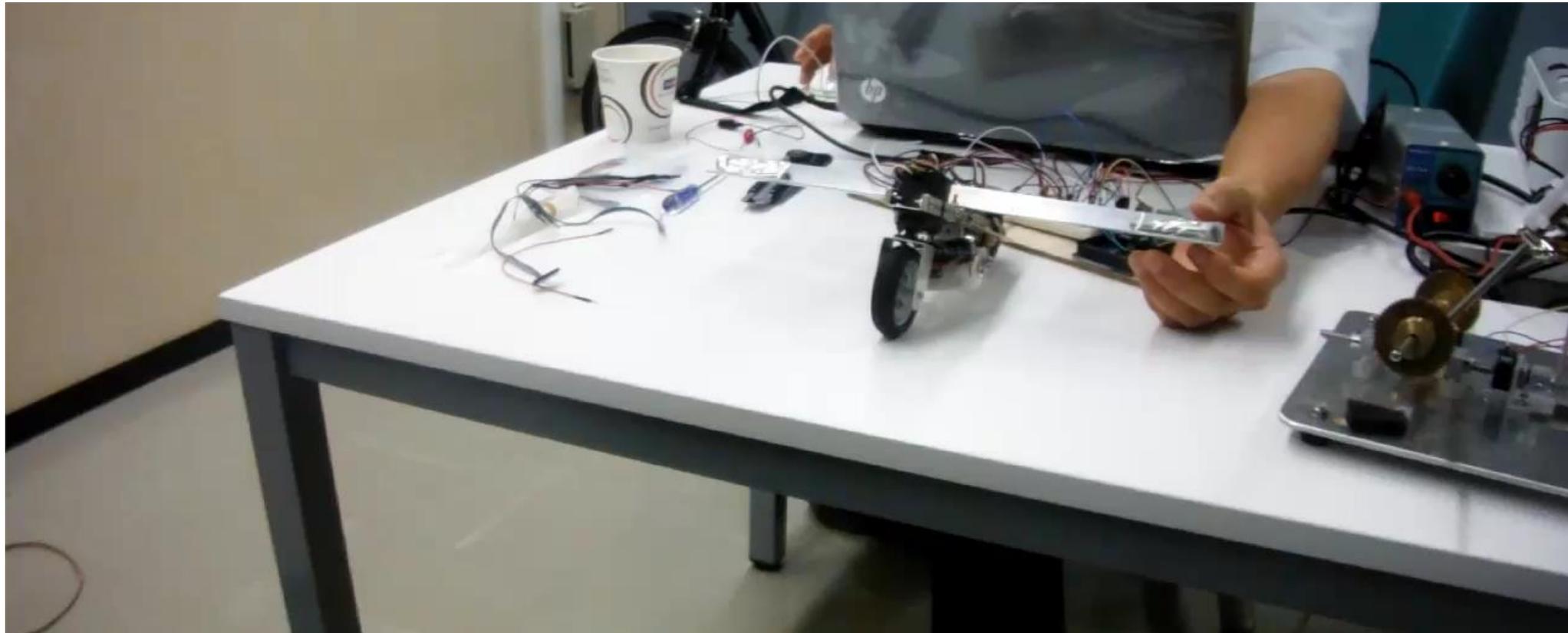
- 簡易モデルで自立制御性確認

I_1 I_2
 m_1 m_2
 $m_2 g l_1 < m_1 g l_2$

- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元
- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御

- 2自由度で可制御性確認
- 必要モータトルク推定

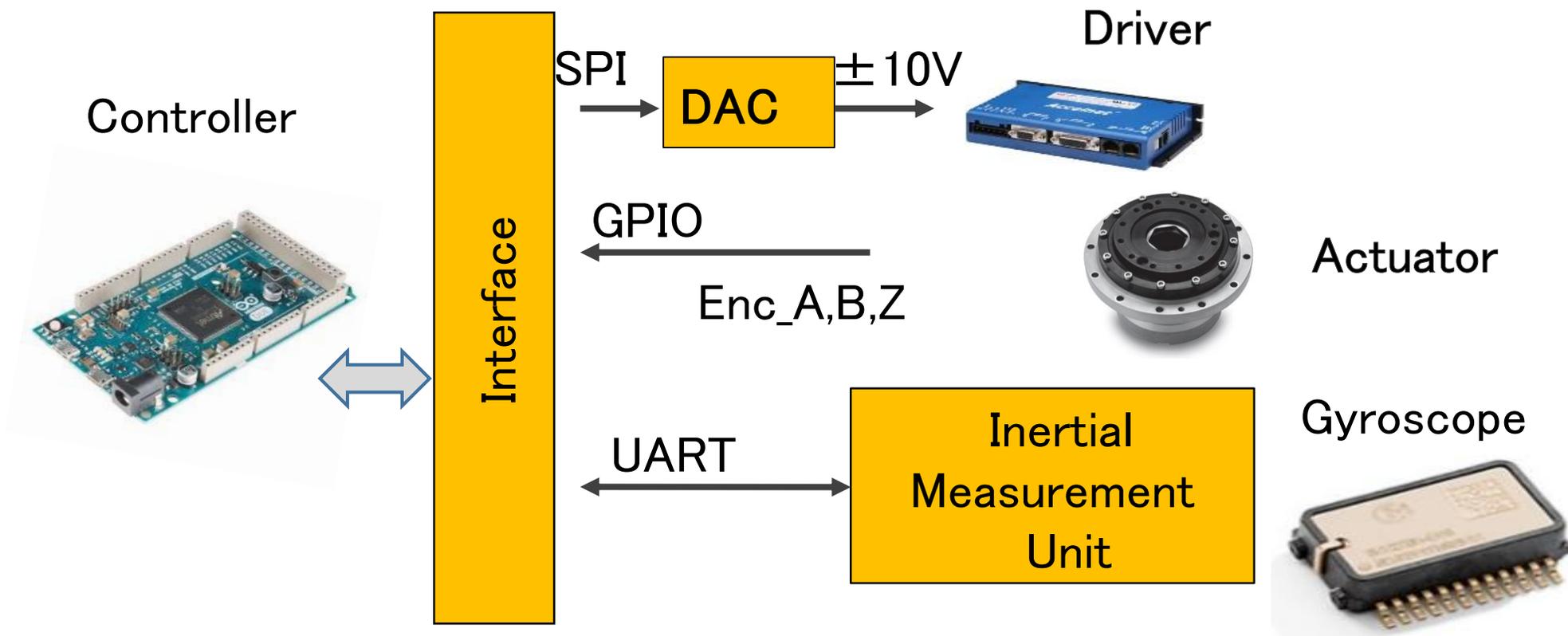
- 原理試作
- 理論と実践の差



4. 3 詳細モデリング

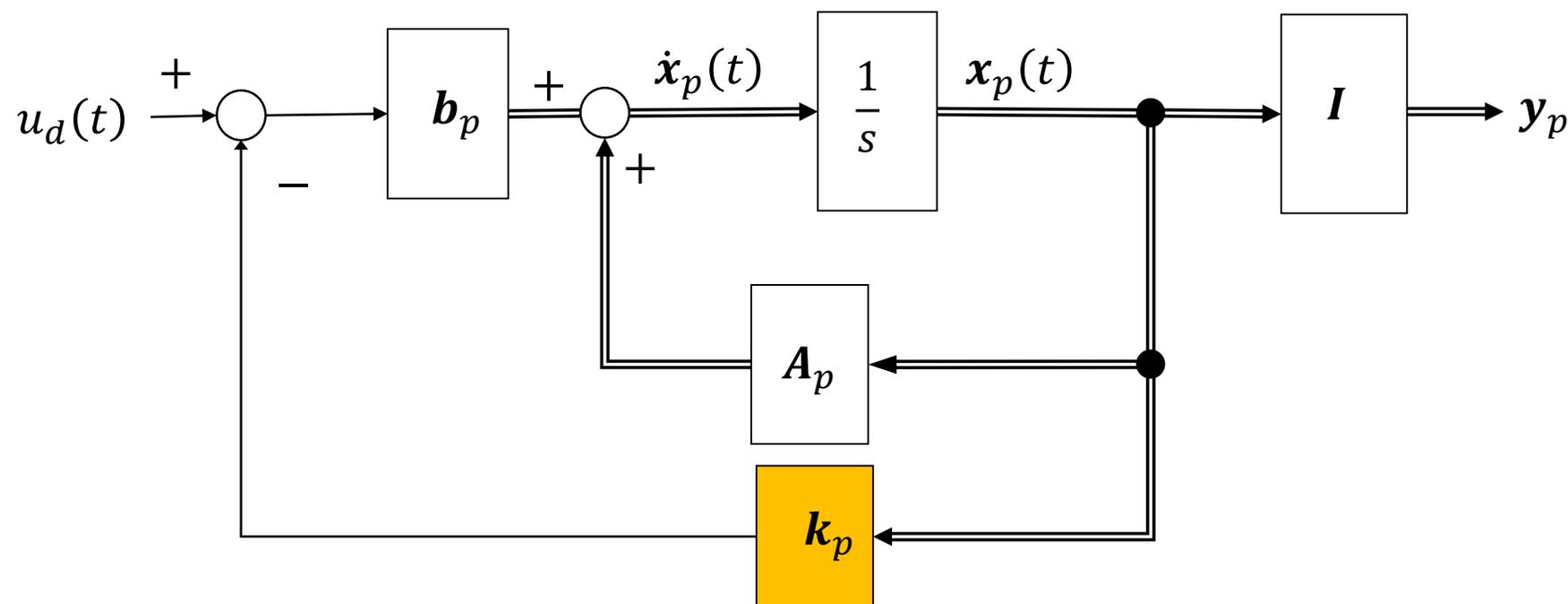


- 計測器, モータ, 制御器選定



4. 3 詳細モデリング

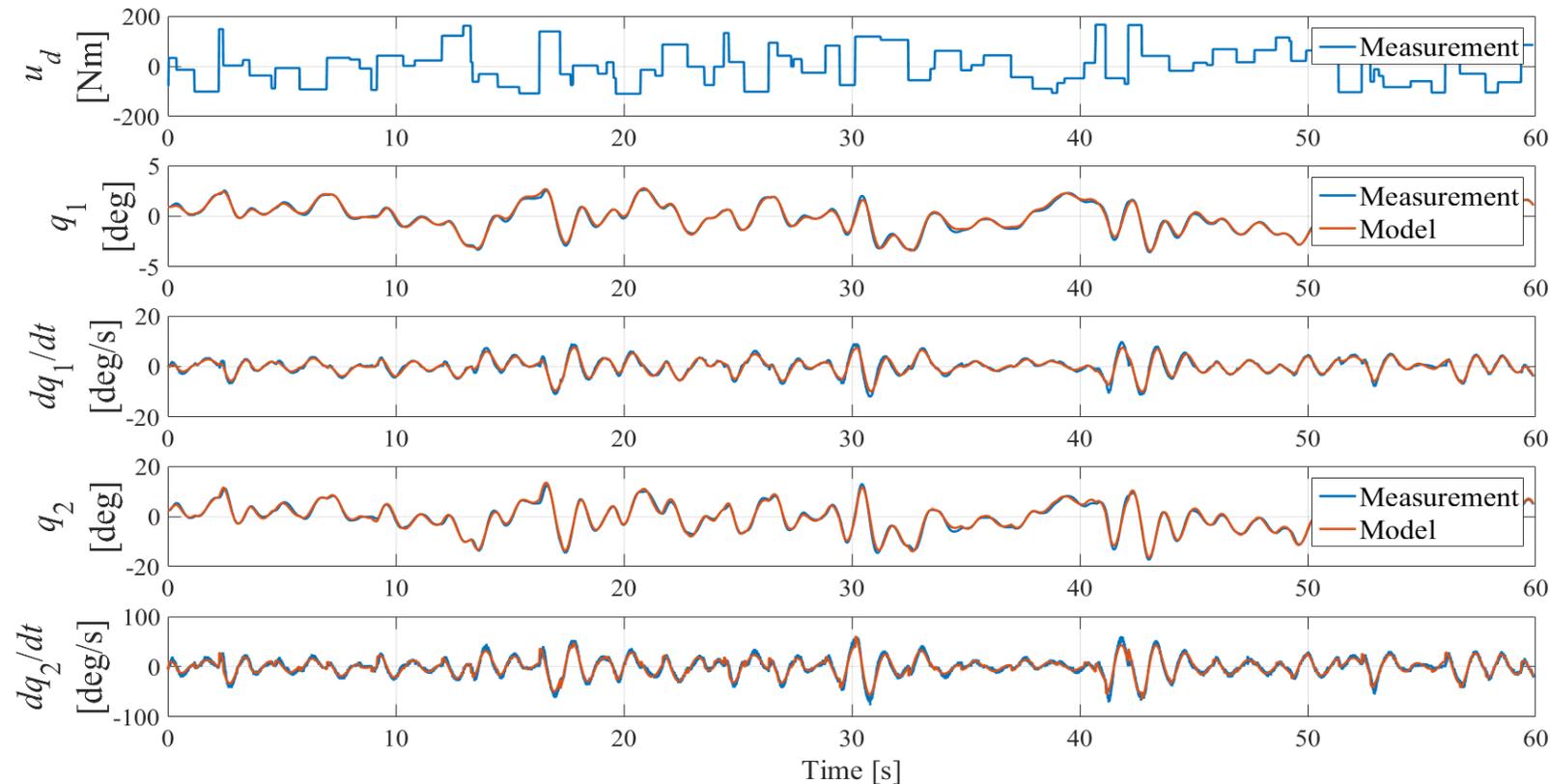
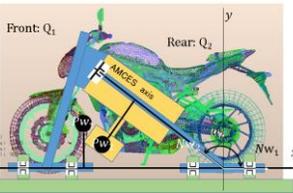
- マイナーループ k_p 込みでの実験同定
- 周波数と振幅がランダムな指令トルク $u_d(t)$ 印加



4. 3 詳細モデリング

式誤差モデルARX用いて詳細状態方程式導出

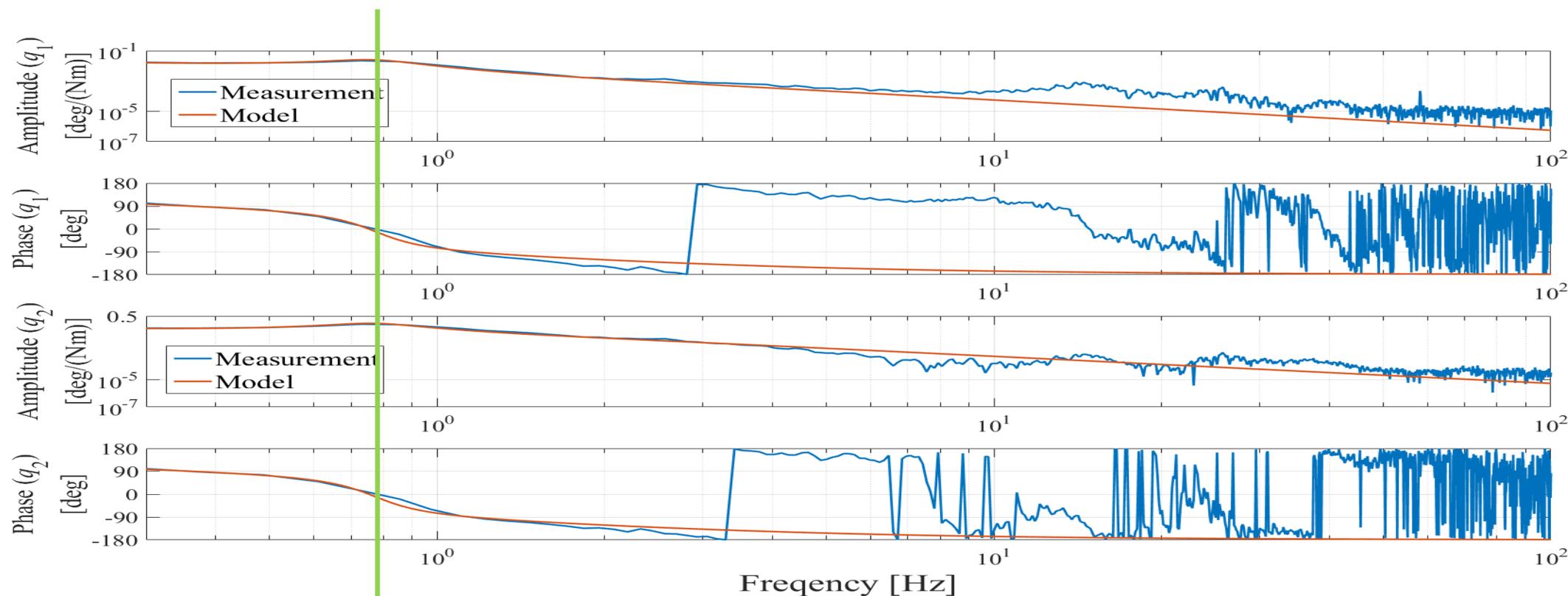
- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元
- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御
- 2自由度で可制御性確認
- 必要モーメント推定
- 原理試作
- 理論と実践の差



4. 3 詳細モデリング

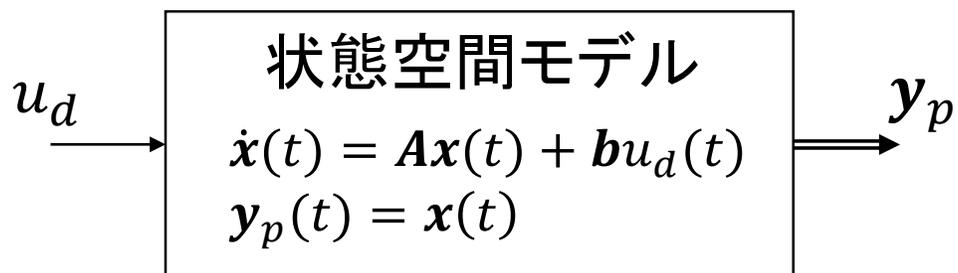
- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元
- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御
- 2自由度で可制御性確認
- 必要モーメント推定
- 原理試作
- 理論と実践の差

- 実機計測結果と詳細モデルの共振点が一致

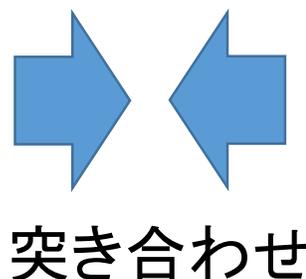


4. 3 詳細モデリング

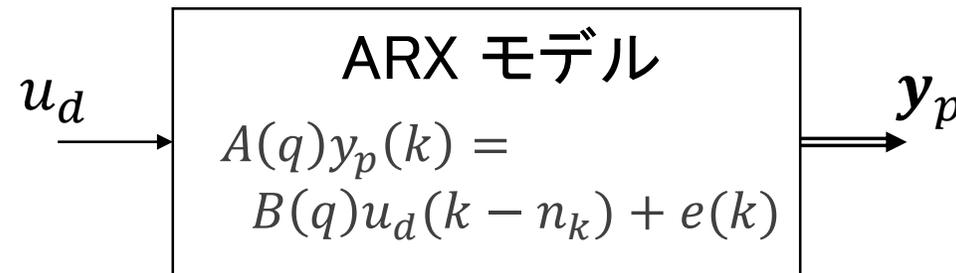
物理モデル + マイナーループ
運動方程式から作成(連続系)



$$x(t) = [q_1 \quad \dot{q}_1 \quad q_2 \quad \dot{q}_2]^T$$



統計モデル
入出力データから作成(離散系)

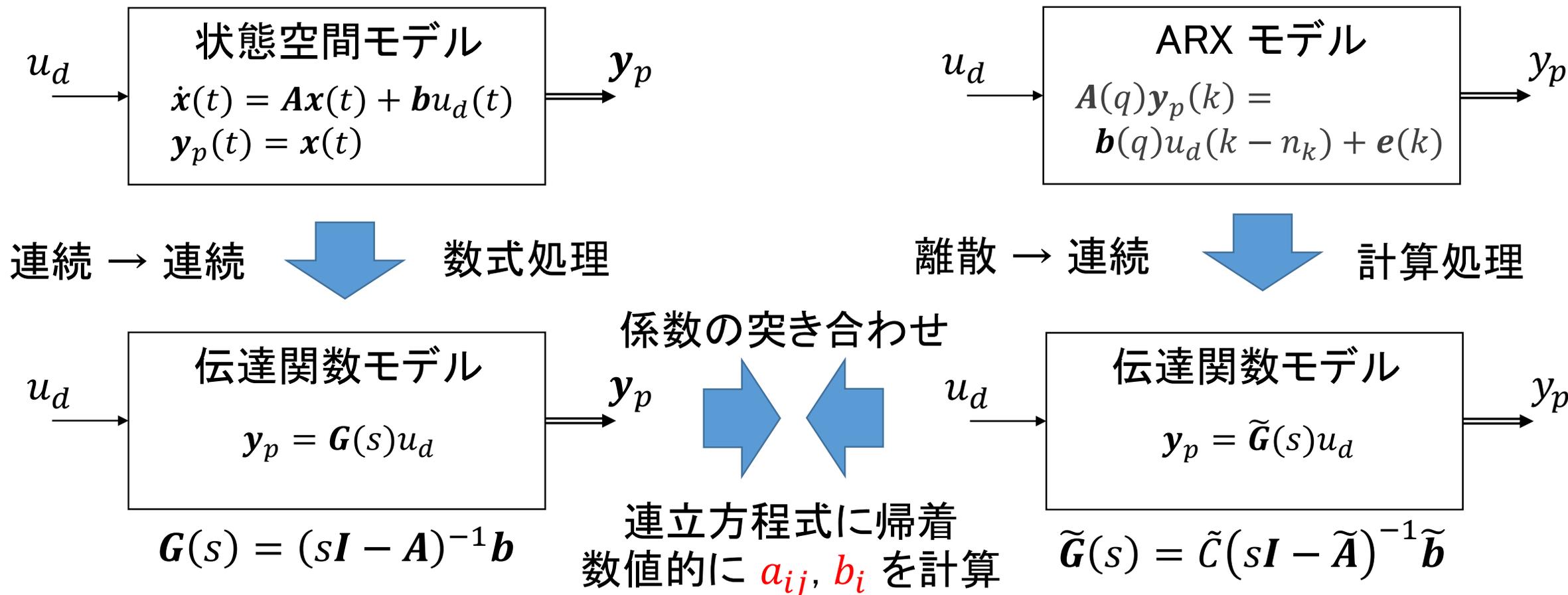


$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_4q^{-4}$$

$$B(q) = 1 + b_1q^{-1}$$

A行列 $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{43} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$ b行列 $\begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix}$ 自明な構造

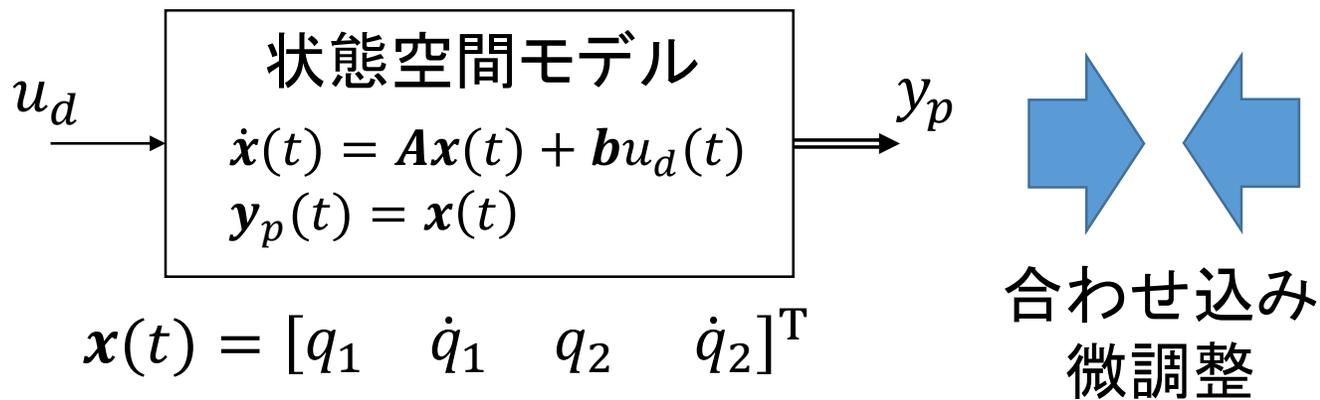
4. 3 詳細モデリング



4. 3 詳細モデリング



物理モデル + マイナーループ
運動方程式から作成(連続系)



$$x(t) = [q_1 \quad \dot{q}_1 \quad q_2 \quad \dot{q}_2]^T$$

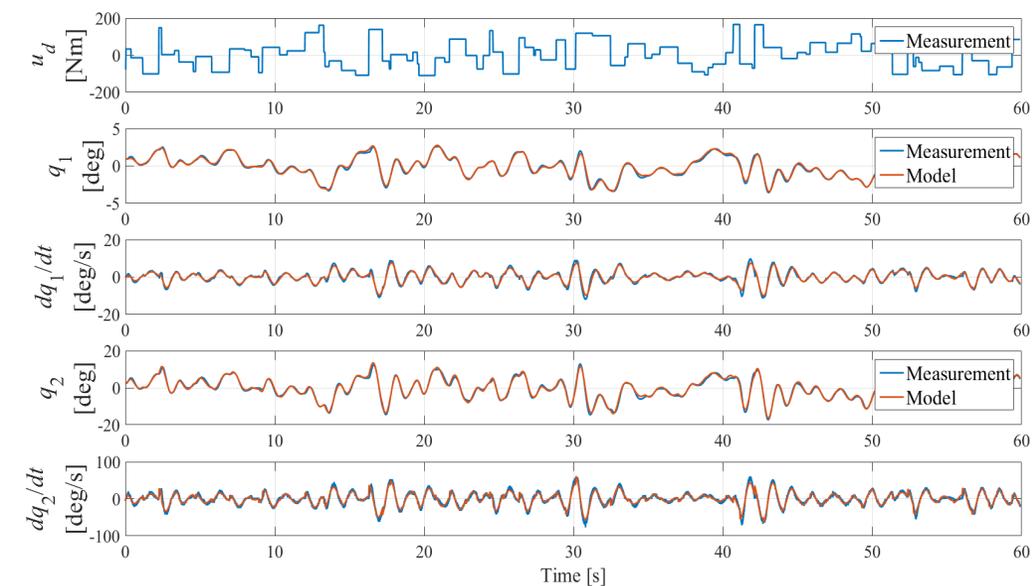
A行列

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{43} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

b行列

$$\begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

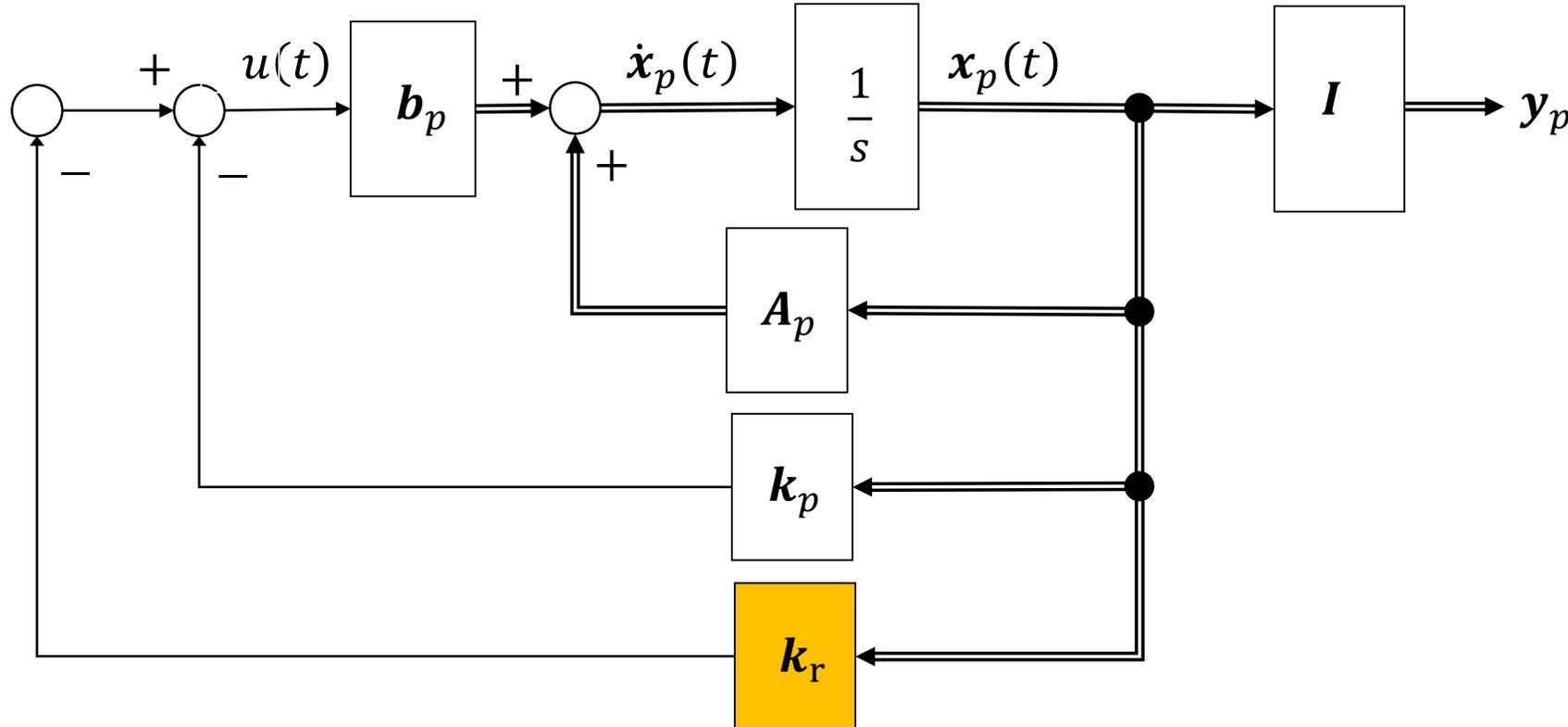
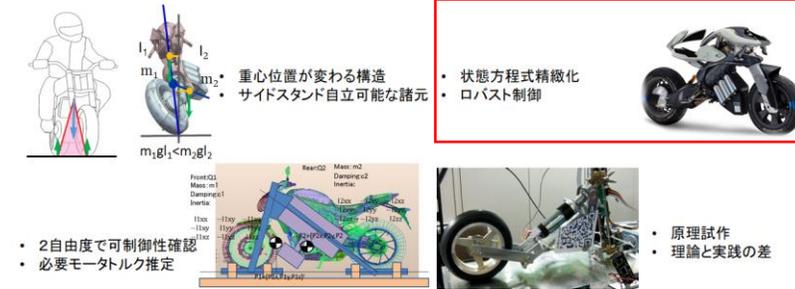
ARX 結果を初期値



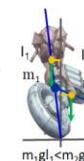
各係数を摂動させて入力トルク u_d と出力状態量 y_p が合うところを探索

4. 4 ロバスト制御

- マイナーループ k_p にメジャーループ k_r を追加



4. 4 ロバスト制御



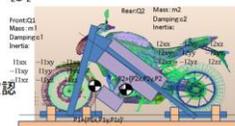
- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元

- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御

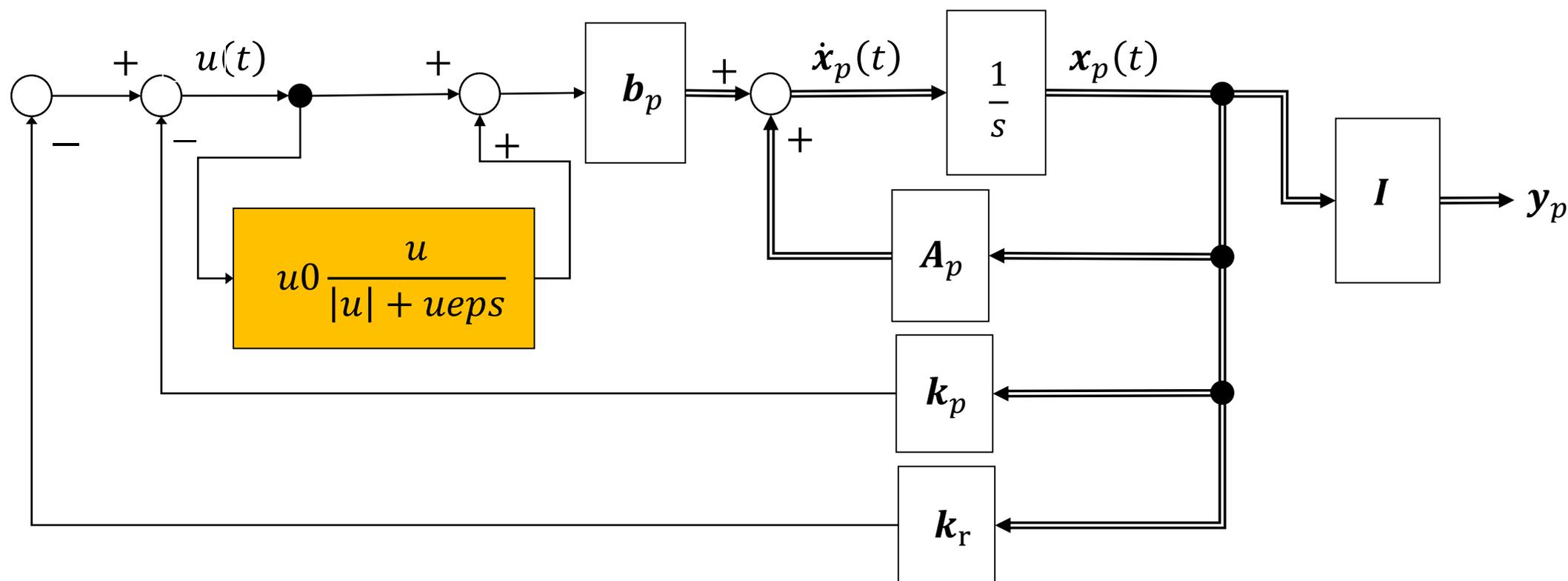


- モータ静止摩擦相当を補償して動き出しスムーズ化

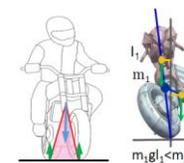
- 2自由度で可制御性確認
- 必要モータトルク推定



- 原理試作
- 理論と実践の差

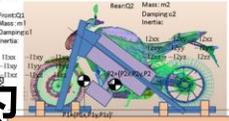


4. 5 シミュレーション



- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元

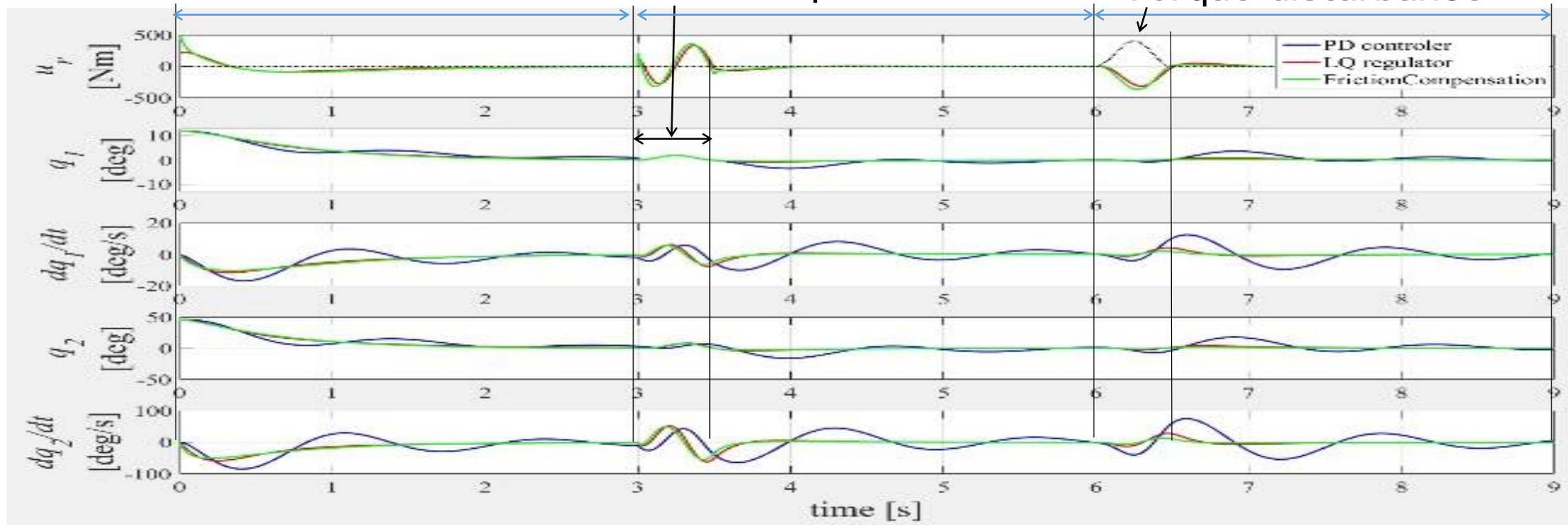
- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御



- 原理試作
- 理論と実践の差

- 3パターン(スタンド自立, 強制変位, トルク外乱)で確認

Stand up Forced displacement Torque disturbance



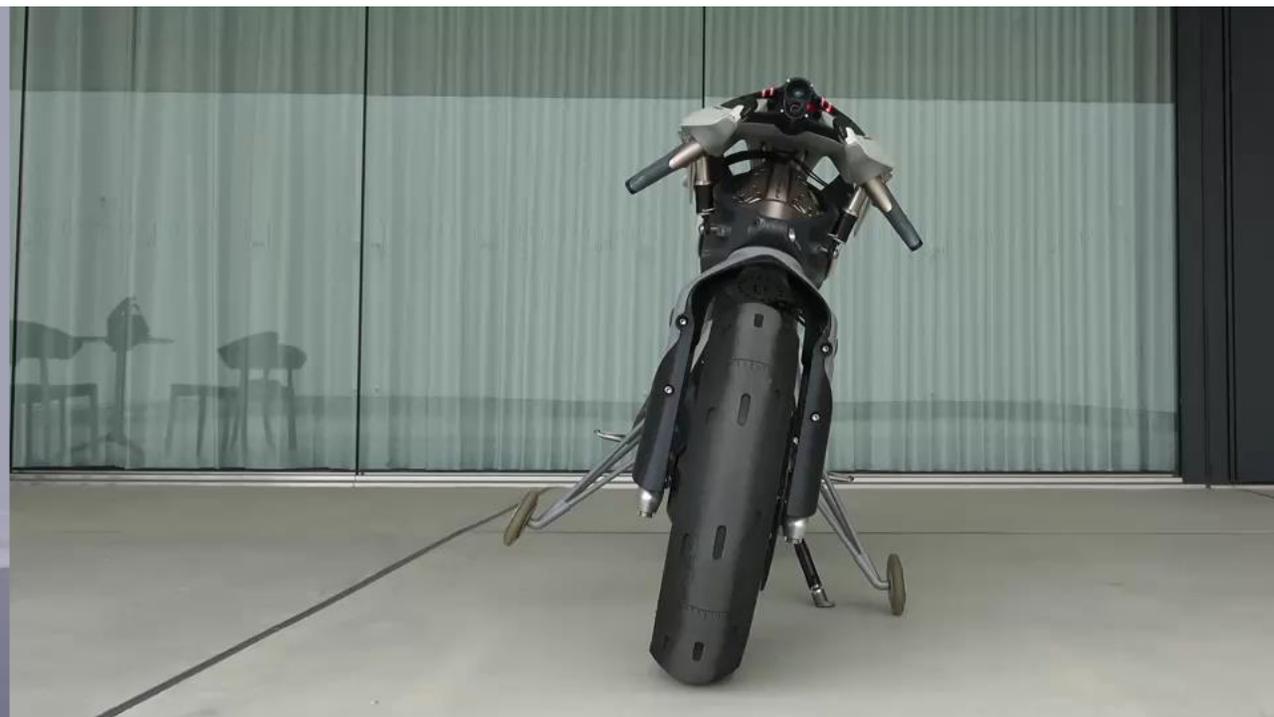
4. 6 実機評価

- 立ち上がり

Before



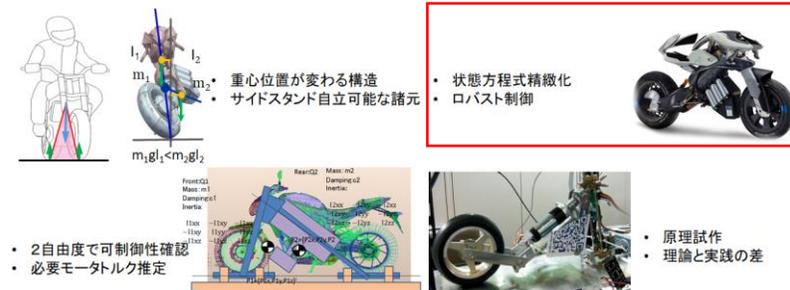
After



- 重心位置が変わる構造
- サイドスタンド自立可能な諸元
- 状態方程式精緻化
- ロバスト制御
- 2自由度で可制御性確認
- 必要モーメント推定
- 原理試作
- 理論と実践の差

4. 5 実機評価

- 強制変位



Before

After

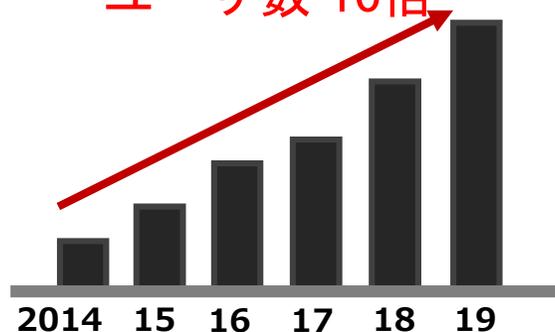


1. ヤマハ発動機紹介
2. MOTORoID概要
 - AMCES
 - 重心位置制御
3. 開発の流れ
 - 制御系設計の流れ
 - ツールと工程
4. 制御系設計
 - 簡易モデリング, 制御器設計
 - 詳細モデリング, ロバスト制御
 - シミュレーション, 実機評価
5. **当社のMATLAB®**
6. まとめ

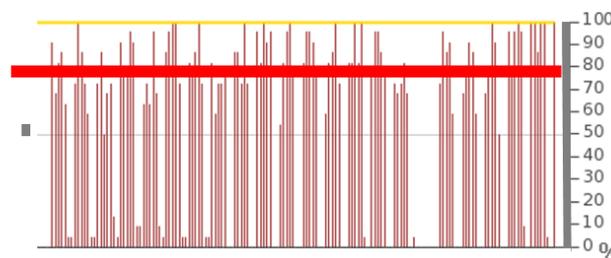
5. MATLAB®利用率推移

- 限られた利用環境

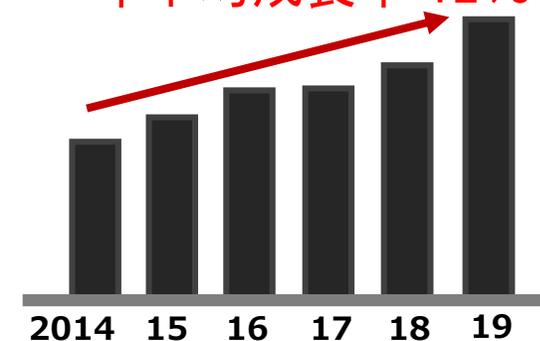
ユーザ数 10倍



平均稼働率 約80%



年平均成長率 12%



利用者の急増



ライセンスの取り合い



コスト増

5. エンタープライズに移行

- オンデマンドな利用環境
 - 何時でも、どのツールボックスでも、外出先でも利用可能
 - 実際のツール使用実績に基づいて、全社一括で後払い



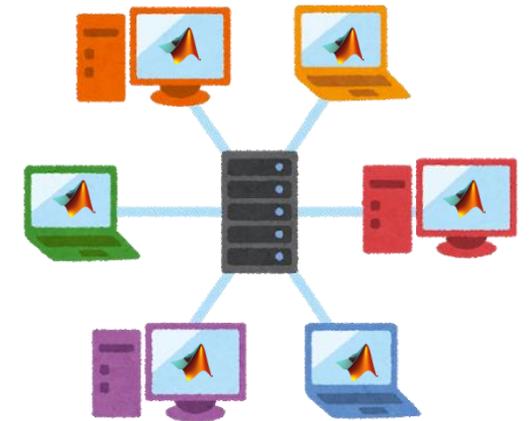
全製品・全バージョン



ライセンス数の制約なし



社外でも利用可能



使用した分だけ後払い

5. MathWorks®への期待

- 部品事例集の充実
 - 構造を仮定して状態方程式を同定する時の事例集やmファイル
 - ツールやコマンドに軸足を置いた情報
 - 問題解決した事例情報
 - × 問題解決に利用できる部品情報
- 利用明細の可視化ツール
 - 利用者と利用期間を指示するとツール別の利用時間推移をCSV出力
 - 費用換算や部門集計は各社で個別実施

1. ヤマハ発動機紹介
2. MOTORoID概要
 - AMCES
 - 重心位置制御
3. 開発の流れ
 - 制御系設計の流れ
 - ツールと工程
4. 制御系設計
 - 簡易モデリング, 制御器設計
 - 詳細モデリング, ロバスト制御
 - シミュレーション, 実機評価
5. 当社のMATLAB®
6. まとめ

6. まとめ

- MOTOROiDは積極的に重心移動させ安定させる機構
- 2自由度に簡易化して成立性検討と制御設計
- 実験同定してメジャーフィードバック追加でロバスト化
- MATLAB®を使い倒して業務効率向上して目標達成

以上です

ご質問やご意見をお願いいたします

tsuchiyaimit@yamaha-motor.co.jp