

# MATLAB EXPO 2018 Japan



## 競技用自転車開発における挙動推定と1Dシミュレーションの活用

株式会社ブリヂストン  
デジタルエンジニアリング本部  
フェロー  
内田和男

### 1. ブリヂストンについて

### 2. 開発背景

1. 競技用自転車の開発について
2. 技術課題

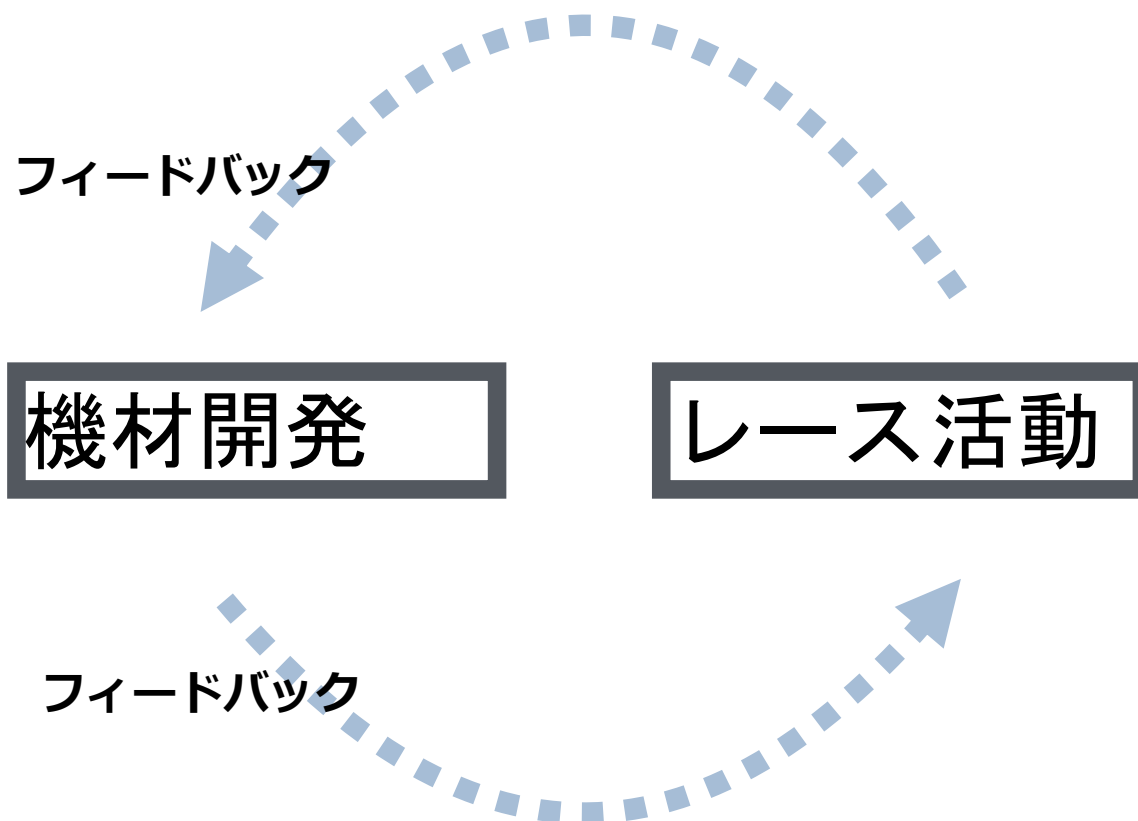
### 3. 方法論(非線形カルマンフィルタ)

1. 自転車の運動学モデル
2. 路面モデル

### 4. 結果

1. 解析結果
2. 苦労話

# ブリヂストンの競技自転車開発



ANCHOR 

## 2.2. 技術課題 ライダーからのFeedback・・・走行状態の定量化

最適なバイクはレースごとに違う・・・選手のFeedbackは極めて重要な情報



官能  
コメント

●  
相関

### 自転車挙動

フレーム（姿勢角）  
前・後輪（接地位置、キャンバ等）  
ハンドル（姿勢角） etc…

挙動計測のための新システムを構築しなければ！

## 2.2. 技術課題

新計測システムを構築する理由

既存システムでは屋内トラック競技  
の計測には適合しないため

### 既存技術の特徴

|         | 既存技術           |             |                  | 新技術   |
|---------|----------------|-------------|------------------|-------|
|         | モーション<br>キャプチャ | ジャイロ<br>センサ | 市販二輪用計測シ<br>ステム) | 本システム |
| 重量（積載性） | ○              | ○           | × ※4             | ○     |
| 精度      | ○              | △ ※3        | △ ※5             | ○     |
| 計測範囲    | × ※1           | ○           | ○                | ○ ※6  |
| 実践投入可能性 | × ※2           | ○           | × ※4             | ○     |

※1: きわめて狭い領域しか計測できない

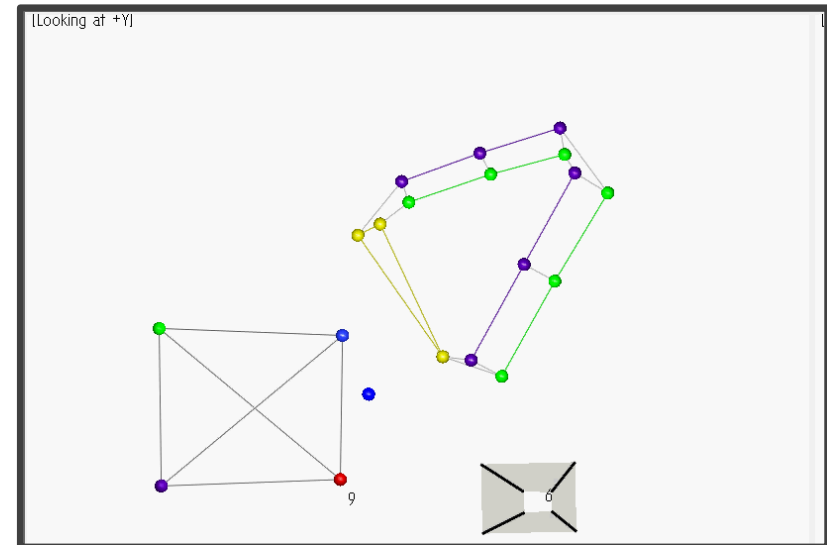
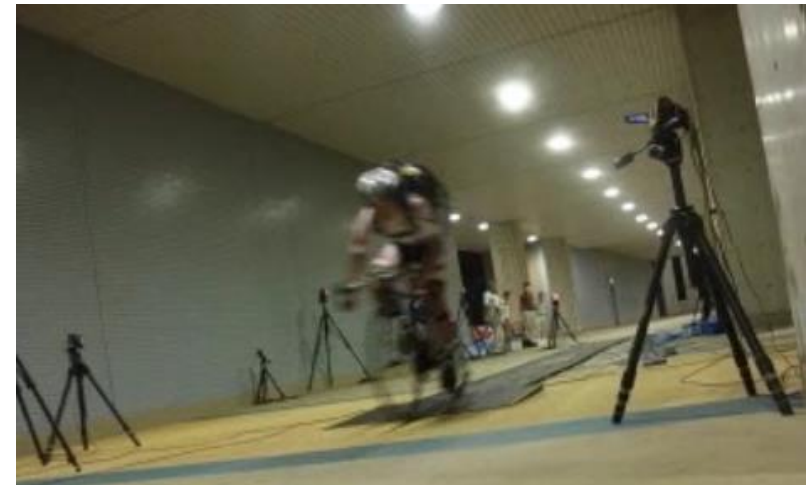
※2: 設営の準備工数が膨大

※3: 積分誤差が大きい

※4: 重量が10kg以上

- ・大規模な装置を置けない  
場所の問題
- ・重い装置は搭載できない  
自転車の軽量性の問題

### 既存計測の例



## 2.2. 技術課題

センサフュージョン

ウェアラブルセンシング

1D-CAE

カルマンフィルタ

こんな感じのシステム構成でいきたい

システム構成



小型の慣性センサ

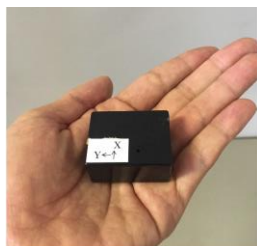
×

3個

個人的にも使いたい

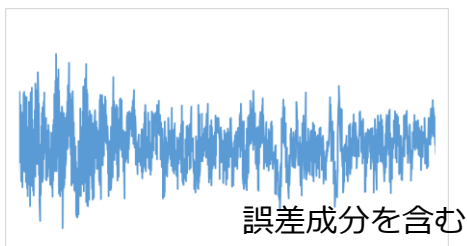
## 2.2. 技術課題 従来技術の課題

近年進化が著しいウェアラブルセンシング

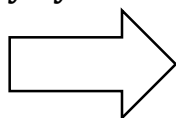


角速度/並進加速度  
(位置の時間微分情報)

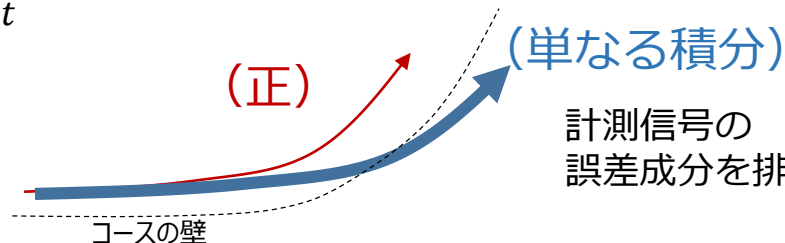
加速度波形



$$x = \int \left( \int a_x dt \right) dt$$



位置データの精度 低

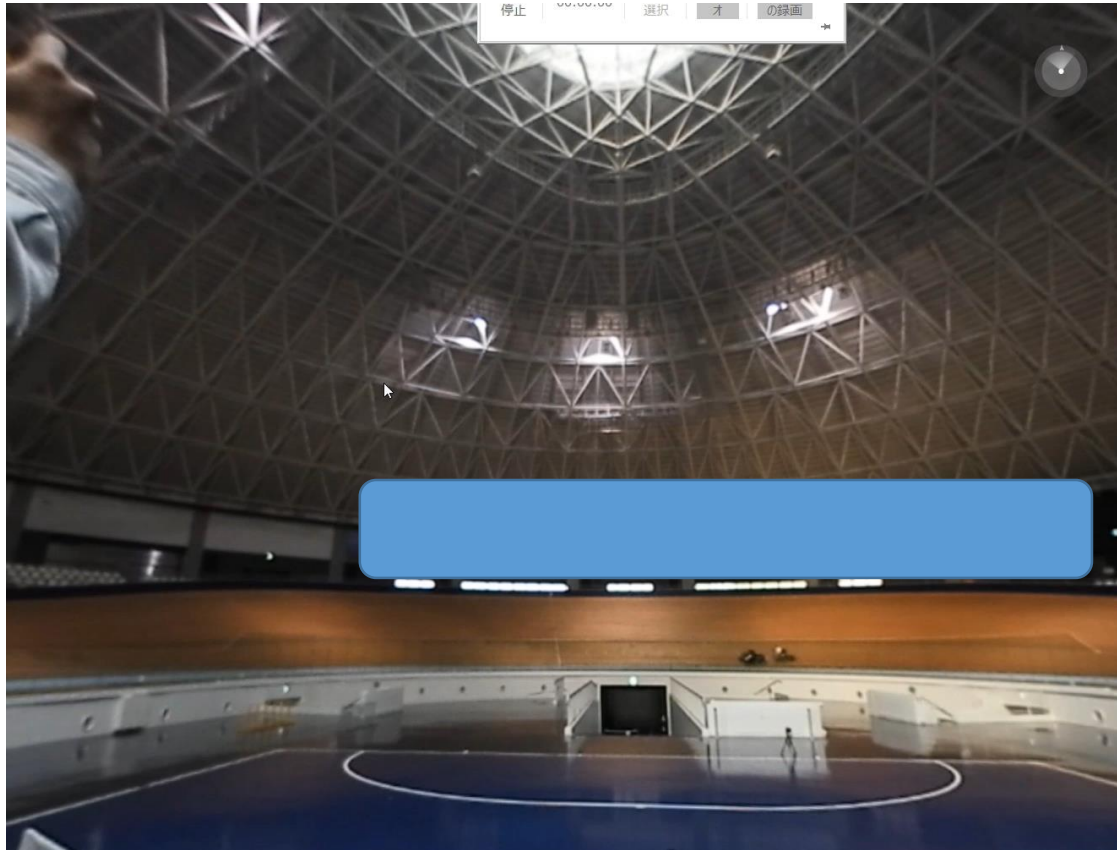


計測信号の  
誤差成分を排除することが困難

**小型センサのみでは精度に限界がある！**

一般的な積分誤差補正に**GPS情報/重力加速度**が有効

積分誤差補正にGPS情報は有効だが、



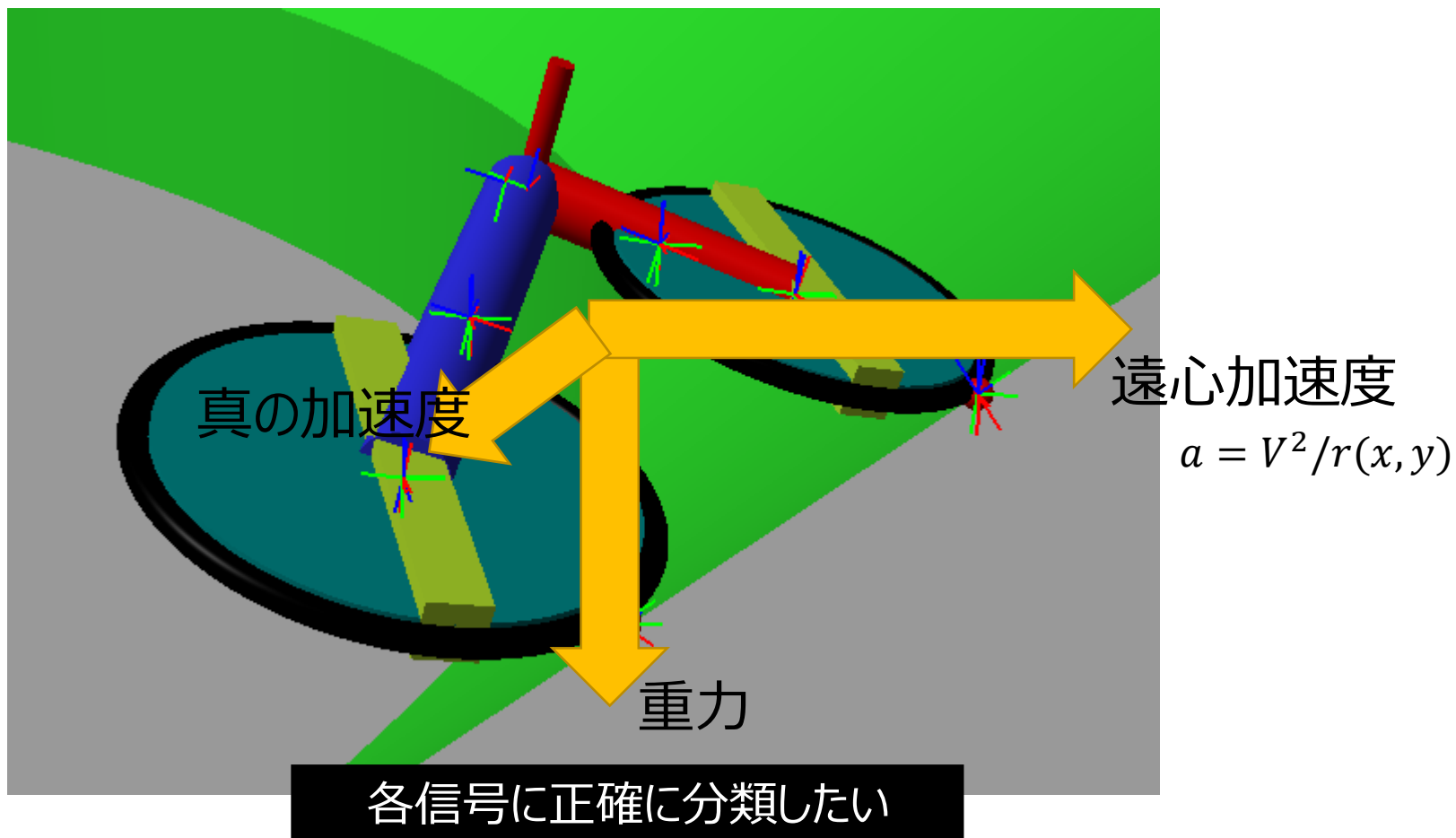
屋内トラックではGPS信号も使えない

位置情報を補正する何らかのシステムが必要



## 2.2. 向きの補正を行う加速度センサは、複雑な信号の重ね合わせ

### 加速度信号の内訳



以上の理由から、**非線形カルマンフィルタによる動作推定**システムを構築

## 発表の流れ

### 1. ブリヂストンについて

### 2. 開発背景

1. 競技用自転車の開発について
2. 技術課題

### 3. 方法論(非線形カルマンフィルタ)

1. 自転車の運動学モデル
2. 路面モデル

### 4. 結果

1. 解析結果
2. 苦労話

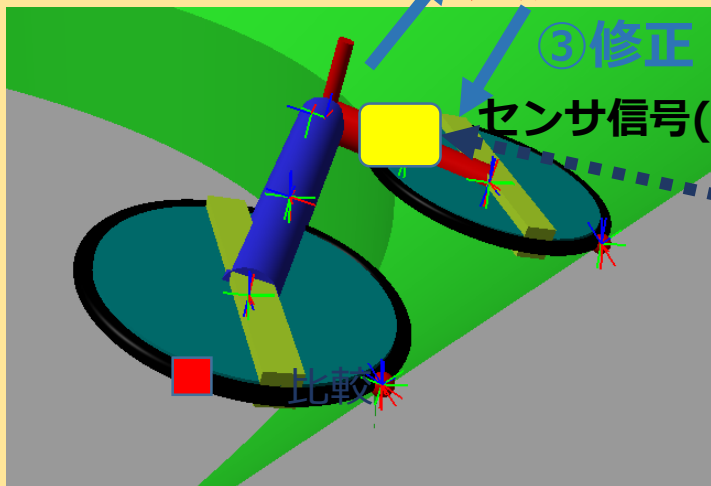
### 3.1 カルマンフィルタとは

運動学シミュレーション

②比較結果をF/B **入力**

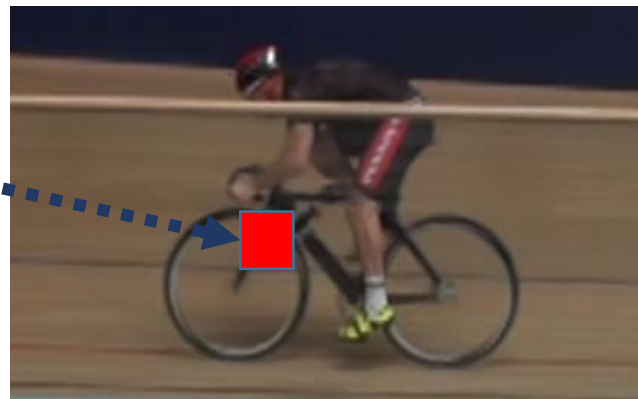
③修正

センサ信号(sim)



①比較

センサ信号(実験)



加速度&各速度計を搭載

実験とシミュレーション（状態方程式）と連動



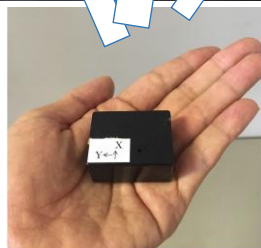
外に飛び出すことがない！  
（物理的根拠をもとに異常なノイズをカット）



見えないものが見えるようになる

## 3.1 計測システム構成

### システム構成



- 並進加速度
- 角速度
- 地磁気(ホイール角速度)

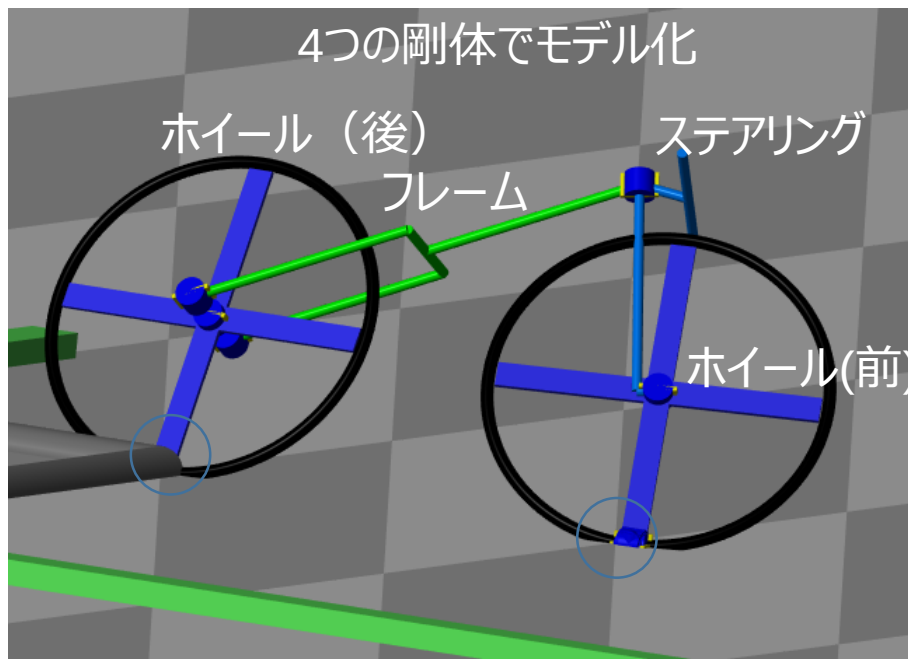
25g の慣性センサ

×

3個

ライダーはセンサの存在を気にせず走ることができる

# 自転車の自由度は？



## ① フレーム

並進位置 : 3自由度

角度 : 3自由度

ステアリング : 1 自由度

ホイール（前） : 1自由度

ホイール（後） : 1自由度

計 : 9自由度

②

位置拘束(タイヤが路面上)

タイヤ（前） : -1自由度

タイヤ（後） : -1自由度

計 : 7自由度

③

各自由度は、位置と速度の自由度がある

計 : 14自由度

④

Non-holonomic拘束

タイヤの転がり方向に関する拘束

タイヤ（前） : -2自由度

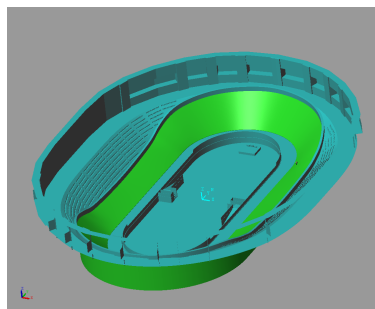
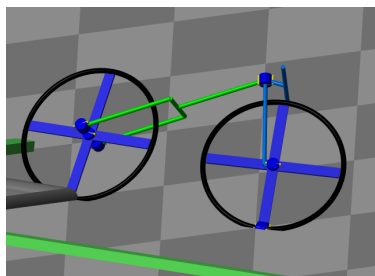
タイヤ（後） : -2自由度

計 : 10自由度

6軸センサ × 3 = 18個の観測情報

# カルマンフィルタの構成

## 自転車の運動学モデル



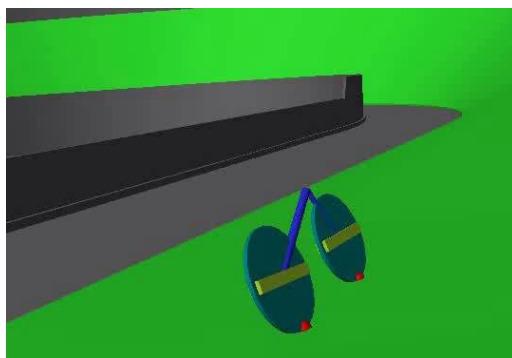
状態変数  
拘束条件  
幾何関係

観測関数  
シミュレーション内のセンサ

$$\omega_{world}^n(v) = \omega_{n-1}^n(v) + \dots + \omega_{world}^1(v)$$
$$\omega_{output} = R_{sensor}(x) \cdot (\omega_{world}^n(v))$$

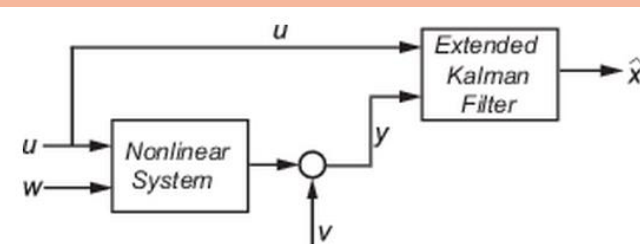
+Noise

状態方程式  
運動学シミュレーション

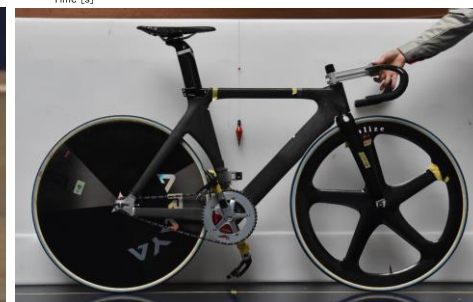
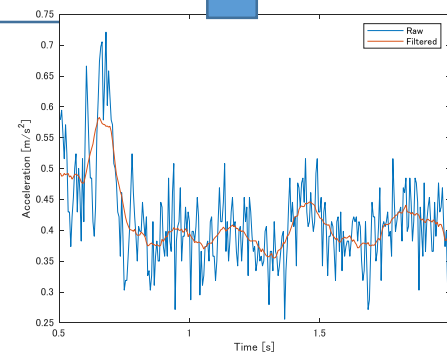


Control System Toolbox™

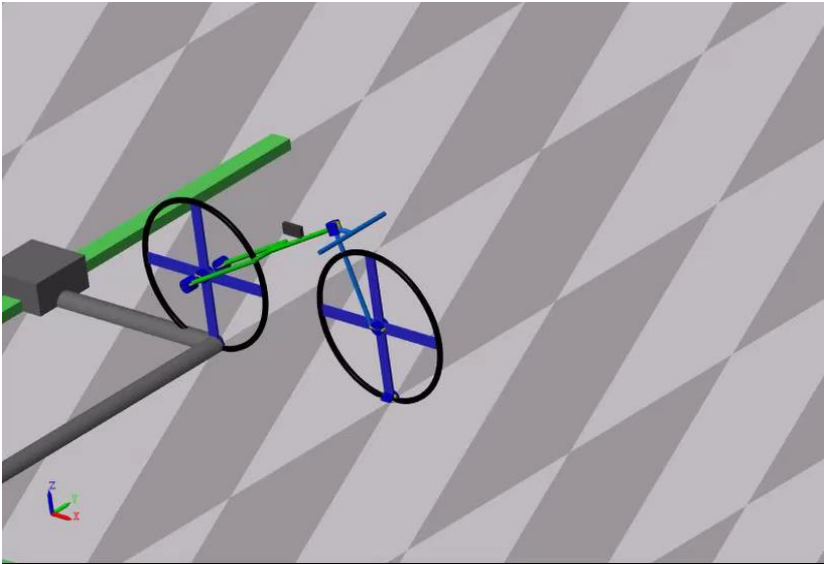
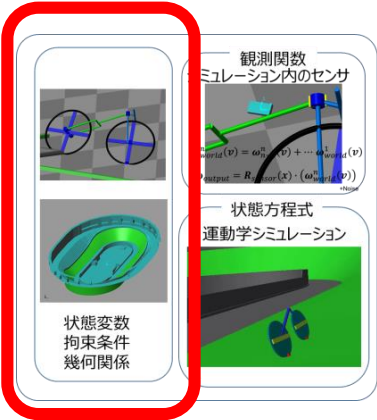
拡張カルマンフィルタ



実験系



# 状態変数の選択



変数の数  $1 \times 3 \times 2 = 26$   
拘束式の数  $= 16$

|          | 位置レベル | 速度レベル |
|----------|-------|-------|
| 後輪 x座標   | ●     |       |
| 後輪 y座標   | ●     |       |
| 後輪 ヨー角   | ●     |       |
| 後輪 回転角   | ●     | ●     |
| 車体ロール角   | ●     | ●     |
| 車体ピッチ角   |       |       |
| ステアリング角  | ●     | ●     |
| 前輪 x座標   |       |       |
| 前輪 y座標   |       |       |
| 前輪 ヨー角   |       |       |
| 前輪 回転角   | ●     |       |
| ステア ロール角 |       |       |
| ステア ピッチ角 |       |       |

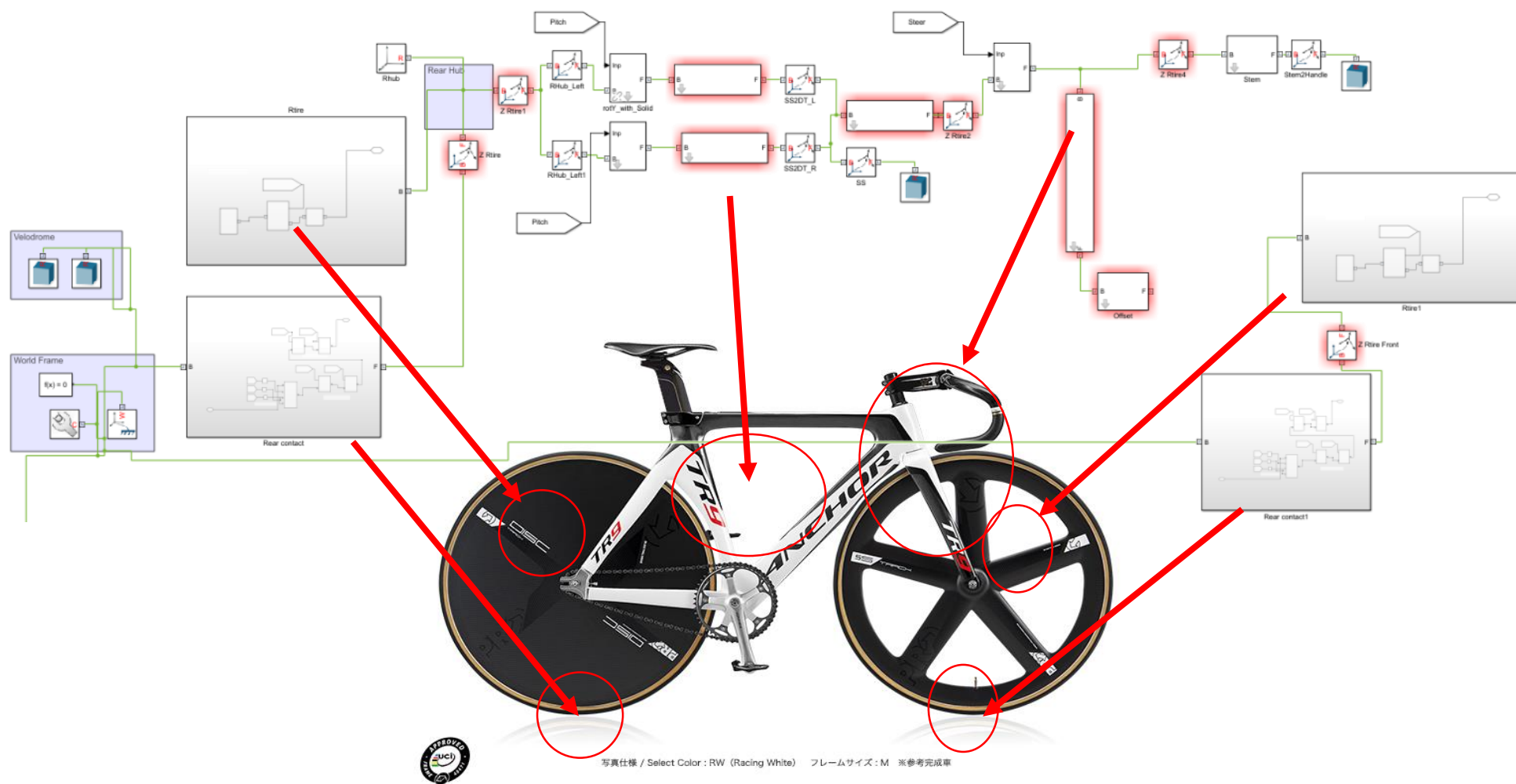
状態変数の数  $26 - 16 = 10$  個

# 自転車の運動学モデル

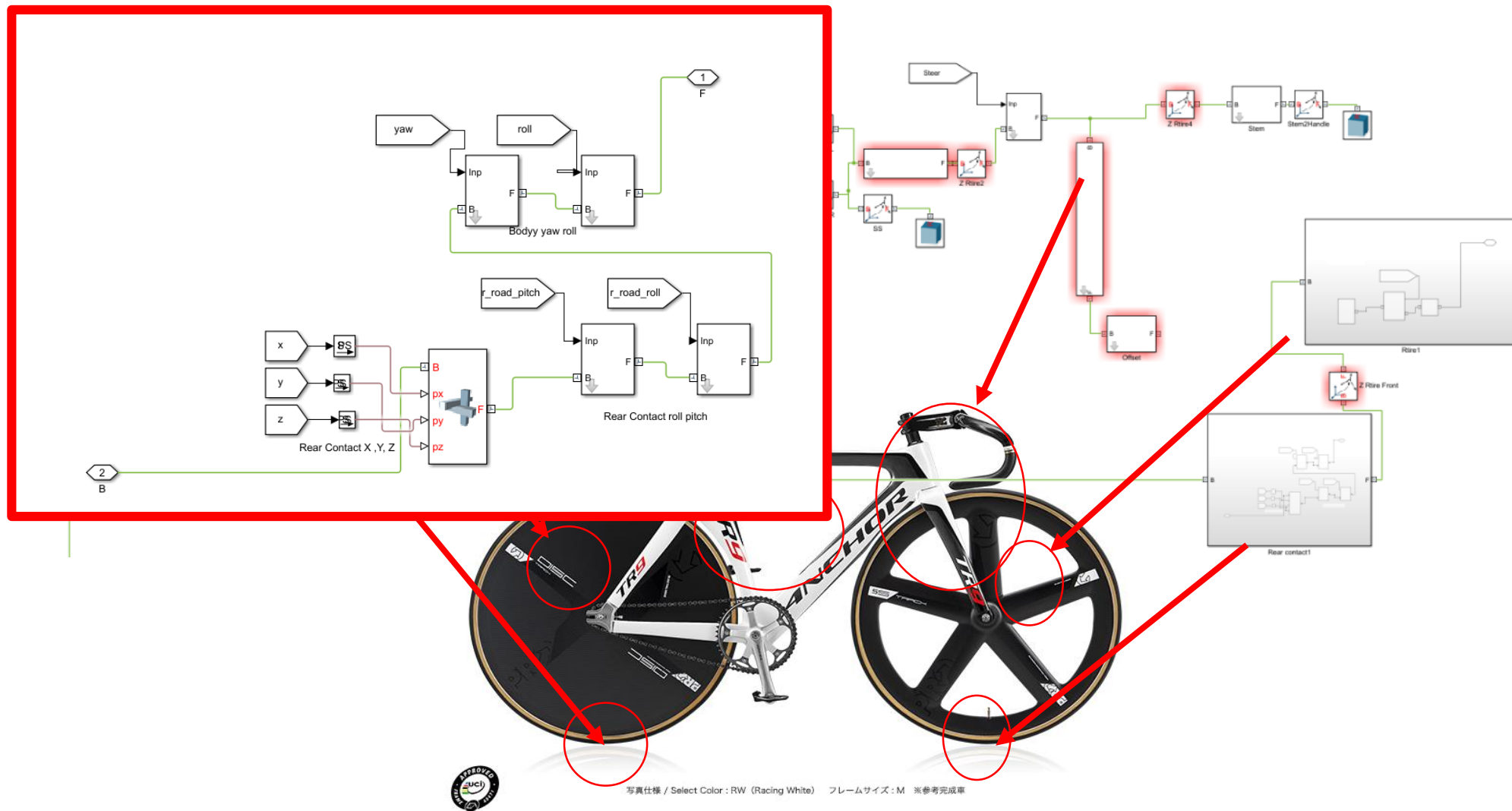
1D-simulatorでモデル化

Symbolic Math Toolbox™

Simscape™ Multibody™

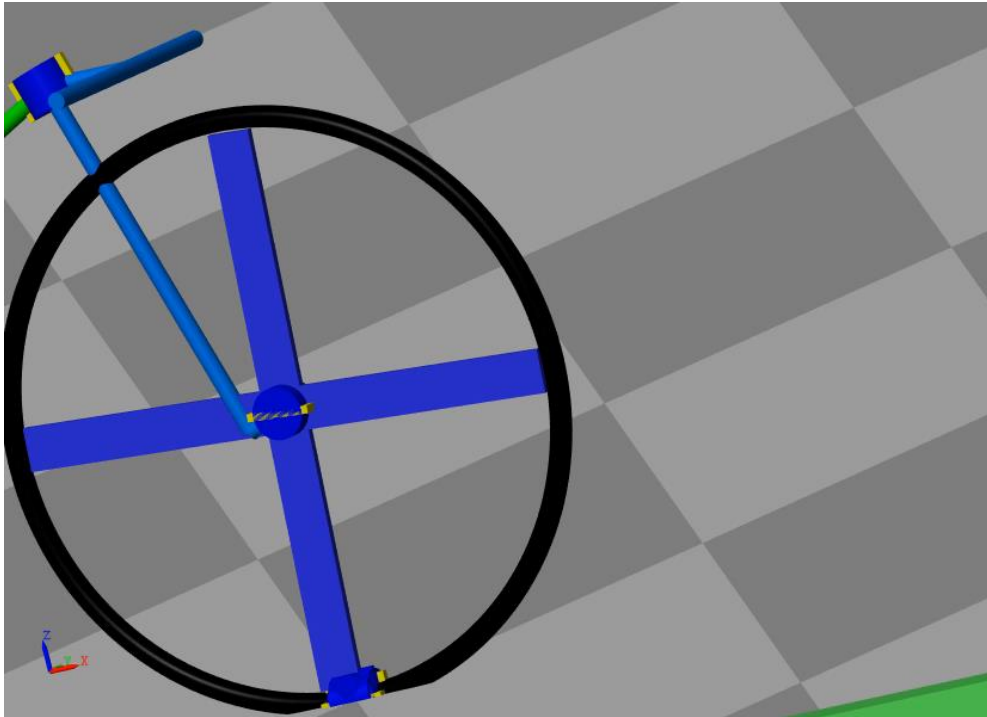








接地点の速度 = タイヤ半径 × ホイール角速度



$$\dot{x} = -r \dot{\alpha} \sin \theta + (R + r \cos \alpha) \dot{\chi} \cos \theta$$

$$\dot{y} = r \dot{\alpha} \cos \theta + (R + r \cos \alpha) \dot{\chi} \sin \theta$$

$$Dx = -r D\alpha \sin \theta + (R + r \cos \alpha) D\chi \cos \theta$$

$$Dy = r D\alpha \cos \theta + (R + r \cos \alpha) D\chi \sin \theta$$

拘束式の数    前輪2個    後輪2個    計4個

# 状態方程式

$t = n$   
全変数の特定

| 位置      |     |
|---------|-----|
| 後輪      | x座標 |
| 後輪      | y座標 |
| 後輪      | ヨー角 |
| 後輪      | 回転角 |
| 車体ロール角  |     |
| ステアリング角 |     |
|         |     |
| 前輪 回転角  |     |
|         |     |
| 速度      |     |
|         |     |
| 後輪 ヨー角  |     |
| 後輪 回転角  |     |
| 車体ロール角  |     |
| ステアリング角 |     |
|         |     |
|         |     |
|         |     |
|         |     |

10個

拘束式

$$Dx = -r D \sin \theta + (R + r \cos \theta) D y \cos \theta$$

$$Dy = r D \cos \theta + (R + r \cos \theta) D x \sin \theta$$

Weld : 12個  
転がり : 4個

| 位置       |     |
|----------|-----|
| 後輪       | x座標 |
| 後輪       | y座標 |
| 後輪       | ヨー角 |
| 後輪       | 回転角 |
| 車体ロール角   |     |
| 車体ピッチ角   |     |
| ステアリング角  |     |
| 前輪       | x座標 |
| 前輪       | y座標 |
| 前輪       | ヨー角 |
| 前輪       | 回転角 |
| ステア ロール角 |     |
| ステア ピッチ角 |     |
| 速度       |     |
| 後輪       | x座標 |
| 後輪       | y座標 |
| 後輪       | ヨー角 |
| 後輪       | 回転角 |
| 車体ロール角   |     |
| 車体ピッチ角   |     |
| ステアリング角  |     |
| 前輪       | x座標 |
| 前輪       | y座標 |
| 前輪       | ヨー角 |
| 前輪       | 回転角 |
| ステア ロール角 |     |
| ステア ピッチ角 |     |

26個

## 時間変化の方程式

$$x_{n+1} = x_n + v_n dt$$

$t = n + 1$

$t = n$

$t = n$

| 位置       |     |
|----------|-----|
| 後輪       | x座標 |
| 後輪       | y座標 |
| 後輪       | ヨー角 |
| 後輪       | 回転角 |
| 車体ロール角   |     |
| 車体ピッチ角   |     |
| ステアリング角  |     |
| 前輪       | x座標 |
| 前輪       | y座標 |
| 前輪       | ヨー角 |
| 前輪       | 回転角 |
| ステア ロール角 |     |
| ステア ピッチ角 |     |

=

| 位置       |     |
|----------|-----|
| 後輪       | x座標 |
| 後輪       | y座標 |
| 後輪       | ヨー角 |
| 後輪       | 回転角 |
| 車体ロール角   |     |
| 車体ピッチ角   |     |
| ステアリング角  |     |
| 前輪       | x座標 |
| 前輪       | y座標 |
| 前輪       | ヨー角 |
| 前輪       | 回転角 |
| ステア ロール角 |     |
| ステア ピッチ角 |     |

+

| 速度       |     |
|----------|-----|
| 後輪       | x座標 |
| 後輪       | y座標 |
| 後輪       | ヨー角 |
| 後輪       | 回転角 |
| 車体ロール角   |     |
| 車体ピッチ角   |     |
| ステアリング角  |     |
| 前輪       | x座標 |
| 前輪       | y座標 |
| 前輪       | ヨー角 |
| 前輪       | 回転角 |
| ステア ロール角 |     |
| ステア ピッチ角 |     |

$dt$

$$v_{n+1} = v_n + noise$$

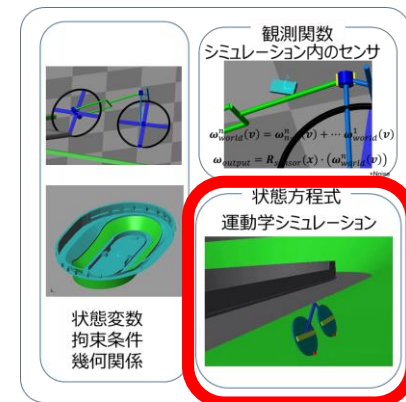
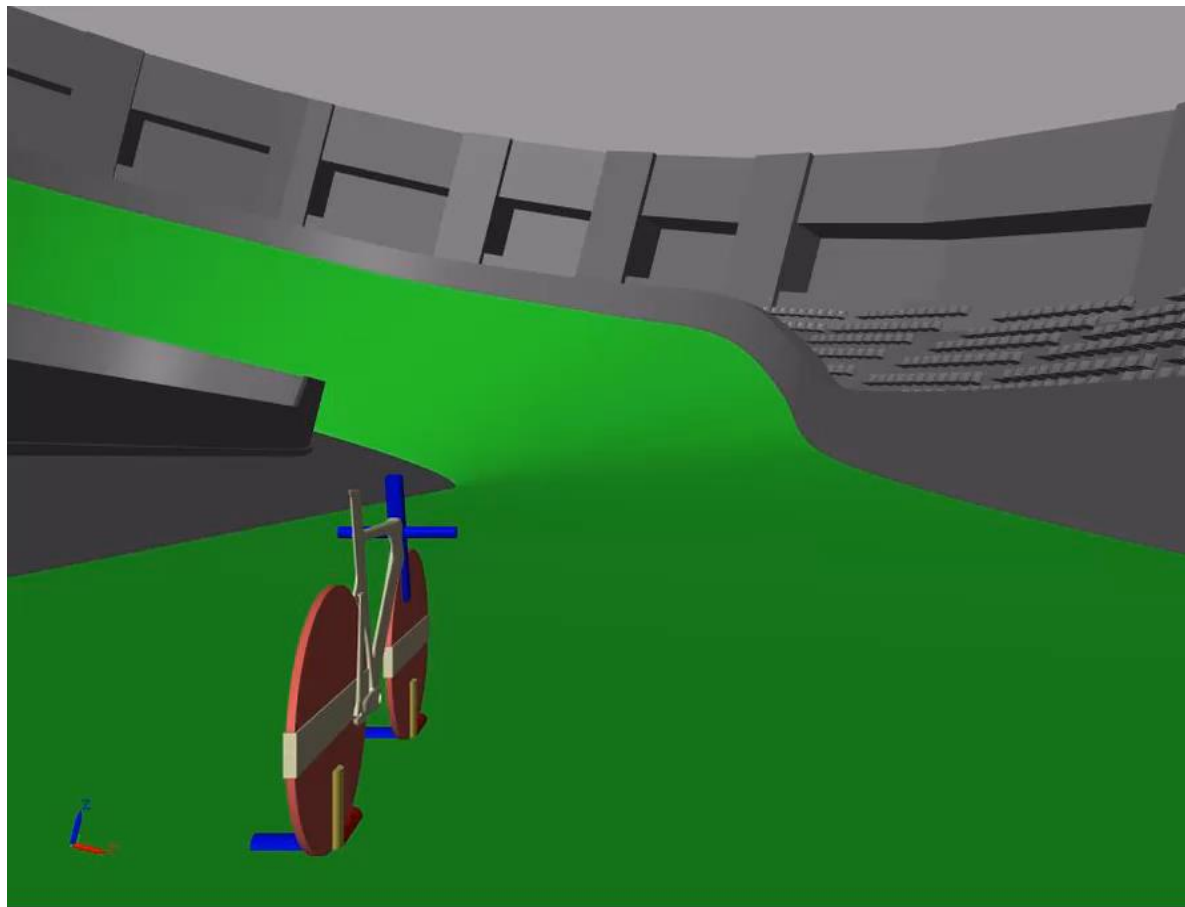
| 速度       |     |
|----------|-----|
| 後輪       | x座標 |
| 後輪       | y座標 |
| 後輪       | ヨー角 |
| 後輪       | 回転角 |
| 車体ロール角   |     |
| 車体ピッチ角   |     |
| ステアリング角  |     |
| 前輪       | x座標 |
| 前輪       | y座標 |
| 前輪       | ヨー角 |
| 前輪       | 回転角 |
| ステア ロール角 |     |
| ステア ピッチ角 |     |

=

| 速度       |     |
|----------|-----|
| 後輪       | x座標 |
| 後輪       | y座標 |
| 後輪       | ヨー角 |
| 後輪       | 回転角 |
| 車体ロール角   |     |
| 車体ピッチ角   |     |
| ステアリング角  |     |
| 前輪       | x座標 |
| 前輪       | y座標 |
| 前輪       | ヨー角 |
| 前輪       | 回転角 |
| ステア ロール角 |     |
| ステア ピッチ角 |     |

+ noise

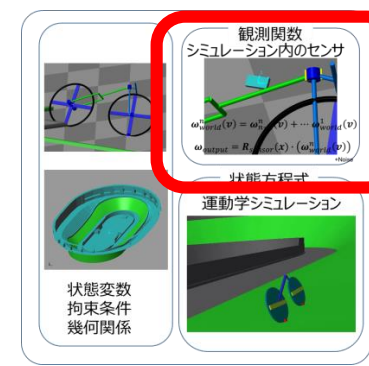
# 運動学シミュレーションの例



自転車の拘束条件を正確に満たしながら、状態変数の時間変化を計算できる

## 観測関数 1 角速度信号

シミュレータの中にセンサを配置する



$$\mathbf{x} = [x, y, \theta, \dots, \chi_f]$$

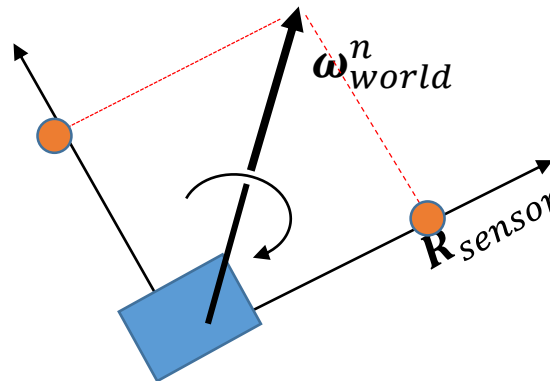
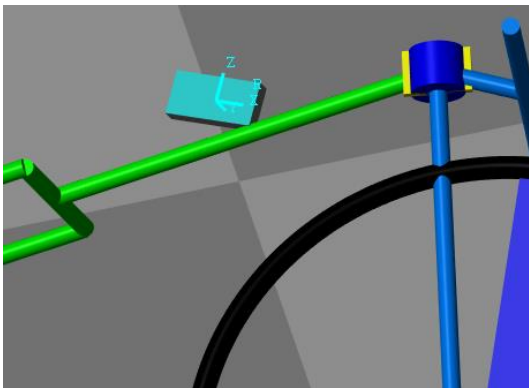
$$\mathbf{v} = [Dx, Dy, D\theta, \dots, D\chi_f]$$

$$\omega_{world}^n(\mathbf{v}) = \omega_{n-1}^n(\mathbf{v}) + \dots \omega_{world}^1(\mathbf{v})$$

$$\omega_{output} = \mathbf{R}_{sensor}(\mathbf{x}) \cdot (\omega_{world}^n(\mathbf{v}))$$

+Noise

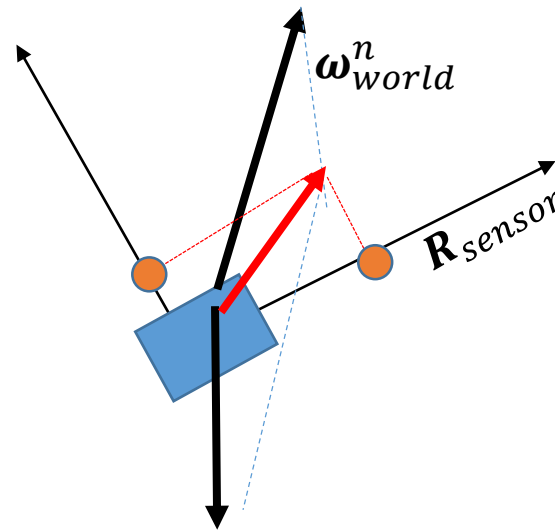
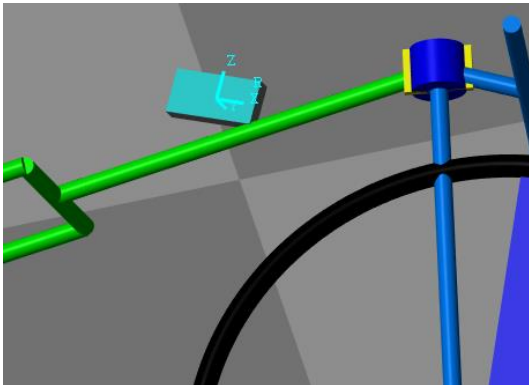
本質的なノイズ



角速度情報→姿勢角、速度の推定

$$\mathbf{a}_{global} = \overset{\text{重力}}{-\mathbf{g}} + \overset{\text{遠心力、コリオリ力}}{\mathbf{a}_v(\mathbf{x}, \mathbf{v})} + \overset{\text{真の加速度}}{\mathbf{a}_{motion}}$$

$$\mathbf{a}_{output} = \mathbf{R}_{sensor}(\mathbf{x}) \cdot (-\mathbf{g} + \mathbf{a}_v(\mathbf{x}, \mathbf{v}))$$



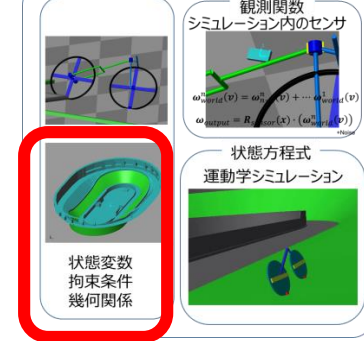
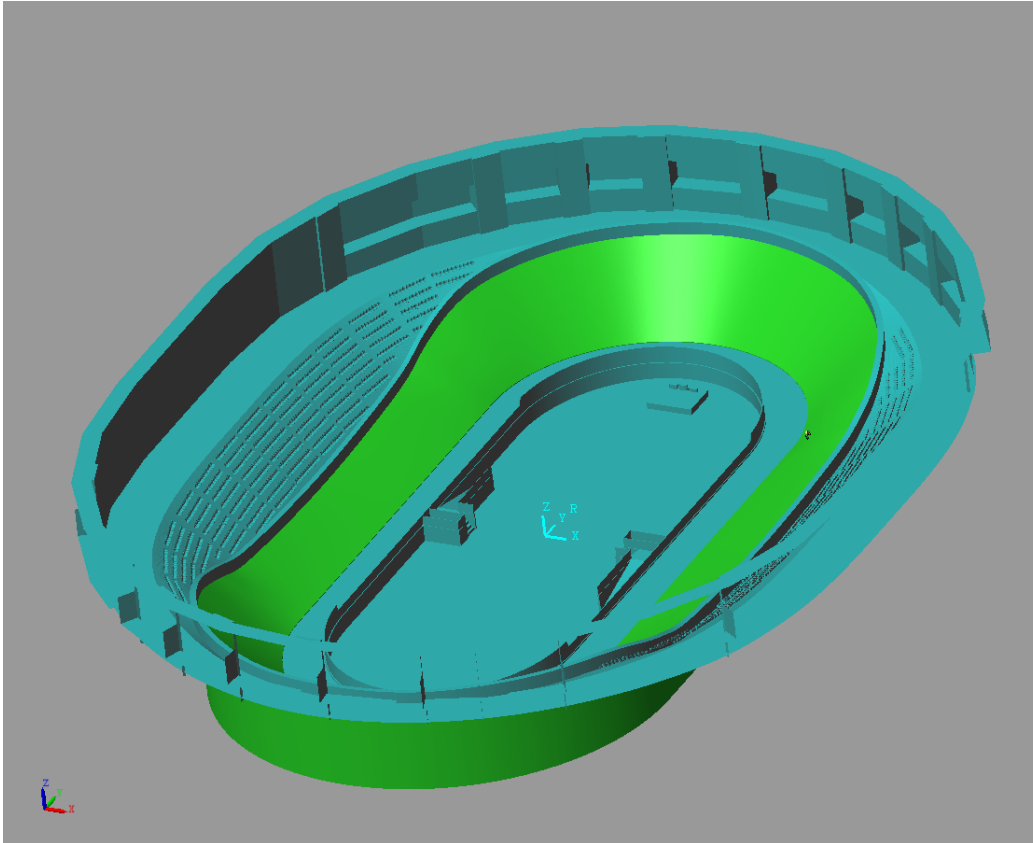
$$+\mathbf{R}_{sensor} \cdot \mathbf{a}_{motion} + \text{Noise}$$

人為的なノイズ      本質的なノイズ

加速度情報→姿勢角、速度の推定

# 屋内トラックモデルの構築

自転車は平地を走っているわけではない



モデルとしては、、、

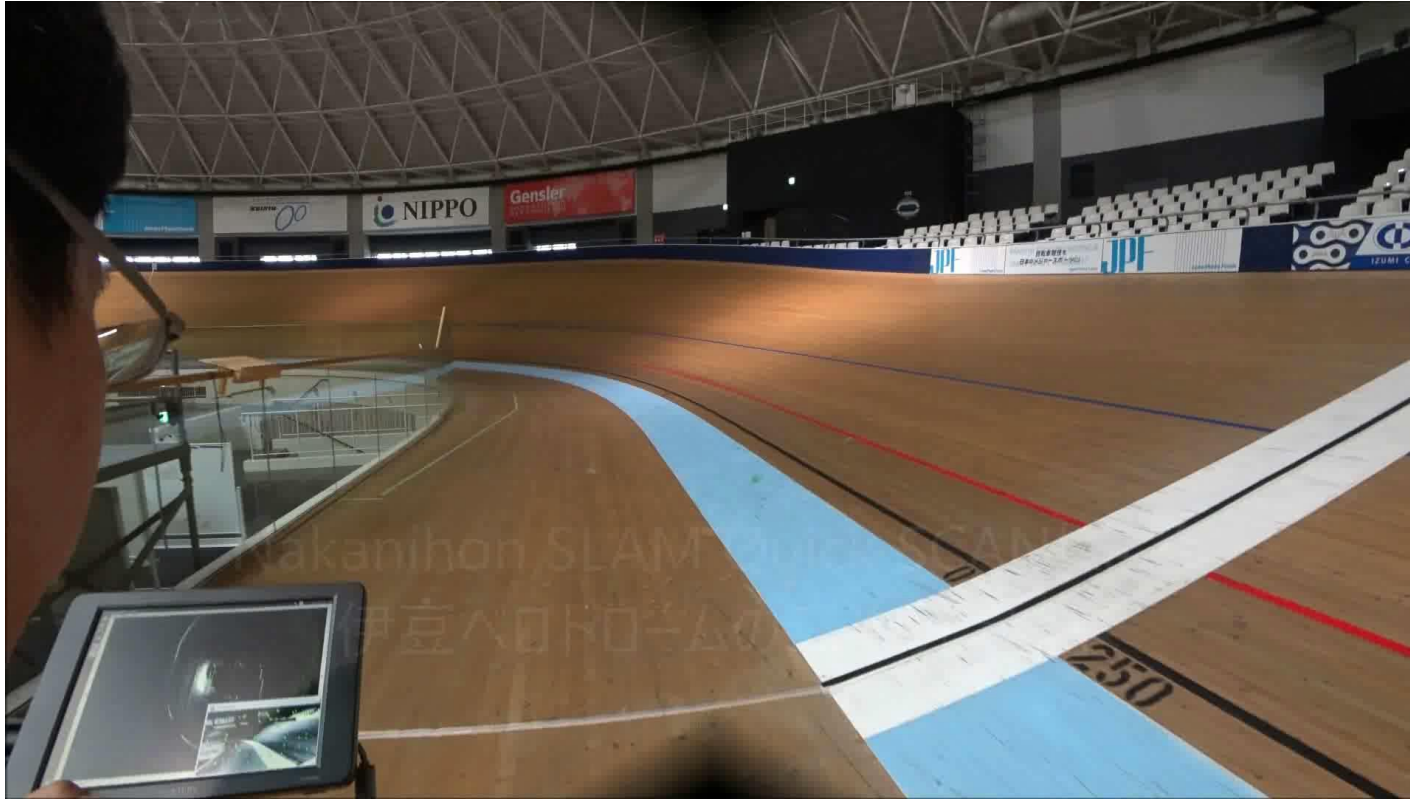
以下の関数を定義したい

$$z = altitude(x, y)$$

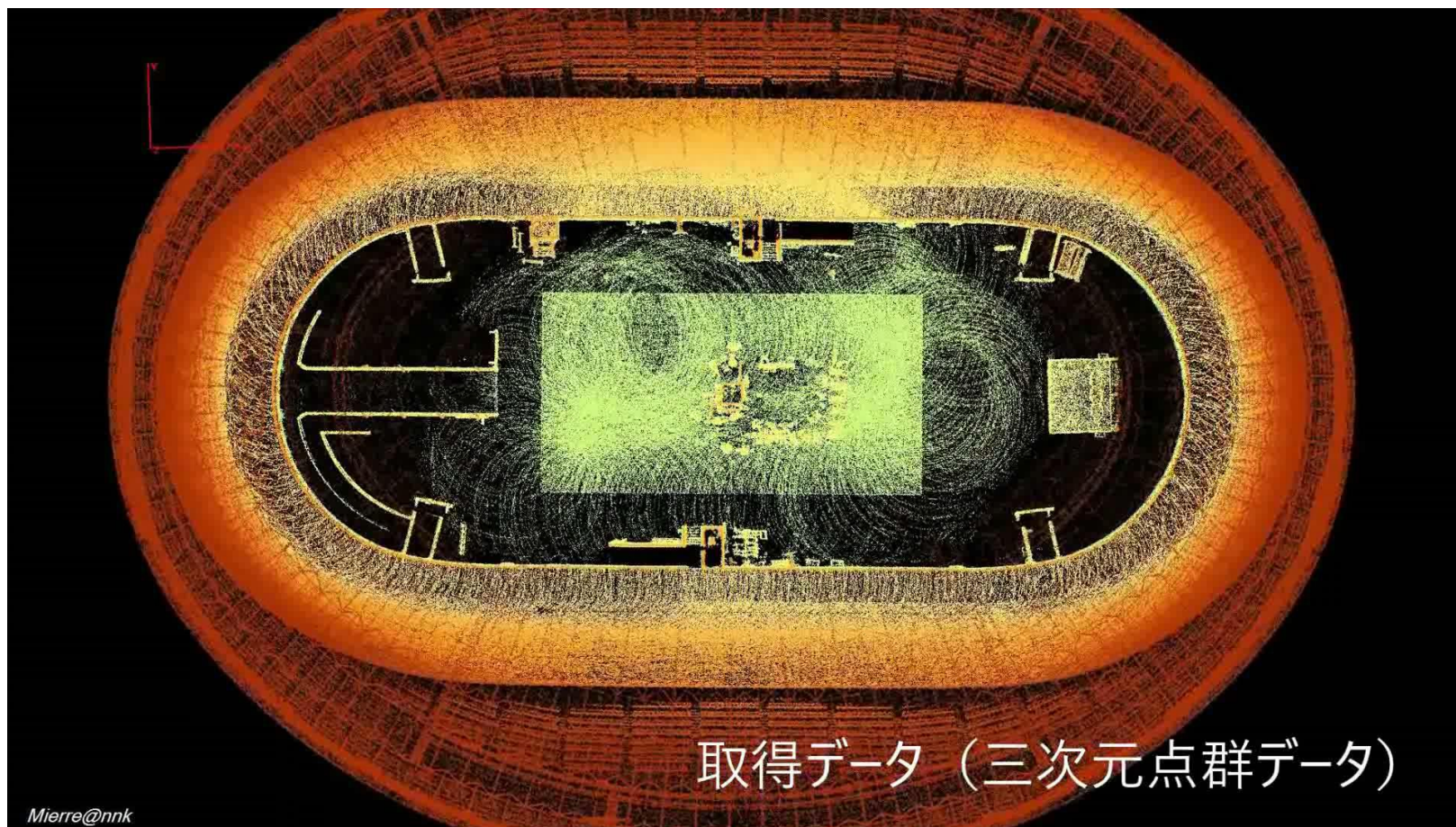
$$\mathbf{n} = Calc\_normal(x, y)$$



## 屋内トラックモデル 計測

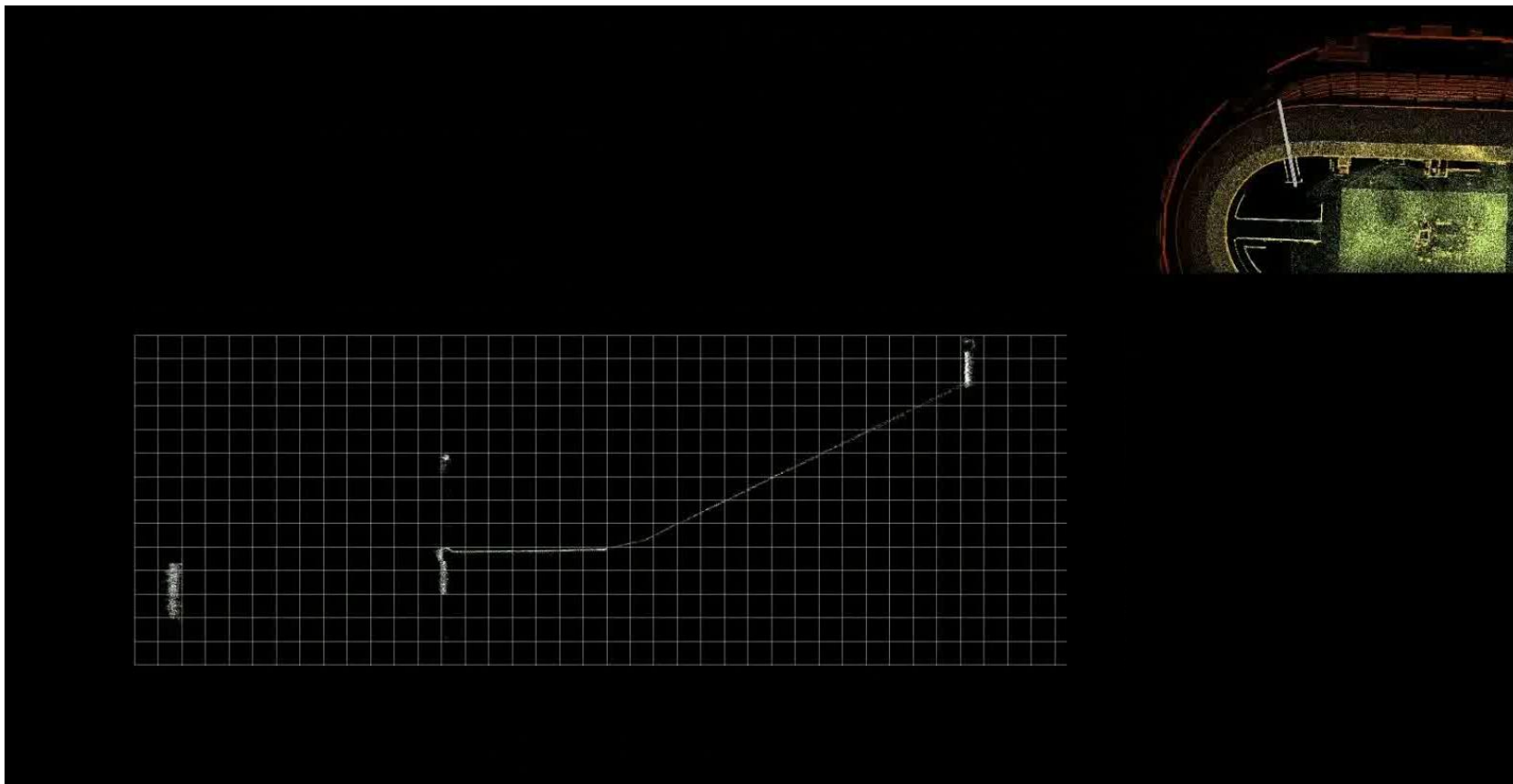


計測協力：中日本航空様



しかし、この時点ではあくまで点群データ（運動学モデルとしては使えない）

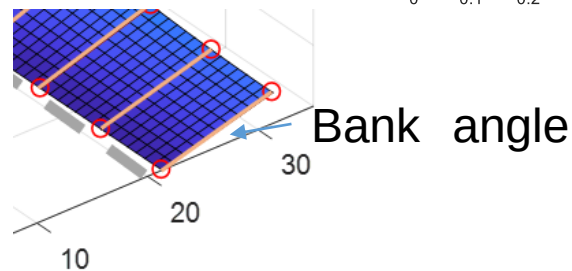
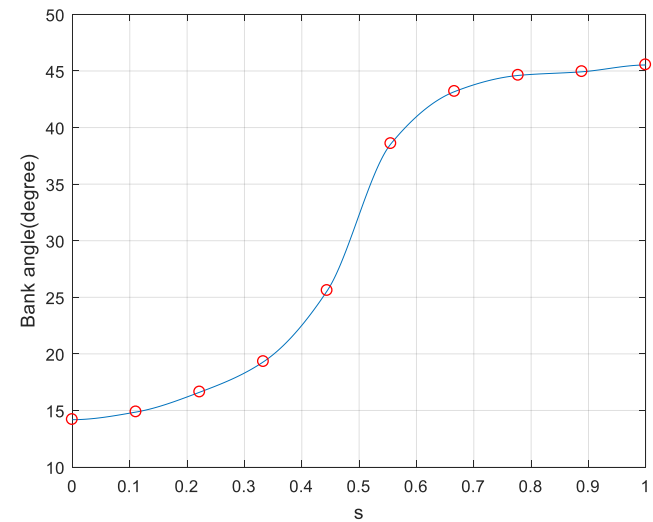
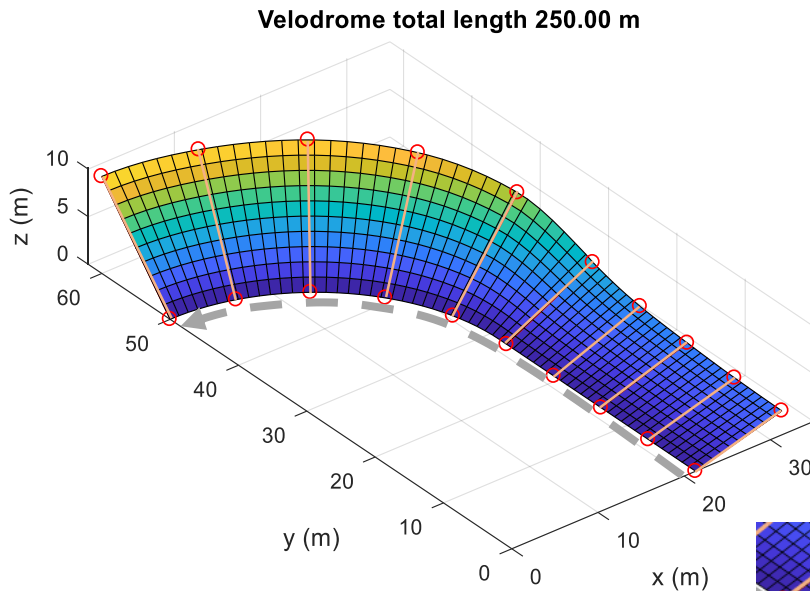
## 屋内トラックモデル 計測



断面では直線になっている（国際自転車連合の規格）

数学モデルとしては取り扱いやすい

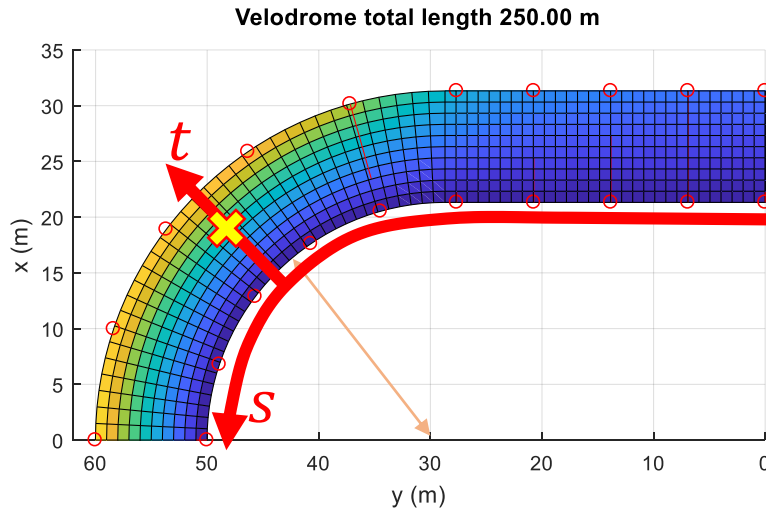
バンク角をベースライン上の位置の関数として表す。





# 屋内トラックモデル モデル同定

(1)  $(x, y) \rightarrow (s, t)$



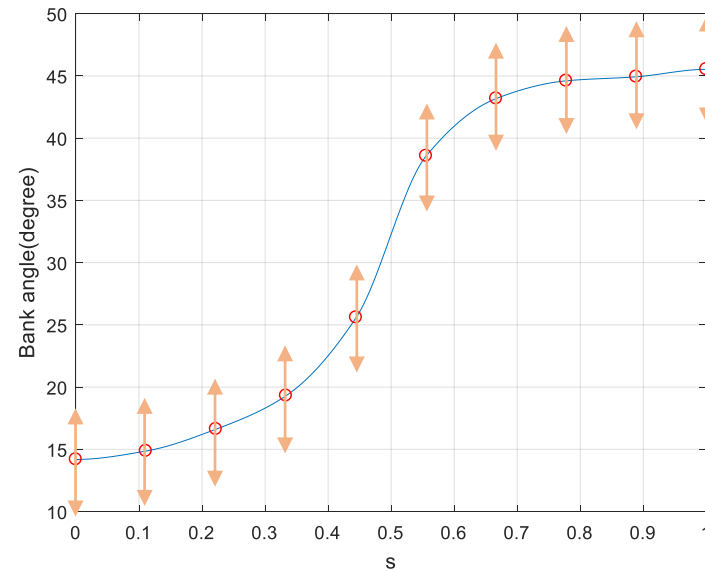
(1)  $(x, y) \rightarrow (s, t)$

(2)  $\theta = \text{spline}(s)$

(3)  $z = t \cdot \tan(\theta)$

(2)  $\theta = \text{spline}(s)$

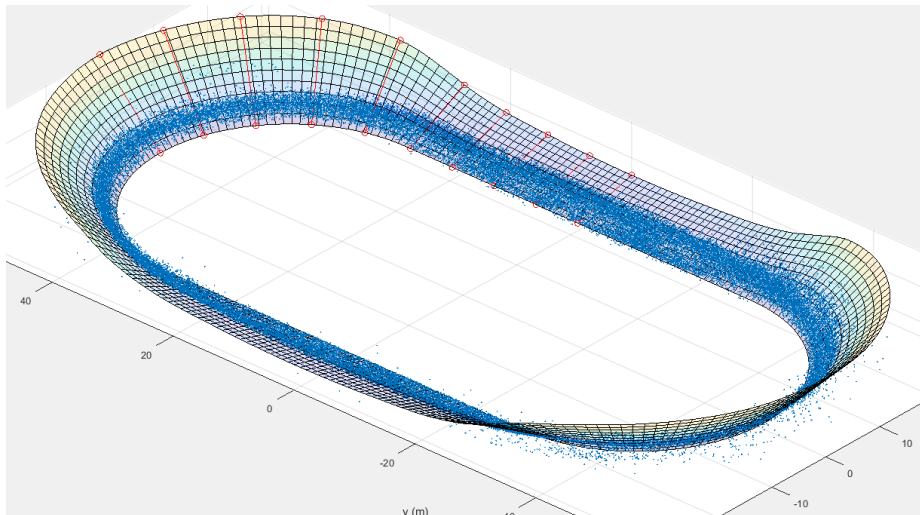
バンク関数のスプラインの制御点 (10個)



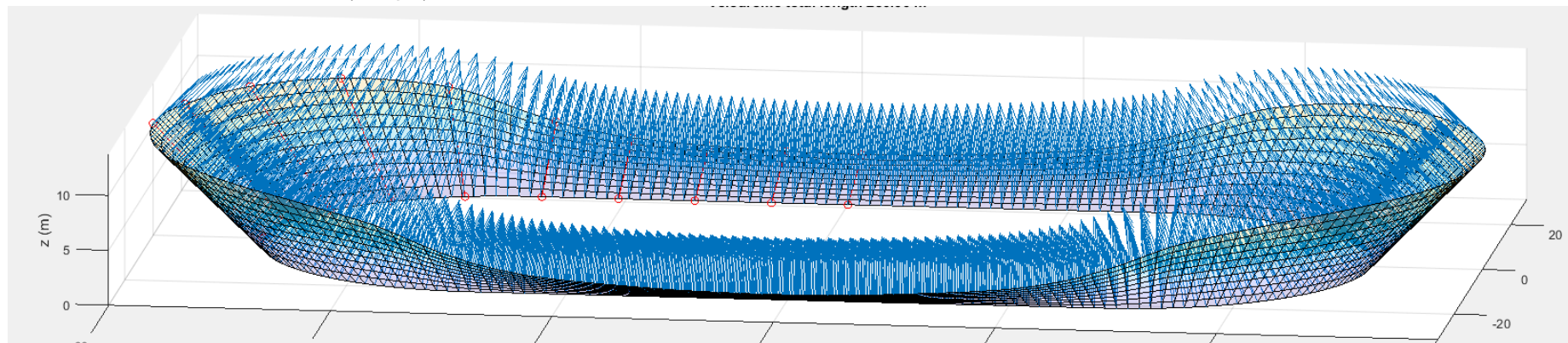
点群データとモデルを合致させるspline制御点のパラメータを求める  
(Optimization Toolbox™)

# 屋内トラックモデル モデル同定

$$z = \text{altitude}(x, y)$$



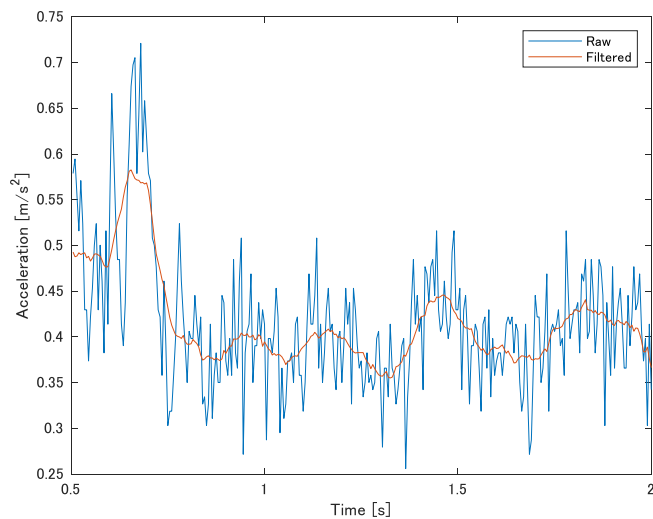
$$\mathbf{n} = \text{Calc\_normal}(x, y)$$



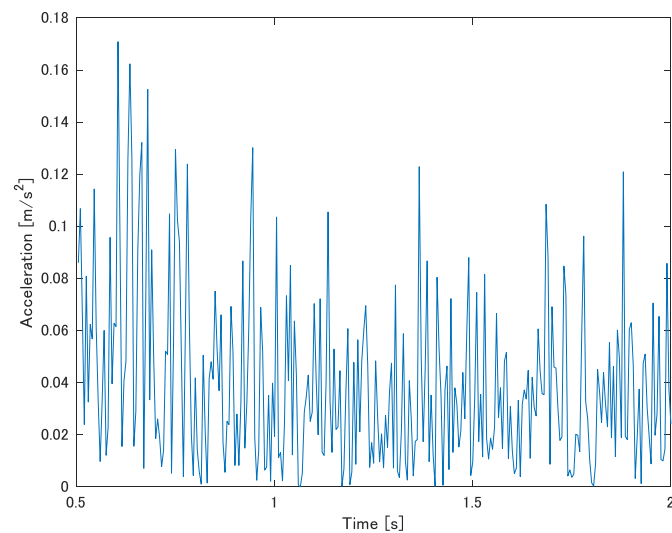
各位置におけるroll,pitch,yawに変換

# センサーノイズの見積もり

計測開始時に自転車を静止させる



生波形 - LPF

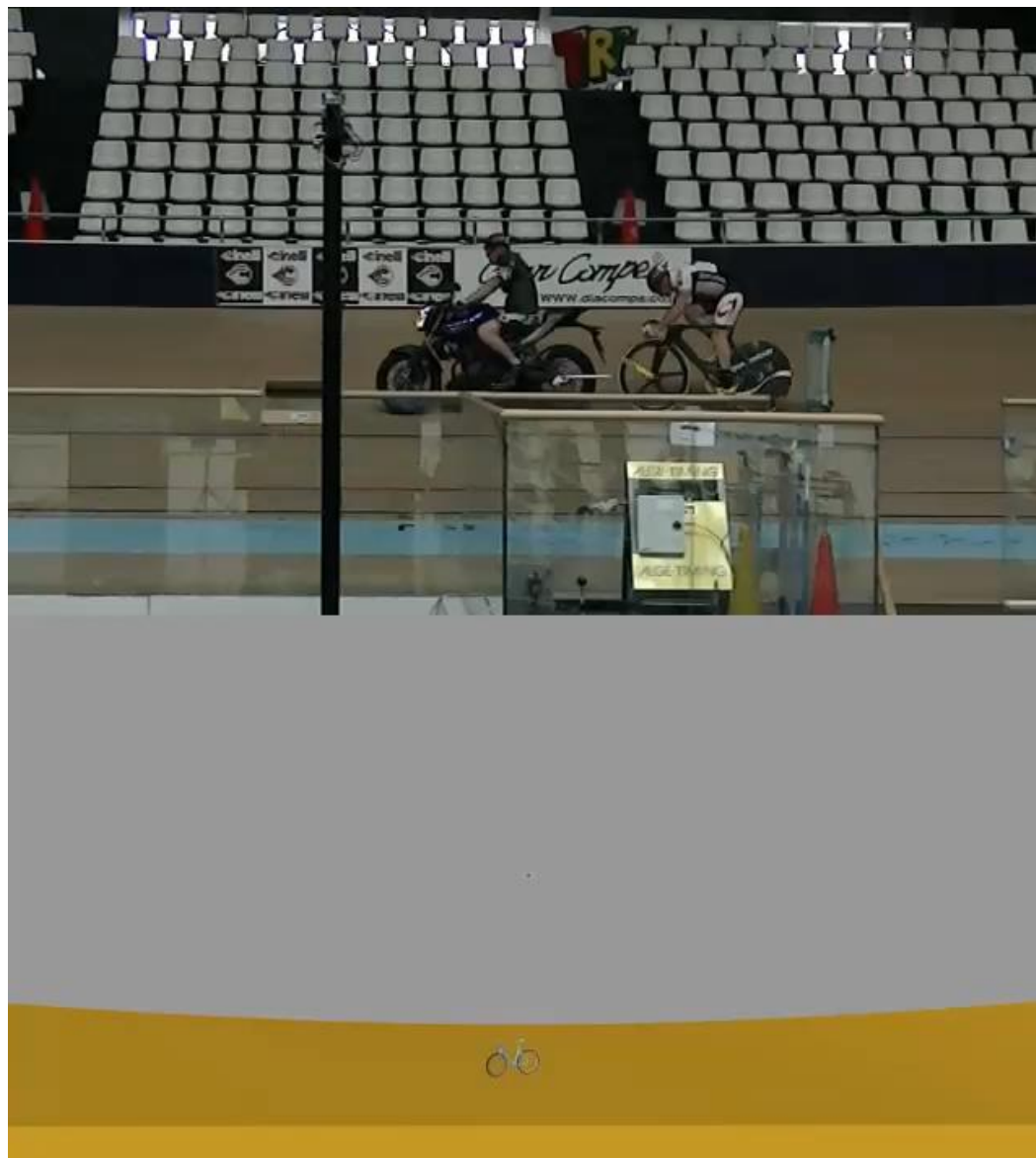


$\sigma = 0.05$  [m/s<sup>2</sup>]程度

1. ブリヂストンについて
2. 開発背景
  1. 競技用自転車の開発について
  2. 技術課題
3. 方法論(非線形カルマンフィルタ)
  1. 自転車の運動学モデル
  2. 路面モデル
4. 結果
  1. 解析結果
  2. 苦労話

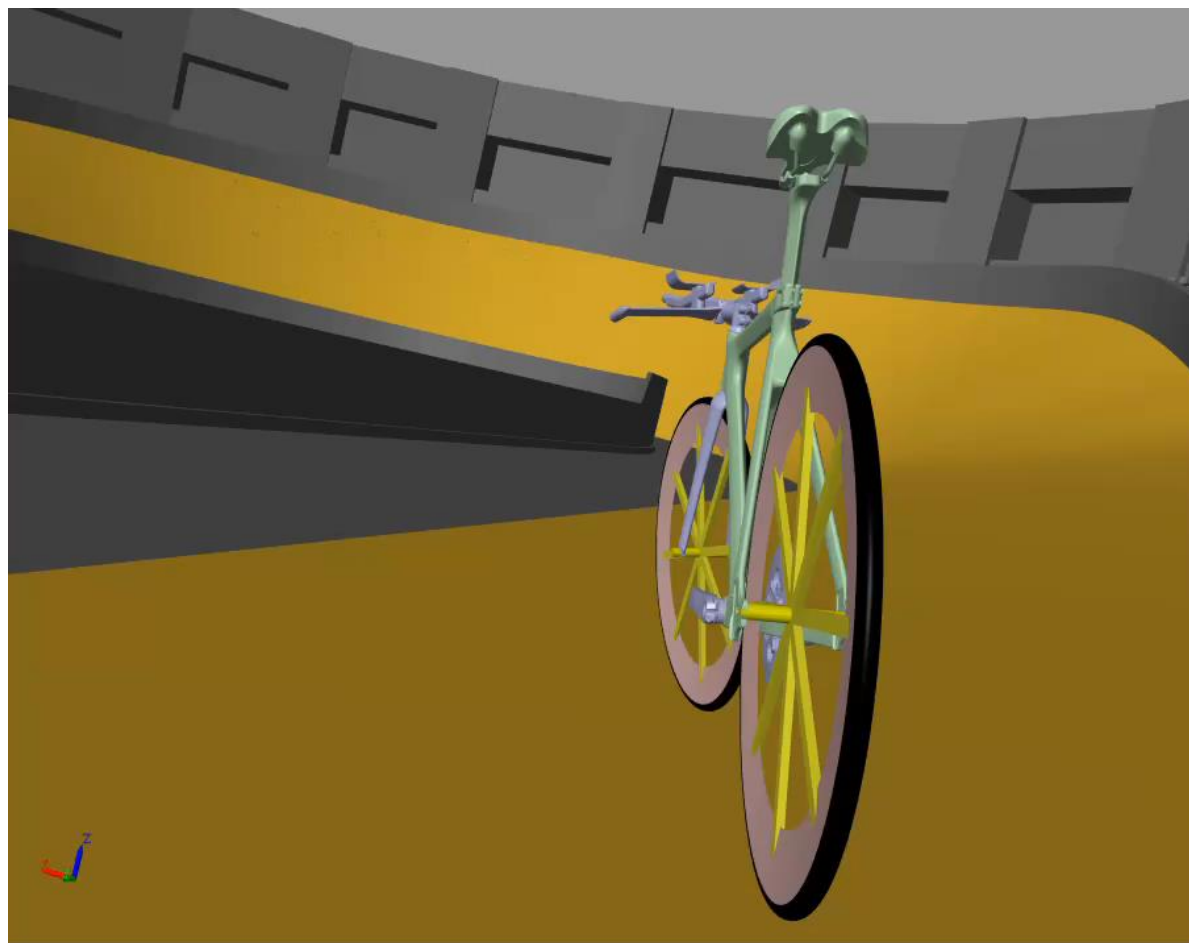


## 4.2 実走行データでの検証



推定した動作データを 自転車開発に活用中！

## 4.2 実走行データでの検証



推定した動作データを 自転車開発に活用中！

## 余談：センサ取付位置（向き）の補正

センサの取付位置も 正確にモデル化 、、、したいが



しかし、現場ではもろもろの理由で、ゆつくりとセンサ位置を計測している余裕がない

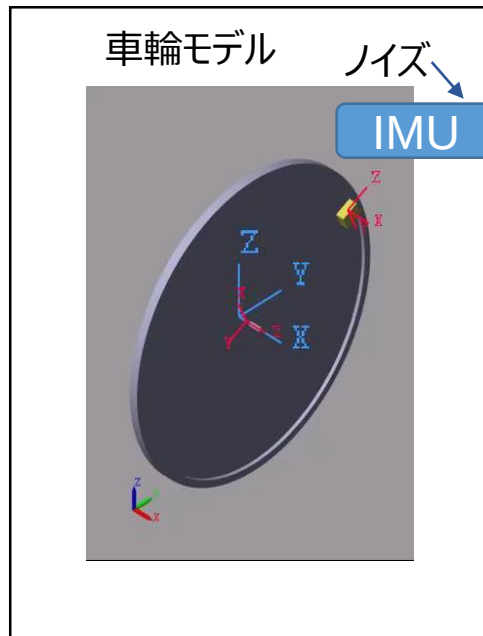
センサの取付位置（向きも含む）を後処理でなんとかできないか？？

## 余談２：センサ取付位置（向き）の補正

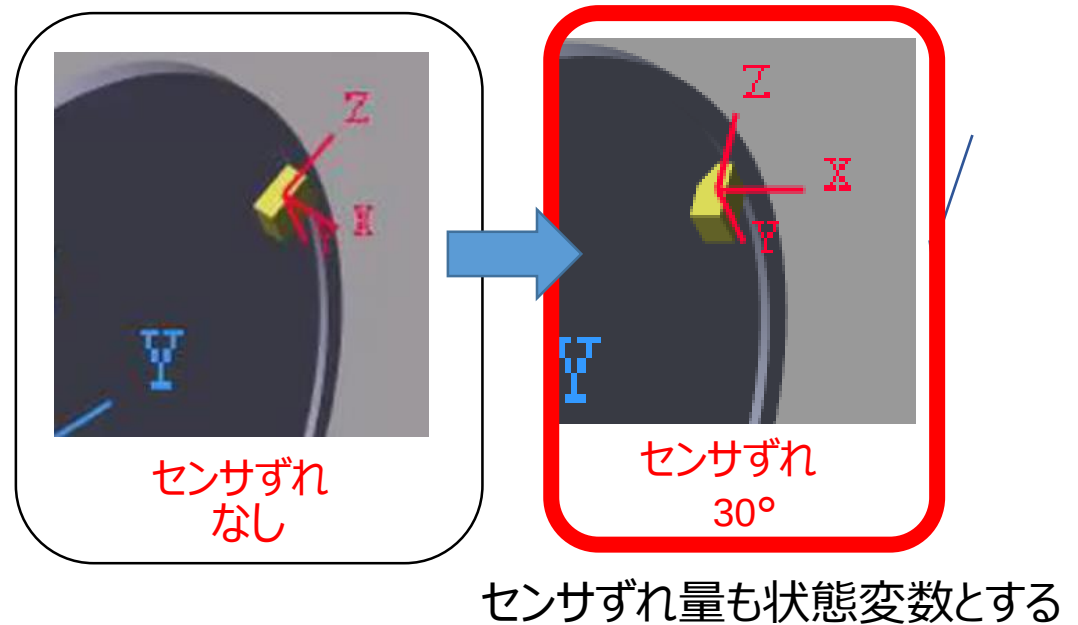
教科書には「“非線形カルマンフィルタ”を用いれば、パラメータ推定も可能」と書いてある

### 簡易モデル概要

1軸回転するホイールの角速度を、ホイールに取り付けられたセンサ情報から推定する



### センサずれ推定と状態の同時推定



## 余談2：センサ取付位置（向き）の補正

センサずれ 30°

初期位置ずらし

センサずれ 30°

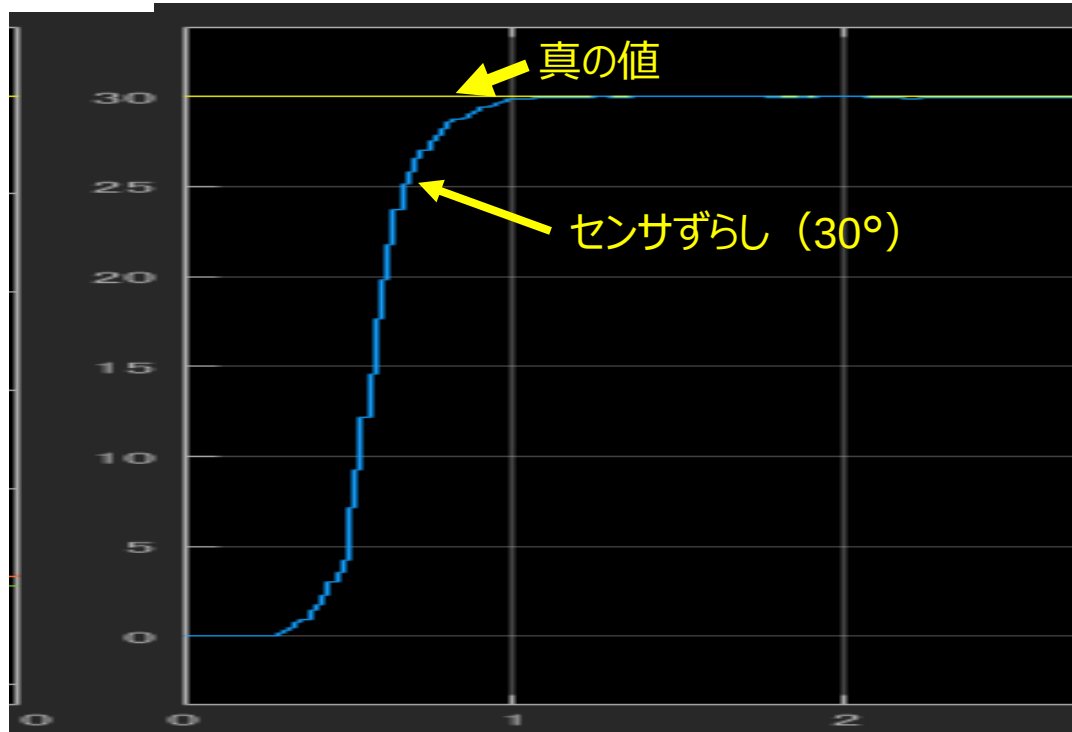
モデル : ukf\_demo\_linear2.slx

センサずれ 量を状態として追加

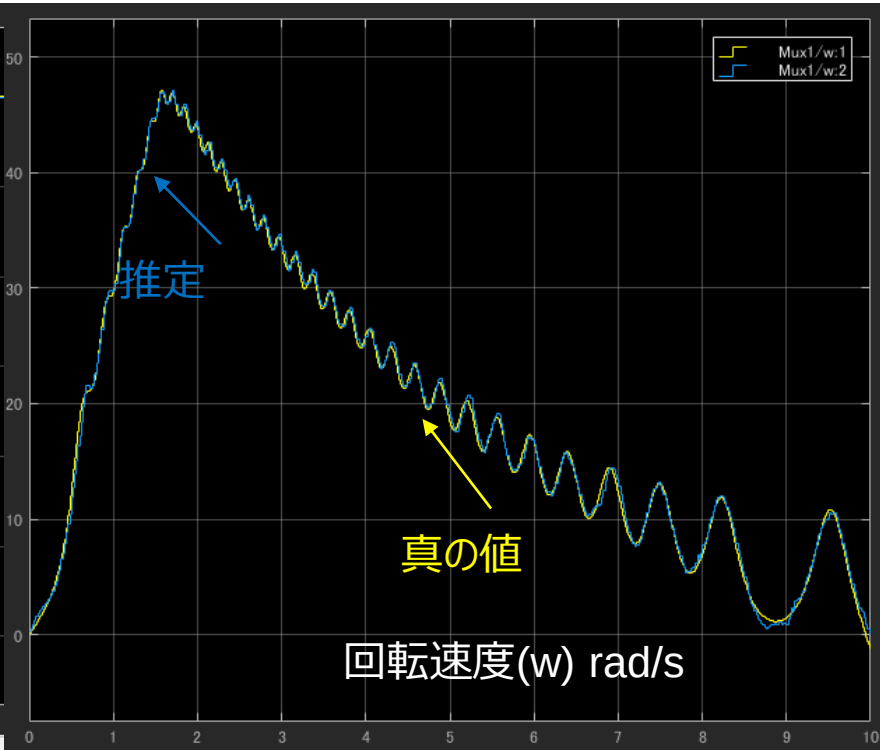
状態遷移/観測関数 : dyn\_model\_2.slx

## 余談 2 : センサ取付位置（向き）の補正

状態変数：センサずれ角度



状態変数：回転速度

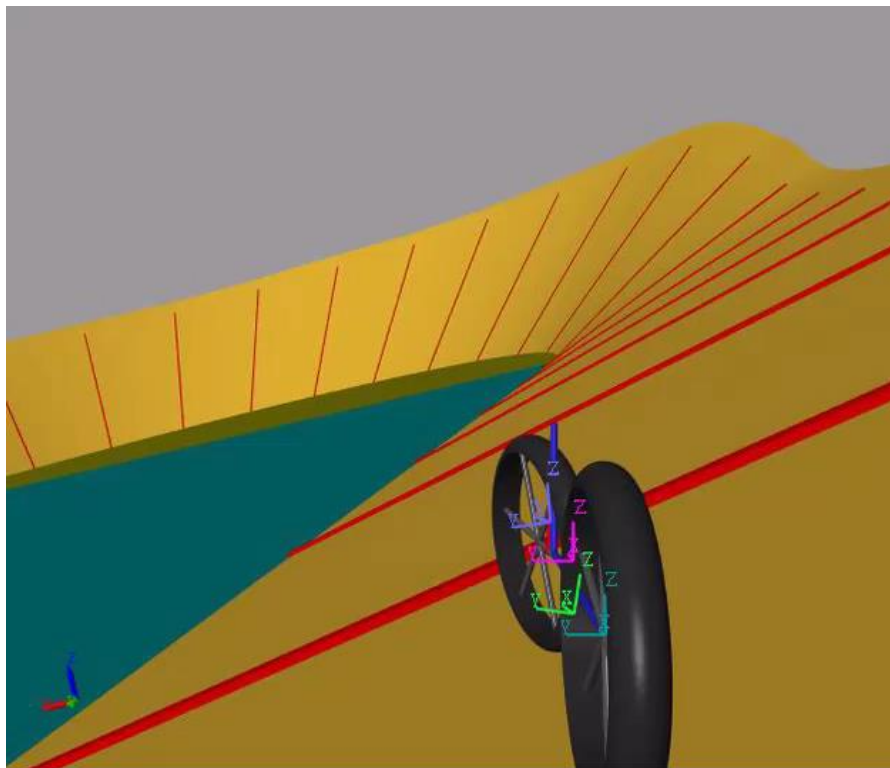


サンプルベース T=10.000

センサ取付位置の補正も原理的には可能！

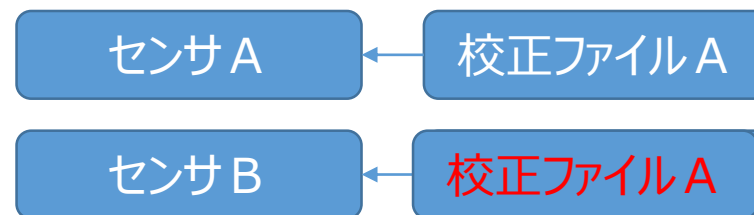
## 余談 2 : 苦労話

計算が発散！



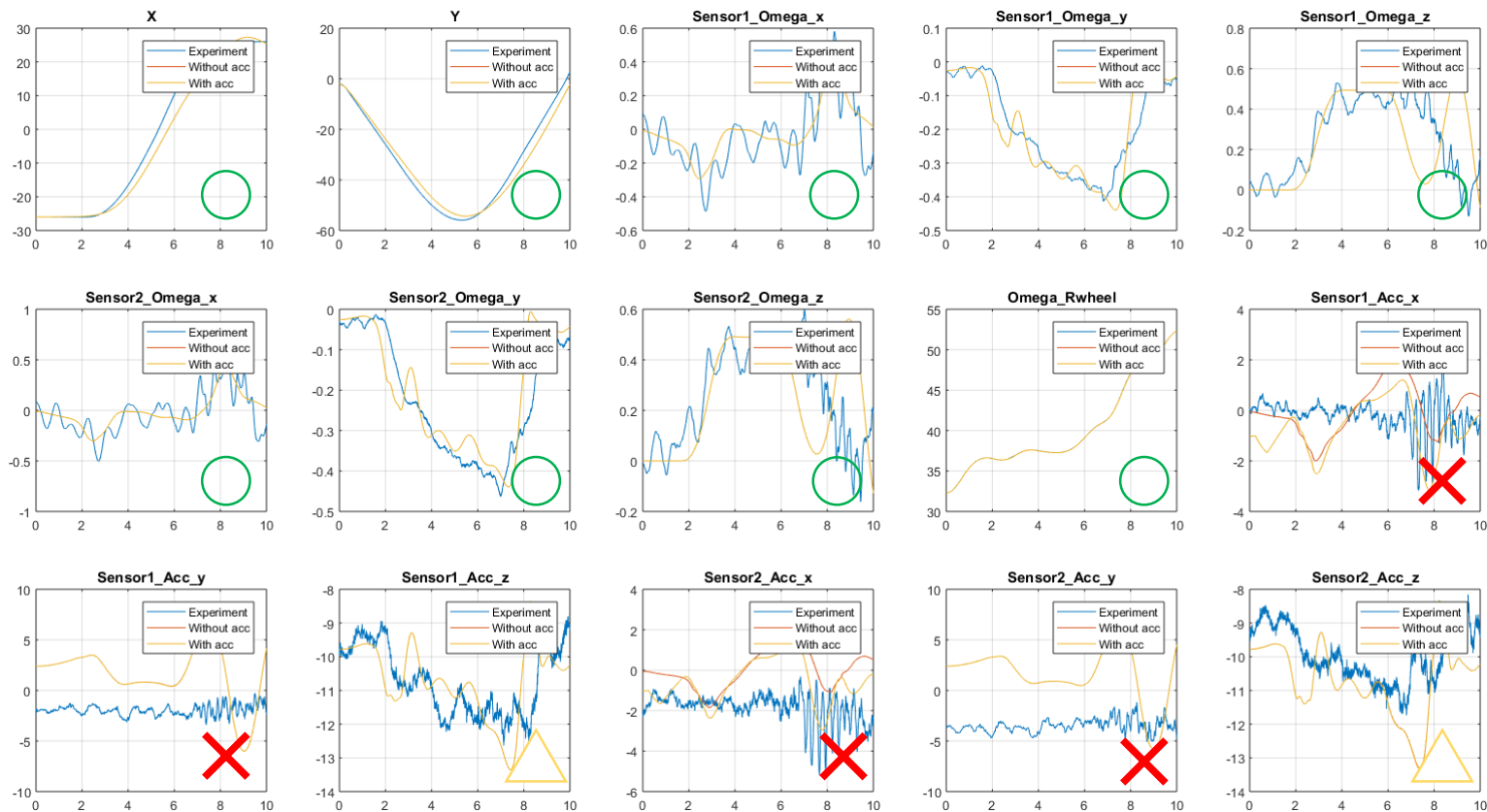
何が原因かわからない

系が複雑になると、データの処理でケアレスミスが起こることがしばしば。



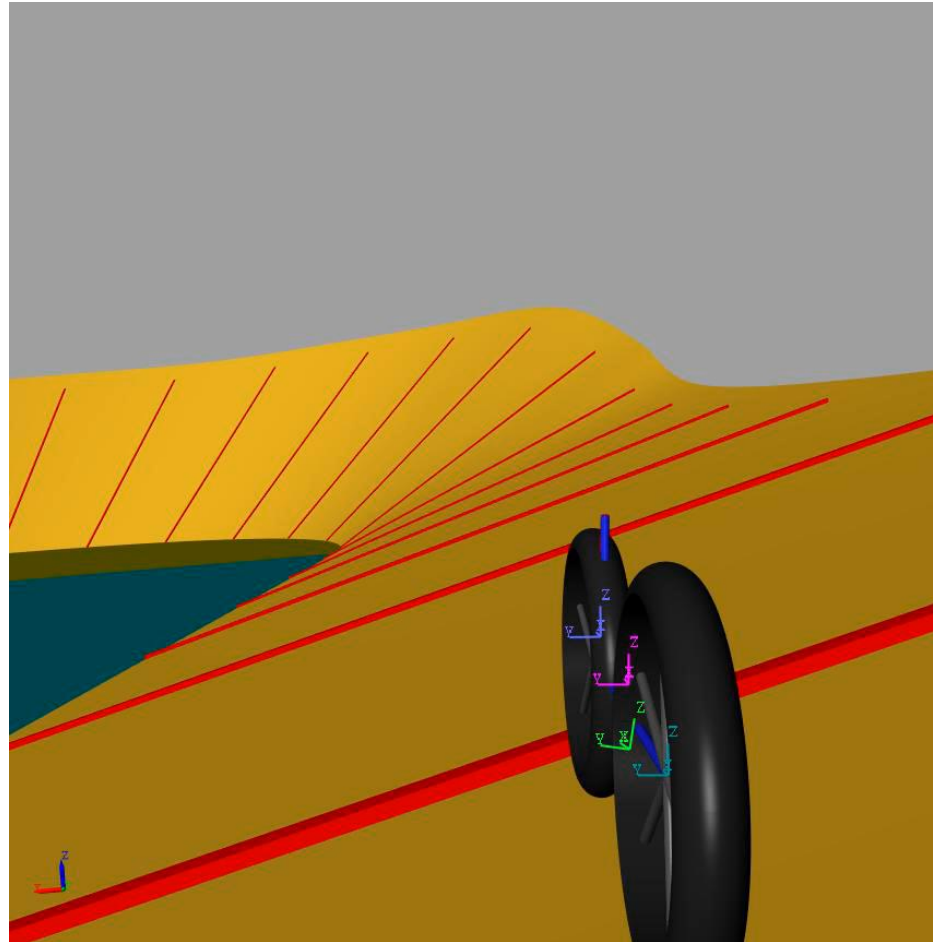
センサ信号に定常的にオフセットが乗ってしまった

## 余談 2 : 苦労話 : 加工後データとシミュレーションデータの比較





## 苦勞話：生データと加工後データの比較



ご清聴ありがとうございました。

