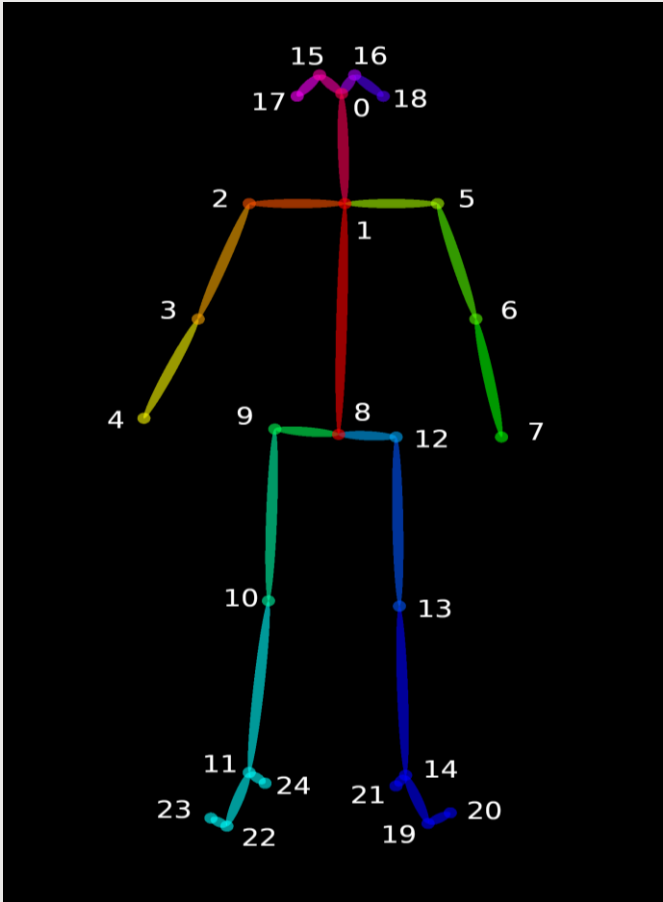


2025/5/18

# コンピュータビジョンを用いた 歩行解析

東京理科大学大学院  
先進工学研究科 電子システム工学専攻  
相川研究室  
中崎 彰太

## OpenPoseのキーポイント



関節	キーポイント	座標
首	1	$(N_t^{DoTC}, N_t^{DoHC})$
骨盤	8	$(MH_t^{DoTC}, MH_t^{DoHC})$
股	9・12	$(HI_t^{DoTC}, HI_t^{DoHC})$
膝	10・13	$(K_t^{DoTC}, K_t^{DoHC})$
足首	11・14	$(A_t^{DoTC}, A_t^{DoHC})$
爪先	22・19	$(T_t^{DoTC}, T_t^{DoHC})$
踵	24・21	$(HE_t^{DoTC}, HE_t^{DoHC})$

***DoTC: Direction of Travel Coordinate***  
***DoHC: Direction of Height Coordinate***

## 二階差分カルマンフィルタの構築

## 状態方程式

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{F}\mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{b}u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{t-1} \\ v_{t-1} \\ v_{t-2} \\ x_{t-1} \\ x_{t-2} \\ x_{t-3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

## 観測方程式

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{H}\mathbf{X}_t + \mathbf{b}w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_t \\ v_t \\ v_{t-1} \\ x_t \\ x_{t-1} \\ x_{t-2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} w$$

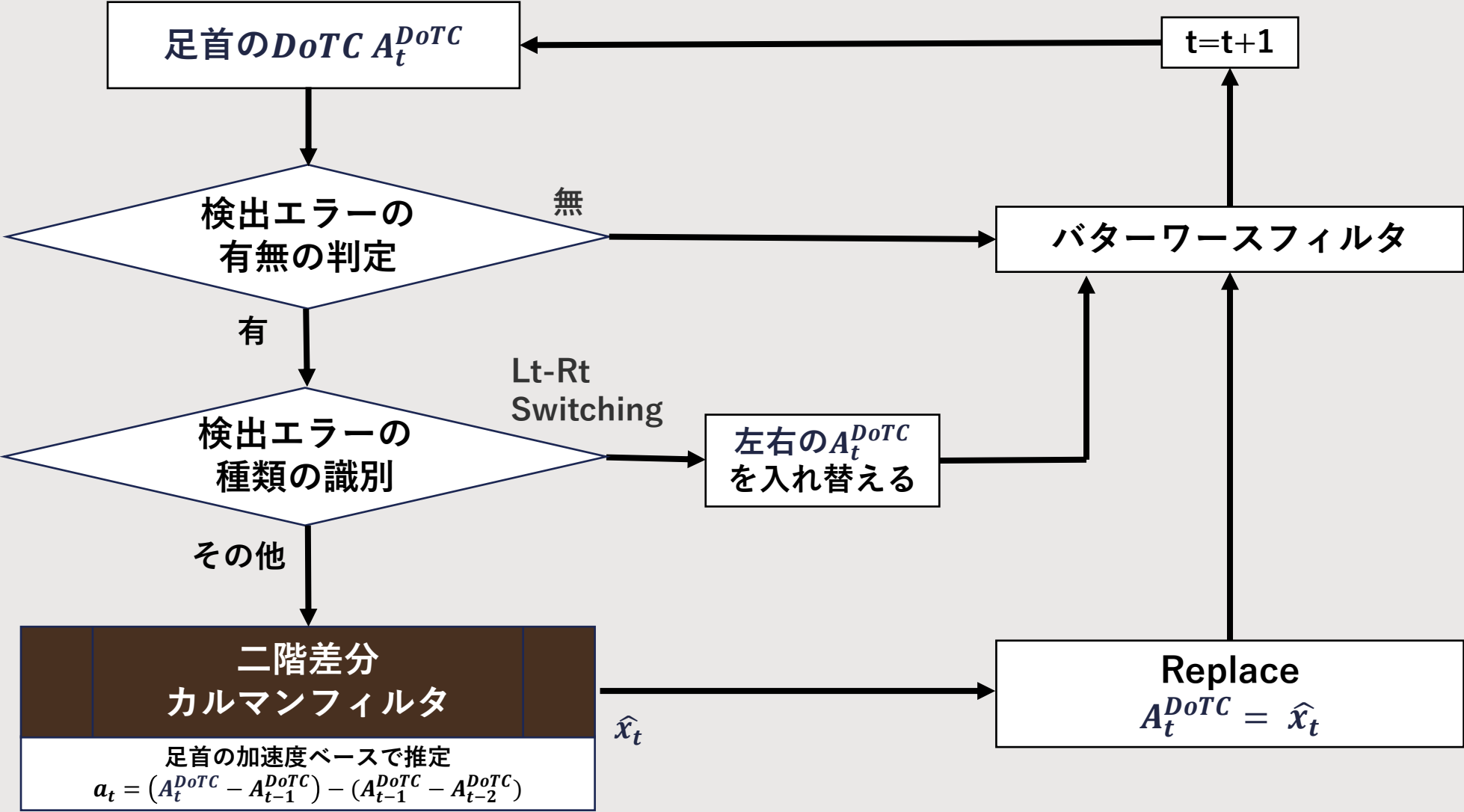
状態ベクトル: $\mathbf{X}_t$  観測ベクトル: $\mathbf{Y}_t$  システム行列: $\mathbf{F}$  観測行列: $\mathbf{H}$

状態ノイズ: $u$  (平均0,分散 $\sigma_u^2$ ) 観測ノイズ: $w$  (平均0,分散 $\sigma_w^2$ )

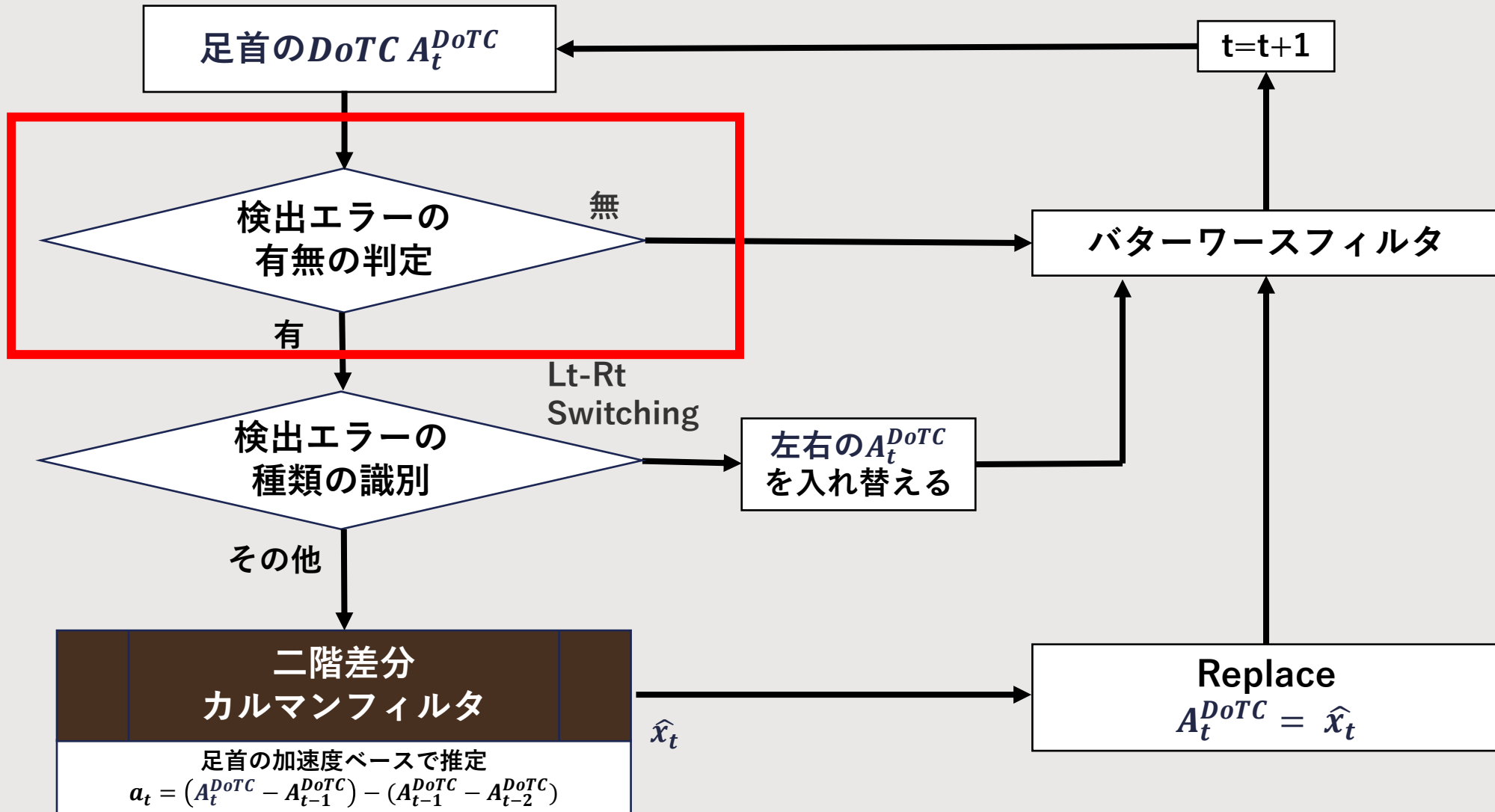
時刻: $t$  加速度: $a_t$  速度: $v_t$  位置: $x_t$

$\sigma_u^2, \sigma_w^2$ の値はニュートン・ラフソン法を用いた反復計算により,拡散対数尤度を最大化するように決定している.

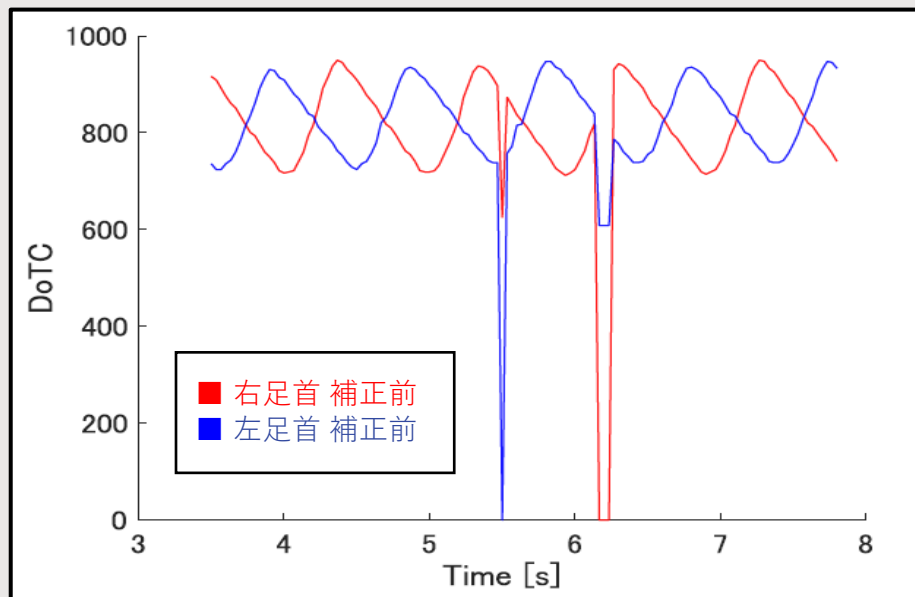
足首のDoTCのシステム概要



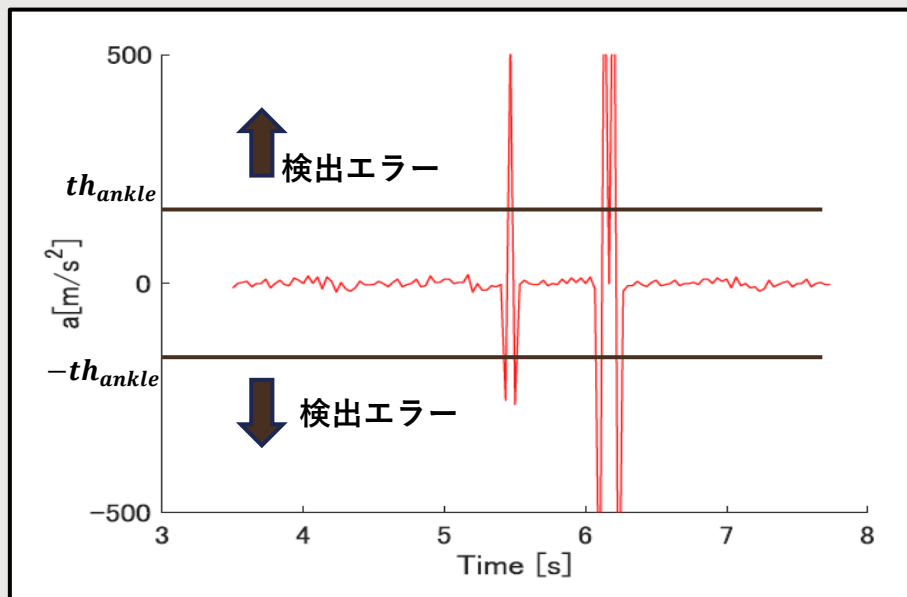
## 足首のDoTCのシステム概要



## 足首のDoTC



## 右足首の加速度 $a_t$



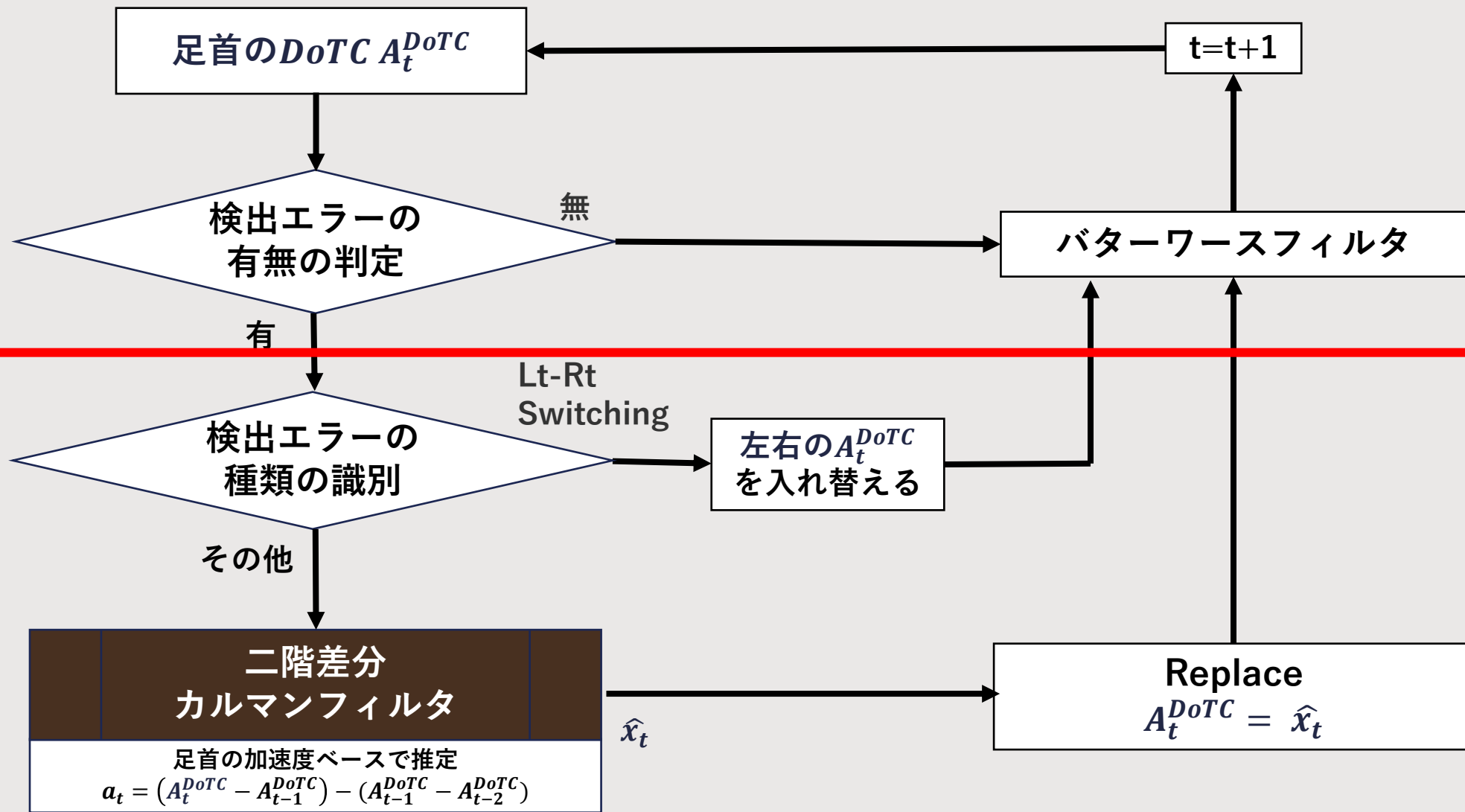
If  $|a_t| > th_{ankle}$



検出エラー有り

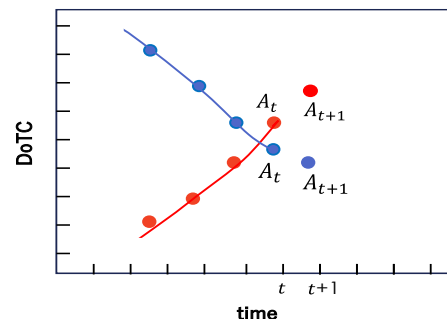
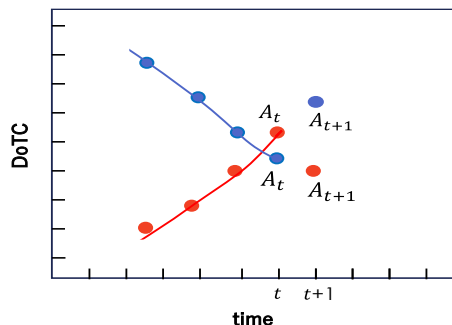
この操作を左右の足首に対して同時に行う

## 足首のDoTCのシステム概要



両足首にエラーがある場合

「Lt-Rt Switching」と仮定し、**左右の座標を入れ替える**



● 右足首  
● 左足首

入れ替え後の座標から加速度を算出

加速度 $a_t$ と閾値 $th_{ankle}$ と比較し、検出エラーの有無を再度判定

Lt & Rt No error

「Lt-Rt Switching」

入れ替えたままにする

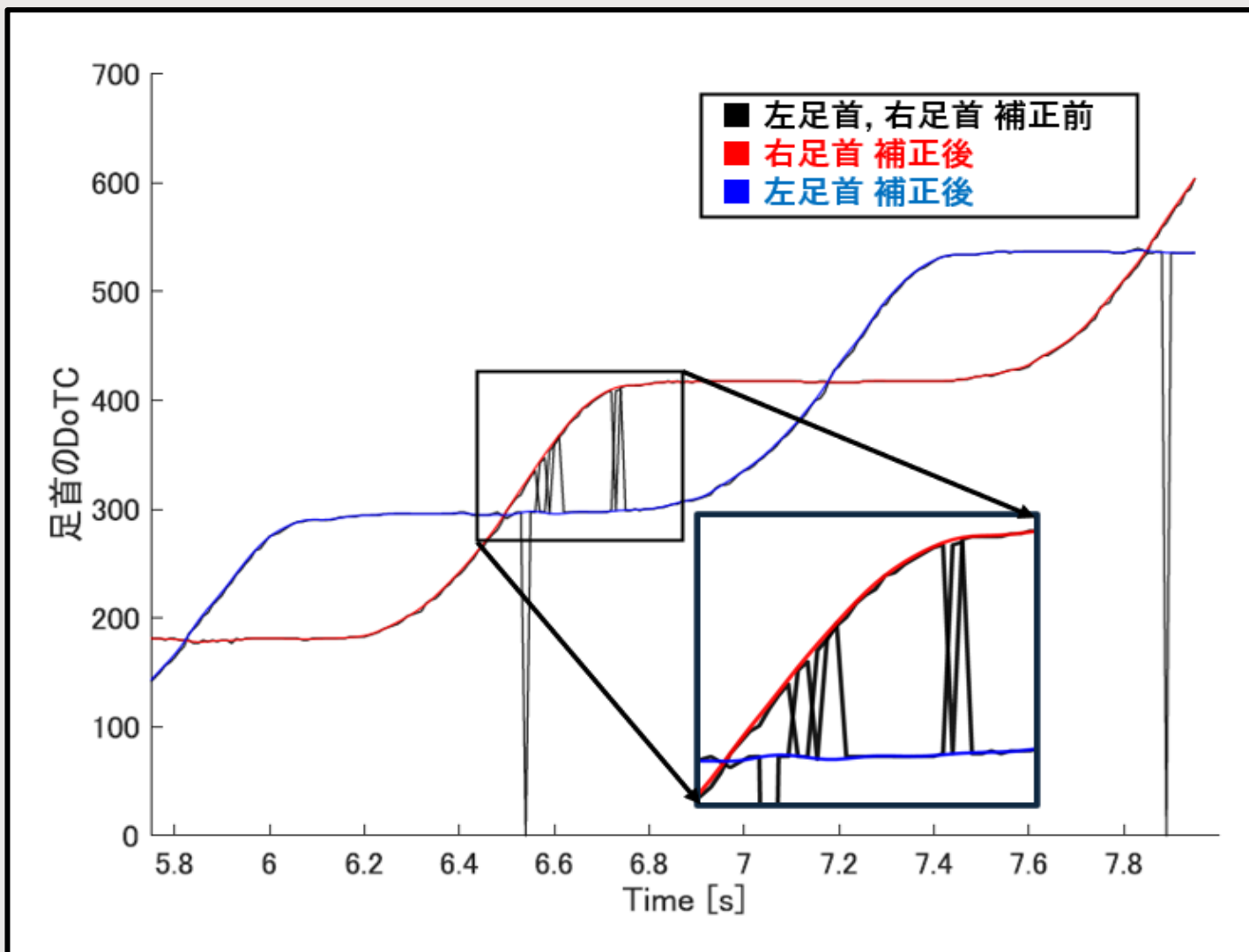
Lt & Rt error  
Lt or Rt error

「Misdetetection」 or 「Undetected」

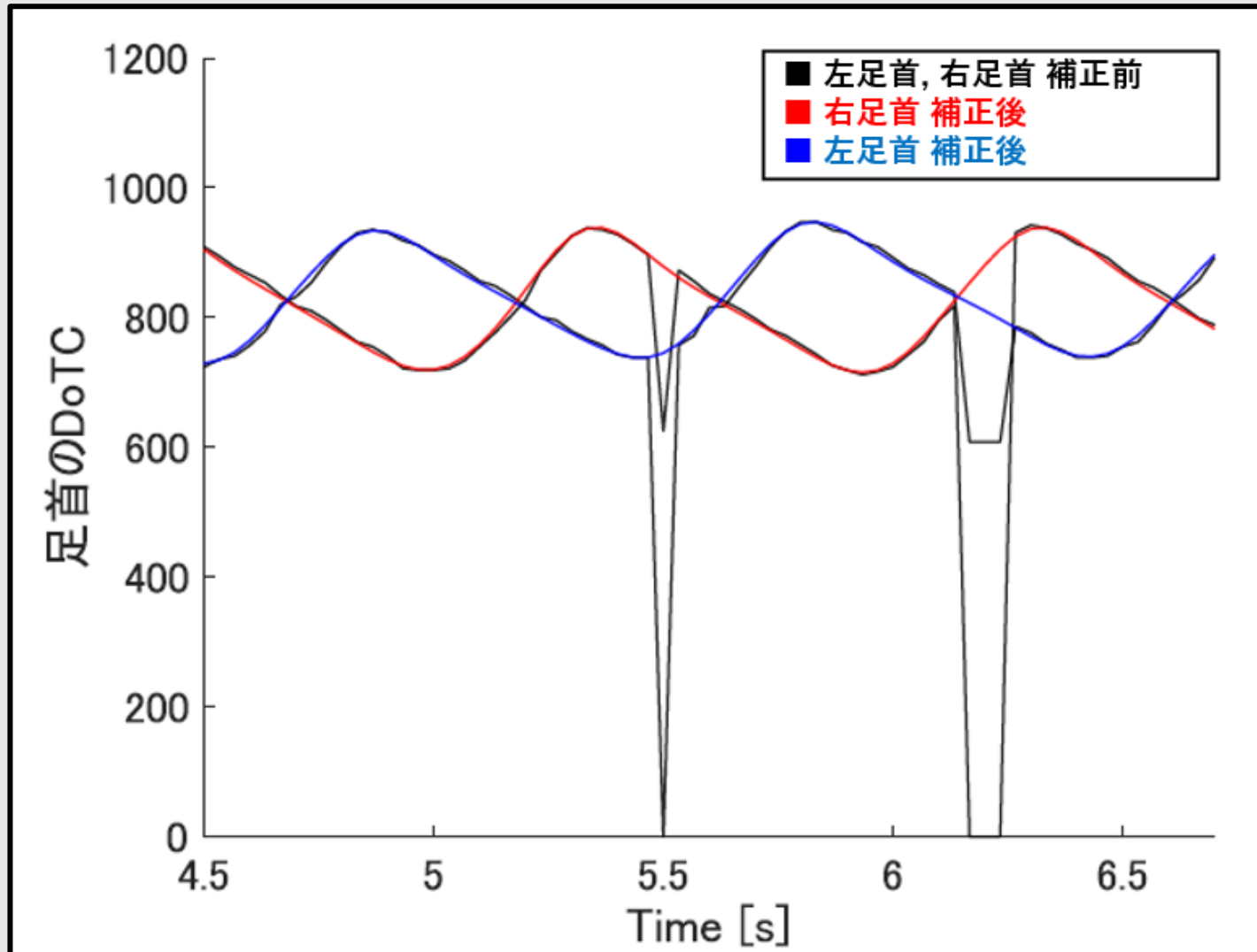
カルマンフィルタによる予測値を真値にする



## 通常歩行

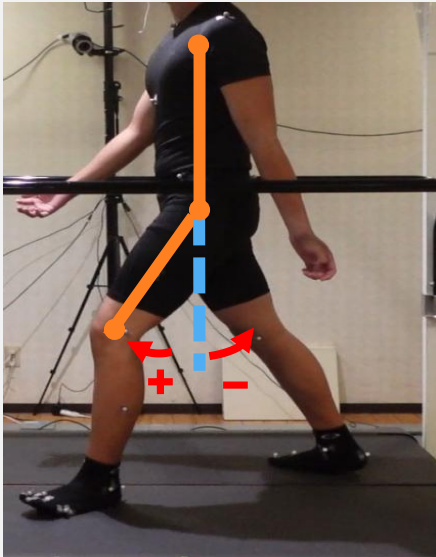


## 通常歩行



*DoTC: Direction of Travel Coordinate*

## 提案法と3DMCで取得した股関節角度



### 股関節角度

股関節角度 $\theta_{hip}$   
→体幹と大腿のなす角

算出時に使用する座標  
→首,骨盤,膝

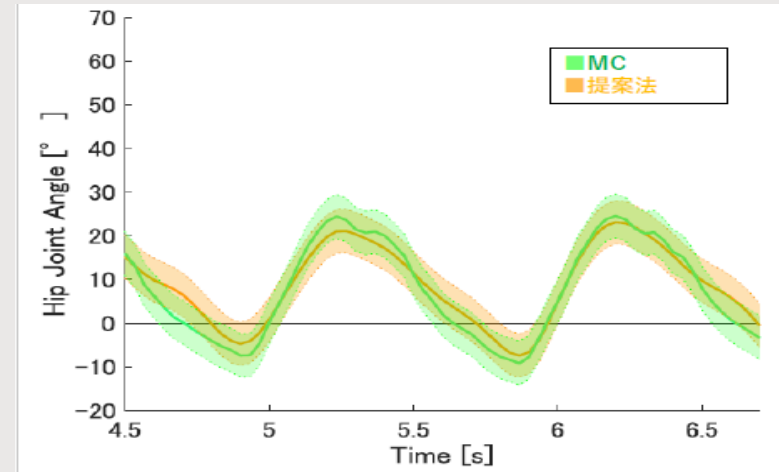
$MAE$  : 平均絶対誤差

$y_i$  : 提案法の股関節角度

$x_i$  : 3DMCで取得した股関節角度

$n$  : データの総数

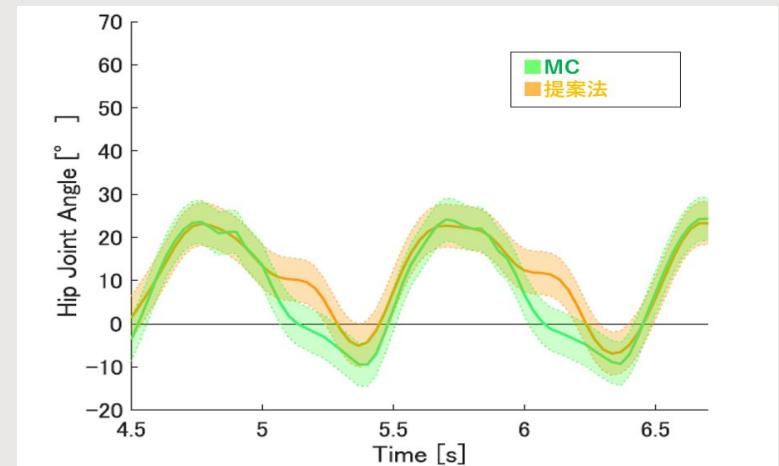
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$



右脚の股関節角度

$MAE = 2.3^\circ$

↑ 屈曲  
↓ 伸展



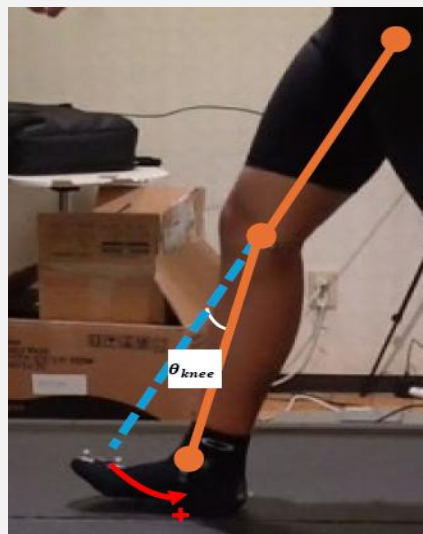
左脚の股関節角度

$MAE = 3.8^\circ$

↑ 屈曲  
↓ 伸展

どちらの場合も  $MAE \leq 5^\circ$  であり, 臨床試験での応用条件を満たしている<sup>[1]</sup>

## 提案法と3DMCで取得した膝関節角度



### 膝関節角度

膝関節角度 $\theta_{knee}$   
→大腿の長軸と  
下腿のなす角

算出時に使用する座標  
→股, 膝, 足首

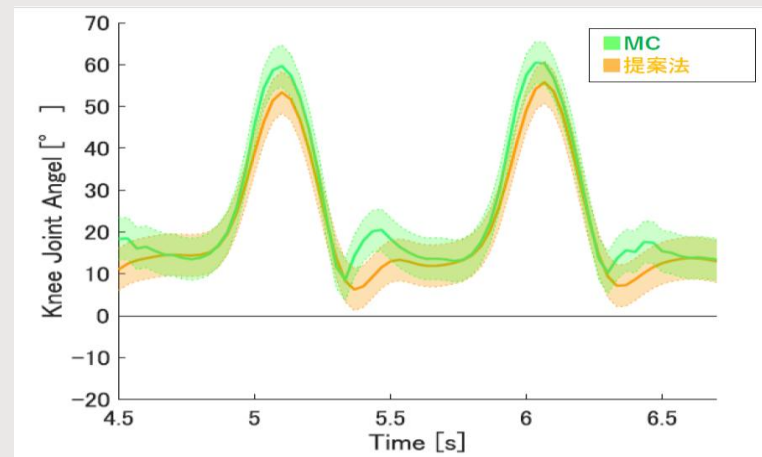
$MAE$  : 平均絶対誤差

$y_i$  : 提案法の膝関節角度

$x_i$  : 3DMCで取得した膝関節角度

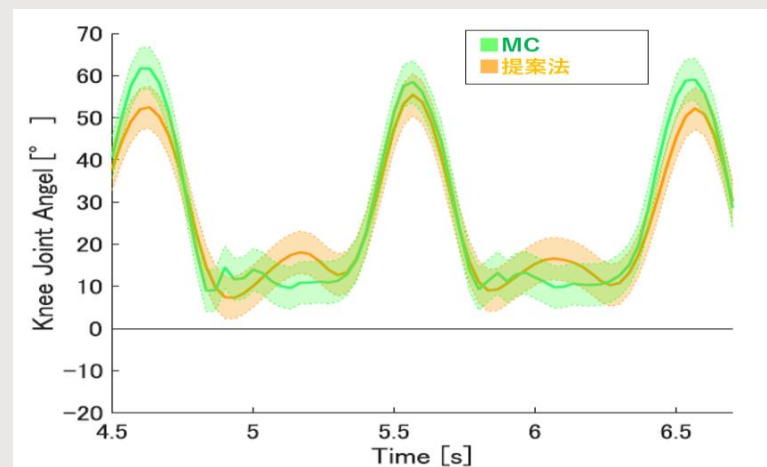
$n$  : データの総数

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$



右脚の膝関節角度

$MAE = 3.6^\circ$



左脚の膝関節角度

$MAE = 3.8^\circ$

どちらの場合も  $MAE \leq 5^\circ$  であり, 臨床試験での応用条件を満たしている<sup>[1]</sup>

## 提案法と3DMCで取得した足関節角度



### 足関節角度

足関節角度 $\theta_{ankle}$   
 →大腿の長軸と  
 足部の長軸のなす角  
 ※下腿と足部のなす角が90度の時に  
 足関節角度は0度と定義

算出時に使用する座標  
 →膝, 足首, 踵, 爪先

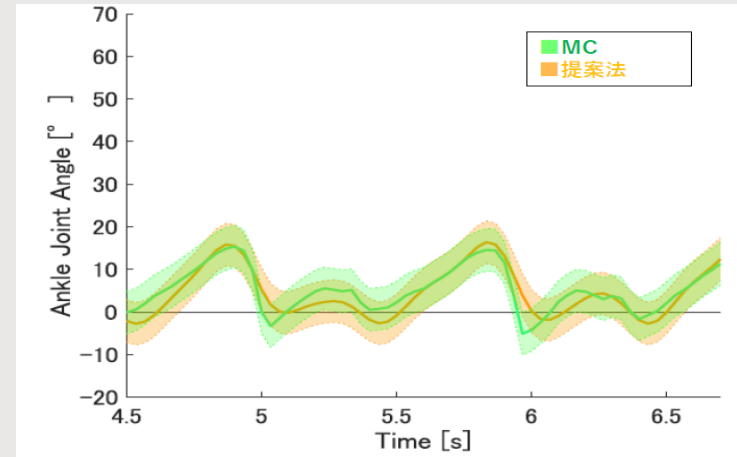
$MAE$  : 平均絶対誤差

$y_i$  : 提案法の足関節角度

$x_i$  : 3DMCで取得した足関節角度

$n$  : データの総数

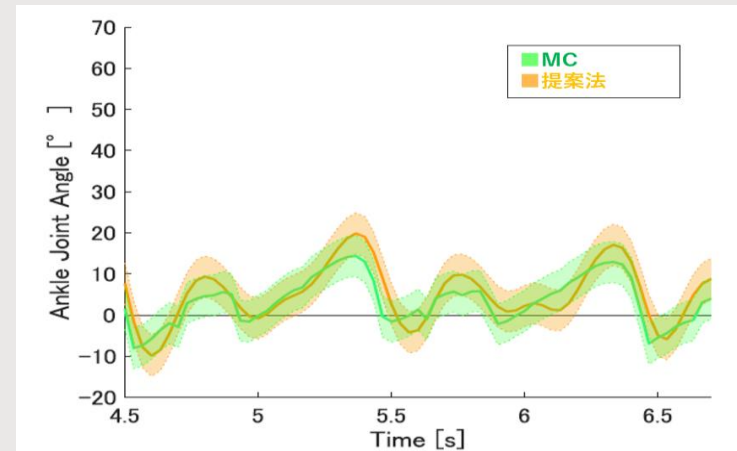
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$



↑ 背屈  
↓ 底屈

右脚の足関節角度

$MAE = 2.0^\circ$



↑ 背屈  
↓ 底屈

左脚の足関節角度

$MAE = 3.0^\circ$

どちらの場合も  $MAE \leq 5^\circ$  であり, 臨床試験での応用条件を満たしている<sup>[1]</sup>

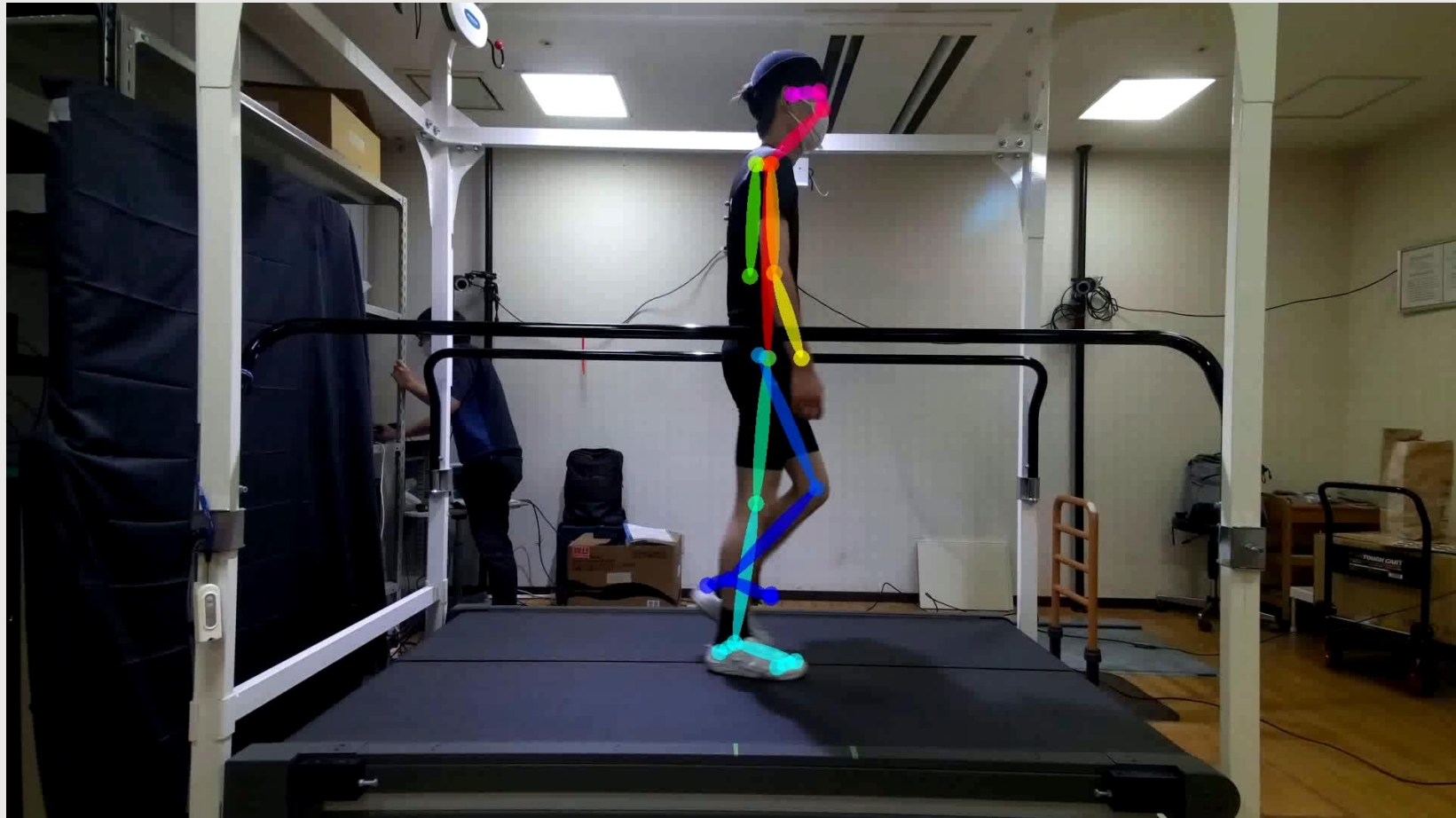
## 結論

- ・ 低フレームレート条件下でも、臨床試験での応用条件を満たす歩行解析法を提案した
- ・ トレッドミルの上を歩行する動画にも適応できた
- ・ リアルタイム処理が可能
- ・ 安価なカメラでも解析できることが期待できる

## 今後の展望

- ・ 検出エラーを判定する閾値を動画ごとに変更が不要なアルゴリズムの実装
- ・ 実際に患者の異常歩行動画で検証

10月16日・病院での撮影データについて



\* 0.5倍速

4.0秒(本動画は8.0秒)に大きな検出エラー



# 結果 Azure Kinect

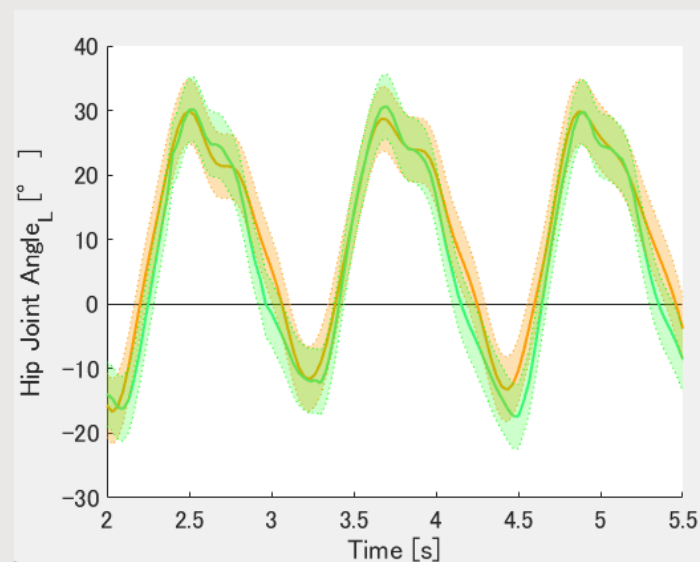
#016

## 計測条件

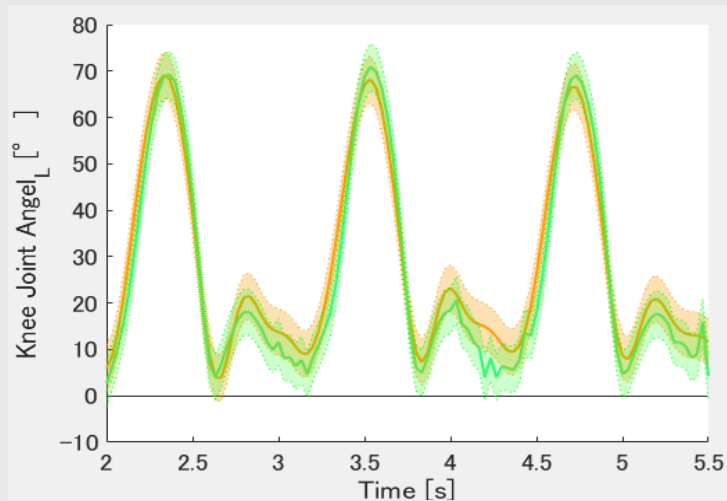
フレームレート : 30fps  
解像度 : 1920×1080pixel  
歩行: 通常  
速度: 通常  
脚: 左

■ MC  
■ 提案法

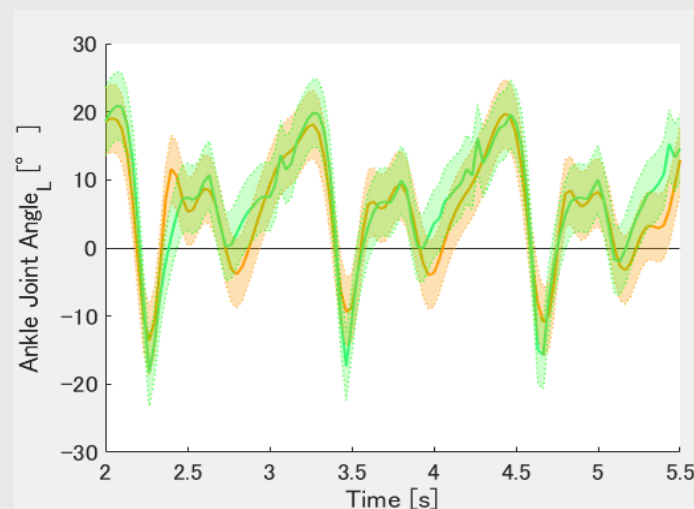
股関節角度 MAE=3.2°



膝関節角度 MAE=3.8°



足関節角度 MAE=2.8°

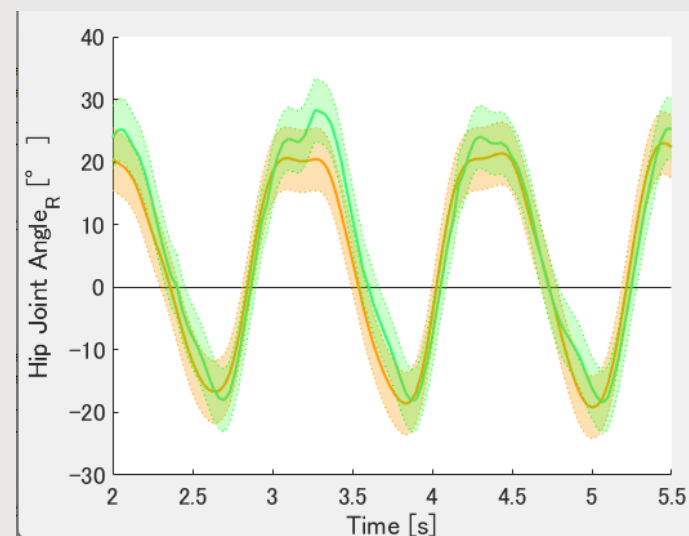


## 計測条件

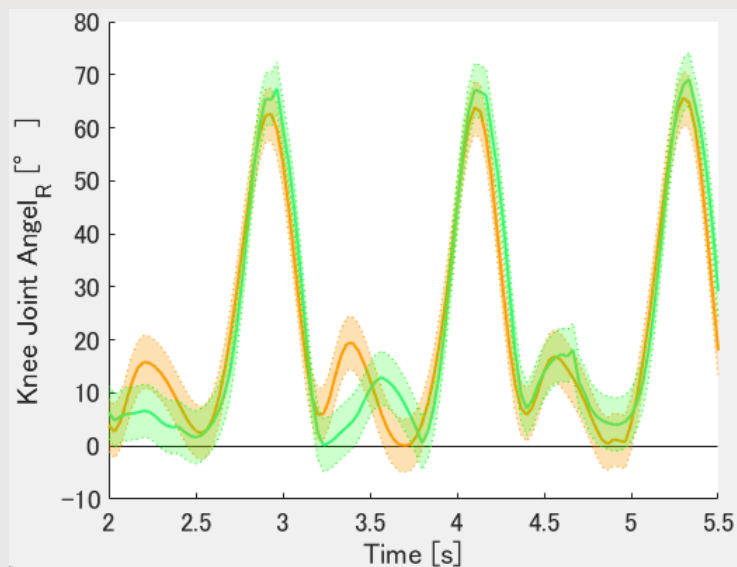
フレームレート : 30fps  
解像度 : 1920×1080pixel  
歩行: 通常  
速度: 通常  
脚: 右

■ MC  
■ 提案法

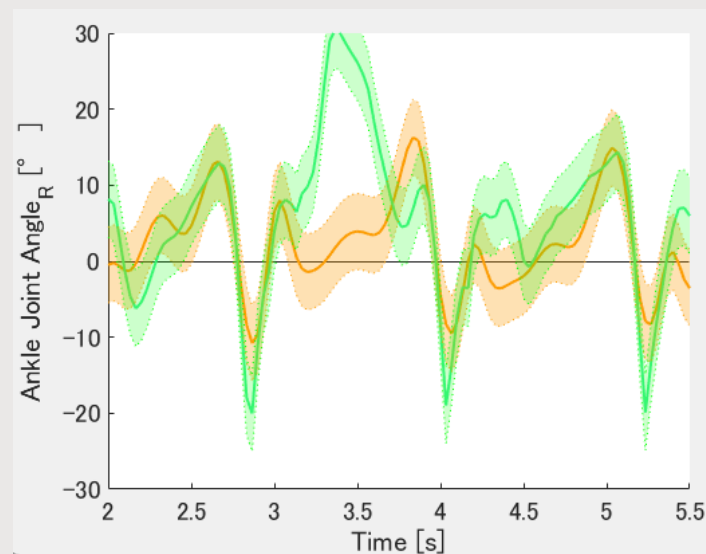
## 股関節角度 MAE=3.5°



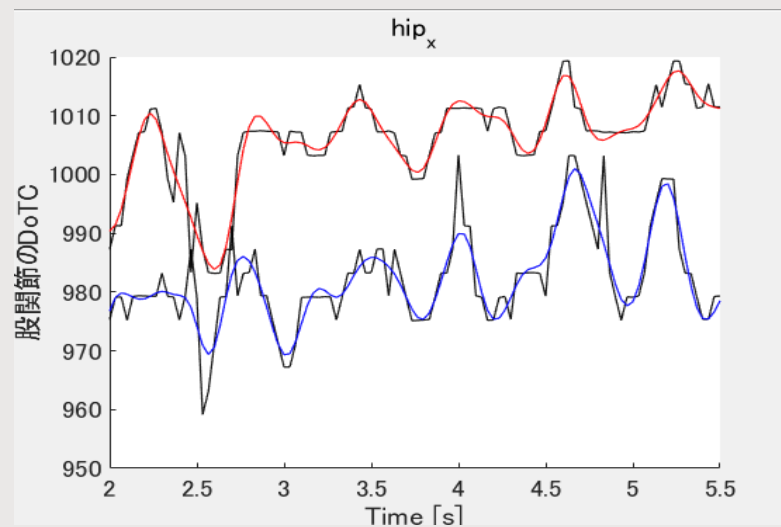
## 膝関節角度 MAE=5.0°



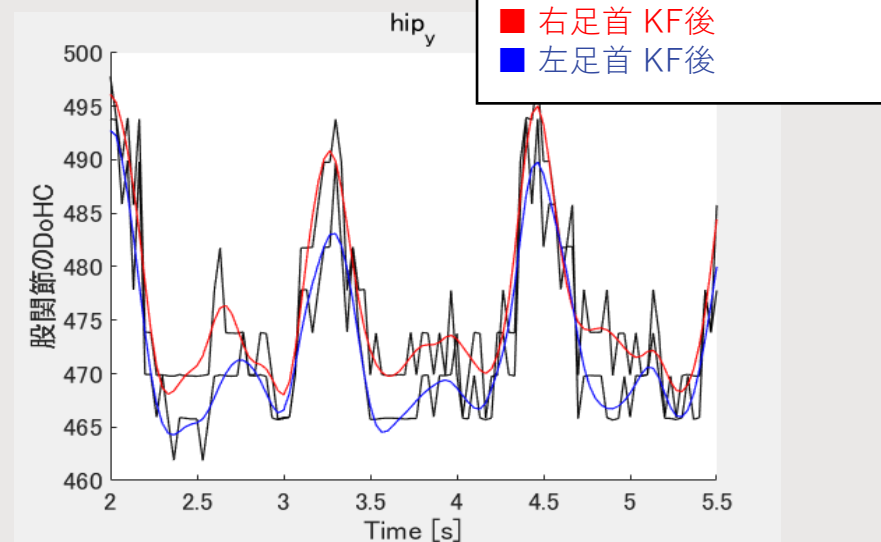
## 足関節角度 MAE=6.2°



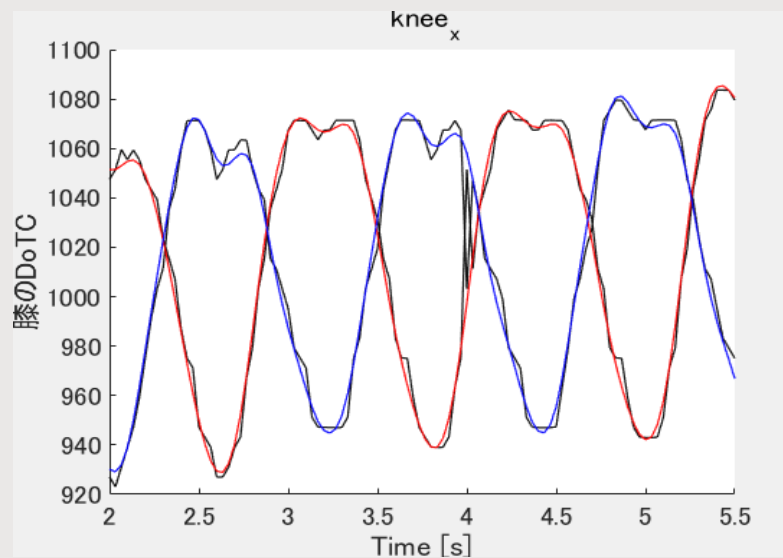
## 股関節\_DoTC



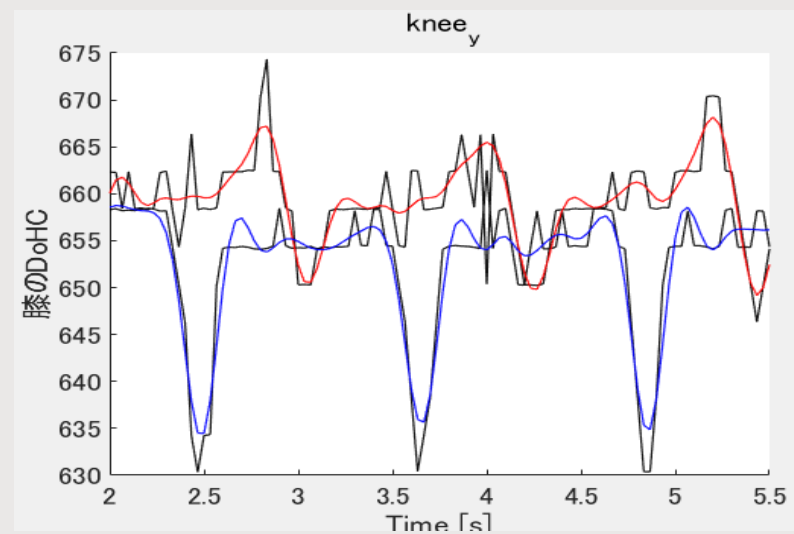
## 股関節\_DoHC



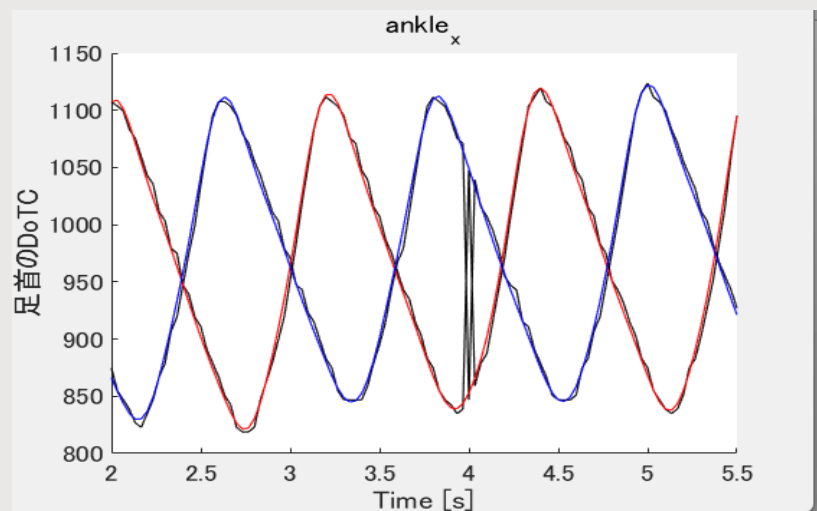
## 膝\_DoTC



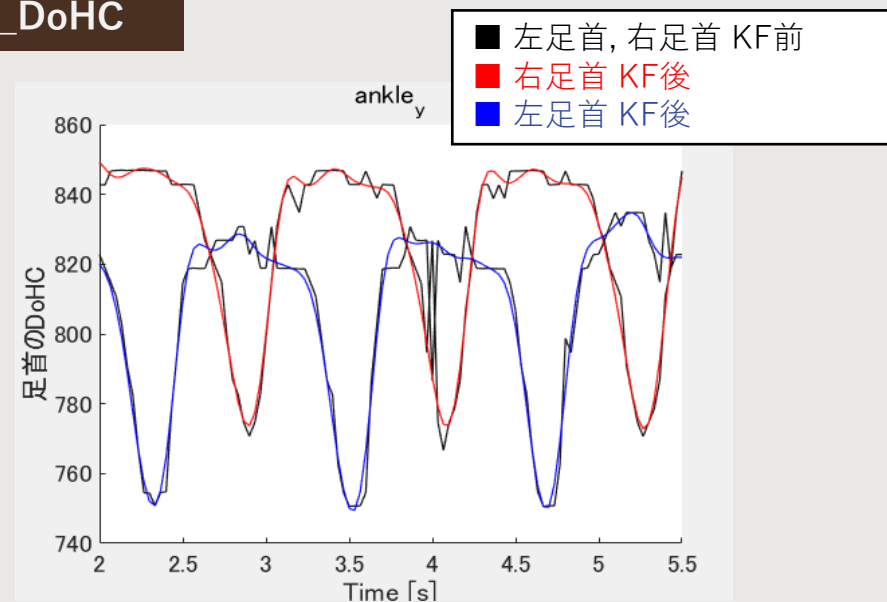
## 膝\_DoHC



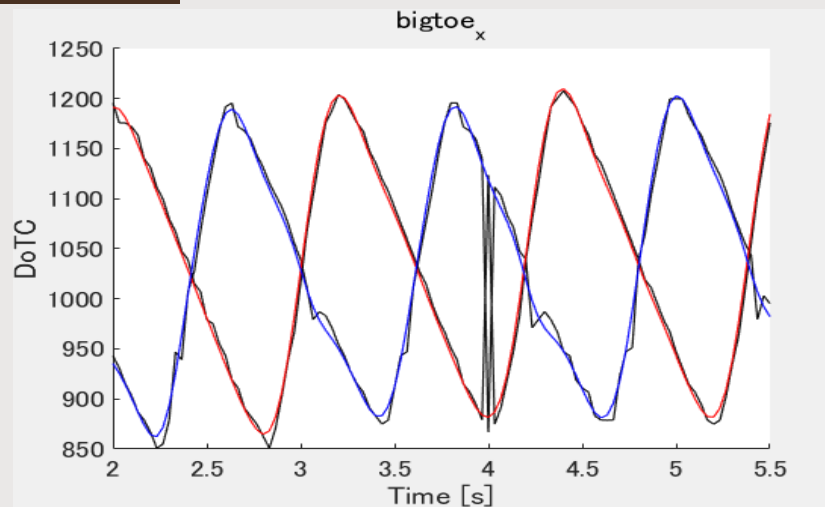
足首\_DoTC



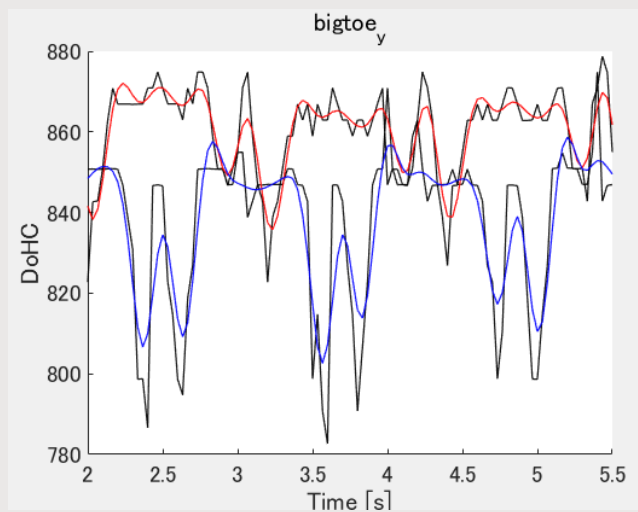
足首\_DoHC



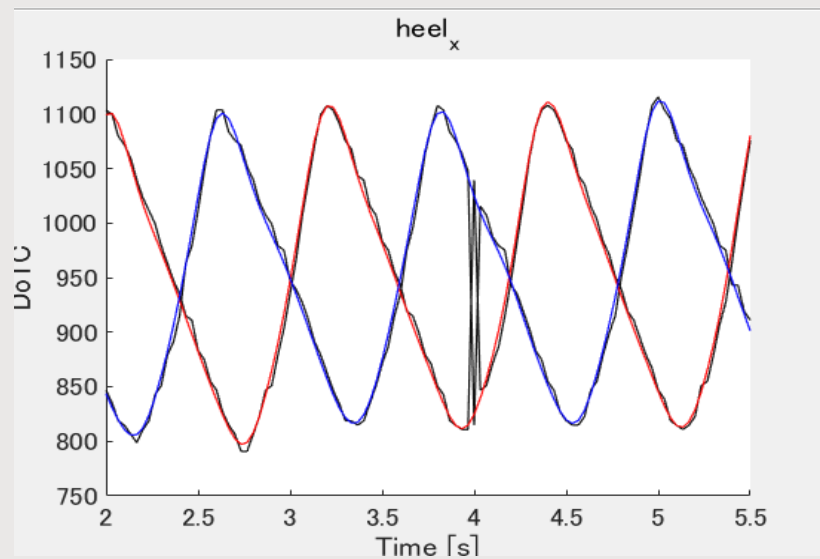
爪先\_DoTC



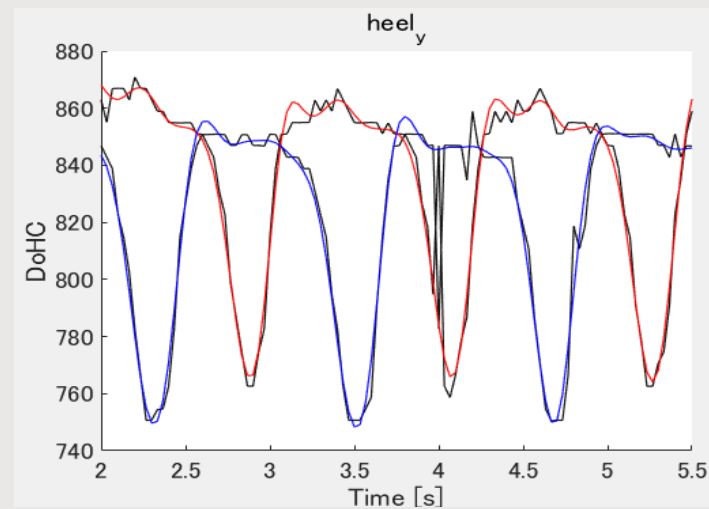
爪先\_DoHC



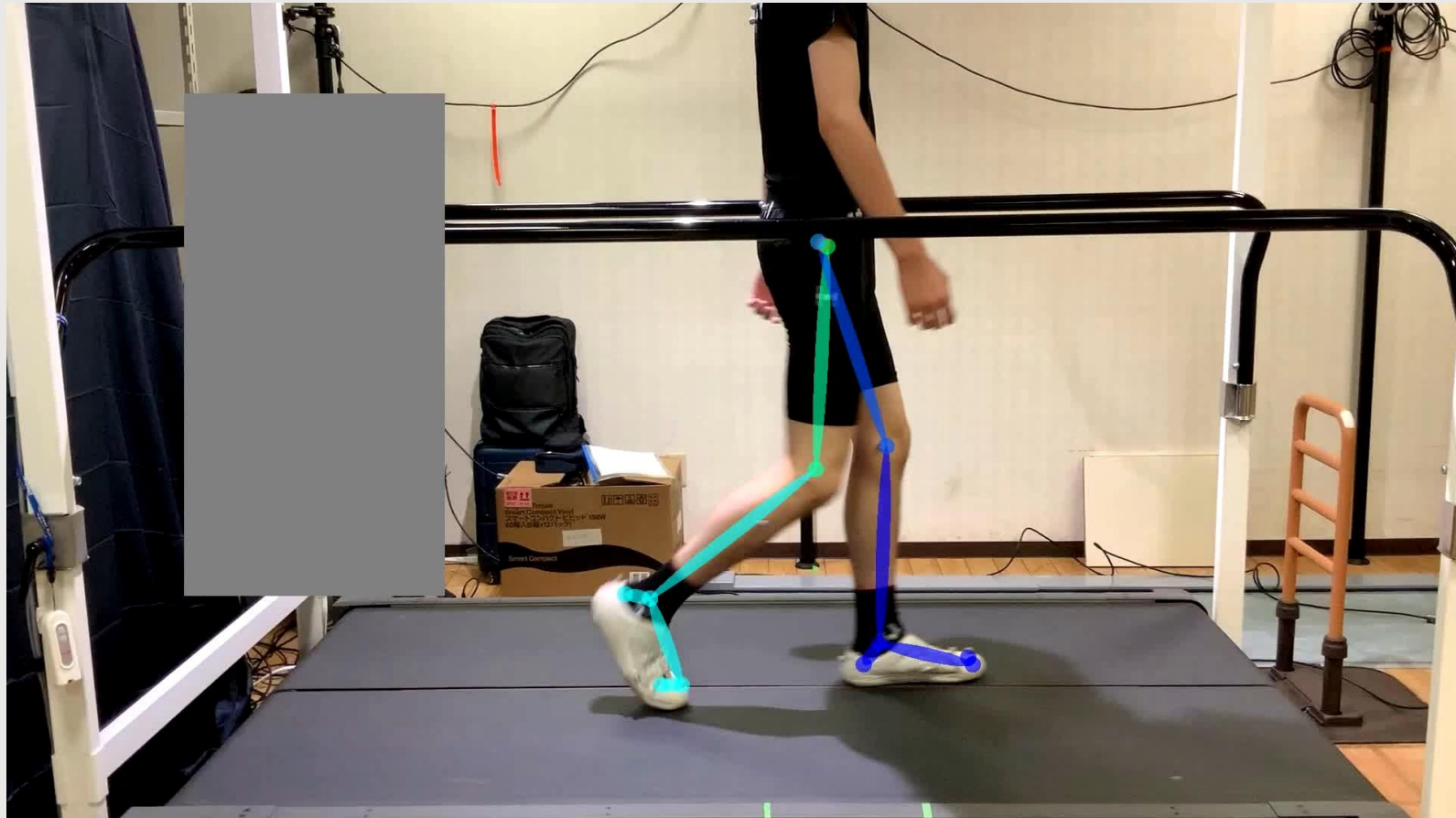
かかと\_DoTC



かかと\_DoHC



■ 左足首, 右足首 KF前  
■ 右足首 KF後  
■ 左足首 KF後



\* 0.5倍速

約3.8秒(本動画は7.6秒)に大きな検出エラー

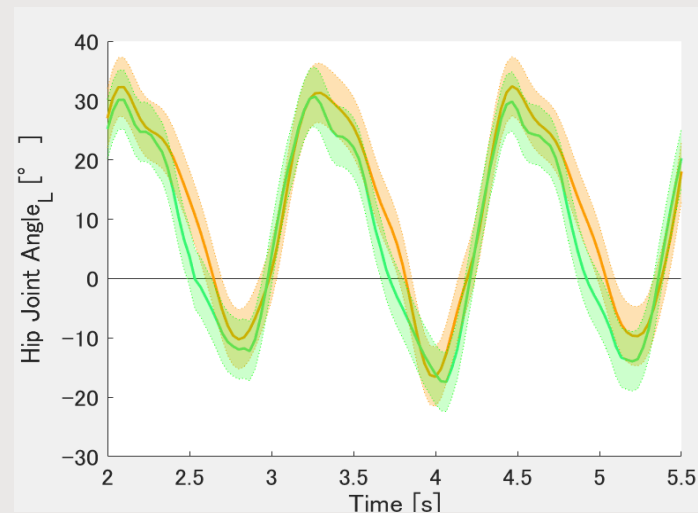
## 計測条件

フレームレート : 30fps  
解像度 : 1920×1080pixel  
歩行: 通常  
速度: 通常  
脚: 左

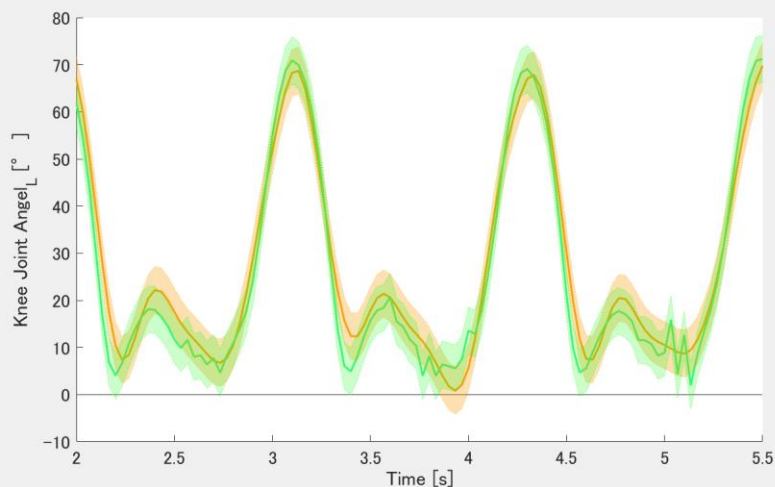


iPadでは首が取れていなかったで、  
股関節角度は大腿と鉛直線のなす角度で算出した

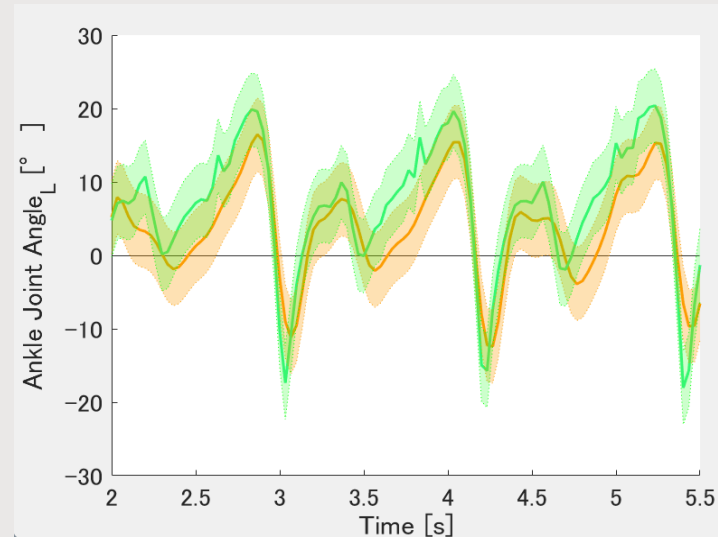
股関節角度 MAE=3.9°



膝関節角度 MAE=3.5°



足関節角度 MAE=4.3°



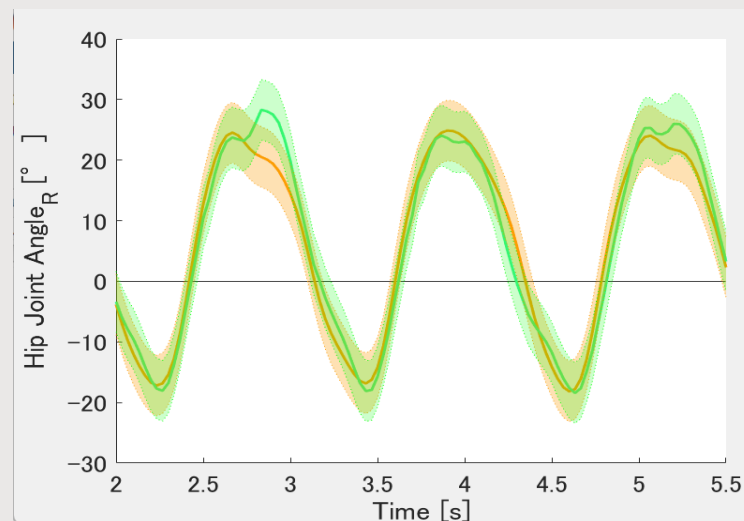


## 計測条件

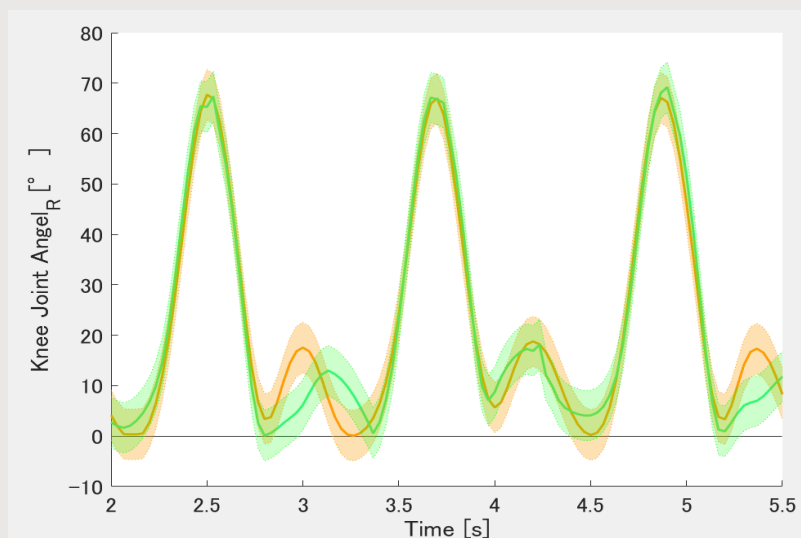
フレームレート : 30fps  
解像度 : 1920×1080pixel  
歩行: 通常  
速度: 通常  
脚: 右

■ MC  
■ 提案法

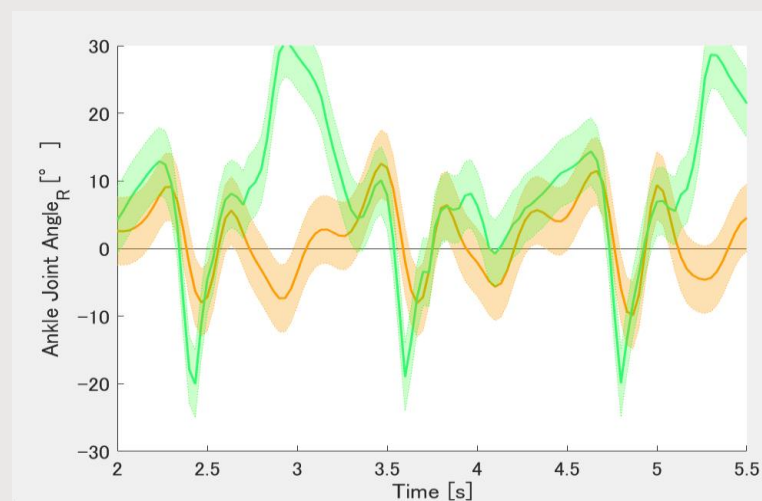
股関節角度 MAE=2.4°



膝関節角度 MAE=3.4°

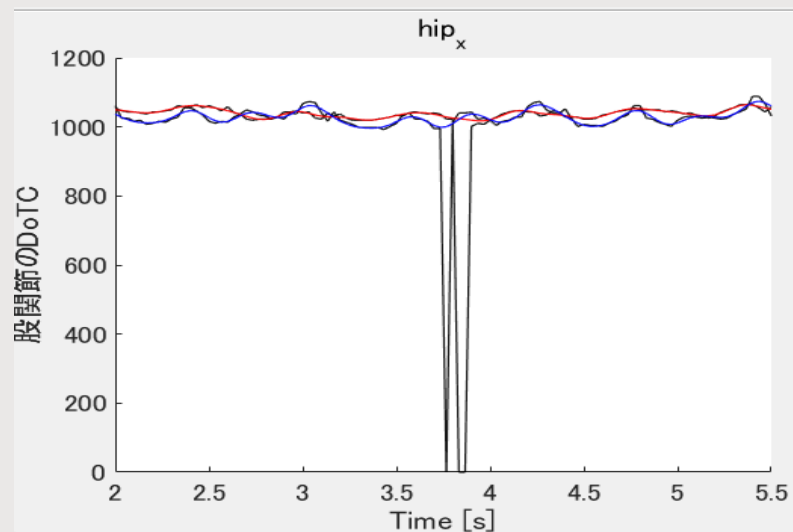


足関節角度 MAE=9.1°

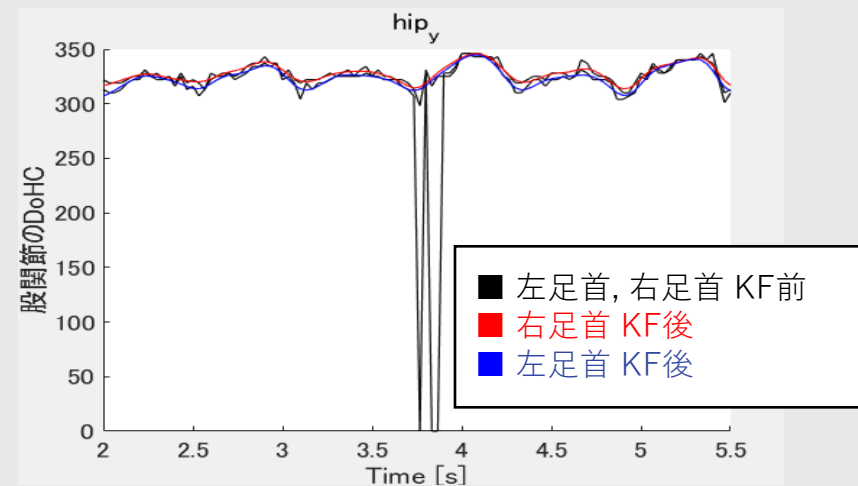




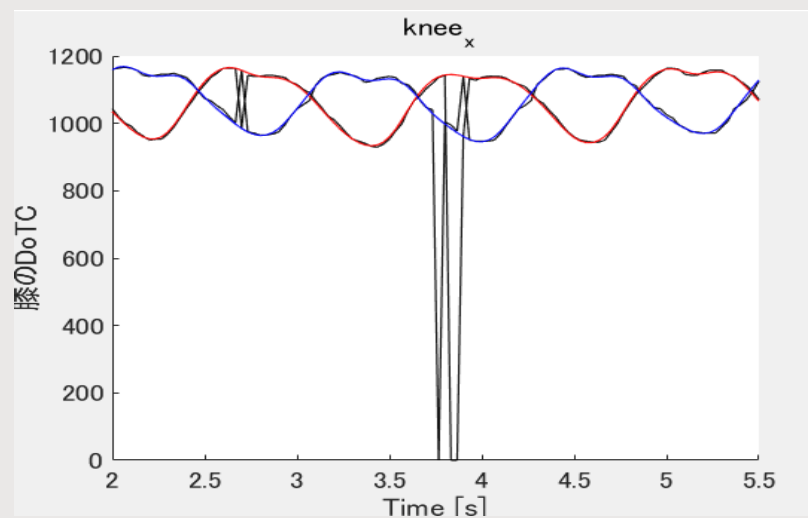
股関節\_DoTC



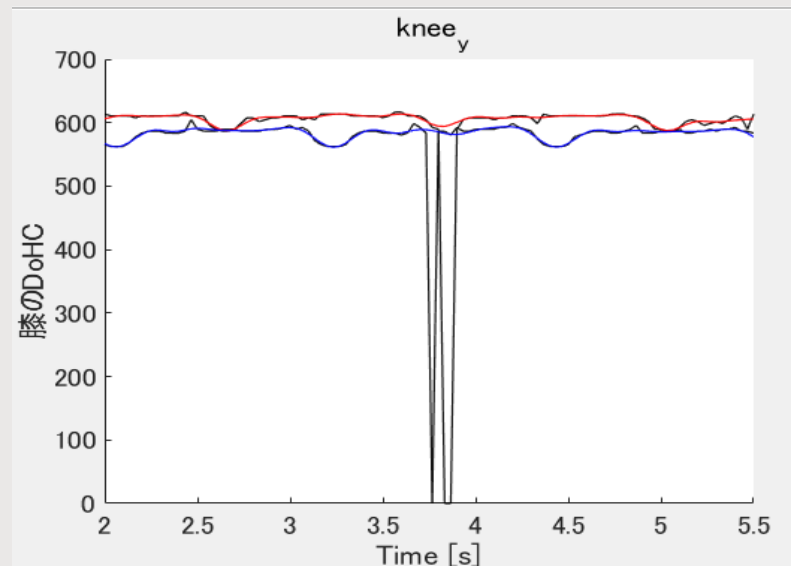
股関節\_DoHC



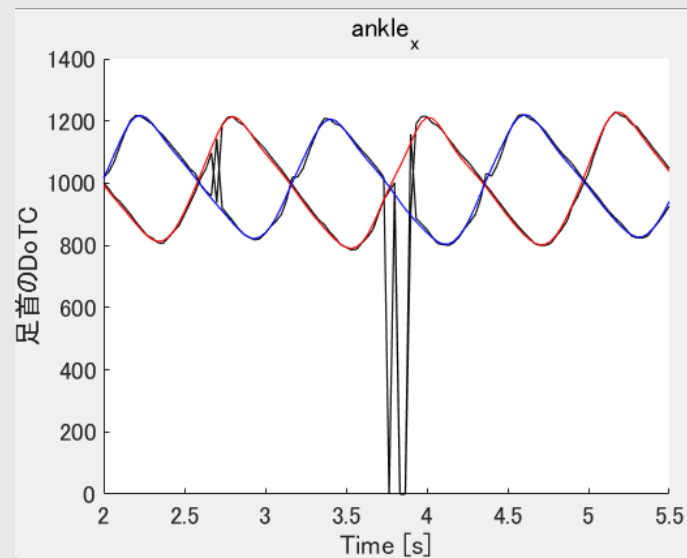
膝\_DoTC



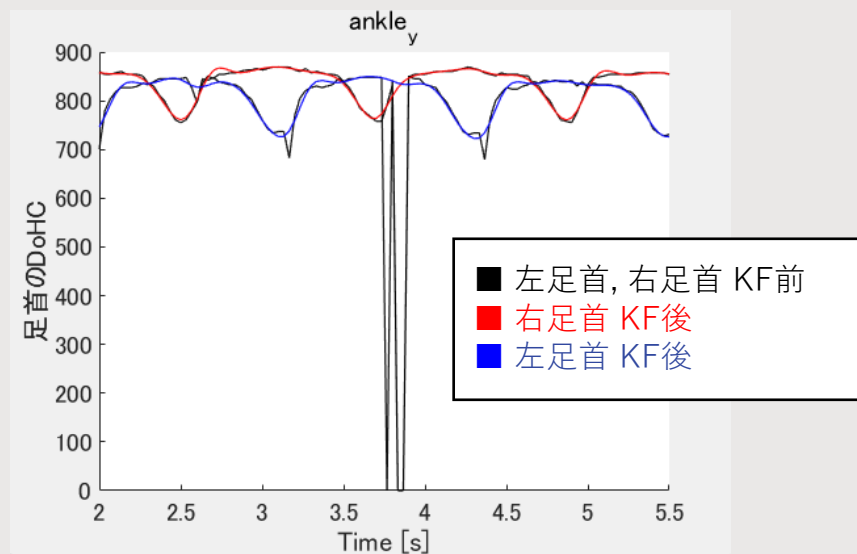
膝\_DoHC



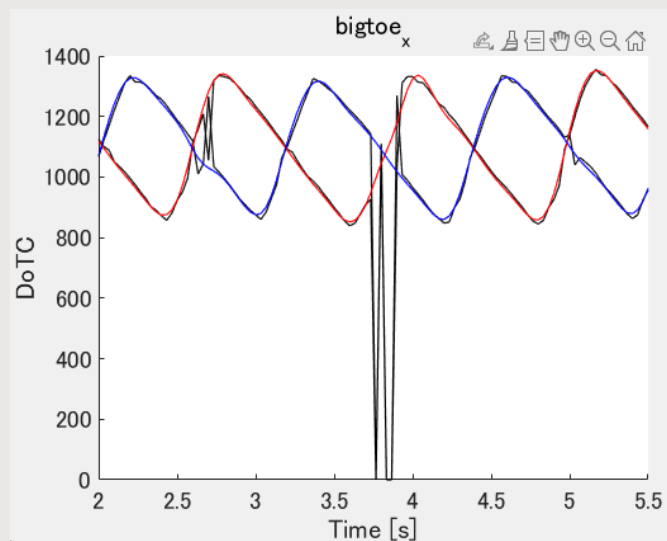
足首\_DoTC



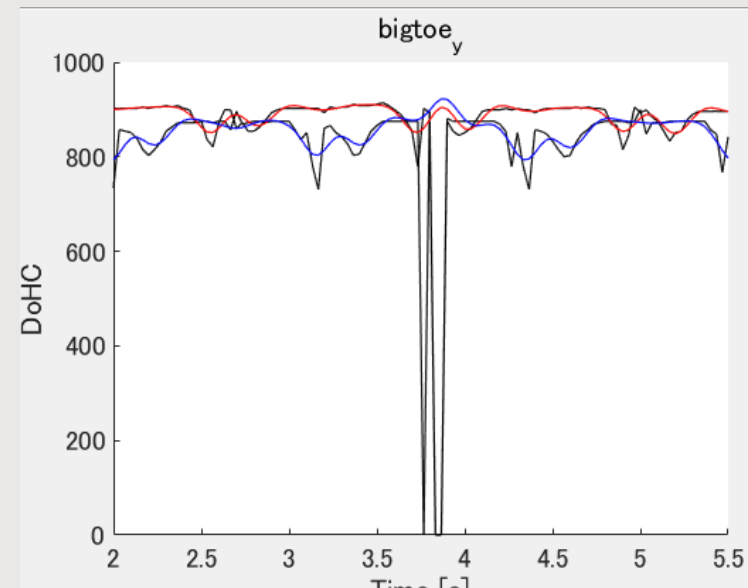
足首\_DoHC



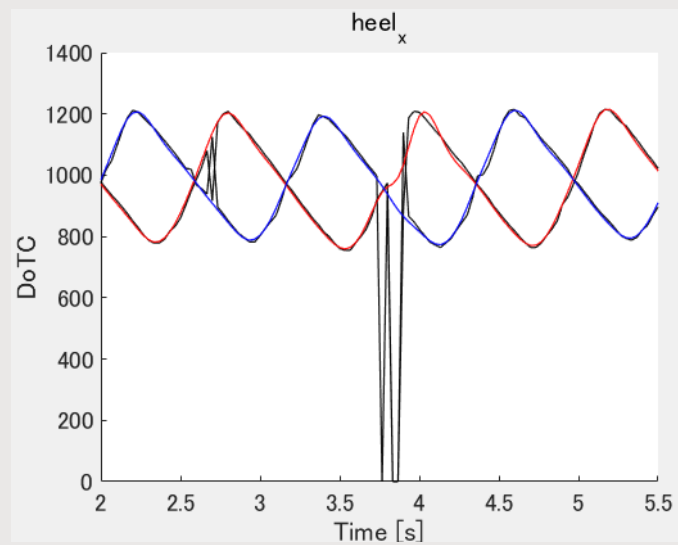
爪先\_DoTC



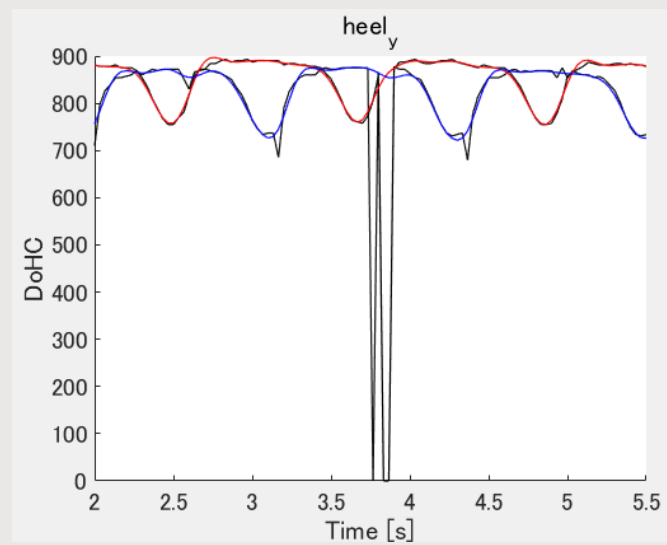
爪先\_DoHC



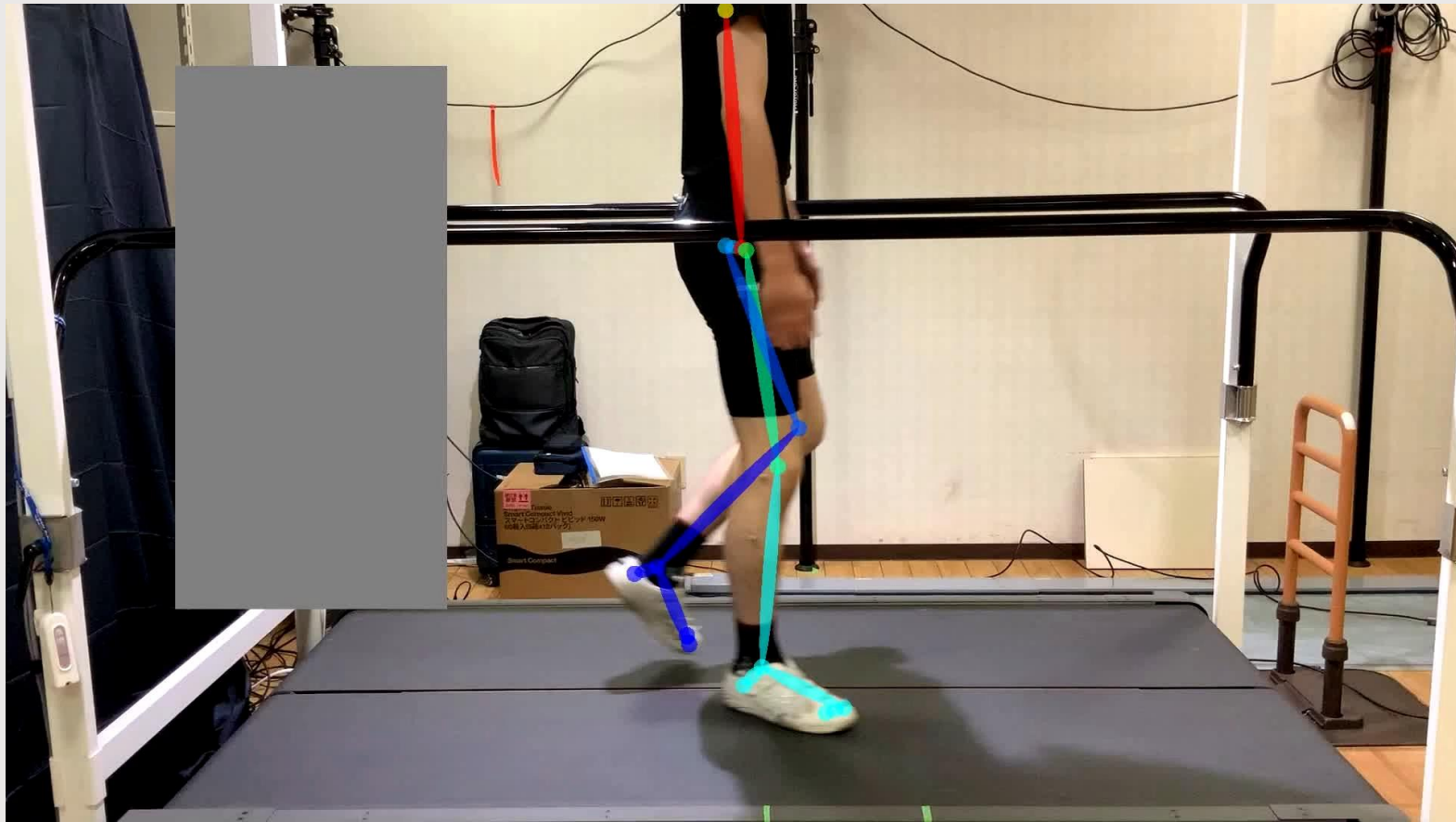
かかと\_DoTC



かかと\_DoHC



- 左足首, 右足首 KF前
- 右足首 KF後
- 左足首 KF後



\* 0.5倍速

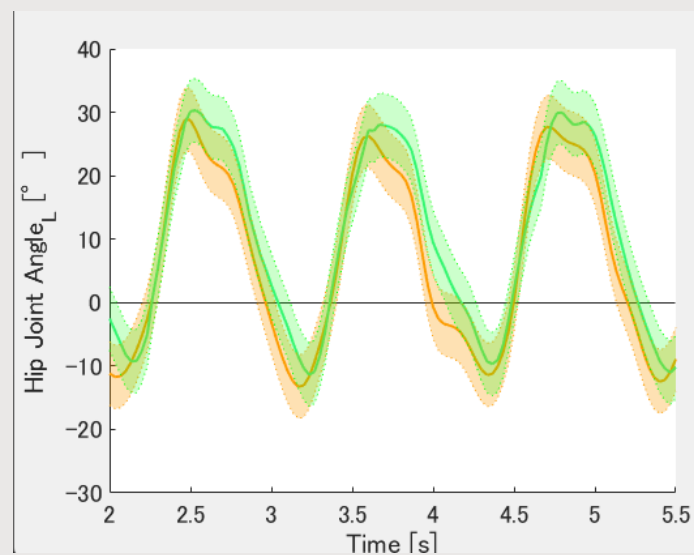
約2.4秒, 3.5秒, 4.0秒, 5.3秒(本動画は約4.8秒, 7.0秒, 8.0秒, 10.6秒)に検出エラー

## 計測条件

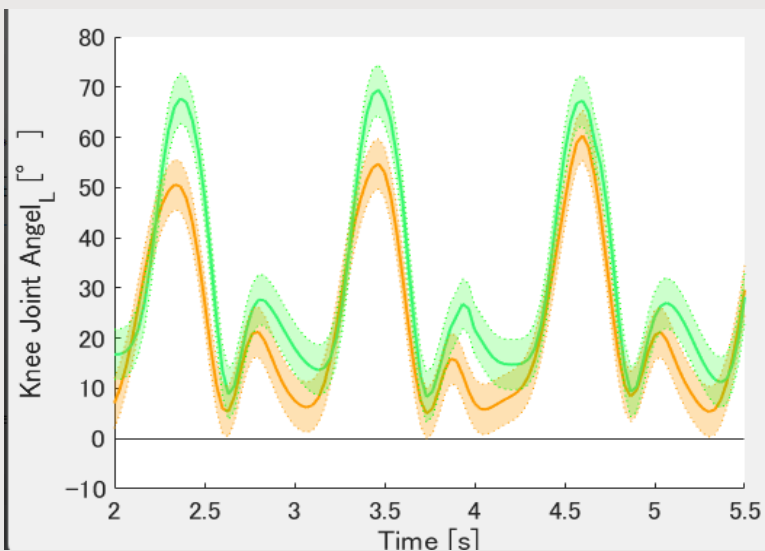
フレームレート : 30fps  
解像度 : 1920×1080pixel  
歩行: 股  
速度: 通常  
脚: 左

■ MC  
■ 提案法

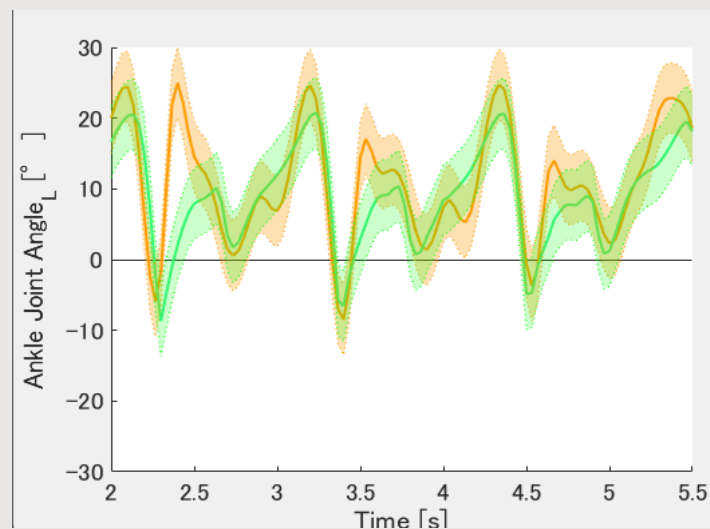
股関節角度 MAE=4.1°



膝関節角度 MAE=7.9°



足関節角度 MAE=4.0°

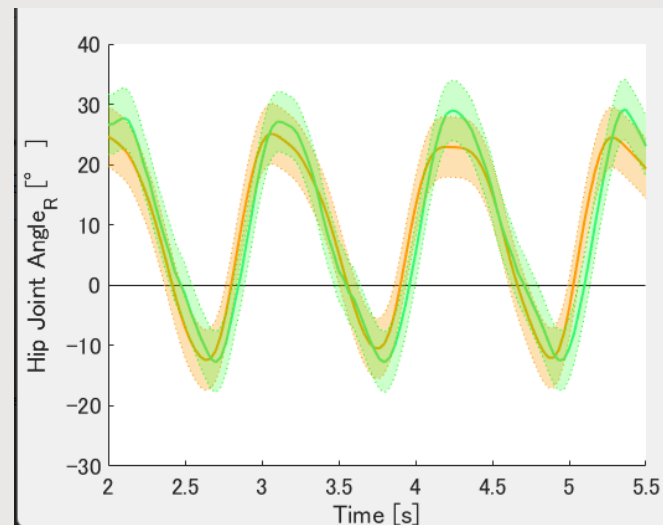


## 計測条件

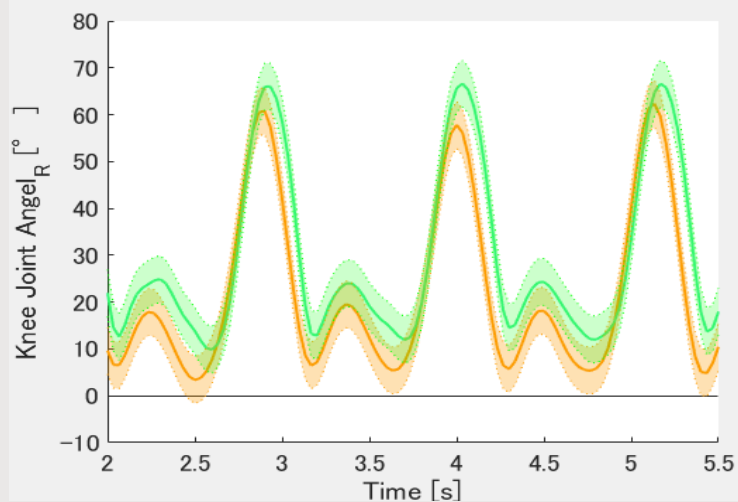
フレームレート : 30fps  
解像度 : 1920×1080pixel  
歩行: 股  
速度: 通常  
脚: 右

■ MC  
■ 提案法

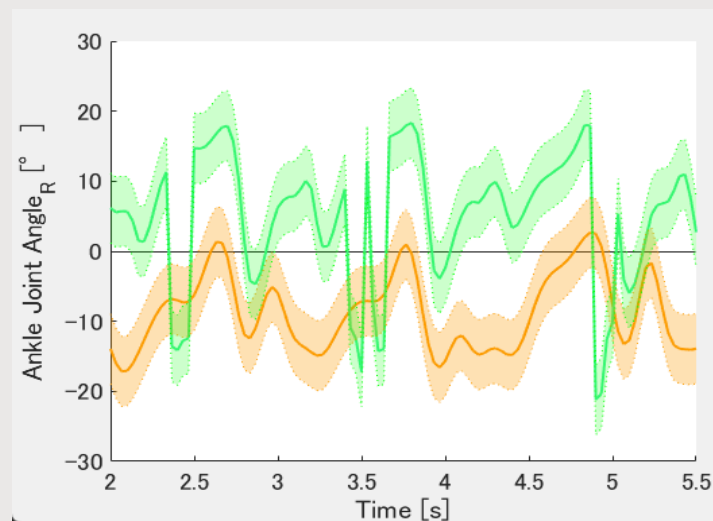
股関節角度 MAE=3.8°



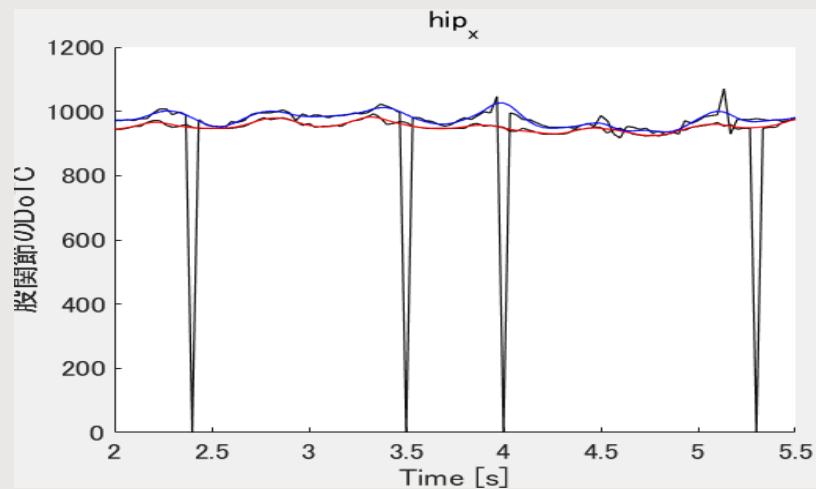
膝関節角度 MAE=8.0°



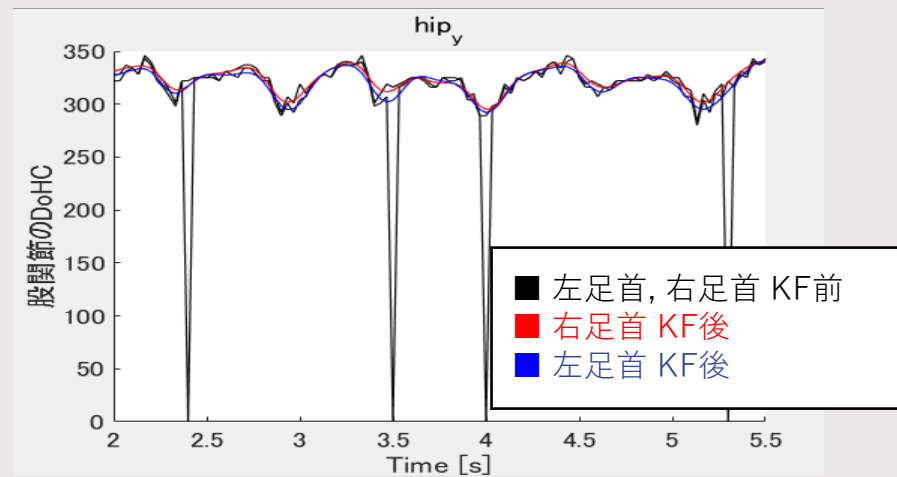
足関節角度 MAE=15.5°



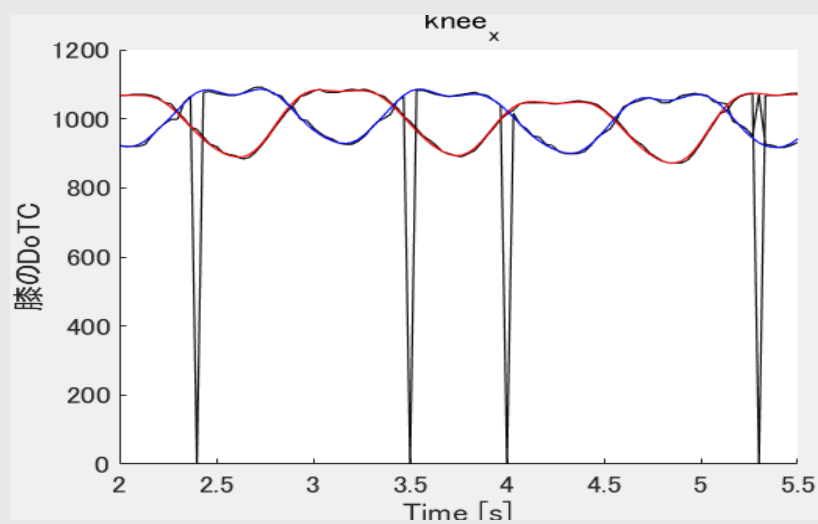
股関節\_DoTC



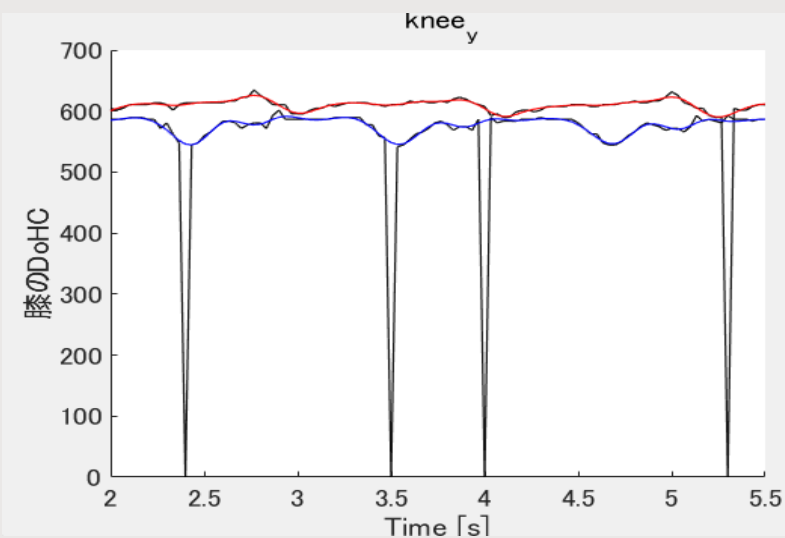
股関節\_DoHC



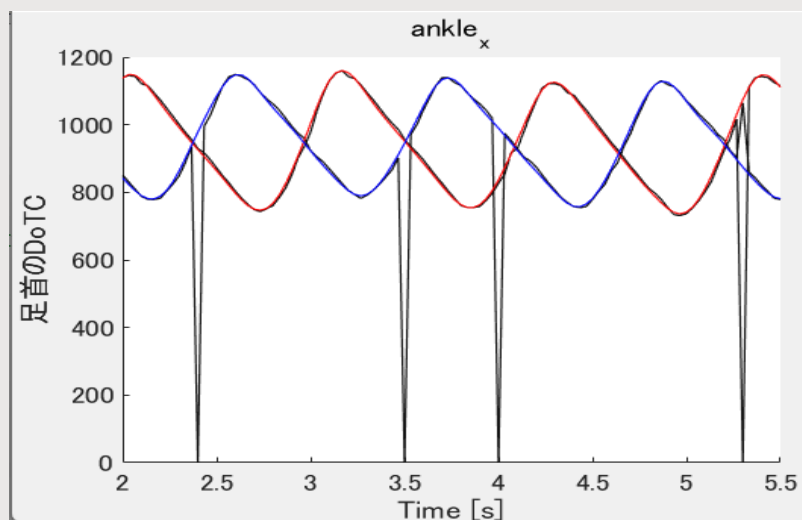
膝\_DoTC



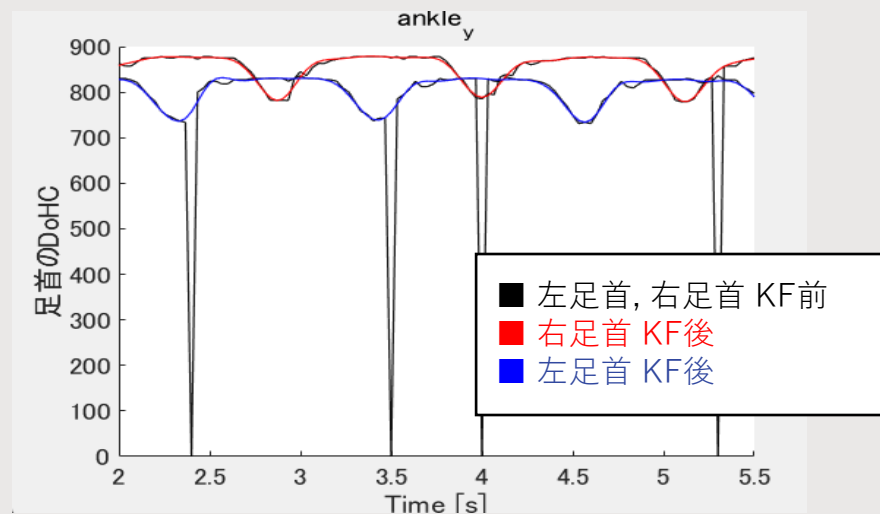
膝\_DoHC



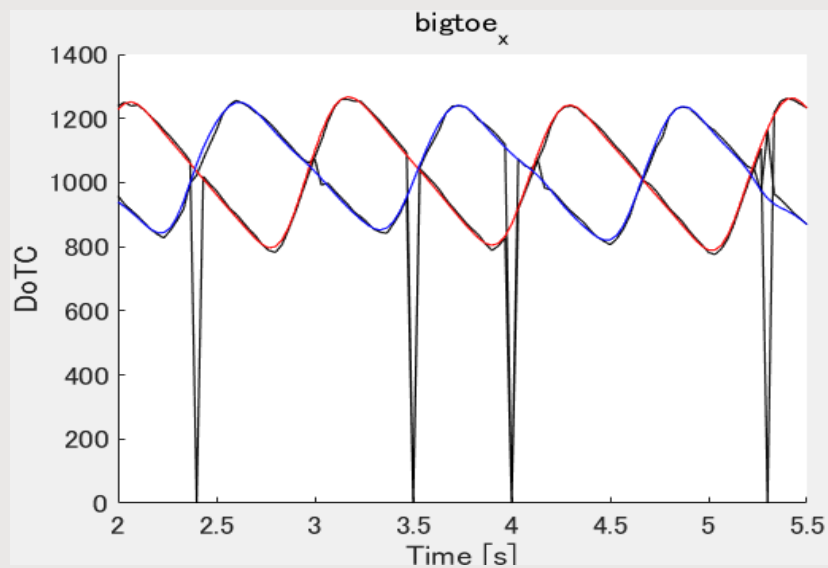
足首\_DoTC



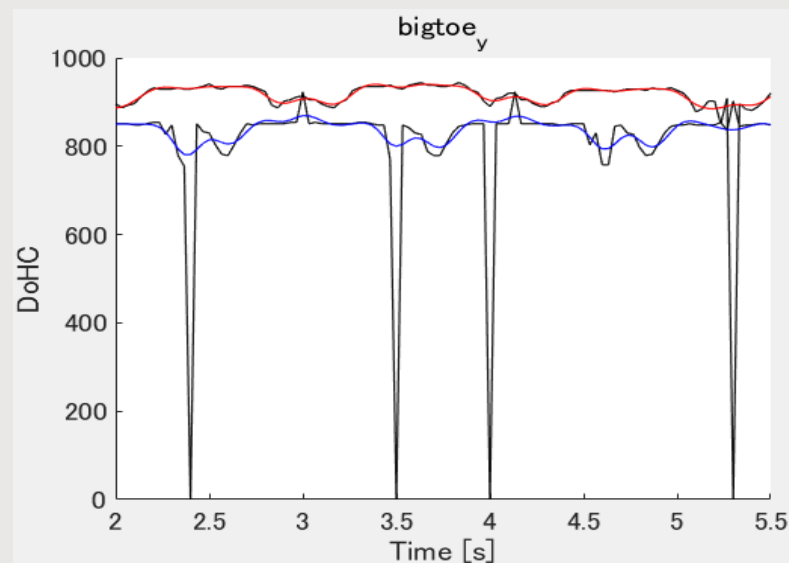
足首\_DoHC



爪先\_DoTC

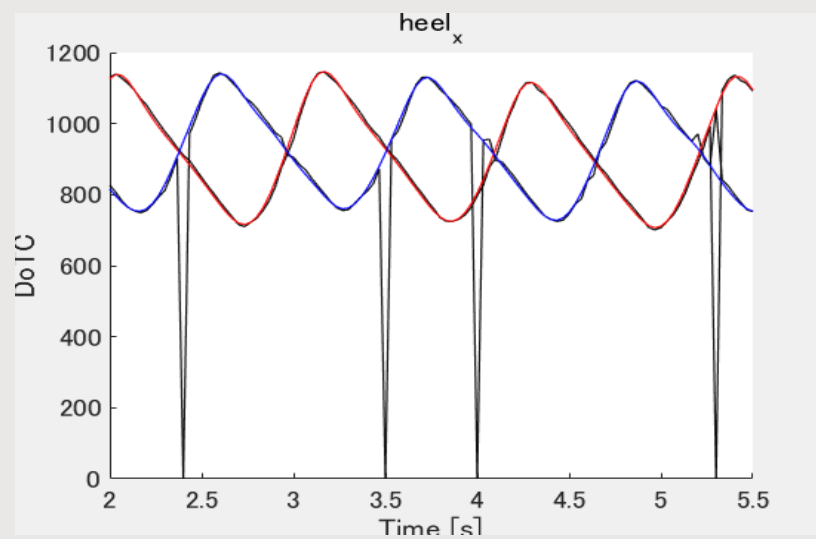


爪先\_DoHC

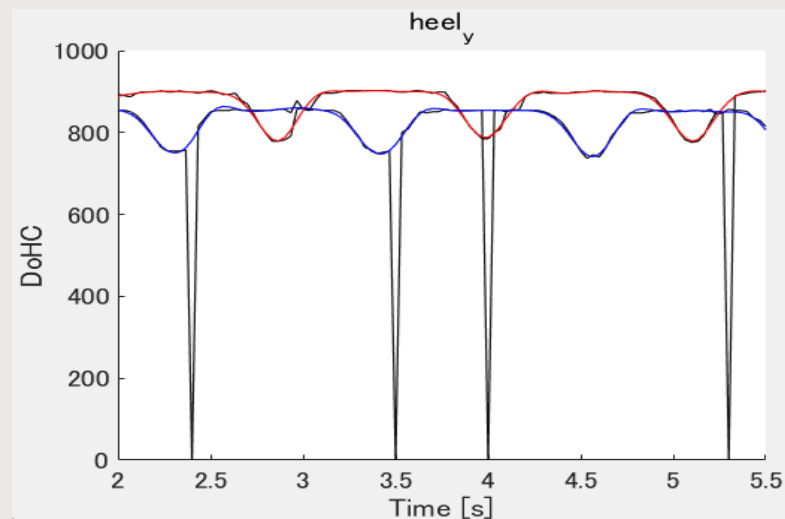




かかと\_DoTC



かかと\_DoHC



- 左足首, 右足首 KF前
- 右足首 KF後
- 左足首 KF後