

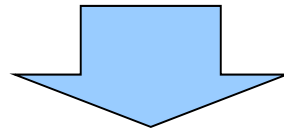
# ヒト並みの運動性能を有する パーソナルロボットの開発

2015年 12月 2日  
株式会社 豊田中央研究所

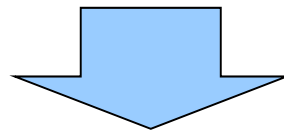
廣瀬 徳晃、但馬 竜介、鋤柄 和俊

# 研究背景1

Arrival of the aging society in many countries



Development of **Personal Robot**  
to Support Active Human Life



What is **TRUE** purpose of Personal Robot?

# 研究背景2



## PR for elder people

\*PR: Personal Robot

- Service robot
- Near-distance transporter



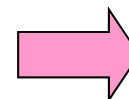
“WALL・E” The Walt Disney Studios

## Prevention from debility

- Walking ourselves
- Going outside



<http://www.shenandoahpodiatry.com/>

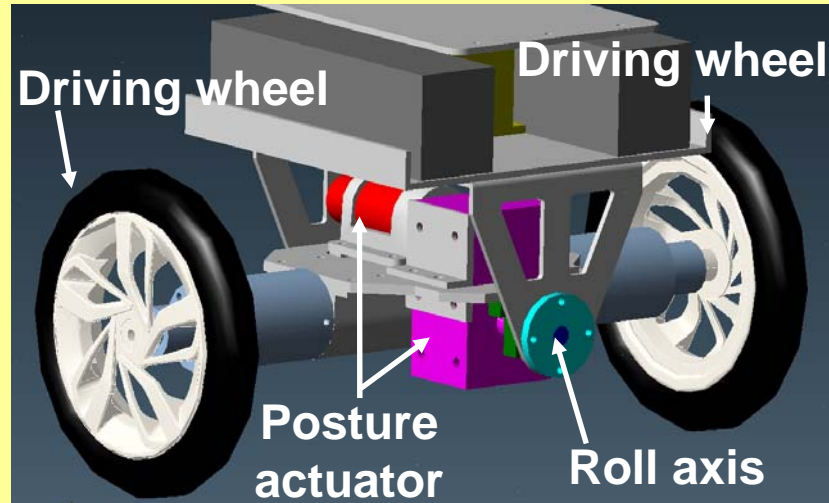


健康寿命の長大化

# パーソナルロボットの概観



## Overview of Personal Robot

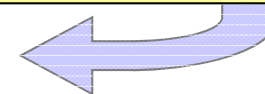
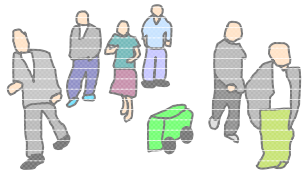


- Posture Actuator  
⇒ **Roll Angle**
- Two Driving Wheels  
⇒ Pitch Angle and Traveling velocity

Important Sp

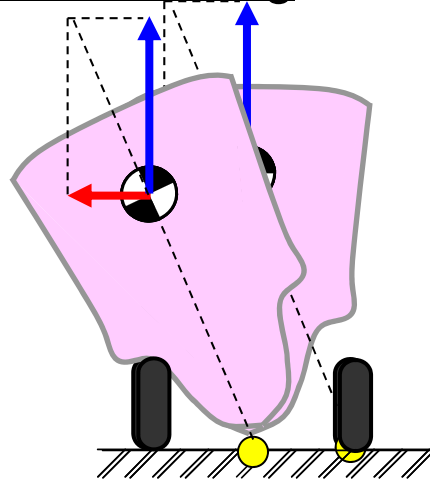
- Small Fo  
⇒ coexist

- High Traveling Performance  
⇒ following person

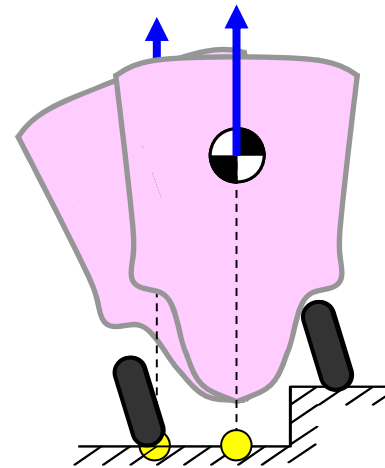





# 姿勢アクチュエータの目的

## Quick Turning



## Vertical Posture on uneven floor



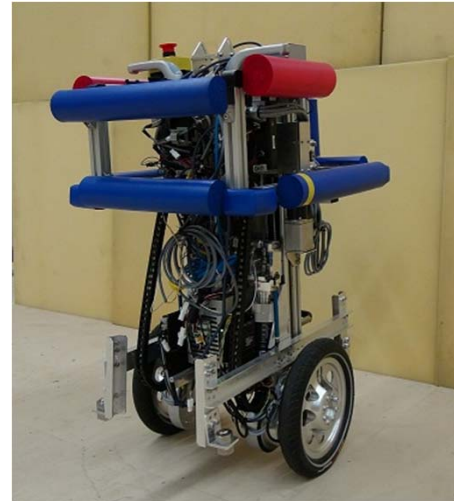
-  :  
Reaction force of own weight
-  :  
Reaction force of centrifugal force
-  : Zero Moment Point



# 試作パーソナルロボット



2011



2012



2013



2014

56 kg

23 kg

10.5 kg

ZIC\*1

WIPC

LAC\*2

MPC\*3

ZIC\*1 : Zeroing Input Control (*Proc. of ICM 2013 @Vicenza, Italy*)

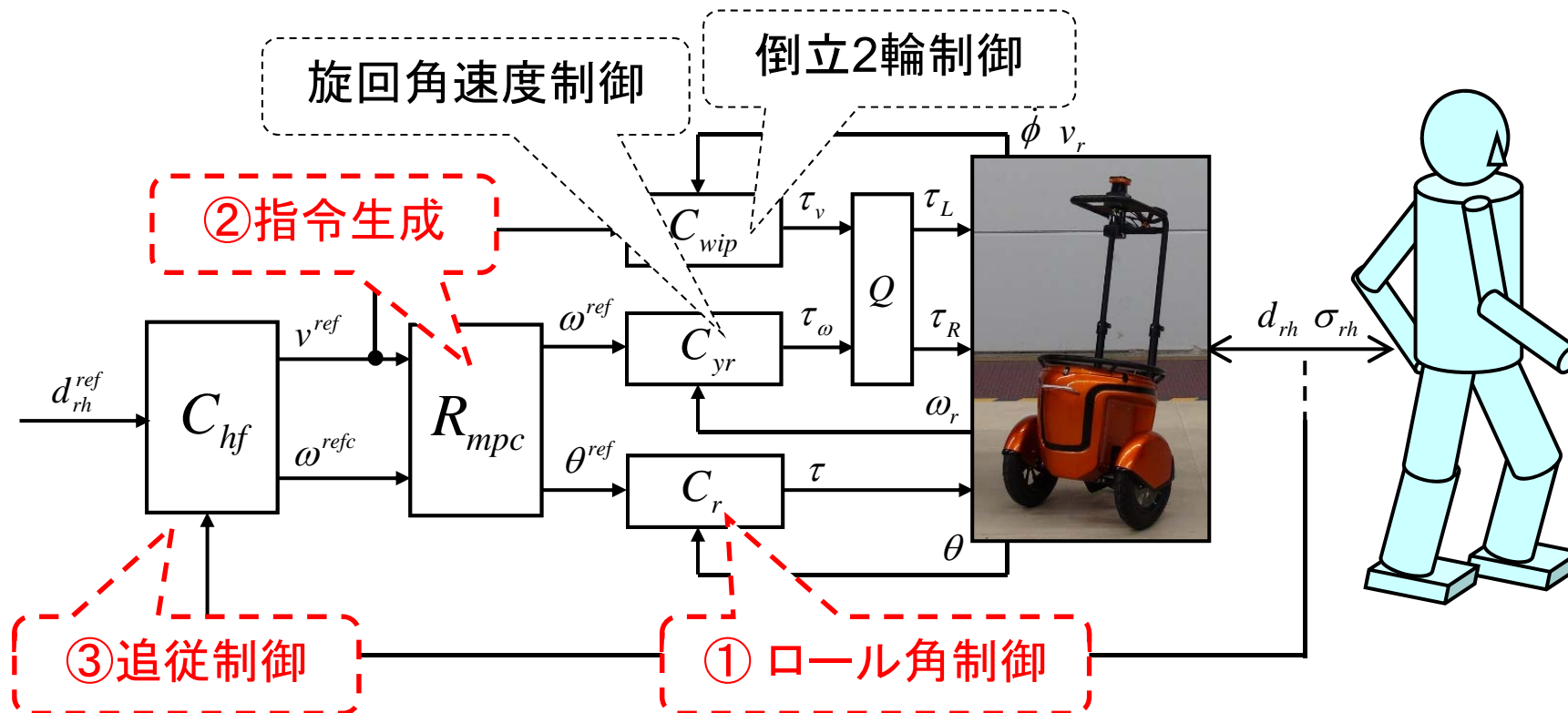
WIPC : Wheeled Inverted Pendulum Control

LAC\*2 : Lateral Acc. Control (*Proc. of IROS 2013@Tokyo, Japan*)

MPC\*3 : Model Predictive Control (*Proc. of ICRA 2014@Hong Kong, China*)

# 制御システム構成

## Feedback Control System for Personal Robot



### その他の研究開発

ユーザの検出、追跡:

小山渚、但馬竜介、田中稔、廣瀬徳晃等: ヒトを活動的にする移動支援ロボット-IDを発信する赤外LEDタグと全方位カメラを用いた利用者の追跡- 計測自動制御学会論文集 Vol.51, No.1

自律移動(自己位置推定):

伊藤誠悟、廣瀬徳晃等: ヒト並みの運動性能を有する小型移動体の実現 - 準静止障害物を考慮した位置推定法- 日本ロボット学会学術講演会 2B2-07



# Subject of Posture Control

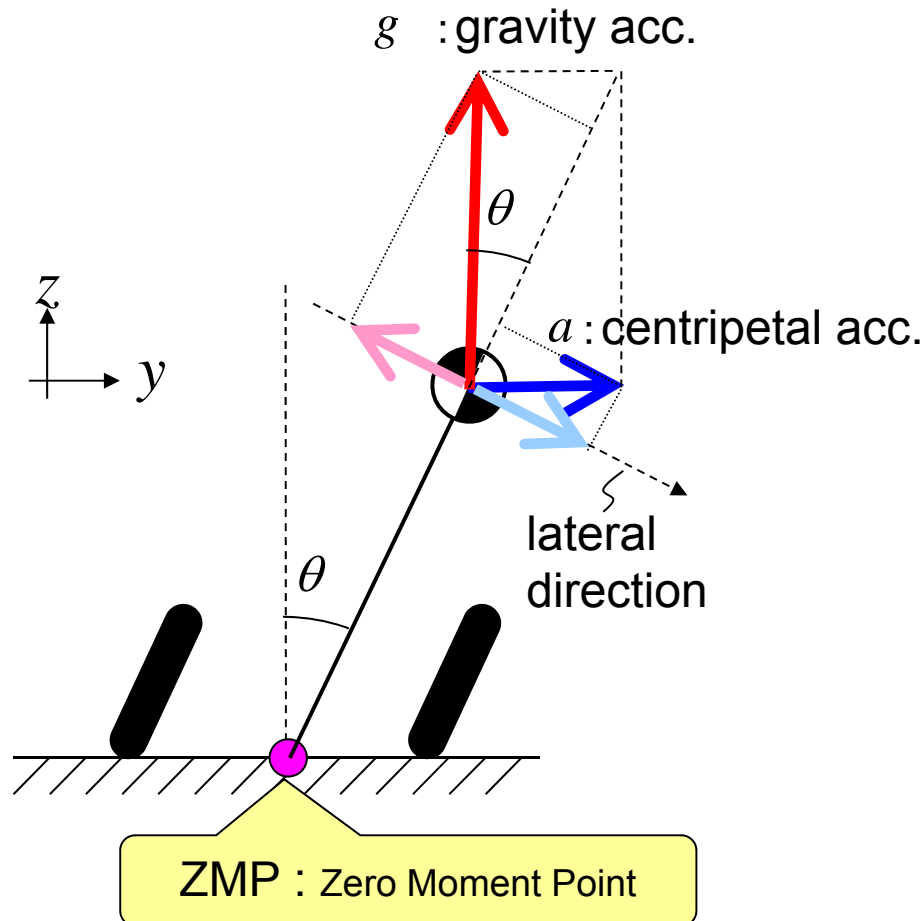


Fig. front view at left turning

Desired roll angle

$$\theta = -\tan^{-1} \frac{a}{g}$$

Conventional method

FB control : Roll angle  $\theta$

Reference :  $\theta_{ref} = -\tan^{-1} \frac{\hat{a}}{g}$

$\hat{a}$  cannot be estimated precisely  
when slipping, idling and etc.

Proposed method

**Zeroing the acceleration  
for the lateral direction**



# Motion Model and Lateral Acc.



Motion model around roll axis

$$J\ddot{\theta} = \tau + hMg \sin \theta - hMa \cos \theta$$

$J$  : inertia around roll axis

$\theta$  : roll angle

$M$  : weight

$a$  : centripetal acc.

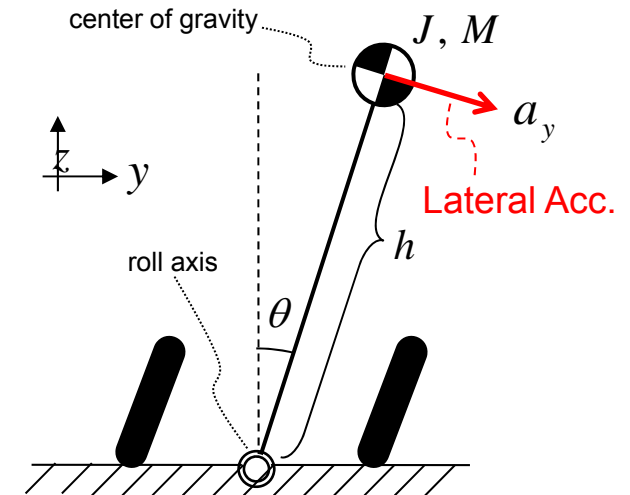
$h$  : height of center of gravity

$g$  : gravity acc.

Lateral Acceleration  $a_y$

$$a_y = g \sin \theta + a \cos \theta - h\ddot{\theta}$$

angular acc.



Plant system in proposed method

$$\frac{a_y(s)}{\tau(s)} = -\frac{hs^2 - g}{Js^2 - Mgh}$$

Unstable Zero

# Compensation of Unstable Zero

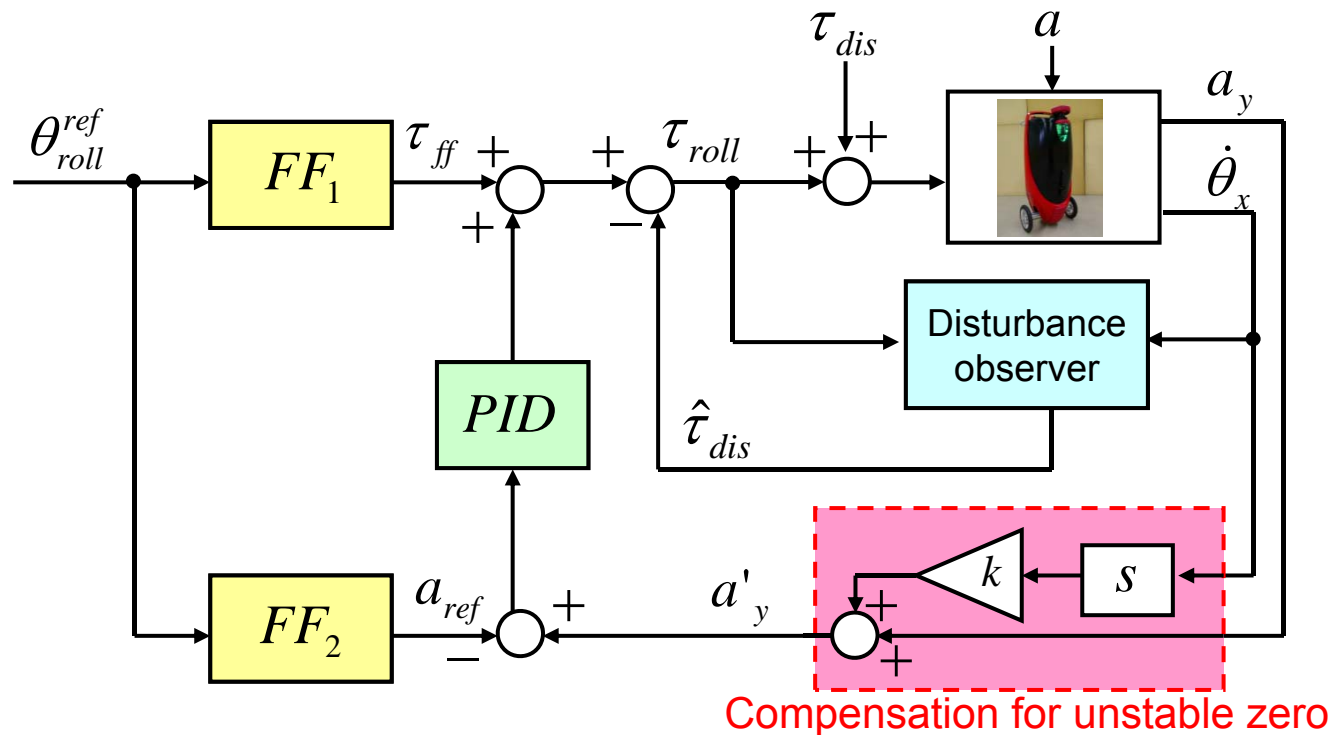

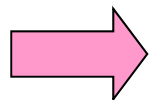


Fig. Block diagram of control system for Personal Robot

# 実験結果：旋回走行

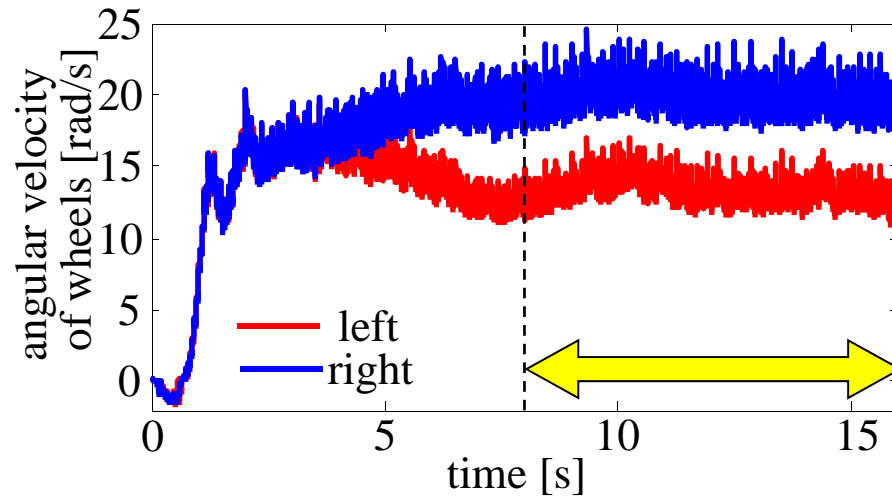
- Quick Turning (  $v = 1.67$  m/s,  $\omega = 1.6$  rad/s )  Centripetal Acc. = **0.3 G**



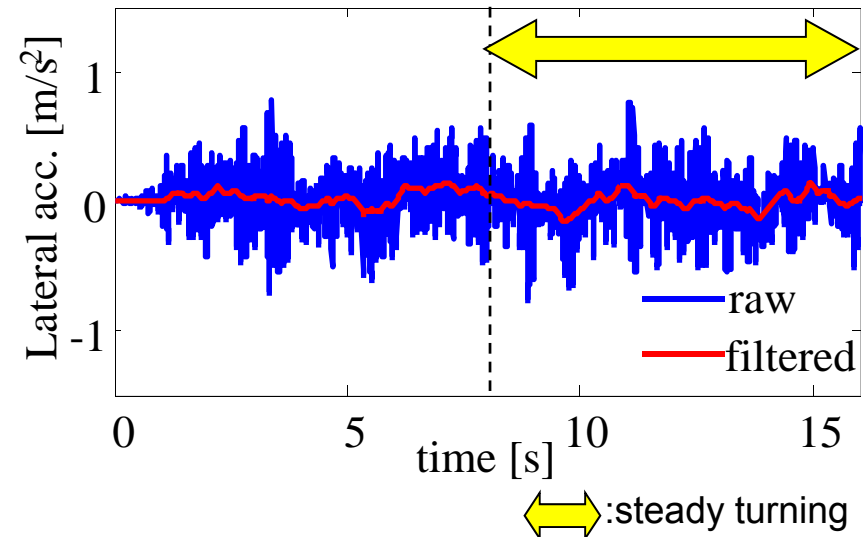
Stable posture during steady turning

# 実験結果：旋回走行

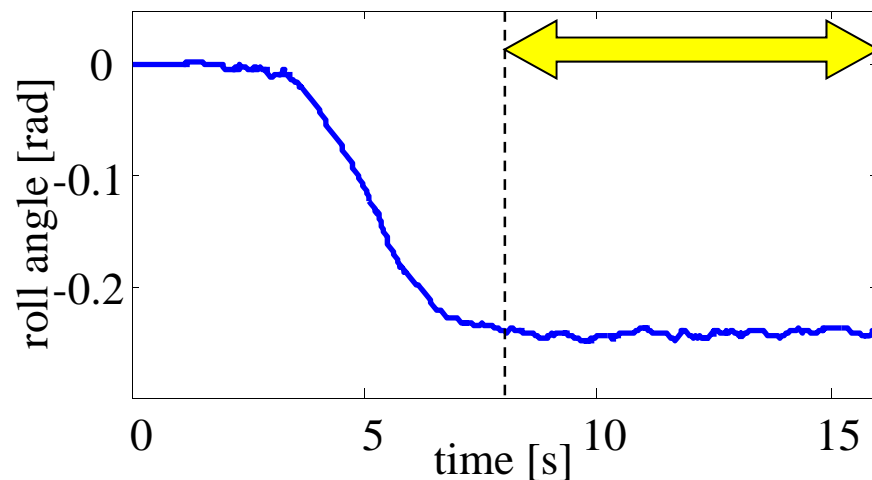
### Angular velocity of wheels



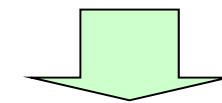
### Lateral Acceleration



### Roll angle



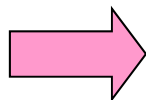
Lateral Acceleration is zero during steady turning



Stable Posture

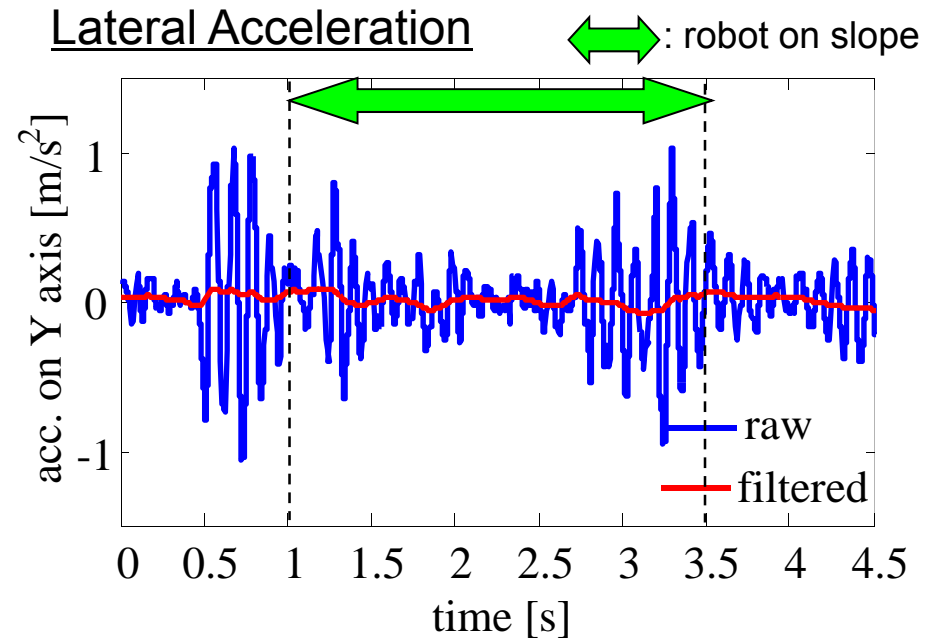
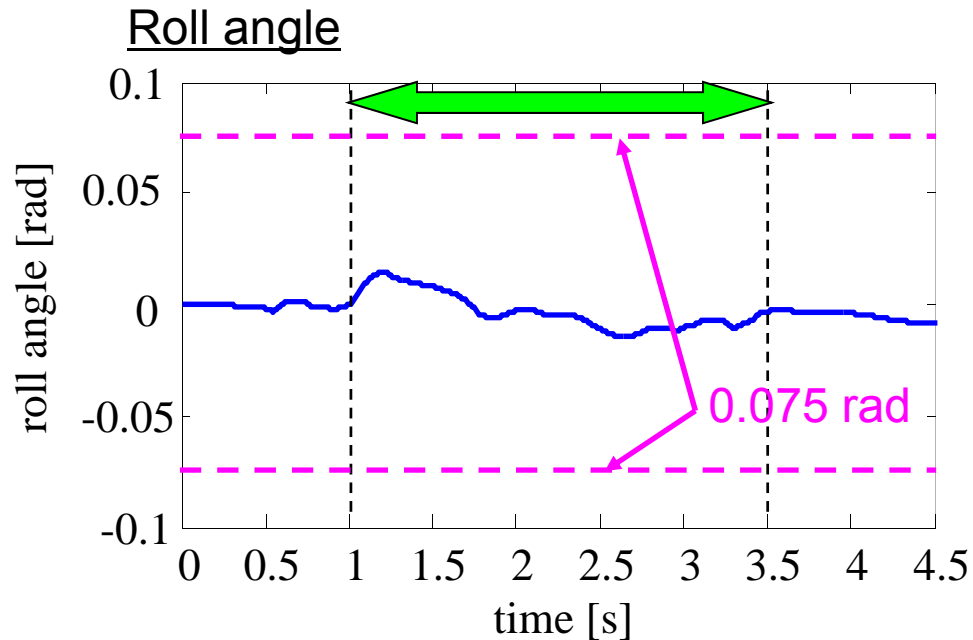
# 実験結果：片輪スロープ走行

・Slope (  $v = 1.11$  m/s, Maximum height = 0.03 m )



Vertical posture even on slope!!

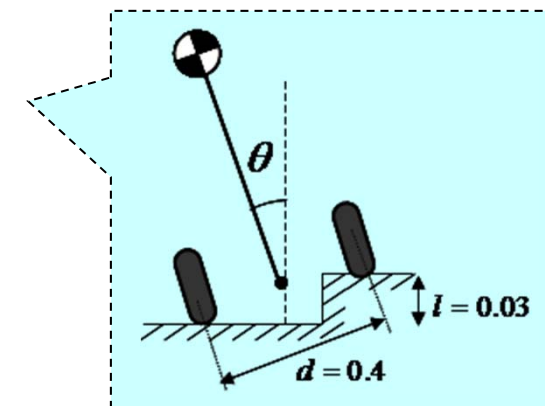
# 実験結果：片輪スロープ走行



Roll angle without feedback compensation

$$\theta = \sin^{-1} \frac{0.03}{0.4} = 0.075 \text{ [rad]}$$

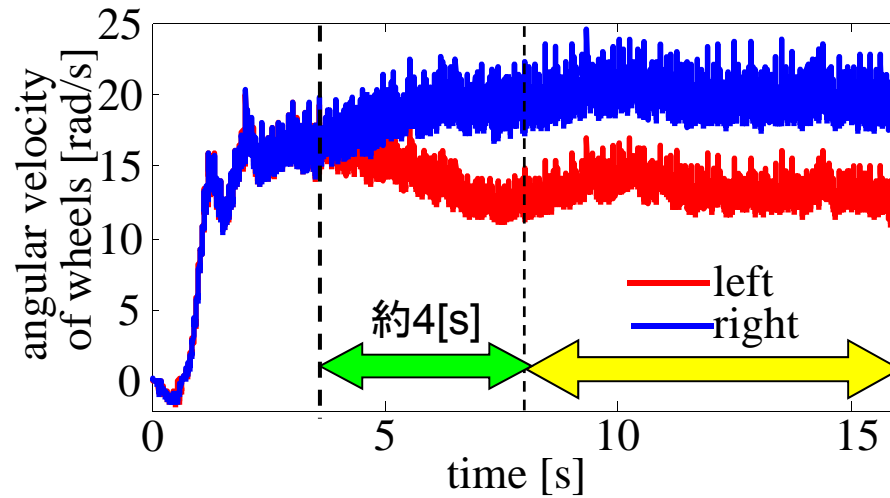
➡ Vertical posture even on Slope !!



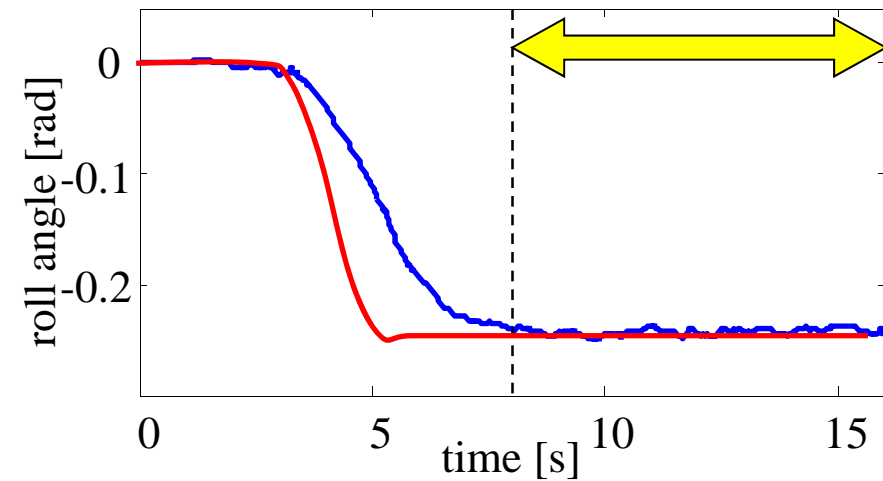
# 課題



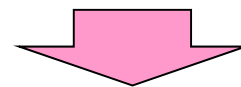
### Angular velocity of wheels



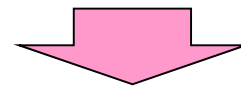
### Roll angle



定常状態での姿勢安定性はOK



俊敏な旋回動作は未達成 ⇒ ロール加速度大で転倒

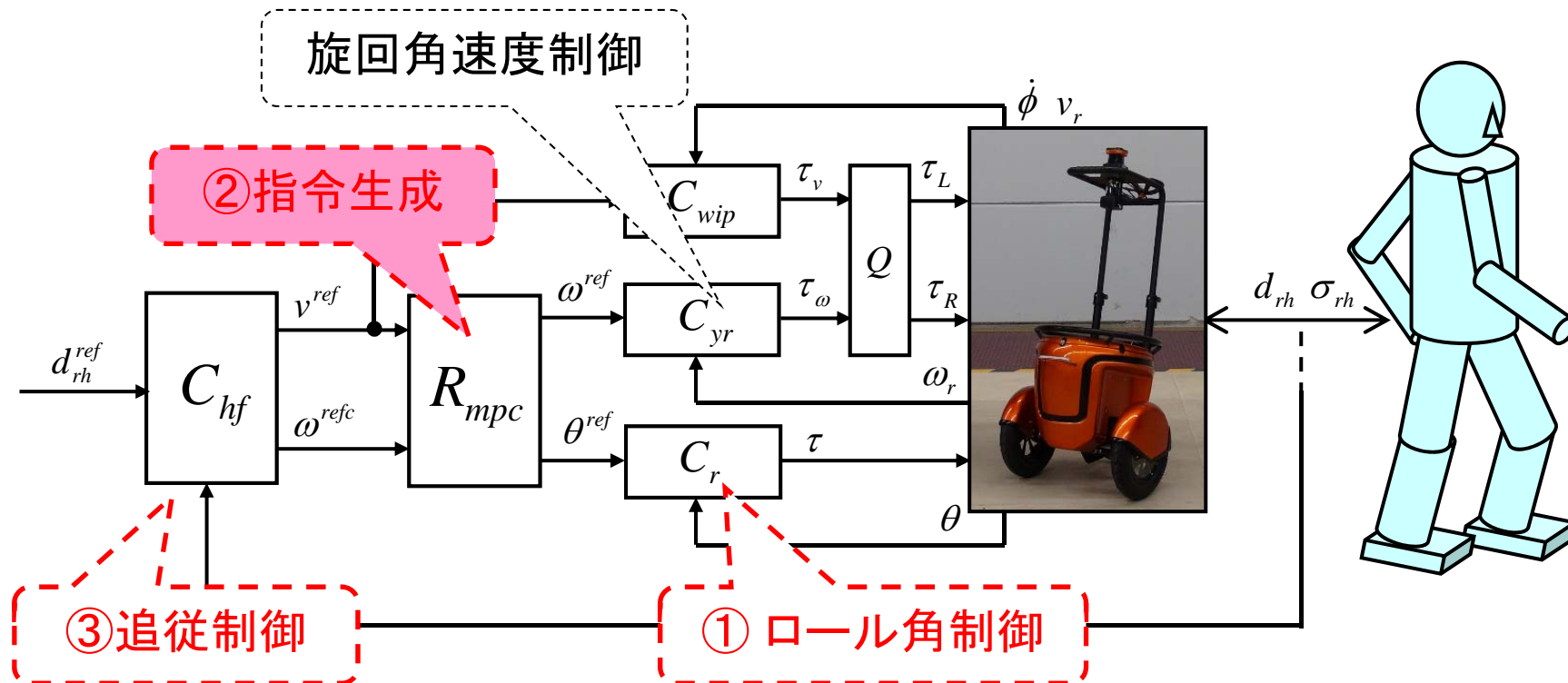


過渡状態での姿勢安定性を考慮した指令生成



# 制御システム構成

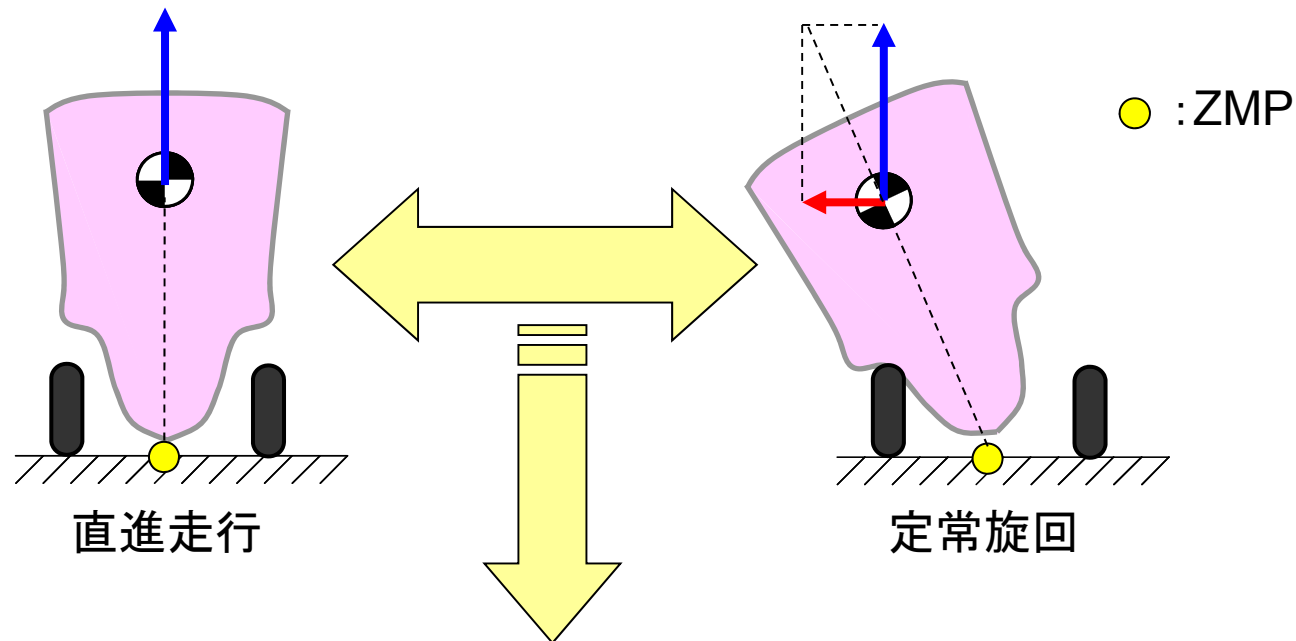
## Feedback Control System for Personal Robot



# 従来制御手法の課題1

従来手法

定常状態(定常旋回、直進走行)でZMPを接地中心に制御



課題

過渡状態(直進走行⇔定常旋回)でのZMPは???

➡ 旋回応答性を十分確保できない⇒ヒト追従性劣化

# 従来手法の課題2



・ZMP方程式(x軸まわりのつり合い)

$$-(p_y - q_y)f_z + (p_z - q_z)f_y = J\ddot{\theta}$$

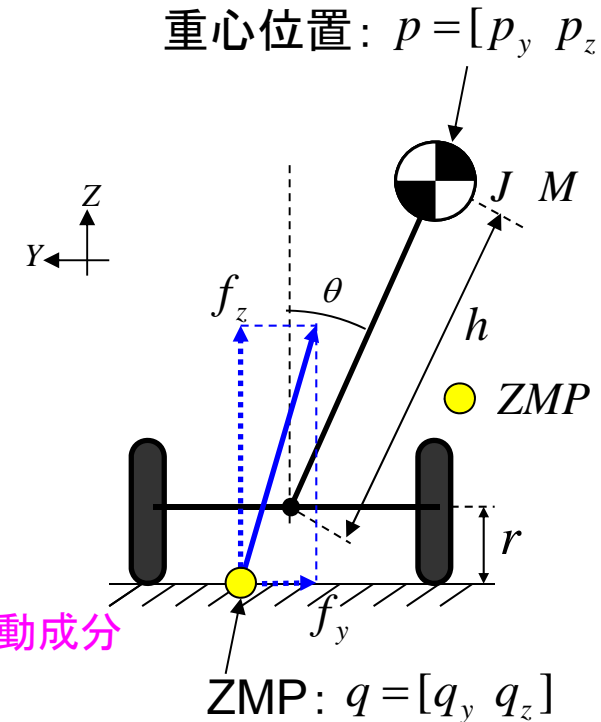
$$\left. \begin{aligned} p_y &= -h \sin \theta \\ p_z &= h \cos \theta + r \\ q_z &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{重心位置} \\ \text{ZMPの高さ=0} \end{array}$$

$$q_y = \frac{J\ddot{\theta}}{f_z} - (h \cos \theta + r) \frac{f_y}{f_z} - h \sin \theta$$

$$f_y = M(\underbrace{v\omega + h\omega^2 \sin \theta}_{\text{遠心力成分}} - \underbrace{h\ddot{\theta} \cos \theta}_{\text{回転運動成分}})$$

$$f_z = M(\underbrace{g}_{\text{自重}} - \underbrace{h\ddot{\theta} \sin \theta}_{\text{回転運動成分}})$$

$$\ddot{\theta} = 0 \quad \& \quad q_y = 0$$



## 従来手法によるロール角指令

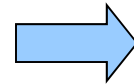
$$\theta_{ref} = -\frac{v_{ref} \omega_{ref}}{\frac{h}{h+r} g + h \omega_{ref}^2}$$

俊敏な旋回動作  $\ddot{\omega}_{ref} \gg 0 \Rightarrow \ddot{\theta}_{ref} \gg 0$

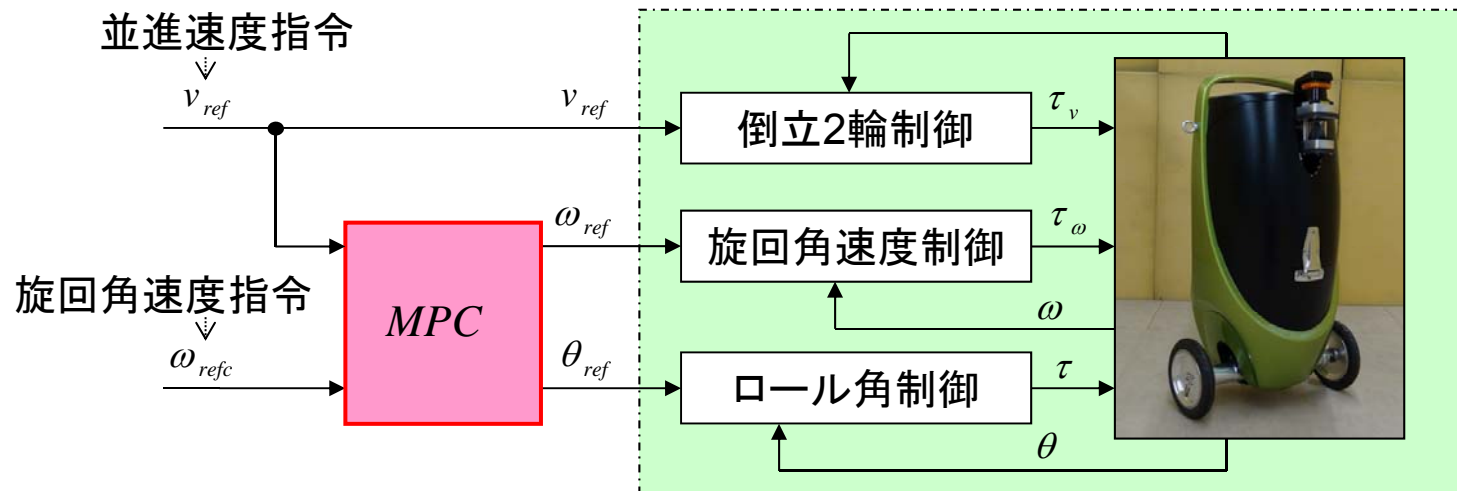
ZMPの変化増大  $\Rightarrow$  姿勢安定性の低下 = 転倒

# 提案手法の概要

要求事項： 旋回応答性向上 & ZMPへの上下限制約 の両立



モデル予測制御(MPC)の適用



目的関数

$$V[k] = \underbrace{(\Omega_{refc} - \Omega_{ref})^T Q_1 (\Omega_{refc} - \Omega_{ref})}_{\text{旋回角速度の偏差最小化}} + \underbrace{Y_{zmp}^T Q_2 Y_{zmp}}_{\text{ZMPの最小化}}$$

旋回角速度の偏差最小化

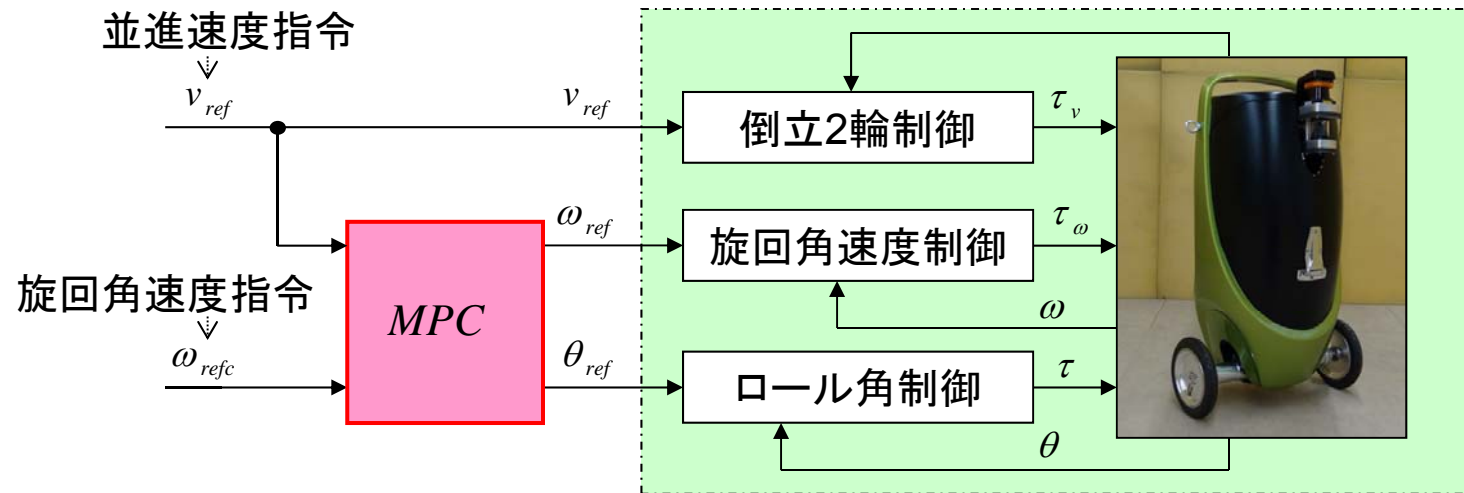
ZMPの最小化

不等式制約

$$Y_{\min} \leq Y_{zmp} \leq Y_{\max}$$

ZMPへの上下限制約

# 予測モデルの状態方程式



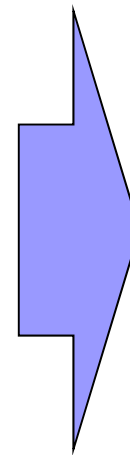
## 予測モデル

(a) ロール角制御系の応答モデル

$$\frac{\theta(s)}{\theta_{ref}(s)} = \frac{\omega_r^2}{s^2 + 2\zeta\omega_r s + \omega_r^2} \cdot \frac{\omega_r}{s + \omega_r}$$

(b) 旋回角速度制御系の応答モデル

$$\frac{\omega(s)}{\omega_{ref}(s)} = e^{-T_s s} \quad T_s : \text{サンプリング周期}$$



$$X[k+1] = AX[k] + B \begin{bmatrix} \theta_{ref}[k] \\ \omega_{ref}[k] \end{bmatrix}$$

$$X[k] = [\ddot{\theta}[k] \quad \dot{\theta}[k] \quad \theta[k] \quad \omega[k]]^T$$

ロール角加速度

ロール角度

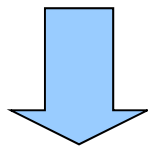
旋回角速度

# ZMP方程式の線形化



ZMP方程式

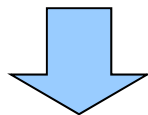
$$\frac{q_y}{\text{ZMP}} = \frac{J\ddot{\theta}}{f_z} - (h \cos \theta + r) \frac{f_y}{f_z} - h \sin \theta \quad \begin{cases} f_y = M(v\omega + h\omega^2 \sin \theta - h\ddot{\theta} \cos \theta) \\ f_z = M(g - h\ddot{\theta} \sin \theta) \end{cases}$$



非線形 → 非線形モデル予測制御は計算負荷大

線形化のための仮定

- $\theta \ll 1$  ... ロール姿勢角は小さい（可動範囲 $\pm 0.24$  rad）
- $g = g - h\ddot{\theta} \sin \theta$  ... Z軸方向の回転角加速度成分は重力加速度に比べて小さい
- $v = v_{ref}$  ... 実速度は予測区間で指令と一致
- $\omega^2 = \omega_{refc}^2$  ... 旋回角速度<sup>2</sup> は予測区間で旋回角速度指令<sup>2</sup>と一致



$$\frac{q_y}{\text{ZMP}} = \frac{(h+r)v_{ref}}{g} \cdot \omega + \frac{h(h+r) + \frac{J}{M}}{g} \cdot \ddot{\theta} - \left( h + \frac{(h+r)h\omega_{refc}^2}{g} \right) \cdot \theta$$

→  $\omega$   $\ddot{\theta}$   $\theta$  の1次関数で記述 ⇒ 線形モデル予測制御が可能

# モデル予測制御による最適化計算



$N_p$  ステップの予測値を入力信号  $U[k]$  の1次関数で獲得

$$\text{ZMPの予測値} : Y_{zmp} = \begin{bmatrix} q_y[k+1] \\ q_y[k+2] \\ \vdots \\ q_y[k+N_p] \end{bmatrix} = \Psi_{zmp} X[k] + \Theta_{zmp} U[k]$$

$$\text{旋回角速度の予測値} : \Omega_{ref} = \begin{bmatrix} \omega[k+1] \\ \omega[k+2] \\ \vdots \\ \omega[k+N_p] \end{bmatrix} = \Psi_{\omega} X[k] + \Theta_{\omega} U[k]$$

将来の  $N_u$  ステップ分の  
入力信号  $\theta_{ref} \ \omega_{ref}$

$$U[k] = \begin{bmatrix} \theta_{ref}[k] \\ \omega_{ref}[k] \\ \vdots \\ \theta_{ref}[k+N_u] \\ \omega_{ref}[k+N_u] \end{bmatrix}$$

目的関数

$$V[k] = (\Omega_{refc} - \Omega_{ref})^T Q_1 (\Omega_{refc} - \Omega_{ref}) + Y_{zmp}^T Q_2 Y_{zmp} \quad \longrightarrow \quad U[k] \text{ の2次形式}$$

$$\text{不等式制約} \quad Y_{\min} \leq Y_{zmp} \leq Y_{\max} \quad \longrightarrow \quad U[k] \text{ の1次不等式}$$

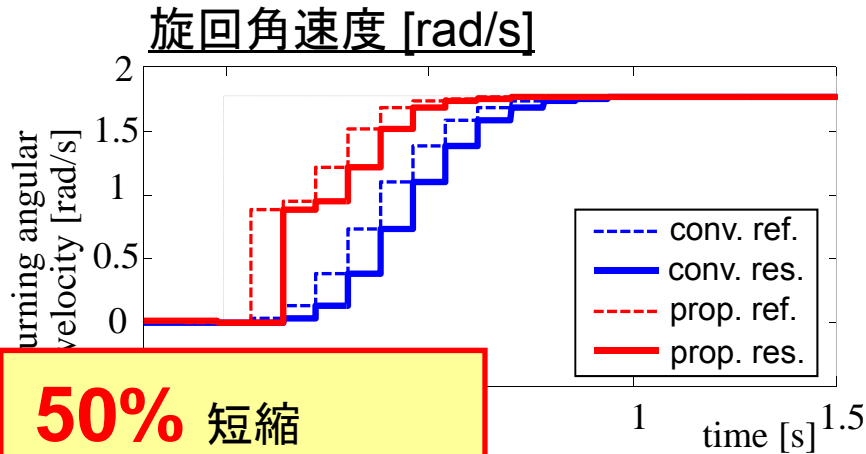
不等式制約付き2次計画問題  $\Rightarrow$  毎サンプリング周期に計算

$\longrightarrow$  実際には... 状態不連続性抑制 + ロール軸可動範囲、トルク上下限 を考慮



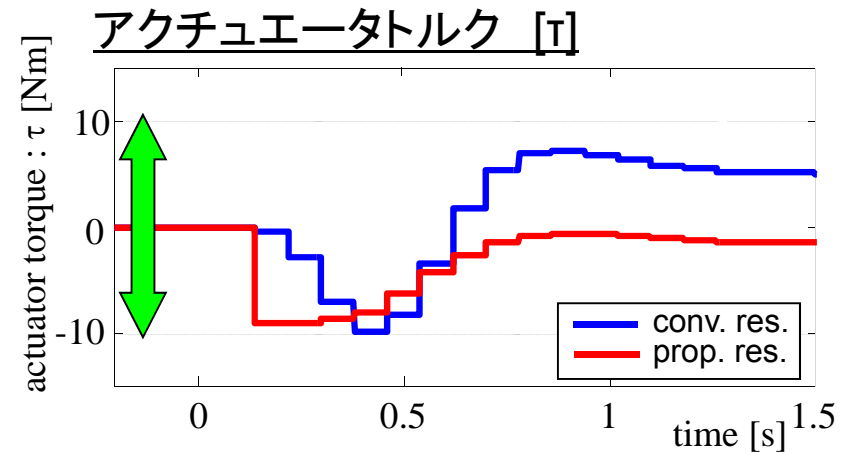
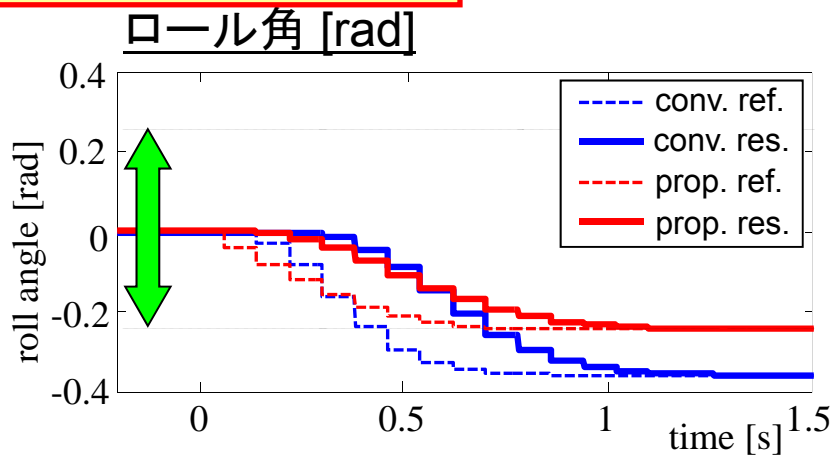
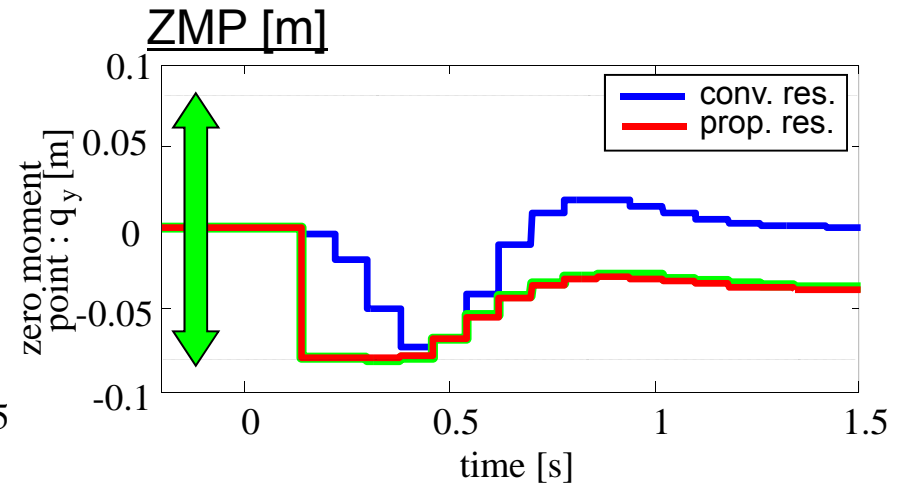
# シミュレーション結果 : 0.3G旋回

$v = 1.667 \text{ m/s}$  (= 時速 6km)     $\omega = 0 \rightarrow 1.766 \text{ rad/s}$  : **0.3G** 旋回



**50% 短縮**

(指令値の50%に到達した時間)



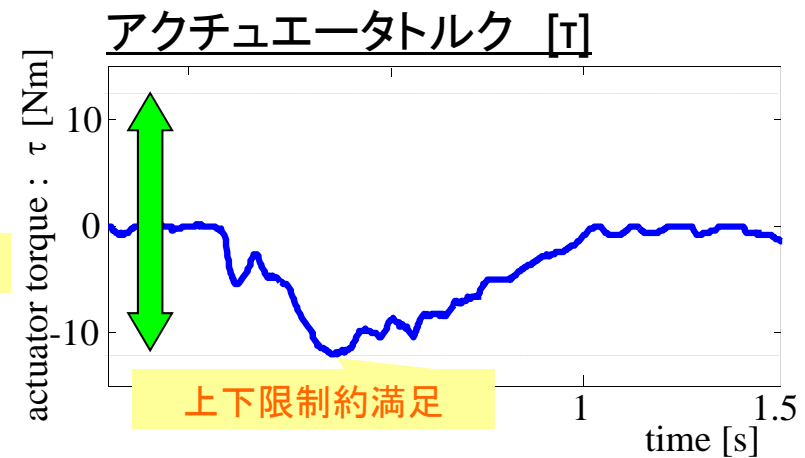
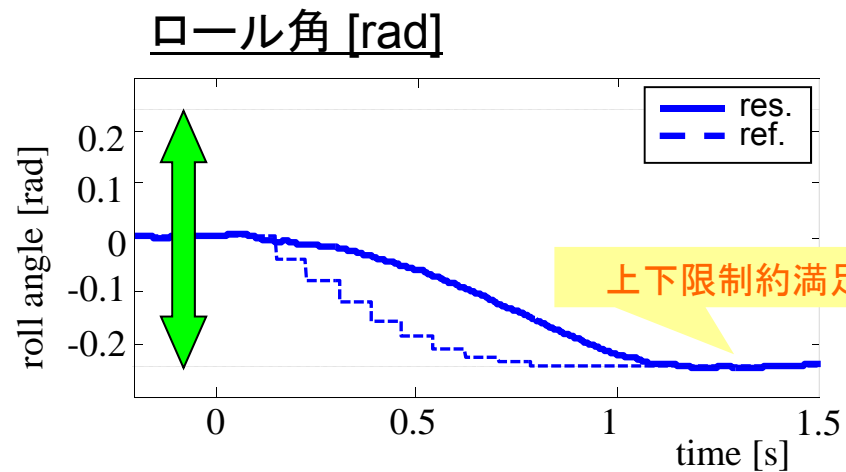
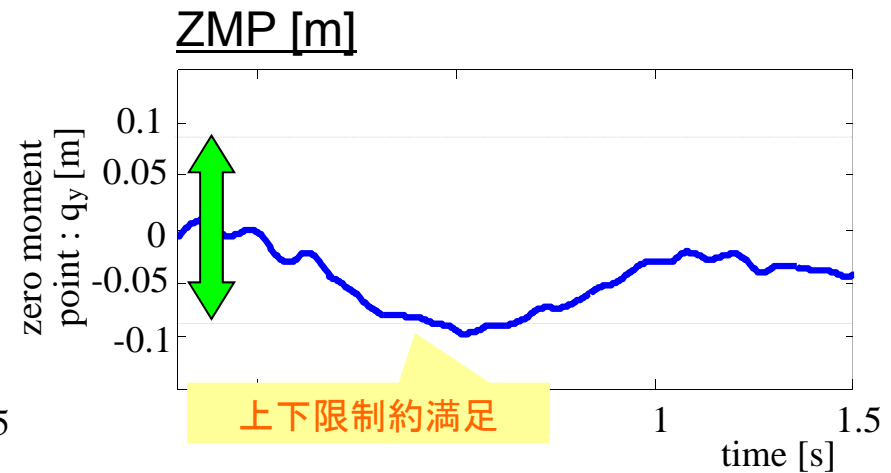
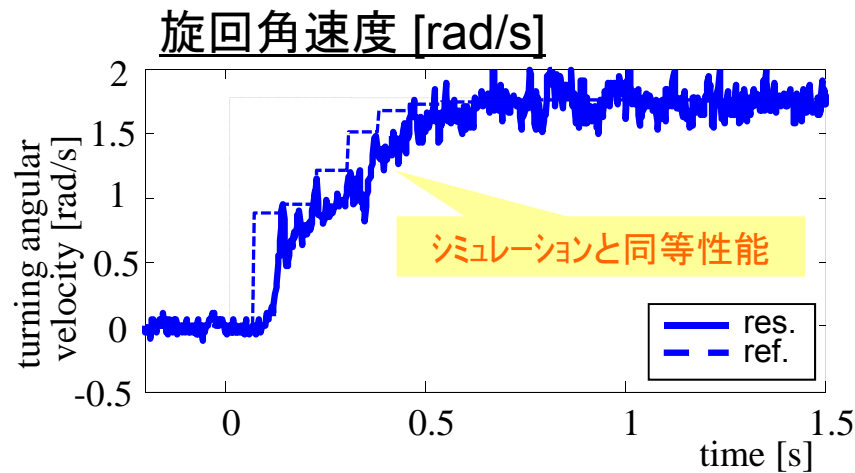
# 実験動画 : 0.3G旋回



# 実験結果 : 0.3G旋回



$v = 1.667 \text{ m/s}$  (= 時速 6km)     $\omega = 0 \rightarrow 1.766 \text{ rad/s}$  : **0.3G** 旋回



# 実験動画：自由走行（最大0.4G）



# 実験動画 : ヒト追従実験

## 従来手法



ヒト歩行速度  
4.0 km/h

⇒ 蛇行走行  
(オーバーシュート、  
アンダーシュート)

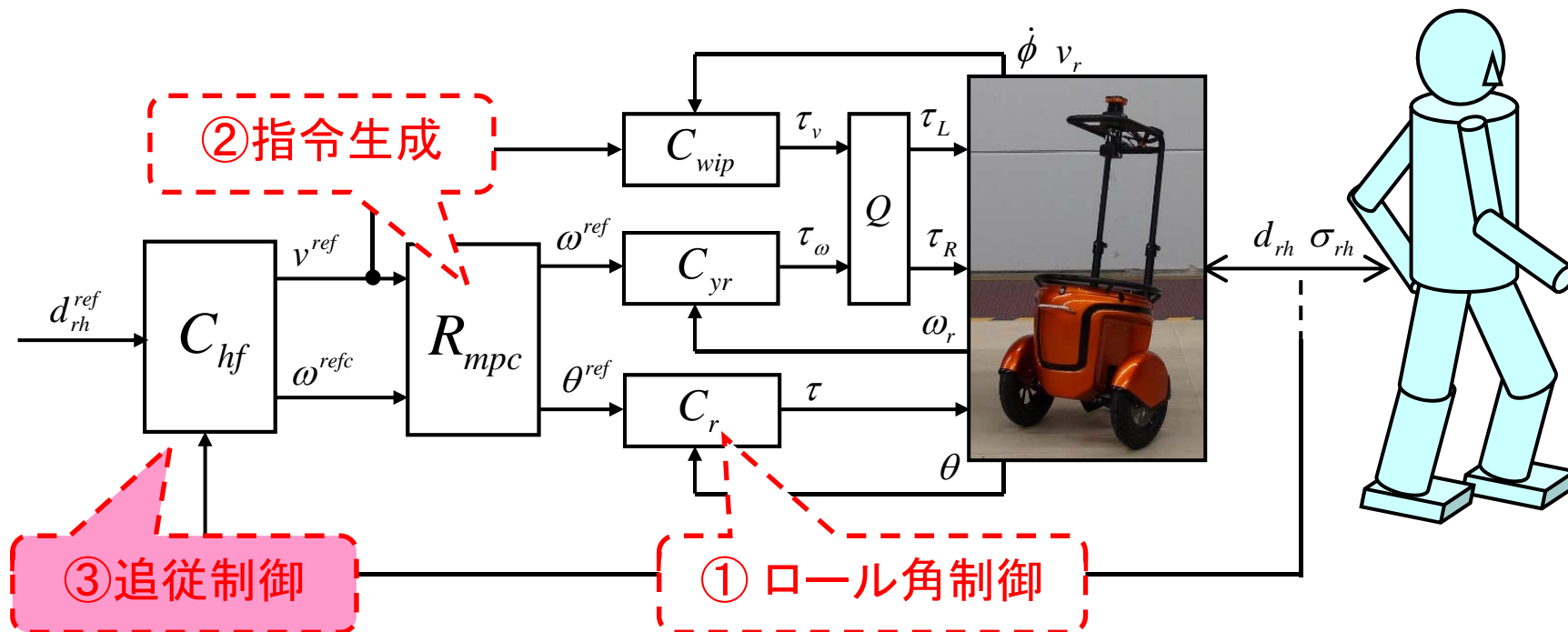
## 提案手法



⇒ スムーズ  
蛇行なし

# 制御システム構成

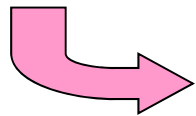
## Feedback Control System for Personal Robot



# 追従制御への要求事項



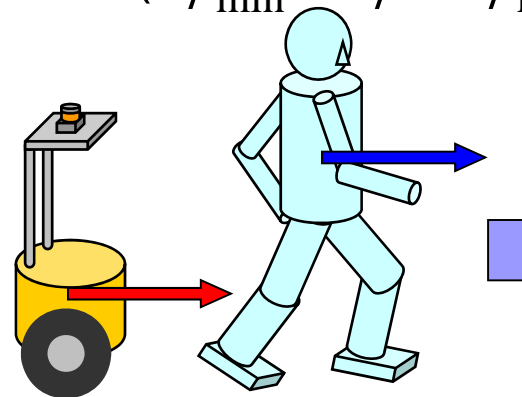
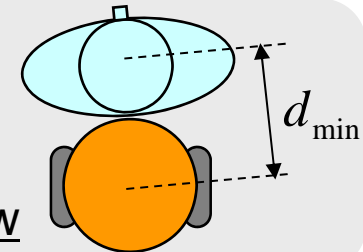
Target : **Adjacent Following with guarantee of No collision and No rollover**



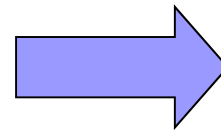
## ■ Requirements

- Close relative distance
- No collision (  $d_{rh} > d_{min}$  )
- Upper and Lower boundaries for Pitch Angle (  $\phi_{min} \leq \phi \leq \phi_{max}$  )

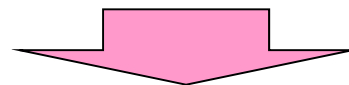
Top View



Close relative distance



Sudden stop!!



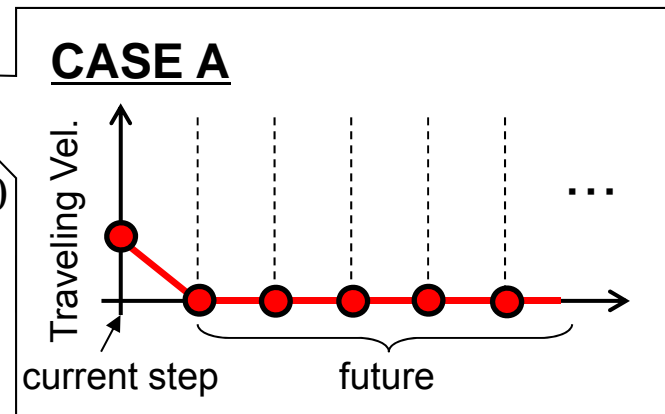
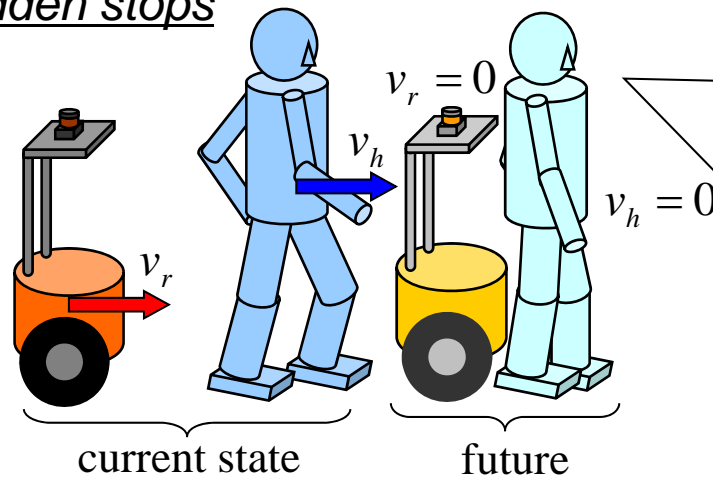
**Model Predictive Control**



# 従来のモデル予測制御の課題

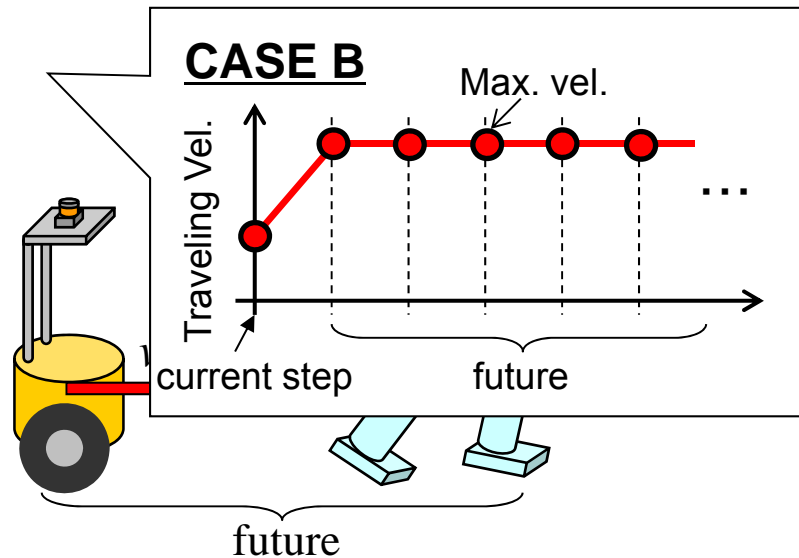
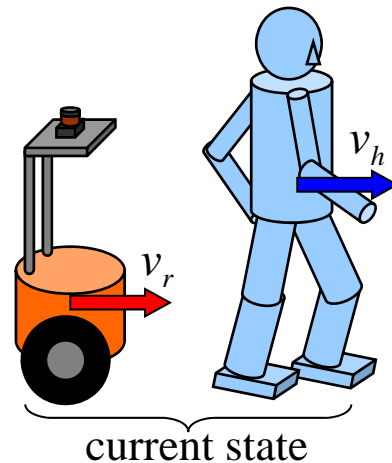
Subject : Human's behavior in the future is unknown

[a] Sudden stops



rol  
ediction

[b] Acceleration to Maximum Vel.



# Multiple Future Prediction



$$\text{Human model : } x_h[k+1] = x_h[k] + T_s v_h[k]$$

$x_h$  : human position

$v_h$  : human velocity

$T_s$  : sampling period

$$\text{Robot model : } x_{ro}[k+1] = A_r x_{ro}[k] + B_r v^{ref}[k]$$

$x_r$  : robot position

$\phi$  : pitch angle

$$x_r[k] = C_r x_{ro}[k]$$

$$\phi[k] = C_\phi x_{ro}[k]$$

## Case A : Sudden stops

$$X_{ha} = \sum_h x_h[k] + \Gamma_h v_h[k]$$

$$X_{ra} = \sum_r x_r[k] + \Theta_r V_a$$

$$D_{rha} = X_{ha} - X_{ra}$$

$$\Phi_a = \sum_\phi x_r[k] + \Theta_\phi V_a$$

$$V_a = [v_a[k] \quad v_a[k+1] \quad \dots \quad v_a[k+N]]$$

: reference of traveling velocity for case A

$\Phi_a$  : predicted pitch angle for case A

## Case B : Acceleration to Maximum Vel.

$$X_{hb} = \sum_h x_h[k] + \Gamma_h v_h[k] + \Theta_h v_{\max}$$

$$X_{rb} = \sum_r x_r[k] + \Theta_r V_b$$

$$D_{rhb} = X_{hb} - X_{rb}$$

$$\Phi_b = \sum_\phi x_r[k] + \Theta_\phi V_b$$

$v_{\max}$  : assumed maximum velocity

$$V_b = [v_b[k] \quad v_b[k+1] \quad \dots \quad v_b[k+N]]$$

: reference of traveling velocity for case B

$\Phi_b$  : predicted pitch angle for case B

# Optimization Problem



## Cost function

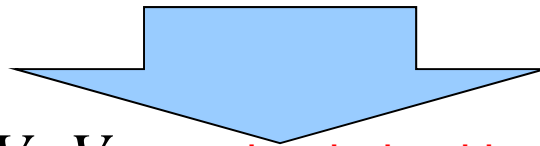
$$\underset{V^{refa} \quad V^{refb}}{\text{minimize}} \quad J = \begin{bmatrix} D_{rha} & D_{rhb} \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} D_{rha} & D_{rhb} \end{bmatrix}$$

## Inequality constraint

$$D_{\min} \leq \begin{bmatrix} D_{rha} & D_{rhb} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{\min} \leq \begin{bmatrix} \Phi_a & \Phi_b \end{bmatrix} \leq \Phi_{\max}$$

$\Phi_a$  : predicted pitch angle for case A  
 $\Phi_b$  : predicted pitch angle for case B



Variable vectors  $V_a \quad V_b$  can be derived by solving QP problem

$$V_a = \begin{bmatrix} v_a[k] & v_a[k+1] & \cdots & v_a[k+N] \end{bmatrix}$$

$$V_b = \begin{bmatrix} v_b[k] & v_b[k+1] & \cdots & v_b[k+N] \end{bmatrix}$$

*Independent current control inputs*

Additional equality constraint  $v^{ref} = v_a[k] = v_b[k]$

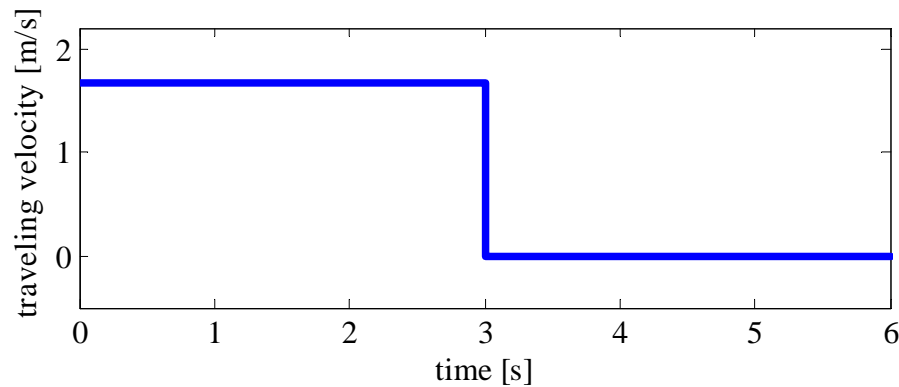
$v^{ref}$  : actual control input

# Simulation Results (6km/h)

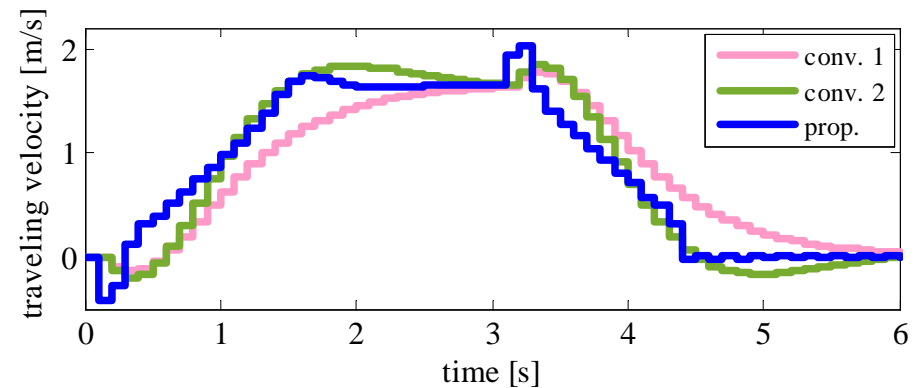


*Simulation condition* : straight walking at **6km/h** and sudden stop

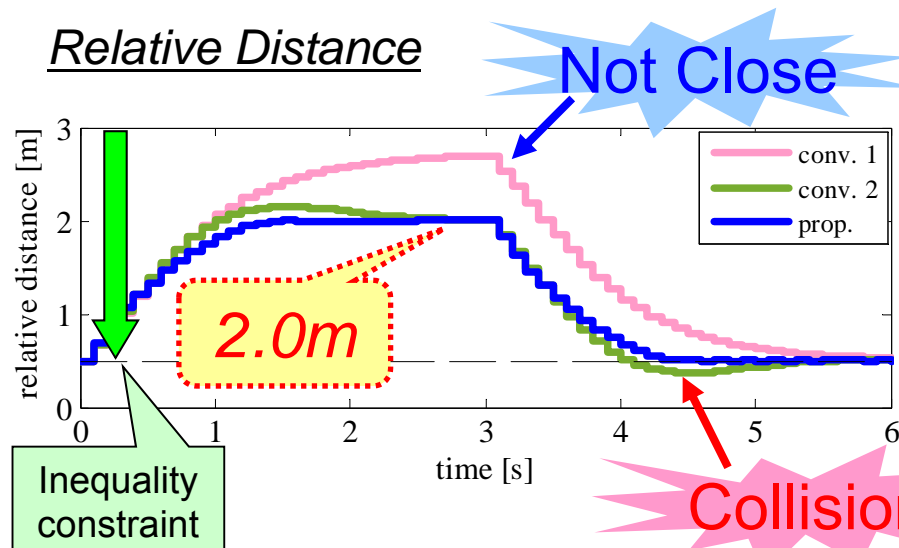
Human Traveling Velocity



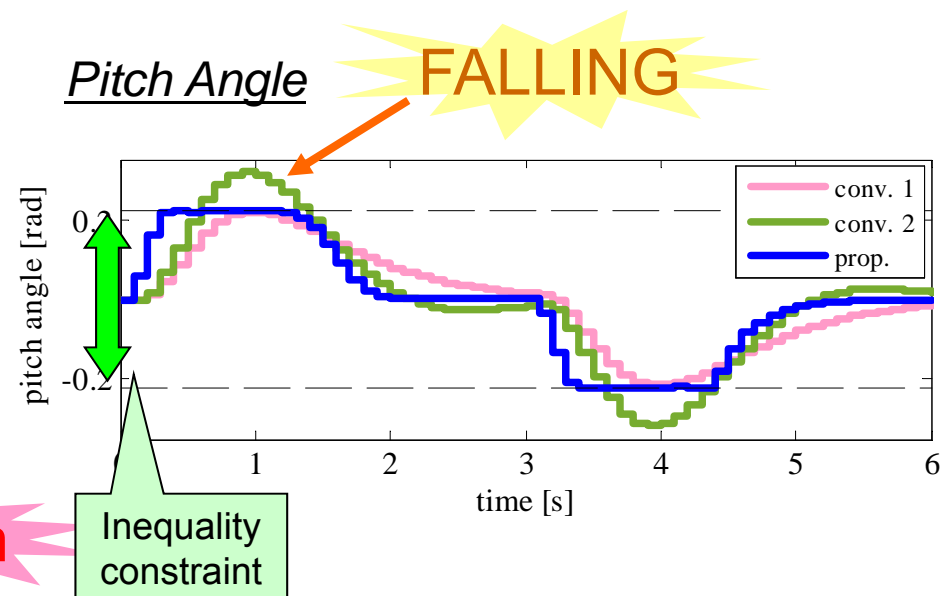
Robot Traveling Velocity



Relative Distance



Pitch Angle

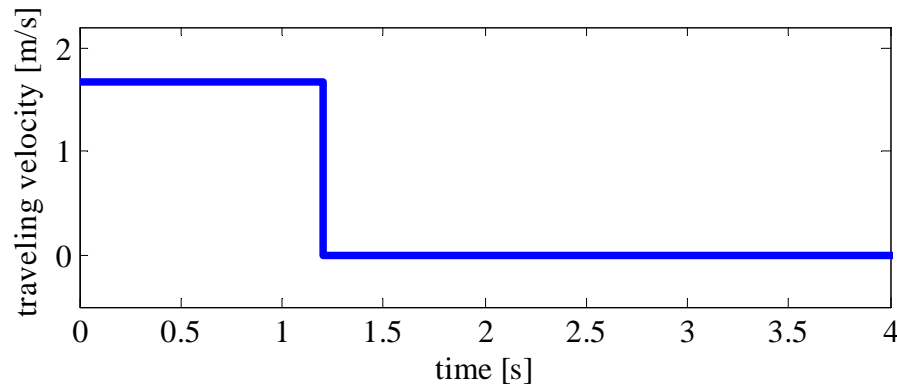


# Simulation Results (6km/h)

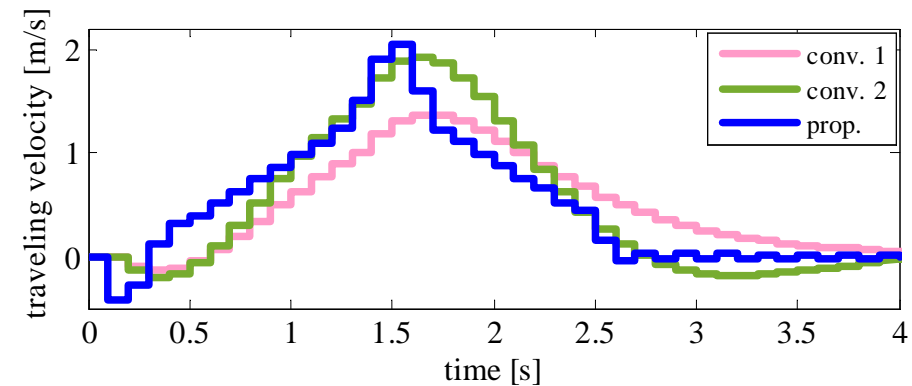


*Simulation condition* : straight walking at **6km/h** and sudden stop

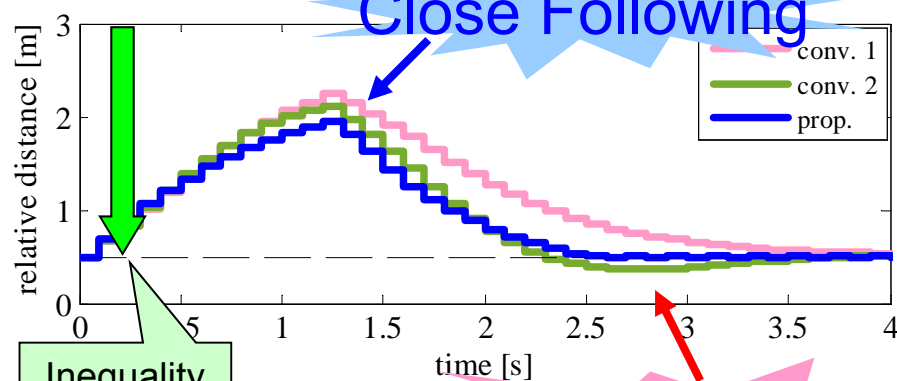
Human Traveling Velocity



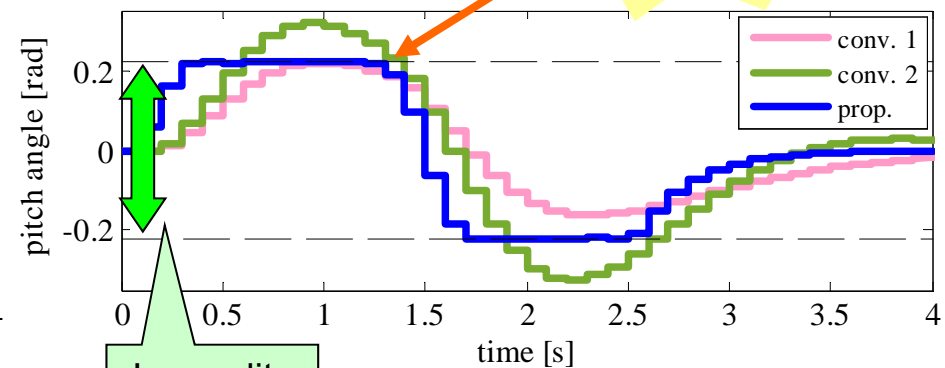
Robot Traveling Velocity



Relative Distance

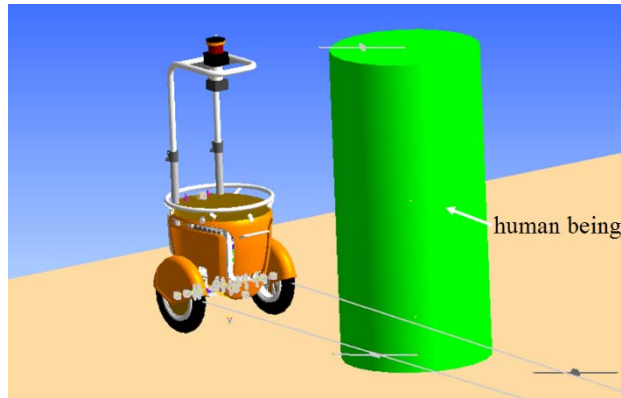


Pitch Angle



# Simulation with Multibody Dynamics Model

TOYOTA CRDL, INC.

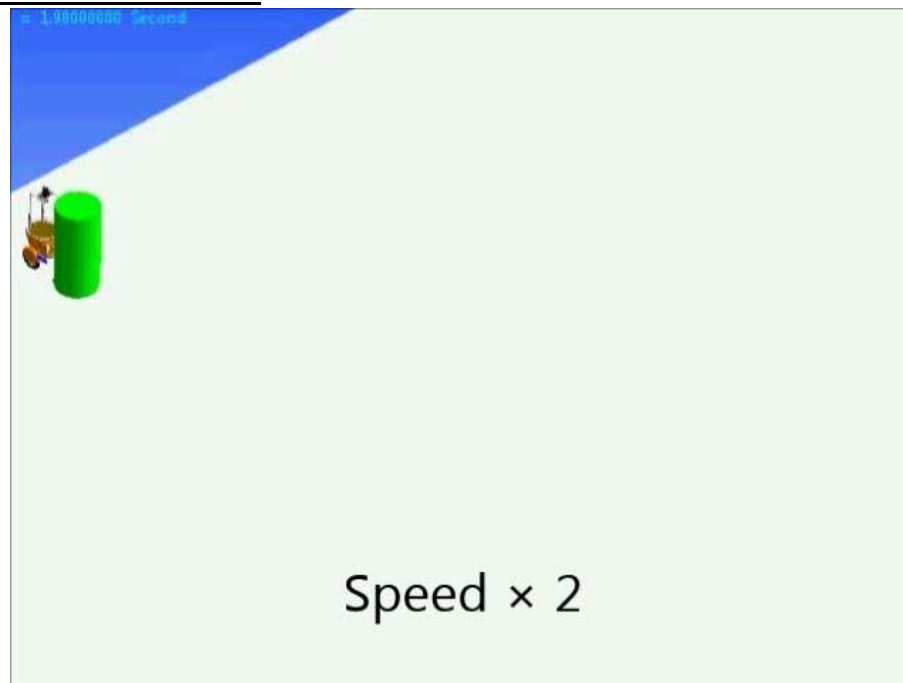


Multibody Dynamics Model by 3D drawing sheet

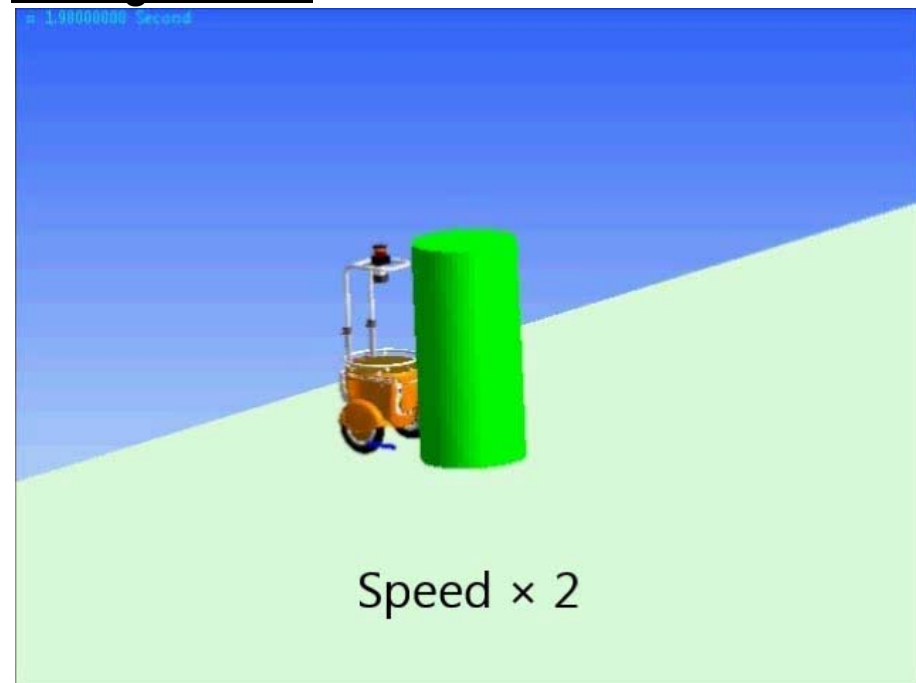
- 20 rigid bodies
- 9 revolution joints
- 3 input forces
- 2 contact definitions

Green Cylinder : Human being model

Overall view



Enlarged view

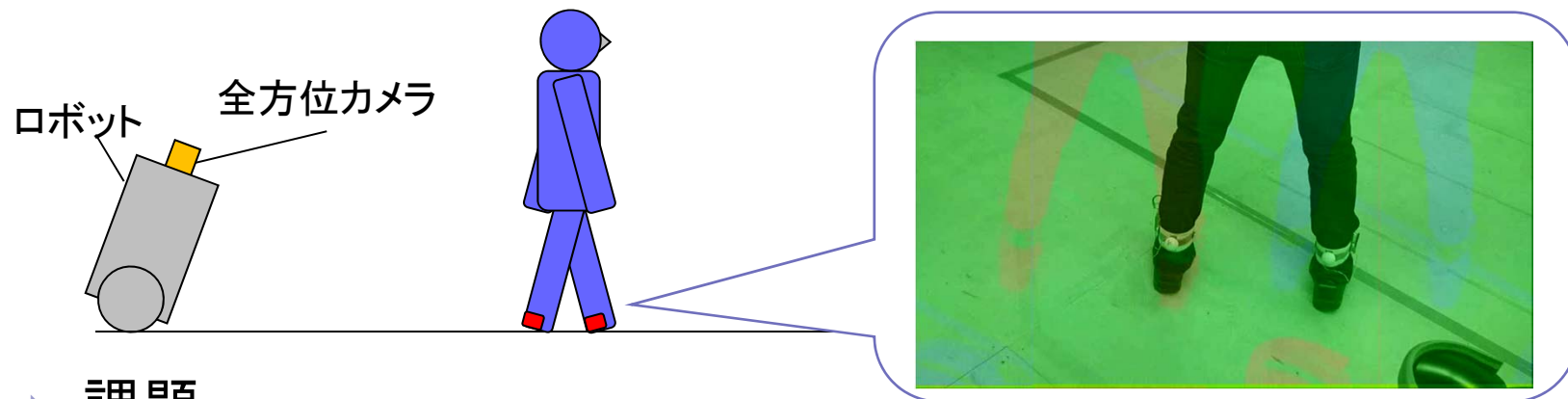


# 付録1: ヒト検出、追跡

## ■ レーザ距離センサ

- ▶ × ユーザの識別
- ▶ × コスト

## ■ アクティブマーカ+全方位カメラ



### ▶ 課題:

- ▶ カメラサンプリング周期大
- ▶ カメラサンプリング周期のばらつき大

マーカとカメラの同期困難

➡ パーティクルフィルタを用いた識別手法開発



# 付録1: 人追従実験

## ▶ 結果:

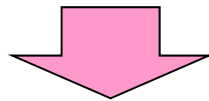


➡ ロボットによる個人識別を実現

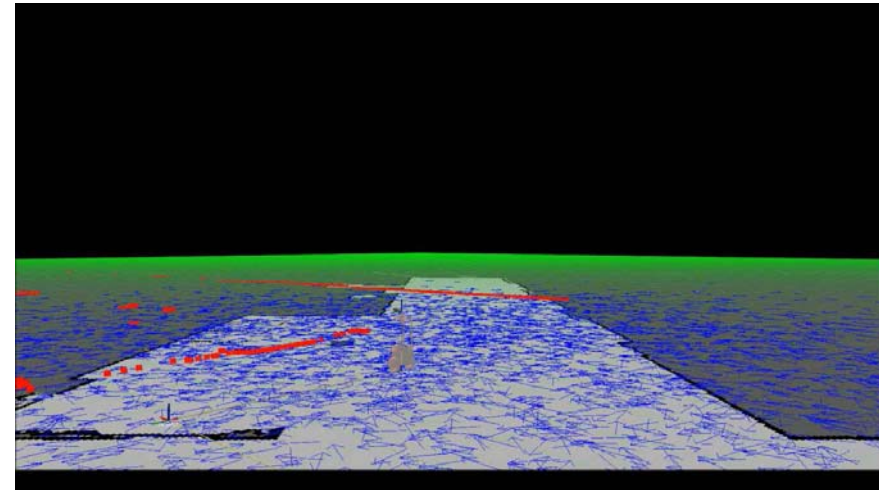
# 付録2: 自己位置推定



道案内機能の開発



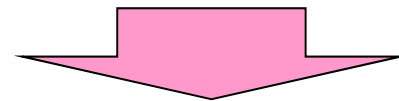
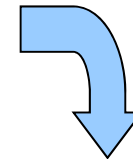
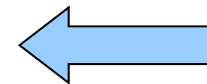
自律移動制御  
(自己位置推定)



- 俊敏な姿勢変化によるセンサーデータのゆれ

- 豊富ではない計算資源

3次元地図の利用

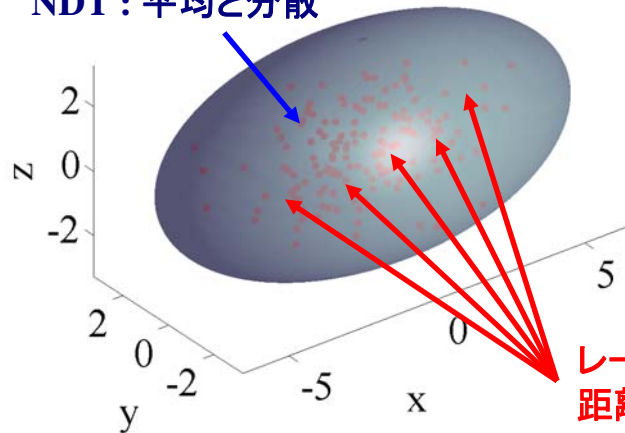


**輝度(レーザの反射強度)付き多次元正規分布を用いた  
3次元地図による位置推定(NDT-I MCL)**

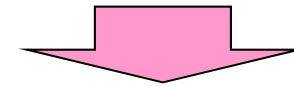
# 付録2: 特徴

NDT(Normal Distribution Transform) とは

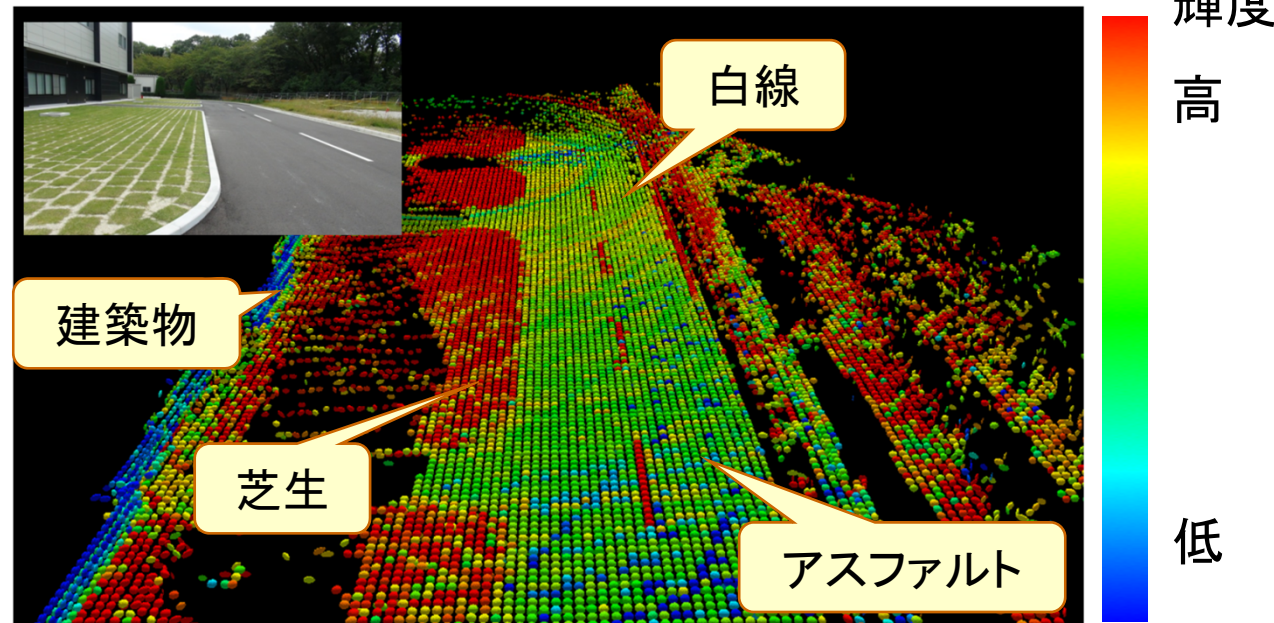
NDT: 平均と分散



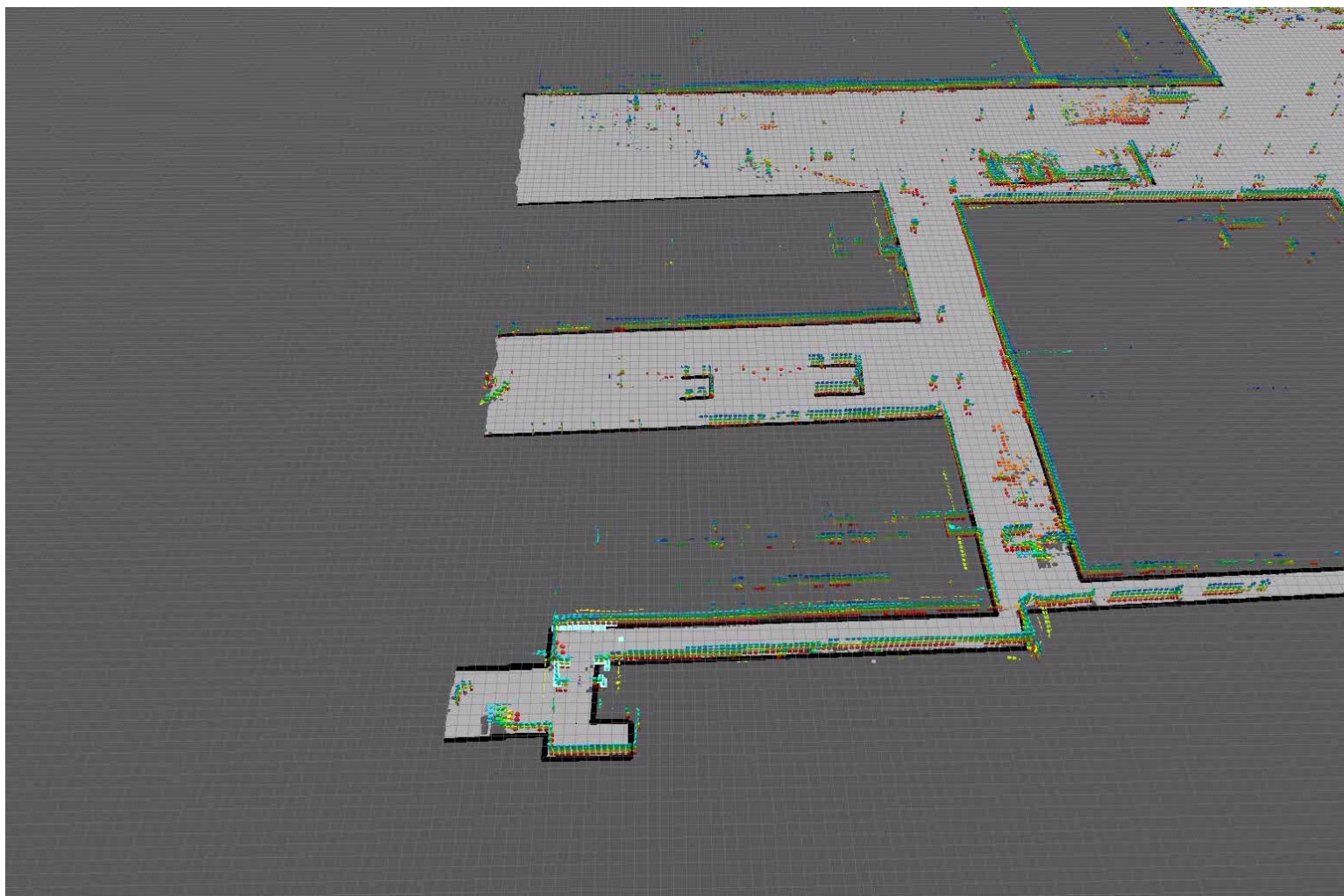
- NDT\*<sup>1</sup>では、ある一定範囲の距離計測結果に対し、位置の平均と分散を計算し、その平均分散で表される多次元正規分布を位置推定の特徴とする。



レーザセンサによる距離計測結果 輝度情報によってパーティクルの重み計算



# 付録2: 実験動画



# まとめ

## ■ まとめ

- ヒトに追従するパーソナルロボットの提案
  - 横加速度フィードバック制御
  - モデル予測制御による指令軌道生成
  - モデル予測制御による追従制御法

## ■ 今後の課題

- 実証実験など



# 文献リスト(パーソナルロボットの制御)

TOYOTA CRDL, INC.

- **廣瀬徳晃**、津坂祐司、清水毅、山内智裕、白石孝、谷中壯弘、"リーニング機構を有するパーソナルモビリティのロール運動モデルと姿勢安定化制御の提案", 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826, pp.1-12, 2015
- **廣瀬徳晃**、但馬竜介、鋤柄和俊、小山渚、田中稔、伊藤誠悟、"モデル予測制御に基づくパーソナルロボットの姿勢安定化制御" 電気学会論文誌D, Vol. 134, No.3, pp.172-181, 2015
- 小山渚、但馬竜介、田中稔、**廣瀬徳晃**、鋤柄和俊、藤井亮暢、"ヒトを活動的にする移動支援ロボット-IDを発信する赤外LEDタグと全方位カメラを用いた利用者の追跡-" 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.1, pp.49-56, 2015
- **廣瀬徳晃**、但馬竜介、鋤柄和俊、津坂祐司、"横加速度フィードバックによるパーソナルロボットの姿勢安定化制御" 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.2, pp.163-171, 2014
- **廣瀬徳晃**、但馬竜介、鋤柄和俊、津坂祐司、"不安定極を有するフィードバック補償を用いた小型移動体の姿勢安定化制御", 電気学会論文誌D, Vol.133, No.3, pp.282-289, 2013
  
- **N. Hirose**, R. Tajima, and K. Sukigara, "Personal Robot Assisting Transportation to Support Active Human Life - Following Control based on Model Predictive Control with Multiple Future Predictions-" Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), pp.5395-5402, 2015
- **N. Hirose**, R. Tajima, and K. Sukigara, "Personal Robot Assisting Transportation to Support Active Human Life - Human-Following method based on Model Predictive Control for Adjacency without Collision-" Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics(ICM), pp.76-81, 2015
- **N. Hirose**, R. Tajima, and K. Sukigara, "Personal Robot Assisting Transportation to Support Active Human Life - Reference Generation based on Model Predictive Control for Robust Quick Turning -" Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.2223-2230, 2014
- **N. Hirose**, R. Tajima, and K. Sukigara, "Personal Robot Assisting Transportation to Support Active Human Life - Posture Stabilization based on Feedback Compensation of Lateral Acceleration -" Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), pp.659-664, 2013
- **N. Hirose**, R. Tajima, K. Sukigara, and Y. Tsusaka, "Posture Stabilization for a Personal Mobility Robot using Feedback Compensation with an Unstable Pole" Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics(ICM), pp.804-809, 2013