

# 三足歩行機械の設計について



石川将人  
京都大学 情報学研究科.

2007年3月6日  
第7回制御部門大会

# 発表の構成

1. 三足歩行の考え方
  - 三足らしさとは何か？
  - 二足から三足へ...円と球のアナロジー
2. Surface Walker とその運動原理
3. コンパス型三足歩行機械
4. おわりに

# 1. 先行研究（の反省）

- 三足歩行機械—二足より静的に安定，四足より軽量なロボットを期待
1. 入江，伊藤，広瀬'00
    - 直動アクチュエータ型三足歩行ロボット
    - GA を用いて脚の振り上げパターンを探索
  2. 興梠，石川，杉江'05
    - 十分な自由度を持った足を交互に出す Full Model

# 1. 先行研究（の反省）

- 三足歩行機械—二足より静的に安定，四足より軽量なロボットを期待
1. 入江，伊藤，広瀬'00
    - 直動アクチュエータ型三足歩行ロボット
    - GA を用いて脚の振り上げパターンを探索
  2. 興梠，石川，杉江'05
    - 十分な自由度を持った足を交互に出す Full Model  
.....発想がよくなかったのでは？

# 1. 先行研究（の反省）

- 三足歩行機械—二足より静的に安定，四足より軽量なロボットを期待

## 1. 入江，伊藤，広瀬'00

- 直動アクチュエータ型三足歩行ロボット
- GA を用いて脚の振り上げパターンを探索

## 2. 興梠，石川，杉江'05

- 十分な自由度を持った足を交互に出す Full Model  
.....発想がよくなかったのでは？
- 各脚 2 自由度 + 胴部のツイスト 1 自由度の Constrained Model

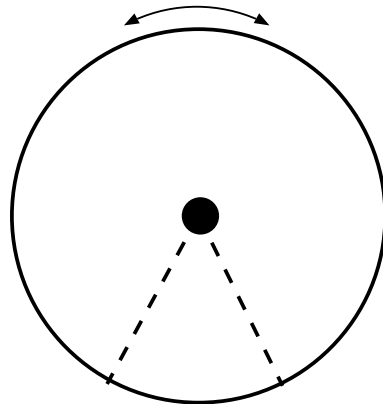
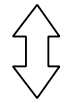
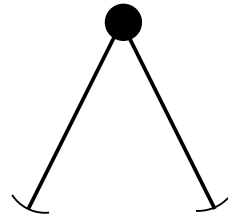
# 1. 本研究の目的

目的は三足らしい三足歩行を実現すること

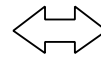
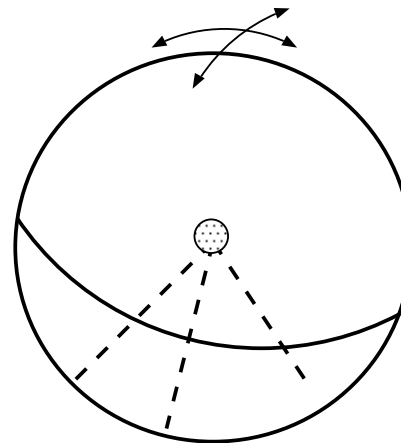
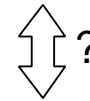
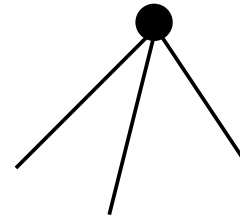
- 三足らしさとは何だろうか？
- 「足の一本余分な二足歩行」や、「簡略化された四足歩行」になってはいけない
- なるべくアクチュエータの数を減らしたい
- キーワードは**対称性**—  
左右対称なパターン（2拍子のリズム）偶数脚の歩行が

# 1. 二足から三足へ...円と球のアナロジー

Compass-type Biped



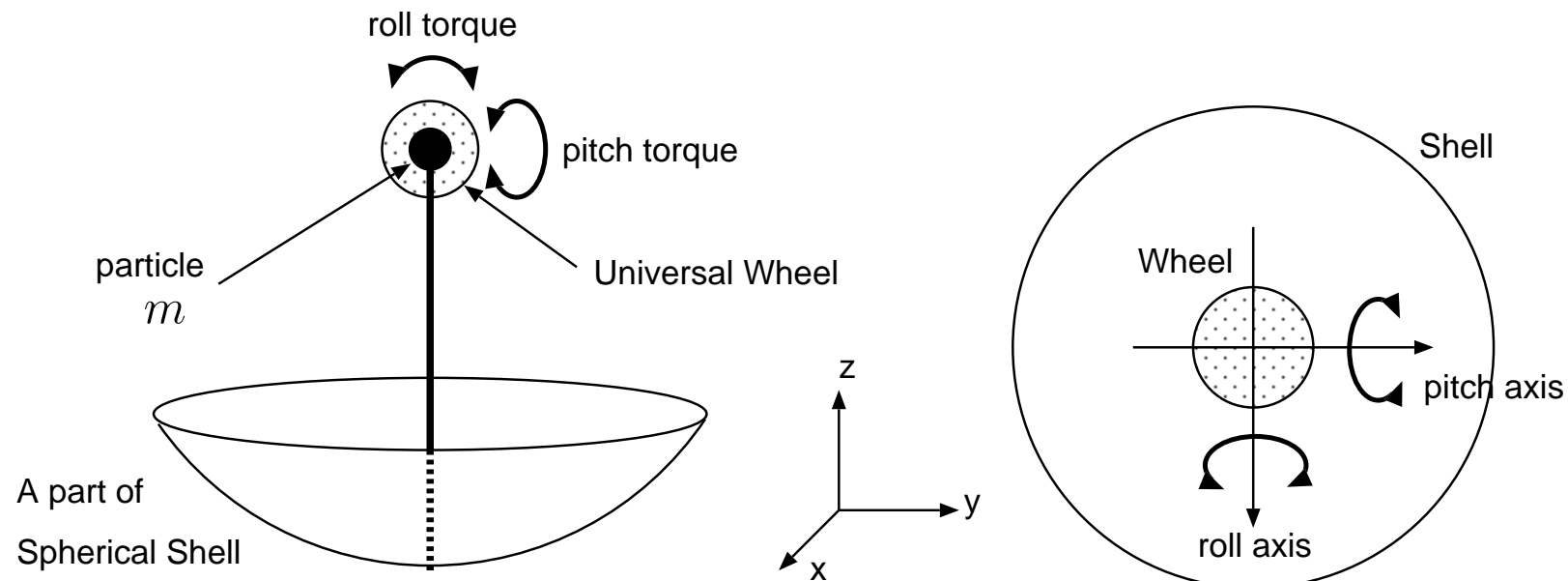
Compass-type Tripod?



- 二足受動歩行における回転車輪モデル cf. [田崎ら'05, 浅野ら'06]
- 連想： 円 ..... 球 ..... **球体操り問題**

## 2. Surface Walker

### モデル



- 脚部（底面）は半球殻状
- 中心にある胴部はロール・ピッチを駆動できるアクチュエータホイールを想定

cf.[ジャイロ駆動型球体ロボット (尾谷ら),Giga-Bowl(楠本ら), 原田ら'02]



## 2. Surface Walker における仮定

仮定 S1. 底面と床面は滑らずに転がる

転がり接触拘束  $\Rightarrow$  非ホロノミック運動学拘束

$\Rightarrow$  状態方程式

仮定 S2. 底面および中央リンクは質量を持たない

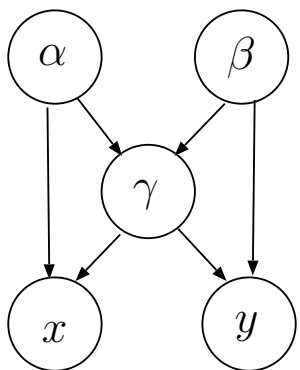
質量は胴部に集中

仮定 S3. 床面との接触点において鉛直軸周りの回転運動（スピン）は発生しない。

## 2. Surface Walker の運動学モデル

$$\begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \sin \beta & 0 \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \gamma \\ -\cos \beta \cos \gamma & \sin \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix}$$

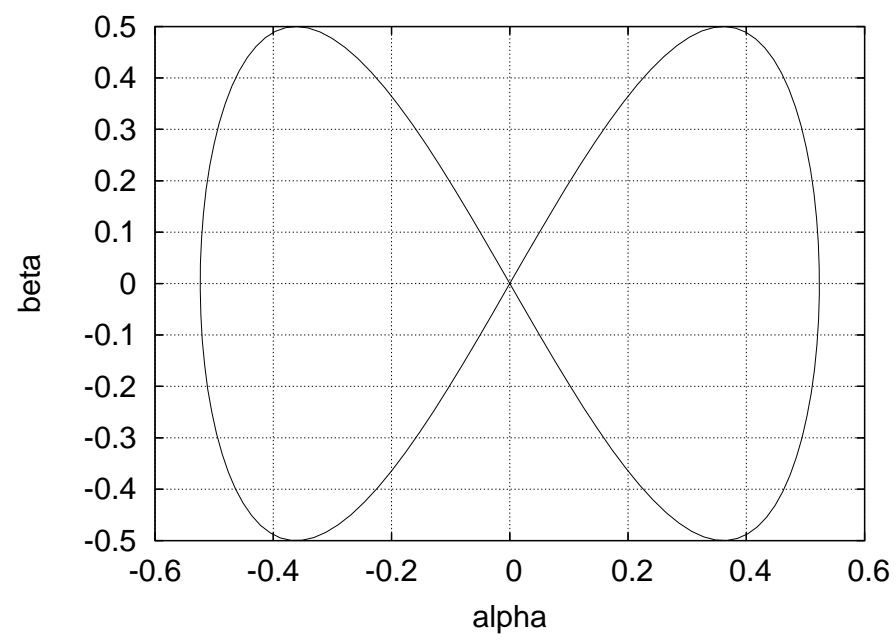
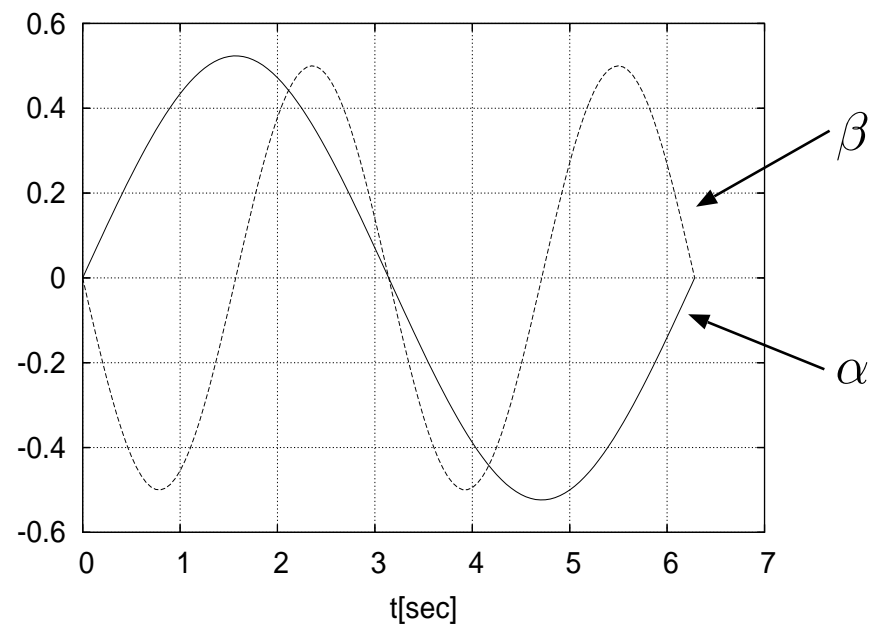
- 2gen. 2 次の可制御性構造を持つ対称アフィン系
- 本質的に球体操り問題と同じ（可動範囲に制限あり）



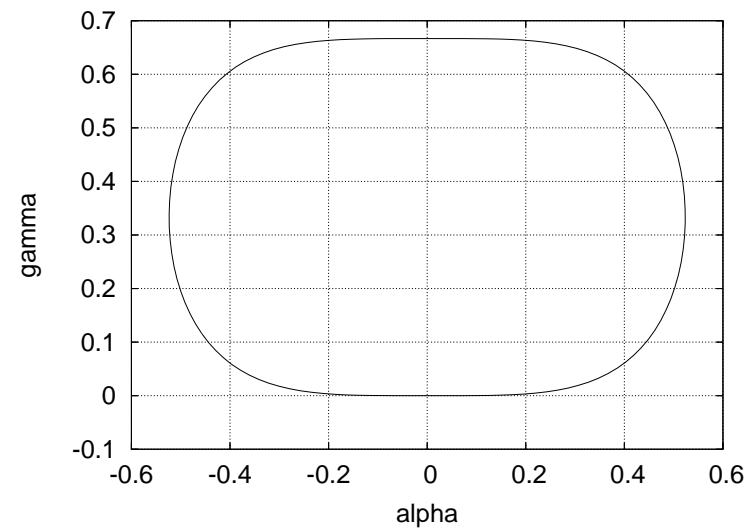
可制御性構造のイメージ (Lie 括弧積の効果)

# 2. Surface Walker の運動原理

ロール角  $\alpha$  およびピッチ角  $\beta$  を周波数比 1:2 で励振



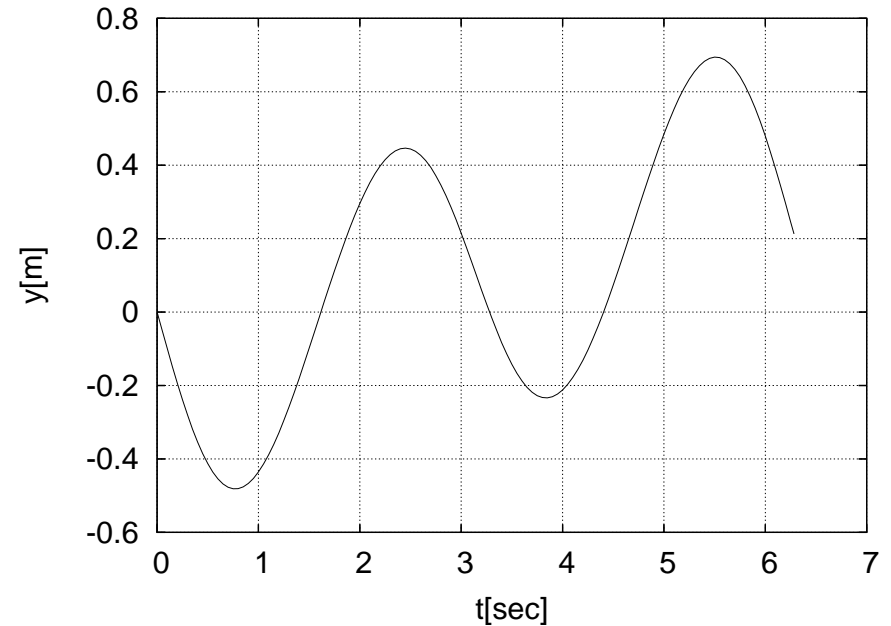
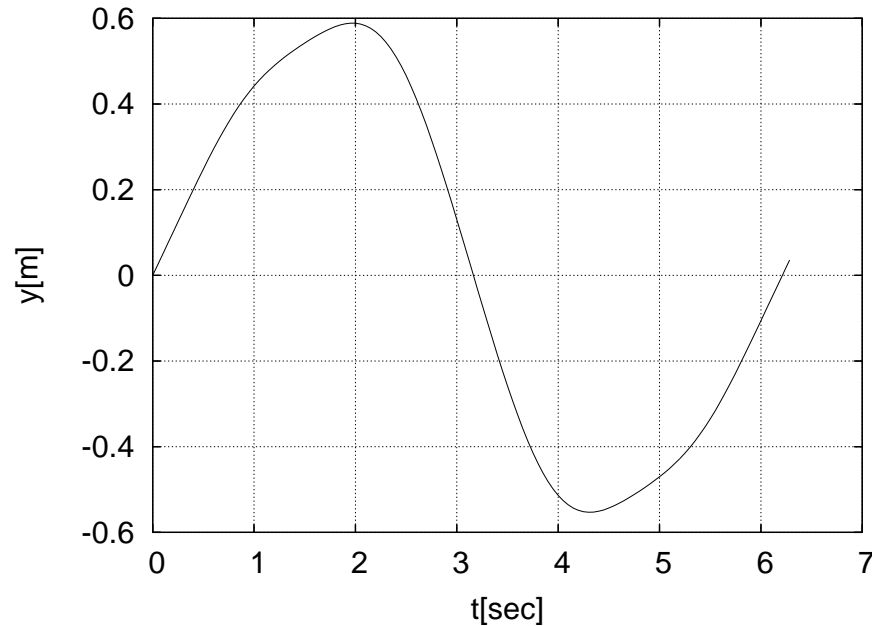
ヨー角  $\gamma$  の変化



## 2. Surface Walker の運動原理

### 位置 $(x, y)$ の変化

動画



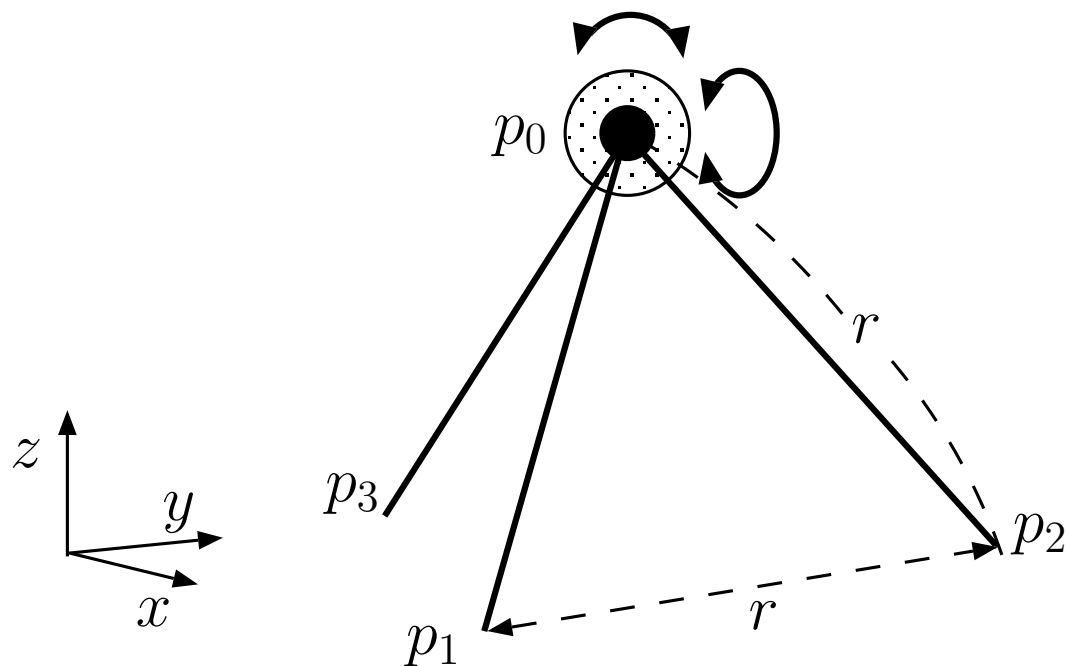
### Rough conclusion:

**ロール角を1周振る間にピッチ角を2周振ると前進する。**

- この原理を三足歩行に生かせないか？

# 3. コンパス型三足歩行機械

## モデル



- 股関節は**固定**。胴部と脚先で一辺  $r$  の四面体を構成
- 胴部のアクチュエータは Surface Walker と同じ
- 質量は胴部に集中。遊脚時は Acrobot に準ず

### 3. コンパス型三足歩行における仮定

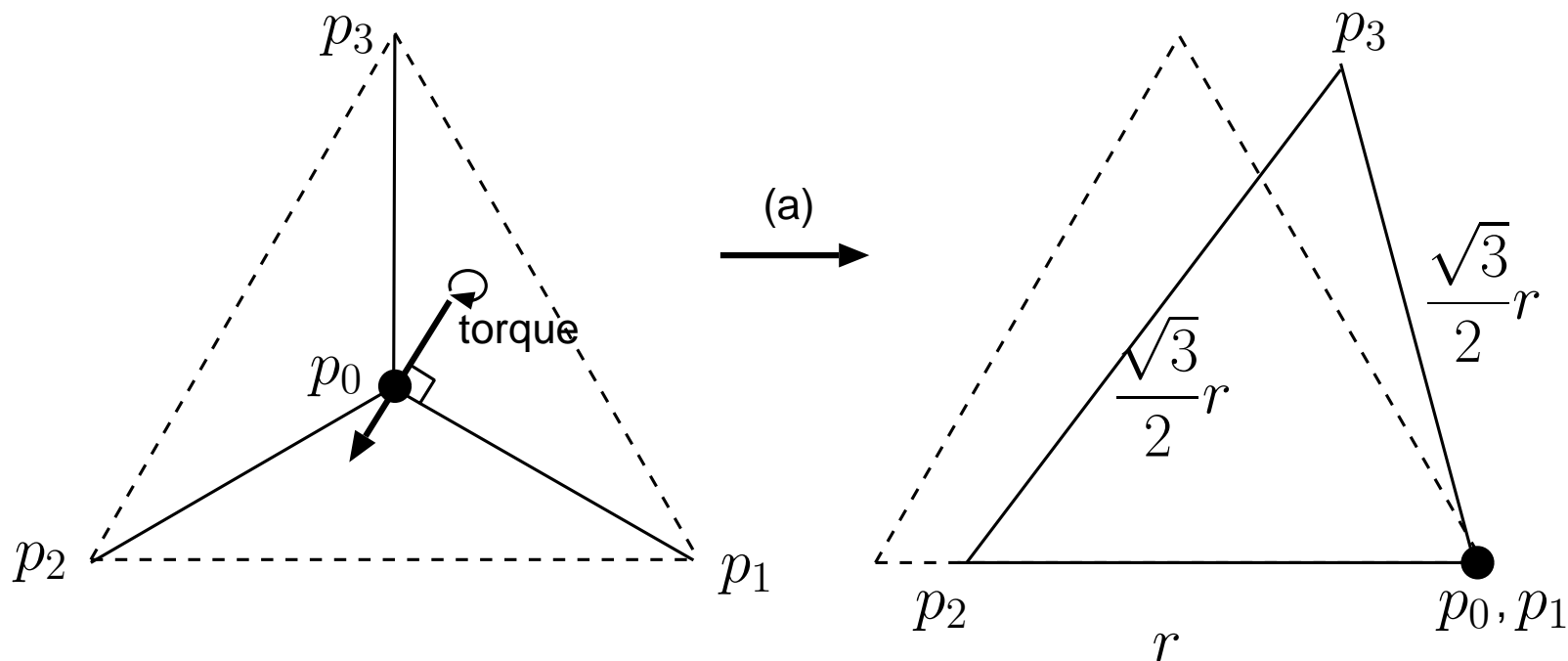
仮定 T1. 脚端と床面は点接触し，水平方向の滑りは発生しない．

⇒ 転がり接触拘束に対応

仮定 T2. 脚部分は質量を持たない．

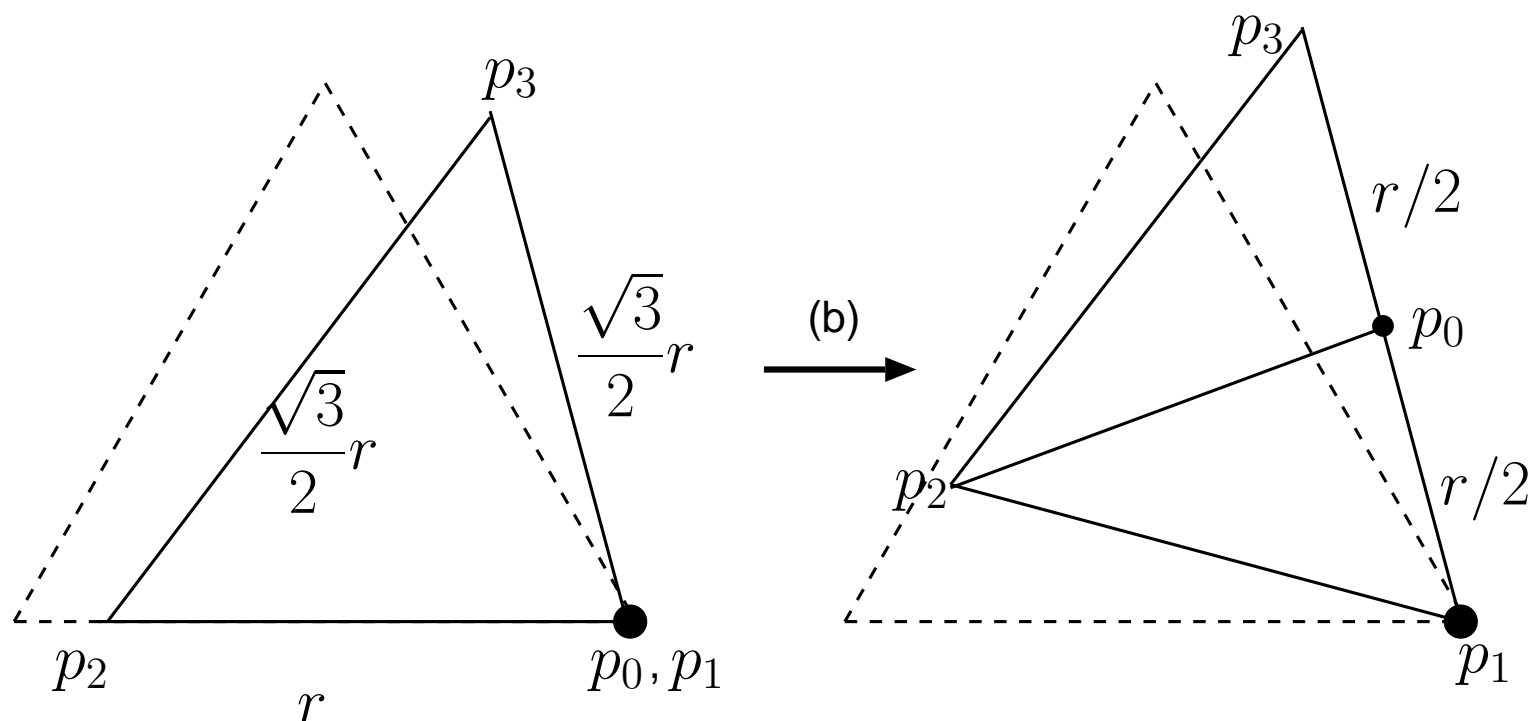
仮定 T3. 床面との接触点において鉛直軸周りの回転運動（スピン）は発生しない．

### 3. 基本ステップ (a)



(a)  $p_0p_1$  に直交する軸周りにトルク  $\tau$  を与え,  $p_0$  が  $p_1$  へ向かう方向に反作用を与える. このとき, 脚端  $p_1$  が軸足となり,  $p_2, p_3$  は離陸する. 脚  $p_0p_1$  を鉛直になった時点で (b) へ移行する.

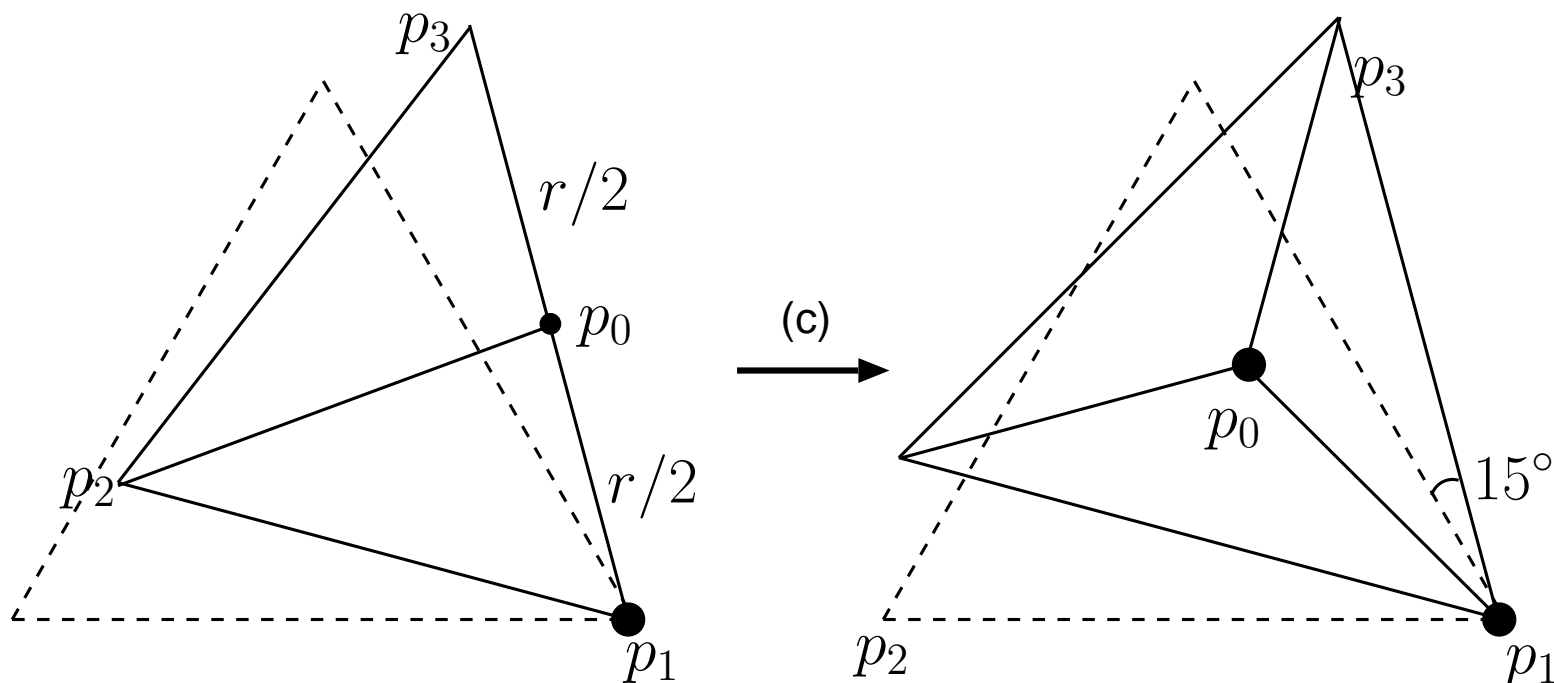
### 3. 基本ステップ (b)



(b)  $\Delta p_0 p_1 p_2$  が属する平面に沿ってボディを倒し，脚端  $p_3$  を着地させる．このとき，辺  $p_1 p_3$  が床面に接することになる．



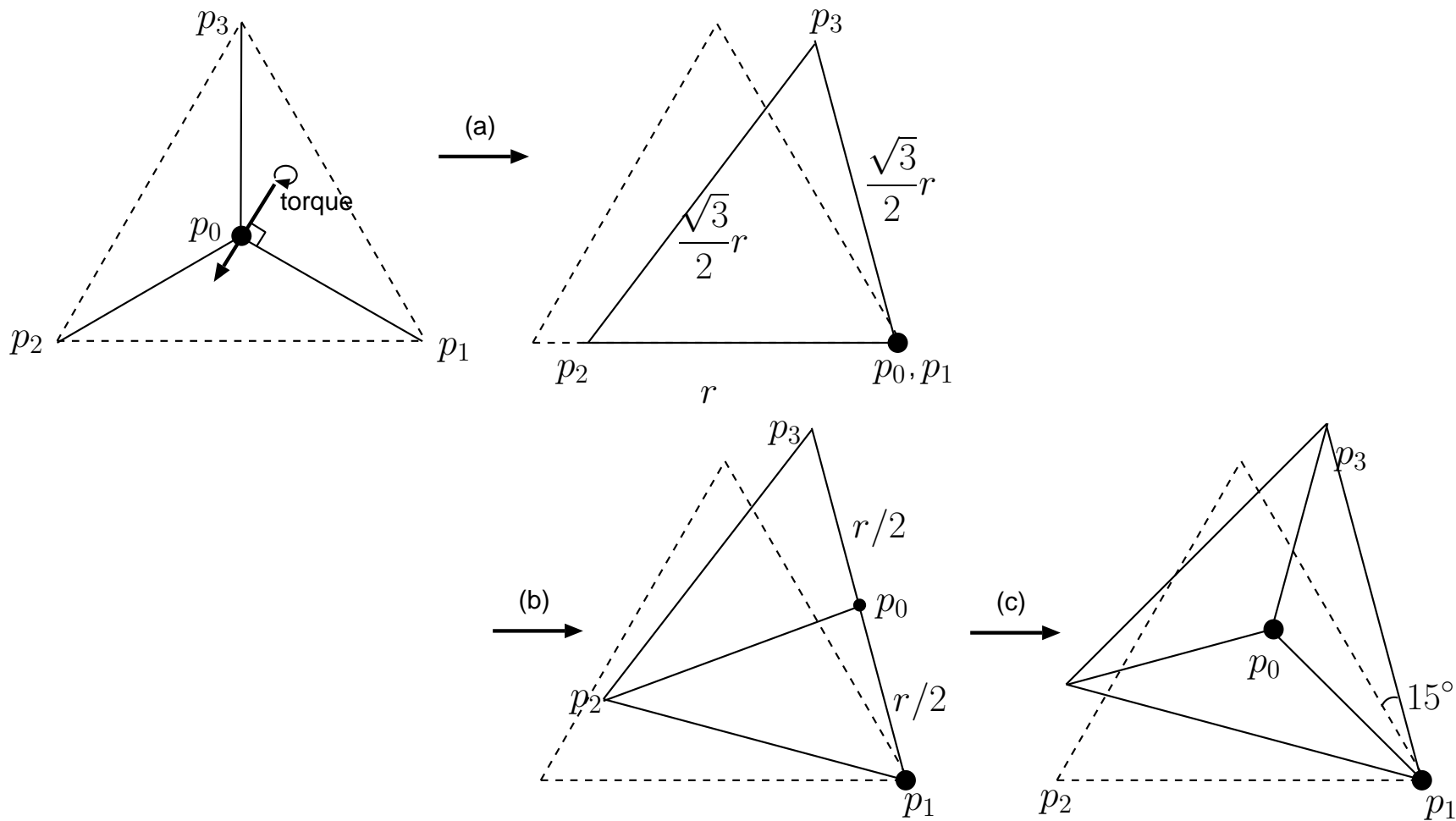
### 3. 基本ステップ (c)



(c) 脚端  $p_2$  を着地させる．これにより全脚端が接地する．

- 最終的に，底面  $\Delta p_1 p_2 p_3$  全体が  $p_1$  を軸にして  $-15^\circ$  回転
- $p_2$  と  $p_3$  の役割を入れ換えると  $+15^\circ$  の回転も可能

# 3. 基本ステップ

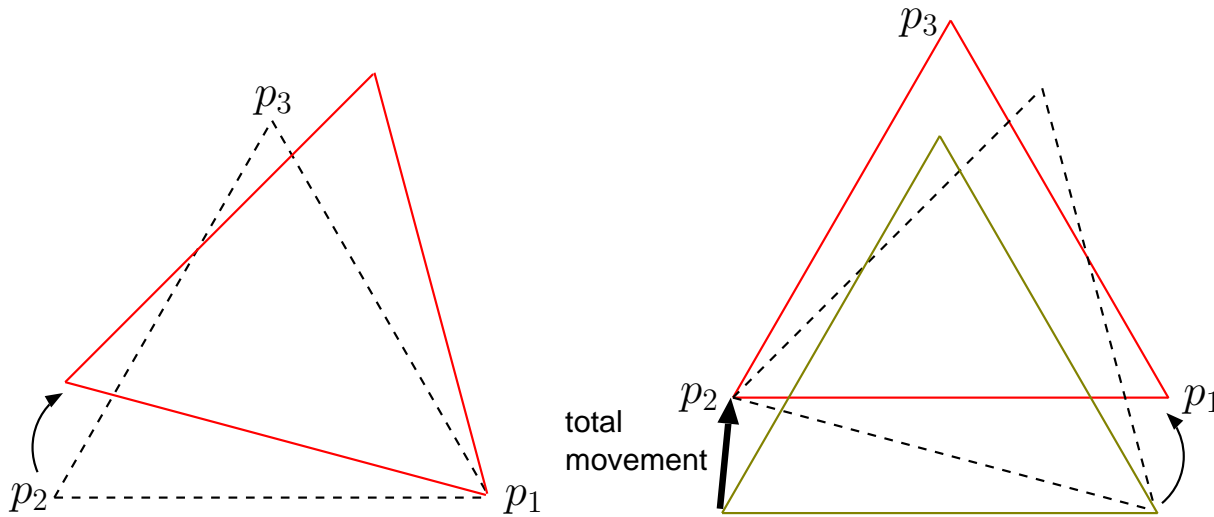


- ロール角: 0 正 0 と変化
- ピッチ角: 0 正 負 0 と変化, 1 周期の振動

# 3. 並進運動

## 基本ステップの組み合わせ

1.  $p_1$  を軸足として  $-15^\circ$  のヨー角回転を行う。
2.  $p_2$  を軸足として  $+15^\circ$  のヨー角回転を行う。



変位  $(1 - \cos 15^\circ, \sin 15^\circ)$

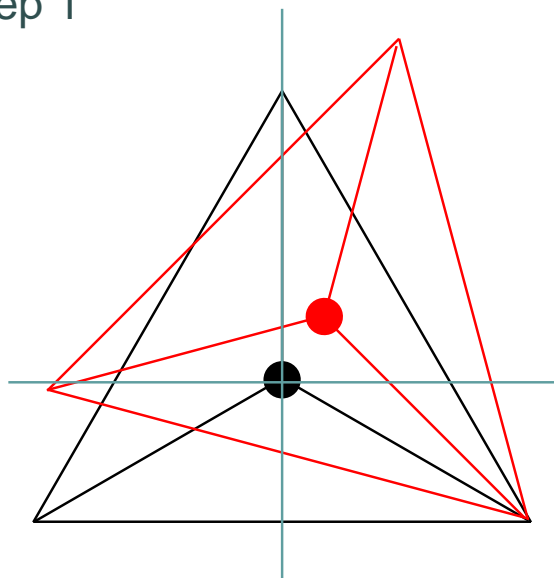
- ロール角: 0 正 負 0 と変化, 1 周期の振動
- ピッチ角: 2 周期の振動
- 3 本目の足 ( $p_3$ ) も重要な役割を果たしている

# 3. 旋回運動

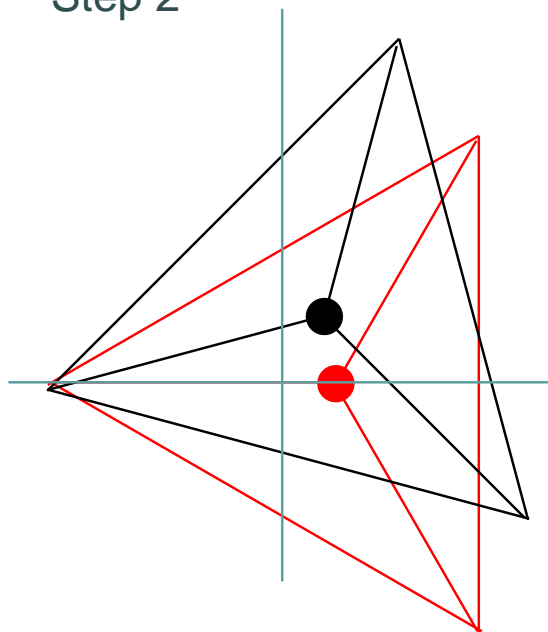
## 基本ステップの組み合わせ

1.  $p_1$  を軸足として  $-15^\circ$  のヨー角回転を行う。
2.  $p_2$  を軸足として  $-15^\circ$  のヨー角回転を行う。

Step 1



Step 2



## 4. おわりに

**まとめ** 「三足らしい」動きをする三足歩行機械の可能性について次の観点から論じた。

- コンパス型二足歩行における車輪モデルと球体操り問題とのアナロジーに基づき、中間モデルとして Surface Walker を設定
- コンパス型三足歩行機械と基本運動パターンを提案

## 4. おわりに

**まとめ** 「三足らしい」動きをする三足歩行機械の可能性について次の観点から論じた。

- コンパス型二足歩行における車輪モデルと球体操り問題とのアナロジーに基づき、中間モデルとして Surface Walker を設定
- コンパス型三足歩行機械と基本運動パターンを提案

### 今後の課題

- **スピンの扱いかた**— より妥当な仮定設定 or 積極的に利用した運動
- 対応の妥当性
  - 車輪と球体は本当に対応しているのか？ (球体は転がらない！)
  - コンパス型二足歩行と三足歩行は本当に対応しているのか？ (三足は関節が固定！)

## 4. おわりに

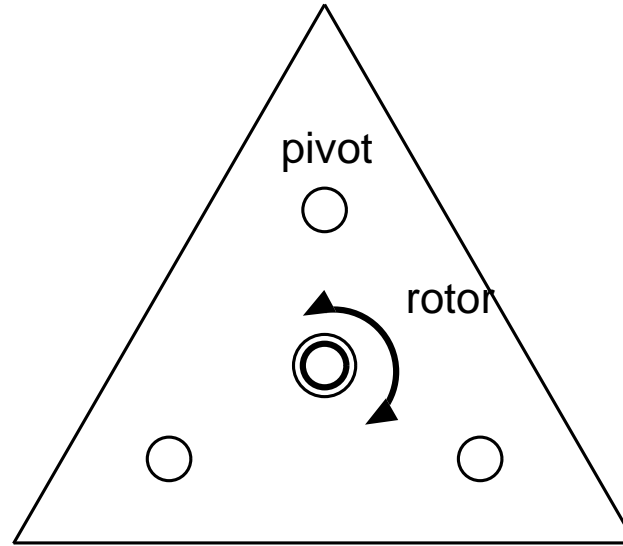
**まとめ** 「三足らしい」動きをする三足歩行機械の可能性について次の観点から論じた。

- コンパス型二足歩行における車輪モデルと球体操り問題とのアナロジーに基づき、中間モデルとして Surface Walker を設定
- コンパス型三足歩行機械と基本運動パターンを提案

### 今後の課題

- **スピンの扱いかた**— より妥当な仮定設定 or 積極的に利用した運動 ⇒ **ピボットロボット**
- 対応の妥当性 ⇒ **股関節の駆動**
  - 車輪と球体は本当に対応しているのか？ (球体は転がらない！)
  - コンパス型二足歩行と三足歩行は本当に対応しているのか？ (三足は関節が固定！)

# 3点ピボット移動ロボット



- ヨー角アクチュエータ × 1(連続値)
- 接地/非接地を切り替えるピボット × 3 (離散値)