

# ヒトの歩行停止動作のシミュレーション

谷口 隆雄  
電子制御システム工学科

## A Simulation for the Motion in Human Gait Stopping

Takao TANIGUCHI  
*Department of Electronic Control Systems Engineering*  
(Received September 18, 1998)

### Abstract

In this paper the characteristics during human gait stopping are simulated. A simple model consisting of one rigid body and two massless legs is used in this simulation. Parameter values characterizing the stopping process such as the motion of the point of application, supporting times and step lengths are used from the experimental results which are reported in the previous paper.

It was assumed that the stopping process required two steps after the steady walking state. The simulation results are quantitatively compared with the measured characteristics. And the relation with the step number and average speed of steady walking state is discussed.

**Key words:** gait stopping, simulation, gait parameters, transient process, reaction force, point of application

## 1. はじめに

筆者は従来より、1剛体2無質量脚モデルを用いたシミュレーションを行い、人間の過渡歩行特性の解析を行って来ている。歩行停止期では、床反力作用点のオーバーシュート特性に着目して、この現象と歩行停止動作との関係を調べてきた。これまでに、定常的な歩行状態から過渡期に1度の脚切り換えを行うとの仮定(1ステップでの停止)のもとで解析を行い、その結果についてはすでに報告している<sup>1)</sup>。

1剛体の簡単なモデルを用いても、特性の定量的な検討が可能であると筆者は考えている。定量的なシミュレーションを行うために、計算機モデルに入力する歩行パラメータ値を、歩調との関係に着目して測定データの範囲内で与える方法を採用した。この結果として、低歩調から高歩調までオーバーシュート量などの特性値を定量的にシミュレートできることなどを示した。

しかし、これらの特性値と定常歩行速度との関係に注目したところ、定常歩行速度が通常の歩行速度より大きい場合(約4 km/h以上)には、進行方向では良好な結果は得られなかった<sup>1)</sup>。この原因として、1ステップで停止するという仮定が、定常歩行速度が大きな場合

には適用できないものであったと考えられる。

本稿では、過渡期において2度支持脚を切り換えると仮定し（2ステップでの停止）、進行方向の歩行停止過程に限定してシミュレーションを行った結果について報告する。さらに、過渡期において支持脚を切り換える回数と定常歩行速度との関係を考察した結果についても述べる。

## 2. シミュレーションの方法

### 2.1 数式モデル

数式モデルの誘導は、文献<sup>2,3)</sup>を参照されたい。ここでは、最終的に得られた式(1)だけを示す。

$$\ddot{X}_E = X_E - X_F \quad (1)$$

ただし、 $X$ ：静止直交座標系の位置を脚長 $l$ で正規化したもの、微分記号 $\circ$ ：無次元時間 $\tau(=t\sqrt{g/(l+h_z)})$ による微分、 $g$ ：重力加速度、 $h_z$ ：ボディの質量中心と股関節の鉛直方向距離を表す。添字は $E$ ：ボディの質量中心位置、 $F$ ：床反力作用点位置を表す。

### 2.2 モデルの解法と仮定した条件

#### (1) 解法

式(1)の形の微分方程式の一般解には2つの未知係数が含まれる。定常歩行から2ステップで歩行を停止すると仮定した場合、支持相の数は定常期が2、過渡期が6の計8（図1参照）となる。したがって、境界条件式と未知係数の数はそれぞれ18, 16である。

これまでに報告したように、全区間の作用点移動量の中の2つを未知量として設定して、未知係数に関する連立方程式を導くことができる<sup>1,3)</sup>。そこで、本研究では文献<sup>1)</sup>と同様に作用点のオーバーシュート量 $X_8$ と、測定データのばらつきが大きい第5区間の作用点移動量

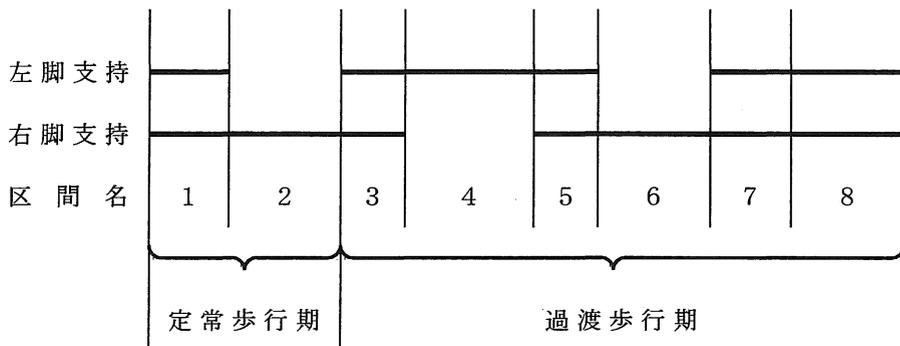


図1 左右脚支持相の定義と各支持期の命名

$X_5$  の2つを未知量とすることにした。

### (2) 測定データ

本研究のシミュレーションでは、計算機モデルへの入力パラメータ値は歩行実験データを用いて設定した。この歩行実験の装置、方法などについての詳細は、文献<sup>1,2)</sup>を参照されたい。歩行実験により得られた支持時間と作用点移動量の例を図2, 3に示す。図2は2.3で述べるようにシミュレーション結果に大きな関わりを持つ第5区間(図1参照)の支持時間 $T_5$ と定常歩行時の平均速度との関係を示したものである。図3は同じ区間での作用点移動量と定常歩行時の平均速度との関係を示したものである。

本研究でも測定データより入力パラメータ値を決定する際には、実験時の歩調に着目したデータ整理結果を用いた<sup>1)</sup>。シミュレーションは10通りの歩行速度値に対して行った。入力パラメータ値を決定するために必要な歩調(1分間あたりの歩数)の値は、定常歩行速度と定常歩行時ステップ長との関係より求めた。

### (3) パラメータ値の条件

計算機モデルには、支持時間 $T_i$  ( $i=1, \dots, 8$ )、作用点移動量 $X_j$  ( $j=1, 2, 3, 4, 6, 7$ )を与える。これらのパラメータ値を一意に与えることにより、境界条件式より得られる連立方程式を解いて作用点移動量 $X_5, X_8$ が一意に得られる。

解 $X_5, X_8$ は、パラメータ値の与え方により、その値の大きさや歩行速度に対する変化パターンも変わる。そこで、シミュレーション時のパラメータ値の条件として、

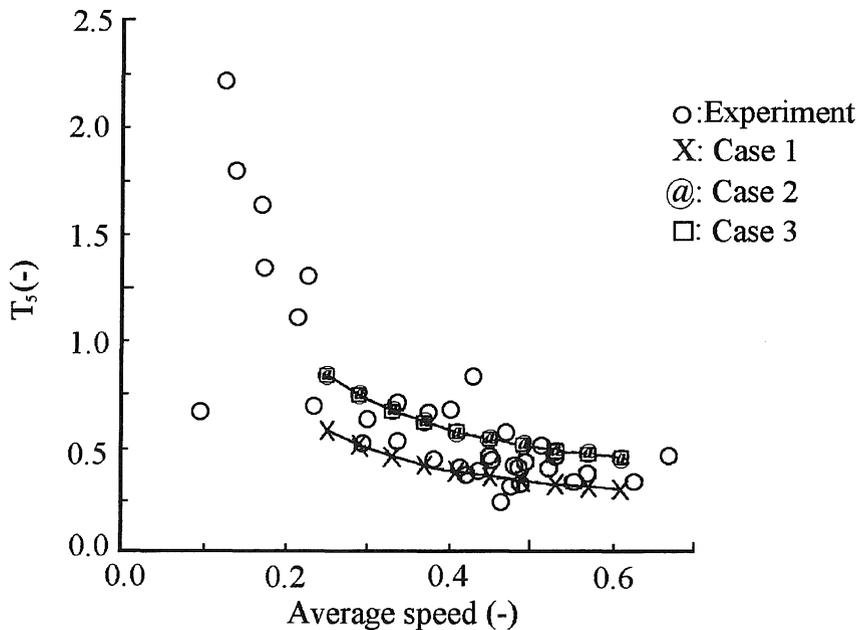


図2 3つのケースで用いた支持時間 $T_5$ の実験データとの比較

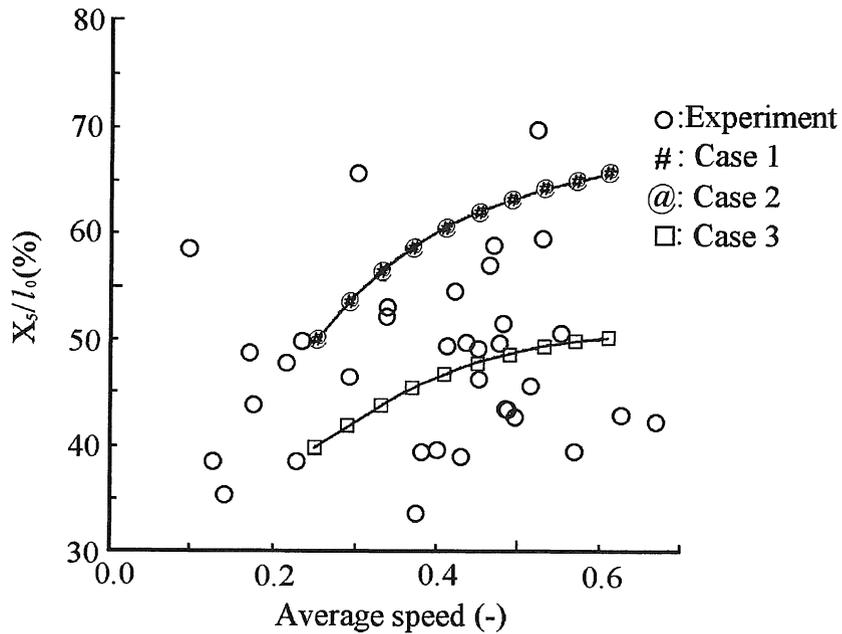


図3 3つのケースで用いた作用点移動量  $X_5$  の実験値との比較

- (A) 入力パラメータ値は実験データの存在範囲内にあること、  
 (B) シミュレーションにより得られた作用点移動量  $X_5$ ,  $X_8$  も実験データの存在範囲内にあること  
 の2つを課すことにした。  
 (4) 左右脚の定義

本研究のシミュレーションでは、

- 1) 定常歩行時の両脚支持期（区間1）には右脚を前に踏み出し、左脚が後ろにある。
- 2) 続く単脚支持期（区間2）では、右脚が支持脚、左脚が遊脚となる。

と仮定する。したがって、定常歩行時は右脚、過渡期の第1ステップは左脚、第2ステップは右脚を主な支持脚とみなすことになる。

### 2.3 歩行パラメータ値決定のためのアルゴリズム

入力パラメータ値を単に測定データの回帰式より与えただけでは、解の作用点移動量  $X_5$ ,  $X_8$  の値が、測定データと定量的に比較しうるものとはならない。したがって、解  $X_5$ ,  $X_8$  が望ましい値、パターンを示すような、入力パラメータ値の組合せを求めることが課題となる。

## (1) 入力パラメータ値と解の関係

まず、入力パラメータ値と解との関係を調べるために、種々の入力パラメータ値の組合せでシミュレーションを行った。その結果、

- 1) 支持時間  $T_i$  の微小変化  $\Delta T_i$  に対して、解  $X_5, X_8$  の変化が線形的であること、
- 2) 支持時間  $T_1 \sim T_5$  の変化の方が  $T_6 \sim T_8$  よりも、解に与える影響が大きいこと、
- 3) とくに  $T_5$  が適当な値に設定されている場合には、 $T_1$  と  $T_3$  の値によって解の値が大きく変化すること、

などがわかった。

## (2) 時間パラメータ値調整アルゴリズム

そこで、以下の手順とアルゴリズムで各時間パラメータ値の調整を行うことにした。

ステップ 1:

まず、解  $X_5, X_8$  の値が測定データの範囲を大きく逸脱しない程度の値で得られ、2.2(3)で述べた条件(A)を満たすような各  $T_i$  ( $i=1, \dots, 8$ ),  $X_j$  ( $j=1, 2, 3, 4, 6, 7$ ) の値を試行錯誤的に捜す。

ステップ 2:

ステップ 1 で得られた  $T_i$  ( $i=1, \dots, 8$ ),  $X_j$  ( $j=1, 2, 3, 4, 6, 7$ ) の値を用いてシミュレーションを行い、得られた解を  $X_{51}, X_{81}$  とする。以降の説明を分かりやすくするため、このときの時間パラメータ値にも添字 1 をつけて  $T_{i1}$  とする。

ステップ 3:

$T_{32} = T_{31} + \Delta T$  とし、他の  $T_i$  は  $T_{i2} = T_{i1}$  ( $i \neq 3$ ) としてシミュレーションを行い、得られた解を  $X_{52}, X_{82}$  とする。ただし、 $\Delta T = T/100$  ( $T$ : 歩行周期時間)。

ステップ 4:

解として望ましい  $X_5$  の値を  $X_{5r}$  として、

$$\Delta T_3 = \frac{\Delta T (X_{5r} - X_{51})}{X_{52} - X_{51}} \quad (2)$$

より、時間の修正量  $\Delta T_3$  を得る。

ステップ 5:

$T_{33} = T_{31} + \Delta T_3$  より得られる  $T_{33}$  の値が条件(A)を満たす場合には、他の  $T_i$  を  $T_{i3} = T_{i2}$  ( $i \neq 3$ ) としてシミュレーションを行う。得られた解を  $X_{53}, X_{83}$  として、ステップ 6 へ。満たさない場合には、 $X_{5r}$  を変えてもう一度  $\Delta T_3$  を求める。それでもだめな場合は、ステップ 1 に戻りやり直す。

ステップ 6:

$T_{14} = T_{13} + \Delta T$  とし、他の  $T_i$  を  $T_{i4} = T_{i3}$  ( $i \neq 1$ ) としてシミュレーションを行い、得られた解を  $X_{54}, X_{84}$  とする。

ステップ 7:

式(2)と同様の計算により  $\Delta T_1$  を求める。

### ステップ 8 :

$T_{15} = T_{13} + \Delta T_1$  が条件(A)を満たす場合には、他の  $T_i$  を  $T_{i5} = T_{i4} (i \neq 1)$  としてシミュレーションを行う。得られた解  $X_{55}, X_{85}$  が 2.2(3) の条件(B)を満たしているかどうかを調べる。満たさない場合には、 $X_{5r}$  を変えてステップ 7 へ。それでもだめな場合は、ステップ 1 に戻りやり直す。

なお、これらの入力パラメータ値  $T_i$  と解  $X_5, X_8$  はスカラではなく、歩行速度のサンプルデータ (10通り) に対応する値を持ったベクトルとして取扱った。

## 3. シミュレーション結果

### 3.1 3通りのケースについての説明

2.3で述べたアルゴリズムと手順によりシミュレーションを行い、特徴的な結果を得た以下の3通りの支持時間  $T_5$  と目標作用点移動量  $X_{5r}$  の組合せを示す (図2, 3参照)。

#### ケース 1

$T_5$  : 測定データの下限寄りの場合

$X_{5r}$  : 測定データの上寄りの場合

#### ケース 2

$T_5$  : 測定データの回帰式の場合

$X_{5r}$  : 測定データの上寄りの場合

#### ケース 3

$T_5$  : 測定データの回帰式の場合

$X_{5r}$  : 測定データの中程の場合

それぞれのケースでのシミュレーションにより得られた、床反力作用点の逆変動量<sup>1)</sup>  $X_8$  を図4に示す。同図は、定常歩行時の平均速度を横軸にして、作用点逆変動量  $X_8$  の実験データと3つのケースのシミュレーションで得られた値を対比して示すために、足部の長さ  $F_i$  で正規化している。いずれのケースでも実験データの存在範囲内に納まる形の結果が得られていることが分かる。

### 3.2 速度と進行方向床反力の特徴量

上記の3通りのケースのシミュレーション結果を、ボディ速度と進行方向床反力について比較するために、以下のように大きく2つのグループの特徴量を定義する。図5は定常歩行状態から停止に至るまでの、ボディ質量中心の移動速度が時間的に変化する様子の一例である。同図中に6種のボディ速度に関する特徴量を示している。図6は同じく進行方向床反力の時間変化の一例である。同様に、同図中には7種の進行方向床反力に関する特徴量を示している。

#### (1) ボディ速度の特徴量 (図5参照)

$V_{m1}$  : 定常歩行時の両脚支持期におけるピーク値

$V_{m3}$  : 歩行過渡期の最初の両脚支持期におけるピーク値

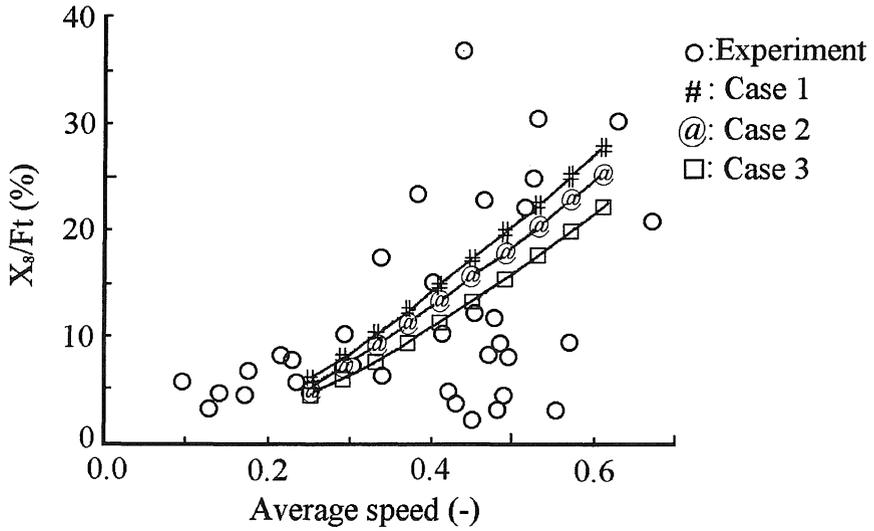


図4 平均定常歩行速度と作用点逆変動量  $X_s$  の実験値と3ケースのシミュレーションで得られた値の比較

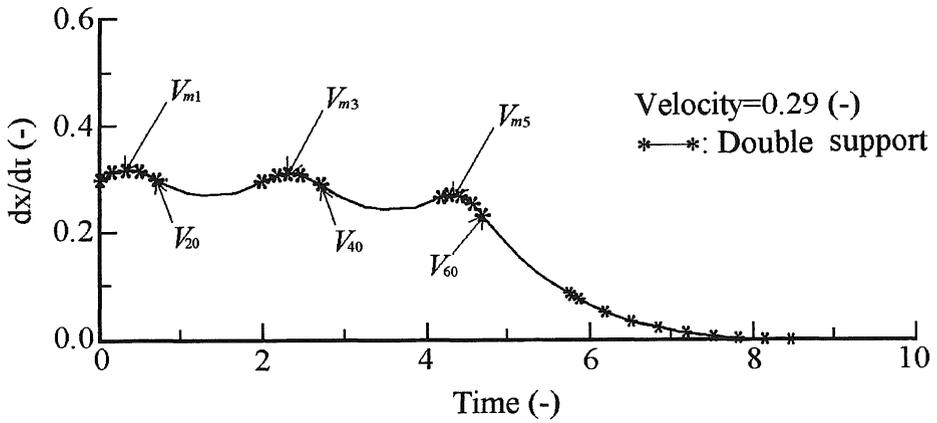


図5 ボディ質量中心移動速度の時間変化の一例と特徴量の定義

- $V_{m5}$  : 過渡期の2番目の両脚支持期におけるピーク値
- $V_{20}$  : 定常歩行時の単脚支持期の始めにおける値
- $V_{40}$  : 歩行過渡期の最初の単脚支持期の始めにおける値
- $V_{60}$  : 過渡期の2番目の単脚支持期の始めにおける値

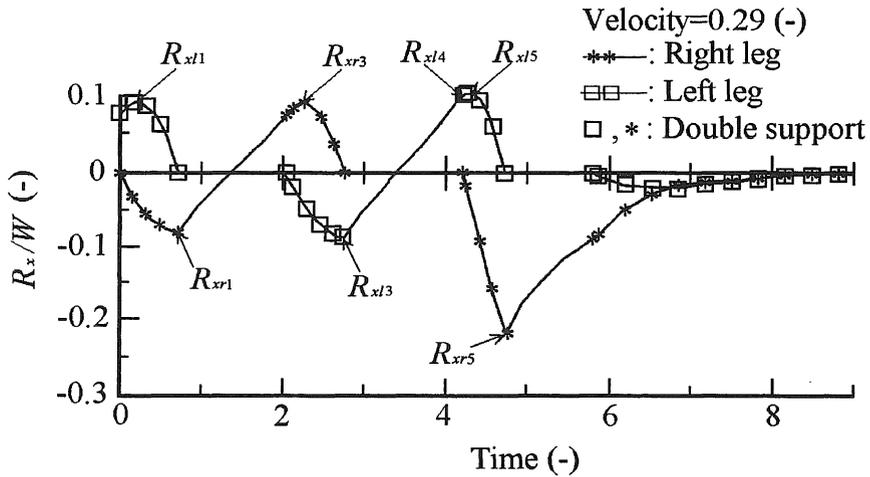


図6 進行方向床反力の時間変化の一例と特徴量の定義

(2) 進行方向床反力の特徴量 (図6 参照)

以下では, 添字  $r(l)$  は右 (左) 脚を表す.

$R_{x_{l1}}$ : 定常歩行時の最大値 (区間1の左脚)

$R_{x_{r1}}$ : 定常歩行時の最小値 (区間1の右脚)

$R_{x_{r3}}$ : 歩行過渡期の最初の両脚支持期における最大値 (区間3の右脚)

$R_{x_{l3}}$ : 過渡期の第1ステップ, 左脚床反力の最小値

$R_{x_{l4}}$ : 過渡期の第1ステップの単脚支持期の終わりにおける値

$R_{x_{l5}}$ : 過渡期の第1ステップ, 左脚床反力の最大値

$R_{x_{r5}}$ : 過渡期の第2ステップ, 右脚床反力の最小値

### 3.3 各ケースごとの結果についての検討

(1) ケース1の場合 (図7, 8 参照)

図7に平均定常歩行速度に対する床反力特徴量の変化の様子を示す. 図8はボディ速度の特徴量の変化の様子を表したものである. 両図より以下のことが分かる.

- 1) 定常歩行速度が約0.42(-)以下では, 過渡期の第1ステップの床反力最大値  $R_{x_{l5}}$  が, 定常歩行時床反力の最大値  $R_{x_{l1}}$  よりも大きい.
- 2) このことから, 速度が低い場合には, ボディが加速されて速度が定常歩行時より大きくなってしまっていると考えられる.
- 3) すなわちこの速度以下では, 歩行停止のために2ステップを必要としないと言うことが出来る.
- 4) 実際に, 定常歩行速度が約0.35(-)以下のとき, 速度のピーク値は  $V_{m3}$  よりも  $V_{m5}$  のほうが大きい.

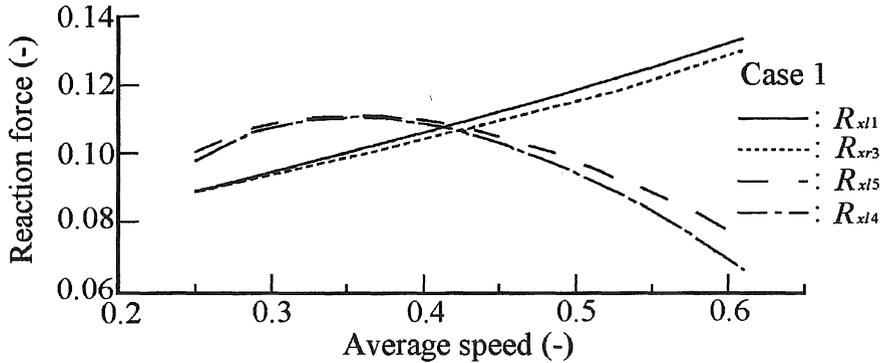


図7 平均定常歩行速度に対する床反力特徴量の変化（ケース1の場合）

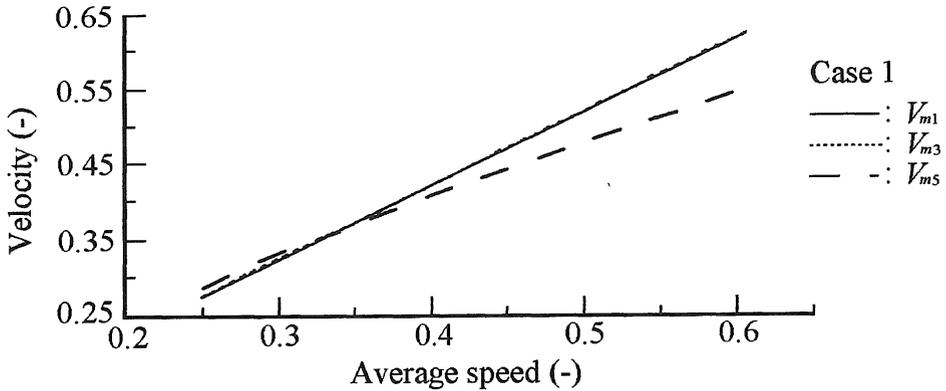


図8 平均定常歩行速度に対するボディ速度特徴量の変化（ケース1の場合）

5) すなわち、過渡期の第1ステップの間に加速されていることが分かった。

(2) ケース2の場合

図9, 10にそれぞれ平均定常歩行速度に対する床反力特徴量とボディ速度の特徴量の変化の様子を示す。

1) 定常歩行速度が約0.38(-)以下の低速歩行時では、第1ステップの床反力最大値  $R_{x15}$  が定常歩行時の最大値  $R_{x11}$  よりも大きい(図9参照)。

2) 速度のピーク値  $V_{m5}$  はつねに  $V_{m3}$  よりも小さい。ケース1の場合と異なり、 $R_{x15} > R_{x11}$  となる場合でも、過渡期の第1ステップの間にボディ速度は減速している(図10参照)。

(3) ケース3の場合

前2ケースと同様に、平均定常歩行速度に対する床反力特徴量の変化の様子と、ボディ速度の特徴量の変化の様子をそれぞれ図11, 12に示す。

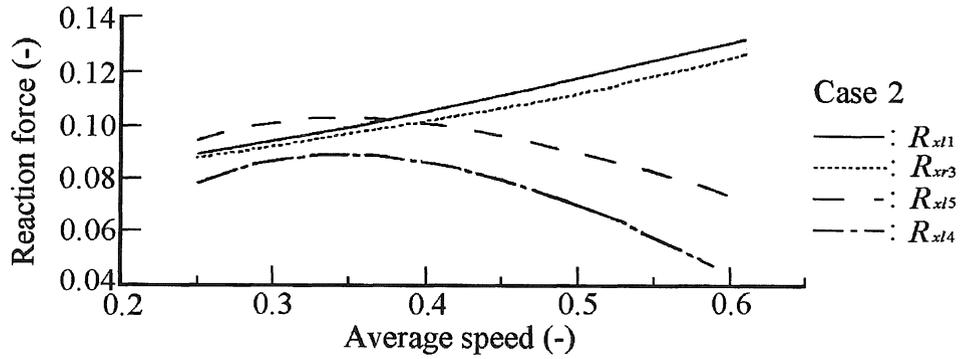


図9 平均定常歩行速度に対する床反力特徴量の変化 (ケース2の場合)

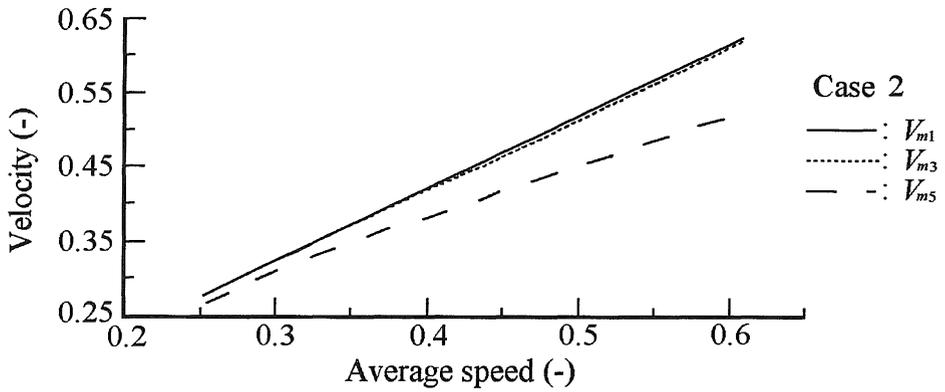


図10 定常歩行速度に対するボディ速度特徴量の変化 (ケース2の場合)

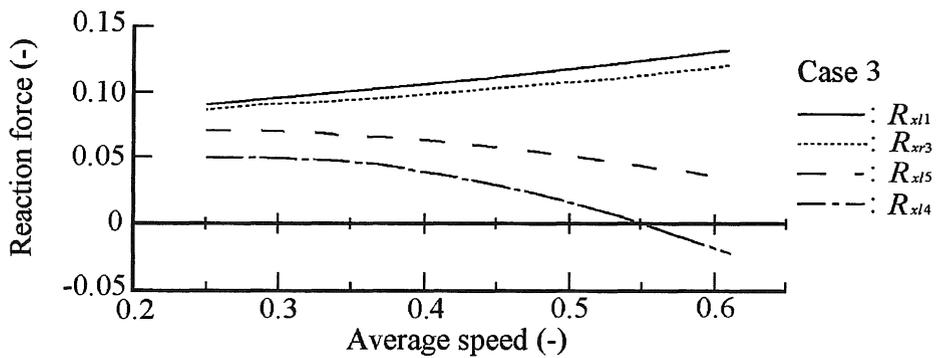


図11 定常歩行速度に対する床反力特徴量の変化 (ケース3の場合)

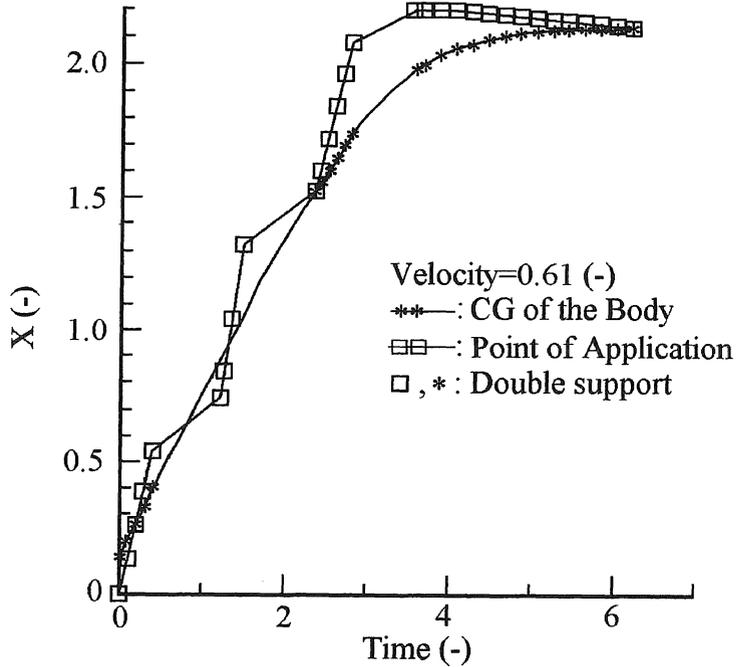


図12 高定常歩行速度の場合のボディ重心と床反力作用点の時間変化の一例

- 1)  $R_{x15}$  はつねに  $R_{x11}$  よりも小さい (図11参照)。
  - 2)  $R_{x14}$  は定常歩行速度が約0.55(-) 以上で負になる。
  - 3)  $V_{m5}$  はつねに  $V_{m3}$  よりも小さい。
  - 4) 定常歩行速度が約0.55(-) 以上のとき、歩行過渡期の最初の単脚支持期の終りにおける作用点位置は、両足ともボディ位置よりも前方にある。この点は、 $R_{x14} < 0$  と対応している (図12参照)。
  - 5) このことは、これ以上の定常歩行速度が2ステップで停止するには大きすぎることを意味している。
- (4) まとめ
- 1) ケース1では、低速歩行時に過渡期の第1ステップの間に加速されてしまう。
  - 2) ケース3では、定常歩行速度が約0.55~0.6(-) 程度の速さになると、過渡期の2ステップ目の支持脚接地時に、作用点位置が両足ともボディ位置よりも前方にある。つまり、作用点位置とボディ位置とが不自然な配置となる。
  - 3) ケース2は、上記1), 2) のような不自然な現象が見られず、ここに示した3通りの結果の中では最もよいと考える。

### 3.4 各特徴量について

#### (1) 各特徴量の傾向

それぞれの特徴量についてのシミュレーション結果を整理すると、以下のような傾向を持つことが分かった。

- 1) 定常歩行速度が大きくなるにつれて、絶対値が大きくなる傾向があるもの  
 $V_{m5}$ ,  $V_{60}$ ,  $R_{x_{r3}}$ ,  $R_{x_{l3}}$ ,  $R_{x_{r5}}$
- 2) 定常歩行速度約0.4(-)以下で極大値を持つもの  
 $R_{x_{l5}}$ ,  $R_{x_{l4}}$
- 3) ケース 1, 2, 3 の順に値が大きいもの  
 $V_{m5}$ ,  $V_{60}$ ,  $R_{x_{r3}}$ ,  $R_{x_{l5}}$ ,  $R_{x_{l4}}$
- 4) ケース 1, 2, 3 の順に絶対値が小さいもの  
 $R_{x_{l3}}$ ,  $R_{x_{r5}}$
- 5) 第1ステップの間の減速度の大きさと対応していると言えるもの  
 $R_{x_{l3}}$ ,  $R_{x_{r3}}$
- 6) 第2ステップ以降の減速度の大きさと対応していると言えるもの  
 $R_{x_{r5}}$ ,  $R_{x_{l5}}$
- 7)  $R_{x_{l4}}$  (図13参照)
  - 1) ケース 1, 2 では、シミュレートした速度範囲でつねに正である。
  - 2) ケース 3 の場合は、0.55(-)以上で負となる。

#### (2) まとめ

- 1) 第1ステップの間の減速度は、ケース 3, 2, 1 の順に大きいと言える。
- 2) 第2ステップ以降の減速度は、ケース 1, 2, 3 の順に大きいと言える。
- 3)  $R_{x_{r3}}$  が小さく、 $R_{x_{l3}}$  の絶対値が大きいほど、第1ステップの間の減速効果が大きい。
- 4)  $R_{x_{l5}}$  が小さく、 $R_{x_{r5}}$  の絶対値が大きいほど、第2ステップ以降の減速効果が大きい。

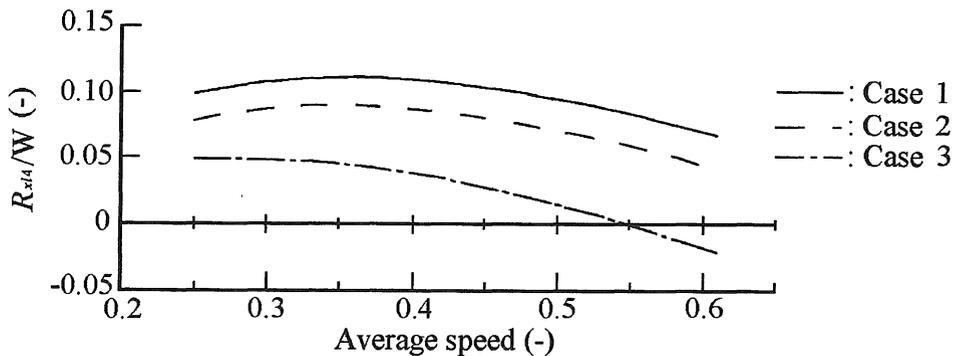


図13 3つのケースにおける平均定常速度に対する床反力値  $R_{x_{l4}}$  の変化

#### 4. 考 察

平均歩行速度が、0.35(-) 以下ではパラメータの選び方によっては、2ステップ必要でない場合もある。つまり、0.35(-) 程度以下の低い歩行速度では、1ステップで止まることが可能である。2ステップで自然なかたちで止まるためには、ピーク速度が増加しないような歩き方をしなければならない(例: ケース 2, 3)。

平均歩行速度が、0.55(-) 以上のときには、パラメータの選び方によっては、過渡期の2ステップ目の(右)脚接地時に、ボディの質量中心位置が、両方の足の作用点位置よりも後方に位置するような止まり方をする場合もある。つまり、他の部分での減速が不十分であるために、1ステップ目から2ステップ目にかけて、負の進行方向床反力を増大させるためにこのような歩容になっている。

以上より、パラメータの選び方によっては、

- 1) 2ステップでの停止が不自然な形となる歩行速度があること、
  - 2) 低い方では、約0.35(-) (=約 3 km/h に相当) 以下であること、
  - 3) 高い方では、約0.55(-) (=約 4 km/h に相当) 以上であること、
- が明らかになった。このことは、
- 4) 0.35(-) 以下の歩行速度では、1ステップで停止する方が自然であること、
  - 5) 0.55(-) 以上では3ステップで停止する方がより自然な形で停止できる場合もあること、
- と、  
を示唆していると考える。

#### 5. お わ り に

1 剛体2無質量脚で人間をモデル化し、2ステップで停止する過程のシミュレーションを行った。計算機モデルに入力する時間と長さに関するパラメータ値は、いずれも人間の歩行停止実験データを定量的にサンプルして与えた。その結果として、以下のことを示した。

- 1) 歩行を停止するのに1ステップしか必要でない歩行速度があり、その大きさは約3 (km/h) 以下であること。
- 2) 1ステップでも2ステップでも停止可能な歩行速度の範囲があり、約3~4 (km/h) であること。
- 3) 2ステップもしくはそれ以上のステップが必要な歩行速度は、約4 (km/h) 以上であること。

#### 参 考 文 献

- 1) 山下 忠, 谷口隆雄: ヒトの歩行停止動作の解析, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 4, pp. 411-416 (1986).
- 2) 山下 忠, 谷口隆雄: ヒトの歩行開始動作の解析—実験とモデルによる考察, 計測自動制御学会論

文集, Vol. 22, No. 2, pp. 176-182 (1986).

- 3) 山下 忠, 谷口隆雄: ヒトの歩行開始動作の解析—実験データの回帰分析とシミュレーション, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 303-309 (1986).