

Ｔ字型廊下の歩行
における
シミュレーションモデル
についての研究

防災安全工学講座 村上秀隆

目次

第0章 序

第1章 歩行実験の方法と解析

1-1 歩行実験の方法

1-2 スムーシングの必要性

1-3 デジタルフィルタについての解説

1-4 スムーシングの結果

第2章 既往の歩行シミュレーションモデルの検討

2-1 既往の歩行シミュレーションモデルの概要

2-2 岡崎の磁気モデルの検証

2-2-1 磁気モデルの理論

2-2-2 磁気モデルによるシミュレーション

2-2-3 本研究への磁気モデルの応用の問題点

第3章 歩行モデルの構築

3-1 歩行軌跡の近似式の設定

3-2 歩行軌跡の近似式における係数の決定

3-3 歩行特性（係数 a 、 b ）についての考察

第4章 総論

第 0 章 序

本研究では、これまでの歩行シミュレーションモデルの中心テーマであった群集歩行を対象としたものではなく、人間個々の歩行行動を再現できるような歩行シミュレーションモデルの開発を目的としている。というのは、廊下などを設計する場合は、歩行を群集で考えるよりは、一人一人がどういった歩行行動を行なうかを考えるほうが、防災安全上より有意義であると考えられるためである。ここでは、複雑な通路の変化（幅員、傾斜、形状などの変化）に対応した歩行行動や、すれ違い、追い越し、合流といった対人的行動などは考慮に入れず、単純に”T字型の通路を直角に曲がる”という歩行行動を対象にしている。また、歩行にともなって人間の重心は、前後、左右に変動するが、これらのゆれは無視し、歩行者を1つの質点として扱い、単純に”曲がる”という軌跡を再現することを目的としている。まず、歩行実験（詳細は田中春彦卒業論文参照¹⁾）での結果を解析、歩行の特性を整理し、また、既存のシミュレーションモデルを整理、比較検討したうえで、実験の解析結果を再現するモデルを構築した。

第 1 章 歩行実験の方法と解析

1-1 歩行実験の方法

体育館内で、スタイロフォーム(1840mm × 920mm、白色)を壁としてT字型の廊下を仮設し、被験者(名古屋大学学生)の歩行の様子を、天井に取り付けたビデオカメラによって撮影、録画した。また、廊下幅は 1.84mと 1.20mの2種類で行なった。

1-2 スムーシングの必要性

今回、構築を試みるシミュレーションモデルでは、歩行にともなう頭部などのゆれは無視するものとする。また、実験の結果はビデオテープに収録後、CRT上に再現したものを画像処理機に通したため、CRT画面上の1ドット(約20cm)以内の動きについては誤差が大きい。

上記の理由により、実験の原データをそのまま用いて、それをシミュレーションモデルの参考とするのは、不相当であると考え。そのため、デジタルフィルタ処理によるスムーシングの作業を行なうことで、本研究に必要な約1Hz以内の行動軌跡を求めることにした。

1-3 デジタルフィルタ処理についての解説

デジタルフィルタ処理とは、演算処理によって、希望する周波数を越える周波数の振幅特性を十分減衰させる処理のことをいう。

今回用いたフィルタは非巡回型フィルタ(FIRフィルタ)とよばれるもので、出力 $y[n]$ は、入力 $x[n]$ と、このフィルタのインパルス応答 h_n (図-1)を使って、(1)式のような差分方程式で表現される。

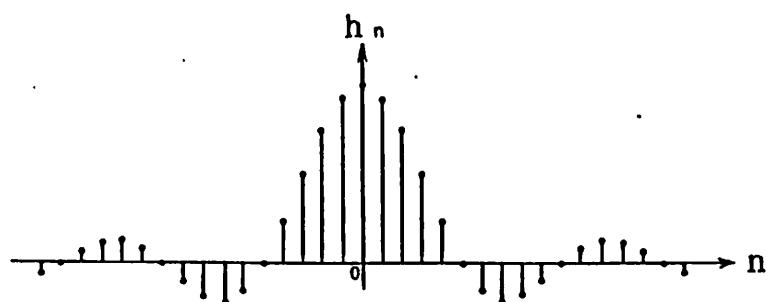


図-1 インパルス応答 h_n

$$y[n] = \sum_{m=0}^N h_m x[n-m] \quad \dots \dots \dots (1)$$

今、サンプリング周波数 f_s を 30Hz、カットオフ周波数 f_c を 0.7Hz とすると、このフィルタの理想的なインパルス応答は g_n は、(2) 式のようになる。 $f_s = 30$ としたのは、画像処理機にかけたデジタル信号が 1/30秒間隔であるためであり、 $f_c = 0.7$ は今回の分析データ量を保持できる範囲内で、カットできる最大の周波数である。

$$g_n = \frac{1}{n\pi} \sin\left(\frac{14}{300}n\pi\right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

このフィルタの振幅特性を示したものが図-2である。この図からわかるように、フィルタの通過帯域の特性が乱れ、阻止帯域での大きな減衰が得られない。そこで、このインパルス応答にハミング窓 $\omega_m[n]$ ((3) 式) と呼ばれる窓関数をかけると、より素直な振幅特性を示す。(図-3)

$$\omega_m[n] = 0.54 + 0.46 \cos(2\pi n/30) \quad \dots \dots \dots (3)$$

結局、(2)、(3) 式より、(1) 式は今回の目的にあわせて、(4) 式のようになる。

$$y[n] = \sum_{m=0}^N g_m \omega_m[m] x(n-m) \quad \dots \dots \dots (4)$$

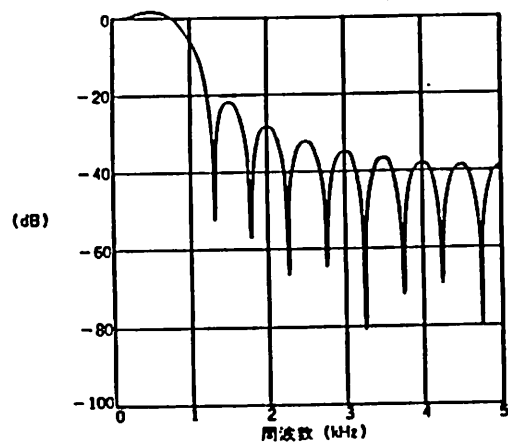


図 - 2 (2) 式の振幅特性

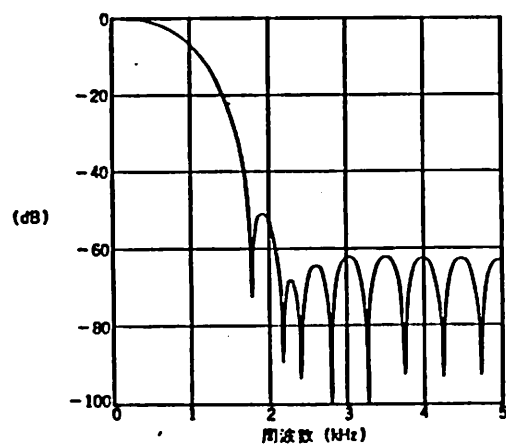


図 - 3 ハミング窓を用いた場合の振幅特性

1-4 スムーシングの結果

以上のようなデジタルフィルタ処理を実測データにほどこした結果を示す。図-4は軌跡の変化を、図-5は速度、加速度変化²⁾を示す。また、図-6では、スムーシング後のデータについて、加速度変化を座標上に矢印で示したものである。

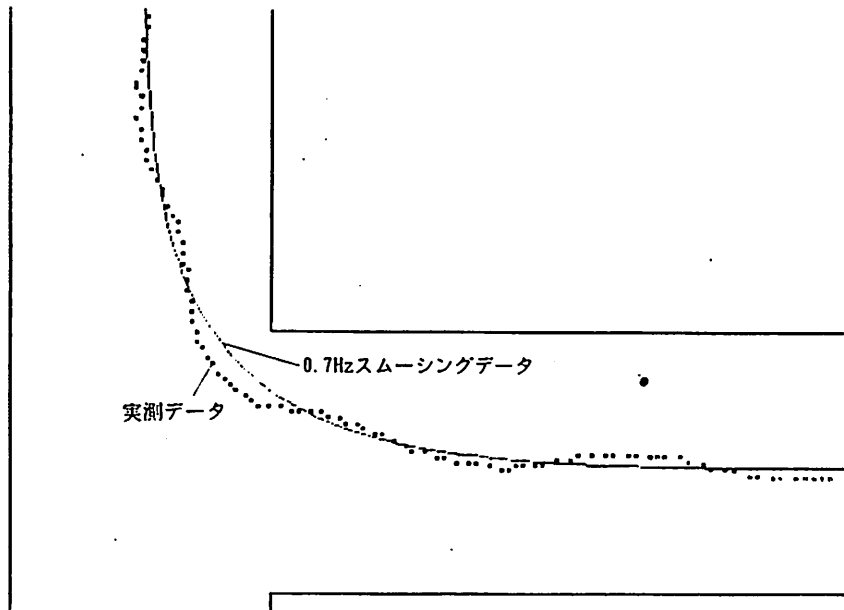


図-4 軌跡の変化

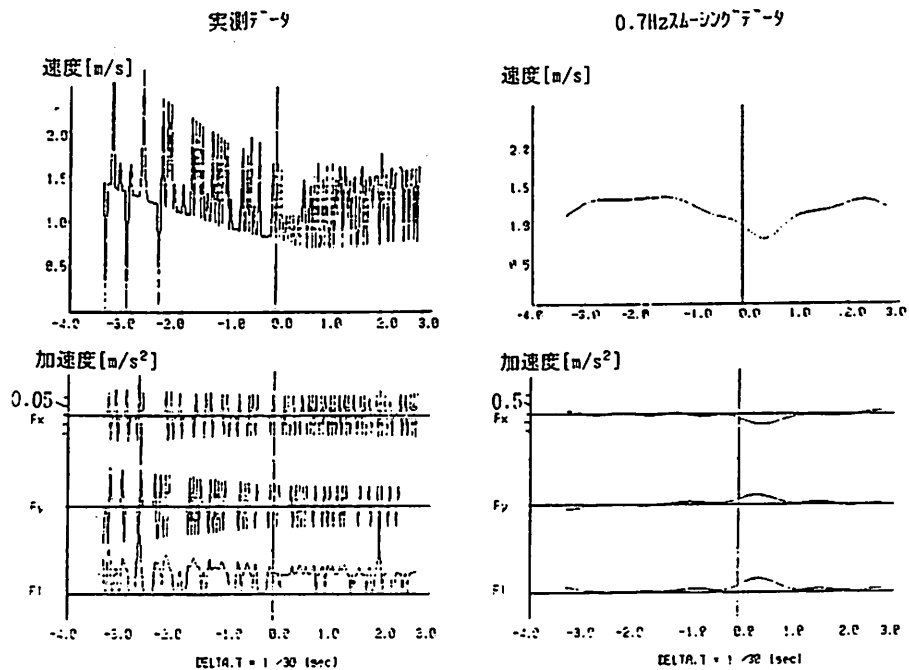


図-4 速度、加速度変化の変化（加速度の正負は座標軸の正負に従う）

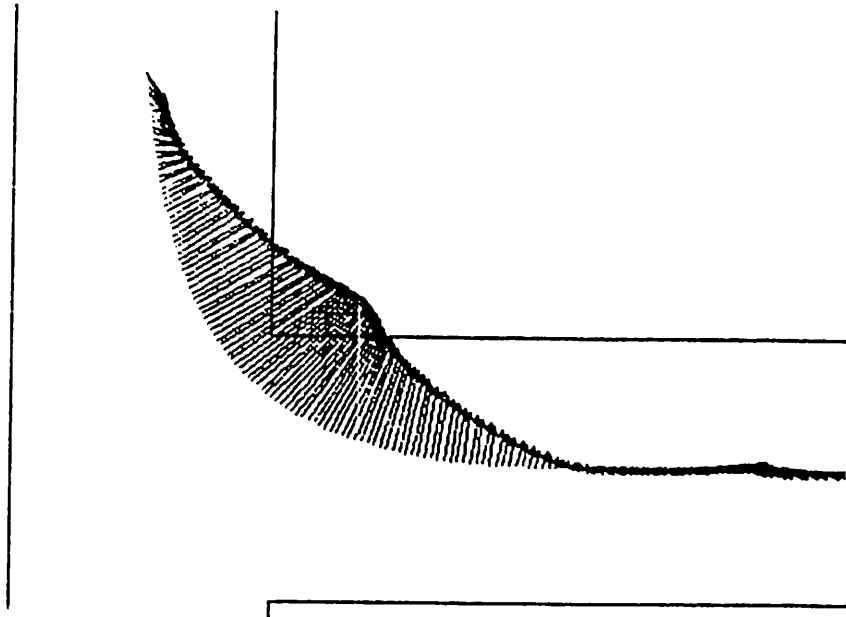


図 - 6 加速度の方向

第 2 章 既往の歩行

シミュレーションモデルの検討

2-1 既往のシミュレーションモデルの概要

既往の歩行シミュレーションモデルは、主に次のような手法で行なわれてきた。まず、二次元平面を一次元のネットワークに置き換え、その線上を移動する人間の量を調べることにより、歩行者の流動状況を流体的かつ量的に把握する手法がある。しかし、この場合には、廊下の細かな状況の変化などは、無視されてしまう。

もうひとつの手法としては、空間をメッシュに分割し、メッシュ内の人間の数、密度の変化などを調べるものである。これは、さきに述べたモデルに比べ、歩行空間の広がりや考慮に入れることができるが、メッシュによる制約を受けメッシュに従ってしか移動できないという欠点がある。いずれにしても、従来の歩行シミュレーションモデルでは群集歩行の流動状態などの把握に重点が置かれており、個人ごとの歩行特性について言及しているモデルは少ない。

次に本研究で対象とするような個人ごとの歩行を把握、再現するためのシミュレーションモデルの例をいくつか述べる。

平井のモデル³⁾では、群衆の中の 1 個体に注目し、それを質量 m [kg] の質点とみなしたうえで、質点に 5 つの力（前方推進力、反発力、他固体回避力、壁からの反発力、目標にむかう力）が働き、ある抵抗（抵抗係数： ν ）を受けながら移動するモデルで歩行を表現している。その運動を表わす式は（5）式で与えられる。

$$F = m \ddot{x} + \nu \dot{x} \quad (\cdot = d / d t) \quad \dots \dots \dots (5)$$

つぎに岡崎のモデル⁴⁾では、先の平井のモデルとは力の与え方が異なる。この場合は、壁と、質点とみなした個体には同極の磁荷を、目的地には異の磁荷を与えることにより質点に力が加わるものとしている。以降はこの岡崎の磁気モデルを用いて本実験での結果をシミュレートすることを考える。

2-2 岡崎モデルの検証

2-2-1 磁気モデルの理論

まず質点が壁から受ける力は次のように計算される。(図-7参照)なお以下の式において、

μ_0 [Wb/mA] : 真空中の透磁率

λ [Wb/m] : 線磁極の線密度

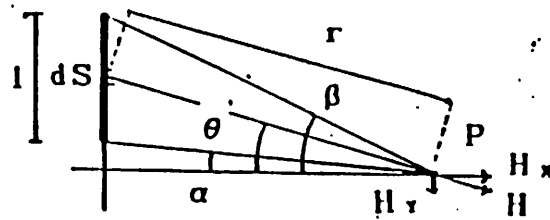


図-7 点磁極が線磁極から受ける磁界

線磁極の中の微小磁極 λdS が点Pにつくる磁界は次式のように表わすことができる。

$$dH = \frac{\lambda dS}{4\pi\mu_0 r^3} \mathbf{r} \quad \dots \dots \dots (6)$$

(6)式に(7)式を代入することにより磁界は(8)(9)式のようになる。

$$\left(\begin{array}{l} dS = a \cdot \sec^2 \theta \cdot d\theta \\ S = a \cdot \tan \theta \\ r = a \cdot \sec \theta \end{array} \right) \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$H_x = \int_1 dH \cos \theta$$

$$= \frac{\lambda}{4 \pi \mu_0 a} (\sin \beta - \sin \alpha) \dots \dots \dots (8)$$

$$H_y = \int_1 dH \sin \theta$$

$$= \frac{\lambda}{4 \pi \mu_0 a} (\cos \alpha - \cos \beta) \dots \dots \dots (9)$$

質点に働く力はそれぞれ $F_x = Q H_x$ 、 $F_y = Q H_y$ と表わされる。なおこれらの値は全て任意の座標軸上の質点の位置 (x, y) についての関数として表される。

質点に加わる力がわかれば、運動方程式により、 $t + dt$ 秒後の座標 $(x + dx, y + dy)$ は、 t 秒後の座標 (x, y) によって (11)、(12) 式のように表わされる。

$$x + dx = x + \frac{2 u F_x dt / M - (F_x dt / M)^2}{2 F_x / M} \dots \dots \dots (11)$$

$$y + dy = y + \frac{2 v F_y dt / M - (F_y dt / M)^2}{2 F_y / M} \dots \dots \dots (12)$$

(ただし (11)、(12) 式において、 u 、 v は t 秒後の x 方向、 y 方向の速度を表わす。)

このように dt 秒間隔で、座標が次々にわかりこれを繰り返し、ある一定時間毎に画面出力すれば、点磁極の軌跡を描くことができる。

2-2-2 磁気モデルによるシミュレーション

次に具体的なシミュレーションを行なう。

初期設定としては、壁を座標軸上に図-8のように配置し、アトラクションとしての壁は概念的なもので実際には存在しない。座標(0.9, -8.0)から、質量M[kg]の質点を打ち出す。また点磁極(歩行者)は、どこにいてもすべての線磁極(壁)から影響を受け、終始磁界の状態は変化しない(壁、アトラクションは移動しない)ものとする。

また出力画面の語句については以下の通りとする。

L A M A : $\lambda_A / 4\pi\mu_0$ [A] (λ_A : アトラクションの線密度)

L A M B : $\lambda_B / 4\pi\mu_0$ [A] (λ_B : 壁の線密度)

Q : 点磁極の磁荷 [Wb]

V : y方向の初速度 [m/s]

M : 点磁極の質量 [kg]

R : 抵抗係数

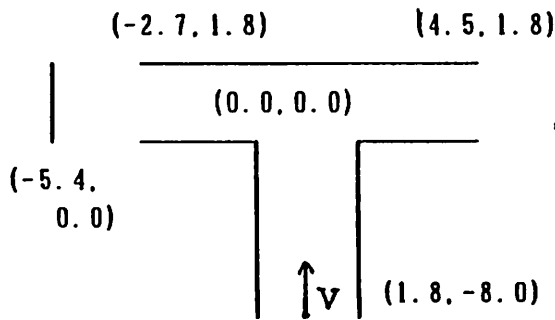


図-8 座標軸上の壁(線磁極)の配置

ここでは、Q、V、Mは常に一定として、他の条件を様々に変えて、点磁極の軌跡を画面出力した結果を図-9に示す。画面出力は、各座標の計算間隔を1/1000秒とし、1/10秒ごとに、点を出力していく。

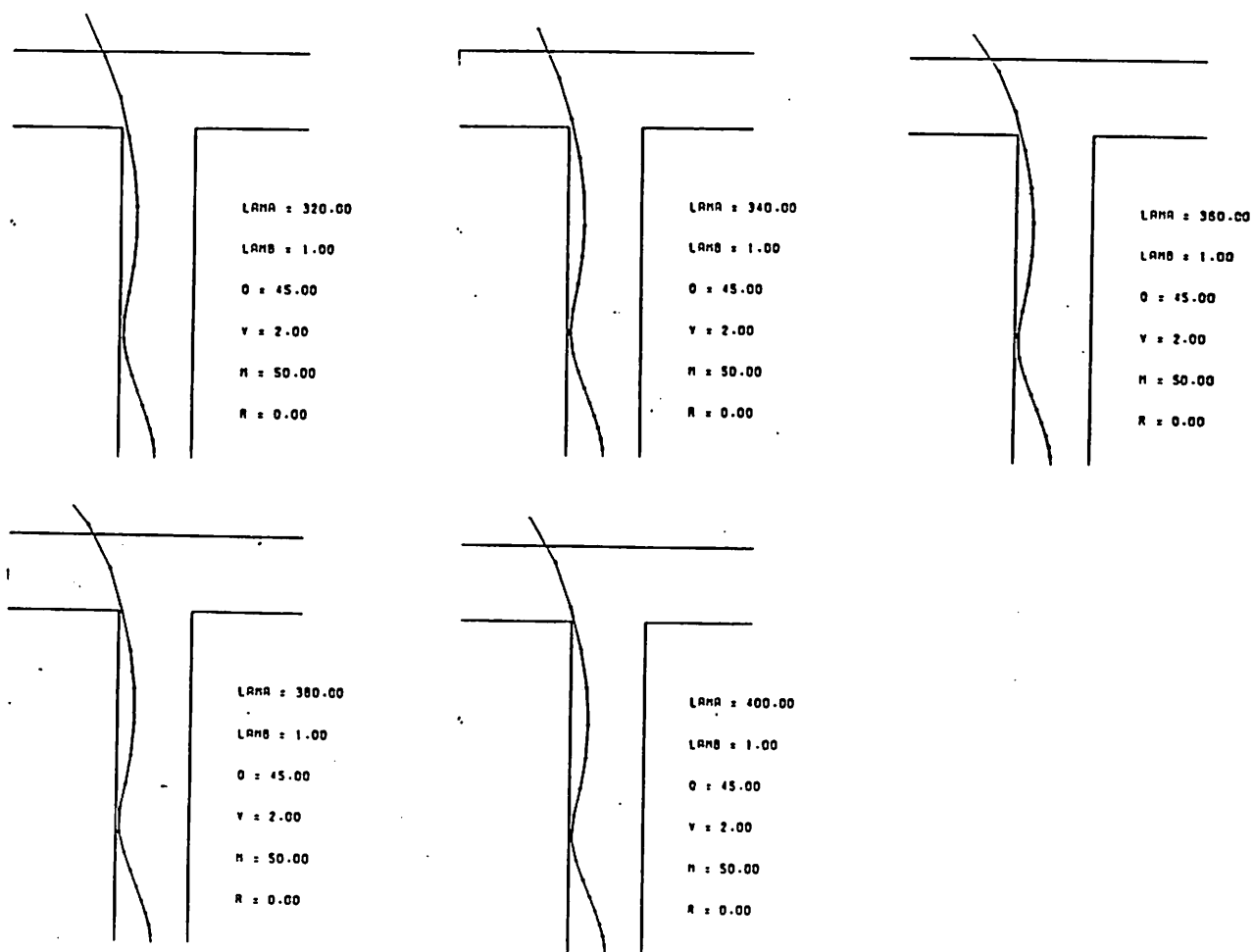


図 - 9 - 1 画面出力の結果 (1)

図 - 9 - 1 はアトラクションの強さを徐々に強くしていった場合である。スタートした直後から既にアトラクションに引かれるため、どんどん加速していき、アトラクションを中心にした円運動のような運動をする。

なお、壁を突き抜けてしまうのは、各座標の計算間隔が大きいためであり、間隔を小さくとれば、壁により接近するため、壁からの力が増大し、直前で衝突を回避する。ここでは、壁の直前でUターンするような歩行はありえないので、あえて突き抜けたままの図を示す。

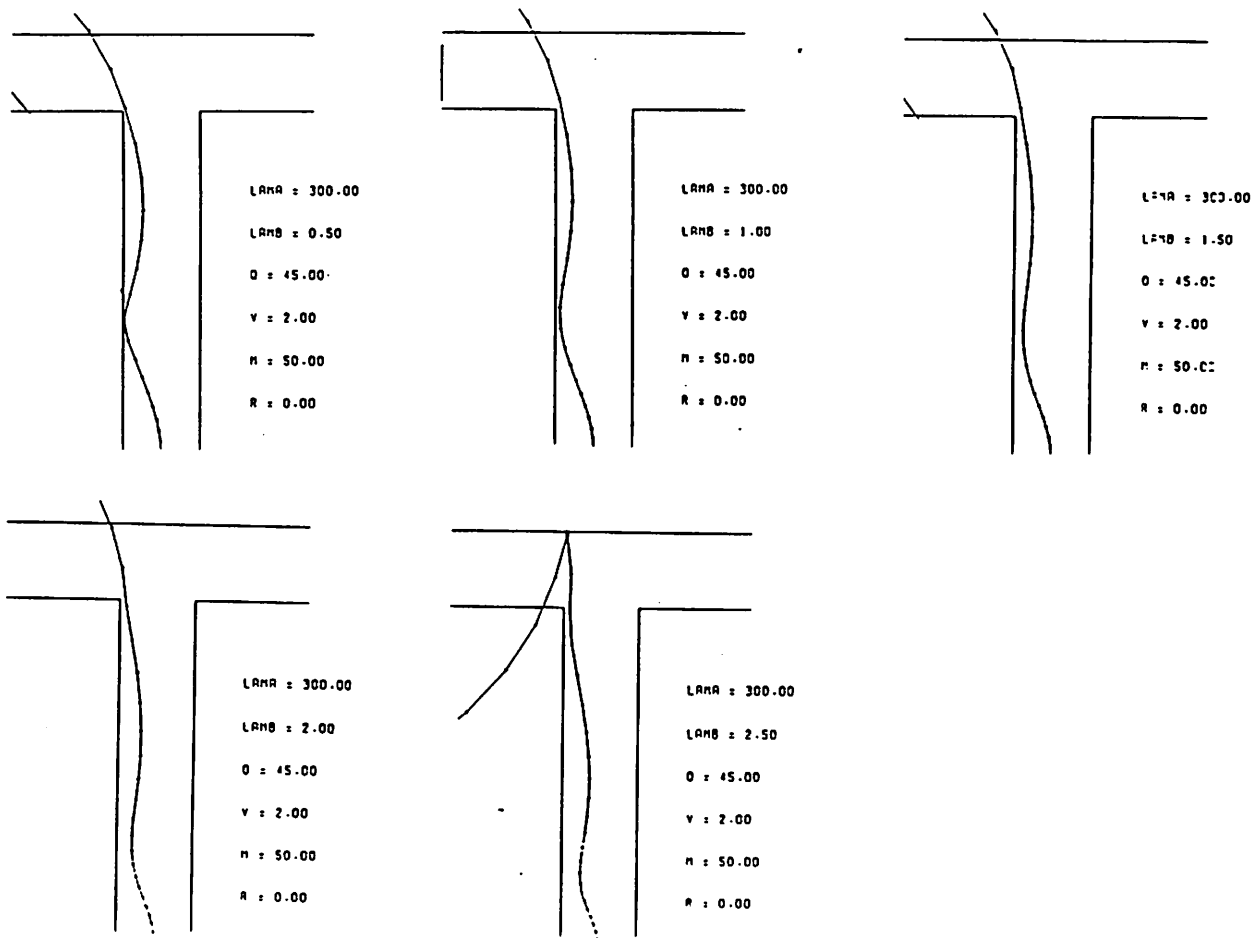


図 - 9 - 2 画面出力の結果 (2)

図 - 9 - 2 は曲がり角で曲がるように、壁の磁力を強めていった場合のものである。壁の磁力を強めても、やはり速度が大きいいため、とても曲がっているとはいえない。曲がるまえからアトラクションの影響をうけるという点は解消されていない。

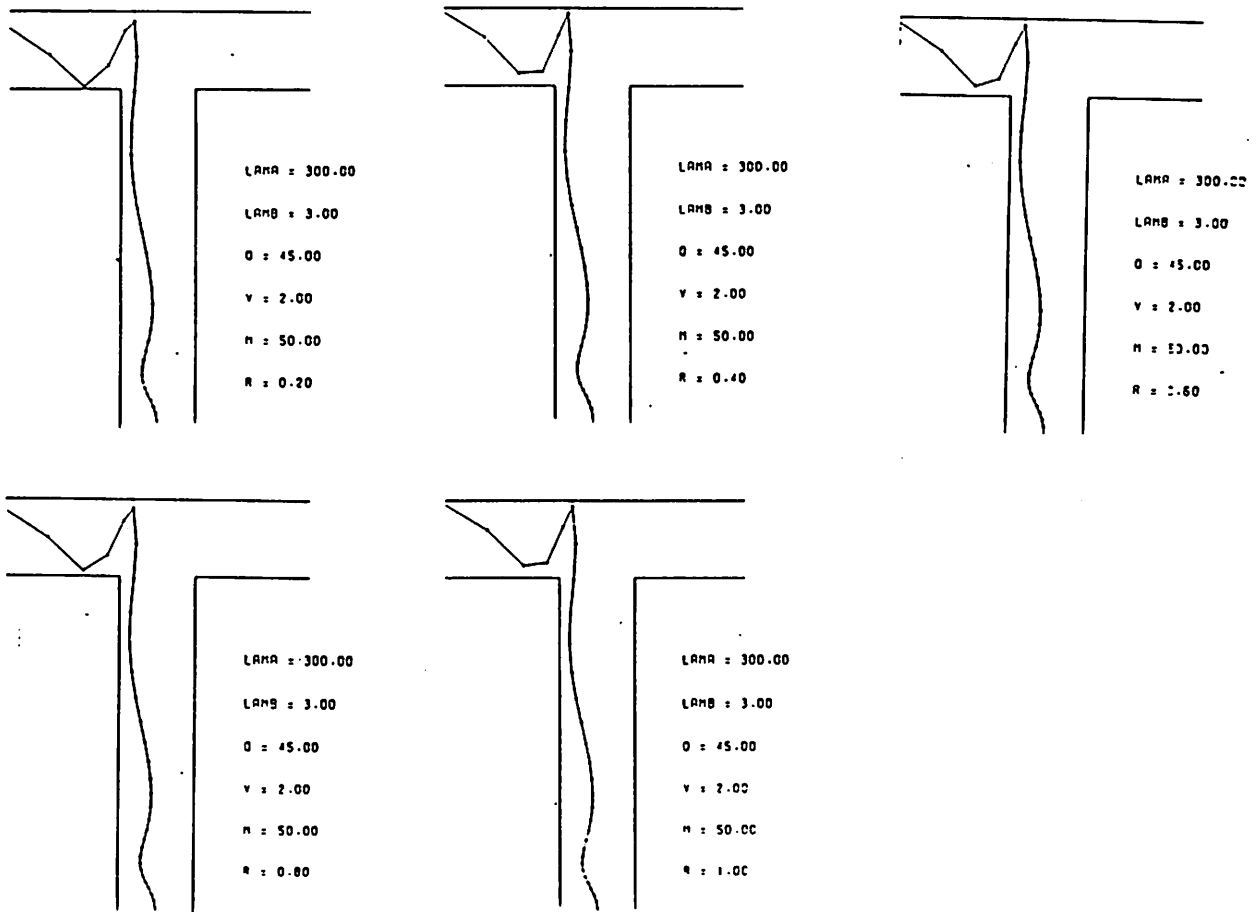


図 - 9 - 3 画面出力の結果 (3)

図 - 9 - 3 は速度の 2 乗に比例する抵抗を用いた場合である。

$$(F_x = F_x - (F_x / | F_x |) \cdot R \cdot V^2)$$

抵抗の分、速度はおちているので、壁を突き抜けるようなことはないが、実験のデータには程遠い。

2-2-3 本研究への磁気モデルの応用の問題点

以上、実験結果に比べてあまりよい結果は得られなかった。

その原因としては以下のようなことが考えられる。

- 1、アトラクションとして線磁極を使用しているが、点磁極や平面磁極としたほうが、より現実的ではないか。
- 2、壁も同様であるが、アトラクションについては特に、その影響が及ぶ範囲を限定するべきではないか。（たとえば視野に入らない壁からは、点磁極は影響を受けない）
- 3、実際の歩行では、遠くの目標に向かって進むにしても、単位時間では少し手前に目標を設定して歩いているので、アトラクションが移動するモデルを考えるべきではないか。

実際の岡崎のモデルでは、最終的には非常時（建築空間内の火災等）の常識をこえた人間行動の解明を目標としており、より複雑な歩行行動を表現するために、さきに述べた欠陥等を補うために、様々な条件が付け加えてある。

- 1、各障害物（壁を含む）、およびアトラクションは、それぞれどこの領域の歩行者に対して影響を及ぼすかをあらかじめ決定しておく。
- 2、歩行者の歩行速度に上限を設け、その上限に達した場合は力を受けても、ベクトルの向きのみが変化し最高速度は越えない。
- 3、歩行領域に自由な磁場を造るために、適当な磁荷を持つ、複数のアトラクションを与える。
- 4、歩行者を質点としてではなく体の厚みも考慮に入れ、さらに「人体領域」（歩行者の回りの、体の幅の半分を半径とした円の内部）の概念により、壁への衝突を回避するための補正を行なっている。図-9のように「人体領域」と壁が交わる場合には、「人体領域」と壁が接するまで位置補正をし、速度についても同様な補正が行なわれる。（(13)式及び、(14)式参照）

5、大規模建築物内など、複雑でいくつかの経路が選択出来るような場合の歩行では、「目的領域」（その領域に入ると歩行が終了する領域）にむかって最短経路を通る必要がある。最短経路の選択方法はここでは省略するが火災などが発生した場合にはその経路を変更しなければいけない事態が生じる。そのためには3の方法により、あらゆる場合を想定してアトラクションを配置すればよいが、それは数的に不可能である。そのような際には歩行者（点磁極）が単位時間ごとに自己のアトラクションを自ら決定していく方法がとられる。図-10のようにコーナーの中心に半径Lの円をえがき、歩行者（点磁極）の位置からこの円に接線を引く。この接線の延長上に、接点からLの距離にアトラクションを置く。Lの値は、仮定として幅員が2.8m以上のときは歩行者の最高速度、2.8m以下のときは幅員の半分の値をとるとしている。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} -\sin T \\ \cos T \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$\begin{pmatrix} v' \\ u' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix} + \frac{R}{dt} \begin{pmatrix} -\sin T \\ \cos T \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (14)$$

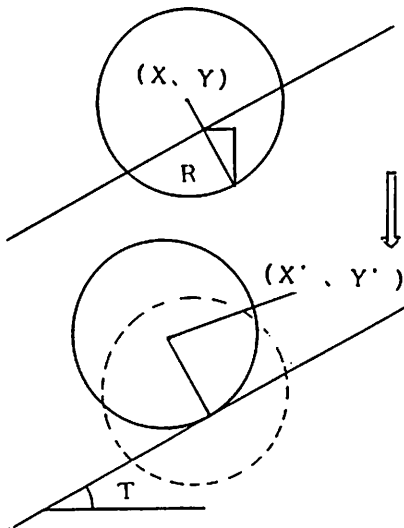


図-10 位置補正

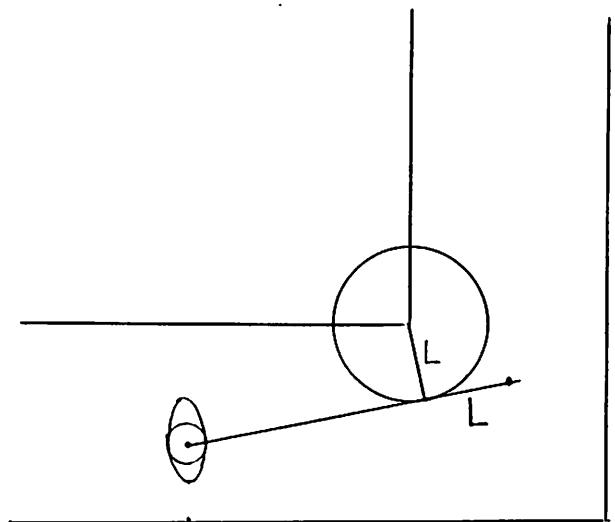


図-11 アトラクションの設定

第 3 章 歩行モデルの構築

3 - 1 近似式の設定

既往の研究では、実際に歩行者を質点などに置き換え、それを動かして歩行を再現するという考え方を採用していたが、ここでは単純に、実験結果を解析した軌跡だけを再現することに重点を置き、質点がこういった速度変化、加速度変化をもつ運動をするかといったことには特に触れない。

歩行軌跡を再現するといっても、個人ごとの歩行軌跡は様々で、その全てをある程度同等な式で具体的に再現することはほとんど不可能に近い。そこで、以下に述べるような仮定により、全体の歩行軌跡を簡略化したうえで、その簡略化された歩行軌跡を、ある関数により近似することを考える。

- 仮定 1、軌跡は曲線部分と直線部分に分けられ、互いに接している。
- 仮定 2、速度は終始一定で、曲線部分では加速度はなめらかに増減する。
- 仮定 3、直線部分は等速直線運動で、前後の直線部分は直交する（直角に曲がる）。

以上の仮定を満たす関数として、(15)式を考える。

$$\begin{cases} x = a \cdot \sin^n t \\ y = b \cdot \cos^n t \end{cases} \quad (0 \leq t \leq \pi / 2) \dots \dots \dots (15)$$

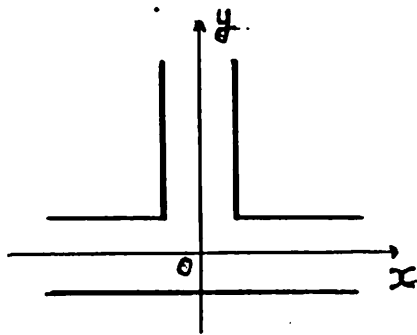


図 - 12 座標軸の位置

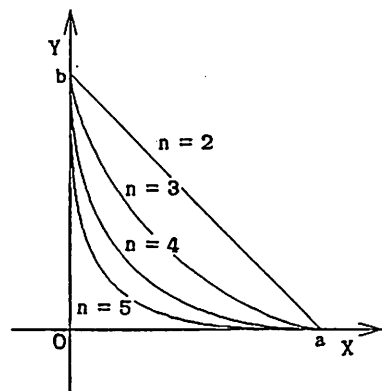


図 - 13 a、b、n の概念図

(15) 式は、座標軸上では、x軸とy軸に接しているが、平行移動させることによって任意の位置に移動する。つまり、あと2つ未知数が加わることになる。そこで、新たに仮定4として

仮定4、直線部分は、廊下の中央を通る。

を加えると、座標軸を、それぞれ廊下の中央にもってくることにより、全ての歩行例が(15)式によって表わされることになる。(図-12参照)

よって(15)式で未知数は、a、b、nの3つとなり、aは曲がり終る位置を、bは曲がり始める位置を、nはその値が大きいほど、曲がり方がきつくなるということを示している。(図-13参照)

3-2 近似式における係数の決定

ここでは、さらに $n=4$ であると仮定し、未知数を2つに減らしたうえで、各歩行軌跡についてa、bを決定する。

なお、bについてはたえず正の値をとるが、aは右曲がりの場合は負の値をとる。しかし右曲がりの場合は、(15)式を(16)式に変えることにより、a、bともに、たえず正の値をとるようにする。

$$\begin{cases} x = -a \cdot \sin^n t \\ y = b \cdot \cos^n t \end{cases} \quad (0 \leq t \leq \pi/2) \dots \dots \dots (16)$$

どこで直線部分と曲線部分をわけるかについては、各歩行毎に条件を平等にするために、曲線部分の中間地点(曲がり角の頂点と廊下の中心軸の交点を結んだ線と、軌跡が交わる点(図-14参照))から前後1.5秒間ずつ、計3.0秒間の座標(91座標)を抽出し、この部分が曲線部分を形成するものとみなす。

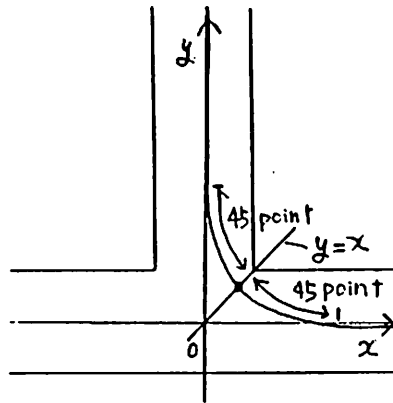


図 - 14 抽出する座標

また、左曲がりの場合、 x 座標は $x = a \cdot \sin^4 t$ ($0 \leq t \leq \pi/2$) で与えられるが、さきに述べたように $a > 0$ なので、 $x \geq 0$ でなければいけない（同様に $b > 0$ より $y \geq 0$ ）。しかし、実際の実験結果は、必ずしもその条件を満たしてはいない（仮定4を満たさない例が存在する）。このままでは曲線部分として抽出した91点のうち1つでもこのような点があれば、 a 、 b を計算することは出来ない。そこで、 $x < 0$ になった場合は、 $-x$ として計算するものとする。右曲がりについても、同様な補正を行なう。

以上のような条件の下で、全ての歩行軌跡（右、左、2種類の通路幅ごと計156サンプル）について、最小2乗法により、 a 、 b を決定した。

まず(15)式を(17)式のように直線式に変形して、この式に最小2乗法を用いて、まず係数を決定、その後 a と b を決定するという方法をとった。

$$\sqrt{y} = \sqrt{b} - \sqrt{b/a} \cdot \sqrt{x} \quad \dots \dots \dots (17)$$

また、以後相関係数とは、(17)式における \sqrt{x} と \sqrt{y} の相関係数であり、 -1 に近いほど、(17)式を直線と見なすことができ、(15)式を満たしていることになる。

巻末資料の図-15は、実験結果の軌跡と近似式(15)による軌跡（定数 a 、 b をそれぞれ代入）とを同一座標軸上に表わしたものである。

3-3 定数 a、b についての考察

以上のように求めた、a、b について、どのような特徴、関係があるかについて考察する。（ここで使用した歩行例は、1.84m 幅廊下の右曲がり、左曲がりがそれぞれ38例ずつ、1.20m 幅廊下は、それぞれ40例ずつである。）廊下幅ごと、右曲がり、左曲がりごとに a、b、 a/b の3種類の数値について平均、標準偏差、変動係数を求めたものが表-1である。

表-1 各数値の平均、標準偏差、変動係数

	a			b			a / b		
	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数
1.84m 右 左	2.55	0.70	0.28	2.23	0.72	0.32	1.24	0.53	0.43
	2.53	0.46	0.18	2.57	0.70	0.27	1.05	0.33	0.31
1.20m 右 左	1.98	0.24	0.13	1.68	0.23	0.14	1.20	0.26	0.21
	1.90	0.28	0.15	1.98	0.36	0.18	0.99	0.23	0.23

表-1 より考えられることを示す。

廊下幅、右曲がり、左曲がりの違いによらず、a、b の変動係数よりも、 a/b の方が大きくなっている。 a/b の変動係数が a、b のそれに比べて小さくなれば、個人による歩行軌跡の違いは軌跡曲線の拡大、縮小により表現できる（早く曲がり始めた人は曲がり終るのが遅く、直前で曲がった人はすぐ曲がり終って直線運動にもどる）が、実際にはその逆になっている。これは、個人によって、曲がり始める位置（b）と曲がり終る位置（a）については選択性が見られない、ということを表わしている。

次に廊下幅が歩行に及ぼす影響を考える。今回は2種類の廊下幅で実験を行ったわけだが、現在考えている歩行軌跡の近似式が、双方について同等な近似であるかを論じる必要がある。a、b を決定する際に求めた相関係数を比べることで、廊下幅による近似の誤差を比べる（表-2）。

表 - 2 相関係数についての平均、標準偏差、変動係数等

	最 大	最 小	平 均	標準偏差	変動係数	サンプル数
1.84m 右	-0.615	-0.997	-0.945	0.066	-0.070	38例
1.84m 左	-0.855	-0.998	-0.975	0.025	-0.026	38例
1.20m 右	-0.615	-0.981	-0.865	0.074	-0.085	40例
1.20m 左	-0.834	-0.982	-0.922	0.035	-0.038	40例

表 - 2 によると、1.20mの方が若干相関が悪くなっているのがわかる。その理由としては、以下のようなことがあげられる。

- 1、図 - 14からもわかるように、1.20mの場合は仮定4の「直線部は通路の中心を通る。」が、1.84mの場合にくらべて十分に満たされていない。
- 2、廊下幅が狭くなるとどうしても曲がり方はきつくなる。そのためa、bを求めた時点で仮定した $n = 4$ では表現しにくくなっている。

以上のような理由で、今回の解析では、廊下幅による歩行への影響は十分信頼性をもって論じることはできない。

最後に右曲がりと左曲がりの違いは、表 - 1、表 - 2 からわかるように、明らかに存在することがわかる。表 - 1からは、曲がり終る位置は双方変わらないが、曲がり始める位置は右曲がりのほうが大きく、早くから曲がり始めていることがわかる。これは、右曲がりのほうが早くからコーナーを意識しているということを表わす。表 - 2からは、左曲がりのほうが今回の近似式に対する相関が高く、その変動係数も小さい。左曲がりの相関係数が高いということはそれだけよりスムーズに曲がっていると考えられ、逆に右曲がりについては変動係数が大きく、各歩行にばらつきがみられる。これらの違いは、利き腕（利き足）の違い、普段の歩行習慣の違い、曲がる際の踏み込む足の違い等に大きく影響されていると考えられるが、本研究では解析の結果より左曲がりのほうが曲がりやすいのではないかとということがわかった。

第 4 章 総論

本研究では実験データの解析から歩行シミュレーションモデルの構築を試みたわけだが、今回は仮定した事項が多すぎて、その仮定を外れると（例えば直線部で廊下の中央を通らない場合や直線部が直行していない場合など）近似曲線と実際の歩行経路がみるからに一致しないという例もいくつかみられた。

また、本研究で考えた相関係数は、本来曲線式である近似式を直線式に変換したものについての相関係数であるから、相関係数の高低が直接、図-15での近似の様子をそのまま表現しているとは言えない場合もある。

今回、仮定した事項のうち、「仮定4：直線部分は、廊下の中央を通る」や「 $n=4$ 」などを取り除き、それらが個人によって決められる定数かどうか、あるいは廊下の形状などによる定数かどうかなどを今後明らかにして行けば、もっとよい近似が得られると考えられる。

また、歩行を、曲がり始める位置と曲がり終る位置で表わすことによって、右曲がりと左曲がりの違いなどを具体的な数値によって表現できたのは、今後のモデル構築に十分役立つものであると考える。

参考文献、注釈

1) 「画像処理を利用したT字型廊下における歩行特性の研究」

田中春彦

2) 速度、加速度は差分により次式のように求める。

$$V_{x_i} = \frac{\sqrt{(x(i))^2 + (x(i+1))^2}}{dt}$$

$$V_i = \sqrt{V_{x_i}^2 + V_{y_i}^2}$$

$$a_{x_i} = \frac{x(i-1) + 2x(i) + x(i+1)}{dt^2}$$

3) 「歩行者の行動モデルとシミュレーション」

平井一正、西田素之：人間工学 Vol.13, No.5 ('77)

4) 「建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究その1～5」

岡崎甚幸：日本建築学会論文報告集第283～285、299、302号

「デジタル信号処理入門」

三上直樹：CQ出版社「トランジスタ技術」1987年12月～88年3月