

# DEM 型歩行者モデルによる回避シミュレーション

小泉孝之<sup>1</sup>, 辻内伸好<sup>1</sup>, 赤塚遼多<sup>2</sup>

<sup>1</sup>同志社大学 工学部

<sup>2</sup>同志社大学大学院 工学研究科

## 概要

粉体工学や土質力学で注目されている DEM に OV モデルを援用し、行動特性を詳細に表現した DEM 型歩行者モデルについて述べる。さらに、そのモデルを用いて行った障害物や他の歩行者を回避するシミュレーションを紹介する。

## Avoidance Simulation by DEM Foot Traffic Model

Takayuki Koizumi<sup>1</sup>, Nobutaka Tsujiuchi<sup>1</sup>, Ryota Akatsuka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Technology, Doshisha University

<sup>2</sup>Grad. School of Engineering, Doshisha University

## Abstract

In this study, we explain DEM Foot Traffic Model described in detail, which use OV model to DEM attention-getting in the field of micromeritics and terramechanics. In addition, we introduce a simulation avoiding obstacle and other footer by using the model.

## 1 はじめに

道路、ショッピングモールや縁日、または地震や火災などの災害時など、様々な場面で渋滞や混雑が発生する。このような渋滞や混雑といったものは人に精神的ストレスを与え、交通事故の発生率を高める。よって、渋滞を解消・緩和し、人がスムーズに移動できる環境を設計するため交通モデルによる交通流解析が重要となる。

現在では車や人などの対象物を粒子で表現し、個々の粒子挙動を追跡するマイクロモデルを用いた解析が一般的である[1,2]。本研究では空間を連続的に捉え、理論に基づき粒子挙動を計算する DEM (Distinct Element Method、個別要素法) [3]を用いて行動特性を詳細に表現した歩行者モデルを構築する。また、粒子の加速度計算には OV (Optimal Velocity、最適速度) モデル[4]を援用する。

そして、構築したモデルを用いて障害物や他の歩行者を交えた障害回避シミュレーションを行った。さらにシミュレーション同様の実験を行い、結果を比較してモデルの有効性を検証した。

## 2 DEM 型歩行者モデルの概要

DEM 型歩行者モデルの構築を行うにあたり、歩行者を粒子としてモデル化した粒子の加速度計算には

OV モデルを援用する。OV モデルは前方粒子との距離から最適な粒子速度を求め、粒子を加速および減速させる計算方法である[4]。 $x$  に位置する粒子加速度  $a$  は粒子間距離  $\Delta x$  を用いて以下の式で表される。

$$a = \alpha(V(\Delta x) - v) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  は感度係数、 $v$  は粒子速度、 $V(\Delta x)$  は粒子間距離から求められる最適速度関数である。 $V(\Delta x)$  は以下の式で求められる。

$$V(\Delta x) = \frac{v_{\max}}{2} \left( \tanh\left(\frac{\Delta x - d}{w}\right) + \tanh\left(\frac{d}{w}\right) \right) \quad (2)$$

ここで、 $v_{\max}$  は制限速度、 $\Delta x$  は粒子間距離、 $d, w$  は定数である。本研究では  $d = 0.47, w = 0.45$  とした。

次に、DEM について説明する。DEM とは、解析対象の構造体を連続体としては取り扱わず、個々の粒子要素からなる集合体でモデル化し、その集合体を離散的に解析する手法である[3]。DEM では粒子加速度  $\bar{a}$  を微小時間増分  $\Delta t$  で差分近似して計算する。そして、速度  $\bar{v}$  および位置  $\bar{x}$  を以下の式で求め粒子を時々刻々移動させる。

$$\bar{v}|_{t+\Delta t} = \bar{v}|_t + \bar{a}|_{t+\Delta t} \Delta t \quad (3)$$

$$\bar{x}|_{t+\Delta t} = \bar{x}|_t + \bar{v}|_{t+\Delta t} \Delta t \quad (4)$$

このように新しい時刻  $t + \Delta t$  における加速度を数値積分すると、時刻  $t + \Delta t$  における変位および速度が得られる。この計算を  $\Delta t$  で繰り返すことによって粒子の運動軌跡が計算できる。

本来 DEM では粒子同士が接触した際、Voigt モデルを用いて接触力を計算し加速度を求めるが、歩行者モデルでは非接触状態で粒子の加速度を計算する必要がある。そこで、上述の OV モデルを用いて加速度計算を行うことで DEM 型歩行者モデルを構築する。

続いて、構築したモデルを用いた障害回避アルゴリズムについて述べる。このモデルでは、粒子  $i$  の目標方向に対して進行の妨げとなる可能性のある障害粒子を判別する視野領域、視野領域に含まれる粒子の内実際に減速ベクトル  $\vec{v}_o$  の影響を受ける粒子を判別する発見領域を定義する[1]。視野領域および発見領域を図 1 に示す。

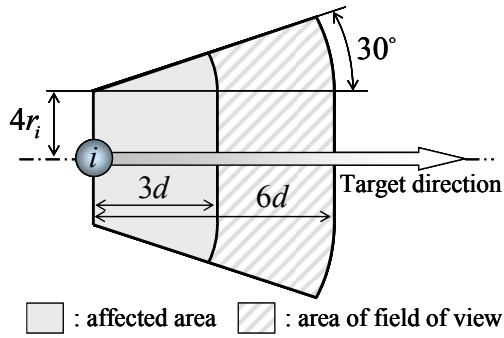


図 1: 視野領域および発見領域  
( $r_i$  は粒子  $i$  の粒子半径)

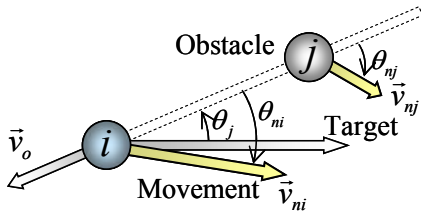


図 2: 粒子  $i, j$  の粒子位置および速度の関係  
(黄色矢印は粒子の進行速度ベクトル)

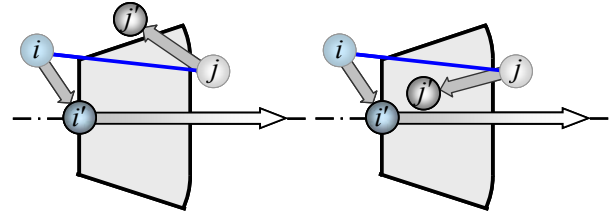
視野領域内に障害粒子  $j$  の中心が存在しない場合、粒子  $i$  は周りの粒子からの影響を受けないとして粒子  $i$  の目標方向に対し最高速度  $v_{i\max}$  を与える。一方、視野領域内にある粒子  $j$  の中心が存在する場合、時刻  $t$  での  $i \rightarrow j$  方向に対する粒子  $i, j$  の速度  $|\vec{v}_{ni}| \cos \theta_{ni}$ ,  $|\vec{v}_{nj}| \cos \theta_{nj}$  をそれぞれ求める(図 2)。

$|\vec{v}_{ni}| \cos \theta_{ni} \leq |\vec{v}_{nj}| \cos \theta_{nj}$  の場合、粒子  $i$  は粒子  $j$  に追いつかないため、影響を受けないとして粒子  $i$  の目標方向に対し最高速度  $v_{i\max}$  を与える。逆に  $|\vec{v}_{ni}| \cos \theta_{ni} > |\vec{v}_{nj}| \cos \theta_{nj}$  の場合、 $i \rightarrow j$  方向に対して粒子  $i$  は粒子  $j$  に近づいていくため、進行の妨げに

なる可能性があると考えられる。そこで、 $i \rightarrow j$  方向に対して粒子  $i, j$  が接触する時間  $\Delta t_{ij}$  を以下の式より求める。

$$\Delta t_{ij} = \frac{|\vec{x}_i - \vec{x}_j| + r_i + r_j}{|\vec{v}_{ni}| \cos \theta_{ni} - |\vec{v}_{nj}| \cos \theta_{nj}} \quad (5)$$

そして、時刻  $t$  での粒子の位置および速度情報から  $\Delta t_{ij}$  後の粒子  $i, j$  の位置  $\vec{x}_i', \vec{x}_j'$  をそれぞれ求める。粒子  $i', j'$  の位置関係より粒子  $i'$  の発見領域内に粒子  $j'$  の中心が存在するか否かを判定する。粒子  $j'$  が存在しない場合(図 3(a))、粒子  $j$  は粒子  $i$  に干渉しないと考えられるため、減速ベクトル  $\vec{v}_o$  の影響を受けないとして粒子  $i$  の目標方向に対し最高速度  $v_{i\max}$  を与える。一方、存在した場合(図 3(b))、粒子  $j$  は粒子  $i$  の進行の妨げになると考えられるため、減速ベクトル  $\vec{v}_o$  の影響を受ける。



(a)  $|\vec{v}_o| = 0$  (b)  $|\vec{v}_o| \neq 0$

図 3: 発見領域での障害粒子判定

減速度  $|\vec{v}_o|$  は式(2)の最適速度関数を利用して以下の式より求める(図 4(a))。

$$|\vec{v}_o| = \alpha \left( V(\Delta x_{ij}) - |\vec{v}_{ni}| \cdot \cos \theta_{ni'} \right) \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$\left( \Delta x_{ij} = \min(|\vec{x}_i - \vec{x}_j|, |\vec{x}_i - \vec{x}_j'|) \right)$$

さらに、 $|\vec{v}_o|$  を用いて、時刻  $t + \Delta t$  における  $i \rightarrow j$  方向に対する進行方向  $\theta_{ni'}$  を

$$\theta_{ni'}|_{t+\Delta t} = \cos^{-1} \left( \frac{|\vec{v}_{ni}| \cdot \cos \theta_{ni'}|_t - |\vec{v}_o|}{v_{i\max}} \right) \cdot \frac{-\sin \theta_{nj}}{|\sin \theta_{j'}|} \quad (7)$$

とし、進行速度  $|\vec{v}_{ni}|$  は以下のように求める(図 4(b))。

$$\begin{cases} |\vec{v}_{ni}| = v_{i\max} & \left( |\theta_{ni'} + \theta_{j'}| \leq \pi/6 \right) \\ |\vec{v}_{ni}| = v_{i\max} \cdot \cos \left( |\theta_{ni'} + \theta_{j'}| - \frac{\pi}{6} \right) & \left( |\theta_{ni'} + \theta_{j'}| > \pi/6 \right) \end{cases} \quad (8)$$

このアルゴリズムを用いることで、目標方向上に障害物が存在しても無駄な減速や静止をせず、進行方向のみを制御して障害を回避できると考えられる。

Condition No.	X-Y coordinate([m], [m])		Target direction		Max speed ( $v_{\max}$ ) [m/s]	
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2
(1)	(-2,0)	(0,0)	X	0	0.86	0
(2)	(-2,0)	(-2,0)	X	X	0.86	0.43
(3)	(-2,0)	(2,0)	X	-X	0.86	0.86

表 1: 回避シミュレーションパラメータ

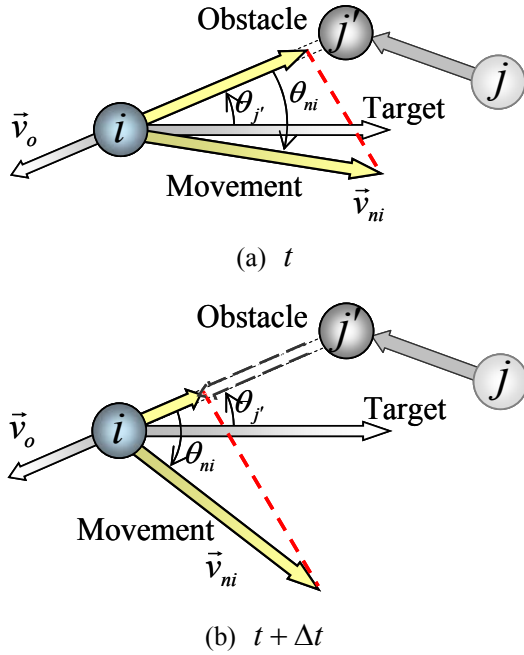


図 4: 粒子  $i$  の速度ベクトル計算

### 3 障害回避試験

構築したモデルの有効性を検証するため、障害物や他の歩行者を回避するシミュレーションおよび実験を行った。これらの試験では、(1)静止した障害物を回避する場合(障害回避)、(2)障害が同一方向に移動している場合(追い越し)、(3)反対方向に移動している場合(すれ違い)について検証した。以下に回避シミュレーションおよび実験について述べる。

#### 3.1 回避シミュレーション

表 1 に各条件での 2 粒子の X-Y 初期座標、目標方向および最大速度を示す。本シミュレーションでは粒子半径を 0.2[m]、時間増分を  $1.0 \times 10^{-4}$ [s] とした。

#### 3.2 回避実験

シミュレーション同様の実験を行った。実験の様子

を図 5 に示す。歩行者の挙動は図 6 に示すように被験者に 4 つのマーカを取り付け、モーションキャプチャシステムを用いて計測した。計測時のサンプリング周波数は 200[Hz] とした。各条件における被験者または障害物の初期位置および進行方向はシミュレーションと同様とし、被験者には目標方向に対して自然に歩くよう指示した。また、被験者には目標方向が明確になるよう、カラーコーンを用いて幅 3[m] の通路を設けた(図 5)。

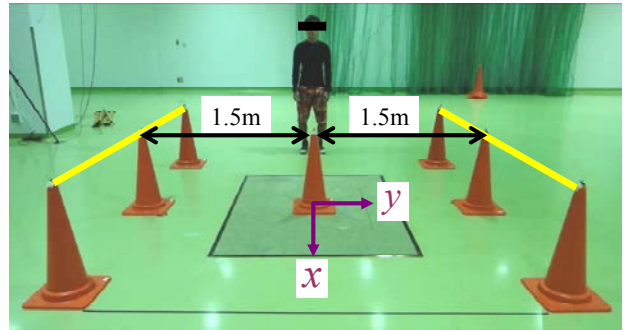
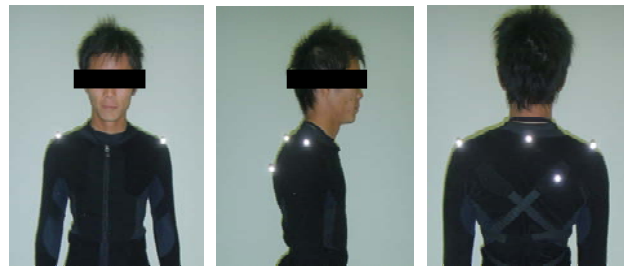


図 5: 実験の様子((1)障害回避の場合)



(a) 正面 (b) 側面 (c) 背面

図 6: 被験者のマーカー取り付け位置  
(右肩、左肩、背中、オフセット)

### 4 結果および考察

各条件における回避シミュレーションの 5 秒間の粒子軌道を図 7 に示す。白粒子は NO.1、黒粒子は No.2 の粒子をそれぞれ表している。次に、回避実験

における被験者の歩行軌跡を図 8 に示す。図 7,8 より、回避シミュレーションの粒子軌道は回避実験の歩行軌道とよく一致している。また、各図は一定時間間隔で位置座標をプロットしている。プロット間隔を見るとバラつきが見られないため、シミュレーションと実験の双方において一定速度で移動していることがわかる。以上の結果から、本研究で構築した DEM 型歩行者モデルは有効であると言える。

また、実験では被験者が移動後に  $|x|=2[m]$  付近に到達した時、プロット間隔が狭くなり、歩行速度が低下する傾向が見られる。これはモーションキャプチャのマーカー認識範囲の制限があったため、 $|x|=2[m]$  で静止するよう指示したためである。シミュレーションでは目標方向に移動し続けるように設定しているが、障害の回避後なので障害を回避する結果に大きな影響はないと考えられる。

## 5 まとめ

本研究では、DEM に OV モデルを援用することで、DEM 型歩行者モデルの構築を行った。そのモデルを用いて障害を回避するシミュレーションを行った結果、実際の歩行者同様の歩行挙動が見られた。

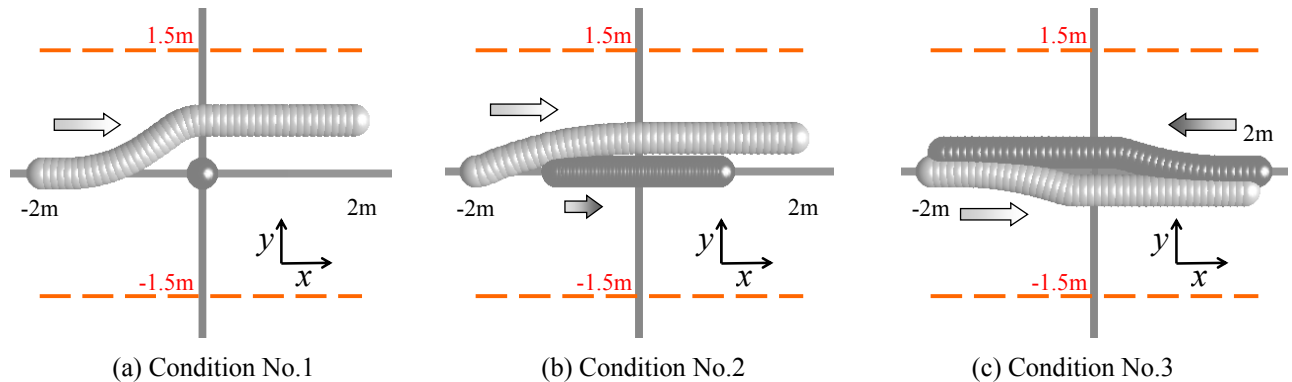


図 7: 回避シミュレーションにおける粒子軌道

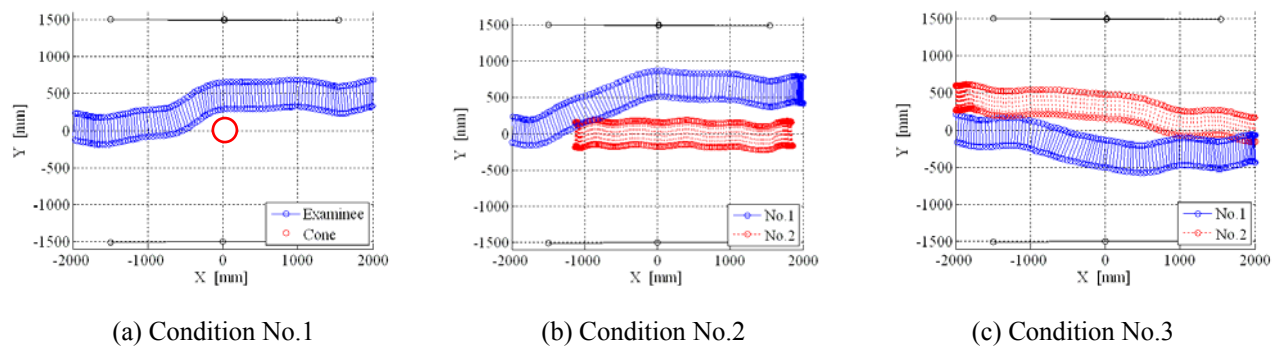


図 8: 回避実験における被験者の歩行軌道

今後は壁の影響を考慮したモデルを考える。さらに対象数を増やし群集での行動特性を調査し、歩行者の行動特性を詳細に表現したモデルの構築を目指す。

## 参考文献

- [1] E. Harada, H. Gotoh, Y. Maruyama, Proposal of DEM-base Crowd Refuge Model with the Optimal Velocity Model, Japan Society of Civil Engineers, **Vol.51** (2007) 553-558.
- [2] K. Nishinari, Jammology Physics of Self-driven Particles Toward Solution of All Jams, Tenth Annual Japanese-American Frontiers of Science Symposium (2007).
- [3] P.A. Cundall, O.D.L.Strack, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies Geo-technique, **Vol.29 No.1** (1979) 47-65.
- [4] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama, Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. Phys. Rev. E, **Vol.51 No.2** (1995) 1035- 1042.