

令和元年5月29日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01294

研究課題名（和文）高密度群集の歩行経路追跡システムの開発と歩行者シミュレーションモデルの高精度化

研究課題名（英文）Development of tracking system of pedestrian's trajectory and improvement of pedestrian simulation model

研究代表者

川口 寿裕（Kawaguchi, Toshihiro）

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：80234045

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：高密度群集における群集事故発生時の解析にも適用できる力学ベース粒子モデルによる歩行者シミュレーションの高精度化を目指し、検証用データ蓄積を目的とした歩行者の移動軌跡を追跡するシステムの開発を行った。歩行者が車椅子利用者を避ける実際の挙動に関して、モーション・キャプチャを用いて軌跡を追跡し、解析を行った。歩行者シミュレーションにおいては仮想バネモデルを導入し、実験データをもとに各種パラメータを決定した。この結果をもとに、車椅子利用者を含む群集の行動特性について数値シミュレーションを実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高密度群集は時に群集事故に至る場合がある。しかし実験によるデータ蓄積はその危険性から困難であり、事故の発生メカニズムは十分に分かっていない。そこで、コンピュータ・シミュレーションによる解析が有用と考えられるが、現状ではシミュレーション・モデルの精度が不十分であり、さらなる高精度化が望まれる。本研究はモデル検証に不可欠な実際の歩行者データの解析を行い、シミュレーション・モデルの高精度化を目指すものである。日本では東京オリンピックや大阪万博など、海外からも多くの人が集まる行事が予定されていることもあり、本研究の社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Aiming to improve the accuracy of the pedestrian simulation model by a dynamics-based particle model that can be applied to analysis for high-density crowd accidents, we develop a system for tracking pedestrian's trajectories to validate the calculation results. The motion capture was used to track and analyze trajectories for the actual behavior of pedestrians avoiding wheelchair users. In the pedestrian simulation, a virtual spring model was introduced, and model parameters were determined based on the experimental data. A numerical simulation was performed to investigate the characteristics of the crowd behavior including wheelchair users.

研究分野：社会・安全システム科学

キーワード：群集事故 歩行者シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

多くの人が集まる場所では、何らかのきっかけで群集事故が発生するおそれがある。日本では2001年7月に兵庫県明石市の花火大会終了後に朝霧歩道橋内で群集雪崩が発生し、11人が死亡した。海外では2015年9月にメッカで行われたイスラム教大巡礼において、2000人以上が死亡する事故が発生している。この地では以前から毎年のように群集事故で多くの人々が亡くなっていたが、2006年に350人の死者を出す事故が発生したのを契機に、施設の改修が行われていた。それにも関わらず、2015年に大きな事故が発生したことで、あらためて群集事故への対策の困難さが浮き彫りになったと言える。

日本人は比較的行儀が良く、ルール遵守の意識が高い国民であることから、これまでは混雑する場所でも一定の秩序が保たれ、大きな群集事故が発生することは比較的少なかった。しかし近年は海外からの旅行者や滞在者が急激に増えており、異なる文化・習慣を持つ人の群集に対してはこれまでの常識が通用するとは限らない。2019年のラグビー・ワールドカップや2020年の東京オリンピックを控えた日本において、群集事故発生の危険性は高まっていると考えられる。しかし、事故防止のノウハウを実験的に蓄積することは困難である。

これらのことから、高密度群集の挙動を予測するための数値シミュレーション手法の高精度化が必要である。ただし、歩行者モデルを検証するための実験手法が十分に確立されておらず、データも不足しているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、個々の歩行者の軌跡を個別に追跡する粒子モデルによる数値シミュレーション手法を高精度化することを目的とする。特に、群集事故の発生が予想されるような高密度群集にも適用できる手法を確立する。また、提案した歩行者モデルの妥当性を検証するため、実際の歩行者の軌跡を追跡する計測手法についても検討する。実測データとの比較により、歩行者モデルのパラメータを調整し、シミュレーション結果の高精度化を図る。

### 3. 研究の方法

#### (1) モーション・キャプチャ

モーション・キャプチャとは現実の人物や物体の動きをデジタル的に記録する技術である。主にスポーツ及びスポーツ医療の分野における選手たちの身体の動きのデータ収集などに利用される。体の各部位に反射マーカ（図1）を取り付け、複数の赤外線カメラ（図2）により3次元位置を計測する行うシステムである。本研究では（株）ノビテック製 Venus3D を用いた。反射マーカは車椅子利用者と歩行者の頭上に設置した。

赤外線カメラを図3のように3台並べて設置した。原理的にはカメラ2台でも軌跡を追跡できるが、カメラと歩行者・車椅子利用者が一直線上に並んだ瞬間にいずれかのマーカが隠れてしまい、反射光が赤外線カメラに届かなくなってしまう可能性がある。このようになってしまうと、システムが対象を見失い、追跡できなくなる。本研究では3台目のカメラを設置することにより、これをバックアップできるようにした。



図1 反射マーカ



図2 赤外線カメラ

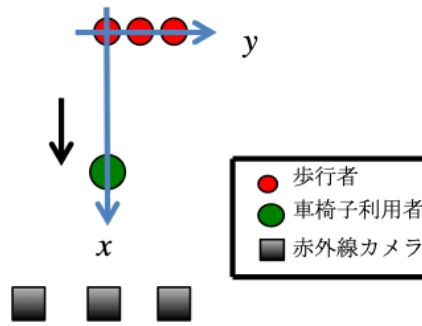


図3 実験の概況

(2) 歩行者モデル

高密度群集にも適用できるモデルとして、離散要素法 (DEM) をベースとする。DEM における接触力は図 4 に示すように、弾性反発を表すバネ、エネルギー減衰を表すダッシュポット、滑り摩擦を表すスライダでモデル化される。これらの力から Newton の運動方程式を用いることで加速度が得られ、時間で積分することにより速度および位置を求めることができる。

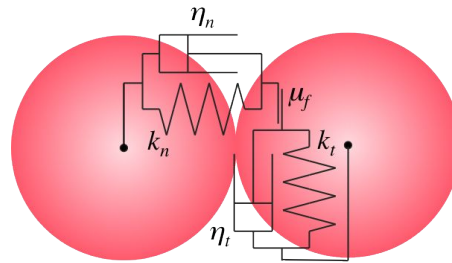


図4 DEM 接触力モデル

DEM はもともと岩石の運動を計算するために土木工学の分野で開発された手法である。このため、上記の力が作用するのは粒子同士が物理的に接触したときのみである。しかし、歩行者は前方に障害物や他の歩行者がいる場合、通常は衝突する前にそれらを避ける。したがって、これらの挙動を表現するためには新たなモデルを導入する必要がある。

そこで本研究では、図 5 に示す仮想バネモデルを導入した。本モデルは、自分から (i) 一定の距離内かつ (ii) 一定の視野範囲内にいる他の歩行者から弾性反発力を受けるようにするものである。つまり、歩行者 A は図 5 において網掛けした扇形の領域内に存在する歩行者 B から力を受ける。C と D は上記 (i) の条件を満たさず、E と F は (ii) の条件を満たさないため、歩行者 A はこれらの歩行者からは力を受けない。

この弾性反発力は心理的な力を表しており、Newton の第三法則 (作用・反作用の法則) は成立しない。つまり、歩行者 A は歩行者 B から力を受けるが、B は A から力を受けない。このモデルを導入することにより、自分の前に歩行者がいる場合には歩行速度を遅くしたり、回り込んで追い越すなどの挙動を表現することが可能になる。

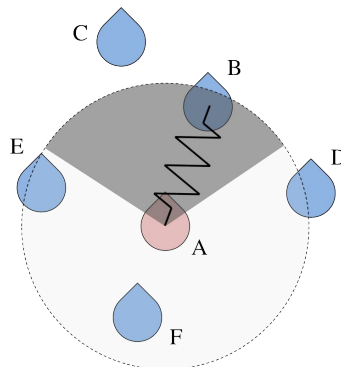


図5 仮想バネモデル

#### 4. 研究成果

##### (1) モーション・キャプチャによる歩行軌跡計測

本実験では、直線通路を介助者走行の車椅子利用者1名を歩行者1名が追い抜きまたはすれ違い歩行する状況を想定した実験を行った。歩行者の軌跡をモーション・キャプチャで計測し、歩行者が車椅子利用者を避ける動きを解析した。車椅子利用者は  $x=3\text{m}$  の位置からスタートし、常に  $y=0$  の直線上を動くようにした。歩行者は  $x=0$  の位置からスタートし、そのスタート位置を  $y$  方向に  $0.1\text{m}$  ずつずらしながら計測を繰り返した。歩行者は常に  $x$  の正方向に歩行し、車椅子は  $x$  の正方向に進む場合(同方向)と負方向に進む場合(対向)を比較した。本実験の概況は図3に示すとおりである。

歩行者が車椅子利用者を避ける動きについて、図6をもとに説明する。同方向の場合、歩行者が  $y=0$  から歩き始めた時は  $x$  方向の間隔(図6の  $l_x$ )は約  $2\sim 3\text{m}$  であった。歩行者の初期位置が  $y$  方向に  $0.1\text{m}$  ずれるごとに  $l_x$  は小さくなり、 $y=1\text{m}$  から歩き始めた時には  $x$  方向の間隔は約  $0.5\text{m}$  になった。しかし、追い抜き幅(図6の  $l_y$ )は歩行者の初期位置に影響されず、約  $1\text{m}$  であった。つまり、歩行者の初期位置が  $y$  方向に  $1\text{m}$  ずれた地点で、車椅子を避ける動きはほぼなくなる。

対向の場合には、 $l_x$  が約  $3\sim 6\text{m}$  と同方向の場合より広くなる傾向があった。ただし、 $l_y$  は約  $1\text{m}$  であり、同方向の場合とほぼ同じであった。

また、同方向・対向いずれの場合も、車椅子利用者を避けた後、歩行者は図6のBのようにそのままの位置を歩き続けた。

JR大阪駅と阪急梅田駅を接続するカリヨン広場連絡橋において、介助者走行の車椅子利用者1名を通行させ、一般の歩行者がこれを避ける動きを観察した。その結果、通路内の混雑具合によって違いはあるものの、同方向から追い越す場合、図6の  $l_x$  の距離は  $0.6\sim 2.4\text{m}$  程度であり、 $l_y$  の距離は  $0.3\sim 0.7\text{m}$  であった。また、対向の場合には  $l_x$  の距離は同方向の場合より少し長くなる一方で  $l_y$  の距離は同方向の場合と大きな違いは出なかった。

車椅子利用者を避けた後の歩行者の動きに関しては、混雑しているときには図6のAのように、もともと歩いていた位置に戻ることが多かった。しかし、比較的空いているときには図3の実験と同様、Bのようにそのままの位置を歩き続ける歩行者が多かった。

これらのことから、混雑した状況では他の歩行者が存在するため、歩行者は図3の実験に比べてやや近い位置で車椅子を避ける動きになるものの、全体的な傾向はほぼ同じになることがわかった。

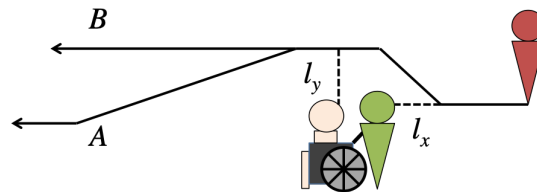


図6 歩行者が車椅子利用者を避ける動き

##### (2) 歩行者シミュレーション

モーション・キャプチャによる実験結果をもとに、図5の仮想バネモデルにおけるパラメータ値を決定することを試みた。仮想半径は図6の  $l_x$  と  $l_y$  の両方に影響し、仮想半径が大きいほど  $l_x, l_y$  ともに大きくなる傾向が確認された。仮想範囲の影響角度は主に  $l_y$  の大きさに影響し、角度が大きくなるほど  $l_y$  も大きくなる傾向が確認された。しかし、 $l_x$  にはほとんど影響しないことがわかった。仮想バネ定数は主に  $l_x$  の大きさに影響し、バネ定数が大きいほど  $l_x$  が大きくなる傾向が確認された。影響角度が大きい場合にはバネ定数は  $l_y$  にも影響するが、ある程度の角度以内であればその影響はほとんど無視できることが確認された。

これらを踏まえて仮想半径、仮想範囲の影響角度、仮想バネ定数の3つのパラメータを変化させ、モーション・キャプチャによる実験結果を再現できるように調整した。その結果、仮想半径を  $1.74\text{m}$ 、仮想範囲の影響角度を  $100^\circ$ 、仮想バネ定数を  $35000\text{N/m}$  としたときに、歩行者が車椅子利用者を避ける挙動に関して実験結果とよく一致することが確認された。

これらのパラメータを用いて、群集の中を車椅子利用者1名が通行する様子の数値シミュレーションを行った。JR大阪駅東口の横断歩道を想定し、幅  $10\text{m}$ 、長さ  $27\text{m}$  の直線通路内に歩行者  $250$  名をランダム配置した。歩行者は北(上)向きおよび南(下)向きそれぞれ  $125$  名ずつとし、北向きの歩行者のうち1名は車椅子利用者とした。上下左右の境界にはいずれも周期境界条件を適用した。計算結果例を図7に示す。図中、緑色の長方形は車椅子利用者を表し、赤色の楕円は北(上)向きの歩行者、青色の楕円は南(下)向きの歩行者を表す。車椅子利用者付近で局所的に歩行者がやや高密度で集まる様子が観察される。



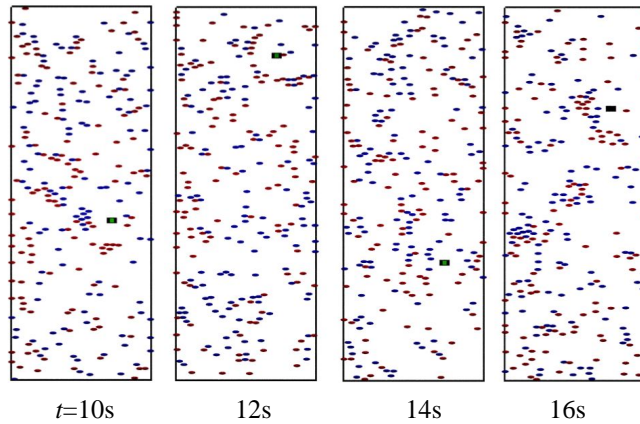


図7 計算結果例

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

川口寿裕, 歩きスマホの現状と衝突危険性の見積もり, 第 23 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, 査読有, 2017, 99-102

川口寿裕, 群集詰め込み時の圧縮力分布, 第 22 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, 査読有, 2016, 9-12

舘沼春奈, 川口寿裕, 車椅子利用者を含んだ群集の行動特性に関する実験および数値モデルの開発, 第 22 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, 査読有, 2016, 13-16

〔学会発表〕(計 1 件)

川口寿裕, 粒子モデルを用いた避難シミュレーション, 第 23 回関西大学先端科学技術シンポジウム, 2019

〔図書〕(計 2 件)

S.Abe, M.Ozawa, Y.Kawata editor, Springer, Science of Societal Safety, 2018, 227 (T.Kawaguchi は 37-46 および 113-120 を担当)

関西大学社会安全学部編, ミネルヴァ書房, 社会安全学入門, 2018, 288 (川口寿裕は 40-51 および 127-135 を担当)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.kansai-u.ac.jp/Fc\\_ss/staff/t\\_kawaguchi.html](http://www.kansai-u.ac.jp/Fc_ss/staff/t_kawaguchi.html)

## 6. 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 舘沼 春奈

ローマ字氏名: (TATENUMA, haruna)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。