

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

館沼春奈¹, 川口寿裕¹

¹関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

概要

災害弱者が緊急時に家屋、施設、交通機関等から安全かつ迅速に避難できるような手立てを考へておくことは重要である。本研究では、災害弱者である車椅子利用者が混在した群集の挙動を表現するための数値シミュレーションモデルの開発を試みた。追い越し、回り込みの挙動は仮想バネモデルで表現することを提案し、同条件の実験結果との比較によりモデルの妥当性を検証した。本モデルは、車椅子利用者を考慮した避難計画を作成する際の歩行モデルへと発展させるための基礎モデルである。

Numerical simulation and validation of crowd motion including wheelchair user

Haruna Tatenuma¹, Toshihiro Kawaguchi¹

¹Department of Safety Management, Faculty of Safety Science, Kansai University

Abstract

It is important to consider the means by which vulnerable people can take refuge in safety and quickly from a house, facilities and transportation, etc. in emergency situations. In this study, a numerical model is developed to represent the behavior of crowd including a wheelchair user. A virtual spring model is employed to represent the passing and going around. An experiment is performed to validate the present model. This model can be an important element for an evacuation planning of crowd including wheelchair users.

1 はじめに

群集の避難に関する研究は、健常者に限定された集団を調査・観察することより得られたものが多い。しかし、これからの高齢化社会や身体障害者といった災害弱者の社会参加を考えると、避難計画に災害弱者を考慮する必要がある。体の不自由な人が足がわりに使用する車椅子は、高齢者や身体障害者のモビリティを確保する便利な移動手段である。だが、緊急時の避難の際、健常者以上の危険が生じる。車椅子利用者が歩行者と共に避難する際の行動特性に関する研究は松倉ら[1]の研究があるが非常に少ない。

本研究では、歩行者と車椅子利用者が直線通路内を移動する際の挙動観察とモーション・キャプチャ((株)ノビテック、VENUS3D)を用いた検証実験をもとに、歩行者が車椅子利用者を追い越す際の挙動モデルを提案した。本シミュレーションでは力学的モデルである離散要素法(DEM)[2]を採用した。本モデルを実際の街中を想定した対向流における歩行者挙動に適用した。本モデルは、今後、車椅子利用者を考慮した避難計画を作成する際の歩行モデルへと発展させるための基礎モデルとなることが期待される。

2 検証実験

2.1 大阪駅での挙動観察

車椅子利用者を含む群集が、街中の直線通路を歩行する様子を観察した。場所は JR 大阪駅と阪急梅田駅をつなぐカリヨン広場連絡橋で行った。群集の中に、介助者歩行の車椅子利用者 1 名を加え、歩行者が車椅子利用者を追い抜き歩行する状況を、カリヨン広場階段上に設置したビデオカメラにより撮影した。本実験では、通路内を車椅子利用者が往復することで、JR 大阪駅側から阪急梅田駅側へ歩行する様子と阪急梅田駅側から JR 大阪駅側へ歩行する様子を撮影した。実験日は、曜日による混雑状況の違いを考慮し、平日、土曜日、祝日に分けて実験を行った。観察回数(片道を 1 回とする)は、平日が 4 回、土曜日が 12 回、祝日が 24 回である。本実験の概況を図 1 に示す。

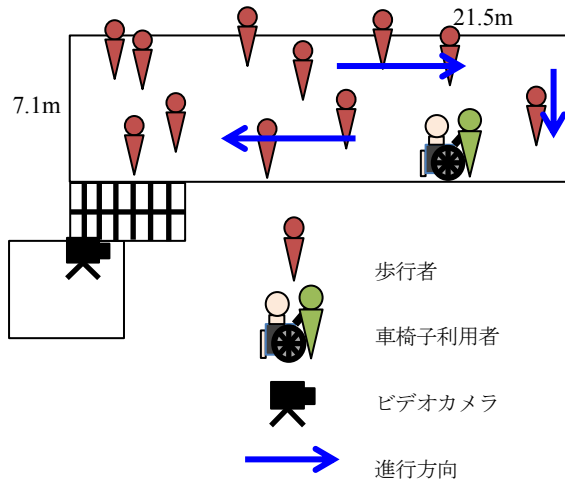


図 1: 実験の概況

本実験で得られた車椅子利用者を含む群集の行動特性を、図 2 をもとに以下に示す。

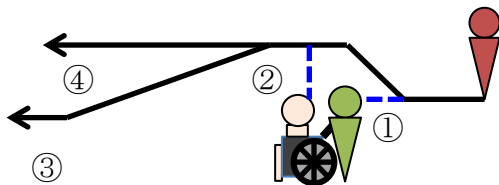


図 2: 車椅子利用者を含む群集の行動特性

- (1) 歩行者が車椅子利用者を追い越す際、前も

って①の間隔をあけた上で避け始め、追い抜きを行う。①の間隔には個人差があった。

- (2) 歩行者が車椅子利用者を避け、追い抜きをする際の①②の間隔は、密度の大小に影響される傾向にあった。平日より土曜日、祝日の方が高密度であった。平日の①は 0.6~2.4m、②は 0.6~0.7m であった。土曜日、祝日の①は 0.6~1.2m、②は 0.3~0.6m であった。個人差があるため、例外的に大きく避ける人や車椅子利用者にぶつかる人もいた。
- (3) 平日は追い抜いた後、③のように別の歩行位置に移動する。これは、平日は混雑状況が緩やかであるため、歩行スペースに余裕があるから見られる行動だと考えられる。また、歩行者が車椅子利用者の②の追い抜きを終了し、別の歩行位置に行く際、その進路変更は追い抜き時よりも緩やかである。土曜日、祝日の混雑時は、歩行者が追い抜いた後、④のように歩行位置の変更はなかった。
- (4) 前方の歩行者が車椅子利用者を避ける動きをとると、後方の歩行者が追従行動をとる。
- (5) 車椅子利用者に対して右にいる歩行者は右方向へ、左にいる歩行者は左方向へ避ける動きをとる。
- (6) 歩行者が車椅子利用者を避けるための進路変更をし、追い抜こうとする際、前方歩行者との距離があると、目で見えてわかる歩行速度の増加がある。しかし、前方歩行者との距離が詰まっていると目で見えてわかる歩行速度の増加はなかった。(周りの歩行速度に合わせて追い抜きをする)

2.2 モーション・キャプチャを用いた実験

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[3]。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。体の各部位に標識(反射マーカ)を取り付け、計測を行うシステム(装着型モーション・キャプチャ)であり、本研究では光学式を用いた。赤外線カメラは 3 台、マーカは車椅子利用者と歩行者の頭上に設置した。

本実験では、大阪駅での挙動観察同様、直線通路を介助者歩行の車椅子利用者 1 名を歩行者 1 名が追い抜き歩行する状況を想定し、モーション・キャプチャを用いた実験を行った。大阪駅の挙動観察では、車椅子利用者を避ける前の歩行者の正確な

歩行位置(車椅子の真後ろ・少しずれた位置など)が把握できなかった。そこで、モーション・キャプチャを用いて、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 0.1m 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。本実験の概況を図3に示す。

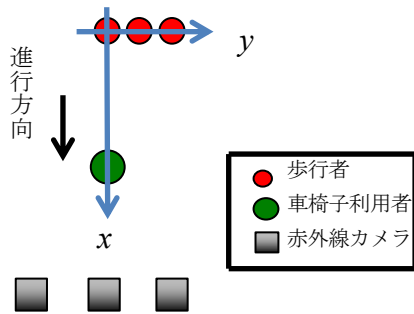


図3: 実験の概況

2.3 実験結果の検討

同方向の場合、歩行者が車椅子利用者を避ける際、歩行者が $y=0$ から歩き始めた時は x 方向の間隔(図2の①)が約 $2\sim 3\text{m}$ であったが、 y 方向に 0.1m ずれるごとに小さくなり、 $y=1\text{m}$ から歩き始めた時には x 方向の間隔は約 0.5m になった。しかし、追い抜き幅(図2の②)は歩行者の歩き始めの位置に影響されず約 1m であった。つまり、歩き始めの位置が y 方向に 1m 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 x 方向の間隔が約 $3\sim 6\text{m}$ と同方向時より広がる傾向にあるが、追い抜き幅は同方向と同じ 1m であった。

3 数値シミュレーション

3.1 離散要素法

計算手法は離散要素法(DEM)を用いた。DEMは力学ベースのモデルであるために歩行者間の接触に伴う力の作用を表現することができる。互いに接触した粒子同士の相互作用力をバネ、ダッシュポット、スライダで表現する。バネは弾性反発力を表し、ダッシュポットは非弾性衝突を表現するための粘性減衰力を意味する。スライダはすべり摩擦(動摩擦)を表す。

3.2 仮想半径・仮想バネモデル

歩行者の歩行挙動に関して、通常歩行者は周囲の状況を自分で視覚し自分で判断する。歩行速度を緩め、周囲の人と一定の距離を保ち避けようとする。このように人が周囲の人と一定の距離を保ち、占拠しようとする心理的な領域のことをパーソナルスペースという。本研究では、このようなパーソナルスペースを表現するため、図4のような仮想半径・仮想バネモデルを導入する。

本研究では、仮想半径・仮想バネモデルに実験で得たパラメータを導入することで、歩行者が車椅子利用者を避けて追い抜き歩行する様子を再現した。

歩行者粒子に対して、パーソナルスペースの形を図4のような領域と仮定した。通常のパネ k_n に加え、仮想バネ k_{n2} を加えることで歩行者と車椅子利用者、あるいは歩行者同士が物理的に接触するのを防ぐために前方から向かってくる粒子を避ける行動をとる。

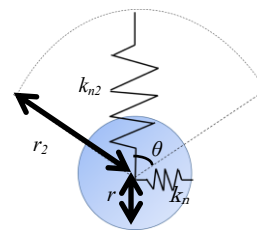


図4: 仮想バネモデル

3.3 計算結果

歩行者粒子は直径 40cm 、質量 60kg 、介助者歩行の車椅子利用者粒子は直径 60cm 、質量 130kg とする。両者の移動速度はそれぞれ 1.3m/s 、 0.6m/s とした。本プログラムでは南端から領域外に出た粒子は北端から再度入ってくる周期境界を設定し追い越しを繰り返すことで、歩行者の歩き始めの位置による避け方の違いを調べた。

仮想バネ定数 $k_{n2}=3.5\times 10^4\text{N/m}$ 、仮想半径 $r_2=1.74\text{m}$ 、仮想範囲(片側角度) $\theta=50^\circ$ に設定し、同方向、対向、どちらの避け方にも対応する仮想バネ定数 k_{n2} 、仮想半径 r_2 、仮想範囲(片側角度) θ にした。仮想バネ定数 k_{n2} は粒子の避け始めの間隔に影響し、仮想半径 r_2 は粒子の避け始めの間隔と追い抜き幅に影響する。仮想範囲(片側角度) θ は追い抜き幅に大きく影響し、上記の仮想バネ定数 k_{n2} 、仮想半径 r_2 では 50° 未満の角度では追い抜き時に粒子同士の接触があるため、 50° 以上で設定することが

好ましいことがわかった。仮想バネ定数 k_{n2} は上記の仮想半径 r_2 、仮想範囲(片側角度) θ では対向時 35000N/m より大きいと車椅子利用者の粒子のバネに押し寄せ、歩行者粒子の前で動きが止まる、あるいは後退する。逆に 30000N/m 以下にするとバネの力が弱く歩行者粒子を避けきれず粒子同士がぶつかってしまった。その他の条件は、法線方向バネ定数 k_n を $1.0 \times 10^5 \text{N/m}$ 、接線方向バネ定数 k_t を $1.0 \times 10^5 \text{N/m}$ 、反発係数 e_p を 0.5 に設定した。

図 5 に車椅子利用者から見た歩行者の相対的な軌跡の例を示す。x 方向は 1 週目 $x=1\text{m}$ となり、実験と近い結果を得た。2 週目以降、実験と異なり避ける動きが生じたが、 $x=1.6\text{m}$ で収束した。y 方向は 1 週目 $y=2\text{m}$ となり、実験の同方向、対向で得たどちらも結果にも対応できる結果を得た。x 方向が進むにつれて y 方向の値が小さくなり実験と近い結果を得ることができた。

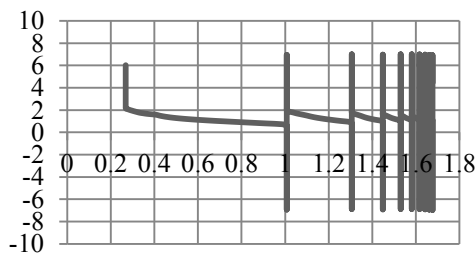


図 5: 追い越し時の歩行者の軌跡

本モデルを、実際の街中を再現したシミュレーションに適用した。街中のモデルは JR 大阪駅東口の横断歩道を想定し、幅 10m、長さ 27m の直線通路内にランダムに粒子を配置し、北向きと南向きの 2 方向に粒子を進めていく歩行者挙動のシミュレーションを行った。スナップショット例を図 6 に示す。人数の割合は介助者走行の車椅子利用者 1 名を含む計 250 の粒子を北向き、南向きともに半分ずつにした。また本プログラムでは東西南北に周期境界条件を適用した。

本シミュレーションは歩行者の車椅子利用者に対する仮想バネモデルだけでなく、歩行者同士にも仮想バネを導入した。歩行者同士の仮想バネのパラメータは仮想バネ定数 $k_{n2}=1.0 \times 10^3 \text{N/m}$ 、仮想半径 $r_2=0.4\text{m}$ 、仮想範囲(片側角度) $\theta=80^\circ$ に設定した。仮想バネ半径には個人差を入れ標準偏差 0.2 の正規乱数で割り振った。歩行速度は、平均値 1.0m/s、標準偏差 0.2 の正規乱数で割り振った。仮想バネを

導入し、実験で得たパラメータを与えることで、歩行者が車椅子利用者を避けて追い抜き歩行する様子を定性的に再現することができた。また仮想バネ半径をランダムにすることで、大阪駅での挙動観察の通り大きな間隔を空けて車椅子を避ける人、車椅子にぶつかる人など、個人差を定性的に再現することができた。

本モデルでは仮想バネが密度によって変化しない。しかし、大阪駅での挙動観察では歩行者のパーソナルスペースは密度によって変化していた。今後、数値シミュレーションで実際の歩行者の行動特性を再現する上で、仮想バネモデルを改良する必要があると考えられる。

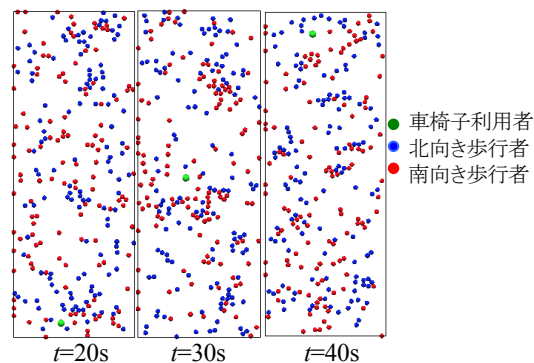


図 6: 対向流歩行者挙動シミュレーション

4 まとめ

検証実験をもとに仮想バネモデルを導入することで、歩行者が車椅子利用者を避けて追い抜き歩行する様子を再現することができた。本研究で得た仮想バネのパラメータを用いることで、車椅子利用者を含む群集の挙動を予測することが可能である。

謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号:16K01294)の支援を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 松倉洋史, 勝原光治郎, 宮恵子, 桐谷伸夫, 日本航海学会論文集 **108**(2002)139
- [2] P.A.Cundall, O.D.L.Strack, Geotechnique **29-1** (1979) 47.
- [3] <http://www.nobby-tech.co.jp/3d/venus3d.html>, ノビテックホームページ