

3種類の色度帯に属する歩行者の 2レーン上におけるシミュレーション

青木隆広¹, 藤田旭洋¹, 柳澤大地^{2,1}, 西成活裕^{2,1}

¹ 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

² 東京大学 先端科学技術研究センター

概要

近年、歩行者の多様性に着目した研究が行われている。本研究でも多様な歩行者の混合流についてより知見を得ることを目的とし、特に3種類の速度帯に分類される歩行者達が2レーン上を同時に歩行する状況についてシミュレーションを行った。その結果低密度な状況では、遅い歩行者達は共通の1つのレーンのみを使用する方が流量は大きくなることが示唆された。この結果は昨今の感染症の拡大を踏まえた、低密度における歩行者流のマネジメントにも寄与すると思われる。また特に最大流量を示す平均密度付近では、速い歩行者はレーン変更による追い越しをせず、遅い歩行者達とは別のレーンを使用する方が流量が大きくなることが示唆された。この知見は将来的に、施設等における動的な歩行者誘導に寄与すると思われる。

Simulation on Pedestrian Flow Composed of Three Types of Agents Walking at Different Speeds on Two Lanes

Takahiro Aoki¹, Akihiro Fujita¹, Daichi Yanagisawa^{2,1}, Katsuhiko Nishinari^{2,1}

¹ Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The University of Tokyo.

² Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo.

Abstract

Recently, heterogeneous pedestrian flow has been studied vigorously. This paper is also aimed to get deeper understanding on heterogeneous pedestrian flow with simulations, especially the flow composed of agents, who are divided into three groups by their walking speed, on two lanes. Our simulations suggest that slow walkers should use only one lane under the condition of low density to increase flow. This result could contribute to managing pedestrian flow of low density in light of the recent pandemic. Besides, when the density increases, fast walkers should also keep walking the other lane without lane-changing or overtaking to increase flow. This knowledge could be applied to dynamic pedestrian guidance in facilities.

1 導入

近年、歩行者流における歩行者の多様性に着目した研究が行われている。Al-Azzawi と Raeside[1] は

観察データから、環境や年齢など様々な要因によって歩行者の速度が0.5 [m/s] 程度から2.0 [m/s] 程度まで多岐にわたることを示した。一方Caoら[2]は歩行速度の異なる被験者グループが混ざり、1列に

なって歩く様子を分析した。同様に藤田ら [3] は被験者を歩行速度によって2グループに分け、速いグループには追い越しを許可するという条件で、2グループが混ざって歩く様子を分析した。またシミュレーションにおいて、Fuら [4] は、歩行者の追い越しの行動をフロアフィールドモデルを用いて分析した。Yuenら [5] は現実世界の歩行者の追い越しを模するように既存の Social Force モデルを改善し、実験結果とのおおよその一致が確認された。実際の大規模イベントなどでは多様な歩行者が限られたスペースを歩行し、その中には歩行が困難な人や急いでいる人などが含まれていることが想定される。そこで本研究では歩行者を模したエージェントをその速度により3種類に分類し、それらの2レーン上での混合流についてシミュレーションを行った。

2 シミュレーションモデル

シミュレーションは2レーンからなる周期系で行った (図1)。各レーンの空間は連続、時間は離散的であり、全てのシミュレーションにおいてレーン一周の長さ $L = 15$ [m] とする。本節で説明する各エージェントはこれらのレーン上を移動するが、位置の更新は $\Delta t = 1$ [step] = 0.5 [s] 毎に全エージェント同時に行われる。

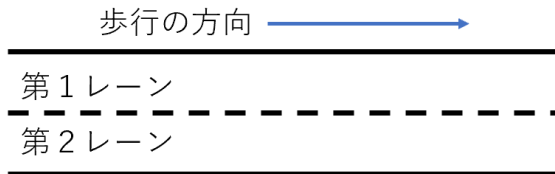


図1: 2レーンから成る周期系

2.1 歩行速度

全てのエージェントは“Fast”、“Normal”、“Slow”の3種類のグループに人数比1:1:1で割り振られる。これらは例えば、急いでいる人、若者、年配の人などにそれぞれ対応している。以後、 i は i 番目のエージェントの値、 t は時刻 t [step] における値であることを表す。各エージェントには最高速度 $v_{\max}(i)$ が個別に割り当てられている。 $U(a, b)$ を最小値 a 、最大値 b の一様分布として、Fast グループのエージェントは $v_{\max}(i) \stackrel{iid}{\sim} U(2.0, 2.2)$ [m/s]、Normal グループの

エージェントは $v_{\max}(i) \stackrel{iid}{\sim} U(1.4, 1.6)$ [m/s]、Slow グループのエージェントは $v_{\max}(i) \stackrel{iid}{\sim} U(0.8, 1.0)$ [m/s] で最高速度が割り振られる。

次に、仮想速度 $v_{\text{in}}(i, t)$ という概念を導入する。 $v_{\text{in}}(i, t)$ はエージェントが意図する歩行速度であり、 $v_{\text{in}}(i, t) = \min[v_{\max}(i), (h(i, t) - s)/\Delta t]$ で与えられる。 $h(i, t)$ は前方のエージェントまでの距離、 s はパーソナルスペースも含めた各エージェントの共通サイズを表す。本シミュレーションでは一貫して $s = 0.5$ [m] である。 $v_{\text{in}}(i, t)$ の表式はすなわち、全てのエージェントは $v_{\max}(i)\Delta t$ 以下の範囲で進めるだけ進もうとすることを示している。このルールにより仮想速度が $v_{\max}(i)$ に達するまでは $h(i, t)$ に対して線形に増加することになる。これは Cao ら [2] の実験結果を参考にしている。

最後に仮想速度に擾乱を加えることで、実速度 $v(i, t)$ を考える。 $v(i, t)$ はエージェントの実際の歩行速度であり、 $v(i, t) = (1 - \epsilon(i, t))v_{\text{in}}(i, t)$ で与えられる。 $\epsilon(i, t)$ は仮想速度と実速度の差の割合を表しており、 $\epsilon(i, t) \stackrel{iid}{\sim} U(0, 0.2)$ で表される。以上のように実速度を決定すると、他の歩行者などに邪魔されない状況では各グループの $v(i, t)$ の最小値および最大値は、Fast グループは 1.6, 2.2 [m/s]、Normal グループは 1.12, 1.6 [m/s]、Slow グループは 0.64, 1.0 [m/s] を示すことになる。

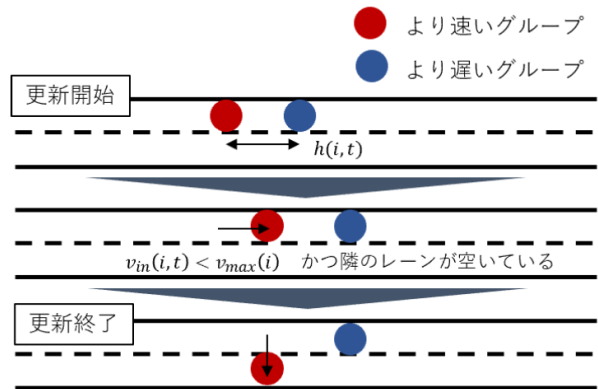


図2: レーン変更の流れ

2.2 レーン変更

いくつかのシミュレーションでは毎時刻、全エージェントの直進方向 (図1「歩行の方向」) の更新が完了した後にレーン変更を行った。ここでは Rickert

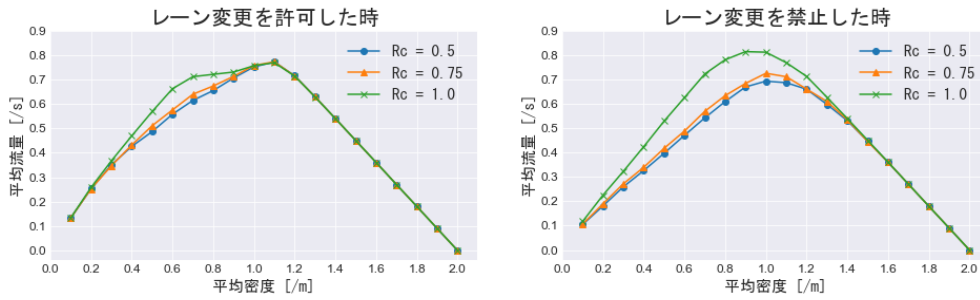


図 3: レーン変更が許可/禁止されている時の基本図

ら [6] の交通流のモデルに変更を加え、以下の 2 つの条件が同時に満たされたエージェントは隣のレーンに移動できるとした。1 つ目は自分より遅いグループに属するエージェントによって、歩行が邪魔された ($v_{in}(i, t) < v_{max}(i)$) と感じられる時である。2 つ目は自分の真横に自身が収まるスペース s が空いている時である。すなわち、レーン変更が許可されているシミュレーションでは、上の二つの条件が同時に満たされれば Fast または Normal グループのエージェントはレーン変更が可能になる。図 2 にこれらの流れを図示した。なお、本ルールでは同一エージェントがレーン変更を毎時刻繰り返すことがある。本研究では両レーンを合わせた流量に注目するため特段の対応は行わないが、レーン変更回数などに注目する際には別途レーン変更回数をコントロールする対応が必要になると考えられる。

2.3 遵守率

最後に遵守率という考え方を導入する。まず状況設定として、「ゆっくり歩く人は左側 (第 1 レーン) 通行」というルールを設けることを考える。これにより Slow グループのエージェントは第 1 レーンを歩くようになるが、全員が従うとは限らない。そこで、Slow グループのエージェントがルールに従う確率を遵守率 R_c と定義し、確率 R_c で第 1 レーンに、確率 $1 - R_c$ で第 2 レーンに初期配置する。Slow グループのエージェントはレーン変更を行わないため、初期配置されたレーンを歩き続けることになる。シミュレーションでは $R_c = 0.5, 0.75, 1.0$ の 3 通りの値を試した。なお、両レーンの密度のバランスを考慮して、Fast グループのエージェントは確率 $1 - R_c$ で、Normal グループのエージェントは確率 0.5 で第 1 レーンに初期配置されることとした。

前述のレーン変更を許可するか禁止するか 2 種類、遵守率 $R_c = 0.5, 0.75, 1.0$ の 3 種類の組み合わせで、計 6 種類のシミュレーションを行った。また、各シミュレーションは、エージェントを 3 人から 60 人まで 3 人刻みで変化させ、各人数において 140 [step] = 70 [s] の長さで 100 回ずつ行った。

なお各シミュレーションにおいて、 $h(i, t)$ は何らかの分布を持っていると考えられるが、初期配置ではそれを無視しているため、初期配置の影響を取り除く必要がある。レーン変更を許可する条件では最初の 20 [step] = 10 [s] を、禁止する条件では最初の 50 [step] = 25 [s] を取り除いて分析を行った。これにより、取り除いた後の最初の流量に対して、後の流量変化は平均的に $\pm 5\%$ 以内に収まっている。

3 結果と考察

まず、遵守率による流量の推移を見てみる。ここでは流量として、両レーン上の平均密度と、全エージェントの平均速度の積に対して時間平均をとったものを用いている。レーン変更が許可されている場合 (図 3 左)、最大流量に達しない程度の低密度な状況では、遵守率が高い順に流量も高い値を示した。これは、Slow グループのエージェントが第 1 レーンに集まることにより、他グループのエージェントが第 2 レーンで歩行を妨げられる頻度が減ることが理由だと考えられる。

またレーン変更が禁止されている場合 (図 3 右) では広い平均密度の範囲で、遵守率の高い順に流量も大きい値を示している。これは、レーン変更が禁止されている状況では、目の前のエージェントの歩行速度が自身と比較して著しく遅いと、歩行が妨げられてしまうことから理解できる [7]。

次に R_c の値ごとに、レーン変更を許可する場合

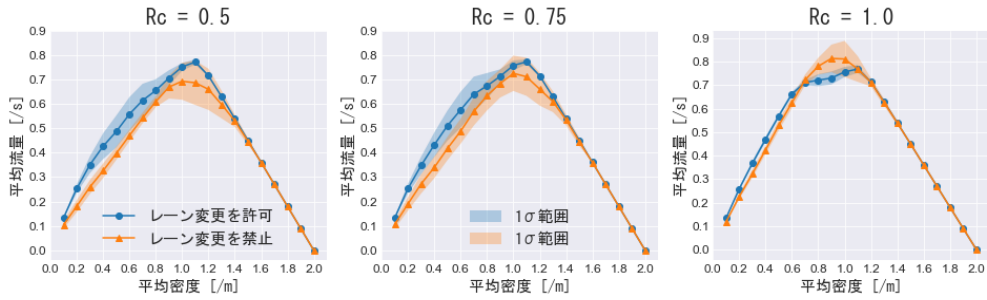


図 4: 遵守率毎の基本図の比較

および禁止する場合の基本図を比較する（図 4）。 $R_c = 0.5$ および 0.75 の時には、レーン変更を許可する場合の方が流量が大きい傾向が見て取れる。レーン変更やエージェントの加減速ルールは異なるものの、Rickert ら [6] の車を模したモデルでも同様の結果が得られており、彼らのモデルは本モデルにおける $R_c = 0.5$ に相当する。一方で $R_c = 1.0$ において、渋滞がまだ起きていない低密度な状況では、レーン変更が許可されている方が流量が大きい、渋滞が起きる前後の平均密度においてはレーン変更が禁止されている方が流量が大きいとわかる。

同一 R_c 毎の基本図の傾向として、レーン変更が許可されている場合の最大流量を示す平均密度 ($\bar{\rho} = 1.1$ [1/m]) は、レーン変更が禁止されている場合のそれ ($\bar{\rho} = 1.0$ [1/m]) より高い値を示しているが、これはレーン変更によって、多少高密度な状況でも歩行が円滑に行えるからであると考えられる。また渋滞が起きた後の高密度な状況では、レーン変更が許可されているか否かに依る流量の差は見受けられない。つまりレーン変更が許可されていても、実際にはほとんど行うことができないのだと考えられる。

4 結論

本シミュレーションにより得られた結論をまとめる。歩行速度が広い範囲にわたる歩行者流が 2 レーン上を流れる際、低密度な状況では遅い歩行者は一方のレーンにまとまった方が流量が増加することがわかった。また特に最大流量を示す平均密度付近では、歩行速度の遅速によってレーンを分け、レーン変更を禁止したほうが流量が増加することがわかった。しかしその際、レーン分けの遵守率が低い (50 ~ 75%) 場合にはレーン変更を許可したほうが流量が増加する可能性が示唆された。

5 謝辞

本研究は、JST 未来社会創造事業 JP-MJMI20D1 及び FONDAZIONE CARIPLO (Italy), "LONGEVICITY - Social Inclusion for the Elderly through Walkability", Rif. 2017-0938 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Marwan Al-Azzawi and Robert Raeside. *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 133, No. 3, pp. 211–219, 2007.
- [2] Shuchao Cao, Jun Zhang, Daniel Salden, Jian Ma, Ruifang Zhang, et al. *Physical Review E*, Vol. 94, No. 1, p. 012312, 2016.
- [3] Akihiro Fujita, Claudio Feliciani, Daichi Yanagisawa, and Katsuhiro Nishinari. *Physical Review E*, Vol. 99, No. 6, p. 062307, 2019.
- [4] Zhijian Fu, Liang Xia, Hongtai Yang, Xiaobo Liu, Jian Ma, Lin Luo, Lizhong Yang, and Junmin Chen. *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 28, No. 05, p. 1750059, 2017.
- [5] JKK Yuen and EWM Lee. *Safety Science*, Vol. 50, No. 8, pp. 1704–1714, 2012.
- [6] Marcus Rickert, Kai Nagel, Michael Schreckenberg, and Andreas Latour. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 231, No. 4, pp. 534–550, 1996.
- [7] Takashi Nagatani. *Physical Review E*, Vol. 51, No. 2, p. 922, 1995.