

Social Forceによるパーソナルモビリティ・歩行者混合交通モデルのキャリブレーション

Charitha Dias¹, Miho Iryo-Asano¹, Keisuke Shimono², and Kimihiko Nakano¹

¹Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Japan

²Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan



概要

セグウェイなどのパーソナルモビリティビークル(PMV)は、近距離トリップのための新たな交通手段として近年着目されている。PMVは欧米の多くの都市において、歩道や自転車歩行者道などでの走行が許されている。しかし、歩行者や自転車交通量が多いアジア諸国においては必ずしも導入が進んでいるとはいえず、PMVが歩行者や自転車などの他の交通モードへの影響を適切に評価する必要がある。

ミクロ交通シミュレーションは、個々の道路利用者の行動モデルを通じて、交通流全体の状況を再現・評価できることから、十分にキャリブレーションされたシミュレーションモデルを構築することにより、上記の目的が達成できると考える。

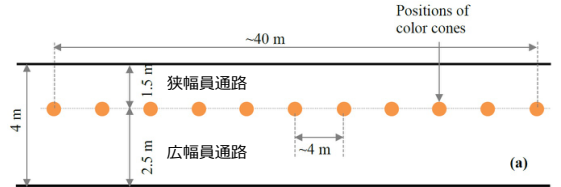
本研究では、歩行者交通への適用事例の多いSocial ForceモデルをもとにしたミクロモデルのPMV-歩行者混合交通への適用可能性を検討することを目的とする。

キャリブレーション結果からは、新たなモデルを導入せずとも、既存の歩行者シミュレーションモデルを適切にキャリブレーションすることでPMVと歩行者との回避行動をある程度表現できることが示された。

実験の設定とシナリオ



Snapshots during several experiments



実験通路の概略図

実験シナリオ

回避

- PMV利用者が対向する／止まっている歩行者を避ける

追従

- PMV利用者が歩行者の後ろに続いて走行する

追い越し

- PMV利用者が歩行者を追い越す

追従後急減速

- PMV利用者が歩行者の後ろを走行し、歩行者が急に止まる

- 最終的な目的は、PMVと歩行者の混在交通に適した道路構造やPMVの性能要件を求めること
- その一環として、今回は詳細な挙動のキャリブレーションを行う
- この研究では、実験シナリオのうち、広幅員道路での回避・追い越しシナリオのみを使用

それぞれのシナリオについて、32走行実施
(16人の被験者×2回ずつ=計32回) (注: いずれの被験者もセグウェイ初心者)

混合交通下の利用者行動モデル

Johansson et al. (2007)により提唱された、Social Force Model (Helbing et al. 1995) の改良モデルを使用

$$\frac{d\vec{v}_{i,t}}{dt} = \vec{f}_{desired,i,t} + \vec{f}_{ij,t} + \vec{f}_{wall,i,t} + \xi$$

希望方向への力 ($\vec{f}_{desired,i,t}$)

$$\vec{f}_{desired,i,t} = \frac{\vec{v}_{o,i} - \vec{v}_{i,t}}{\tau_i}$$

← 目的地方向への引力
 τ は緩和時間, \vec{v}_o は希望速度ベクトル

他者から受ける反発力 ($\vec{f}_{ij,t}$)

$$\vec{f}_{ij,t} = w(\varphi_{ij}) \cdot \vec{g}_{ij}(\vec{d}_{ij})$$

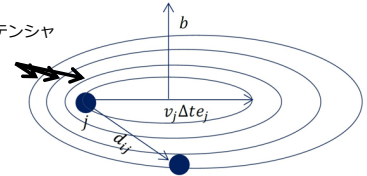
← 他者の位置、方向と速度を考慮

$$w(\varphi_{ij,t}) = \left(\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\varphi_{ij,t})}{2} \right)$$

$$\vec{g}_{ij}(\vec{d}_{ij}) = A_i \exp\left(-\frac{b_{ij}}{B_i}\right) \cdot \frac{\|\vec{d}_{ij}\| + \|\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}\|}{2b_{ij}} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\vec{d}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij}\|} + \frac{\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}\|} \right)$$

$$2b_{ij} = \sqrt{\left(\|\vec{d}_{ij}\| + \|\vec{d}_{ij} - (\vec{v}_j - \vec{v}_i)\Delta t\|\right)^2 - \left\|(\vec{v}_j - \vec{v}_i)\Delta t\right\|^2}$$

反発力の等ポテンシャル線



他者から受ける力の楕円形モデル

ここに;

φ_{ij} = エージェントiの移動方向と、エージェントから見たエージェントjの方向との間の角度

\vec{d}_{ij} = エージェントjに対するiの相対位置ベクトル

$\vec{y}_{ij} = (\vec{v}_j - \vec{v}_i)\Delta t$, Δt : 先読み時間

\vec{v}_i, \vec{v}_j = エージェントiとjの現在の速度ベクトル

ξ = ランダムネスによる変動項

先読み時間:

$$\Delta t = \gamma_i \Delta t_{sim} \quad (\Delta t_{sim} \text{ はシミュレーション更新時間間隔})$$

キャリブレーションするパラメータ:

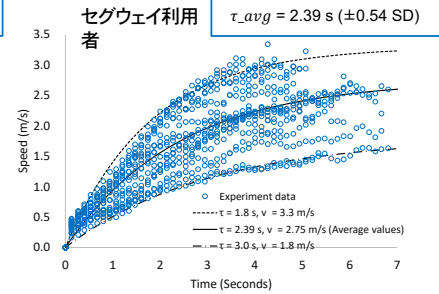
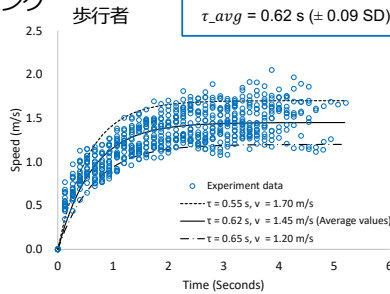
$\tau, A, B, \lambda, \gamma$

モデルキャリブレーション (希望方向への力, $\vec{f}_{desired,i,t}$)

実験データを以下のPipes (1953)の式にフィッティング

$$\vec{v}_{i,t} = \vec{v}_{o,i} - \vec{v}_{o,i} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right)$$

- » τ と $|\vec{v}_0|$ の値は、個別の歩行者とセグウェイ利用者に対してそれぞれキャリブレーションした。右図は20回の走行データをまとめて載せている。
- » 歩行者の τ と $|\vec{v}_0|$ の値は、既存研究で得られた値とほぼ同等の範囲に収まっている。



モデルキャリブレーション(反発力, $\vec{f}_{i,j,t}$)

クロスエントロピー法 (De Boer et al. 2005)

Step 1: τ と $|\vec{v}_0|$ の値を、セグウェイ利用者と歩行者それぞれに対して Pipes の式に当てはめることで導出。

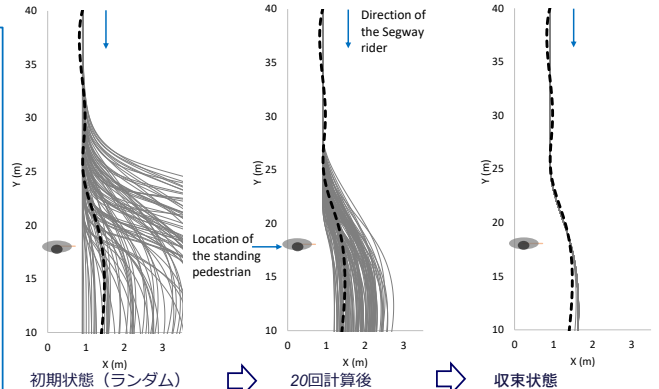
Step 2: N (=100) 個のランダムなパラメータの組合せを生成する。パラメータの生成確率は、ある設定範囲内において一様分布とする。

Step 3: それぞれのパラメータを用いて計算されたセグウェイの移動軌跡と、実験により観測された軌跡との誤差を計測する。

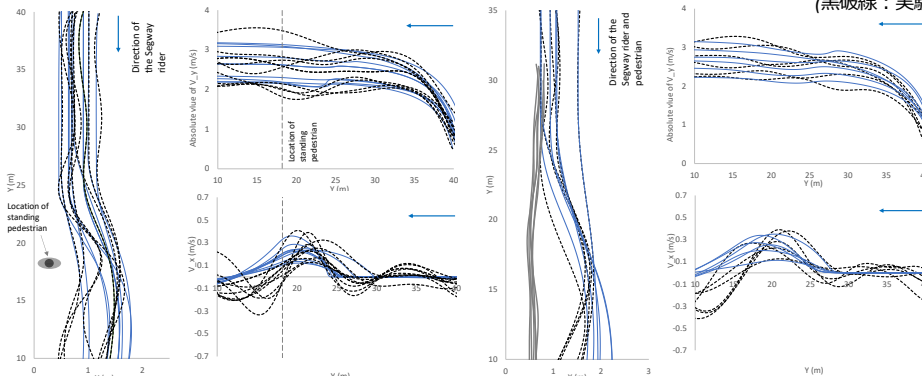
平均位置誤差 = $\|\vec{S}_{Simulated,t} - \vec{S}_{Experimental,t}\|$ の平均

Step 4: パラメータの更新を行う。平均位置誤差が小さい順にセグウェイの移動軌跡を並べ、上から抽出率 ρ (= 70%) だけの移動軌跡を抽出する。これらに使用されているパラメータ値を母集団として、 N 個のランダムなパラメータの組合せを生成する。

Step 2 に戻り、パラメータの組合せ数に変化がなくなるまで繰り返す。



クロスエントロピー法によるキャリブレーション結果の例 (黒破線: 実験観測結果, 灰色線: シミュレーションによる軌跡)



実験とシミュレーションの移動軌跡の比較。左: 立っている歩行者を避ける場合, 右: 歩いている歩行者を避ける場合。(黒破線: 実験のセグウェイ軌跡, 灰色実線: 実験の歩行者軌跡, 青実線: シミュレーションによるセグウェイの軌跡)

誤差:

平均位置誤差 = 0.64 m (± 0.24 SD), 進行方向速度のRMS誤差 = 0.19 m/s (± 0.06 SD), 横方向速度のRMS誤差 = 0.05 m/s (± 0.02 SD)

セグウェイ利用者と歩行者とのパラメータ比較

Parameter	本研究 (セグウェイ利用者)	Johansson et al. (歩行者)
A (m/s^2)	1.60 ± 0.26	0.04 ± 0.01
B (m)	0.51 ± 0.11	3.22 ± 0.67
λ	0.56 ± 0.16	0.06 ± 0.04
γ	36.11 ± 6.10	5.0^*

*シミュレーション更新時刻0.1秒に相当

まとめ

- セグウェイ・歩行者混合交通に対応するよう、Social-forceモデルのセグウェイ用のパラメータキャリブレーションを実施
- 低密度交通でのセグウェイ利用者の回避行動は、キャリブレーションにより既存モデルの構造を変えることなく再現できることを確認した。
- このキャリブレーション結果を用いて、セグウェイ・歩行者混合交通のシミュレーションを実施することで、歩道の安全性やサービス水準の評価を行うことができると期待される。

今後の課題

- より高密度な交通流下でのモデル検証
- 前後・左右方向の加速特性の違いを考慮したモデルの改良
- 自転車などの他の交通手段との比較検証

参考文献

1. Helbing, D., and P. Molnar. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, Vol. 51, No. 5, 1995, pp. 4282-42860.
2. Johansson, A., D. Helbing, and P. K. Shukla. Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data. *Advances in Complex Systems*, Vol. 10, Supp. 02, 2007, pp. 271-288.
3. Pipes, L. A. An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, No. 3, 1953, pp. 274-281.
4. De Boer, P. T., D. P. Kroese, S. Mannor, and R. Y. Rubinstein. A tutorial on the cross-entropy method. *Annals of Operations Research*, Vol.134, No. 1, 2005, 19-67.