

## 1. 研究の背景と目的

都市・建築空間をデザインするに際し、歩行者の行動モデル分析から、快適さや安全性を探ることは意義のあることである。近年、複雑系の発想を取り入れたエージェントアプローチが有望視されている。

本研究では、Helbing らの提案した歩行者動力学モデルを *artiso*c 上に実装し、集団行動、アーチング現象の再現を通じて、このモデルの特徴を探る。

## 2. Helbing らの歩行者動力学モデル

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \begin{cases} \mathbf{f}^{dr}(t) + \sum_{j(\neq i)} [\mathbf{f}_{ij}^{soc}(t) + \mathbf{f}_{ij}^{att}(t)] + \sum_b \mathbf{f}_{ib}(t) & \dots (1a) \\ \mathbf{f}^{dr}(t) + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{ph}(t) + \sum_b \mathbf{f}_{ib}(t) & \dots (1b) \end{cases}$$

Helbing らの歩行者動力学モデルの主たる部分は、歩行者  $i$  の質量、速度をそれぞれ  $m_i$ 、 $\mathbf{v}_i$  として、式 (1) の時刻  $t$  の微分式として表される。このモデルでは、他者と自分の身体が接触しない状態では式 (1a) で、接触し体積力が加わる状態では、式 (1b) で扱う。

対人非接触状態の式 (1a) を  $m_i v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) \tau_i^{-1}$ 、 $-m_i \mathbf{v}_i(t) \tau_i^{-1}$ 、 $\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{soc}(t)$ 、 $\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{att}(t)$ 、 $\sum_b \mathbf{f}_{ib}(t)$  と 5 つの項に分解する。第 1 項は歩行者駆動力で、希望巡航速度  $v_i^0(t)$  と目的方向を表す正規化ベクトル  $\mathbf{e}_i^0(t)$  との積で表される。

第 2 項は第 1 項に対する摩擦項として解釈でき、第 1 項と第 2 項の和は、歩行者の目的方向と希望速度に漸近させる力として作用する。

第 3 項は社会作用力であり、減速回避を行い、他者との社会的距離を維持しようとする斥力である。この項はカーゴイド型の感度分布に従い、歩行者の進行方向以外の方向に位置する他者から受ける社会作用力を表す。

第 4 項は集団凝集力であり、小集団がまとまる力として作用する。この項は、集団が他の歩行者や障害物などにより、分断後も再びまとまる作用を表している。この項を作用させたものと、そうでないものにつき歩行者集団を歩行させ、対向者回避をシミュレーションすると、集団凝集項が作用しない場合は、対向歩行者に分断された後、集団成員間の距離は離れてしまうが、作用する場合その間の距離は分断前の距離に戻る挙動を示す。

第 5 項は障害物回避力であり、この項は歩行者が障害物に必要以上に接近することを妨げる働きをする。

対人接触状態の式 (1b) では、式 (1a) に対し、集団凝集力は式全体に対しての影響が微小なため無視でき、社会作用力を表す項が、物理的接触を考慮した項に切り替わる。

## 3. 集団行動のシミュレーション

本モデルによる式 (1a) による集団凝集力の効果を探るため、通路上に 2・3 人からなる集団を歩行させ、それぞれの個人間距離と集団としての平均速度を計測した結果を示すとともに、その対人回避パターンをシミュレーションで示す。シミュレーション開始直後は値がばらつくが、ステップが進むと集団全体の平均速度は、安定したものとなる。2 人より 3 人集団の方が個人間距離は大きくなり、Wills の測定値と同じ傾向を示す。平均速度に関しては集団規模に応じて増加し、Wills らの計測値と逆の傾向を示した。1 ステップ 1/3 秒のとき、RSU 方式は逐次処理を行うため、集団規模に応じて先導者が後続者の接近による社会作用力で、より前方に押し出される作用が働いたためと考えられる。

## 4. アーチング現象のシミュレーション

本モデルのもう一つの主要な特徴である式 (1b) の対人接触時を示す事例として、避難事故の典型例の一つであるアーチング現象を扱う。その生成と崩壊のプロセスの内、ここでは崩壊のプロセスに焦点を当て、諸エージェントが 0.8m 幅の出口に殺到し、それぞれが避難するシミュレーションの実演を行う (1 ステップ 1/100)。崩壊プロセスを視覚的に観察するとともに、そのアーチ端部のエージェントに 1 ステップ毎に作用する力も計測した。アーチ崩壊時に端部では瞬間的に英国のフットボール場事故から推定された、幅 1m 当り 4,450N を超える値がかかることが確かめられた。

## 5. 結論

本研究では、Helbing らの歩行者動力学モデルの特徴を検討するとともに、差分近似によるエージェントシミュレーションを試行した。

集団行動のシミュレーションでは、集団凝集力の作用とともに、集団規模に対する個人間距離の傾向を再現に成功したと言える。一方で、集団平均速度の再現するには、さらに社会作用力と集団凝集力のバランスを調整する必要がある。

アーチング現象のシミュレーションでは、さらなる精査は必要であるが、アーチの形成から崩壊のプロセスを再現するとともに、崩壊時のアーチ両端の人にかかる力の大きさも、微視的に再現が可能である。このことにより、歩行者安全対策の動的解析を行うツールとしての可能性が示唆される。