



# Social Force Model を適用した没入型 HMD 装着時の 実空間歩行支援

金森浩平<sup>1)</sup>, 酒田信親<sup>2)</sup>, 富永登夢<sup>1)</sup>, 土方嘉徳<sup>3)</sup>, 原田研介<sup>1)</sup>, 清川清<sup>2)</sup>

1) 大阪大学大学院 基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3)

2) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5)

3) 関西学院大学 商学部 (〒 662-8501 兵庫県西宮市上ヶ原一番町 1-155)

**概要:** Head Mounted Display(HMD) のトラッキング技術の進歩により, ユーザは椅子に座って仮想空間を見渡すだけでなく, 部屋の中を歩き回ってよりダイナミックに Virtual Reality(VR) を利用できるようになった. 一方で, HMD を外さずに実空間を動き回するために周囲の障害物と衝突する可能性が生じた. 本稿では, VR 利用時にユーザが実空間上で安全に目的地に辿り着くために, 障害物や他の歩行者が存在する中で歩行者がどのように動くかをシミュレートしたモデルである Social Force Model を適用して, 仮想空間内に安全な歩行ルートを描画することでユーザの歩行を支援するシステムを提案する.

**キーワード:** Social Force Model, Virtual Reality, 歩行支援

## 1. はじめに

近年の VR デバイスの廉価化と一般化によって, ユーザの視野全体をディスプレイで覆う Head Mounted Display(HMD) を用いることで, 高い没入感を伴った Virtual Reality(VR) 体験を容易に提供可能になってきている. また, 頭部座標の計測技術の進歩により, ユーザは椅子に座って仮想空間を見渡すだけでなく, 部屋の中を歩き回ったとしても仮想空間への高い没入感を得られるようになった. 一方で, HMD を外さずに実空間を動き回するために周囲の障害物と衝突して怪我をするという危険性が高まった. この危険性を低下させるためには, 何らかの形でユーザに周囲の実空間情報を提示する必要があるが, 提示方法によっては VR を利用する上で大切な要素と考えられている仮想空間への没入感を損なってしまう. そこで本研究では, ユーザが VR 利用中に障害物に衝突することなく, かつ仮想空間への没入感を損なうことなく実空間上の目的地に辿り着けるよう支援するシステムを研究する.

没入型 HMD による VR 利用時にユーザが実空間上で目的地に辿り着くためには, ユーザが実空間上で自分の位置を把握できるように, なんらかの実空間情報を仮想空間内に表示する必要がある. しかし, 仮想空間内に表示する実空間情報を多くする程, 仮想空間への没入感が損なわれてしまう可能性がある. そこで我々は, システムが周辺の障害物の位置を認識して自動的に歩くべきルートを算出し, その道筋だけを出来る限り少ない表示でユーザに提示することができれば仮想空間への没入感を損なわず, ユーザを

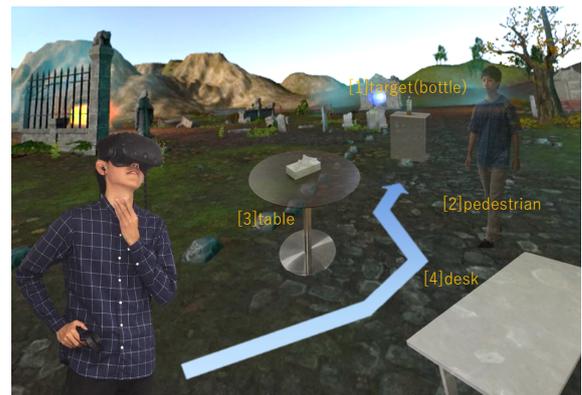


図 1: 提案システム適用イメージ ([1-4]:実空間物体)

目的地まで誘導できるのではないかと考えた(図 1). システムが最適な歩行ルートを算出するために, 我々は歩行者モデルに着目した. 歩行者モデルとは, 障害物や他の歩行者が存在する中で歩行者がどのように動くかをシミュレートしたモデルであり, 代表的なモデルに Social Force Model がある [1][2]. Social Force Model は, 注目する歩行者に, 目的地からの引力や他の歩行者, 障害物からの斥力が見かけ上発生すると仮定したモデルであり, 歩行者が進む方向をベクトルで表現できること, また確率的に行動を選択するモデルでないことから, VR 利用時のユーザに進むべき方向を提示しやすいと我々は考えた.

本稿では, VR 利用時にユーザが実空間上で安全に目的地に辿り着くために, Social Force Model でシミュレートした歩行ルートを仮想空間内に表示することでユーザの実空間での歩行を支援するシステムを提案する. また, 提案システムの有効性を評価するための実験設計について述べる.

Kohei KANAMORI, Nobuchika SAKATA, Tomu TOMINAGA, Yoshinori HIJIKATA, Kensuke HARADA, and Kiyoshi KIYOKAWA

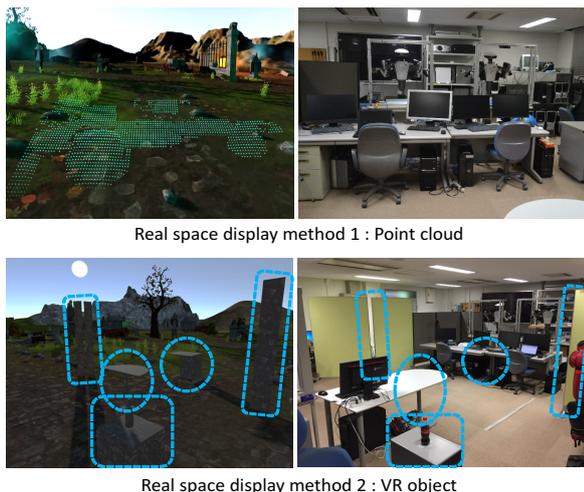


図 2: 仮想空間没入時の実空間での歩行支援手法

## 2. 関連研究

本章では、VR 利用時の実空間インタラクション支援について調査した研究を紹介する。McGill らが、108 人の VR HMD ユーザに VR 利用時の実空間インタラクションについてアンケート調査を行った結果、多くのユーザが実空間インタラクションを改善してほしいと考えていること、実空間インタラクションの度に HMD を取り外すことに不満があること、HMD を装着していると周辺の実空間を認識しづらくなることが判明した [3]。これらの問題を解決するためにユーザスタディを通して調査を行い、HMD を取り外して実空間を見るよりも仮想空間内に実空間情報を部分的に表示した方が仮想空間への没入感を損なわないことを知見として得ている。また、実空間の物体を仮想空間内に表示する際には、外見を VR コンテンツに調和させた方が良いという被験者からの意見をj得ている。VR 利用時の実空間インタラクションについて調査した研究は、着座姿勢で VR を利用している状況を想定して調査されている場合が多く [3][4]、ユーザが部屋全体を自由に動き回れる状況で実空間インタラクションを支援した研究はあまり見られない [5]。

そこで我々は、仮想空間没入時に実空間での歩行を支援する手法として、ユーザから一定距離以内にある実空間物体を点群データで仮想空間内に表示する手法と、実空間上での自分の位置を把握するための手がかりとなる物体を VR オブジェクトとして表示する手法を提案し、既存手法である実空間物体の境界線を表示する手法と比較するために実験を行った (図 2)[6]。その結果、実空間の情報を周辺仮想環境に調和するような VR オブジェクトで表現し、手がかりをプレイエリア内に点在させることで仮想空間への没入感を損なうことなく実空間での歩行を支援できるという知見が得られた。しかし、VR オブジェクトによる手がかりの提示を行う手法では、ユーザは VR 環境に調和された VR オブジェクトを手がかりに実空間の実際の形状を頭の中で思い描き、障害物に衝突しないためにはどこを歩けば良いか

を考えながら歩く必要がある。その場合、ユーザは周囲の実空間を常に意識している状態となるため、VR コンテンツへ没入することは難しい。また、実験では予め場所が分かっている実物体を、固定の VR オブジェクトとして仮想環境上に再現しているため、プレイエリア内に人が入ってくる場合などのリアルタイムな環境の変化に対応できない点で制約的である。そこで本研究では、HMD に取り付けられた RGB-D カメラで周囲の実空間物体をリアルタイムに認識し、計測した環境に応じてシステムが自動的にユーザが歩行すべきルートを算出して、これを提示することで、ユーザに実空間をより意識させずに VR 利用時の歩行を支援するシステムを実現する。

## 3. Social Force Model

Social Force Model は、局所的な情報に基づいて歩行者の動きを決定するモデルである。このモデルは、歩行者に周囲の物体や人物から適度な距離を保つように仮想の力が発生すると仮定したモデルであり、目的地に向かって移動する歩行者  $i$  (質量  $m_i$ ) に働く力を以下の 4 つの力の和の運動方程式 (1) で表現する [7]。

- i). 目的地から受ける引力:  $\mathbf{F}_i^{self}$
- ii). 他の歩行者  $j$  から受ける斥力:  $\mathbf{F}_{ij}$
- iii). 障害物  $w$  から受ける斥力:  $\mathbf{F}_{iw}$
- iv). 引率者や誘惑  $a$  から受ける引力:  $\mathbf{F}_{ia}$

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = \mathbf{F}_i^{self} + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{F}_{ij} + \sum_w \mathbf{F}_{iw} \left( + \sum_a \mathbf{F}_{ia} \right) \quad (1)$$

i) は、歩行者  $i$  が他の歩行者や障害物などの影響によって当初予定していた目的地への最短経路から外れた場合に、目的地の方向に歩行者を曲げようとする力であり、式 (2) で表現される。 ( $v_i^0(t)$ : 希望歩行速度、 $\mathbf{e}_i^0(t)$ : 目的地へのベクトル、 $\mathbf{v}_i(t)$ : 現在の歩行速度、 $\tau_i$ : 遷移時間)

$$\mathbf{F}_i^{self} = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

ii) iii) は、歩行者  $i$  が周囲の歩行者  $j$  や障害物  $w$  を避けようとする力であり、式 (3) で表現される。  $\mathbf{F}_{iw}$  は式 (3) の  $j$  を  $w$  に変更した同様の式で表す。歩行者  $i$  と歩行者  $j$ 、障害物  $w$  の位置関係と変数の対応を図 3 に示す。 ( $A_i, B_i$ : 定数、 $\mathbf{n}_{ij}$ :  $j$  から  $i$  へのベクトル、 $\lambda_i$ : 歩行者  $i$  の視野を考慮した定数 ( $0 < \lambda_i < 1$ ))

$$\mathbf{F}_{ij} = \left( \lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos \varphi_{ij}}{2} \right) A_i \exp \left[ \frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i} \right] \mathbf{n}_{ij} \quad (3)$$

Social Force Model は、iv) の引率者や誘惑に歩行者が引き付けられる場合にも適用できるが、本研究ではユーザが自分で目的地まで辿り着くことを想定しており、また VR 利用時はユーザの視界に実空間上の誘惑となる物体は表示されないため、この引力は考慮しない。ユーザが VR コンテンツ内のイベントやオブジェクトに注意を引かれる可能性はあるが、ユーザを現在地から目的地へ誘導することが目的であるためこれらを考慮する必要はない。

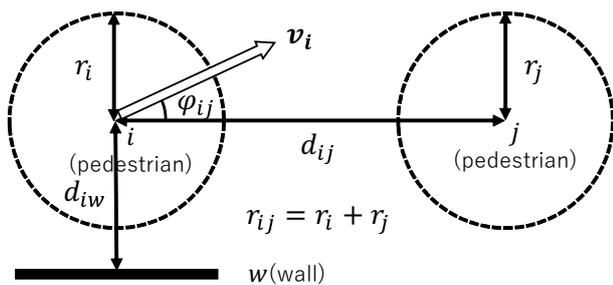


図 3: 歩行者  $i, j$  と障害物  $w$  の位置関係

柳沢らは、Social Force Model において障害物の配置が多く、回避行動が複雑化して歩行者がスタックする問題に対し、出発地点と最終目的地の間にサブゴールを設定することで最終目的地に到達できる歩行者モデルを提案した [8]。また、実際の歩行者の視線データを用いて、歩行者がサブゴールを設定する位置や、新たなサブゴールに目的地を切り替えるタイミングを求めており、以下のサブゴール設定法を実測値から得ている。以下の記述において、目的地とはユーザの最終目的地と歩行中に順次更新されるサブゴールを意味する。

- i). 歩行者は障害物が存在する場合、目的地と現在地を遮る障害物を避けうる点 (端点から 1m 外側) にサブゴールを設定する。
- ii). 歩行者は、サブゴールから 2m 以内までに近寄ると、次のサブゴールもしくは最終目的地をゴールとする。
- iii). 目的地と歩行者の現在地との間に障害物が存在する場合は、さらにその障害物に関する別のサブゴールを設定する。

VR 利用時に、実空間上の目的地がユーザから離れている場合や障害物の配置が複雑な場合には、これらの知見を基にサブゴールを設定することでユーザをうまく目的地まで誘導できる可能性がある。

#### 4. 提案システム

本研究では、ユーザが没入型 HMD を装着している際に、周辺実環境を視認できず目的地まで辿り着けない問題に対して、HMD に取り付けられた RGB-D カメラで周辺実環境を計測し、Social Force Model を適用して歩行ルートをユーザに提示するシステムを提案する。このシステムの実装にあたり、HMD には VIVE Pro(HTC 社, 765g, 両眼解像度:2880 × 1600), 周辺実環境認識には Intel RealSense Depth Camera D435(Intel 社, 222g, Depth 画像:1280 × 720, Color 画像:1920 × 1080) を用いる予定である。

##### 4.1 実空間マップの生成

ユーザを実空間上の目的地に到達させるためには、まず目的地の座標を定義する必要がある。HMD のトラッキング方式には、HMD に取り付けられたセンサで頭部姿勢を推定するインサイドアウト方式と、外部設置型のセンサから頭

部姿勢を推定するアウトサイドイン方式が存在する [9]。アウトサイドイン方式を用いる場合、プレイエリアを事前に定義する必要があるため、定義された範囲の実環境全体をセンシングできるデバイスを外部環境に設置しておくことで容易に実空間マップを生成できる。また、事前にプレイエリア内に目的地候補の座標を定義することで、VR 利用時に目的地を候補から選択できる。しかし、今後急速にトラッキング技術が発展し、どのような環境でも VR を利用可能であるインサイドアウト方式が主流になると予想されるため、本研究ではインサイドアウト方式での実空間マップ生成を試みる。

インサイドアウト方式で目的地を定義するためには、まず HMD に取り付けられたセンサでユーザ周辺の実空間マップを生成する必要がある。RGB-D カメラを用いた実空間三次元復元技術の代表的な手法である SLAM(Simultaneous Localization And Mapping) には様々な手法が存在する [10][11][12]。我々は、その中で高精度かつリアルタイムに動作し、RGB-D カメラに対応している ORB-SLAM2[13] を用いる。実空間マップ生成後、ユーザはマップ内に目的地候補を定義し、VR 利用時に目的地を候補から選択する。実空間マップを生成していない実空間上の地点にも、GPS 情報を用いることで目的地を定義可能であるが、本研究では考慮しない。

##### 4.2 障害物と歩行者の検出

Social Force Model を適用してユーザが歩行可能なルートを算出するためには、ユーザ周辺の障害物と歩行者をカメラで認識し、これらの実空間における座標を取得する必要がある。実空間上にある机や壁などの障害物は短時間で大きく座標は変化しないが、人物や動物は動いている場合が多く常に座標が変化する。そこで、障害物と歩行者の検出には、それぞれ異なる処理を行う。

ユーザの周辺に存在する障害物は、実空間マッピングで得た点群データをラベリング処理を用いてオブジェクト毎に分割することで、それぞれを別の障害物として検出する。Social Force Model を適用して最適ルートを算出するためには、それぞれの障害物に対してユーザとの最短距離を求める必要がある。同じラベルを割り当てられた全ての点群データに対して、自己位置推定によって得られたユーザの座標との距離を計算し、最短距離である点をそのラベリングされた障害物の代表点とする。点群データの外れ値が存在すると障害物までの距離が正確に得られないため、ラベリングの際に大きく外れた点を除外する。

歩行者の検出には、NuiTrack や OpenPose[14] などによる骨格検出機能を用いる。そして、深度画像からユーザと歩行者との距離を取得し、実空間マップに歩行者の座標をマッピングする。

##### 4.3 Social Force Model の適用

実空間マップから障害物や歩行者の座標を取得して、Social Force Model を適用する。ユーザに見かけ上発生する力から、目的地までの歩行ルートをシミュレートし、仮想空間

内にルートを描画する。あるいは、ルートを直接描画するのではなく、中継地点にサブゴールとしての VR オブジェクトを配置することでユーザを目的地まで誘導する。ルートの描画や VR オブジェクトの配置の際には、ユーザが仮想空間への没入感を損なわないように周辺仮想環境に調和する色で表示する。実環境は絶えず変化するため、一定時間置きに歩行ルートを再びシミュレートし更新する。

## 5. 実験設計

VR 利用時に提案システムを用いた際、ユーザ周辺の実環境の複雑さによって仮想空間への没入感や目的地への到達しやすさがどのように異なるかを調査するために実験を行う。Social Force Model を適用して最適な歩行ルートを算出するためには、まず式 (3) の最適なパラメータを決定する必要がある。そこで事前に、3D ゲームエンジンである Unity で仮想的な実験環境を作成しシミュレーションを行う。障害物の位置や個数を変化させながら、各パラメータを調整して歩行ルートをシミュレートし、ルートの長さや障害物との最接近距離を基に最適なパラメータを決定する。

パラメータ取得後、VR 環境に没入している際に飲み物を取りに行く場面を想定して実験を行う。実環境の複雑さによる歩行支援パフォーマンスの変化を知るために、ユーザ周辺に歩行者が存在する場合と存在しない場合で提案システムを適用する。また、障害物の位置や個数を変化させて実験を行うことで、どれだけの複雑さならば提案システムが正常に動作するか確認する。

評価指標は、仮想空間への没入感、目的地までの到達時間、障害物や歩行者との最接近距離や衝突回数とする。仮想空間への没入感の計測には、VR 分野で広く利用されている Igroup Presence Questionnaire(IPQ)[15] を用いる。

## 6. おわりに

本稿では、VR 利用時にユーザが実空間上で安全に目的地に辿り着くための方法として、HMD に取り付けられた RGB-D カメラで周辺実環境を認識し、Social Force Model を適用して仮想空間内に歩行ルートを提示するシステムを提案した。また、この提案システムの有効性と周辺実環境の複雑さによって歩行支援パフォーマンスがどのように異なるかを確認するための実験設計を述べた。提案システムを実装し、評価することを今後の展望とする。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18H04116, JP18H03273 の助成を受けたものである。

### 参考文献

[1] Helbing, D. and Molnar, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Physical review E*, Vol. 51, No. 5, p. 4282 (1995).  
 [2] Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T.: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, Vol. 407, No. 6803, p. 487 (2000).

[3] McGill, M., Boland, D., Murray-Smith, R. and Brewster, S.: A dose of reality: Overcoming usability challenges in vr head-mounted displays, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 2143–2152 (2015).  
 [4] Budhiraja, P., Sodhi, R., Jones, B., Karsch, K., Bailey, B. and Forsyth, D.: Where’s My Drink? Enabling Peripheral Real World Interactions While Using HMDs, *arXiv preprint arXiv:1502.04744* (2015).  
 [5] Sing, K. H. and Xie, W.: Garden: A mixed reality experience combining virtual reality and 3d reconstruction, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 180–183 (2016).  
 [6] Kanamori, K., Sakata, N., Tominaga, T., Hijikata, Y., Harada, K. and Kiyokawa, K.: Obstacle Avoidance Method in Real Space for Virtual Reality Immersion, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (2018 (to appear)).  
 [7] Wang, P.: Understanding Social-Force Model in Psychological Principles of Collective Behavior, *arXiv preprint arXiv:1605.05146* (2016).  
 [8] Yanagisawa, Y., Yamada, T., Hirata, K. and Satoh, T.: Pedestrian dynamics with decision of subgoals based on eye-gaze, *Journal of the Information Processing Society of Japan*, Vol. 47, No. 7, pp. 2160–2167 (2006).  
 [9] Bhatnagar, D. K.: Position trackers for Head Mounted Display systems: A survey, *University of North Carolina, Chapel Hill TR93*, Vol. 10 (1993).  
 [10] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., Wegbreit, B. et al.: FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem, *Aaai/iaai*, Vol. 593598 (2002).  
 [11] Klein, G. and Murray, D.: Parallel tracking and mapping for small AR workspaces, *Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007. 6th IEEE and ACM International Symposium on*, IEEE, pp. 225–234 (2007).  
 [12] Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M. and Tardos, J. D.: ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1147–1163 (2015).  
 [13] Mur-Artal, R. and Tardós, J. D.: Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and rgb-d cameras, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 33, No. 5, pp. 1255–1262 (2017).  
 [14] Cao, Z., Simon, T., Wei, S.-E. and Sheikh, Y.: Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields, *arXiv preprint arXiv:1611.08050* (2016).  
 [15] Schubert, T., Friedmann, F. and Regenbrecht, H.: The experience of presence: Factor analytic insights, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol. 10, No. 3, pp. 266–281 (2001).