

# 実環境のレーザ計測点群内における人間行動シミュレーションとそのアクセシビリティ評価への応用(第10報)

## 一階段歩行シミュレーションのための階段の踏み面境界抽出手法の開発一

北海道大学 ○丸山翼, 金井理, 伊達宏昭

### 要旨

近年、高齢者を含む誰もが屋内外の環境を支障なく安全・快適に利用できるかといった環境アクセシビリティの担保が重要となってきた。そこで本研究では、人間行動シミュレーション技術と実環境の3次元レーザ計測点群を組み合わせ、環境アクセシビリティを定量評価可能な技術の実現を目的とする。本報では、屋内環境の計測点群から階段の踏み面境界を自動抽出する機能を開発し、この踏み面境界を用いてデジタルヒューマンモデルが階段上を自律的に歩行できる機能を開発したので報告する。

### 1. はじめに

近年、環境内の人間の挙動を予測する人間行動シミュレーション技術が実用化され、災害時の避難方法の検討等に応用されている[1]。一方で、高齢化社会の進行と共に、災害時の避難容易性だけではなく、高齢者を含む誰もが屋内外環境を快適かつ安全に利用できるかといった環境アクセシビリティ[2]の担保も重要となってきた。

そこで本研究では、実環境を計測して得られた高密度な3次元レーザ計測点群から、人間行動シミュレーションのための実環境モデルを高精度かつ低コストに自動構築する技術を実現し、さらに、実環境モデル上でのデジタルヒューマンモデル(DHM)を用いた人間行動シミュレーションに基づき、環境アクセシビリティを定量的に評価する手法を開発する。

図1のように、これまで著者らは3次元計測点群からの実環境モデルの自動構築機能、およびこのモデル上でのDHMの歩行シミュレーション機能を開発してきた[3]。しかし、前報のDHM[3]は、階段歩行中に遊脚のつま先と階段の段鼻(凸部)が干渉してしまい、適切な階段歩行を行えないといった問題があった。そこで本報では、屋内環境の計測点群から階段の踏み面(ふみづら)境界を自動抽出可能な機能を開発し、さらにこの踏み面境界を用いて、段鼻とつま先が干渉しないDHMの階段上での歩行シミュレーションを実現した。

### 2. 計測点群からの実環境モデルの自動構築

図1に示すように、本研究では屋内外環境のレーザ計測点群から実環境モデルとして、ダウンサンプル後の法線ベクトル付き点群である環境点群 $Q = \{q_0, \dots, q_N\}$ 、床や階段1段分の歩行面を表す歩行面領域点群集合 $W = \{W_k \subset Q\}$ 、歩行可能な経路の接続関係を表すグラフ構造である経路グラフ $G_N$ を構築する[3]。ここで、各歩行面領域点群 $W_k$ は、主成分分析により推定された法線ベクトルの傾きに基づくRegion growing法によって抽出される。しかし、主成分分析では踏み面の境界付近で適切な法線ベクトルが推定されず、これに伴いRegion growingにおいても境界付近の領域が歩行面領域点群 $W_k$ として正しく抽出されないといった問題があった。

そこで本報では、階段の踏み面をラフに表した歩行面領域点群から、階段の踏み面を表す歩行面領域点群を正確に再抽出し、これに基づき階段の踏み面境界を抽出する手法を開発した。

#### 2.1 階段の踏み面境界の抽出

踏み面境界の抽出手法の概要を図2に示す。まず、図2(a)、(b)に示すように、階段 $m$ の踏み面 $n$ を計測して得られた歩行面領域点群 $W_{m,n}$ に対し、その凸包 $H_{m,n} = \{p_k\}$ を抽出する。次に、図2(c)のように、 $H_{m,n}$ 内の各点 $p_k$ を探索中心とし、半径 $r_s$ 内にあり、かつ $|z_i - z_{m,n}| < d_z$ を満たす近傍点群

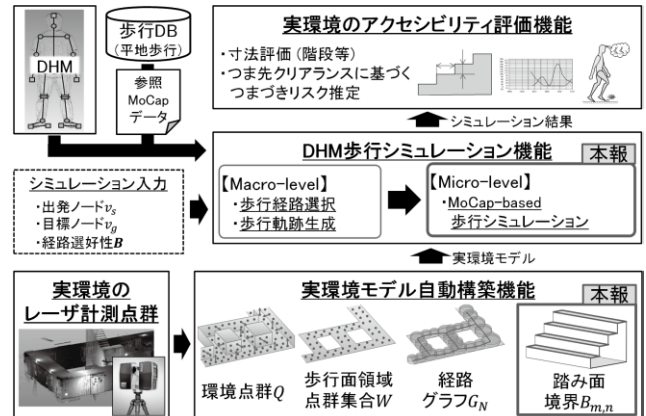


図1 本研究の概要

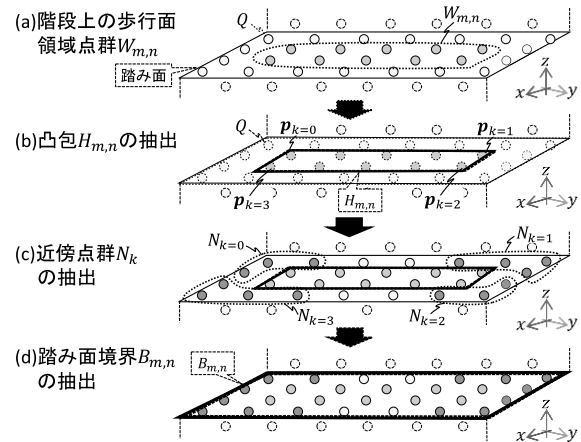


図2 階段の踏み面境界の抽出

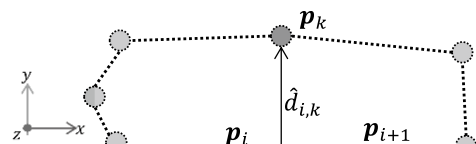


図3 踏み面寸法の推定

$N_k = \{q_i\}$ を、kd木を用いて環境点群 $Q$ から抽出する。ここで、 $z_i$ は $q_i \in Q$ の鉛直方向成分、 $z_{m,n}$ は歩行面領域点群 $W_{m,n}$ の重心点の鉛直方向成分を表す。また、閾値 $r_s, d_z$ はそれぞれ $r_s = 0.05m, d_z = 0.01m$ と設定した。最後に、図2(d)に示すように、 $N_k$ を $W_{m,n}$ に挿入し、踏み面の境界 $B_{m,n}$ を $W_{m,n}$ の凸包として推定する。なお本研究では、 $B_{m,n}$ に対しRamer-Douglas-Peucker法[4]を適用することで、 $B_{m,n}$ 内の頂点数の削減を行った。

## 2.2 階段の踏み面寸法の推定

2.1 節の手法で得られた踏み面境界の抽出精度評価のために、まず、図 5 に示す階段のレーザ計測点群より、各階段の踏み面寸法(踏み面の奥行き方向の寸法)の推定を行った。踏み面境界 $B_{m,n}$ の踏み面寸法 $d_{m,n}$ は式(1)により推定する。

$$d_{m,n} = \min_i (\max_k \hat{d}_{i,k}) \quad (1)$$

ここで、図 3 に示すように、 $\hat{d}_{i,k}$ は $B_{m,n}$ 内の隣接頂点 $p_i$ と $p_{i+1}$ からなる線分と、他の頂点 $p_k \in B_{m,n}$ 間の距離を表す。最後に、同一階段の踏み面寸法は等しくなるという仮定の下に、階段 $m$ 内の各段の踏み面寸法 $d_{m,n}$ の中央値を、その階段の踏み面寸法 $d_m$ として推定する。

## 3. 実環境モデル上での DHM の歩行シミュレーション

図 1 のように、本研究の DHM の歩行シミュレーション機能は、歩行経路選択と歩行軌跡生成のための Macro-level シミュレーションと、1 歩毎の歩行動作生成を行う Micro-level シミュレーションから成る。Micro-level シミュレーション内では、歩行 DB[5]内に記録されている 139 名分の平地歩行のモーションキャプチャ(MoCap)データ内の、ある 1 被験者の MoCap データ(参照 MoCap データ)を選択し使用する。この MoCap データを歩行環境に合わせて修正することで、DHM が廊下や坂道といった実環境モデル上で若齢者や高齢者といった参照被験者と類似性を持った歩行動作を生成できた [3]。しかし、階段昇段・降段時に同一の手法を適用した場合は、DHM の遊脚つま先と階段の段鼻が干渉してしまい、適切な階段昇段・降段を行えないといった問題があった。

そこで本報では、階段昇段・降段時の DHM の遊脚つま先が、階段の踏み面の手前側境界として表現された段鼻に干渉しないように歩行中の遊脚足関節軌跡を修正する手法を開発した。

### 3.1 階段歩行時の干渉回避のための遊脚足関節軌跡修正

提案手法の概要を図 4 に示す。図において、 $f_A(\phi) = [x_A(\phi), y_A(\phi), z_A(\phi)]$ は DHM の歩行時の遊脚足関節軌跡を、 $\phi \in [0,1]$ は正規化された 1 歩の歩行フェーズを表す。

はじめに、図 4(a)に示すように、前報[3]の手法を用いて階段歩行時の遊脚の 1 歩分の運動を事前に生成し、遊脚つま先が段鼻の直下にある時の歩行フェーズ $\phi_1, \phi_2$ と、この時の干渉の深さ $d_1, d_2$ を取得する。ここで、 $d_1, d_2$ は遊脚つま先位置と踏み面境界 $B_{m,n}$ の鉛直方向距離として計算される。次に、図 4(b)に示すように、修正後の遊脚足関節位置の鉛直方向成分 $z'_A(\phi)$ を、 $z'_A(\phi_1) = z_A(\phi_1) + d_1$ と $z'_A(\phi_2) = z_A(\phi_2) + d_2$ を通過するように、3 次スプライン補間により生成する。境界条件として、 $z'_A(0) = z_A(0)$ 、 $z'_A(1) = z_A(1)$ 、 $\dot{z}'_A(0) = v_0$ 、 $\dot{z}'_A(1) = v_1$ を用いた。ここで、速度境界条件の $v_0, v_1$ は、本研究で実施済みの平地・坂道・階段上での実際の人間の歩行動作の解析結果に基づき、 $v_0 = 0$ 、 $v_1 = \dot{z}_A(1)$ と設定した。

最後に、3 次スプライン補間された修正後の遊脚足関節軌跡 $f'_A(\phi) = [x_A(\phi), y_A(\phi), z'_A(\phi)]$ に DHM の遊脚足関節が到達するよう、遊脚の運動を逆運動学計算に基づき再生成することによって、階段との干渉がない歩行動作が得られる。

### 4. 計測点群からの踏み面境界の抽出結果と評価

図 5 に、階段を含む屋内環境の計測点群からの、階段の踏み面境界 $B_{m,n}$ の抽出結果を示す。図より、階段の踏み面境界 $B_{m,n}$ が良好に抽出されていることが確認できる。

また、図 5 に示すように、推定された踏み面寸法 $d_m$ の実

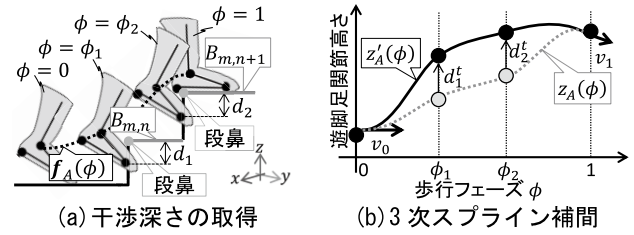


図 4 遊脚つま先と階段との干渉回避手法

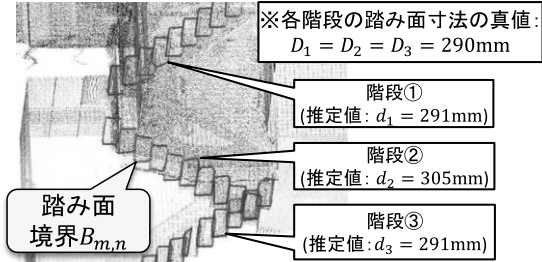


図 5 階段の踏み面領域の抽出結果

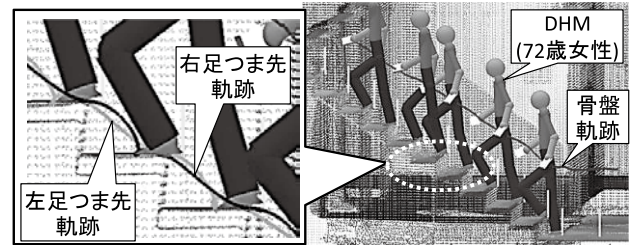


図 6 階段上での歩行シミュレーション結果

測値 $D_m$ との差異は最大でも約 15mm と、良好に踏み面寸法を推定できていることを確認した。

## 5. DHM の階段歩行シミュレーション結果

図 5 に示した階段②上での DHM の歩行シミュレーション結果を図 6 に示す。歩行シミュレーションのための参照 MoCap データとして、72 歳女性の平地歩行時のものを使用した。図 5 に示すように、DHM が階段上を 1 歩ずつ歩行でき、かつ提案手法によって遊脚のつま先軌跡が階段の段鼻との干渉を回避できていることが確認できる。

## 6. まとめと今後の課題

本報では、階段の踏み面境界を屋内環境のレーザ計測点群から自動抽出できる手法を開発した。さらに、得られた踏み面境界を用いて、DHM が段鼻とつま先を干渉させることなく階段を歩行できるアルゴリズムを開発した。

今後は、DHM の経路探索シミュレーション機能を開発し、DHM が経路探索を行いつつ、階段や坂道等を含む環境内で自律的に歩行できる機能の実現を目指す。

## 参考文献

- [1] Dorine C. D., Winnie D., Serge P. H. : State-of-the-art crowd motion simulation models, Journal of Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 35 pp.193-209, (2013).
- [2] ISO21542:Building construction - Accessibility and usability of the built environment, (2011).
- [3] 丸山翼, 金井理, 伊達宏昭, 多田充徳 : 実環境のレーザ計測点群内における人間行動シミュレーションとそのアクセシビリティ評価への応用(第8報)-階段や坂道を歩行可能なMoCap-based歩行シミュレーションの開発-, 2015 年度精密工学会春季大会講演会講演論文集, pp.513-514, (2015).
- [4] Urs R. : An iterative procedure of the polygonal approximation of plane curves, Journal of Computer Graphics and Image Processing, 1(3), pp.244-256, (1972).
- [5] 小林吉之, 持丸正明, AIST 歩行データベース 2013, <http://www.dh.aist.go.jp/database/gait2013/>