

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2報)
—基本歩行シミュレーションへの移動方向決定アルゴリズムの実装—

北海道大学 ○丸山翼, 金井理, 伊達宏昭

要旨

現在, 人間行動シミュレーションのための大規模環境モデルの構築は人手で行われており, モデリングのコスト, 品質, 精度に問題がある. 本研究では, 実環境の3次元レーザ計測点群を用い, 現状を正確に反映した低コストな人間行動シミュレーションのための大規模環境モデルの自動構築技術を開発する. 本報では, 計測点群内における人間の基本歩行シミュレーションに, 1歩毎の移動方向を自動決定するアルゴリズムを機能追加したので報告する.

1. はじめに

近年, 大規模環境における人間行動シミュレーションに関する研究が活発に行われ, 災害時の避難方法の検討や, 商業空間における快適な歩行空間の設計, CGにおける自然な群集動作の生成などに応用されている. 近年では, 3次元空間における人間行動シミュレーションも可能となった[1]. しかし, これらのシミュレーションのための大規模環境モデルは, 実環境の測定結果に基づき人手で構築されているため, 環境の詳細が忠実に再現できず, 環境が大規模になるとモデル構築コストが増大する. 一方で, 設計時のCADデータをそのまま環境モデルとして用いる手法も考えられるが, CADデータはas-built環境を正確に反映していないという問題がある.

一方で, 近年3次元レーザ計測機により, 大規模なas-built環境を3次元点群として高密度かつ低コストに取得することが可能となった. そこで本研究では, 3次元レーザ計測機より得られた計測点群から, 人間行動シミュレーションのための大規模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, 人間行動シミュレーションを用いた実環境のアクセシビリティ評価手法を開発する. これにより, 従来人間に頼っていた, ISO21542[2]等で奨励される建築物のアクセシビリティを, より詳細かつ定量的に評価できる可能性をもつ. 前報[3]では, 環境の歩行容易性評価のための身体動作シミュレーションの開発を目的とし, 屋内環境計測点群を直接環境モデルとした, コンピュータマネキンの基本歩行シミュレーション機能を開発した. しかし, 前報[3]では, コンピュータマネキンの1歩毎の移動方向は直接指定していたため, 障害物や壁が存在しても自律的回避行動を行うことができなかった. そこで本報では, コンピュータマネキンが計測点群から壁や障害物を認識し, 1歩毎の移動方向を自動決定するアルゴリズムを開発し, 基本歩行シミュレーションに実装したので報告する.

2. 計測点群内における人間の基本歩行シミュレーション

図1に示すように, 実環境のアクセシビリティ評価には, シミュレーションのための環境モデル構築と, 計測点群内におけるコンピュータマネキンの基本歩行シミュレーションが必要となる. これらの処理について, 次節以降に詳細を述べる.

2.1 シミュレーションのための環境モデル構築

本研究では, 前報[3]の手法を用いて, 3次元レーザ計測機より得られた高密度な屋内環境計測点群から, 歩行のために必要な歩行面領域点群を抽出し, 環境モデルを構築する. 計測点群からの環境モデル構築の処理手順を図2に示す. 前報[3]の手法では, レジストレーション済み計測点群(図3(a))をダウンサンプリング(A2)した点群に対し, 8分木を用いて, 点群管理のためのボクセル空間を構築する(A3). さらに, 主成分分析(A4)により得られた点群の法線ベクトルを用いて, 床面を離散近似した点群を抽出(A5)し, これに対しEuclidian Cluster Extractionを行うことにより, 床面となる歩行面領域点群を抽出する(A6)(図3(b)).

2.2 コンピュータマネキンの基本歩行シミュレーション

前節で得られた環境モデル内における基本歩行シミュレーションを実現するため, 前報[3]では人間のコンピュータマネキンとして, 文献[4]で提案されたモデルを単純化した脚部4自由度の運動学モデルを用いて, 計測点群内における基本歩行シミュレーションを実現した. 本報ではさらに, コンピュータマネキンが計測点群から壁や障害物を認識し, 1歩毎の移動方向を自動決定するアルゴリズムを開発し, 実際に基本歩行シミュレーションに実装した(図4).

実装したコンピュータマネキンの基本歩行シミュレーション処理手順を図4に示す. はじめに, 直立姿勢の人間の運動学モデルを作成する(B1). 次に, 前節で構築したボクセル空間を用い, 与えた初期位置から床の方向へと点群の探索を行い, はじめに発見した点群を床領域として, 点群上にコンピュータマ

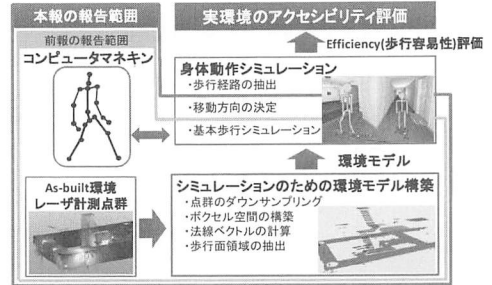


図1 開発する実環境のアクセシビリティ評価手法

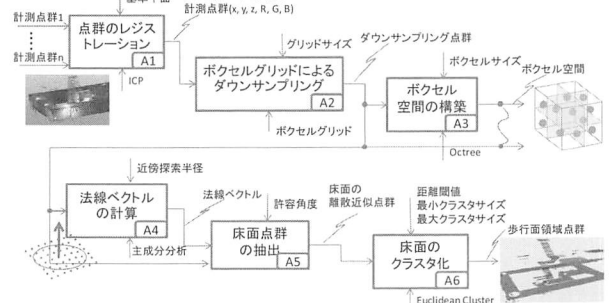
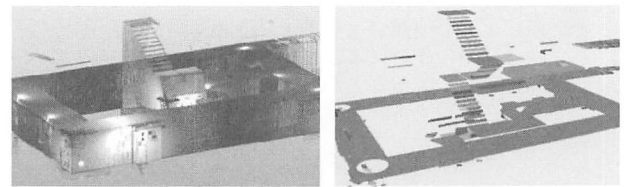


図2 シミュレーションのための環境モデル構築手順



(a) レジストレーション済み計測点群 (b) 歩行面領域点群(天井を除く)
図3 シミュレーションのための環境モデル構築の実行結果

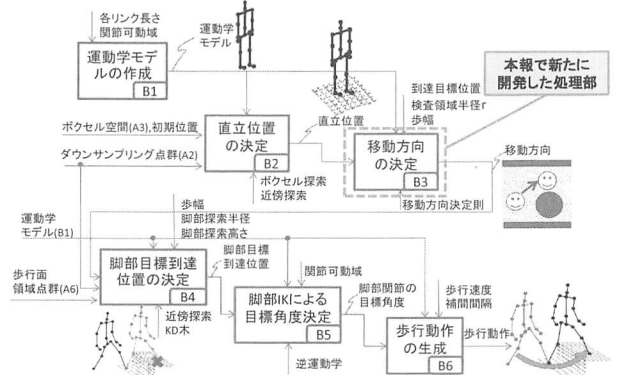


図4 コンピュータマネキンの基本歩行シミュレーション手順

ネキンを直立させる(B2). 次に, 到達目標位置と検査領域半径 r , コンピュータマネキンの歩幅を与え, 次の1歩の移動方向を以下の手順(1)~(9)で決定する(B3, 図5参照).

- (1)指定された到達目標位置 x_t とコンピュータマネキンの現在位置 x_c から, 目標方向ベクトル $t = x_t - x_c$ を決定する.
- (2)目標方向ベクトル t と検査領域半径 r から, 半円状の検査領域 C を内包する矩形領域 D を決定する(図5(a)).
- (3)得られた矩形領域 D を底面とし, コンピュータマネキンの膝から頭の位置までを高さとする直方体領域 V を決定する.

- (4)得られた直方体領域 V と共通部をもつボクセル群を取得する。
- (5)階段やスロープを障害物として誤認識しないように、得られたボクセル群において、歩行面領域点群を含むボクセルが存在するとき、これより下に存在するボクセルをボクセル群から除去する。
- (6)図 5(b)に示すように、ボクセル群内に存在する各点 x_a を取得し、 $x_a - x_c$ を水平面上に投影したベクトルと、目標方向ベクトル t のなす角 θ_a を計算する。
- (7)検査領域 C を角度 $\Delta\theta (= \pi/2n)$ 毎に $2n$ 個の小領域 $c_i (i \in [-n, n])$ に分割し、手順(6)で得られた角度 θ_a に応じて、各点を小領域 c_i に分類する(図 5(b))。本研究では $n=9$ として、 10deg 毎に検査領域を分割した。
- (8)小領域 c_i 毎に、 c_i 内の全点とコンピュータマネキンの距離 $\|x_a - x_c\|$ を計算し、その最小距離を d_i とする。なお、領域 c_i 内に点群が存在しない場合は、特別に $d_i = r$ とする。
- (9)得られた最小距離 d_i に基づいて、以下の決定則により、コンピュータマネキンの移動方向ベクトル v を決定する。

【移動方向決定則】

(Step 1)

$d_{-1} = d_0 = r$ の場合、移動方向ベクトル $v = t$ とする。そうでなければ、(Step 2)へ。

(Step 2)

小領域 $c_{i-1}, c_i (i = -1, 1, \dots, (n-1), n-1)$ を順に探索し、 $d_{i-1} = d_i = r$ となる小領域 c_{i-1}, c_i が存在する場合、目標方向ベクトル t を θ_i 回転させたベクトルを移動方向ベクトル v とする。そうでなければ、(Step 3)へ。

(Step 3)

最小距離 d_i が最大である小領域 c_k を求め、その最小距離 d_k に応じて、移動方向ベクトル v を以下のように決定する。

(a) d_k が歩幅以下の場合

行き止まりと判断し、コンピュータマネキンを直立させる。

(b) d_k が歩幅以上、かつ $d_{k-1} > d_{k+1}$ の場合

目標方向ベクトル t を θ_k 回転させたベクトルを移動方向ベクトル v とする。

(c) d_k が歩幅以上、かつ $d_{k-1} \leq d_{k+1}$ の場合

目標方向ベクトル t を θ_{k+1} 回転させたベクトルを移動方向ベクトル v とする。

上記の手順により、階段やスロープといった環境を計測した点群に対し、コンピュータマネキンの移動方向を統一的に決定することが可能となる。次に、(B3)で得られた移動方向と歩幅から、次の1歩の脚部目標到達位置を決定する(B4)。次に、脚部目標到達位置に対し、脚部の逆運動学問題を解くことにより、コンピュータマネキンの脚部6関節の目標角度を決定する(B5)。最後に、得られた目標角度に到達するように、脚部の各関節角をフレーム毎に線形補間することで、歩行動作を生成する(B6)。

3. 人間の基本歩行シミュレーションの結果と評価

3.1 基本歩行シミュレーションの結果

階段を含む中学校舎内の環境(26m×11m)を、3次元レーザ計測機(Focus 3D S120)により計測した点群内でのコンピュータマネキンの基本歩行シミュレーション結果を図6に示す。図6(a)は廊下の歩行を、図6(b)は階段の歩行を行った例である。また、図6(c)は障害物を配置した廊下における歩行の例である。図6より、廊下や階段といった環境においても、コンピュータマネキンが適切に歩行でき、さらに、障害物が存在する環境においても、提案アルゴリズムにより障害物を自律的に回避しながら歩行できることが確認できる。

3.2 基本歩行シミュレーションの処理時間

コンピュータマネキンの基本歩行シミュレーションの処理時間を表1に示す。なお、実験条件は以下の通りであり、3次元点群処理ライブラリであるPCL(Point Cloud Library)[5]を用い、Visual C++で開発した。

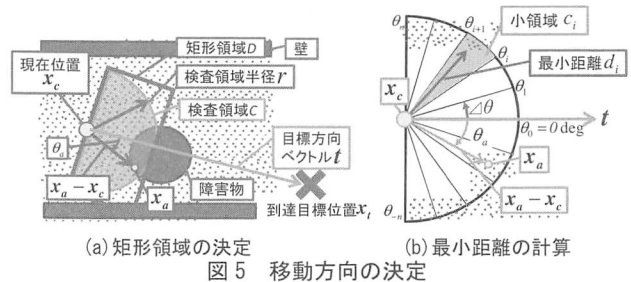
- ・屋内環境計測点群数 : 7,058,731 点
- ・ダウンサンプリング点群数 : 1,043,386 点
- ・ボクセルサイズ : 0.30m
- ・近傍探索半径 : 0.06m
- ・脚部探索半径 : 0.20m
- ・脚部探索高さ : 0.25m
- ・検査領域半径 : 1.00m

表1に示すように、シミュレーションのための環境モデル構築の処理時間は全体で16.446s(約274分)である。しかし、その多くはレーザ計測機による計測時間が約9割を占め、環境モデルの構築自体は126s(約2分)と、手作業で環境モデルを構築する場合と比較し、極めて短時間かつ自動的に、as-builtな環境モ

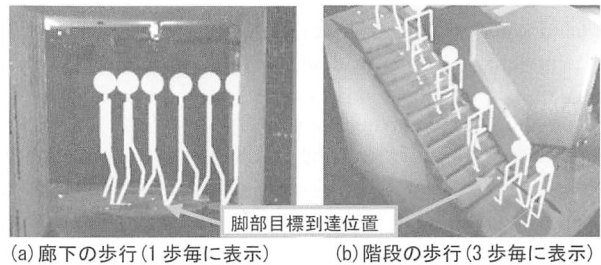
デル構築が可能であることが判る。また、コンピュータマネキン1体について、1歩あたりの脚部目標到達位置と、脚部IKによる目標角度決定の総処理時間は4msと高速に可能である。しかし、移動方向の決定には最大で14msの処理時間を要しており、処理速度の改善が必要である。また、描画処理を含めた基本歩行シミュレーションの処理速度は2.6fpsに減少する。これは、本研究で用いたPCLによる描画処理に処理時間を要していることが原因であるため、今後OpenGL等による描画処理の改善を行う予定である。

4. まとめと今後の課題

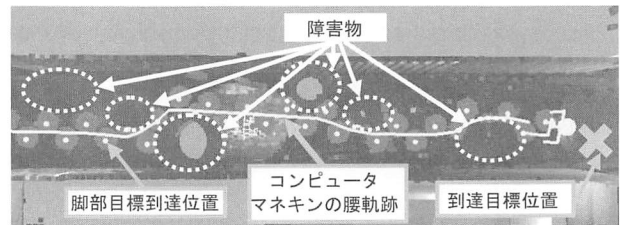
本報では、3次元レーザ計測点群内における人間の基本歩行シミュレーションに、1歩毎の移動方向を自律的に決定するアルゴリズムを提案・実装し、実際に障害物を回避しながら歩行可能であることを確認した。今後の課題として、初期位置から到達目標位置へデジタルヒューマンを歩行させるため、as-built環境のレーザ計測点群内から適切な歩行経路を抽出・選択する手法が必要である。



(a) 矩形領域の決定 (b) 最小距離の計算
図5 移動方向の決定



(a) 廊下の歩行(1歩毎に表示) (b) 階段の歩行(3歩毎に表示)



(c) 障害物の回避
図6 基本歩行シミュレーションの実行結果

表1 基本歩行シミュレーションの処理時間

(実験計算機 CPU: Intel(R) Core(TM) i7 3.30GHz, メモリ: 3.2GB, GPU: GeForce GTX 560 Ti)

処理内容	処理時間[s]	合計[s]
シミュレーションのための環境モデル構築	実環境のレーザ計測	約16,320秒 (約272分)
	点群のダウンサンプリング	18.9
	ボクセル空間の構築	6.5
	法線ベクトルの抽出 (OpenMPによる並列化)	67.9
	水平面領域の抽出	32.3
1歩あたりの基本歩行シミュレーション	脚部目標到達位置の計算	0.003
	移動方向の決定	0.014
	脚部IKによる目標角度決定	0.001
		125.6 (約2分)
		0.018

参考文献

- [1]例えば、柿崎隆夫、瓜井治郎、柿崎隆夫、井上修作、大町達夫：精密人間モデルの導入による3次元集団避難シミュレーションの高精度化、日本機械学会論文集 C編 76(769) 2176-2185,(2010)。
- [2]ISO21542: Building construction -- Accessibility and usability of the built environment.(2011)
- [3]丸山 翼、金井 理、伊達 宏昭：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1報)一計測点群内における基本歩行シミュレーション機能の開発一、精密工学会 2012 秋季大会講演論文集、(2012)
- [4]梅野 謙、福井幸男、三谷 純、西原清一：コンピュータマネキンを用いた高齢者の歩行時における転倒動作のシミュレーション、情報処理学会第70回全国大会講演論文集、"pp.4-29" pp.4-30".(2008)。
- [5]PCL - Point Cloud Library, <http://pointclouds.org/>