

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7報) ーデジタルヒューマンモデルの歩行時の方向転換機能の実現ー

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ている. 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的に評価可能な技術の開発を目的とする. 本報では, 前報で開発した高度なデジタルヒューマンモデルに対し, 歩行中の方向転換機能を追加し, 環境内の経路の形状に従って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ている.

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, これまで著者らは環境3次元計測点群からの実環境モデルの自動構築機能, および得られたモデル上でのDHMの簡易的な歩行シミュレーション機能を開発してきた[3]. さらに, 前報[4]ではDHMと歩行中のMoCapデータを含む歩行データベース(DB)[5]を組み合わせることにより, より実際の人間に近い歩行動作を生成可能とした. しかし, 前報のDHM[4]は直進歩行しか行えず, 環境内の経路の形状に従って自身の移動方向を変更することができなかった. そこで本報では, 新たにDHMの方向転換が可能なシミュレーション機能を開発した.

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, 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段分等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経路グラフ $G_N = \langle V, E, c, t \rangle$ を構築する[3]. ここで, G_N は歩行経路の経路幅を表す円柱形状 $c(v_k)$ とその3次元位置ベクトル $t(v_k)$ を持つノード集合 $V = \{v_k\}$ と, 隣接ノード間の接続関係を表すエッジ集合 $E = \{e_k\}$ から構成される.

3. 実環境モデル上でのDHMの歩行シミュレーション

3.1 DHMの歩行シミュレーションの概要

図1に示すように, 提案する歩行シミュレーションは歩行経路選択と目標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(図2)から構成される.

本研究では歩行DB[5]を用いて, より実際の人間に近いDHMの歩行動作を生成する. ここで, この歩行DBは, 13~73歳の男女(男性:76名, 女性:63名)の平地歩行中のMoCap・床反力・関節角度データ, および被験者の身体寸法等を含んでいる. 本研究では, 図3に示すように, この歩行DB内に記録されている被験者の身体寸法を持った, 総計45自由度から成るDHMを歩行シミュレーションに用いる.

3.2 Micro-levelシミュレーション

Micro-levelシミュレーションの処理手順を図2に示す. また, 各処理の概要を以下に述べる.

(B1) 到達目標位置の更新: Macro-levelシミュレーションから得られた目標歩行軌跡 S^0 (図4の破線)に従ってDHMを歩行させるために, DHMが軌跡点 $s_k \in S^0$ を通過した時, その一時的な歩行目標である到達目標位置 x_t を s_{k+2} に更新する.

(B2) 遊脚踵目標位置の決定: まず, DHMの現在の骨盤位置 x_c を用いて次の1歩の目標移動方向ベクトル $v = (x_t - x_c) / \|x_t - x_c\|$ を計算する. 次に, 目標移動方向ベクトル v と直前の移動方向ベクトル v' (すなわち, 直進時の移動方向ベクトル)のなす角 θ_{turn} を1歩毎の転

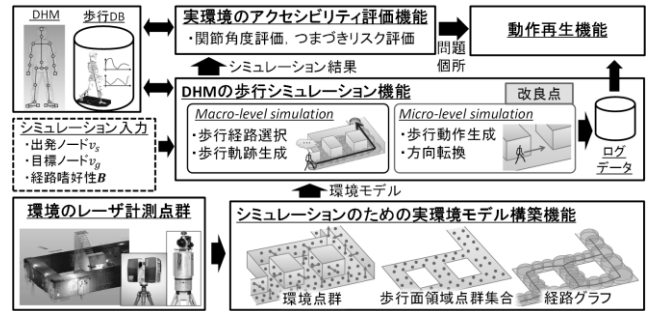


図1 シミュレーションのための実環境モデル構築

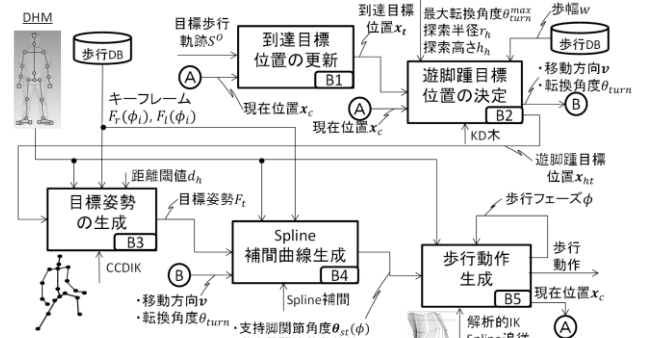


図2 Micro-level 歩行シミュレーションの処理手順

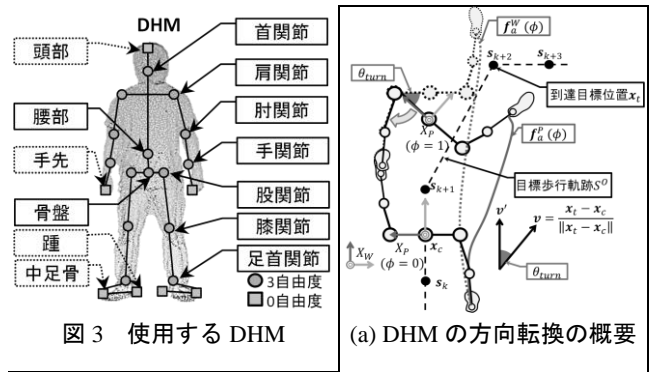


図3 使用する DHM (a) DHMの方向転換の概要

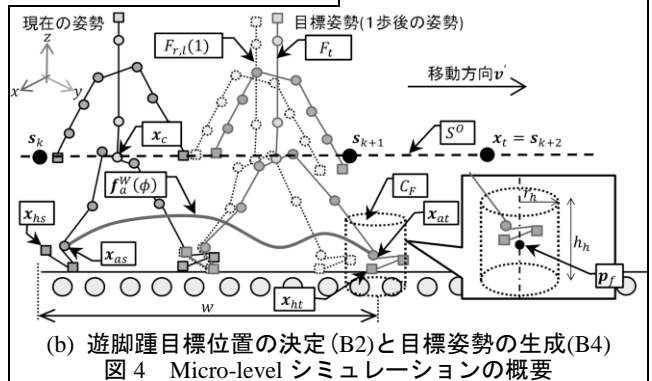


図4 Micro-levelシミュレーションの概要

換角度として計算する(図4(a)). この時, $\theta_{turn} > \theta_{turn}^{max}$ であれば, $\theta_{turn} = \theta_{turn}^{max}$ とする. ここで, θ_{turn}^{max} は事前に与えられた1歩毎の最大転換角度である. 次に, 現在の遊

脚踵位置 x_{hs} から wv 離れた位置 $p_f = wv + x_{hs}$ に円柱状の探索領域 C_F を生成し、 C_F 内で最大の点数を持つ歩行領域点群 W_k の重心位置を、安定して遊脚を接地可能な次の1歩の遊脚踵目標位置 x_{ht} として決定する。

(B3) 目標姿勢の生成：得られた遊脚踵目標位置に到達するために、歩行DBから取得されたキープフレーム $F_r(\phi = 1)$, $F_l(\phi = 1)$ ($\phi \in [0,1]$ は正規歩行フェーズを表す)を初期姿勢とし、 $\|x_h - x_{ht}\| < d_h$ となるまで下肢に対してCCDIK法 [6]を適用することにより、DHMの全身の目標姿勢 F_t を自動生成する。ここで、 x_h はDHMの遊脚踵位置であり、 $d_h = 5\text{ mm}$ は事前に指定した距離閾値である。また、 $F_r(\phi)$, $F_l(\phi)$ はそれぞれ右足、左足を遊脚とした際の歩行中の全身の関節の角度、角速度、角加速度の集合である。なお、 $\phi = 0,1$ はそれぞれ支持脚踵、遊脚踵のイニシャルコンタクトを表す歩行フェーズである。また、CCDIK法において良好な目標姿勢 F_t を得るために、両脚の股関節角度が対称となるような制約を与えている。

(B4) Spline 補間曲線生成：得られた目標姿勢 F_t に到達するために、現在の姿勢 F_s 、目標姿勢 F_t 、キープフレーム $F_{r,l}(\phi = 0.4, 0.5, 0.6)$ における関節角度を通過するように、DHMの支持脚の股/膝/足関節角度軌跡を表す3次スプライン曲線 $\theta_{st}(\phi)$ を生成する。次に、ワールド座標系 X_W における遊脚足関節位置の移動軌跡 $f_a^W(\phi) = (x_a^W(\phi), y_a^W(\phi), z_a^W(\phi))$ の生成も行う。ここで、遊脚足関節位置の移動軌跡の高さ $z_a^W(\phi)$ は、現在の遊脚足関節高さ h_0 、キープフレーム $F_{r,l}(\phi = 0.2, 0.4, 0.8, 0.9)$ における足関節高さ、目標姿勢 F_t における遊脚足関節高さ h_1 を用いて3次Spline曲線で補間し、水平方向の位置を表す $x_a^W(\phi)$, $y_a^W(\phi)$ は現在の遊脚足関節位置 x_{as} と、目標姿勢 F_t における目標遊脚足関節位置 x_{at} の間で線形補間する。最後に、得られた $\theta_{st}(\phi)$ を用いて、1歩における支持脚動作をプログラム内部でシミュレーションし、ワールド座標系 X_W で定義された遊脚足関節軌跡 $f_a^W(\phi)$ を骨盤座標系 X_P に変換した $f_a^P(\phi)$ を計算する。

(B5) 歩行動作生成：最後に、得られた $\theta_{st}(\phi)$ と $f_a^P(\phi)$ を用いて、DHMの1歩毎の歩行動作を生成する。この時、支持脚股関節の内外旋角度を毎フレーム $\Delta\theta_{turn} = \theta_{turn}/n_\phi$ だけ増加させることにより、DHMの方向転換動作を実現する。ここで、 n_ϕ は1歩行フェーズの表現に使用するフレーム数である。本研究では、 $n_\phi = 100$ とし、正規歩行フェーズ ϕ を毎フレーム0.01ずつ増加させることにより、DHMの歩行動作を生成している。なお、遊脚の股/膝関節角度は、遊脚足関節位置が $f_a^P(\phi)$ に到達するように、解析的逆運動学計算を用いて毎フレーム計算する。

以上のアルゴリズムにより、本研究では支持脚股関節の内外旋角度を変化させつつ、骨盤座標系 X_P に変換された遊脚足関節軌跡 $f_a^P(\phi)$ に到達するよう遊脚の関節角度を変化させることにより、DHMの方向転換動作を実現する。

4. 実環境モデル上での歩行シミュレーション

4.1 本研究で使用する歩行DBとDHM

図5に、約700万点からなる屋内環境の計測点群上での歩行シミュレーション結果を示す。図に示すように、DHMが計測点群上で1歩ずつ遊脚踵位置を決定し、かつ環境中の経路の形状に従って方向転換を行いつつ歩行できていることが確認できる。なお、図5において、1歩毎の最大転換角度 θ_{turn}^{max} は40degとしている。

4.2 DHMの歩行中のスティックピクチャ

DHMの歩行中のスティックピクチャを図6に示す。図6(a)は平地歩行時の、図6(b)は70degの方向転換を行った際のものであり、正規歩行フェーズ $\phi = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ の時のDHMの姿勢を歩行開始時($\phi = 0$)の矢状面から表示している。図に示すように、方向転換を行った場合においても、DHMが支持脚踵・つま先を中心に支持脚を回転させ、かつ人間の歩行の特徴の一つである骨盤の上下方向の揺動を再

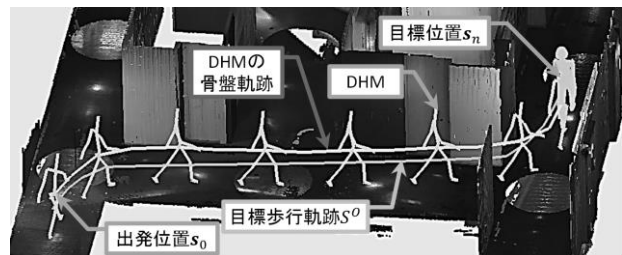
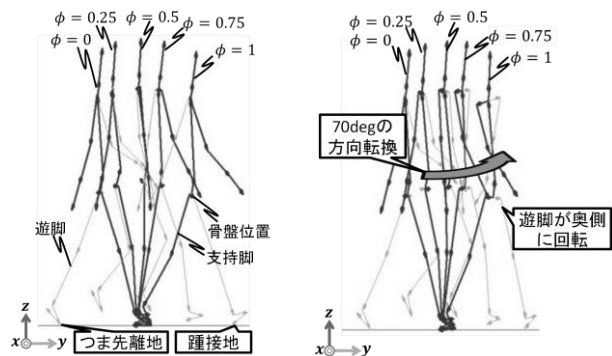


図5 歩行シミュレーションの実行例



(a) 平地歩行時 (b) 70degの方向転換時

図6 DHMの1歩行フェーズのスティックピクチャ (歩行開始時の矢状面から、 ϕ が0.25毎に表示)

表1 モデル構築と歩行シミュレーションの処理時間

| 処理内容 | 処理時間 | |
|------------------------|---------------|--------|
| 実環境のレーザ計測 | 約5h | |
| 点群のレジストレーション | 約1h | |
| 実環境モデルの構築 (約700万点) | 5.48s | |
| Macro-level シミュレーション | 0.001~0.020s | |
| Micro-level シミュレーション | 遊脚踵目標位置の決定 | 0.002s |
| | 目標姿勢の生成 | 0.014s |
| | Spline 補間曲線生成 | 0.002s |
| 1歩の歩行動作生成 (100フレームで補間) | 0.160s | |

現しつつ、歩行できていることが確認できる。

4.3 歩行シミュレーションの処理速度

実環境モデル構築と歩行シミュレーションの処理速度を表1に示す。1歩行フェーズを100フレームで補間した時、1歩毎の歩行動作生成の処理時間は約0.16秒と実時間で処理可能であることを確認した。

5. まとめと今後の課題

本報では、総計45自由度のDHMと、実際の人間の平地歩行中のMoCapデータを有する歩行DBを活用することで、点群ベースの実環境モデル上で環境内の経路の形状に従って、DHMが方向転換を行いつつ歩行できるアルゴリズムを開発した。しかし、このDHMは未だ階段や坂道を歩行できないため、今後はこれらを歩行可能なアルゴリズムに拡張を行う予定である。

謝辞

本研究で使用した歩行DB [5]は、(独)産総研デジタルヒューマン工学研究センターから提供して頂いた。深く感謝する。

参考文献

- [1] Daniel T., Soraia R. M. : Crowd Simulation, Springer - Verlag, London, pp.3-4, (2007).
- [2] ISO21542:Building construction - Accessibility and usability of the built environment, (2011).
- [3] 丸山翼, 金井理, 伊達宏昭: 大規模3次元レーザ計測とデジタルヒューマンモデルを活用したas-built環境内の基本歩行シミュレーション技術の開発, 精密工学会誌 80巻 8号, (2014).
- [4] 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6報)-MoCapデータに基づくデジタルヒューマンモデル歩行シミュレーションの高精度化 -, 2014年度精密工学会秋季大会講演会講演論文集, (2014).
- [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/>
- [6] Hua-wei P., Xu-dong H., Chun-ming G., Yuan L. : A method of real-time human motion retargeting for 3D terrain adaption, 13th IEEE IJCSIT, pp.1-5, (2013).