

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560168

研究課題名(和文) レーザスキャンとデジタルヒューマンを融合した大規模実環境のアクセシビリティ評価

研究課題名(英文) Accessibility evaluation of large-scale as-built environment by the integration of laser-scanning and digital human model

研究代表者

金井 理 (Kanai, Satoshi)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90194878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：実際の大規模な屋内外環境の3次元レーザスキャンから、その環境に存在する物体の詳細形状や意味属性までも高精度に再現した3次元実環境モデルを自動構築し、その環境モデル内で、視覚や自律歩行を模擬できる精緻な人間のモデルであるデジタルヒューマンモデル(DHM)を動作させ、行動時に人間にかかる身体的・認知的負荷を数値的に予測推定するシステムを開発した。これにより、屋内外の実環境に対する「アクセシビリティ」を、レーザスキャン計測データと計算機シミュレーションのみから効率的・合理的に評価できるソフトウェアを試作し、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is to realize the accessibility evaluation of "as-built" environments based on the detailed human behavior simulation. To this end, we propose a method where as-built 3D environment models can be constructed in a fully automatic way from laser-scanned 3D point clouds measured from as-built environments. Additionally, we propose an advanced walking simulation function of the digital human model (DHM) in the as-built environment models. The proposed simulation enabled a DHM to automatically walk utilizing the functions of the global path findings, the walking path location control, the local collision avoidance and the walking motion generation. Moreover, we applied our modeling and simulation algorithms to the complex as-built environments such as a two-storey indoor environment, and an outdoor environment which includes slopes. The efficiency and effectiveness of the modeling and simulation were confirmed.

研究分野：デジタルエンジニアリング, CAD

キーワード：安心の社会技術 デジタルヒューマンモデル アクセシビリティ 安全システム レーザスキャン

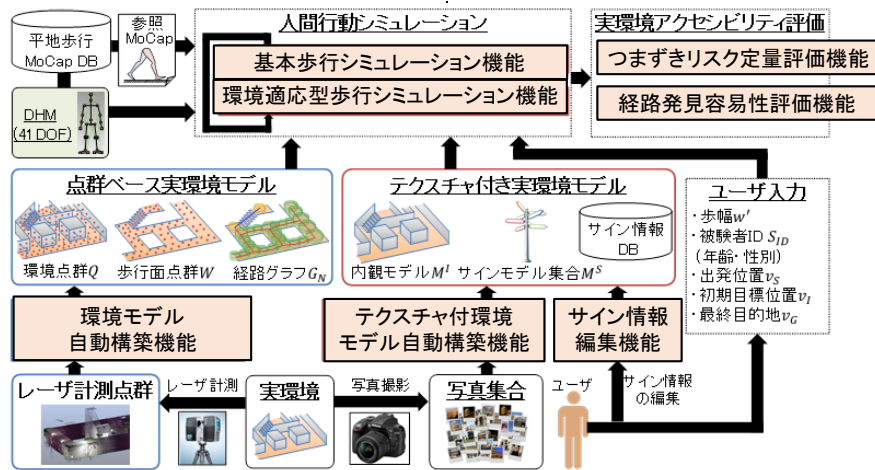


図1
本研究の
全体構造

1. 研究開始当初の背景

超高齢社会を迎えた我が国では、健常者のみならず高齢者や障がい者を含む誰もが、建物等の生活環境を支障なく安全に利用できることの保障、すなわち環境に対する「アクセシビリティ」の保障が、生活の質の向上にとって喫緊の課題となっている。アクセシビリティの ISO 規格も、近年、制定された。従って今後、様々な建物や施設において、その保障が管理者に強く求められることが予測される。例えば公共施設では、脚力や視力が低下した高齢者でも、目的地までの経路が容易に理解でき、かつ歩行や車椅子走行が困難とならないような整備・改修を行う義務が生ずる。

しかし、単なる規格に則ったアクセシビリティ評価では、アクセス経路、通路、階段などの設計推奨値と実環境の該当寸法との適合性を比較することしか行えず、環境中のどの部分が、どのようなユーザにとって、どのような利用時に、どの程度利用に支障を生ずるのかが数値的に評価できず、屋内外環境に対する合理的な整備・改修計画が立案できないといった問題点が残されている。

一方、建築・測量分野では、近年、地上型レーザースキャナや高密度写真計測により、屋内外の大規模環境を高精度に3次元計測モデル化できるスキャン技術が普及しつつある。また人間工学分野では、人体構造の精密な3次元モデルであるデジタルヒューマンモデル(DHM)を活用し、製品利用時の姿勢や身体負荷などのエルゴノミック評価を、シミュレーションで実施可能な技術が実用化されつつある。

2. 研究の目的

本研究では、実際の大規模な屋内外環境の3次元レーザースキャンから、その環境に存在する物体の詳細形状や意味属性までも高精度に再現した3次元実環境モデルを自動構築し、その環境モデル内で、視覚や自律歩行を模擬できる精緻な人間のモデルであるデジタルヒューマンモデル(DHM)を動作させ、行動時に人間にかかる身体的・認知的負荷を数値的に予測推定するシステムを開発する。これ

により、屋内外の実環境に対する「アクセシビリティ」を、レーザースキャン計測データと計算機シミュレーションのみから効率的・合理的に評価できるソフトウェア技術を実現しようというのが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

目的達成のため、本研究では次の(1)~(4)の機能をもつシミュレーションアルゴリズムを新たに考案し、図1に示す原理試作ソフトウェアとして実装し、それらのシミュレーション結果の妥当性を考察した。

- (1) 地上型レーザースキャナで屋内外環境を高密度計測した3次元計測点群から、環境モデルを自動構築し、その環境モデル上で運動学に基づいた DHM の歩行シミュレーションが可能な、環境モデル自動構築・基本歩行シミュレーション機能
- (2) 様々な歩行環境(坂道、階段等)の環境モデルと、様々な歩行者(性別・年齢の違い)の DHM の組合せに対しても、実歩行と高い相関を保ちつつ、歩行シミュレーションが可能な環境適用型歩行シミュレーション機能
- (3) 環境モデル内において、DHM の歩行中につまずきが起きる可能性のある個所を同定し、その際につまずきリスクを定量評価可能な機能
- (4) 環境モデル内において、DHM が経路探索を行う際の経路サイン配置が適切かどうかをシミュレーションにより判断可能な経路発見容易性評価機能

4. 研究成果

(1) 環境モデル自動構築・基本歩行シミュレーション機能

実環境のアクセシビリティ評価には、シミュレーション用環境モデルの自動構築と、環境モデル上での DHM の基本的な歩行シミュレーション機能が必要となる。

このため図2のように、実環境を地上型レーザースキャナで計測し、レジストレーション

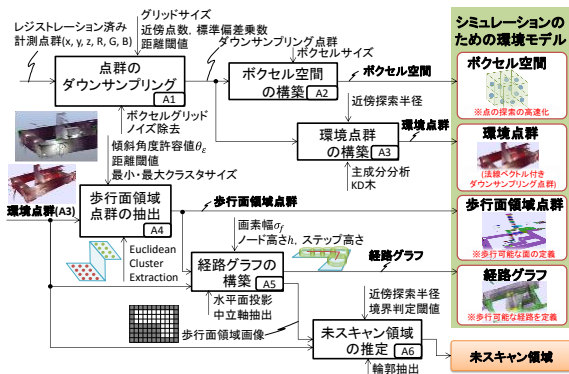


図2 環境モデル自動構築機能

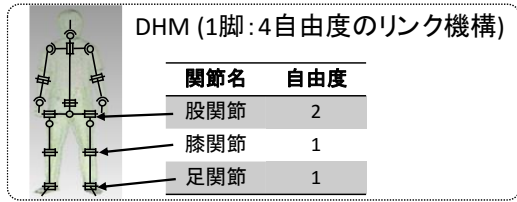


図3 基本歩行シミュレーション用デジタルヒューマンモデルの構造

(位置合わせ)が行われた大規模計測点群から、歩行のための環境モデルとして、ボクセル空間、環境点群、歩行面領域点群、経路グラフを生成した。まず、入力された大規模計測点群をボクセルダウンサンプルした点群に主成分分析を適用し、各点法線ベクトルを算出する。次に法線ベクトルが鉛直上向き方向の水平面上点群に対し、セグメンテーション手法である Region growing を用いてグループ化を行い、床や階段 1 段分がグループ化された点群を、独立した歩行面領域点群として抽出する。最後に、経路幅を表す円柱形状を幾何属性として持つグラフノードと、経路の接続関係を表すグラフエッジから構成される経路グラフを、画像処理により生成する。

一方、環境モデル内の歩行シミュレーションを実現するため、まず図3のような1脚が4自由度のリンク機構で表される DHM をモデル化した。次に DHM の歩行シミュレーションを、環境モデル内の歩行経路選択および歩行軌跡を生成する Macro-level シミュレーションと、障害物回避および歩行動作生成を行う Micro-level シミュレーション処理に分割し実現した。

Macro-level では、与えられた出発ノードと目標ノードから、グラフ上の経路を全探索で自動抽出し歩行経路とする。次に歩行経路上にサンプルされた点からなる初期歩行軌跡に対し、Snakes を用いたエネルギー最小化計算を行い、軌跡点列の平滑化を行う。一方、Micro-level では、DHM が軌跡点を通る毎に、歩行到達目標位置を順次更新しながら、1歩毎の移動方向を決定する。最後に、得られた移動方向に対し、踵軌跡の B-spline 曲線補間と脚部の逆運動学計算を行い、DHM の1歩毎の歩行動作を生成する。

この機能を利用した環境モデル構築と歩行

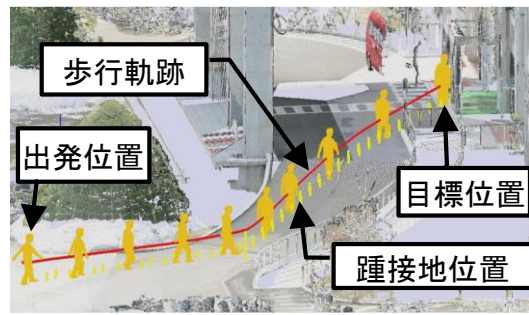


図4 屋外環境モデル内での基本歩行シミュレーション結果

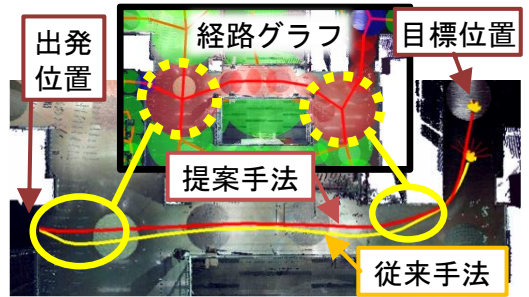


図5 屋内環境モデル内での経路グラフ生成結果と DHM の歩行軌跡

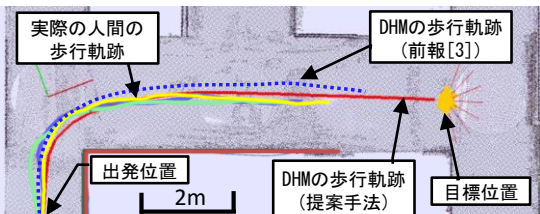


図6 屋内環境モデル内での DHM 歩行軌跡と実歩行軌跡との比較

シミュレーション結果を図4、図5に示す。図4は、坂道を含む屋外環境を計測した約2億点からなる計測点群上での歩行結果である。大規模なレーザ計測点群から、歩行面領域点群が環境モデルの一部として適切に抽出され、かつモデル上で DHM の歩行シミュレーション実行可能なことが確認できる。図5は廊下を含む屋内環境の計測点群上での、DHM の歩行を推定した例である。複雑な廊下上を、DHM が滑らかな軌跡をもつ自然な歩行軌跡に沿って歩行できていることが確認できる。

本機能による歩行シミュレーション結果の一部を、計測したヒトの実歩行軌跡と比較した結果を図6に示す。本機能は人間の実歩行軌跡を良く近似でき、その差は最大でも約350mmに収まることが確認できた。

表 1 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:32GB,
GPU:GeForce GTX 560 Ti)

		屋内環境 (点数: 346 百万点)		屋外環境 (点数: 198 百万点)	
処理内容		処理時間 [s]	合計 [s]	処理時間 [s]	合計 [s]
実環境のレーザ計測		約 10 時間		約 6 時間	
点群のレジストレーション		約 3 時間		約 4 時間	
環境 モデル 構築	環境点群の構築 (ダウンサンプリング後の点数)	147.74 (9 百万点)	228	170.18 (22 百万点)	252
	歩行面領域点群の抽出	1.14		6.23	
	経路グラフの構築	78.76		75.42	
Macro-level シミュレーション		0.6		0.15	
Micro-level シミュレーション		0.19		0.19	

また表 1 のように、環境モデル自動構築の処理時間は約 4 分と、手作業でモデルを構築する場合と比較して著しく短時間かつ自動的に、現況を反映した環境モデルの構築が可能である。また、Macro-level シミュレーションは約 0.6 秒で計算でき、描画処理を含めた歩行シミュレーション全体の処理速度も約 110fps と実時間で実行可能なことを確認した。

(2) 環境適応型歩行シミュレーション機能

身体的観点に基づく環境アクセシビリティ評価の信頼性向上には、高齢者を含む様々な人間の様々な環境下における歩行動作を、高精度に模擬できる DHM の開発が必須である。特に DHM の歩行動作が、実歩行動作と一定の相関を持つことが担保されなければならない。

そこで本研究では、産業技術総合研究所より提供されている歩行 MoCap(モーションキャプチャ)データベースに含まれる 13 歳~73 歳男女の平地歩行 MoCap データに基づいて、坂道や階段といった平地以外の歩行環境でも自律的に歩行可能な環境適応型歩行シミュレーション機能を開発した。

この機能では、指定されたある年齢・性別・身体寸法をもつ被験者の平地歩行 MoCap データから、41 自由度をもつ DHM の平地歩行動作を仮想的に生成し、その後、1 歩における骨盤と遊脚足関節の移動軌跡を、レーザ計測で得られている歩行環境のモデルに合わせ、DHM の骨盤・足関節の関節移動軌跡を変換し、さらに CCDIK 法により支持脚・遊脚の各関節角度を解析的 IK 計算により毎フレーム計算する。これにより様々な年齢性別を反映した DHM の、様々な環境モデル内での実歩行と、運動学的な意味で相関が担保された歩行シミュレーションを可能とした。

このシミュレーションの実行結果を図 7 に示す。提案機能によりデジタルヒューマンが子供や高齢者の歩行動作を模擬しつつ、3 次元点群として表現された坂道や階段、方向転換部といった環境モデルに適応し、妥当な歩行動作を生成できていることが確認できる。また図 8 のように、本シミュレーションで生成された 6 deg 坂道上での DHM の歩行動作を、実際の人間の 6deg 坂道上での歩行動作と

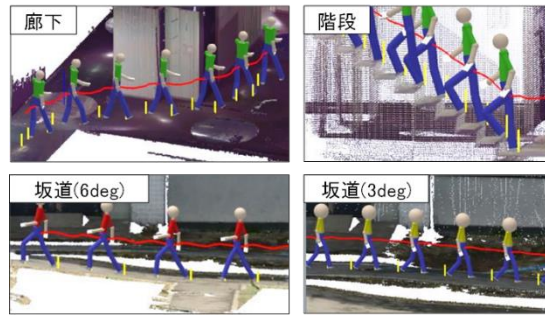


図 7 様々な環境モデルに適用した DHM の歩行シミュレーション結果
(赤: 23 歳男, 黄: 13 歳女, 緑: 72 歳女)

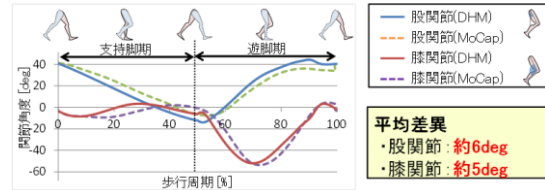


図 8 6deg 坂道歩行時の歩行シミュレーションと MoCap 実データとの比較

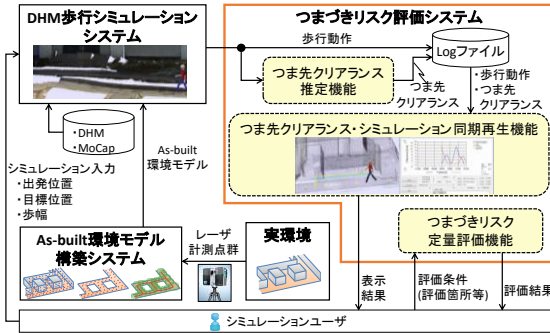


図 9 つまずきリスク定量評価機能

比較した結果、23 歳男性の模擬歩行の場合、実歩行パターンとの膝関節角度・股関節角度の平均偏差は、夫々 5deg, 6deg となり、実歩行動作と一定の相関を持つことが確認できた。

(3) 環境内のつまずきリスク定量評価機能

日本国内では、年間約数千件もの転倒死亡事故が発生し、また転倒がきっかけで寝たきり状態となる高齢者も数多く、実環境に内在される転倒・つまずきの発生リスクの高い個所の発見と予防は、アクセシビリティの中でも重要な項目である。そこで、上記(1)(2)の歩行シミュレーション機能を活用し、レーザ計測から作られた環境モデル内のつまずきリスクを定量評価可能な技術を開発した。

図 9 に、つまずきリスク定量評価機能の概要を示す。まず歩行中の DHM のつま先クリアランス(遊脚のつま先と、最近傍歩行面との鉛直距離)をシミュレーション上で計算し、歩行シミュレーションと同期して計算機上のグラフに描画する。次に、ユーザはクリアランス値が低下した箇所を中心に、つまずきリスクの評価箇所を改めて指定する。最後に、評価箇所において DHM の歩幅、遊脚足関節軌

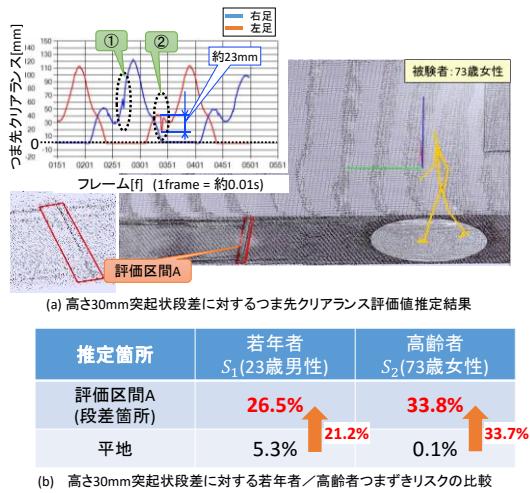


図 10 突起状段差に対するつま先クリアランス評価結果とつまずきリスク評価結果

跡, 出発位置を人間の運動計測の統計データに基づき変化させながら, モンテカルロ法により歩行シミュレーションを自動的に複数回繰り返し, 歩行面につま先が接触・干渉しクリアランス値が負となった歩行回数, すなわちつまずき発生回数を算出する. 最後に総シミュレーション回数に対するつまずき発生回数の比を「つまずきリスク」として出力する.

図 10 に, 高さ 30mm の突起状の段差を含む屋内環境レーザ計測点群上でのつまずきリスク推定結果を示す. 図の通り, 平地と比較し, この突起が原因のつまずきリスクは, 20%~30%も増加することが推定できた. さらに, 若年者と高齢者の DHM を用いて夫々リスク評価した結果比較より, 平地歩行時に対する段差歩行時のつまずきリスク増加量が, 若年者(23歳男性)よりも高齢者(72歳女性)の方が, 約 13%も高いことが示唆された. これらは, ヒトは平地より突起部でつまずきやすい事, また若年者より高齢者の方がつまずきやすい事という事実と合致しており, この評価機能が, 一定の妥当性を持つことが確認できた.

(4) 経路発見容易性評価機能

環境アクセシビリティ評価では, 認知的観点からの環境評価も重要である. 一般に, 認知的な観点に基づくアクセシビリティでは, サイン不足等による人間の迷いがなにかを表す経路発見容易性の評価が特に重要であるとされる. そこで図 11 のように, DHM がサインに基づき経路探索シミュレーションを行う技術を開発し, 経路探索結果に基づいて経路発見容易性評価の一部である環境中の「迷い」箇所を検出する技術を開発した.

経路発見容易性評価の結果に基づいて, ユーザが適切なサインの再配置を提案するには, 高品質テクスチャ画像付きの環境モデルが必要となる. そこで図 12 のように Structure from Motion 技術を用いテクスチャ付き 3次元環境モデルを半自動構築した. さらに, 環境中に配置されたサイン情報を入力・変更可能なサ

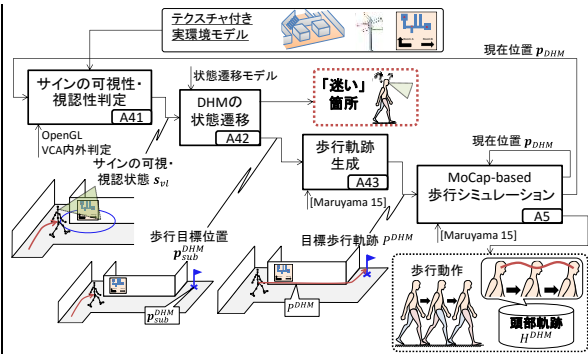
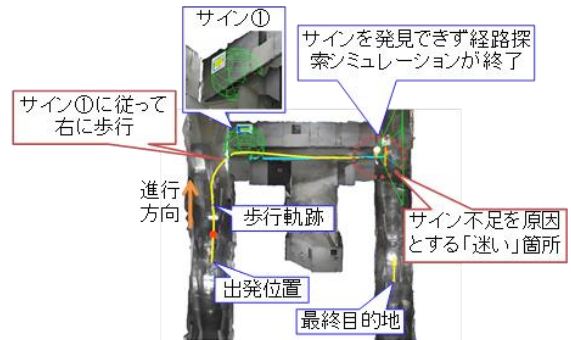
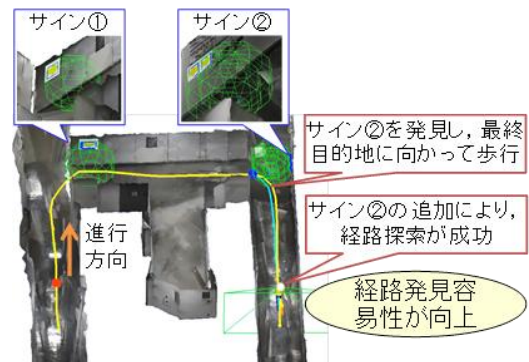


図 11 経路発見容易性評価機能



(a) 経路上の「迷い箇所」検出例



(b) サイン追加による発見性改善効果のシミュレーション結果

図 12 経路発見容易性評価結果の例

イン情報編集機能を開発した.

(1)(2)で開発した歩行シミュレーション技術と, Visibility Catchment Area によりモデル化された DHM 疑似視覚に基づくサインの可視性・視認性判定技術を組み合わせ, DHM がサインを含む環境モデル内を, サイン指示情報のみに従って経路探索可能な技術を実現した. DHM の探索行動の規則は, 有限状態機械としてモデル化した. またその探索行動結果から, 経路探索シミュレーションが失敗した箇所を, サイン不足による「迷い」箇所, すなわち周囲にサインがなく DHM が新たな歩行経路を適切に選択できない箇所として検出可能とした.

図 12 に屋内環境における経路探索シミュレーションの実行結果を示す. 図 12(a) は 1 つのサインのみを配置した場合の経路探索シミュレーションであり, 途中でサインを発見できず経路探索シミュレーションが終了してし

まい、この個所がサイン不足を原因とする「迷い」箇所として検出されていることが確認できる。一方で図 12 (b)は検出された「迷い」箇所に対し新たなサインを追加し、経路探索シミュレーションを実行した結果である。図 12 (b)に示すように、デジタルヒューマンが最終目的地まで到達でき、これより、新たなサインの追加による経路発見容易性の改善効果が、視覚模擬機能をもつ DHM によるシミュレーション結果により即座に推定できる機能を実現した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- (1) Tsubasa Maruyama, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, and Mitsunori Tada: “Motion-capture-based Walking Simulation of Digital human Adapted to laser-scanned 3D As-is Environments for Accessibility Evaluation”, *Journal of Computational Design and Engineering*, (2016) (掲載決定済, 印刷中) [査読有], DOI: 10.1016/j.jcde.2016.03.001
- (2) Tsubasa Maruyama, Satoshi Kanai, and Hiroaki Date: “MoCap-Based Adaptive Human-Like Walking Simulation in Laser-Scanned Large-Scale as-Built Environments”, *Lecture Notes in Computer Science*, 9185, (2015), pp.193-204. [査読有] DOI: 10.1007/978-3-319-21070-4_20
- (3) Satoshi Kanai, Ryu Hatakeyama, and Hiroaki Date: “Improvement of 3D Monte-Carlo localization using a depth camera and terrestrial laser scanner”, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-4/W5, (2015), pp.61-66. [査読有] DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-61-2015
- (4) 丸山翼, 金井理, 伊達弘昭: 「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(8), (2014), pp.755-762. [査読有] DOI:10.2493/jjspe.80.755

〔学会発表〕(計 13 件)

- (1) Tsubasa Maruyama, Satoshi Kanai, and Hiroaki Date: “Vision-based Wayfinding Simulation of Digital Human Model in Three Dimensional As-is Environment Models and Its Application to Accessibility Evaluation”, *ASME International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information Engineering Conference 2016*, (発表決定済), 2016 年 8 月 23 日, Charlotte Convention Center, 米国・Charlotte 市.
- (2) 丸山翼, 金井理, 伊達弘昭: 「大規模 3 次元実環境モデル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 - デジタルヒューマンの視覚に基づくサインの可視性・視認性推定機能の開発 -」, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 15 日, 東京理科大学, 千葉県・野田市.

- (3) 金井理: 「大規模環境のレーザスキャンに基づいた人間行動シミュレーション技術」,[招待講演], 3D レーザスキャニング&イメージングシンポジウム 2015, 2015 年 11 月 20 日, 東京大学, 東京都・文京区.
- (4) Tsubasa Maruyama, Satoshi Kanai, Hiroaki Date, and Mitsunori Tada: “Motion-capture-based Walking Simulation Adapted to Laser-scanned Large-scale Complex As-built Environments for Accessibility Evaluation”, 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics, 2015 年 9 月 17 日, 北海道大学工学部, 札幌市・北区.
- (5) 丸山翼, 金井理, 伊達弘昭: 「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 9 報) -歩行中のつま先クリアランス推定・表示機能の開発-」, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 04 日, 東北大学, 仙台市・青葉区.
- (6) 丸山翼, 金井理, 伊達弘昭: 「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 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学術講演会, 2015 年 3 月 17 日, 東洋大学, 東京都・文京区.
- (7) Tsubasa Maruyama, Satoshi Kanai, and Hiroaki Date: “Enabling human-like walking of digital human model in laser-scanned large-scale as-built environment”, 2014 Asian Conference on Design and Digital Engineering, 2014 年 10 月 31 日, 山東大学, 中国・済南市.
- (8) Tsubasa Maruyama, Satoshi Kanai, and Hiroaki Date: “Efficient Large-scale As-built Environment Modeling based on 3D Laser-scanning for Human Walking Simulation”, *Digital Human Modeling Symposium 2014*, 2014 年 5 月 22 日, 産総研臨海副都心センター, 東京都・江東区.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://sdmwww.ssi.ist.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1)研究代表者
金井 理 (KANAI SATOSHI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90194878
- (2)研究分担者
伊達弘昭 (DATE HIROAKI)
北海道大学・大学院情報科学研究科
・准教授
研究者番号: 20374605