

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 7 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510234

研究課題名(和文) 災害時における人間の動作を精密に考慮可能な集団避難行動シミュレーションの開発

研究課題名(英文) Development of a 3D mass disaster evacuation simulation using precise kinematic digital human models

研究代表者

柿崎 隆夫 (KAKIZAKI, Takao)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：10586556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：大規模災害を想定した集団避難シミュレーションの開発およびそれを実験検証した。まず複数の避難者モデルによる引率や搬送などの特殊形態を発現する動作モデルを構築した。ついでこれらを担架や背負いなど主要な搬送モデルへと拡張し、階段登坂を含むシミュレーション手法を開発した。さらにこれを緊急車両等の移動オブジェクトとの安全な連携を考慮した避難モデルへと発展させ、空港における避難シミュレーションとして統合した。この基本機能を確認するため、航空機からの集団避難動作について、約100名の被験者参加による大規模な実証実験を実施し、主な結果は本研究で開発したシミュレーション結果とよく一致することを確認した。

研究成果の概要(英文)：A 3D mass evacuation simulation using kinematic digital human models has been developed and verified by an experiment. At first, evacuee models emerging specific motion primitives such as company or carrying patient or elderly models have been developed. Then, primitives have been extended to stretcher carry and saddleback models including stairway ascending motion. Furthermore, the models were integrated into a 3D mass evacuation simulation platform including interacts a variety of moving object such as emergency vehicles. Evacuee motion has been experimentally investigated by building a test field that emulates the interior of an actual regional airliner with a capacity of approximately 100 passengers. Finally, the experimental results were compared with the corresponding simulation results. The obtained results can be effectively applied to more accurate mass evacuation/rescue simulations using precise KDH models.

研究分野：シミュレーション，ロボティクス，キネマティクス，ダイナミクス

キーワード：シミュレーション デジタルヒューマン キネマティクス 集団避難 航空機事故 防災 ロボティクス
ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

(1) 災害時の避難行動に関する研究の歴史は古く、国内では阪神・淡路大震災、海外ではハリケーン・カトリーナによる甚大被害などを機に、避難行動に関する研究が加速され、今般の東日本大震災によりその重要性は一層高まった。大規模災害の避難についてはそもそも実験検証が困難なことから、近年はコンピュータによるシミュレーション研究に大きな力が注がれているのが現状である。避難行動シミュレーションでの最重要課題には、群衆行動およびそれを構成する歩行者のシミュレーションがある。前者ではセルラーオートマトン、マルチエージェントなどの手法が導入され検証されてきた。後者では歩行者を単純な円または球で近似するモデルが主流とされてきた。さらに上記の各種手法を統合し、集団避難行動を模擬するシミュレータが開発されるなど、高精度な予測手法の確立はまさに急務となっている。

(2) これまでの研究の多くは2次元問題に限定されており、このため廊下や階段などを含む住居やビルなど実際の3次元空間での集団避難者行動を精緻に検証することは困難であった。さらに、避難訓練を含めシミュレーションの妥当性に関する定量的な検証は、先述の実験困難性もあってほとんど報告されていないのが実情であった。以上のようなことから、3.11を経験した我が国でこそ、今まさに急務である災害における避難行動問題へ実証的な解決案を与えることが焦眉の急であり、本研究で企図する開発意義は極めて大であると考え、本テーマを考案するに至った。

2. 研究の目的

東日本大震災は約2万人の死者および行方不明者という未曾有の被害をもたらしたが、一方では地道な避難訓練が奏功し多くの人々が安全に避難することができた。本研究ではこうした避難をより確実にするため、大規模災害時における集団避難行動の高精度な3次元シミュレーション手法を開発することを目的とした。具体的には健常者、高齢者、子供などに加え、身体不自由者とその介護者・搬送者を含む精密なデジタル人間による動作および避難行動モデルを開発し、これを具体例として、人、機械および施設などが大規模に混合する空港での航空機火災からの集団避難行動シミュレーションにより検証することで、今後想定される大規模災害の高精度な避難シミュレーションに広くかつ簡便に提供可能な技術の開発を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 申請者らは、人間と同様な関節構造を持つ精密なデジタル人間モデルによる主要な動作モデルを開発してきた。この中で、3次元の建物空間を多数の人間が自律的に動

く集団避難を対象に精密デジタル人間モデルを導入、避難時の基本動作定義とともに一連の避難動作を生成し、マルチエージェントに基づくシミュレーション法を開発した。以上を学校における実際の集団避難訓練結果と比較しその有効性を実証した。本手法の最大特長は、人間モデルに簡単な動作判断条件を与えるだけで複雑な集団避難行動を高精度にシミュレーションできることにある。

(2) 本研究の遂行には上記の技術をベースとした。しかしながら、申請者の研究も含め従来の避難対象はほとんどが成人健常者であり、子供、高齢者、身体不自由者や搬送者、さらにその混合ケースは除外されていた。このため、病院などでの避難行動を対象とした研究例、また頻発する航空機事故において負傷者を含む避難行動を想定した研究例はほとんどなく、当該問題に直結する簡便で高精度なシミュレーション報告も見当たらない。以上のようなことから、本研究では大規模な混合避難に必要な精密デジタル人間モデル群の生成、モデルの動作精度および信頼性を向上させるための集団実験、人間とその他の動的オブジェクトが混合するマルチエージェント技術などの手法を駆使し、空港における大規模集団避難シミュレーションを可能にするプラットフォームの構築を目指した。

4. 研究成果

(1) 本申請課題は、大規模災害時における避難を確実にするため、集団避難行動の高精度な3次元シミュレーション手法の開発である。このために建物から避難する健常成人、子供および高齢者や負傷などからなる混合避難モデルの開発、空港における大規模災害を想定して集団避難シミュレーションの開発に関する研究を企図した。研究においてはまず当初計画通り、混合避難モデルの開発およびその集団避難動作モデルへの応用を実施した。具体的にはデジタル人間モデル作成ソフトウェア CAS-Station を用いて、健常成人だけでなく、負傷者やその搬送者を含む階段昇降時の避難動作モデル(図1)およびそれを用いたシミュレーションを構築した。そのシミュレーション結果から、今後避難時の時間遅れや負傷者や搬送者の避難動作による健常成人への影響などを考察した。

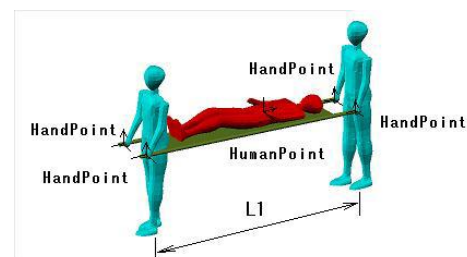


図1 前後2名での担架搬送モデル

まず混合避難モデル構築のためのデジタル人間モデルに適用する避難動作のパラメータを同定した。具体的には階段昇降時および平地移動の健常成人とその他の状態での時間比率をパラメータとし、実地での計測実験を通じて同定した。ここで計測対象を脚部不祥事、脚部負傷（松葉杖移動：図2）時、負傷者背負い時、負傷者協同搬送（左右）、負傷者協同搬送（前後）などを対象とした。なおこれらの搬送は消防庁のガイドラインを参考にした。計測実験により得た動作に基づきデジタル人間モデルを構築し、その移動へ同定したパラメータを適用したシミュレーションを作成した。災害時に最も厳しい条件と思われる階段昇降に着目すると、松葉杖歩行の場合は健常者歩行に比してその速度は約30%に、他者搬送では最も効率がよかった背負い搬送でも単独歩行速度の50~60%であることがわかった。

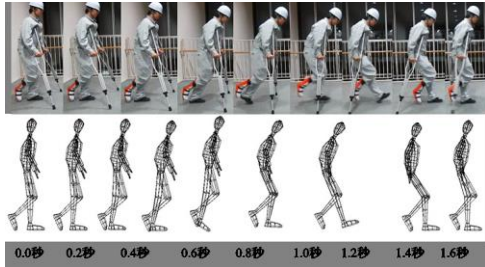


図2 松葉杖による歩行とそのモデル化



図3 災害時における主な負傷者搬送法

実験結果も参考に階段および平地での移動を含む混合避難シミュレーションを作成した（図4）。踊り場が複数ある階段を対象とし、その昇降運動動作を解析した結果、想定した通り、健常成人と負傷者協同搬送などが複合されたグループでの避難では、移動速度の遅い搬送者がボトルネックとなり、全体の避難時間が増加することが確認できた。

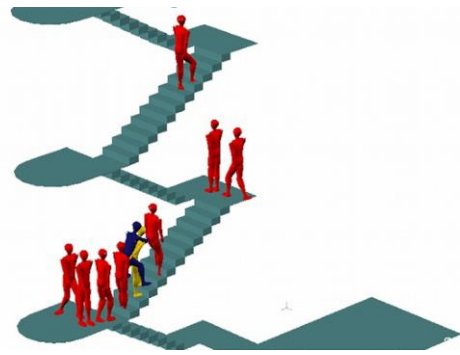


図4 負傷者搬送を含む混合避難シミュレーション例

(2) ついで空港における大規模災害を想定した集団避難シミュレーションの開発およびそれを実験検証した。まず複数の避難者モデル相互間をアドホックな仮想リンクで接続し、これにより主要な引率（家族等が同道）や搬送などの特殊形態を発現する動作モデルを構築した（図5）。ついでこれらのモデルと既開発の担架搬送、車椅子搬送および背負い搬送など主要な搬送するモデルへ群と統合し、多様な混合モデルを考慮可能な階段避難を含む集団避難シミュレーション手法を開発した。これをベースに災害現場での緊急車両等、避難者以外の移動するオブジェクトとの安全な連携を考慮した避難動作モデルへと発展させるとともに、これを空港における集団避難シミュレーションとして開発を進めた。

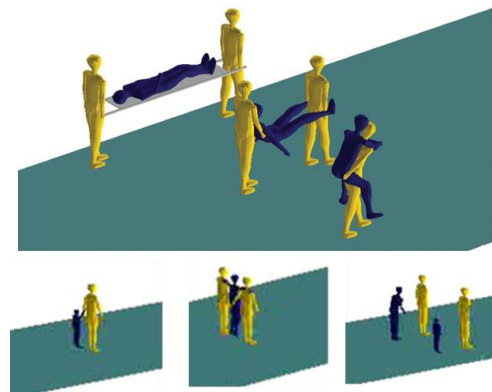


図5 混合避難モデルのためのモデル群

併せて本研究のゴールでもある、空港における航空機事故を想定したシミュレーションの開発のため、航空機からの集団避難動作について、約100名の被験者参加による大規模な実証実験を実施した。対象とする航空機のモデルは全長40m、両翼35m、100人乗り程度の双発中型機であり、客席は左右2列で中央に通路を持つ。実験ではこれとほぼ同様な環境条件を構成した。実験では、中小型機の場合通路が狭いため脱出口付近で避難者の滞留が生じ、それが避難時間の律速となることが明確になった。

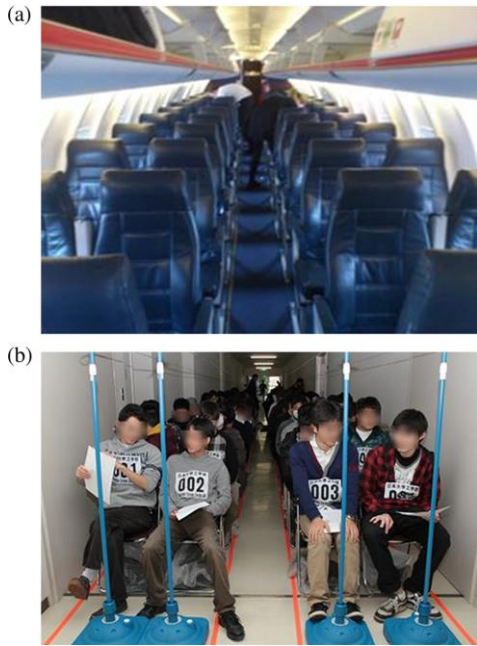


図6 航空機内からの集団避難実験模様

(3) 本研究では避難者モデルに加え、救急などの地上支援者モデル、インフラとして航空機滑走路、消防・救急車両およびトリアージ施設等、これらのインフラと人間との連携モデルとして脱出、搭乗および処置モデルをそれぞれ導入し、すべてのインフラおよびモデルを含むエージェントとする空港災害避難シミュレーションプラットフォームとしてまとめた(図7)。このプラットフォームは航空機火災に関するリッチな3Dグラフィクスモデルを使用しているもので、シミュレーション結果をわかりやすく表示することができる。

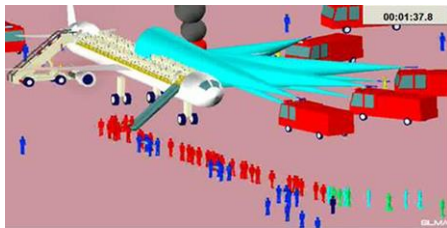


図7 空港における航空機事故での集団避難およびレスキューを含む統合シミュレーション例

図8は、空港における航空機火災事故における乗客の機外への誘導避難シミュレーションと実験との比較例である。機内歩行速度を85m/min一律と設定したシミュレーションの場合、安全に考慮しつつ誘導避難した実験結果とほぼ一致することがわかった。実際の事故では乗客の避難はもちろん、機体の消火、負傷者の搬送さらにはトリアージなど多くの活動が滑走路周辺で同時並行的に進められるが、本研究で開発したシミュレーションにより様々な検討を加えることで減災のた

めの施策や訓練改善への具体的な指針を得ることができるかと確信している。

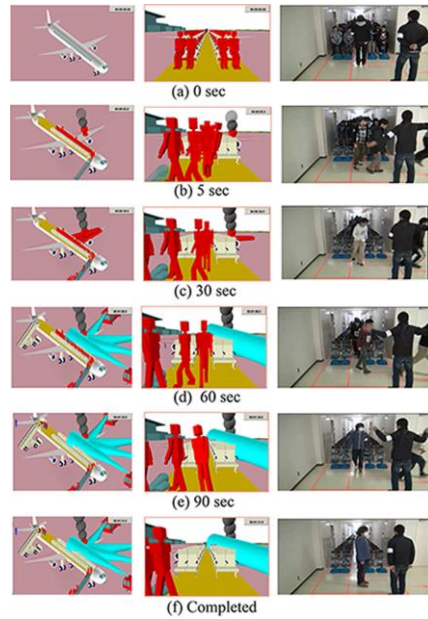


図8 機外への誘導避難シミュレーションと実験との比較例。

(4) 災害を避けることは難しいが工夫により減災は可能である。海外では避難をテーマとする大きな会議も開催されている。過去の経験を活かす知恵とともに、災害に備えた訓練は最も有効な対策である。避難のシミュレーションには限界はあるが様々な場面を想定できる強みもある。多数の避難者の個別特性はもちろん、各人に環境パラメータおよび時刻と紐づけた属性を持たせることができる。これによりたとえば避難時の移動量および渋滞時間、さらには被曝量や感染危険度などを推計することも可能となる。災害からの避難問題はあらゆる分野の知識と経験を総合して対処すべきものである。本研究で開発した避難者モデル、統合シミュレーションおよび実験的検証結果は、頻発する地震のほか、今期課題であった航空機事故、さらには大津波からの避難など、今後の重要課題である減災に大きな効果を発揮する。以上のように本研究の意義は極めて大であり、今後より一層発展させていくべきものと考えらる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

- ① Takao Kakizaki, Mitsuru Endo and Jiro Urie, Experimental Study of an Airplane Accident Evacuation/Rescue Simulation Using Three-Dimensional Kinematic Digital Human Models, 査読有, ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, 15(3), 2015.
- ② Takao Kakizaki, Jiro Urie and Mitsuru Endo, Post-Tsunami Evacuation Simulation Using 3D Kinematic Digital

Human Models and Experimental Verification, 査読有, ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, 14(2), 2014.

- ③ 柿崎隆夫, 災害避難シミュレーションへの人間モデルの導入, 査読無(解説記事), 日本機械学会誌 117(1153), 2014.

[学会発表] (計 2件)

- ① 柿崎隆夫, 遠藤 央, 瓜井治郎 (日大工・機械), 航空機事故からの緊急避難シミュレーションに関する実験的検証, 第57回 日本大学工学部学術研究報告会, pp. 機-2-10, (2014), 12月, 査読無
- ② Takao Kakizaki, Experimental Study of an Airplane Accident Evacuation/Rescue Simulation Using 3D Kinematic Digital Human Models, 査読有, ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Buffalo, NewYork, USA. 2014-8. 17-20

[その他]

<http://ssl-lab-nu.com/topPage.php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柿崎 隆夫 (KAKIZAKI, Takao)
日本大学・工学部・教授
研究者番号: 1 0 5 8 8 6 5 5 6

(2) 研究分担者

遠藤 央 (ENDO, Mitsuru)
日本大学・工学部・助教
研究者番号: 5 0 5 4 7 8 2 5