

熱煙流動を考慮したマルチエージェント避難シミュレータと マルチユーザーVRによる可視化

Multi-Agent Evacuation Simulator Considering Thermal Smoke Flow and Visualization on Multi-User Virtual Reality

○城戸 大輝^{*1}, 天野 和洋^{*2}, 今関 修^{*2}, 近藤 理恵子^{*3}
Daiki KIDO^{*1}, Kazuhiro AMANO^{*2}, Osamu IMAZEKI^{*2}, and Rieko KONDO^{*3}

- *1 鹿島建設株式会社 建築設計本部
Architectural Design Division, Kajima Corporation.
- *2 鹿島建設株式会社 技術研究所
Technical Research Institute, Kajima Corporation.
- *3 鹿島建設株式会社 建築管理本部
Building Construction Management Division, Kajima Corporation.

Summary:

Large-scale, mixed-use facilities, such as redevelopment of urban centers, offices, and commercial facilities, potentially have a large number of evacuees in the event of a fire. Evacuation flow lines are becoming more complex, increasing the complexity of evacuation safety design. In recent years, evacuation simulators using multi-agent models that can reproduce in detail the behavior of each individual and the interaction between people have been developed. Since the movements of evacuees can be visualized, it can be used for evacuation safety evaluation in the design stage and for evacuation guidance measures in the operation stage. In addition, it is important to display the results of evacuation simulations in an easy-to-understand manner and appropriately share the image, especially in consideration of feedback to users and facility managers. By visualizing the thermal smoke flow and human flow from an evacuation simulation using multi-user VR, all parties involved can experience the evacuation with a sense of immersion in the same virtual space. Therefore, an evacuation simulation and its visualization system using multi-user VR that takes into account heat and smoke flows was developed. The effectiveness of the system is shown through case studies.

キーワード: 避難シミュレーション; マルチユーザーVR; マルチエージェント; FDS; 可視化

Keywords: Evacuation simulation; multi-user virtual reality; multi-agent; fire dynamics simulator; visualization.

1. はじめに

都心部の再開発、オフィスや商業施設など大規模で複合用途化した施設は、火災等有事の際の避難者を多数抱えている。また、避難動線が複雑化しており、避難安全設計の複雑度も増している。そこで、設計段階で火災時の避難安全性能を評価、検討することは重要である。一般的には避難安全検証法（告示法¹⁾）に基づいた計算を実施して、火災発生時における建物内者の避難安全性を検証しているが、避難者の個々の動きをイメージすることが難しい。そこで近年では、一人ひとりの挙動や人同士の相互作用を細かく再現可能なマルチエージェントモデルを用いた避難シミュレータの開発が進んでいる。

例えば小久保ら²⁾は、セルオートマトンを用いた避難シミュレータを提案しており、2次元メッシュ上で人の動きと火災の燃え広がりを再現している。掛川ら³⁾は、

避難者個人の行動特性データを扱う避難者モデルと煙流動予測モデルを組み合わせた避難シミュレーションを提案している。これは、煙流動が避難行動に及ぼす影響として、煙層暴露による避難行動の継続性、避難開始時間、煙濃度による誘導灯の見えを考慮している。これらのマルチエージェントモデルは、年齢や身体能力等の個人特性を加味した上で避難者の動きを可視化でき、設計段階での避難安全性評価や運用段階での避難誘導対策に活用できる。浅野ら⁴⁾⁵⁾が提案したモデルは、ネットワークモデルによる大域的な経路選択と連続空間モデル上で他者や障害物を回避するための局所的な進路決定の機能を兼ね備えている。これにより、避難時の混雑状態の表現が可能であると同時に、火災の広がりに応じてネットワークを切断することで避難動線を変化させることは可能ではあるものの、熱や煙の連成までは考慮できていない。

火災時の避難において人は火炎からの熱や煙の影響を受けて出口を探す、既存の避難シミュレータでは熱や煙によって大きく変化する避難動線を踏まえた避難安全性の検討が困難であるといった課題があった。そこで天野ら⁹⁾は、火災時に刻一刻と変化する熱や煙が人の避難行動に与える影響を考慮した避難シミュレータ PSTARS (People, Smoke, Temperature, And Radiation interaction evacuation Simulator) を開発した。

一方、特に利用者や施設管理者の理解を深めるために、避難シミュレーションの結果をわかりやすく表示し、災害時のイメージ、危機感を適切に共有することは重要である。その際、避難シミュレーションの結果を3DCG (3-Dimensional Computer Graphics) やVR (Virtual Reality) を用いて可視化することは有効である。避難シミュレーションの可視化は、Pathfinder⁸⁾などのソフトウェアの利用も考えられる。Pathfinderは避難や煙流動を3Dアニメーションで可視化できる。一方、VRを用いた可視化により、没入感をもって疑似的に避難の様子を体験でき、災害時のイメージをより深く理解できると考えられる。目黒ら⁹⁾は避難シミュレーションの結果をVRで可視化するシステムを開発した。これは人流のみの可視化であったが、被験者実験により、「実際にその空間に入り込み、避難しているかのような気分になったとの感想を得た」と報告している。このように、避難シミュレーションに限らず、VRを用いたシミュレーション結果の可視化は直感的な理解の促進に有効である¹⁰⁾。Kidoら¹¹⁾は、マルチユーザーVRを用いてシミュレーション結果を複数関係者間でリアルタイムに共有可能なシステムを開発している。熱煙流動と人流を合わせた避難シミュレーションの結果をマルチユーザーVRで可視化することで、関係者全員が同じ仮想空間内で臨場感をもって避難の様子を体験でき、今まで以上に災害時の危機感を共有しながら議論できると考えられる。しかし、避難シミュレーションの結果をマルチユーザーVRで可視化した研究は見られない。本報告では、まず熱煙によって変化する避難動線を考慮した避難安全性を検討できる避難シミュレータ PSTARS の概要を説明する。次に、PSTARS とマルチユーザーVRを連携した可視化システムを説明する。本システムの有効性を確認するため、事務室の火災を想定したケーススタディを実施したので、その概要を報告する。

2. 熱煙の流動を考慮した避難シミュレータ

2.1. 避難シミュレータの概要

避難シミュレータにおける人の行動モデルは、一人ひとりの挙動や人同士の相互作用を細かく再現できるマルチエージェントモデルとした。このモデルは、浅野ら⁴⁾のモデルを一部簡略化したものであり、図1に示すように「大域的な経路選択」と「局所的な進路決定」の2段階

の意思決定の仕組みを有している。「大域的な経路選択」では、居室出口などの分岐点をノード、それらを結ぶ経路をリンクとしたネットワークモデルを構成し、距離情報や経路上の人数から換算されたリンクコストに基づいて最小コスト経路を探索する。「局所的な進路決定」では、ネットワークモデルで計算した次の目的ノードの方向を希望方向とした上で、二次元の連続空間モデル上の選択可能方向のうち、障害物に遮られず、希望方向成分が最も長くなる方向を次の速度ベクトルとする。これら2段階の意思決定を、時間ステップ0.1秒毎に避難者全員に対して実行した。なお、本避難シミュレータに関する詳細は既報⁹⁾にて報告している。

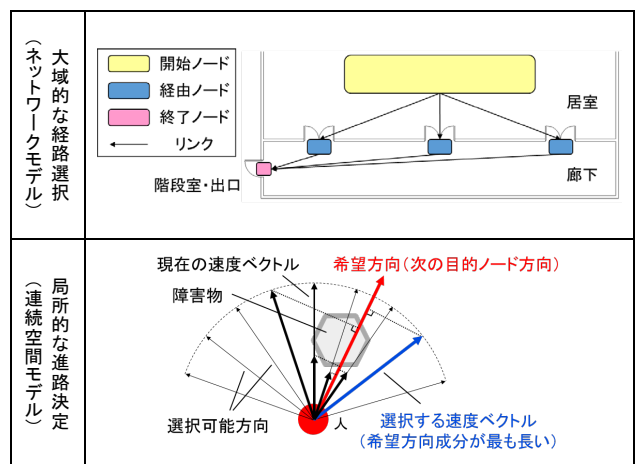


図1 2段階の意思決定を有する人の行動モデル

2.2. 熱煙流動シミュレータの概要

熱煙流動シミュレータは、NIST (National Institute of Standards and Technology) が開発した火災シミュレーションソフトウェアであるFDS (Fire Dynamics Simulator)¹²⁾を用いた。FDS使用にあたっての精度検証は既往研究¹³⁾¹⁴⁾にて実施しており、計算メッシュサイズや物理定数はこれら成果を参考にした。

2.3. 熱煙による人間行動の制約

熱煙流動シミュレータで計算したメッシュ毎の減光係数 $[1/m]$ (煙濃度として考慮) と放射受熱量 $[kW/m^2]$ の時系列データを避難シミュレータへ読み込む。その際、煙データを読み込むメッシュサイズは $0.8 [m] \times 0.8 [m]$ に設定し、熱煙流動シミュレータにて計算した減光係数と放射受熱量の値を格納する^{注1)}。放射受熱量の閾値は文献¹⁵⁾より $2.0 [kW/m^2]$ として、これを超えるメッシュは壁と同様の障害物とみなし人が立ち入れない領域とした。また、その内部に閉じ込められた人は負傷として停止させた。

また、人は煙の減光係数が高いほど視認性が低下し歩行速度が低下する。そのため、視点高さにおける減光係数の時系列データに基づき連続空間モデル上での最大歩

行速度を制御する。減光係数に対応した歩行速度は、文献¹⁶⁾に基づき決定した。減光係数の閾値を超える領域では、歩行は完全に困難になると考え、人をその場に停止させた。減光係数の閾値は文献¹⁷⁾に基づき 0.5 [1/m]とした。さらに、放射熱もしくは減光係数どちらかが閾値を超えた領域については、それと結ばれるリンクを切断して大域的な経路選択を制御することによって、扉が使用できなくなるなどの事象も再現した。避難者は、熱と煙の流動を考慮しながら出口付近の人の渋滞や防火シャッターの降下状況などを見て、図2に示すように出口を探す。このようにすることで、熱や煙によって大きく変化する避難動線を表すことが可能になっている。

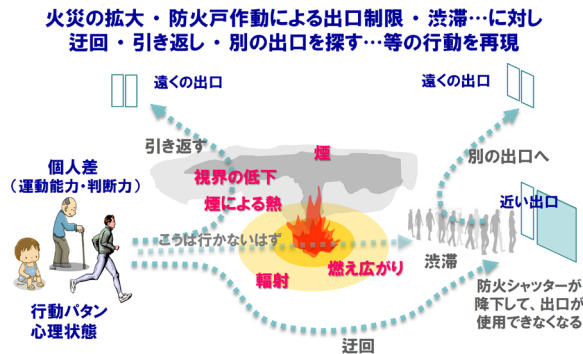


図2 熱と煙の流動を考慮した避難行動

3. 避難シミュレーションのマルチユーザーVR可視化

3.1. マルチユーザーVR可視化の概要

本章では、マルチユーザーVRを用いて避難シミュレーション結果を可視化するシステムについて説明する。システムの概要を図3に示す。まず、人流と熱煙の計算結果と解析空間の3Dモデルデータを仮想空間上で統合して、避難シミュレーション結果を可視化する。各ユーザーはアバターとして仮想空間に没入し、避難シミュレーションの様子を確認することができる。本VRのマルチユーザー対応として、各ユーザーの位置や向き、避難シミュレーション結果の読込や時系列データのアニメーション表示処理を、サーバを介して各ユーザー間でリアルタイムに同期する。

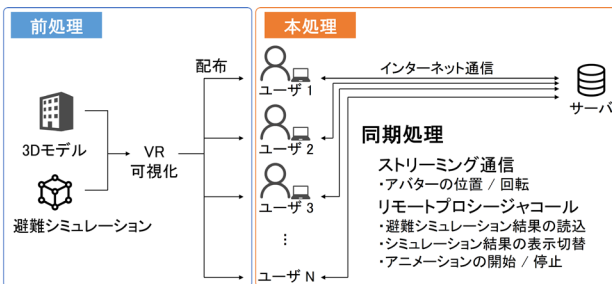


図3 避難シミュレータのマルチユーザーVRシステム

3.2. 人流のVR可視化手法

人流の計算結果のデータは、時間ステップ 0.1 秒毎の各避難者の位置座標、回転角、速度ベクトルの値から構成される csv データである。人流のVR可視化では、避難者の人型 3D モデルを作成して、時間ステップ毎に指定の位置座標、回転角に沿って移動させることで、人流のVR可視化を行った。その際、時間ステップ 0.1 秒毎のデータを 1 秒毎に間引き、位置座標、回転角の値を線形補間することで、処理負荷を軽減しつつ滑らかに移動するよう設定した。また、3D モデル移動時に歩行アニメーションを設定することで、実際に避難者が歩いて避難している様子を再現した。

3.3. 煙のVR可視化手法

熱煙の計算結果データは、時間ステップ 0.1 秒毎の各空間メッシュの座標、気流温度 [°C]、減光係数 [1/m]、熱放射 [kW/m²]の値から構成される csv データである。本稿では、煙のVR可視化に焦点を当てる。煙のVR可視化にあたり、CGにおけるパーティクルシステムを使用した。パーティクルシステムでは、ビルボード^{注2)}としてレンダリングされる粒子を模倣した2次元画像を大量に生成し、アニメーション化することで雲や液体、炎などの流体を表現する。

まず、2次元画像を用いて煙オブジェクトを作成した。この煙オブジェクトを各空間メッシュの座標位置に配置して、各メッシュの時間ステップ毎の減光係数の値を基に煙の色と濃度を調整することで、煙の計算結果を可視化した。煙の色は、減光係数の値に応じて白から黒へと変化させた。煙の濃度は、減光係数の値に応じてメッシュ位置に描画する煙オブジェクト数を増やすことで再現した。なお、減光係数が 0.1 [1/m]に満たない場合は煙オブジェクトを表示しない設定とした。本システムにおける減光係数の値と煙の色、濃度の対応付けを表1に示す。また、煙を可視化した様子を図4に示す。煙の流動についても人流の可視化と同様に処理負荷を軽減させるため、時間ステップを 1 秒毎に間引く設定とした。また、生成した煙オブジェクトを一定速度で回転させることで、煙流動にリアリティを持たせる工夫を施した。

表1 減光係数と煙の色、濃度の設定

減光係数 [m ⁻¹]	色 (R,G,B)	濃度 (オブジェクト数)
0.1 未満	-	-
0.1～0.2	白 (255, 255, 255)	5
0.2～0.35	薄灰 (168, 168, 168)	8
0.35～0.5	濃灰 (84, 84, 84)	12
0.5 以上	黒 (0, 0, 0)	15



図4 煙の可視化

(左から順に減光係数：0.1～0.2、0.2～0.35、0.35～0.5、0.5以上における煙オブジェクト)

3.4. 避難シミュレーション VR のマルチユーザー対応

避難シミュレーション VR のマルチユーザー対応は Kido ら¹¹⁾ の提案手法を用いた。本システムは様々な関係者が操作しやすいよう、PC 上でキーボードとマウスを用いて操作し、ディスプレイ上に描画する設計とした。

ユーザーは一人称視点の-avatarとして VR 空間に没入し、キーボードで移動、マウスで視点を自由に操作できる。各参加者の-avatarの位置、向きは、サーバを介したストリーム通信によって常にリアルタイムに同期される。そのため、他の参加者がどこで何を見ているかをリアルタイムに共有することができる。VR 上での避難シミュレーション結果のデータ読込や、時系列データのアニメーション表示処理は、RPC (Remote Procedure Call)^{注 3)} によって同期されるように設定した。これらの処理はユーザーインターフェースを通して任意のタイミングで実行され、サーバを介して各ユーザー間でリアルタイムに同期される。そのため、他の参加者と同じシミュレーション結果をリアルタイムに共有することができる。

4. 火災を想定した検証実験

4.1. 検証実験の概要

本システムの有効性を検証するため、避難シミュレーション及びマルチユーザーVR による可視化のケーススタディを実施した。対象にした建物モデルを図5に示す。フロアの専有面積は 715 m² で事務室と会議室が配置されており、在館者人数は3部署の合計 169 人と設定した。事務所の天井高さは 2.7m であり、避難扉の幅はそれぞれ 0.8m、上部には 0.3m の防煙垂壁が設置されている。また、本モデルは廊下（第1次安全区画）がなく、執務室から付室（階段）に直接避難する。地震発生後の出火を想定して、出火とほぼ同じタイミング（0秒）に一斉退出を開始することとした。また、上階にも避難者が計 450 人で、2か所の階段を使って 225 人ずつ降りてくる設定とした。検討ケースとして、出火階を優先して上階からの避難を出火階の避難が完了した後に行うケース1と、出火階も上階も全階一斉に避難するケース2の2パターンを実施した。火災解析領域のメッシュ分割は、既往研究¹³⁾を参考に1メッシュあたりのサイズを考慮して、300 (X方向分割) × 150 (Y方向分割) × 27 (Z方向分割) とした。火源の位置は図5に示す通りで、ソファ火災を

想定して火源面積は 1.7m²、発熱速度は 240 秒で最大 3MW になるように設定した¹⁸⁾。その他物理定数についても既往研究¹³⁾と同様である。なお今回の事務室の机の高さでは、熱気流に与える影響は少ないと考え、気流計算では机の配置は考慮していない。避難シミュレーション結果のVR化は、ゲームエンジンの Unity 2020.3.4f1 を用いて実装した。VR のマルチユーザー対応には Unity 上で動作するネットワークエンジンの Photon Unity Networking2 を用いた。また本検証では、Photon Server SDK を用いてオンプレミス環境に通信用のサーバを構築し、LAN (Local Area Network) 環境で3名のユーザーが同時接続してマルチユーザーVRでの避難シミュレーション結果の可視化検証を実施した。

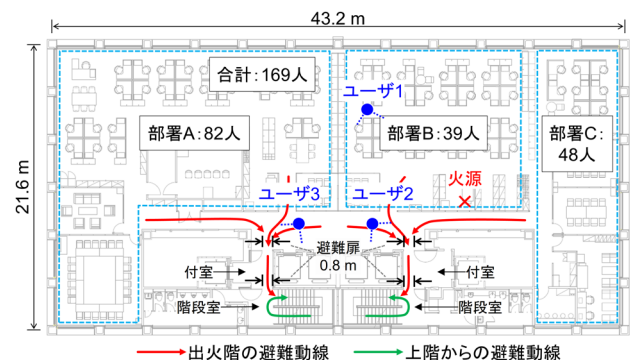


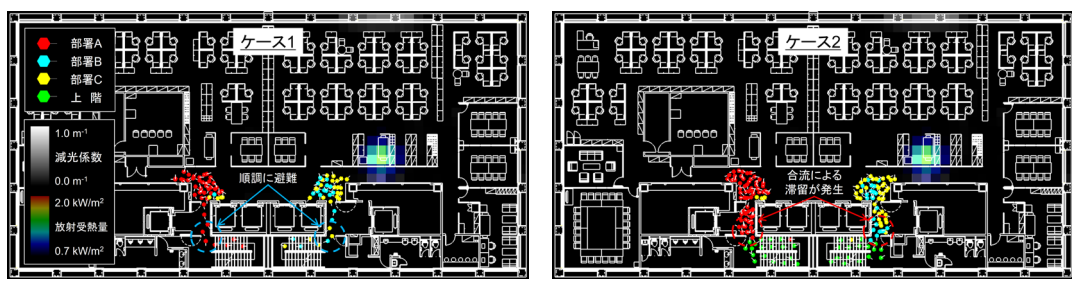
図5 検証に使用した建物モデル

4.2. 検証結果と考察

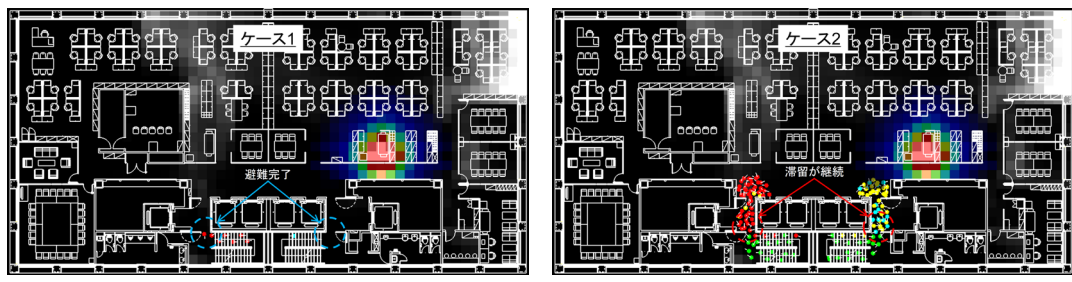
避難シミュレーションの結果を表2に示す。上階からの避難が出火階の避難に影響を与えないケース1においては、階段室までの避難時間が87秒で逃げ遅れた人は発生しなかったが、上階からの避難が出火階の避難に影響を与えるケース2では、避難時間が190秒で30人の逃げ遅れた避難者が発生する結果となった。なお、ケース1においては、階段室に全員収容可能であるため、居室出口（避難扉部分）での有効流動係数は告示法¹⁹⁾から最大の 90 [人/分・m] と考えられる。実際に、ケース1の結果から避難扉部分での10秒単位の通過人数を計測したところ、どちらの扉も最大で12人であった。流動係数に換算すると、 $12 \times 60 / 10 / 0.8 = 90$ [人/分・m] となり、告示法とも整合していることを確認した。

表2 避難シミュレーションの結果比較

ケース	階段室までの避難時間	逃げ遅れた人
ケース1： 出火階を優先退出	87 秒	0 人
ケース2： 全階一斉退出	190 秒	30 人



(a) 50 秒時点の結果



(b) 87 秒時点の結果

図 6 2 次元での避難シミュレーション結果の可視化



(a) 12 秒時点の結果



(b) 30 秒時点の結果



(c) 50 秒時点の結果



(d) 120 秒時点の結果

図 7 ケース 2 におけるマルチユーザーVR での避難シミュレーション結果の可視化

避難シミュレーションの可視化結果を図 6、図 7 に示す。図 6 は 2 次元的に避難の様子をプロットした従来方式、図 7 は VR 空間に入った 3 名でケース 2 の避難シミュレーション結果を共有している様子である。なお、図 7 の視点位置は図 5 に示す各ユーザー位置としている。図 6 の可視化では、人の全体的な動きはわかりやすいが、煙の高さ方向の挙動がわかりにくい課題があった。また、全体として簡易的な表現に留まるため、火災時の避難の様子や危機感を適切に共有することが難しかった。一方、図 7 のマルチユーザーVR による可視化では、関係者全員が同じ空間を共有しながら 3 次元的な煙の挙動や人流の混雑度合を把握できることがわかった。煙流動については、火源から天井にあたった煙が天井を伝って壁に到達し、その後降下してくる様子が VR によって確認でき、2 次元では表現できない流動の様子が確認できた。煙の流動は避難行動に大きく影響を与えることから、煙流動を正確に可視化することで建築計画や避難誘導計画立案に大きく寄与すると考えられる。人流の可視化は、全体把握に重点を置いた従来表現に対して、直感的に把握できるスケール感をもって確認できる点が優れていた。また、関係者全員が同じ仮想空間に没入して、同じ時間軸で相互の動きを確認しながら臨場感をもって火災時の避難の様子を疑似体験できるため、火災時のイメージや危機感を適切に共有しながら議論できることがわかった。

5. まとめ

設計段階で火災時の避難安全性能を評価、検討して、わかりやすく表現することは重要である。本研究では、熱煙流動を考慮した避難シミュレータとマルチユーザー VR による可視化システムの開発を行った。以下に本研究の貢献を示す。

- 熱や煙によって変化する避難動線を考慮した避難シミュレータ PSTARS とマルチユーザーVR による可視化システムを連携させ、複数関係者が同じ仮想空間を共有しながら臨場感のある火災避難を疑似体験可能なシステムを開発した。
- 事務室の火災を想定した避難のケーススタディを実施し、従来の 2 次元での可視化と本研究で開発したマルチユーザーVR での可視化を比較検討した。その結果、本手法は関係者全員が同じ空間を共有しながら 3 次元的な煙の挙動や人流の混雑度合を把握できるため、防災計画や避難誘導計画、関係者間でのイメージ共有に寄与することを示した。

本研究では、煙の減光係数と見通し度合い関係を CG におけるパーティクルシステムを用いた煙オブジェクトを調整することで再現している。今後は減光係数と見通し度合をより忠実に再現可能な表現方法や、放射受熱量の可視化についても検討していく。

【注釈】

- 注1) メッシュのサイズは任意に設定可能であるが、本稿ではメッシュ幅を告示法¹⁾の必要滞留面積 0.3 [m²/人]を参考に 2 人程度が入る大きさとして、1 辺 0.8 [m]とした。
- 注2) 常にカメラの方向を向いた状態でレンダリングされるオブジェクト。
- 注3) あるコンピュータで動作するソフトウェアから、通信回線やコンピュータネットワークを通じて別のコンピュータ上で動作するソフトウェアへ処理を依頼したり、結果を返したりするための規約。遠隔手続き呼び出しとも呼ばれる。

【参考文献】

- 1) 建築基準法施行令第 129 条、第 129 条の 2、平成 12 年建設省告示第 1441 号、第 1442 号
- 2) 小久保聡、山本和弘、山下博史：セルオートマトンによる火災時の避難行動のシミュレーション、日本機械学会論文集 (B 編)、74 巻、748 号、pp.2724-2730、2008
- 3) 掛川秀史、関沢愛：火災時における建物の避難安全性評価のための避難シミュレーションモデル、日本リスク研究学会誌、53 巻、4 号、pp.241-248、2013
- 4) 浅野美帆：歩行者交通流動評価のためのシミュレーションモデルの開発—予測行動を考慮して、東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 博士論文、2007
- 5) 浅野美帆、井料隆雅、桑原雅夫：交錯交通の容量評価のためのミクロ歩行者行動モデル、交通工学研究会、2008
- 6) 天野和洋、今関修、抱憲誓、井田卓造：熱煙流動を考慮した避難シミュレータの開発、日本火災学会研究発表会概要集、pp.182-183、2013
- 7) 天野和洋、今関修、桑名秀明、三田尚貴、井田卓造、田中重良、笹田岳：火災時の熱・煙の影響を考慮した避難行動予測、鹿島技術研究所年報、第 69 号、pp.9、2021
- 8) <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (アクセス日：2023.09.28)
- 9) 目黒公郎、藤田卓：ポテンシャルモデルと VR を組み合わせた新しい避難シミュレーションツールの開発、生産研究、54 巻、6 号、pp.401-404、2002
- 10) Bryson, S.: Virtual reality in scientific visualization, Communications of the ACM, 39(5), pp.62-71, 1996
- 11) Kido, D., Imazeki, O., Nakayama, K., and Nakano, Y.: Visualization of computer-aided engineering simulations on multi-user virtual reality for consensus building, Proceedings of the 41st Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe), pp.843-852, 2023
- 12) <https://pages.nist.gov/fds-smv/> (アクセス日：2023.07.05)
- 13) 佐藤博臣、栗岡均、今関修、田中太：CFD による散水設備作動時のトンネル空間熱性状予測、地下空間シンポジウム論文・報告集 = Proceedings of the Symposium on Underground Space/土木学会地下空間研究委員会 編、土木学会、pp.69-78、2004
- 14) Imazeki, O., Kurioka, H., Oka, Y., Takigawa, S., and Amano, R.: Computational fluid dynamics of hot current from a fire source near a tunnel wall, Proceedings of the 8th International Symposium on Fire Safety Science, pp.1485-1496, 2005
- 15) 長谷見雄二、重川希志依：火災時における人間の耐放射限界について、Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering, 31(1), 1981
- 16) 神忠久：煙の中での歩行速度について、火災、25 巻、2 号、pp.102-106、1975
- 17) 室崎益輝：建築防災・安全、鹿島出版会、1993
- 18) 砂原弘幸、城明秀、佃めぐみ、川尻朋之、浅見高志、抱憲誓、松山賢、原田和典：3 人がけソファの燃焼性状、日本火災学会研究発表会概要集、pp.158-159、2008