

地震火災時における安全避難の連鎖生成 市民による自律協調分散システム

○上田 遼*¹

キーワード：マルチエージェント 自律協調分散 ブロックチェーン AR(拡張現実)

1. はじめに

首都直下地震対策は、公知の通り喫緊の社会課題となっている。建物密集地域における地震火災時の広域避難は重要な課題の一つである。

一方近年、主にセキュリティ、金融等の経営・経済のマネジメントにおいて、中央管理主体をもたない自律協調分散型システムの頑強性が着目されつつあり、これは様々な脅威に対して応用可能な情報システムである。

そこで、本研究では地震火災時の広域避難におけるリスク（火災遭遇者数）を最小化することを目的とし、市民主体型の自律協調分散システムの必要性とその効果について、マルチエージェントモデルを用いて検討を行う。

より具体的には、金融取引などに用いられるブロックチェーン(分散型台帳技術、3.1章)において、正統な取引履歴を多数の分岐の中から決定していくアルゴリズムの考え方が、問題構造の類似性から火災に対する安全経路の導出に応用できると筆者は考える。これは、後段で詳述するように、既存の経路最適化アルゴリズム ACO(Ant Colony Optimization, 蟻コロニー最適化)等とは、本質的な部分で異なるアプローチとなっている。

1.1 木造密集地域と地震火災

東京においては、木造住宅密集地域が都心を取り囲むように分布しており、この地域が多くの火災被害を生じると考えられている。木造密集地域において危険に暴露される避難者や犠牲者が数多く生じる恐れがある。沖・大佛¹⁾は救助の観点から、住民相互の協力の必要性をシミュレーションにより実証的に検討、指摘している。

1.2 避難誘導の Sensing-Actuation・相互依存性

情報社会システム、特に IoT、人工知能等に関するフレームワーク(例えば²⁾)に即して論じれば、Sensing と Actuation の問題があると考えられる。Sensing は外的状況を知覚してデータを取得するプロセスであり、それを元に人工知能等の推論・判断システムにより状況判断を行い、最終的に Actuation として、外部にそれをフィードバックし、新たな行動や変化を促すものである。

広域避難の場合図1に示すように、行政が市民に対して的確な誘導・指示を行うこと(Actuation)が期待されるが判断の材料となる多発火災のような分散情報は、目撃情報が住民レベルでは局所的に存在しても、それを速やかに収集すること(Sensing)は行政のみでは限界がある。

また、避難過程や時間進展で新たに発見された火災等へも対応が必要である。このように、行政と住民は、判断と判断材料(情報)を相互に依存しており、最も避けるべきは限定情報下での双方の情報待ち、硬直状態である。

建物内での避難において既設の検知設備から状況が中央管理しうることとは対照的と考える。2016年の熊本地震では、SNSを介した情報提供が盛んに行われた。市民からの情報提供を活用する試みとして南・加藤³⁾は避難所混雑状況の緩和等を目的とした SNS 利用に関する研究を行っている。本研究では住民が自律的に、協調して避難経路を創成し選択するシステムが必要と考える。

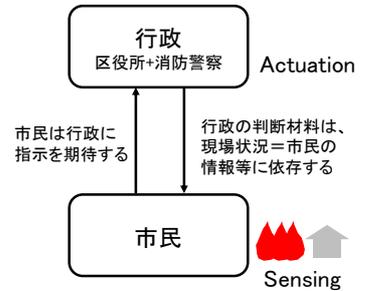


図1 避難情報の相互依存状態

2. 対象地域と現況のシミュレーション

まず対象地域の現況を述べ、それに基づく解析を行う。

2.1 対象地域

研究の対象とする木造密集市街地、阿佐ヶ谷・高円寺・中野地域(人口約5万人)を図2に示す。当地域では3か所の広域避難場所が設定されており、それぞれ鉄道駅前の再開発地域の公開空地、河川沿いの緑地、および広大な公園となっている。市街地の状況は、建物が密集するだけでなく、旧農道等に由来する不整形で屈曲した街路が形づくられている。そのため、グリッド型の街路は少なく、道なりに進行しても無意識のうちに方向を誤るリスクがあり、袋小路も多い。そのため、方向・方角を指し示す指方型の誘導は、必ずしも最適とは言えない。



図2 対象地域および広域避難場所

2.2 解析モデル

火災の発生と延焼を模擬するため、確率的に出火を評価し、既往の延焼シミュレーション式⁴⁾を用いた。建物の防火、耐火性能や着火からの経過時間、隣棟間隔等の幾何学条件、および風速等の気象条件から、着火の及ぶ飛距離と延焼時間を評価し、延焼状況を逐次シミュレートするものであり、冬季の18:00を想定している。

街区のモデルは、市街規模の対象地域を効率的にモデル化するため、斎藤、鏡味⁵⁾を参考に図3に示すようにノード・リンクモデルを用いた。Node-Linkモデルは、Nodeと呼ぶ結節点(交差点)とそれをつなぐLinkのネットワークからなるモデルである。

エージェントの経路選択は、Node分岐に際して目的地に最も近い方向にある分岐を選ぶアルゴリズムとした。目的地は、いずれかの避難場所であり、エージェントごとに確率的に選択させた。自分自身の居場所から各避難場所までの直線距離 r を評価し、 r の2乗に反比例する確率で選択を行うようにした^{注1)}。

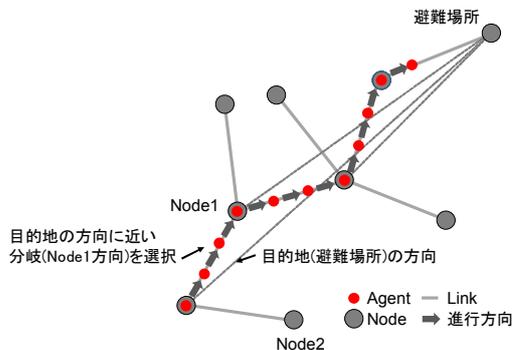


図3 Node-Link Model と経路



図4 市街地モデルと火災状況(3次元 View)

エージェントの歩行速度(混雑がない状態)は、熊谷⁶⁾、上田⁷⁾を参考に高齢者以外(50代以下)の歩行者の歩行速度を1.2m/sとし、高齢者(60代以上)の高齢者は年齢に応じて歩行速度を0.4m/s(90代)まで線形に低減した。エージェントの相互作用として、混雑の影響を考慮するため、中央防災会議⁸⁾の手法(関数)を参照し、群衆密度が増大するにつれて歩行速度を低下させるようにした。

これらのアルゴリズムを汎用CADソフトVectorWorks 2016(A&A社)のVector Scriptを用いて実装した。

オレンジの点は避難者を表す

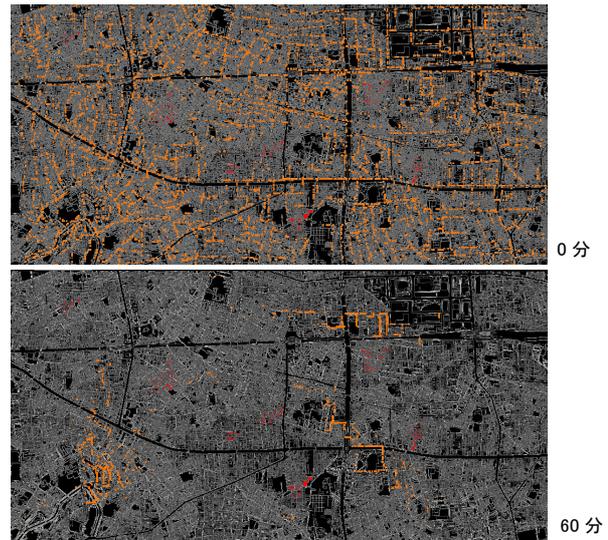


図5 現況による避難のシミュレーション

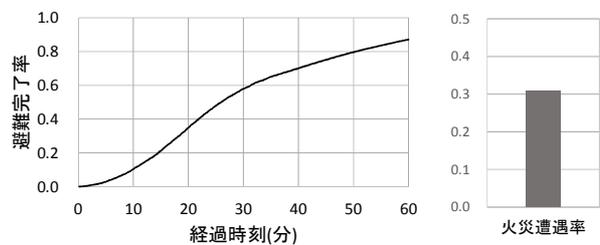


図6 避難完了者率の推移

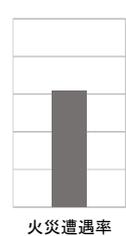


図7 火災遭遇率

2.3 現況の避難のシミュレーション検討

市街地の3次元表示の俯瞰図を図4に示す。赤色で表示した建物は火災延焼中である。

エージェントの避難性状を平面表示して図5に示す。エージェントの分布をオレンジ色で示す。図より、エージェントの分布が時間を追うごとに3つの広域避難場所へ集合、避難していく様子が見て取れる。時間軸に対して避難を完了したエージェントの割合(避難完了率)をグラフ化して図6に示す。60分後に避難完了率は85%程度となっている。また、全体に占める火災に遭遇したエージェントの割合(火災遭遇率)を図7に示す。31%の避難者が火災に遭遇した。

3. 対策検討と自律協調分散システムの導入

対策として、既往システムをレビューしつつ、避難における自律協調分散システムの提案を行うとともに、安全度に関する基礎的なシステム変数の検討を行う。

筆者⁷⁾は、津波避難時に到達予測を元に避難者に安全かつ最短な避難経路を通知する方法の効果を検討しているが、火災のように情報が限定的である際には、直接応用できない。火災を回避するための策として、従前の簡明なアプローチとしては、火災情報そのものを収集し、

地図上にプロットし、利用者がそれと現在位置を見て行動を判断することである。しかし、前述のとおり方向性のない複雑な街路とグリッドにあって、特に現地の道に不慣れな、広域避難してきた避難者にとって、情報システムと現況を照合し、判断することは必ずしも容易とは言えない。そこで、具体的な経路まで落とし込んで誘導することがより効果的な支援となると考える。

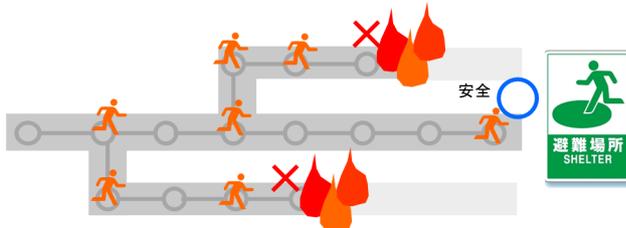


図 8-1 避難経路における火災遭遇と安全経路

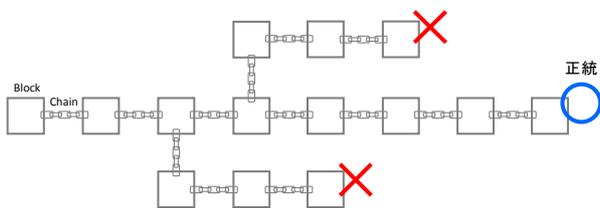


図 8-2 ブロックチェーンにおける分岐排除と正統性

表 1 システムの特徴の比較

	避難経路の連鎖生成	ブロックチェーン(電子マネー)
共同データベースと目的	避難地域内における、共通・共有された避難経路(安全危険度)を導出する	唯一の正統な取引データベース(台帳)を決定する
参加者	避難者(情報報告、情報利用を兼ねる)	取引データベースへの分散管理参加者(取引報告、相互チェックを兼ねる)
ブロック	避難者の経路履歴	取引者の取引履歴
情報アーキテクチャ	避難地域別の分散サーバーを想定	全世界の分散サーバー

3.1 避難経路の安全性とブロックチェーンの正統性

火災情報の提供に関する問題を模式的に図 8-1 に示す。避難者が任意の経路を通して避難場所に向かっている。○印は、火災に遭遇せずに避難場所に到達した避難者を表す。一方、他のエージェントは、経路の途中で火災に遭遇したことを表している。問題点として、先頭を進んで火災に遭遇した避難者がいた際に、その情報を後から来る避難者に遡及的に伝えることができなければ、後続の避難者も同様に火災に遭遇する恐れがある。もちろん、引き返す途上にその情報を口頭などにより伝えることができるとはいえ、必ずしも効率的とは言えない。

一方、既往の代表的な群知能システムである ACO (Ant Colony Optimization, 蟻コロニー最適化)は、蟻の往来歩行のプロセスにおいて、蟻が時間と共に消失するフェロモンを歩きながら塗布し、相対的にフェロモン濃度の高

い(消失量の少ない)経路に蟻が誘導されることで、「経路の最短化」が図られる。しかし、火災の「危険回避」を目的とした場合、危険を察知してもフェロモンの場合には、空間を隔てて危険を遡及的に他の蟻に伝える術がない。後藤ほか⁹⁾は建物内避難において危険時にフェロモンを打ち消しながら歩行することを提案しているが、広域避難の場合に対応可能な範囲は限定的と考える。

翻って近年の自律協調分散システムの社会利用¹⁰⁾の代表の一つブロックチェーン¹¹⁾は、図 8-2 に示すように、仮想通貨に対して改竄などの脅威の防御と正統性の維持に活用されている。多数の金銭取引をブロックの形でシステム参加者に公開し、ブロックを連結する形で取引の履歴が伸長していく。それによりブロックの様々な分岐が生じるが、矛盾や疑義のある分岐は相互検証と多数原理により淘汰され、結果として正統なチェーンが残る。

以上のような比較をまとめて表 1 に示す。両者のデータの物理的な意味は異なれども、不特定多数の参加者が信頼された共同のデータベースを作り上げ、運用する思想は通底する。そこで、火災情報とそこに至るまでの危険経路、あるいは逆に安全に避難所に至る経路を収集し、推奨すべき経路を分散協調的に浮かび上がらせる方法を提案する。これにより、不確実な限定情報の束を元に、より信頼性の高いレジリエントな誘導が可能と考える。

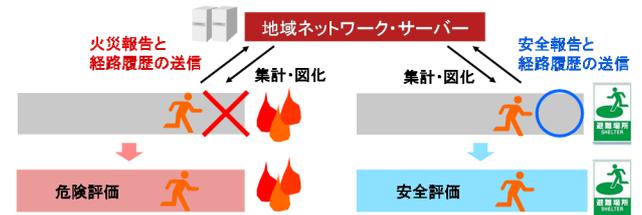


図 9 避難者とシステムの Interaction (経路履歴の送信とフィードバック)

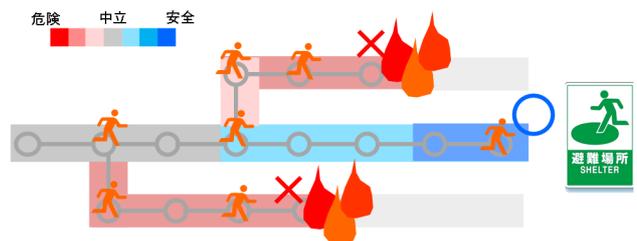


図 10 避難経路の危険度および安全度の評価

3.2 提案法の設計

本研究では、地域別のサーバーが情報を集計する役割を担うことを想定している^{注 2)}。ユーザーが用いるアプリケーション上の機能として、具体



図 11 ユーザーインターフェースのイメージ

的には図9に示すように、避難者の避難の道のをアプリケーション内に記憶しておき、避難者が火災に遭遇した場合にはその旨を簡単な押下動作でローカルな防災システムへ送信できるようにしておく。これによって、火災の位置のみならずそこに至る経路もバックグラウンドで送信する。一方、火災に遭遇せずに避難場所へ到達してきた避難者は、同じくシステムを用いて、安全に避難が完了した旨を送信する。この際に避難完了までの経路が送信されるようにする。以上のようにして、システム側では避難の危険、安全の情報が逐次収集されることになる。単一のユーザーからの情報は、経路も情報量も限定的であるが、それを重ね合わせていくことで、危険、安全な領域がシステム内で評価される。逆にその安全(危険)経路をアプリケーションにフィードバックすることで、ユーザーはより安全な経路を選択できるようになる。

まず初期条件として全ての経路上地点に±0の危険(安全)度の値を持たせ、危険経路情報を受信した場合にはその経路の危険度を1ポイント増大させ、逆に安全経路情報を受信した場合には安全度を1ポイント増大させることとした。危険、安全情報がオーバーラップした場合には、二つの情報は相殺する(正負逆符合の値を持つ)こととした^{註3)}。図10では、安全を青色に、危険を赤色に、各絶対値が増大するごとに色濃度が強まる表現としている。情報が集約、確度が可視化され、錯綜を防止するとともに、仮に不慮の誤情報が混入してもカバーされる。

ユーザーのインターフェースのイメージを図11に示す。拡張現実AR(Augmented Reality)を応用するコンセプト^{註4)}の下、安全経路を青色で、危険経路を赤色でアプリ画面内の映像上に重ね合わせるとともに、ユーザー側の通知ボタンとしては極めてシンプルなものとしている。

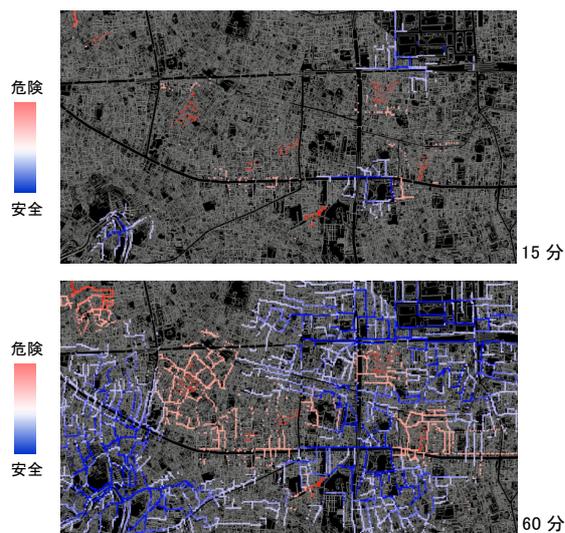


図12 経路の安全評価の発展(避難者非表示)

3.3 提案法を用いた場合のシミュレーション

モデルの仮定として、提案法による誘導を使用可能な

端末が2人に1人の割合で保有されているものとして、端末を保有するエージェントは、火災に遭遇した場合にはその旨を、安全に避難が完了した場合にはその旨をシステムに送信し、システム上で集計評価を行い、端末を所有したエージェントにフィードバックする。

経路の評価の様子をより明確にするため、エージェントを非表示として経路の評価を描画して、図12に示す。任意の経路を経たエージェントの経路履歴情報がチェーン的に統合されることにより、時間経過とともに、いずれの経路も赤または青に着色され、それらの領域がほぼ全域に向かって遡及的に広がり、ゾーニングがなされることが確認できる。これにより、後続者の避難がますます適正化されていく。

3.4 システムの事前最適化

人工知能をはじめとする知的システムは、災害時などの既存データが存在しない、または限定される領域に対しての適用性が課題となっている。避難シミュレーションのような評価技術は、そのような課題に対しての事前検討データの作成のためにも有用であると考えている。本研究では、基礎的な検討ではあるが、シミュレーションを用いた事前検討によって調整を行うことにより、システムの最適化を図ることができることを示したい。

前述の経路の安全評価のシステム上では、送信者となったユーザーが安全、危険いずれかに1人1ポイントを与えることとしていた。これは、「投票」のような制度を模倣した一つの原理としては明確ではあるが、工学的な意義を必ずしも一意に定められるものではない。工学的判断により、適切な安全度を取り入れたものとしてできるものとする。

安全側の1人1ポイントに対して、仮に危険側の報告に1人5ポイントの重み(以下、危険票の加重度)を与えた時の性状を図13に示す。加重度を高めると、全体として赤色の危険度評価は高くなり、その範囲も拡大して火災に接近する恐れは減少するが、それによって相対的に安全な経路の範囲も狭められ、迂回するケースも増えることになる。逆に、加重度を低下させた場合には、危険とされる地域も範囲も狭まるが、火災に遭遇する恐れは高まる。さらに、火災発生場所が異なった場合に対しても効果を担保するため、出火パターンを変えて比較評価を行った。ここでは、確率的な出火モデルの試行を図14に赤丸で模式的に示すように10パターン(図上では9パターン表現)、各々の加重度に対して行っている。

これらの検討を整理し、諸結果の関係を示すため、危険の重みづけを横軸に、火災遭遇率、避難完了率を縦軸にとり、図15に示す。前述したように、重みを増すにつれて、火災遭遇率が下に凸の曲線状に減少するとともに、避難完了率についても漸減し、それが徐々に減少率を増すような上に凸の性状となっている。避難完了率の変化

は、避難経路の狭窄がある度合いを超えると、避難場所への直線に近い経路が限定されるためと考えられる。避難完了者のうち火災に遭遇しなかった避難者数を評価して、危険度の加重度との関係を描き、図 16 に示す。グラフは、加重度 2 ないし 3 で極大となることがわかる。この値をベースに、適宜実働時にさらなる微調整による適応を図ることで、避難完了率を低下させることなく火災遭遇率を減少させることができると考える。

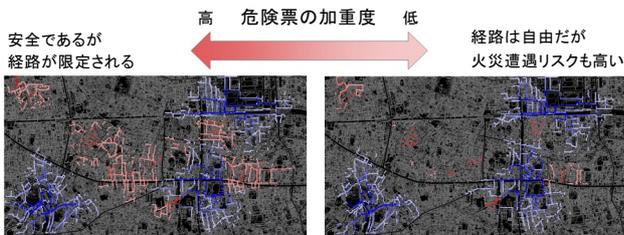


図 13 危険票の加重度の影響

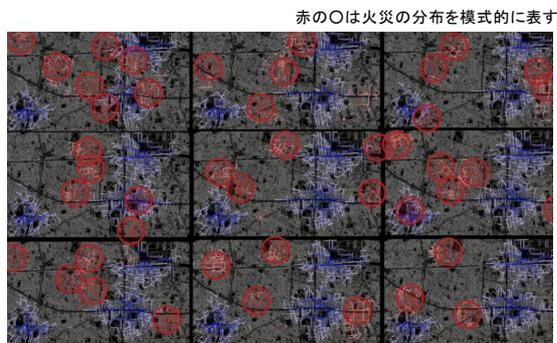


図 14 火災発生パターンと安全-危険のゾーニング

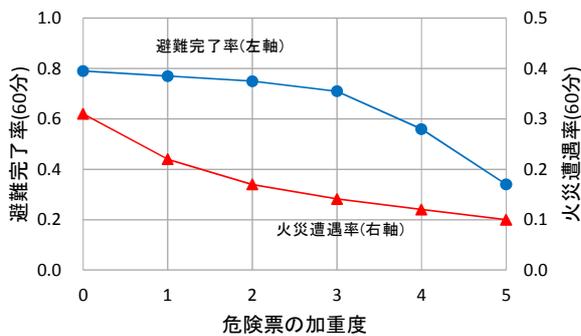


図 15 危険票加重度に対する避難完了率・火災遭遇率

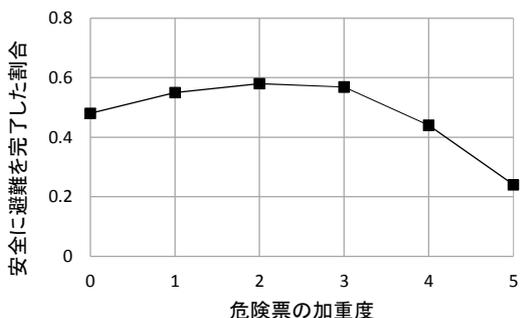


図 16 危険票加重度に対する安全な避難完了者の最大化

4. まとめ

本研究では、複雑な木造密集市街地における地震火災時の広域避難の火災遭遇リスク回避を目的とし、情報把握から経路導出に至るアルゴリズムにおけるブロックチェーンとの類似性に着目し、市民が主体となって連携し限定情報下での経路案内を可能とするレジリエントな自律協調分散システムの提案を行った。シミュレーション上において火災遭遇者減少の効果を確認するとともに、モデルを用いて、安全率の最適化のための基礎的検討を行った。提案法の実装と実証実験が今後の課題である。

【謝辞】 2名の査読者に貴重なご意見を頂きました。国土地理院の基盤地図情報を利用いたしました。記して謝意を示します。

【注】

- 注 1) 広域避難場所 3箇所は十分広く敷地としての安全度は概ね同等と仮定して、距離に関して重力モデルを援用して設定した。より一般化されたロジックモデルでは、避難先の敷地面積などの選好を考慮することが考えられる。
- 注 2) 本稿では市民の分散協調に主眼を置き、地域別サーバーを介して情報を集計することを想定しており、前述表 1 に示したように全世界分散のブロックチェーンと比較して、本研究の一地域のみを見た場合にはハードウェア側(およびそのシステム)は狭義の分散型アーキテクチャにはなっていない。地域間サーバーを連結し、大都市の超広域で分散型とすること、逆にごく小地域で端末間通信によって PtoP 分散アーキテクチャを構成することなど、構築方法は「避難」の想定範囲と組として議論する必要がある。
- 注 3) 「安全」と「危険」の相異なる情報が同一地点で報告された場合「後に報告された方が正である」とする時系列上の上書きの考え方もありうるが、本手法では情報の確度を重視し錯綜を防止する点から多数決原理とし、後述のように危険票に加重を与えることで安全にも配慮している。
- 注 4) 近年 AR によって、端末カメラ上で建物の像に建物情報(建物名や用途など)を重ね描く技術等が発達しており、災害時誘導にも、平常時の情報技術との融合が期待できる。

【参考文献】

- 1) 沖拓弥,大佛俊泰:住民による救助活動を組み込んだ大地震時における木密地域の広域避難シミュレーション分析, 日本建築学会計画系論文集, No.724,pp.1345-1353, 2016
- 2) Chanyang Lu, IEEE: Real-Time Wireless Sensor-Actuator Networks for Industrial Cyber-Physical Systems, Proceedings of the IEEE, Vol.104, No.5, 2016
- 3) 南貴久, 加藤孝明: MAS を用いた災害避難行動に与える SNS の効果と影響の考察, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.417-418, 2015
- 4) 室崎益輝: 市街地の難燃化と新延焼速度式に関する研究, 日本建築学会研究報告集, 第 22 号計画系, 1982
- 5) 斎藤崇, 鏡味洋史: マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション, 日本建築学会計画系論文集, No.597, pp.229-234, 2005
- 6) 熊谷兼太郎: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性, 国土交通省国総研研究報告 No.742, 2013
- 7) 上田遼: 行動特性に着目した津波避難の分析と対策 -人間と ICT の相互作用による安全避難の共創-, 日本地震工学会論文集, pp.140-169, 2017
- 8) 内閣府中央防災会議: 帰宅行動シミュレーション結果について, 首都直下地震避難対策等専門調査会資料, 2008
- 9) 後藤大貴, 太田飛鳥, 松澤智史, 滝本宗宏, 神林靖, 武田正之: 被災時避難誘導に向けたフェロモン調節による改良 ACO アルゴリズムの提案, 情報科学技術フォーラム 第 4 分冊, pp.65-70, 2015
- 10) 経済産業省: 次を見据えた新たな「自律・分散・協調」戦略, 産業構造審議会, 2016
- 11) ビットバンク, 馬淵邦美: ブロックチェーンの衝撃, 日経 BP 社, 2016

*1 富士通総研 経済研究所 上級研究員

Productive Chain of Safe Evacuation in Post Earthquake Fire

Autonomous coordinated distribution system by citizens

○Ryo UEDA*¹

Keywords: Multi-Agent, Autonomous Coordinated Distribution System,
Block Chain, Augmented Reality

The probability of the occurrence of an earthquake immediately under the capital (Tokyo Inland Earthquake) has been calculated to be tremendously high, and the magnitude of the damage and impacts mean that addressing this possibility is an urgent social issue. When a Tokyo Inland Earthquake occurs, it is projected that multiple fires will break out at the same time, mainly in areas with a high concentration of wooden structures, and a high number of casualties is projected. Therefore, it is crucial for affected individuals to safely complete evacuation while avoiding areas where there is a fire encounter risk. Furthermore, in research area, complicated and skewed road pass will obstruct quick evacuation, where former guidance method indicating direction might be not effective. Therefore detailed autonomous guidance for proper safe route is necessary.

In trend of information technology of these days, autonomous coordinated system is developed mainly for management or economical issue taking advantage of its robustness. Block chain for electrical money is one of the most famous and predominant examples. Through it, transaction of buy-and-sell are opened and everyone can make transaction history. Righteousness is evaluated by crosscheck and unfit branch is eliminated against falsification. Author insist this algorithm can be used for coordinate safe evacuation route.

In this research, a multi-agent simulation was executed with the goal of proposing a safe evacuation guidance method in the event of multiple simultaneous fires following a Tokyo Inland Earthquake.

When natural disasters strike, the ability of affected individuals to access information is limited, even as it becomes vital to manage large-scale evacuations. Information regarding the break-out of fires is grasped on the local level – it is information that residents in the area at the time have witnessed or encountered for themselves. In addition, residents rely on municipalities for information and guidance related to evacuation. Also, by guiding residents in evacuation procedures, local governments can collect the on-the-ground information local people have, thereby making judgements on evacuation routes. The mediation of information focusing on these interdependencies is considered to be important in this process.

After several foundational considerations, and after discussing the trade-off between minimizing evacuation time and avoiding fire, a smartphone application through which residents can easily report the location of fire outbreaks, thereby evaluating safe evacuation areas and routes, and an autonomous coordinated distribution system, which feeds information back to residents, eliminating dangerous evacuation routes, is proposed. The effect of proposed system is basically evaluated multi-agent simulation, and expansion of zoning of safe route is demonstrated. Also proper parameter for safety factor is determined considering balance between safety and freeness of walk. Through such a system, it is believed that citizens can co-create safe evacuation routes and report unsafe areas through the evacuation process. Based on this research, Author plan to further discuss ICT as a medium for enhancing the resilience of both citizens and society.

*1 Senior Research Associate, Economic Research Center, Fujitsu Research Institute.