

論文審査の結果の要旨

氏名：野 本 秀 樹

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：機能共鳴分析手法（FRAM）を用いた不特定多数の人工知能エージェントによる自由行動の安全化に関する研究

審査委員：（主査） 教授 高 橋 聖
（副査） 教授 細 野 裕 行 特任教授 泉 隆
元教授 中 村 英 夫

IoT（Internet of Things）や人工知能という、新しい技術が自動システムに導入されつつある。現在、システムの安全性評価に対しては、IEC61508 や ISO26262 などの国際規格にしたがって行うこととされている。これらの規格はいずれもソフトウェアを用いて構成されるシステムを対象としているが、ソフトウェアの安全性評価にはFTA（Fault Tree Analysis）やFMEA（Failure Mode and Effect Analysis）と呼ばれる解析手法の利用が前提とされている。しかし、「故障モード」に相当するソフトウェアの「仕様誤り」の出方は千差万別であり、FMEAにおいても、どのような故障（バグ）からスタートすべきかを考えると実態との乖離が大きい。同様にFTAにおいても、障害に対する根源事象をソフトウェアの故障（バグ）に結びつけることの困難さが指摘されている。これらに対し、Nancy G. Levesonは、プログラムが正しくてもシステムの障害は起こり得ることを実証し、むしろ構成要素間のインタフェースに着目した解析のほうが有効であるとの主張を展開し、その手法をSTAMP（Systems Theoretic Accident Model and Process）として取りまとめ有効性が評価されている。

一方、本論文が対象としている「不特定多数の人工知能エージェントが自由行動するシステム（マルチエージェントシステム）」に対しては、システムのモデル化も困難なほか、安全性や安定性を評価する方法もないといった困難な課題がある。特に自動車の自動運転が混在走行する場合や、多くのロボットが人間とともに共存するような状況を考えた場合、マルチエージェントシステムのモデル化や安全性の評価に対する研究が待たれている。このような課題に対し、提出者は、Erik Hollnagelが提唱するレジリエンス・エンジニアリングの一手法である、機能共鳴分析手法FRAM（Functional Resonance Analysis Method）に着目し、マルチエージェントシステムのモデル化およびシミュレーションを通して、その安全化の要因を明らかにした。

マルチエージェントシステムの安全化という目的のために、提出者は、実際に存在するマルチエージェントシステムのモデルとして、東京駅コンコースにおける利用者の自由歩行が、どのような仕組みで安全に行われているのかをFRAMモデルを用いて分析した。分析の結果、安全が達成される成功要因として、トップダウン的制御や制約、ルールなどではなく、利用者それぞれが自律的に自分専用の戦術を作り上げており、その異なる戦術がシステム全体としては協調的に働いていることを見出した。さらに、リスク要因も識別しており、このリスク要因を最小化するための方策が、現在の東京駅の安全化策に既に反映されていることを示した。そして提出者は、FRAMモデルの妥当性検証のため、モデルから作成したシミュレータで検証も行っている。その結果、安全であればあるほど経済性が高まるという性質を東京駅コンコースは有しており、従来の制御系システムの安全設計では実現が困難な長所を持つことも明らかにした。

提出者の申請論文は、マルチエージェントシステムの安全化を論じたものである。以上のように、本研究は社会に与える影響も、また、技術領域での水準も高いものであるが、以下、論文の章立てに沿って審査の内容を報告する。

論文は、第1章の序論から第6章の結論に至る全6章から構成されている。

第1章は、序論であり、本研究の背景や位置づけ、目的および概要がわかりやすく説明されている。そして、本研究で分析対象とした東京駅コンコースの特徴を示すことで、本研究の課題を明確に浮き上がらせている。

第2章は、従来の安全解析手法の問題点と新しい安全解析手法について述べている。従来の安全解析手法としてドミノ・モデルおよびFTAを説明し、これらの従来手法がソフトウェアの安全解析には適していないことを論じている。

次に新しい安全解析手法として、まずSTAMPモデルについて述べ、このモデルを使った安全解析のプロセスをわかりやすく説明している。STAMPモデルは、事故は故障以外からでも起こるとした従来の安全工学を拡張した概念で、次に述べるFRAMモデルと合わせて、本研究で扱う安全解析手法として重要なものである。次に提案者は、本研究の対象としているマルチエージェントシステムでは、STAMPモデルでも解決できない課題があることを論じ、その課題を具体的に示している。STAMPモデルでの課題を明確に論じたことは、FRAMモデルを使うことの妥当性を裏付けた点で評価できる。

そして提案者は、STAMPモデルでの課題を解決するため、近年提唱され始めているレジリエンス・エンジニアリングの一手法であるFRAMモデルについて説明している。FRAMモデルの概念を丁寧にわかりやすく述べており、特にFRAMモデルの特徴である、事故の失敗要因からだけでなく、成功要因の分析による安全解析を行うという重要な概念を説明している。

本章は、事故モデルの変遷をまとめることで、本研究でFRAMモデルを採用したことの根拠を明確に示す役割を果たしている点で評価できる。

第3章は、不特定多数の人工知能エージェントが自由行動するシステムとして東京駅コンコースを取り上げ、これに対するFRAM分析について述べている。本章の冒頭で、東京駅コンコースにおける安全状態を明確に定義しており、東京駅コンコースの安全を論じる上での基礎を的確に与えている。

論文ではまず、FRAMモデルの作成を行っている。東京駅コンコースの様々な機能のうち、その安全を分析する上で最も注目すべき機能として「歩く」を取り上げ、FRAMモデルの作成のプロセスをわかりやすく説明している。

次に、完成したFRAMモデルの分析を行っている。分析の結果、東京駅コンコースのFRAMモデルが、4つの層に分割された構造的特徴を有していることを見出している。すなわち、(1)戦略層、(2)戦術層、(3)監視層、(4)制御層である。提出者は、これらの各層間の関係を分析するために、FRAMモデルをSTAMPモデルに写像するという独自の視点を導入している。その結果、各層間の関係が単なるController/Controlled-Process間の上下関係とは異なっているという分析結果が明らかとなり、東京駅の安全をもたらしている要因を明らかにすることができたことは高く評価できる。FRAM分析は、これまでシステムの機能や事故の状況を表現することまでで留まっており、安全性の分析や解析にまで発展させた事例はなく、今後の研究が待たれていた。これに対し提出者は、FRAM分析によって明らかになったシステムの機能関係性を、一旦STAMPの制御構造図的なController/Controlled-Process間のヒエラルキーに当てはめ、STAMPモデルとFRAMモデルのハイブリッド的な手法を発想して適用した。このことは提出者の独創性の高さを示すものとして高く評価できる。

本章の分析結果のまとめでは、本研究の結論となる、東京駅コンコースの安全性に関する「成功要因」および「リスク要因」を簡潔に述べている。

第4章は、前章で分析したFRAMモデルの妥当性を検証するためのシミュレーションについて述べている。モデルから生成したシミュレータには種々の条件が設定可能である。論文では、これらの条件の中から、歩行者モデルが次の一步を踏み出せるかどうかの条件であるFree Spaceをしきい値(Minimum Distance)としてシミュレーションを行っている。その結果、本研究の結論となる重要な知見を得ている。すなわち、Minimum Distanceが1のケースのような安定した系の性質が見られる領域では、系の安全性と経済性は強い相関を有しており、安全であればあるほど経済的になるという好循環が、東京駅コンコースの特徴となっていることを明らかにした。このような特徴は、従来の制御系システムの安全設計では実現が困難な長所であり、「先天的安全性」、あるいは「本質安全性」と呼べる優れた性質をシステムが備えていることを明らかにしたことは、画期的な成果として高く評価できる。

第5章は、対象システムの安全化に関する考察について述べている。論文では、本研究の分析と強く関連している「Safety 2」および「Safety 2.0」の概念との高い親和性を有していることや、分析結果に対する将来展望および今後の課題についても言及しており、本研究の意義を包括的に論じている章として評価できる。

第6章は、論文の結論であり、提出者の行った研究の成果や今後の展望を述べている。

提出者の研究は、今後急速な技術進歩が予測されるロボットや自動車の自動運転といった自律したエージェントが、安全性を損なうことなく共存できるための分析手法の確立を意図したものである。本研究の成果は、安全理論が単に安全な社会作りに貢献するだけでなく、経済発展にも貢献するという、新しいパラダイムを作るきっかけとなり得る可能性も持っているものと評価できる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成30年10月18日