

審査の結果の要旨

氏 名 土井 裕介

本論文は、「分散システム上のオブジェクトトレーサビリティに関する研究」と題して、複数の要素から成る分散システムにおける障害発見および対処を目的として、要素間の相互作用の記録とトレースについての提案と評価を行ったもので、8章から成る。

社会インフラにおいて情報システム・ネットワーク技術による拡張・自律制御・最適化などを実施し、利便性・経済性・環境適合性・その他各種効率を高めるための試みが多数行われている。こういったシステムは、主に投資コストの効率的な回収と、新規アプリケーションの参入障壁の低減のために、個別の応用に向けたシステムから共通プラットフォーム化され、相互運用されることが期待されている。一方で、複数の管理ドメイン(事業主体あるいは設備管理者など)により管理されるシステムの複合体において、管理ドメインをまたがるトラブル発見・解決、という新しい課題を解決しなければならない。本論文では、この課題に対して、分散システム上で交換される情報(トレース対象)のトレースをグラフによりモデル化し、グラフをDNSを用いて分散管理することによる解決を提案している。

第1章「背景」は、社会インフラにおけるネットワーク技術への期待を述べた上で、これらがプラットフォーム化し、相互運用・相互乗り入れを行う段になるとトラブル(センサ故障による異常値など)発生時の原因追求および波及範囲の判定が困難になるとしている。トラブル発生時の復旧を早めるために、分散システム上のできごとに対して何が影響を与えるのか、また発見されたトラブル原因がどの程度の範囲に影響を与えた可能性があるのか、といった情報を算出する必要があり、本論文ではこの算出が可能である特性を「トレーサビリティ」と位置付けている。その上で、トレーサビリティに対する要件として次の4つを挙げている。(1)トレースバック(結果から原因へのトレース)とトレースフォワード(原因から結果へのトレース)の両方が実現できる、(2)多様なシステム・アプリケーション上のできごとをトレースできる、(3)小規模から大規模まで円滑に取り扱える(規模拡張性)、(4)汎用のクライアントからアクセスが可能である。

第2章「関連研究」では、システム上のできごとのトレースに関係する研究、ならびに本研究で取り扱う技術の研究について述べている。トレーサビリティの定義の一つとして、品質保証のためのISO9000についてまとめた上で、既存の物流系の研究と、データ来歴に関する研究を比較対象として挙げている。また、本研究はトレースのために必要な情報の「共通ログ」を分散インデックス・ストレージとしてどう構築するか、という部分に帰着する。そのため、既存の分散インデックス・ストレージとしてDHTとDNSを比較対象として挙げている。

第3章から第5章が本論文の提案内容である。第3章では、「トレーサビリティ」と題して、本論文で取り扱うトレーサビリティの概念設計を行っている。システムの構成要素を「トレース主体」と「トレース対象」に二分し、「トレース主体による一つまたは複数のトレース対象の操作」と「トレース対象を介したトレース主体間のやりとり」の二つの操作をトレース対象としている。その上で、トレーサビリティを実現するための情報モデルを、トレース対象を節とし、トレース対象同士の関係を弧としたグラフの形で定義し、このグラフに基づくモデルをシステム間で共有する。その上で、グラフの操作について論じている。

第4章は、「トレーサビリティのための識別子解決」と題し、トレース情報を記録する共通ストレージにおいて、多様性と規模拡張性を両立させる分散インデックスの設計について論じている。管理ドメインの異

なるシステム間についてそれぞれの管理ドメイン下にてトレーサビリティの情報を管理するため、インデックス空間に DNS にもとづく木構造のインデックスを用意し、共通のインターフェイスを保ちつつ実装を切り替える。一方、トレース対象 ID の解決に必要となる規模拡張性については、ハッシュ構造のインデックスを用意することで実現できる。その上で、ボトルネックなしにこれらを結合するために、DHT に DNS のインターフェイスを持たせ、各々の DHT ノードに DNS の名前空間権限を付与することができる、DHT-DNS マウンタを実装している。

第 5 章は、「トレース情報の維持管理」と題し、トレース情報維持管理のためのコストを低減させるための方式を提案している。通常、DHT 上のデータの維持管理にはソフトステート方式を利用するが、データ量が大きくなることが期待される本応用においてソフトステート方式の利用は困難である。そこで、本論文では、DHT 側で欠損したデータ領域を検出し、その領域のデータのみを再度各クライアントがアップロードする方式を提案している。欠損領域の通知は DHT 自身をブロードキャストメディアとして利用し、同時に、DHT 側のインデックス構造にあわせた形式でトレース主体側からのアップロードを行わせる。この方式により、DHT 側でデータ維持管理のためのコストを低減させることが期待できる。

第 6 章において、提案方式の評価を行っている。第 4 章で提案したトレーサビリティのための識別子解決方式について、都市圏におけるゲリラ豪雨の観測を例題としセンサ数を見積り、そのセンサ情報に関連するトレース情報を 1 年分蓄積するためのインデックスシステムの性能推定とスケーラビリティ評価を行っている。個々の要素についての性能測定と、StarBED クラスタなどにおいて実行したデータを元に、大規模化した際の性能を見積っている。あわせて、第 5 章で提案したトレース情報の維持管理方式について、ソフトステート方式との比較を行い、DHT ノードの故障率が低ければ提案方式のほうがよりトラフィック量が抑えられ、コスト低減につながることを示している。

第 7 章において、本論文で議論した内容に関連する内容について議論を行っている。ひとつはトレース情報のサイズがシステムの稼働時間に対して線形に増大する問題についてであり、グラフ縮約によるデータ量圧縮の可能性を検討している。もうひとつは動的な Publish-Subscribe モデルに基づくシステムに対する提案方式の最適化について議論している。その上で、第 9 章において本論文の貢献についてまとめ、また、それが Internet-of-Things やスマートグリッドなどといった技術において信頼性向上のために果たす役割について触れている。

以上を要するに、本論文は、将来の社会インフラを情報システムにより制御・最適化する際のトレーサビリティにおける課題を総合的に分析した上で、多様な社会インフラシステムにおける共通課題としてのトレーサビリティを定義し、トレーサビリティの問題の必須構成要素となる実現可能なアーキテクチャを示しており、情報理工学における創造的実践の観点で価値が認められる。

よって、本論文は、博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。