

# 博士請求論文審査要旨

情報セキュリティ大学院大学

情報セキュリティ研究科

論文題目 : ダークウェブハイパーリンクグラフの時系列視覚化による  
ダークウェブネットワークの変化の理解

申請者 : 青木 太一

審査委員会 : 主査 教授 後藤 厚宏  
副査 教授 大久保 隆夫  
副査 教授 松井 俊浩  
副査 教授 (東京大学) 豊田 正史

## I. 論文内容の要旨

ダークウェブを理解することは、さまざまなサイバーセキュリティ戦略の検討に役立つ。たとえば、ダークウェブで取り交わされる脅威の傾向を知ることが出来れば、企業や政府がサイバーセキュリティ上の防衛手段の適切さを検討する指標が得られる。

本研究の成果であるダークウェブハイパーリンクグラフの時系列視覚化は、大規模で複雑なダークウェブネットワークがどのように変化してきたかを直感的に理解することを可能とし、今後のサイバーセキュリティ対策について様々な洞察を得るための手段として役に立つ。本研究の貢献は、ダークウェブから大局的な視点で変化についての洞察を得るための視覚化による手段を提供したことである。

本論文は6つの章と付録からなる。

第1章では、ここ数年間にダークウェブに関連して発生したいくつかの重要なセキュリティ事案を通して本研究の背景を示した上で、従来研究の外観と本研究の目的について述べている。

第2章では、倫理について記載している。本研究は、サイバー空間及び国や社会の安全と安定の確保を目的として行われ、法執行機関の協力を得て、技術的な安全性以外にも、適法性及び倫理について細心の注意を払った上で実施された。また、本論文でのダークウェブの詳細な記述は必要最小限となっている。

第3章では、Tor ネットワークを対象とするダークウェブの探索について述べられている。本研究では、2018年6月1日から2021年1月30日までの約2年8カ月の期間において、25,270,157ページのhtmlテキストファイルを収集し、収集した全データを180日間隔のスナップショットに分け、それらのスナップショットについてテキスト間の差分を取る処理を行い、ダークウェブ全体の時系列変化を視覚化している。視覚化による分析結果として、ダークウェブにおけるドメインの生存期間が、ワールドワイドウェブのドメインの生存期間と比べて著しく短い(1.5%~2.3%)ことなど、ダークウェブの特性についての重要な知見が示されている。

第4章では、ダークウェブハイパーリンクグラフの時系列視覚化について述べている。第3章で作成し

たスナップショットの有向グラフデータを“ばねモデル”を用いて視覚化したことにより、ダークウェブ構造の時系列変化を分析できるようにした意義は大きい。一例としては、ダークウェブにおける情報検索手段が、リンク集から検索エンジンへと徐々に変化している様子などが明らかにできている。また、視覚化結果を、ネットワークグラフの代表的な中心性指標と比較し、中心性指標からは見出しにくい領域を発見することにも貢献している。

第5章では、ダークウェブネットワークの大きさ（ノード数）の推定について述べている。ダークウェブの大きさを求めることは一般的に困難であるが、本研究では Peterson による標識再捕獲法を用いてダークウェブの大きさの推定することに成功している。Peterson による標識再捕獲法は個体群生態学の分野で野生動植物の個体数の推定を行う場合にしばしば使用される手法であり、本手法の適用したネットワークの大きさを推定していることは新しい。本研究の推定では、観測期間中のさまざまな時点で32回の測定を行い、ダークウェブの大きさは14,509から96,034であり、データセット全体の推定値平均は40,848であるとの推定値が示している。

第6章では、本研究が、ダークウェブという巨大なネットワークがどのように動き、変化してきたかを描写し、過去と現在のダークウェブの姿、そして将来のダークウェブの変化についての洞察を得るための手段を提供できたと結論付けている。

## II. 論文審査結果の要旨

ダークウェブネットワークは巨大で複雑で流動的であるため、ダークウェブの全てを瞬時にとらえることは困難であり、ダークウェブの状態を理解することは簡単ではない。このため本研究が視覚的にダークウェブの変化を示すまで、ダークウェブがどのように変化してきたかを知る手段は無かった。

本研究で示した視覚化は、ダークウェブという巨大なネットワークがどのように動き、変化してきたかを描写し、過去と現在のダークウェブの姿、そして将来のダークウェブの変化についての洞察を得るための貴重な知見と手段を提供しており、これらの研究成果による情報学への貢献は大変大きく、本論文は、博士（情報学）の論文として合格と認められる。

## III. 審査経過

本審査委員会は、2022年1月14日に論文内容とこれに関連する事項について口述試問を行い、その後、2022年2月5日にこれに関連する事項の最終試験審査を行った。審査に当たっては、博士学位のディプロマ・ポリシーに基づいて総合的に評価し、申請者が学位取得にふさわしい知見を持つものと判断した。