

東京大学
情報理工学系研究科 電子情報学専攻
修士論文

Fuga: ランサムウェアからリアクティブに
データを保護するシステムの設計と実装

Fuga: Design and Implementation of
Reactive Data Protection System against Ransomware

48-236427

手塚 尚哉

Naoya Tezuka

指導教員 落合秀也 准教授

2025 年 1 月

概要

ランサムウェアの脅威に対応するためには、ランサムウェアの活動を迅速に検知して被害の拡大を防ぐだけでなく、仮に被害を受けた場合でもデータを復旧することができる手法が必要となる。定期的なスナップショットによる復旧は一般的な手法だが、バックアップの粒度の粗さから頻繁な取得は難しく、その結果データ損失が発生するおそれがある。本研究ではランサムウェアのファイル侵害の直前にデータを隔離領域へ退避させることでデータ復旧を実現するシステム Fuga を提案する。Fuga はファイル単位のバックアップをリアクティブに取得することでスナップショット方式の課題を克服し、誤検知時のコストも軽減する。本稿では Fuga の設計を行い、ランサムウェアのファイル侵害方法に応じた実装方針を示した。さらに eBPF を用いた実装を行い、様々なファイルサイズにおけるデータ保護性能とオーバーヘッドを評価した。これにより、ランサムウェアからデータを保護するシステムとして Fuga が実用的であることを示した。

Abstract

To address the threat of ransomware, it is essential not only to detect ransomware activities quickly to prevent further damage, but also to have methods for recovering data in case the attack succeeds. While recovery using periodic snapshots is a common approach, their coarse granularity makes frequent backups impractical, increasing the risk of data loss. In this study, we propose Fuga, a system that ensures data recovery by evacuating data to an isolated storage area just before ransomware compromises files. Fuga reactively performs file-level backups, addressing the limitations of snapshot-based approaches while reducing the cost of false positives. We presented the design of Fuga and its implementation strategies tailored to different methods of ransomware file compromise. Furthermore, we implemented Fuga using eBPF, and evaluated its data protection performance and overhead across various file sizes. We conducted evaluation experiments. The results demonstrate that Fuga is effective and practical as a data protection system against ransomware.

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	ランサムウェア	2
2.1	概要	2
2.2	ランサムウェアの分類	3
2.3	ランサムウェアの影響	6
2.4	主要なランサムウェアインシデント	8
第 3 章	ランサムウェア対策	11
3.1	感染リスクの緩和	11
3.2	ランサムウェア検知	11
3.3	ランサムウェア被害からの復旧	13
第 4 章	Fuga: 提案手法のアプローチ	16
第 5 章	Fuga の設計	17
第 6 章	Fuga の実装	18
6.1	各コンポーネントの実装	18
発表文献と研究活動		20
参考文献		21
付録 A	eBPF	27
A.1	歴史的背景	27
A.2	eBPF のアーキテクチャ	28

2.1	Development of major ransomware families (1989–2021). The first know ransomware, AIDS Trojan, was introduced in 1989. [1].	3
2.2	Breakdown of encryption algorithms used by major ransomware families (1989–2021). [2]	5
2.3	The outcomes of ransomware attacks based on whether victims paid the ransom and the success rate of data recovery. [3]	7
2.4	Recovery costs from the most severe ransomware attacks in 2023 and 2024. The cost includes downtime, labor, device and network costs, and lost revenue. [4]	8
2.5	A post by BlackSuit detailing their alleged access to KADOKAWA’ s networks, encryption of the infrastructure, and theft of 1.5TB of data. [5]	10
3.1	Overview of each stage in MITRE ATT&CK framework. Some stages such as Reconnaissance are omitted for simplicity. [6]	12
3.2	Overview of PayBreak. [7]	14
3.3	On the right ShieldFS shadowing a file offended by ransomware malicious write (MW), in comparison to standard filesystems (on the left). [8] . . .	15
A.1	Overview of eBPF system. [9]	28

表目次

3.1	Techniques for Initial Access and general countermeasures	12
6.1	Implementation environment for Fuga.	18

第1章

序論

これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。

これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。

これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。

これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。

これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。これは、序論の文章である。

参考文献を引用してみる [?, ?]. もうひとつ引用する [?]. 日本語の文献 [?, ?] も引用する。創造情報学専攻のウェブページを引用する [?].

第 2 章

ランサムウェア

2.1 概要

ランサムウェアとはマルウェアの一種であり、攻撃者が要求した金額が支払われるまで、システムやデータへのアクセスを制限する。言い換えると、データや計算資源、サービスなどのリソースを人質に取って被害者を脅迫することで身代金を要求するマルウェアがランサムウェアである。

ランサムウェアはリソースへのアクセスを制限する方法に基づいて暗号化ランサムウェアとロッカーランサムウェアに分類される [10]。暗号化ランサムウェアは感染先ホストのファイルやデータを暗号化し、元のファイルを削除または上書きする。ロッカーランサムウェアは暗号化を行わず、デスクトップのスクリーンやブラウザをロックすることで被害者がシステムを利用できないようにする。本研究は暗号化ランサムウェアを対象としているため、本稿では暗号化ランサムウェアを単に「ランサムウェア」と呼ぶことにする。

図 2.1 に示すように、AIDS Trojan [11] は 1989 年に最初のランサムウェアとして登場した。AIDS Trojan は被害者に郵送されたフロッピーディスクを介して感染し、Windows システムを対象としていた。その後インターネットの普及に伴い、ランサムウェアによる被害が増加し始めた。2005 年に登場した GPCode [12] はフィッシングメールを介して感染し、独自の暗号化アルゴリズムによってファイルを暗号化した。

現代のランサムウェアはますます高度化している。ランサムウェアの進化における重要な要素を以下に列挙する。

- AES などの対称鍵暗号化アルゴリズムや RSA、楕円曲線暗号などの非対称鍵暗号化アルゴリズムを使用して暗号化を行うようになっている [1]。これにより、復号鍵を入手することができなければデータの復号はほぼ不可能となった。
- Windows だけでなく、Linux, macOS, Android などの他の OS を対象としたランサムウェアも登場するようになった。
- ビットコインに代表される仮想通貨が普及したことで身代金の支払いが匿名で行えるようになり、攻撃者の特定が難しくなった。



図 2.1. Development of major ransomware families (1989–2021). The first know ransomware, AIDS Trojan, was introduced in 1989. [1].

- ランサムウェアの開発と配布を有料で行うサービスである Ransomware as a Service (RaaS) が登場し、専門知識が無くとも容易に攻撃を実施することができるようになった。
- 無差別的な攻撃から、特定の高価値な組織 (政府機関や大企業など) を対象とした高度な攻撃に移行しつつある [13].

2.2 ランサムウェアの分類

2.2.1 悪意ある振る舞いに基づく分類

2.1 節で述べたように、ランサムウェアは被害者が身代金を支払うまでリソースへのアクセスを制限するが、アクセスを制限する方法には多様性が見られる。本稿では Oz らの分類 [1] を参照し、その方法として暗号化、データ破壊、データ窃取を扱う。

暗号化：ランサムウェアは暗号化鍵を用いてデータを暗号化し、元のデータを削除するか、暗号化後のデータで上書きする。この時使用する鍵はランサムウェアの実行ファイルに埋め込まれているか、感染先ホスト上で生成されるか、C2 サーバとの通信から取得されるかのいずれかである。ファイルを暗号化するランサムウェアの中には、暗号化の対象とするファイルを限定するものも存在する。例えば CTB-Locker [14] は、被害者にとってより高価値なファイルのみを暗号化するために、.pdf や.zip などの拡張子を持つファイルを暗号化対象としている。また、Jigsaw [15] は 10MB 以下のファイルのみを暗号化する。このように、ランサムウェアの一部は暗号化の対象とするファイルを限定することで、ランサムウェアの活動が検出されるリスクを緩和している [16] と考えられる。

データ破壊：破壊活動を目的としているがランサムウェアに擬態して攻撃者の意図を隠蔽しようとするマルウェアが確認されている。例えば、2017 年に発見された NotPetya [17] は、ハードディスク全体を暗号化した後、ビットコインの送金先として無効なアドレスを提示していた。このアドレスはランダムに生成されており、攻撃者が金銭を回収する意図がないことから、NotPetya は破壊活動を目的として作成されたと考えられる [17]。同様の攻撃として、暗

4 第2章 ランサムウェア

号化を行わず、ランダムなデータでファイルを上書きするマルウェアを作成し使用することも可能である。なお、このタイプのマルウェアの被害者は身代金を支払ってもリソースを復旧することができないが、本研究ではランサムウェアとして扱う。

データ窃取：ランサムウェアは機密文書や顧客の個人情報などの重要データを摂取する可能性がある。データの暗号化または破壊とデータの窃取を組み合わせる脅迫を行うランサムウェアを「二重脅迫ランサムウェア」と呼ぶ。二重脅迫ランサムウェアは、データの復旧のために一回、窃取したデータの公開を防ぐためにもう一回、被害者に身代金を要求する。二重脅迫ランサムウェアによる被害は近年増加しており、SOPHOS 社が発表したレポート [4] によると、2023 年に発生したランサムウェアインシデントのうち 32% においてデータの摂取も発生している。加えて、データの窃取のみによって脅迫を行う「ノーウェアランサム」[18] と呼ばれる手法も確認されている。

2.2.2 暗号化アルゴリズムに基づく分類

データを暗号化するランサムウェアは、ISO/IEC [19] などの標準化団体が採択した標準的なアルゴリズムを使用する場合と、攻撃者によって独自に設計された暗号化アルゴリズムを使用する場合がある。Begovic ら [2] が調査した、1991 年から 2021 年までに確認された著名なランサムウェア変種の暗号化アルゴリズムの使用状況を図 2.2 に示す。図 2.2 によると 8.2% のランサムウェアが独自の暗号化アルゴリズムを使用しているが、近年のランサムウェアは AES や RSA といった標準的な暗号化アルゴリズムを使用する傾向が強いことがいくつかの先行研究 [1, 20] にて指摘されており、この数値には初期のランサムウェアが多く含まれていると考えられる。より具体的には、攻撃者が独自に設計した暗号化アルゴリズムは強度が不十分で暗号解読者による解読が容易であることが多い [20] ため、2000 年代後半から 2010 年代前半にかけて、十分に評価され強度が高い暗号化アルゴリズムが採用されるようになっていった [1]。

ランサムウェアは**対称鍵暗号化**、**非対称鍵暗号化**、**ハイブリッド暗号化**のいずれかの暗号化技術を採用することができる。

対称鍵暗号化：対称鍵暗号化では、暗号化と復号のために 1 つの鍵のみが使用される。非対称鍵暗号化よりも高速に暗号化を行うことができるが、被害者が鍵を入手してファイルを復号することができる可能性がある。例えば、PayBreak [7] は、暗号化機能を提供する Windows API の関数をフックして暗号化に使用される共通鍵を取得することで復号を可能にしている。そのため攻撃者は、鍵が被害者からアクセスできないようにする必要がある。図 2.2 より、ランサムウェアが採用する対称鍵暗号化アルゴリズムとしては AES が最も人気であることがわかる。

非対称鍵暗号化：非対称鍵暗号化では、暗号化鍵（公開鍵）と復号鍵（秘密鍵）の 2 つの鍵が使用される。被害者が公開鍵を入手しても暗号化されたデータを復号することはできないため、対称鍵暗号化に比べて暗号化速度は劣るが、暗号化鍵の保護を行う必要がない。常に同一の鍵ペアを使用する場合、一度秘密鍵が漏洩（または、ある被害者が身代金を支払って秘密鍵を取



図 2.2. Breakdown of encryption algorithms used by major ransomware families (1989-2021). [2]

得)すると、その鍵ペアで暗号化されたデータは全て解読可能となる。そのため CryptoLocker [21] などの一部のランサムウェアは、被害者ごとに異なる鍵ペアを生成する戦略を採用している。RSA が最も頻繁に、楕円曲線暗号が次いで使用されていることが図 2.2 よりわかる。ハイブリッド暗号化：ハイブリッド暗号化では、対称鍵暗号を用いてデータを暗号化した後、その暗号化鍵を非対称鍵暗号化アルゴリズムを用いて暗号化する。これにより大量のデータの暗号化を効率よく実行しつつ、対称鍵暗号化における問題点であった鍵の保護を解決することができる。近年の著名なランサムウェアはハイブリッド暗号化を採用しているものが非常に多い [2]。代表例としては WannaCry [22] や CTBLocker [14] が挙げられる。

2.2.3 暗号化の対象に基づく分類

ランサムウェアは OS 上でユーザが扱うデータファイル (e.g. .docx, .xlsx, .jpg) を暗号化することが一般的であるが、ファイル以外の単位で暗号化を行うランサムウェアも存在する。Mamba [23] はハードディスク全体を暗号化したのちマスターブートレコード (MBR) を書き換えて OS の正常な起動を阻害し、OS 起動時にランサムノートが表示されるようにする。また、Petya [23] は Windows システムのマスターファイルテーブル (MFT) ^{*1}を暗号化することでファイルのアクセスを不可能にする。DarkSide [24] ランサムウェアは VMWare ESXi [25] のホストマシン上で実行される。DarkSide は実行中の仮想マシン (VM) を強制終了させ、VM の仮想ディスクなどの関連ファイルを暗号化する。これらのファイルは、典型的には /vmfs/volumes ディレクトリ以下のファイルであるが、仮想マシンからは認識できない。

今日のクラウドサービスの隆盛に伴い、クラウド環境を対象としたランサムウェア攻撃が

^{*1} MFT は Windows システム内に存在するファイルの物理的な位置、ファイル名、作成者などのメタデータを管理するデータ構造である。

6 第2章 ランサムウェア

増加している。ALIBABA Cloud の仮想ストレージサービスは 2023 年の第三四半期のみで 1000 件以上の被害報告をユーザから受けており、2021 年と比較して 118% の増加率を示している [26]。さらに Zscaler 社は、クラウドサービスやクラウド上のワークフローに最適化されたランサムウェアが開発されることを予測 [27] しており、新しいタイプのランサムウェアの出現に備える必要がある。

2.3 ランサムウェアの影響

2.3.1 データ損失

PGPCode [12] に代表される原始的なランサムウェアの一部は、強度が不十分な独自の暗号化アルゴリズムを採用していた、鍵の保護が不十分だったなどの理由から、暗号解読者によって解読されるケースが存在した。しかし 2.2.2 節で述べたように、近年のランサムウェアは標準的な暗号化アルゴリズムを利用してデータを暗号化することが一般的であり、暗号化されたデータを独力で復号することは現実的ではない。したがって身代金を支払わない場合、ランサムウェア被害者は暗号化されたデータを失うことになる。

ランサムウェアによって利用不可能になったデータは、攻撃者に身代金を支払ったとしても復旧される保証はない。SpyCloud 社のレポート [3] (図 2.3) によると、2024 年にランサムウェア攻撃者に対して身代金を支払った組織のうち、暗号化されたデータを完全に復旧することができたのは約 50% である。

身代金を支払わない場合、あるいは攻撃者によって復旧の手段が提供されない場合でも、定期的なバックアップを取得していればデータ損失を緩和することが可能である。そこで身代金を支払うインセンティブを高めるために、近年の攻撃者はバックアップデータの侵害を試みることが多い [3]。2023 年にランサムウェア被害を報告した組織の 94% がバックアップへの侵害も試行され、さらにバックアップ侵害の試行の 57% が成功している [4]。例えば、CryptoWall や CTB-Locker といったランサムウェアは Windows OS のスナップショットを削除する機能を持っている [28] ことで知られる。またクラウドストレージによるバックアップは、暗号化されたローカルのデータがクラウドと同期された時点で利用不可能になる恐れがある。さらに、クラウドサービスにおける認証認可に使用するデバイスデータも暗号化することでクラウドストレージへのアクセスを不可能にするランサムウェアが増加していることが指摘されている [29]、

バックアップを安全に作成および運用できている場合でも、ランサムウェア被害によるデータ損失を完全に回避することは困難である。なぜなら、最新のバックアップからランサムウェア攻撃が発生するまでの間に更新されたデータは失われるからである。したがってバックアップの取得間隔はなるべく短いことが望ましいが、頻繁なバックアップ取得の課題としてストレージ容量の圧迫や運用コストの増加が挙げられる [26]。



図 2.3. The outcomes of ransomware attacks based on whether victims paid the ransom and the success rate of data recovery. [3]

2.3.2 金銭的損失

攻撃者に支払う身代金がコストとして発生する。さらに、システムダウンやデータアクセスの制限により、業務が停止することで本来のサービスが提供できなくなるためサービスのダウンタイム中に機会損失が発生するほか、復旧作業の費用（データ復旧、セキュリティ対策や調査の人的費用、デバイスやネットワークの修理費用など）も生じる。

ランサムウェア攻撃の対象は無差別な個人から高価値な組織へと移行しつつあり、それに伴って身代金額も増加している。SOPHOS 社のレポート [4] によると、要求される身代金の中央値が 200 万 USD、63% が 100 万 USD 以上であり、30% が 500 万 USD 以上であった。同レポートの調査対象において身代金の中央値と平均値が最も高かったのはアメリカ合衆国中央政府であった。

図 2.4 に示すように、身代金の支払いを除く復旧コストは 2024 年に大幅な増加が確認された。復旧コストの平均値は 2023 年の 182 万 USD から 273 万 USD に増加し [4, 3]、図 2.4 では年間の収益が中程度のグループにおいて復旧コストの増加が顕著である一方、収益が高いグループではコストは微増または減少している。

8 第2章 ランサムウェア



図 2.4. Recovery costs from the most severe ransomware attacks in 2023 and 2024. The cost includes downtime, labor, device and network costs, and lost revenue. [4]

2.3.3 信頼性の低下

ランサムウェア攻撃を受けた企業は、データの保護やセキュリティへの投資が不十分であるとの印象を顧客や取引先に与えることがある。これにより既存の顧客や取引先との取引関係が損なわれ、逸失利益が発生する可能性がある。図 2.4 に示される復旧コストには逸失利益も含まれていることに注意する。また非営利の組織であっても、メディア報道によってネガティブなイメージが拡散された結果組織の活動に支障が出るおそれもある。

2.3.4 長期的なリスク

CyberReason 社の調査 [30] によると、ランサムウェア攻撃を受けて身代金を支払った企業は、その 8 割が再度ランサムウェア攻撃を受ける。したがって身代金支払いによって一度の攻撃に対処したとしても、その後も継続的に攻撃の対象となるリスクがある。

2.4 主要なランサムウェアインシデント

2.4.1 選定基準

- 2015 年 (本稿の執筆時点から 10 年前) 以降に発生したインシデントであること。
- インシデントのタイムラインや被害状況などの情報が広く公開されていること。
- インシデントの規模が大きく、社会的影響が大きかったこと。

2.4.2 WannaCry の事例 (2017 年)

ランサムウェア WannaCry による攻撃は 2017 年 5 月に発生したランサムウェアインシデントである。WannaCry は Windows サーバの任意コード実行脆弱性 (CVE-2017-0143) を利

用して、Microsoft による脆弱性修正パッチが適用されていない Windows7 マシンを中心として感染を広げた。

スペインの大手通信事業者であるテレフォニカが最初の標的であり、その後ヨーロッパ諸国および世界中で感染が拡大して最終的には 100 カ国以上で被害が発生した [31]。英国における NHS (National Health Service, 国民保健サービス) の被害は特筆すべきものであり、NHS 全体で 19,000 件以上の来院予約のキャンセルと 9200 万ポンドの損失が生じ、手術や診察の中止により人名にかかわる被害も報告された [32]。

2.4.3 コロニアル・パイプライン社への攻撃 (2021 年)

RaaS を提供する犯罪者グループである DarkSide ^{*2}は、VPN システムの認証の不備についてコロニアル・パイプライン社のネットワークに侵入し、ランサムウェア攻撃を展開してデータの窃取と暗号化を行った [33]。コロニアル・パイプライン社はランサムウェア攻撃を受けて一時的にパイプラインの操業を停止した。同社はアメリカ合衆国の東海岸にて石油製品のパイプラインを運営しており、インシデント発生当時には東海岸にて 45% の燃料供給を担っていたため、操業停止の発表によってパニック的なガソリンの買い占めが発生し、一部の給油所で備蓄が枯渇した。このインシデントで影響を受けたのは同社の社内 IT システムのみであったため輸送パイプラインは 1 週間以内に稼働を再開することができたが、パイプライン制御システムが攻撃されていた場合操業停止が長引いて燃料のサプライチェーンに深刻な影響を及ぼす可能性があった。

2.4.4 名古屋港への攻撃 (2023 年)

2023 年 7 月 4 日に、名古屋港のコンテナターミナルシステムを対象としたランサムウェア攻撃が発生し、名古屋港の全ターミナルが約 3 日間作業停止となる障害が発生した [34]。名古屋港は総貨物取扱量や貿易額などの項目で日本一 [35] であり、復旧までに約 2 万本のコンテナの輸出入に影響が発生した。

本インシデントではコンテナターミナルシステムが稼働するすべての物理マシンおよび仮想マシン上のデータが暗号化され、システムバックアップによる復旧が行われた。ただしログはバックアップの対象外であり復旧作業中にログが消失したため、感染経路や感染の原因は特定されていない。

2.4.5 株式会社 KADOKAWA への攻撃 (2024 年)

株式会社 KADOKAWA は 2024 年 6 月にランサムウェア攻撃を受けたことを発表し、動画配信サービスをはじめとする主要サービスの一部が一時的に停止した [36]。この攻撃の対象は株式会社ドワンゴが使用するファイルサーバであり、ファイルの暗号化のみならずデータ窃取

^{*2} DarkSide という名前は犯罪者グループだけでなく、彼らが作成したランサムウェア [24] も指すが、本節では犯罪者グループを指す。



図 2.5. A post by BlackSuit detailing their alleged access to KADOKAWA's networks, encryption of the infrastructure, and theft of 1.5TB of data. [5]

も行われた。その結果、株式会社ドワンゴの従業員やユーザなど、合計で 25 万人以上の個人情報流出したとされる。この個人情報データは BlackSuit というランサムウェア犯罪グループによってダークネット上のリークサイトに公開された [5]。

第 3 章

ランサムウェア対策

3.1 感染リスクの緩和

現実世界の攻撃を戦術と使用技術の観点から分類したフレームワークである MITRE ATT&CK [37] によると、ランサムウェアのデータ侵害は、攻撃の最終段階である Impact ステージの Data Destruction, Data Encrypted for Impact, Data Manipulation のいずれかに分類される。つまり、ランサムウェアによるデータ侵害は Initial Access (初期アクセス) や Privilege Escalation (権限昇格) などのステージを完了した後に発生するといえる。したがって、Impact より前のステージにおけるセキュリティ強化もランサムウェア対策の重要な要素である。なお、本研究の提案手法はランサムウェアの Impact ステージの活動に対する対策であるため、本節の内容はスコープ外であることに注意する。

本節では、すべてのランサムウェアが通過するステージである Initial Access ステージに焦点を当て、感染リスクの緩和について述べる。SpyCloud 社 [3] によると、ランサムウェアの Initial Access に利用される手法として 2023 年に最も多く報告されたものはフィッシング、サードパーティアプリケーションの IAM 設定の不備、cookie 窃取によるセッションハイジャックであった。これらの手法に対する一般的な対策を表 3.1 に示す。

3.2 ランサムウェア検知

3.2.1 特徴量

ランサムウェアを検知する手法で用いられる特徴量は、実行ファイルの解析から得られる静的データと、実行ファイルを実行した際にプロセスの振る舞いから得られる動的データに分類される。静的データを用いた検知を静的検知、動的データを用いた検知を動的検知と呼ぶ。静的検知と動的検知は組み合わせて使用されることもあり、これをハイブリッド検知と呼ぶ。

静的検知では実行ファイルにおけるランサムウェア特有の構造的特徴を分析する。典型的な静的データはファイルのハッシュ値、文字列、関数呼び出しなどである。文字列としては”ransom”や”bitcoin”などのランサムノートに頻出する文字列や、過去にランサムウェアが使用していたドメイン文字列や IP アドレスなどが確認される [38]。また関数呼び出しについ

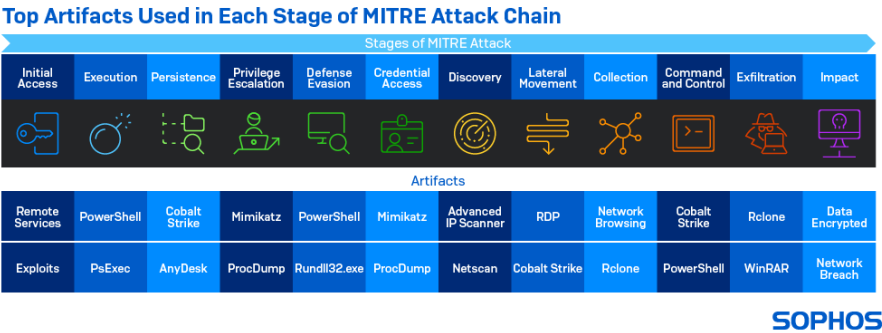


図 3.1. Overview of each stage in MITRE ATT&CK framework. Some stages such as Reconnaissance are omitted for simplicity. [6]

表 3.1. Techniques for Initial Access and general countermeasures

Initial Access の手法	対策
フィッシング	メールフィルタリングを強化する 組織構成員の教育を行う
IAM 設定の不備	多要素認証を導入する
Cookie 窃取によるセッションハイジャック	Secure 属性や HTTPOnly 属性を強制する 多要素認証を導入する

では、暗号化やファイルアクセスといった操作の有無を、ランサムウェアと良性アプリケーションの区別に使用することができる [1]。しかし、静的データは一般に難読化や圧縮などの手法に弱く、さらに新種のランサムウェアに対して有効ではないことが多いという問題が指摘されている [39]。

動的検知では実行中のプロセスの振る舞いを分析する。ランサムウェアは特定のディレクトリ以下のファイル一覧を取得して各ファイルを暗号化する挙動を繰り返し行うことから、ファイルシステム上の操作、暗号化ライブラリや API の呼び出しが特徴量として使用されることが多い [1]。またランサムウェアがファイルに書き込むデータは暗号化されているため、書き込まれるデータのエントロピーを利用する手法も複数存在する [40, 41]。ただし書き込みデータのエントロピーはファイル圧縮などの正常アプリケーションにおいても高くなるので、エントロピーはその他の特徴量と組み合わせて使われる傾向がある [38]。

3.2.2 検知レイテンシ

動的検知あるいはハイブリッド検知において、ランサムウェアが実行されてから検知されるまでの時間を本稿では検知レイテンシと呼ぶ。検知レイテンシが小さければランサムウェアの被害を抑えることができるため、検知手法の評価指標として重要である。例えば RATAFIA [42] はオートエンコーダを用いた検知手法で、WannaCry を含む変種を最大 5.3 秒で検知し

た。また、RWGuard [43] はデコイファイル、プロセス監視、ファイル監視を組み合わせるレイテンシの削減を目指した手法であり、評価実験ではランサムウェアのプロセスを 9 秒未満で特定した。Brownor ら [44] は提案した検知手法の検知レイテンシを CPU 使用率ごとに測定し、使用率が 90% の設定でも評価に用いたランサムウェアサンプルを 3 秒未満で検知することができた。

検知レイテンシはランサムウェア攻撃を迅速に終了させられるかどうかという観点において重要な指標であるが、検知レイテンシの評価を行っている研究が少ないことが指摘されている [42]。例えばいくつかの研究では、提案手法の検知精度を最大化するために、30 日間などの非常に長い期間での評価を行っているものがある [39]。

3.3 ランサムウェア被害からの復旧

ランサムウェア被害からの復旧とは、ランサムウェアによって侵害されたデータを身代金を支払うことなく攻撃前の状態に戻すことを指す。したがって復旧手法は、データの復旧を実施するトリガとして、人間の明示的な入力または手法自体の自動的なランサムウェア検知を必要とする。

3.3.1 スナップショットによる復旧

3.3.2 暗号化鍵の取得による復旧

2.2.2 節で述べたように、共通鍵暗号では暗号化と復号に同じ鍵を使用する。そのため共通鍵暗号を利用するランサムウェアに対しては、暗号化に使用される鍵を取得することができればデータを復号することができる。PayBreak [7] はこの点に着目して開発された手法で、Windows OS が提供する暗号化ライブラリをフックして暗号化鍵を取得する。取得された鍵は事前にユーザが登録した公開鍵によって暗号化されたのち、追記のみが可能なデータストアに保存される。PayBreak は暗号化ライブラリの動的リンクと静的リンクの両方に対応している。さらに代替となる暗号化ライブラリが登場した場合でも、マルウェア解析によって一度暗号化関数を特定することができれば、その関数をフック対象として容易に追加することができる。しかしながら、PayBreak は非対称鍵暗号を利用するランサムウェアには対応していない。

3.3.3 SSD の特性を利用した復旧

SSD の特性を活用してランサムウェアにより侵害されたデータを復旧する手法が提案されている。HDD と SSD はブロックデバイスとしての抽象化により論理的には同一の I/O 操作を受け付けるが、ハードウェアレベルではデータ上書き時の挙動が異なる。HDD では論理的な上書きに対して物理的な上書きが即時実行される (in-place 書き込みされる) 一方で、SSD における物理的な上書きは複数回の論理的な上書きに対してまとめて実行される (上書きされる古いデータが out-of-place 書き込みされ、GC: Garbage Collection によって一定時間の後

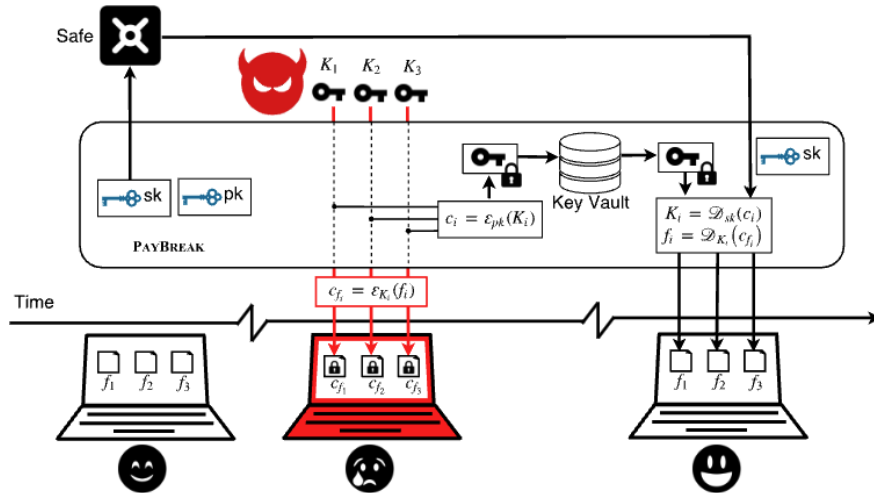


図 3.2. Overview of PayBreak. [7]

削除される)。これは SSD 上で物理ページを消去するレイテンシが大きいためである。つまり、SSD は上書きされたファイルや削除されたファイルのコピーを、GC までの期間だけ保持することになる。

FlashGuard [16] は上記の SSD の特性を利用したデータ復旧システムであり、SSD ファームウェアとして実装された。FlashGuard はランサムウェアによって上書きまたは削除された可能性のある物理ページに「GC によって回収しない」というフラグを立てることで、SSD 上にそのデータを保持してデータ復旧に使用できるようにする。筆者らは 1477 個のランサムウェアサンプルを用いて FlashGuard の有効性を評価し、ランサムウェアによって暗号化されたファイルを効率的に復元可能であり SSD に与える性能劣化も最小限であることを示した。

FlashGuard は保守的にデータの保持を行うため、実際には保持しておく必要がない古いデータまで保持してしまうという問題がある。SSD-Insider [45] はブロック I/O リクエストのヘッダを参照してあるデータがランサムウェアによって侵害されたかどうかを判定することでこの問題を改善した。

SSD の特性を活用したこれらの手法は、ランサムウェア検知がデータ復旧のトリガとなるが、検知において誤検知や見逃しが頻繁に発生する点が先行研究によって指摘されている [46]。そのため本来必要のないリカバリが発生してデータが消失するリスクがある [47]。さらに、ハードウェアに依存した復旧手法は大規模な展開が難しいという課題も指摘されている [26]。特殊なハードウェアまたはプロトタイプ的なハードウェアに依存していること、ランサムウェアの進化に追隨してファームウェアを頻繁に更新することが非現実的であるからだ。

3.3.4 ファイルシステムの拡張による復旧

いくつかの先行研究では、ファイルシステムを拡張することでランサムウェアによるデータ侵害からの復旧を実現している。ShieldFS [8] は OS のネイティブなファイルシステムにカー

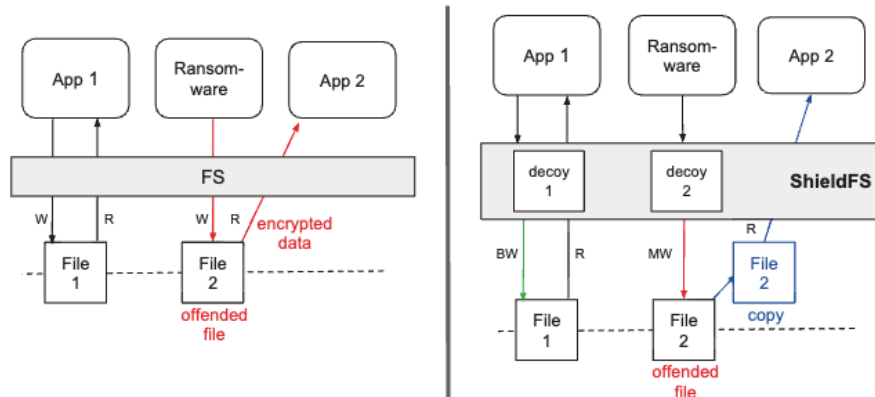


図 3.3. On the right ShieldFS shadowing a file offended by ransomware malicious write (MW), in comparison to standard filesystems (on the left). [8]

ネルモジュールを適用し、任意のプロセスのファイル書き込みまたは削除の I/O リクエストに対して COW (Copy on Write) を行うデータ保護システムである。概要を図 3.3 に示す。ShieldFS はすべてのプロセスの低レベルの I/O リクエスト、および不審なプロセスの暗号化処理を監視してプロセスごとの悪意スコアを計算するモジュールを持つ。あるプロセスの悪意スコアが閾値を超えた場合、COW のコピー元となっているファイルを用いて、そのプロセスによって更新されたファイルを復旧する。Redemption [41] は ShieldFS と類似した手法で、ファイルシステムへの書き込みおよび削除の I/O リクエストをインターセプトし、保護領域に作成されるコピーファイル (「リフレクションファイル」と呼ばれる) にリクエストをリダイレクトする。リフレクションファイルは変更履歴が保持されており、ランサムウェアによるファイルの暗号化や削除を検知した場合、リフレクションファイルを用いてファイルを復元する。

Matos らは RockFS [29] を提案し、悪意ある第三者によるファイルデータの侵害からの復旧を行うシステムの設計と実装を行なった。ランサムウェアなどがバックアップサービスのクライアントデバイス上に保存されているデータを侵害すると、データの更新がクラウドに同期されるため、バックアップが利用不可能になってしまう。RockFS は既存のクラウドバックアップサービスに存在するこの問題に注目し、クライアントデバイス上のファイルシステム操作のログをクラウドストレージ上に保存するというアプローチを取っている。ランサムウェア攻撃が発覚した場合に、ログ上の正常な操作のみをファイルの初期バージョンに適用することでデータを復元する。攻撃者がクラウドストレージへのアクセス情報を窃取してログを改ざんすることを防ぐために、RockFS はログを完全性を保証するための手法を提案している。さらに RockFS は操作ログを複数のクラウドストレージに分散して保存する仕組みを提供しており、ログの改ざんを試みる攻撃者は複数のクラウドサービスに侵入する必要がある点が特徴的である。

第 4 章

Fuga: 提案手法のアプローチ

第 5 章

Fuga の設計

第 6 章

Fuga の実装

5 章で述べた Fuga の設計をもとに Fuga を実装した。本稿の実装は、TMP 節で述べたケースの実例として、OpenSSL を利用して暗号化を行うランサムウェアを対象としている。カーネル空間のプログラムは eBPF [9] を利用して、ユーザ空間のプログラムは Go 言語を用いて実装した。本稿の執筆時点において eBPF は実用上 Linux 環境のみで利用可能であるため、Linux 環境にて実装を行った。実装に使用したシステムの環境を表 6.1 に示す。

6.1 各コンポーネントの実装

本節では Fuga の実装特有の詳細を説明する。Detector の実装は本研究のスコップ外であることに注意する。

6.1.1 Process Monitor

Capturer

Capturer は、OpenSSL 内の暗号化関数を uprobe でフックする eBPF プログラムとして実装した。暗号化関数には引数として平文データが格納されているバッファへのポインタが渡されるため、eBPF プログラム内でこのポインタをキャプチャしユーザ空間からカーネル空間へ平文データをコピーする。コピーされた平文データは、関連するメタデータとともに暗号化イベントを表す構造体に格納され、eBPF map のリングバッファを介して Evacuation Module に送信される。なお、本稿で示す実装においては OpenSSL の暗号化関数のみを対象としているが、OpenSSL 以外の暗号化ライブラリにも容易に同じ手法を適用することができる。

表 6.1. Implementation environment for Fuga.

Linux カーネル	6.3.0-060300-generic
CPU アーキテクチャ	amd64
clang	14.0.0-1ubuntu1.1
Go コンパイラ	go1.22.5 linux/amd64

Collector

Collector は Capturer が取得した平文データに対して、元ファイルの絶対パスと元ファイル上のオフセットを取得する機能を持つ。上述したように Collector がアクセスできるのは平文データのポインタのみであり、ポインタから絶対パスやオフセットを直接取得することはできない。そこで本研究では、FD (File Descriptor) を仲介して必要なデータを取得する方法を採用した。read(2) システムコールは FD とバッファのポインタを引数として受け取るため、read(2) をフックすることでポインタと FD の対応関係を取得することができる。この対応関係を参照し、open(2) システムコール (FD を返り値として戻す) のフックから相対または絶対パスを、lseek(2) および read(2) システムコール (FD を引数に取り、FD に紐づくファイルのオフセットを更新する) のフックからオフセットを取得可能である。より詳細には、以下の手順で FD の値から元ファイルの絶対パスとオフセットを取得する。

元ファイルの絶対パス: open(2) のフックにより FD とファイルパスの関係が得られるので、FD を key とし、ファイルパスを value とするハッシュマップにこの関係を保存する。open(2) に渡された引数が相対パスであった場合、プロセスの CWD (Current Working Directory) と結合して絶対パスを取得する。CWD は Linux カーネルにおいて各ユーザプロセスの状態を管理するカーネル内変数である task_struct を介して取得する。

元ファイル上のオフセット: lseek(2) および read(2) システムコールをフックする。これらのシステムコールは FD を引数に取り、lseek(2) はシステムコール完了時のオフセットを、read(2) はシステムコールによって読み込まれたバイト数を返す。この性質を利用して、FD を key とし、オフセットを value とするハッシュマップにオフセットを保存する。open(2) のフックによりファイルが開かれた際にハッシュマップに $jkey, value_j = jFD, 0_j$ のエントリを追加しておき、lseek(2) および read(2) が実行された際に value を更新しておく。

発表文献と研究活動

- (1) 手塚尚哉, 宮本大輔, 明石邦夫, 落合 秀也, "ファイルの侵害をフックすることによるランサムウェアからのデータ保護システム". CSS2024, <https://conferenceservice.jp/registration/css2024/mypage/proceedings/IPSJCSS-2024150.pdf>, 2024.10.24.

参考文献

- [1] Gourav Nagar. The evolution of ransomware: Tactics, techniques, and mitigation strategies. *Valley International Journal Digital Library*, pp. 1282–1298, 2024.
- [2] Kenan Begovic, Abdulaziz Al-Ali, and Qutaibah Malluhi. Cryptographic ransomware encryption detection: Survey. *Computers & Security*, Vol. 132, p. 103349, 2023.
- [3] SpyCloud. 2024 malware & ransomware defense report — spycloud. <https://spycloud.com/resource/2024-malware-ransomware-defense-report/>. (Accessed on 12/09/2024).
- [4] SOPHOS. 2024 Ransomware Report: Sophos State of Ransomware. <https://www.sophos.com/en-us/content/state-of-ransomware>. (Accessed on 11/21/2024).
- [5] comparitech. Ransomware group blacksuit adds kadokawa corporation to its data leak site - 1.5tb of data allegedly stolen - comparitech, 7 2024. [Online; accessed 2024-12-10].
- [6] Sophos Ltd. Mitre att&ck - mdr documentation, 1 2023. [Online; accessed 2024-12-17].
- [7] Eugene Kolodenker, William Koch, Gianluca Stringhini, and Manuel Egele. Pay-break: Defense against cryptographic ransomware. In *Proceedings of the 2017 ACM on Asia conference on computer and communications security*, pp. 599–611, 2017.
- [8] Continella Andrea, et al. ShieldFS: A Self-healing, Ransomware-aware Filesystem. 2016.
- [9] eBPF.io. What is eBPF? An Introduction and Deep Dive into the eBPF Technology. <https://ebpf.io/what-is-ebpf/>. (Accessed on 11/19/2024).
- [10] Harun Oz, Ahmet Aris, Albert Levi, and A Selcuk Uluagac. A survey on ransomware: Evolution, taxonomy, and defense solutions. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol. 54, No. 11s, pp. 1–37, 2022.
- [11] Virus Bulletin. Trojan horse: Aids information introductory diskette version 2.0. <https://www.virusbulletin.com/uploads/pdf/magazine/1990/199001.pdf>. (Accessed on 12/08/2024).
- [12] Wikipedia. Pgp coder - wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/PGPCoder>. (Accessed on 12/08/2024).

- [13] Mingcan Cen, Frank Jiang, Xingsheng Qin, Qinghong Jiang, and Robin Doss. Ransomware early detection: A survey. *Computer Networks*, Vol. 239, p. 110138, 2024.
- [14] SOPHOS. The current state of ransomware: Ctb-locker – sophos news. <https://news.sophos.com/en-us/2015/12/31/the-current-state-of-ransomware-ctb-locker/>, 2015. (Accessed on 12/08/2024).
- [15] Dermot Byrne and Christina Thorpe. Jigsaw: an investigation and countermeasure for ransomware attacks. In *European Conference on Cyber Warfare and Security*, pp. 656–665. Academic Conferences International Limited, 2017.
- [16] Jian Huang, Jun Xu, Xinyu Xing, Peng Liu, and Moinuddin K Qureshi. Flashguard: Leveraging intrinsic flash properties to defend against encryption ransomware. In *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC conference on computer and communications security*, pp. 2231–2244, 2017.
- [17] Cloudflare. What are Petya and NotPetya? — Ransomware attacks — Cloudflare. <https://www.cloudflare.com/learning/security/ransomware/petya-notpetya-ransomware/>. (Accessed on 11/22/2024).
- [18] 警視庁. 令和 5 年におけるサイバー空間をめぐる脅威の情勢等について. https://www.npa.go.jp/publications/statistics/cybersecurity/data/R5/R05_cyber_jousei.pdf. (Accessed on 11/23/2024).
- [19] ISO. Iso/iec 27001:2022 - information security management systems. <https://www.iso.org/standard/27001>, 2022. (Accessed on 12/09/2024).
- [20] Pranshu Bajpai, Aditya K Sood, and Richard Enbody. A key-management-based taxonomy for ransomware. In *2018 APWG Symposium on Electronic Crime Research (eCrime)*, pp. 1–12. IEEE, 2018.
- [21] Kevin Liao, Ziming Zhao, Adam Doupé, and Gail-Joon Ahn. Behind closed doors: measurement and analysis of CryptoLocker ransoms in Bitcoin. In *2016 APWG symposium on electronic crime research (eCrime)*, pp. 1–13. IEEE, 2016.
- [22] Maxat Akbanov, Vassilios G Vassilakis, Ioannis D Moscholios, and Michael D Logothetis. Static and dynamic analysis of WannaCry ransomware. In *Proc. IEICE Inform. and Commun. Technol. Forum ICTF 2018*, 2018.
- [23] Qublai K Ali Mirza, Martin Brown, Oliver Halling, Louie Shand, and Abu Alam. Ransomware analysis using cyber kill chain. In *2021 8th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, pp. 58–65. IEEE, 2021.
- [24] TrendMicro. Darkside on linux: Virtual machines targeted — trend micro (us). https://www.trendmicro.com/en_us/research/21/e/darkside-linux-vms-targeted.html, May 2021. (Accessed on 12/09/2024).
- [25] vmware. Vmware vsphere — virtualization platform. <https://www.vmware.com/products/cloud-infrastructure/vsphere>. (Accessed on 12/09/2024).

- [26] Zhongyu Wang, Yaheng Song, Erci Xu, Haonan Wu, Guangxun Tong, Shizhuo Sun, Haoran Li, Jincheng Liu, Lijun Ding, Rong Liu, et al. Ransom access memories: Achieving practical ransomware protection in cloud with {DeftPunk}. In *18th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 24)*, pp. 687–702, 2024.
- [27] Zscaler. 2023 threatlabz state of ransomware report — zscaler. <https://info.zscaler.com/resources-industry-reports-2023-threatlabz-ransomware-report>, 2023. (Accessed on 12/09/2024).
- [28] Mattias Weckstén, Jan Frick, Andreas Sjöström, and Eric Järpe. A novel method for recovery from crypto ransomware infections. In *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pp. 1354–1358. IEEE, 2016.
- [29] David R Matos, Miguel L Pardal, Georg Carle, and Miguel Correia. RockFS: Cloud-backed file system resilience to client-side attacks. In *Proceedings of the 19th International Middleware Conference*, pp. 107–119, 2018.
- [30] CyberReason. Ransomware: True cost to business 2024. <https://www.cybereason.com/blog/ransomware-true-cost-to-business-2024>. (Accessed on 12/09/2024).
- [31] The Guardian. Massive ransomware cyber-attack hits nearly 100 countries around the world — cybercrime — the guardian, 2017. [Online; accessed 2024-12-10].
- [32] Kaspersky. Ransomware WannaCry: All you need to know. [Online; accessed 2024-12-10].
- [33] CloudGate. コロニアル・パイプライン社へのランサムウェア攻撃、その背景とは | セキュリティニュース | cloudgate クラウドゲート. [Online; accessed 2024-12-12].
- [34] 国土交通省. 名古屋港コンテナターミナルのサイバー攻撃におけるインシデント対応について, 7 2023. [Online; accessed 2024-12-10].
- [35] 名古屋港管理組合. 日本一の名古屋港 | 名古屋港管理組合公式ウェブサイト. [Online; accessed 2024-12-10].
- [36] KADOKAWA Corporation. Notification and Apology Concerning Information Leakage caused by the Ransomware Attack, 7 2024. [Online; accessed 2024-12-10].
- [37] MITRE. Mitre att&ck®. [Online; accessed 2024-12-17].
- [38] Eduardo Berrueta, Daniel Morato, Eduardo Magaña, and Mikel Izal. A survey on detection techniques for cryptographic ransomware. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 144925–144944, 2019.
- [39] Timothy McIntosh, ASM Kayes, Yi-Ping Phoebe Chen, Alex Ng, and Paul Watters. Ransomware mitigation in the modern era: A comprehensive review, research challenges, and future directions. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, Vol. 54, No. 9, pp. 1–36, 2021.
- [40] Amin Kharaz, Sajjad Arshad, Collin Mulliner, William Robertson, and Engin Kirda.

- {UNVEIL}: A {Large-Scale}, automated approach to detecting ransomware. In *25th USENIX security symposium (USENIX Security 16)*, pp. 757–772, 2016.
- [41] Amin Kharraz and Engin Kirda. Redemption: Real-time protection against ransomware at end-hosts. In *Research in Attacks, Intrusions, and Defenses: 20th International Symposium, RAID 2017, Atlanta, GA, USA, September 18–20, 2017, Proceedings*, pp. 98–119. Springer, 2017.
- [42] Manaar Alam, Sarani Bhattacharya, Swastika Dutta, Sayan Sinha, Debdeep Mukhopadhyay, and Anupam Chattopadhyay. Ratafia: Ransomware analysis using time and frequency informed autoencoders. In *2019 IEEE International Symposium on Hardware Oriented Security and Trust (HOST)*, pp. 218–227. IEEE, 2019.
- [43] Shagufta Mehnaz, Anand Mudgerikar, and Elisa Bertino. Rwgward: A real-time detection system against cryptographic ransomware. In *International Symposium on Research in Attacks, Intrusions, and Defenses*, pp. 114–136. Springer, 2018.
- [44] Calvin Brownor, Patrick Andersen, Zachary Fischer, and Gabriel Osterberg. Ransomware detection using dynamic anomaly matrix for accurate and real-time threat identification. 2024.
- [45] SungHa Baek, Youngdon Jung, Aziz Mohaisen, Sungjin Lee, and DaeHun Nyang. Ssd-insider: Internal defense of solid-state drive against ransomware with perfect data recovery. In *2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 875–884. IEEE, 2018.
- [46] Jaehyun Han, Zhiqiang Lin, and Donald E Porter. On the effectiveness of behavior-based ransomware detection. In *Security and Privacy in Communication Networks: 16th EAI International Conference, SecureComm 2020, Washington, DC, USA, October 21–23, 2020, Proceedings, Part II 16*, pp. 120–140. Springer, 2020.
- [47] 榎本秀平ほか. ランサムウェアに対する破壊的書き込みの監視による仮想ディスク保護機構. コンピュータセキュリティシンポジウム 2024 論文集, pp. 1109–1116, 2024.
- [48] Steven McCanne and Van Jacobson. The BSD Packet Filter: A New Architecture for User-level Packet Capture. In *USENIX winter*, Vol. 46, pp. 259–270. Citeseer, 1993.
- [49] Isovalent. Learning eBPF. [Online; accessed 2024-12-12].

謝辞

ありがとうございました！

付録 A

eBPF

A.1 歴史的背景

A.1.1 Berkeley Packet Filter

Steven と Van [48] は 1993 年に、Unix 系の OS 上でパケットキャプチャを効率的に行うためのアーキテクチャである Berkeley Packet Filter を提案した。これ以降、Berkeley Packet Filter を「BPF」と表記する。BPF が登場する以前のパケットキャプチャでは、カーネル空間で取得したパケットをすべてユーザー空間にコピーしてからフィルタリングしていて、これが無駄なオーバーヘッドの原因となっていた。[48] では特殊な 32 ビットの命令セットを解釈してパケットフィルタリングを行う擬似マシン (BPF pseudo-machine) を提案し、この擬似マシンをカーネル空間で動作させることでオーバーヘッドを軽減することを目指した。

BPF は Linux カーネルの v2.1.75 にて Linux Socket Filter として導入され、`tcpdump` コマンドの高速化に利用された。既存のシステムとの比較では、BPF は最大で 20 倍程度高速にパケットキャプチャを行うことができた。

A.1.2 eBPF: extended BPF

BPF は Linux カーネルの v3.18 にて大幅に拡張が行われ、extended BPF すなわち eBPF と呼ばれるようになった。eBPF 以前の BPF を明確に区別するために cBPF (classical BPF) と呼ぶことがある。拡張された項目は多岐にわたるが、代表的な項目を以下に示す。

- BPF 命令セットが 32 ビットから 64 ビットに書き直され、実行効率が向上した。
- eBPF map というデータ構造が導入され、ユーザ空間とカーネル空間の間でのデータ共有や、eBPF プログラム内のデータ保存またはプログラム間でのデータ共有が可能になった。
- eBPF プログラムが安全に実行できることを検証する eBPF verifier が追加された。

上述した拡張に加えて、eBPF はその適用範囲を大きく拡大してきた。ネットワーク分野においては、Linux ネットワークスタック内の様々なレイヤー、例えばトランスポート層 (e.g.

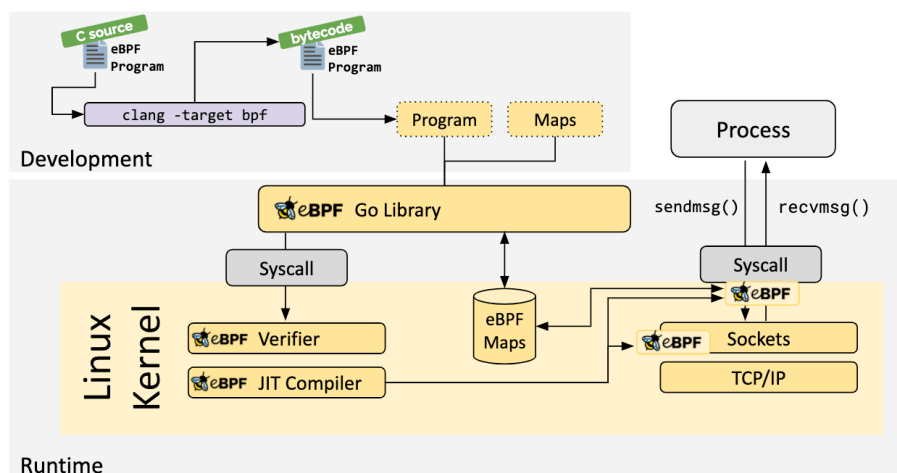


図 A.1. Overview of eBPF system. [9]

TCP/UDP) やデータリンク層 (e.g. ネットワークデバイスドライバ) などを対象に処理を記述することが可能となった。さらに eBPF はパフォーマンストレーシングやセキュリティ機能の向上にも活用されるようになっている。これに伴い、「BPF」という用語は元々の「Berkeley Packet Filter」という意味を超えて、独立したフレームワークを指す言葉として認識されるようになった。

A.2 eBPF のアーキテクチャ

eBPF システムの概要を図 A.1 に示す。特殊な C 言語で記述された eBPF プログラムは BPF バイトコードにコンパイルされ、bpf システムコールを通じてカーネルにロードされる。ロードされた eBPF プログラムは eBPF verifier によって検証され、安全性が確認された後に JIT コンパイルされ、カーネル内で実行される。本研究における Fuga の実装に関連性の高い要素について詳述する。

A.2.1 イベント駆動型アーキテクチャ

eBPF はイベント駆動型のアーキテクチャを採用している。すなわち、開発者はカーネル空間またはユーザ空間で発生する特定のイベントを eBPF プログラムでフックし、イベント発生時にプログラムが実行されるようにカーネルの動作を拡張することができる。eBPF プログラムでイベントをフックすることを「eBPF プログラムをアタッチする」と表現するが、プログラムのロードおよびアンロード、アタッチおよびデタッチは動的に行えるように実装されている。

eBPF にはフックポイントという概念があり、eBPF プログラムが特定のイベントに応じて動作するために接続されるカーネルやユーザスペースの機能的なエントリポイントを指す。本研究における Fuga の実装では以下のフックポイントを利用している。

- **uprobe** : ユーザ空間プログラムが実行する関数のエントリ
- **fentry/fexit** : カーネル関数のエントリ/終了

これらのフックポイントではフックする先の関数を eBPF プログラム内に記述する。指定した関数が呼び出されると、その関数のエントリや終了時に eBPF プログラムが実行される。

A.2.2 eBPF Verifier

eBPF verifier はバイトコードに変換された eBPF プログラムを入力として受け付けて、そのプログラムがカーネル上で安全に実行できることを検証するプログラムである。verifier の検査項目としては、プログラムのメモリアクセス違反、正常終了性 (無限ループする可能性があるかどうか)、スタックサイズや命令数の上限の超過などが挙げられる^{*1}。eBPF プログラムは verifier による安全性の検証を通過しない限り実行されないという点において、eBPF は一定レベルの安全性が保障されている。

A.2.3 eBPF Map

eBPF map (以下、map) は eBPF プログラムおよびユーザ空間の両方からアクセス可能なデータ構造である。map は複数の eBPF プログラム間でデータを共有したり、eBPF プログラムとユーザ空間プログラム間でデータを授受したりするために利用される。典型的なユースケースは以下の通り [49]。

- ユーザ空間にて設定情報を書き込み、eBPF プログラムがそれを取得する。
- ある eBPF プログラムがステートを保存し、後に同一プログラムまたは別のプログラムが参照する。
- eBPF プログラムがメトリクスを map に書き込み、ユーザ空間プログラムが map から取得して可視化を行う。

配列やキューなど複数のデータ構造が map として提供されているが、本研究においてはハッシュテーブルとリングバッファを利用している。eBPF におけるリングバッファは、eBPF プログラムからユーザ空間への高頻度なデータ転送に適している。

^{*1} 命令の上限数は、cBPF において 4096, eBPF において 100 万である。