

明治大学総合数理学部

2024 年度

卒業研究

ヘッドセットの動的特徴量の DTW 距離に基づく VR ユーザ
の個人識別

学位請求者 先端メディアサイエンス学科

三浦 晃暉

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	はじめに	1
第 2 章	関連研究	2
2.1	階層的分類モデル	2
2.2	マルチクラス分類器	2
2.3	DTW 距離による歩容識別	2
第 3 章	提案個人識別	3
3.1	個人識別手法	3
3.2	DTW 距離の計算	3
3.3	個人識別	3
第 4 章	実験	6
4.1	実験目的	6
4.2	実験方法	6
4.3	実験結果	6
第 5 章	おわりに	10
	謝辞	10
	参考文献	12
付録 A	ARP スプーフィングを用いたインターネットの利用時間を管理するホームセキュリティの開発	13
A.1	背景	13
A.2	提案システム構成	14
A.3	システムの開発	15
A.4	結論	18
	参考文献	19

第 1 章

はじめに

1.1 はじめに

近年、バーチャルリアリティ（VR）技術の普及率が上昇しており、メタバースが次世代のインターネットの利用形態として注目されている [1]. 教育やゲーム、観光といった様々な用途やコンテンツがある VR では、利用者は匿名の存在であり、架空の人物として振る舞うことができる.

しかし、VR ユーザの動作を詳細に記録したリプレイデータから、現実世界で個人が識別にされる可能性がある. Nair ら [2] や Lieber ら [3] は、VR リズムゲーム “Beat Saber” [4] の公開リプレイデータから、9 割を超える精度で個人を識別できることを示した. しかし、個人識別の精度に最も影響を与えたのは身長や手の長さなどといった静的特徴量であった.

動作などの動的特徴量を用いると識別精度を向上できる可能性がある. そこで、本研究では、時系列データの DTW (Dynamic Time Warping) 距離を用いて、腕の動かし方のくせなどの動的な特徴量を要因とする個人識別を試みる. VR 体験中のモーションデータから個人を識別することを目的とする.

第 2 章

関連研究

2.1 階層的分類モデル

2023 年, Nair らは VR リズムゲーム “Beat Saber” [4] をプレイ中の頭部と手の動きのデータから, 50,000 を超える VR ユーザを高精度で識別する手法 [2] を提案した. ナイーブに機械学習を用いた手法で識別をする, 大規模 VR ユーザを識別するには莫大な計算コストと記憶コストがかかる. そこで, Nair らは, 位置・回転の統計量といったモーションデータとゲーム内オブジェクトとの相互作用を表すコンテキストデータを統合した 232 次元のハイブリッド特徴量を用いて, LightGBM を用いた階層的な分類モデルを構築した. 各ユーザ 5 分間のモーションデータを学習し, 100 秒のテストデータを 94.33%, 10 秒のデータで 73.20% の精度で識別した.

2.2 マルチクラス分類器

2023 年, Liebers らは VR 環境における行動的バイオメトリクスの安定性と時間経過による識別性能の変化を評価するため, リモートフィールドスタディ [3] を実施した. Meta Quest 2 ヘッドセットを使用し, VR リズムゲーム “Beat Saber” をプレイする 15 名の被験者からセッション毎 2 回, 指定された楽曲をプレイしたモーションデータを 4 セッション収集した. 各セッションのデータの位置と回転の統計量を計算した 18 次元の特徴量を基に構築されたランダムフォレストによるマルチクラス分類器を用いて, 識別性能を評価した. 初回セッションのデータセットの 80% で訓練したモデルを, 残りの 20% のデータで評価した場合, 識別精度 (F1 スコア) は 86% であった. また, 初回セッションのデータセットで訓練したモデルを, 後続セッションのデータセットで評価した場合, 時間が経過したセッションで評価するにつれて識別精度は減少した.

2.3 DTW 距離による歩容識別

2018 年, 森らは Kinect を用いて収集した歩容データの時系列情報に DTW を適用し, 高精度な個人識別を実現する手法を提案した [5]. 提案手法は, モーションキャプチャデバイスである Kinect を活用し, 被験者に装置を装着させることなく関節の動きから得られる身体の 25 箇所の関節の 3 次元スケルトンデータを解析して, 特定の関節の動きを統合し, 最適な特徴量の組み合わせを検討した. このデータに DTW を適用することで, 時間軸を調整した類似性評価を可能とした. 実験では, 31 人の被験者を対象に, 関節間の統合 DTW 距離を用いて個人識別を行い, 等価エラー率 (EER) 0.036 の精度を達成した.

第 3 章

提案個人識別

3.1 個人識別手法

本研究では、VR デバイスのセンサから得られた HMD と両手のコントローラの 3 次元座標を測定し、動作の時系列データの DTW 距離を算出して、個人識別を行う。

3.2 DTW 距離の計算

DTW は、音声などの波形識別に用いられる手法で、長さの異なる時系列データの類似度を測る。森ら [5] と同様に、長さ n_p の時系列データ $P = (p_1, p_2, \dots, p_{n_p})$ と長さ n_q の時系列データ $Q = (q_1, q_2, \dots, q_{n_q})$ の DTW 距離 $d(P, Q)$ を $d(P, Q) = f(n_P, n_Q)$ と定義する。ここで $f(i, j)$ は、

$$f(i, j) = \|p_i - q_j\| + \min \begin{cases} f(i, j-1), \\ f(i-1, j), \\ f(i-1, j-1), \end{cases}$$

$$f(0, 0) = 0, f(i, 0) = f(0, j) = \infty,$$

と定める。また、 $\|p - q\|$ は、3 次元ベクトルのユークリッド距離である。

3.3 個人識別

与えられた特定の動作のモーションデータに対して、被験者全員のテンプレートデータとの間で DTW 距離を計算する。最も DTW 距離が小さかったテンプレートデータの該当者を識別結果とする。

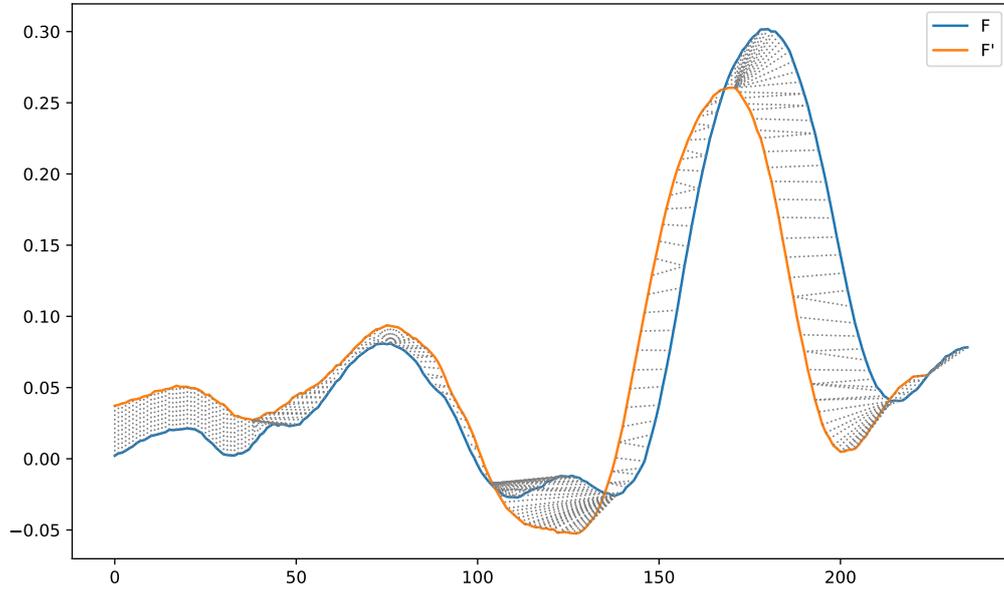


図 3.1 被験者 F の 1, 2 回目に測定した右手の x 座標のデータの DTW の適用例

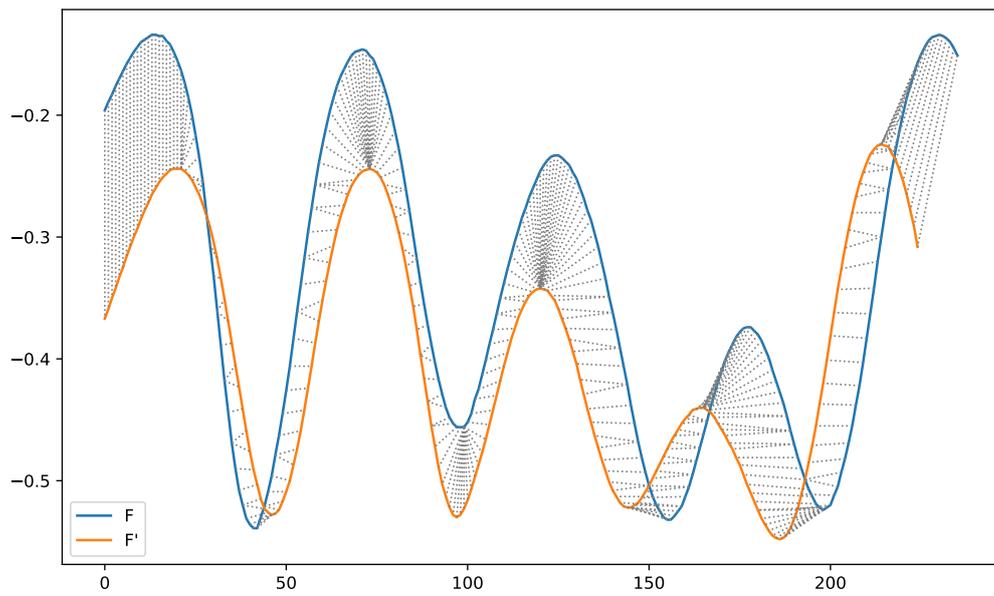


図 3.2 被験者 F の 1, 2 回目に測定した右手の y 座標のデータの DTW の適用例

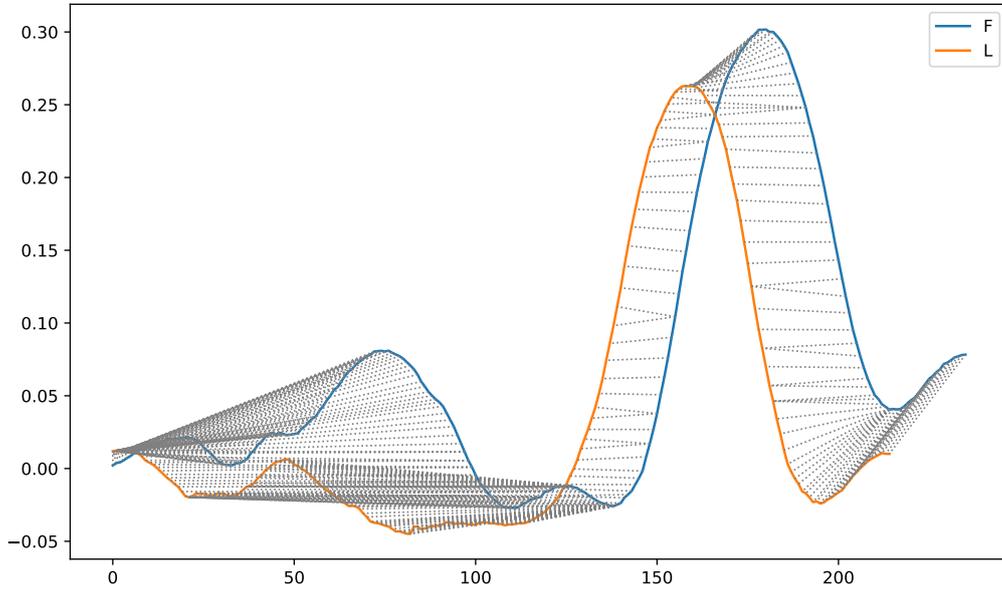


図 3.3 被験者 F と L の右手の x 座標のデータの DTW の適用例

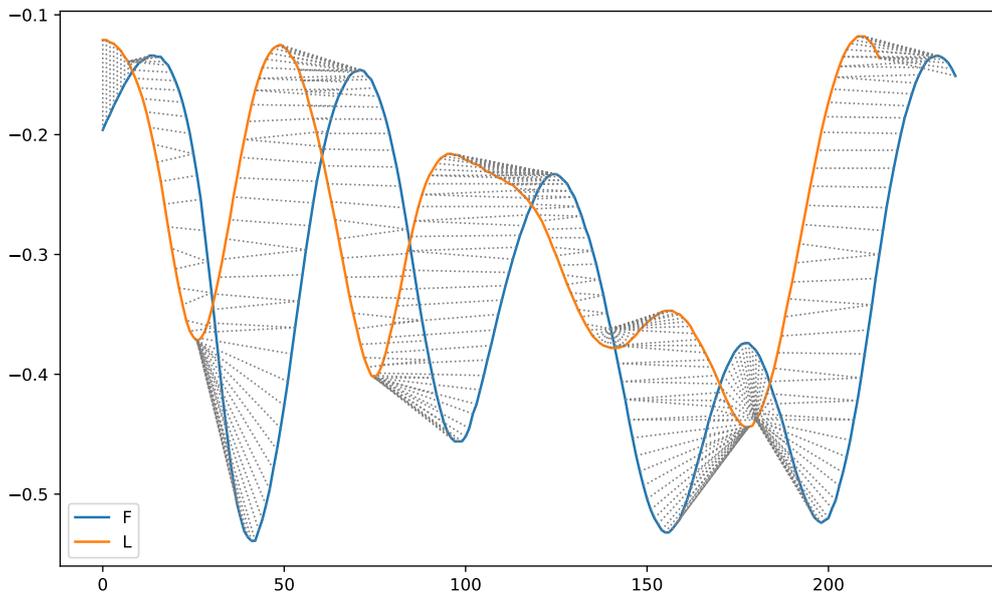


図 3.4 被験者 F と L の右手の y 座標のデータの DTW の適用例

第 4 章

実験

4.1 実験目的

VR デバイスから DTW 距離に基づく個人識別の精度を明らかにする。

4.2 実験方法

実験環境を表 4.1 に示す。Meta Quest 3 を用いて HMD・両手のコントローラの 3 次元座標の時系列を得るために、Unity のアプリケーションを通して、HMD・両手のコントローラの 3 次元座標を取得するシステムを C# を用いて実装した。

被験者の情報を表 4.2 に示す。被験者 12 人に対し、四拍子を行わせるモーションデータを計測した。四拍子とは図 4.1 に示す動作である。2024 年 11 月 1 日から 2024 年 11 月 15 日にかけて一人あたり両手の四拍子を 6 回測定した。

また、各モーションデータに対して個人識別を行う。1 回目から 6 回目までのデータを順にテンプレートデータとして使用して、それぞれのテンプレートデータと他のデータとの DTW 距離を計算する。例を挙げると、1 回目のデータをテンプレートデータとした場合、テンプレートデータと 2-6 回目のデータとの DTW 距離を計算する。2 回目のデータをテンプレートデータとした場合、テンプレートデータと 1, 3-6 回目のデータとの DTW 距離を計算する。

4.3 実験結果

1, 2 回目に測定した被験者 F の動作の時系列データに DTW を適用した例を x, y 座標の各動作について図 3.1, 3.2 に示す。被験者 F と L の動作の時系列データに DTW を適用した例を x, y 座標の各動作について図 3.3, 3.4 に示す。縦軸が座標、横軸がフレーム数を表している。2 曲線間の点線は、DTW 距離を求める際

表 4.1 実験環境

項目	環境
VR デバイス	Meta Quest 3
開発環境	Unity 2022.3.28f1
サンプリングレート	72 fps

表 4.2 被験者

項目	情報
参加者年齢	20-50 代
参加者性別	男性 11 名 女性 1 名
参加人数	12 名

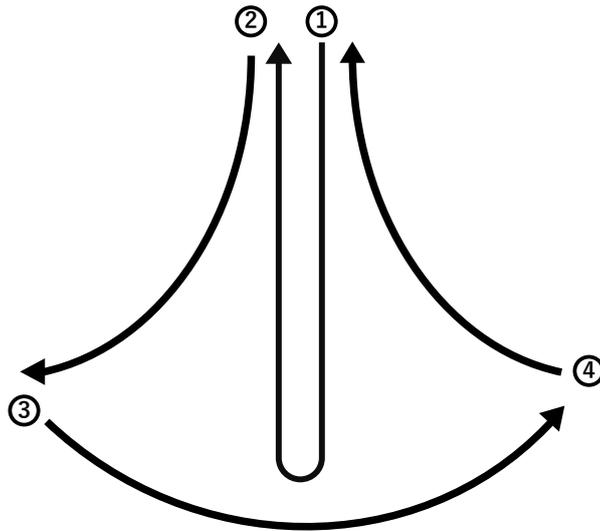


図 4.1 四拍子の例

に距離が最小となる 2 点の組み合わせをつないでいる。図 3.2 の 100 フレーム目で見られるように、1 点が複数の点と対応する場合もある。また、被験者 D, F, L の右手の四拍子の様子を図 4.2, 4.3, 4.4 に示す。これらの図の青点は四拍子の開始点、赤点は四拍子の終了点を示している。被験者 D の四拍子は左右に手を振っているが、被験者 F と L は右側だけに手を振る似た四拍子をしている。四拍子 1 回にかかるフレーム数は約 200 フレームであった。

識別結果を表 4.3 に示す。計算にかかった時間は 18 時間 36 分 42 秒であった。全体の正解率は 95.56% となった。表 4.3 を見ると、被験者 C が被験者 I, 被験者 F が被験者 I や L と推定されている。この誤識別の原因は四拍子の手の振り方が似ているからだと考えられる。

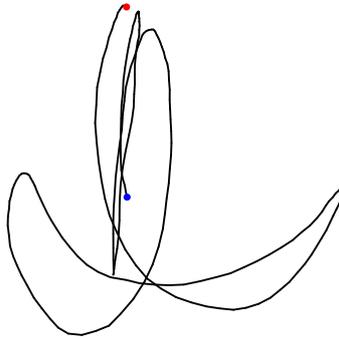


図 4.2 被験者 D の右手の四拍子の時系列データ (X-Y)

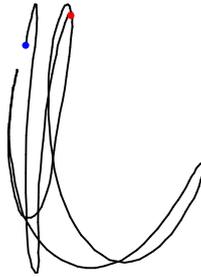


図 4.3 被験者 F の右手の四拍子の時系列データ (X-Y)

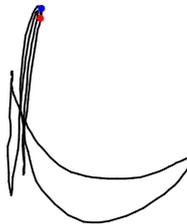


図 4.4 被験者 L の右手の四拍子の時系列データ (X-Y)

表 4.3 識別結果の混同行列

真 \ 推定	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	FRR[%]
A	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
B	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
C	0	0	26	0	0	0	0	0	4	0	0	0	13.33
D	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
E	0	0	0	1	29	0	0	0	0	0	0	0	3.33
F	0	0	0	0	0	21	0	0	5	0	0	4	30.00
G	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0.00
H	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0.00
I	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0.00
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0.00
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0.00
L	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	28	6.67
FAR[%]	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.61	0.00	2.73	0.00	0.00	1.21	

第 5 章

おわりに

本実験により、12 名分のデータを 95% を超える精度で識別できることを示した。しかし、計算時間が 18 時間を超えてしまったため、Nair ら [2] の 50,000 を超えるデータに対して本手法で識別を行うのは現実的ではない。DTW と機械学習を組み合わせたアプローチを今後の課題とする。

謝辞

本研究を行うにあたり，多くの方よりご指導いただきました．特に，明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科，菊池浩明教授に深く感謝申し上げます．また，研究にご助言いただいた當麻僚太郎さん，付録 A の研究を行った太田和希さん，研究にご協力いただいた研究室の皆様に深く感謝の意を表すとともに，謝辞とさせていただきます．

参考文献

- [1] MM 三菱総合研究所, “三菱総合研究所, 国内のメタバースの認知・利用に関する研究成果を発表”, 三菱総合研究所, 2023-3-30, (<https://www.m2ri.jp/release/detail.html?id=600>, 2024年6月参照).
- [2] Vivek Nair and Wenbo Guo, Justus Mattern, Rui Wang, James F. O’ Brien, Louis Rosenberg, Dawn Song, “Unique Identification of 50,000+ Virtual Reality Users from Head & Hand Motion Data”, the 32nd USENIX Security Symposium, pp.895-910, USENIX, 2023.
- [3] Jonathan Liebers and Christian Burschik, Uwe Gruenefeld, Stefan Schneegass, “Exploring the Stability of Behavioral Biometrics in Virtual Reality in a Remote Field Study”, Virtual Reality Software and Technology 2023, pp.1-12, VRST, 2023.
- [4] Meta, “Beat Saber - VR リズムゲーム”, (https://www.meta.com/jp/quest/beat-saber/?srsltid=AfmB0orFWBiX8b_m4_ZKaXHp9W1F027nLJFgfcEEcbH3HxR1ZxnfVEX0, 2024年6月参照).
- [5] 森駿文, 菊池浩明, “歩容データの DTW 距離に基づく個人識別手法の提案と外乱に対する評価”, DICOMO2018 シンポジウム, pp.672-680, IPSJ, 2018.
- [6] 當麻 僚太郎, 谷口 輝海, 菊池 浩明, “歩容に基づく個人識別における Kinect と OpenPose の多人数追跡評価”, 情報処理学会研究報告 (2023-DPS-194), Vol.38, pp.1-7, IPSJ, 2023.

付録 A

ARP スプーフィングを用いたインターネットの利用時間を管理するホームセキュリティの開発

A.1 背景

近年, YouTube や TikTok といった様々なサービスが登場し, SNS やゲーム依存をはじめとするインターネット依存症の子どもの人数が増加傾向にある [1]. スマートフォンの普及率は年々増加 [2] しており, 幼年期のうちからインターネットを利用する人数が増えていくと予想される. そのため, 保護者が子どものインターネット利用を制限することが重要である. しかし, 既存の利用制限アプリやサービス [3] では, 制限したいデバイスに直接インストールする必要があり, パスワードの漏洩や抜け道により, 制限が容易に解除される事例が指摘されている [4]. 企業内 LAN で広く用いられている専用のファイアウォール製品は, 高度な運用知識が必要であり, ホームネットワークには適していない.

そこで, 本研究では, ホームネットワークの環境に配慮した, 別のデバイスから対象のデバイスに制限をかけるシステムを開発する. 同一ネットワーク内の管理用 PC にて本システムを運用し, 専用ファイアウォールなしでネットワーク内のデバイスの管理, 制限を行うことを目的とする. 本研究では, IP アドレスから MAC アドレスを導出するためのプロトコルである ARP(Address Resolution Protocol)[5] に注目する. それぞれのデバイスがもつ, IP アドレスと MAC アドレスを対応づける ARP テーブルを意図的に書き換える ARP スプーフィングを応用し, デバイスの利用制限を実現する.

2022 年, 井窪 [11] は, ARP スプーフィングを用いた, ネットワーク内のファイアウォールシステムである SHS(Simple Home Security) を開発した. SHS は, 家庭内ネットワークのセキュリティ対策を目的とし, Wi-Fi に接続しているデバイスの検出, それらの IP アドレス, MAC アドレス, ベンダー情報の検出, サイトのアクセス制限を実現している. それに対し本研究では, 子どものデバイスのセキュリティ対策と利用時間の管理を目的としている. 検出されたデバイスについて, Wi-Fi 接続時間と閲覧可能コンテンツの管理の機能を新しく実現する.

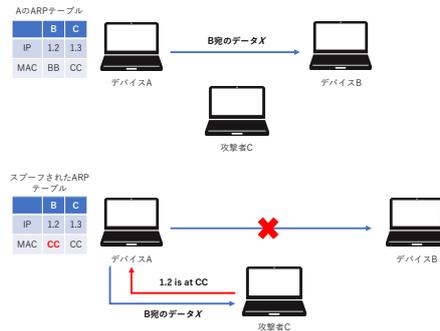


図 A.1 ARP スプーフィングのしくみ

A.2 提案システム構成

A.2.1 ARP

ARP[5] は、LAN 内で IP アドレスから MAC アドレスを求めるプロトコルである。デバイスは、解決したい IP アドレスを ARP リクエストをして送信し、目的のデバイスは ARP リプライを送信する。対応付けられた IP アドレスと MAC アドレスを自身の ARP テーブルに格納している。デバイスは他のデバイスと通信する際、自身の ARP テーブルを参照して、通信相手の IP アドレスから MAC アドレスを取得し、Ethernet フレームを送信する。

A.2.2 ARP スプーフィング

ARP スプーフィングは、不正な ARP リプライを対象に送信し、ARP テーブルを書き換え、通信経路を強制的に変更する攻撃である。図 A.1 にネットワーク内での本来の通信と ARP スプーフィングでの通信の例を示す。通常、デバイス A は自身の ARP テーブルを参照してデバイス B の IP アドレス 1.2 の MAC アドレス BB を取得し、データ X を送信している。しかし、攻撃者 C がデバイス A に不正な ARP リプライを送信して ARP テーブルを書き換えることで、デバイス B の MAC アドレス BB を攻撃者 C の MAC アドレス CC に改変させる。そのため、B 宛のデータ X は攻撃者 C に届いてしまう。

A.2.3 システム構成

図 A.2 に本研究のシステム構成を示す。本来であれば、ネットワーク内のデバイス A, B, C がインターネットを利用する際、ルータを介して通信する。本研究では、ルータと A, B, C に ARP スプーフィングを仕掛け、全てのアウトバウンドの通信を X を経由するようにする。このシステムはネットワーク内にある X にて実行する。

A.2.4 実装する機能

本研究で開発するシステムで表 A.1 の機能を実装する。

表 A.1 の 1, 2 はネットワーク内の全てのデバイスに対して行う。それ以外の機能は、利用者が管理対象の

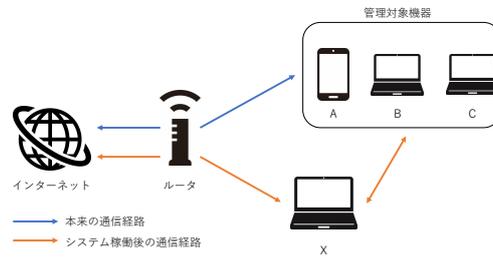


図 A.2 システム構成図

表 A.1 研究分担

研究者	分担内容	章
太田	1. ネットワークに接続されているデバイスを検知する機能	3.2.1
	2. デバイスが Wi-Fi に接続, 切断した際に通知する機能	3.2.2
	3. Wi-Fi に接続している時間を管理し, 利用制限する機能	
三浦	4. 管理するコンテンツの IP アドレスを検索し, リストに登録する機能	3.2.3
	5. コンテンツの閲覧時間を管理する機能	3.2.4

機器やコンテンツを個別に設定する.

A.3 システムの開発

A.3.1 開発環境

本研究では, python を用いてシステムの開発を行った. また, ARP スプーフィングには, ライブラリである scapy[7] を用いた.

A.3.2 主要な機能の仕組み

1. デバイス検知

デバイス検知は, インストールしている PC の ARP テーブルを取得することによって行う. これにより, ネットワーク内にあるデバイスの IP アドレス, MAC アドレスを取得する.

2. Wi-Fi 接続時間による利用制限

利用者は管理対象機器を設定する際, 個別に制限時間を分単位で指定する. 制限時間を超えると, そのデバイスとルータに ARP スプーフィングを行う. 表 A.2 のように ARP リプライを送信し ARP テーブルを書き換えることで通信が遮断される.

3. 閲覧管理するコンテンツのリスト登録

閲覧サイトのホワイトリスト登録は, 対象の Web サイトのドメインによって行う. 対象 Web サイトの IP アドレスを以下のフォーマットで json ファイルに記録する.

```
{
  "example.com": [
```

```

    "192.0.2.1",
    "192.0.2.2",
    "192.0.2.3"
]
}

```

4. コンテンツ閲覧時間の管理

3 の json ファイルに記録されている Web サイトを閲覧している時間を計測し、設定した閲覧制限時間を比較する。

表 A.2 ARP リプライ

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000	1.1	1.2	ARP	60	1.2 is at AA
2	0.001	1.1	1.3	ARP	60	1.3 is at BB
3	0.002	1.1	1.4	ARP	60	1.4 is at CC

A.3.3 システム開発

本システムは、以下のライブラリが必要となる。

- scapy[7]
- tabulate[8]
- manuf[9]

デバイス検知と Wi-Fi 接続時間による利用制限、閲覧管理するコンテンツのリスト登録、コンテンツ閲覧時間の管理のソースを表 A.3 に示す。

main.py は、デバイスの検知を自動で行い、表 A.4 のような表を出力する。一行ごとに検知したデバイスを表示し、デバイスごとに六つの情報を出力する。IP アドレスの欄は、デバイスの IP アドレスを表示する。MAC アドレスの欄は、デバイスの MAC アドレスを表示する。デバイス名の欄は、利用者が個別に設定するデバイス名が表示される。接続状況の欄は、デバイスが Wi-Fi に接続しているかを表示する。制限状態の欄は、Wi-Fi の接続時間による利用制限をするための管理対象機器に設定しているかを表示する。接続時間の欄は、一日のデバイスの Wi-Fi 接続時間を分単位で表示する。

接続時間管理

接続・切断の通知は自動的に行う。デバイスが接続（切断）すると、「MAC アドレス、デバイス名が接続（切断）しました」と通知する。

Wi-Fi 接続時間による利用制限は、コマンドを実行した後、制限したいデバイスの IP アドレスと制限した

表 A.3 各機能の起動コマンド

機能	ソース
デバイス検知と Wi-Fi 接続時間による利用制限	main.py
閲覧管理するコンテンツのリスト登録	save_domain_ip.py
コンテンツの閲覧時間の管理	calc_browsingtime.py

表 A.4 main.py の起動画面の例

IP アドレス	MAC アドレス	デバイス名	接続状況	制限状態	接続時間
192.168.1.1	00:0b:a2:a3:ef:f4	未登録	接続中	対象外	0
192.168.1.2	58:27:8c:3a:cd:f8	未登録	接続中	対象外	0
192.168.1.3	aa:2d:d5:f8:fd:97	未登録	接続中	対象外	0
192.168.1.10	38:78:62:7a:40:e1	未登録	接続中	対象外	0

い時間をコンソールから入力する。入力した時間を超えると、自動的に ARP スプーフィングを開始し、デバイスはインターネットを利用できなくなる。表 A.5 に利用制限の実行画面の例を示す。一行目で利用制限のコマンドを入力し、二行目で制限したいデバイスの IP アドレスを入力し、三行目で制限したい時間を分単位で入力する。

表 A.5 利用制限の例

コマンドを入力してください (終了するには 'exit' を入力): add
IP アドレスを入力してください: 192.168.1.10
制限時間を入力してください: 30

コンテンツアクセス制御

閲覧管理するコンテンツのリスト登録は、閲覧管理する Web サイトのドメインを入力する。

コンテンツ閲覧時間の管理は、閲覧管理したい Web サイトのドメインと制限したい時間を入力する。入力した時間を超えると、「IP アドレス X における example.com の閲覧時間が Y 分を超えました」と通知する。

A.3.4 評価

ネットワーク内にあるデバイスが正確に検知されているか調べる。ネットワーク内に以下の 6 デバイスを用意した状態でシステムを実行し、デバイスが検知されるかを検証する。

- Windows PC
- mac PC
- iPhone
- iPad
- Android
- Nintendo Switch

また、Web サイトの閲覧時間が正確に計測されているか調べる。システムを実行した状態で、以下の 5 つの Web サイトにアクセスして 10 分間閲覧する。システムで計測した時間と手動で閲覧した時間を比較して正確に計測されているかを検証する。

- Yahoo!JAPAN (<https://www.yahoo.co.jp/>)
- X (<https://twitter.com/>)
- CookPad (<https://cookpad.com/>)
- Steam (<https://store.steampowered.com/>)
- Discord (<https://discord.com/>)

表 A.6 デバイス検知結果

デバイス	結果
WindowsPC	検知
macPC	検知
iPhone	検知
iPad	検知
Android	検知
Nintendo Switch	検知

表 A.7 閲覧時間計測結果

Web サイト	閲覧時間 (分)	計測時間 (分)	誤差 (分)
Yahoo!JAPAN	10	10	0
X	10	10	0
CookPad	10	10	0
Steam	10	10	0
Discord	10	10	0

デバイスの動作結果を表 A.6 に示す。6 デバイスすべてが正常に検知された。また、検知以外の動作についても正常に行われていた。

サイトのアクセス結果を表 A.7 に示す。5 つのサイトすべてにおいて、目測による実際の閲覧時間とシステムによる自動計測時間の差は発生しなかった。

A.4 結論

本研究では、ARP スプーフィングを応用し、保護者が子どものインターネット利用を管理するホームセキュリティを開発した。しかし、本ホームセキュリティは Web サイトの閲覧を停止する機能が実装されていないため、今後は URL フィルタリングの実装を課題とする。

参考文献

- [1] KDDI 株式会社, “コロナ禍で変化するスマートフォンの利用方法と、スマホ依存などへの影響を調査”, (<https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2021/10/12/5468.html>, 2023 年 12 月参照)
- [2] 総務省, “令和 2 年版 情報通信白書”, (<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd252110.html>, 2023 年 12 月参照)
- [3] NTT ドコモ, “あんしんフィルター for docomo”, (https://www.docomo.ne.jp/service/anshin_filter, 2023 年 1 月参照)
- [4] CNET Japan, “親のかけたスマホ制限を自力で解除する子どもたち”, (<https://japan.cnet.com/article/35160831/>, 2023 年 12 月参照)
- [5] ITmedia, “ARP”, (<https://atmarkit.itmedia.co.jp/aig/06network/arp.html>, 2023 年 1 月参照)
- [6] 井窪, “ホームネットワークにおける全ホストを管理する Simple Home Security の開発”, 2022 年度菊池研究室卒業論文, 2023.
- [7] Scapy, “Scapy”, (<https://scapy.net/>, 2023 年 1 月参照)
- [8] PyPI, “tabulate”, (<https://pypi.org/project/tabulate/>, 2023 年 1 月参照)
- [9] PyPI, “manuf”, (<https://pypi.org/project/manuf/>, 2023 年 1 月参照)
- [10] 北原, 菊池, “ARP スプーフィング攻撃のリスク評価”, 情報処理学会第 84 回全国大会, 2022.
- [11] 瀬川, 中村, “仮想環境における L 2 ネットワークの脆弱性分析と ARP スプーフィング緩和手法の提案”, コンピュータセキュリティシンポジウム 2022, pp.540-545, 2022.