

在宅高齢者見守りに向けたサービス横断型マルチカメラシステムの開発

眞銅 利典[†] 西山 敦紀[†] 福田 章太[†] 中田 匠哉[†] 陳 思楠[†]

佐伯 幸郎^{††} 安田 清[†] 中村 匡秀[†]

[†] 神戸大学 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

^{††} 高知工科大学 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: [†]{shintoshi,atsunori,fukuda-s}@es4.eedpt.kobe-u.ac.jp, ^{††}tnakata@bear.kobe-u.ac.jp,
^{†††}chensinan@gold.kobe-u.ac.jp, ^{††††}saiki.sachio@kochi-tech.ac.jp, ^{†††††}yasukiyo.12@outlook.jp,
^{†††††}masa-n@cmds.kobe-u.ac.jp

あらまし 現在、日本では高齢者数および認知症患者数が増加傾向にあり、カメラを利用した在宅高齢者向け支援サービスの研究開発が進められている。しかし、従来の Web カメラを用いたサービスには物理的な配線による設置制限が存在するほか、サービスごとに個別のカメラを必要とするため映像の共有や機器の管理が困難であるという問題がある。本研究ではこれらの問題を解決するため、ネットワークカメラ・エッジデバイス・映像中継サーバーから構成されるサービス横断型マルチカメラシステムを開発した。エッジデバイスをカメラ専用のアクセスポイントおよび VPN クライアントとして事前構成することで、家庭側では機器の設置のみで稼働するシステムを実現し、映像中継サーバーが集約した映像を複数のプロトコルで再配信することで、複数のサービスによる単一カメラ映像の共有を可能とする。動作検証の結果、家庭内でのネットワーク設定操作を行うことなく映像の伝送と閲覧が可能であることを確認した。

キーワード 高齢者、ネットワークカメラ、エッジデバイス

Development of a Cross-Service Multi-Camera System for In-Home Monitoring of Older Adults

Toshinori SHINDO[†], Atsunori NISHIYAMA[†], Shota FUKUDA[†], Takuya NAKATA[†], Sinan

CHEN[†], Sachio SAIKI^{††}, Kiyoshi YASUDA[†], and Masahide NAKAMURA[†]

[†] Kobe University Rokkodai-cho 1-1, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501 Japan

^{††} Kochi University of Technology 185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami, Kochi 782-8502, Japan

E-mail: [†]{shintoshi,atsunori,fukuda-s}@es4.eedpt.kobe-u.ac.jp, ^{††}tnakata@bear.kobe-u.ac.jp,
^{†††}chensinan@gold.kobe-u.ac.jp, ^{††††}saiki.sachio@kochi-tech.ac.jp, ^{†††††}yasukiyo.12@outlook.jp,
^{†††††}masa-n@cmds.kobe-u.ac.jp

Abstract With the growing population of older adults and people with dementia in Japan, the research and development of camera-based in-home support services have been actively pursued. However, conventional services utilizing webcams face installation constraints due to physical wiring. Furthermore, because each service typically requires its own dedicated camera, sharing video resources and managing devices across multiple applications remains difficult. To address these issues, this study develops a cross-service multi-camera system composed of network cameras, edge devices, and a video relay server. By pre-configuring the edge device as a dedicated access point for the cameras and as a VPN client, we achieve a zero-configuration deployment, allowing the system to operate simply by physically placing the devices in the user's home. Concurrently, the video relay server aggregates the incoming streams and redistributes them via multiple protocols, enabling various services to share a single camera's video feed. The results of our operation verification confirmed that video transmission and viewing can be successfully executed without requiring any local network configuration by the home user.

Key words Older Adults, Network Cameras, Edge Devices

1. はじめに

現在、日本は総人口に対する高齢者の割合が高く、その割合や認知症患者数は今後も増加傾向であると推測されている [1]。これに伴い在宅高齢者の生活を支援するために、カメラを利用した見守りサービスや生活支援サービスの研究開発が進められている。我々もこれまでに、把持物体を自動で認識・記録することで物の置き場所忘れを支援する把持物体認識記録サービス「GORRS」[2] [3] や、外出時の忘れ物を防止する身支度サポートサービス「モッテコ」[4]、PoseNet による歩行動態解析と InBody による体組成測定を統合した高齢者向けセンサベース移動能力評価フレームワーク [5] 等のカメラを利用したサービスの研究開発を行ってきた。

しかし、これらのサービスを実際の高齢者宅へ導入することを想定すると次の問題が存在する。

P：サービスごとのカメラ占有に起因する設置・管理・共有の困難さ

既存の各サービスはそれぞれが個別にカメラを占有して映像を取得する構成となっている。そのため同一の部屋を対象とする場合であっても、サービスの数だけカメラを設置する必要があり機器コストや管理の手間が増大する。さらに現在想定している Web カメラは USB ケーブルにより PC と物理的に接続するため、カメラの設置場所は PC 周辺に制限される。このため、死角を低減するために複数台のカメラを柔軟に配置することが困難である。またカメラおよび映像の管理がサービスごとに分断されるため、同一の映像を複数のサービスで共有することができない。

本研究ではこの問題に対し、

C：複数のサービスが共通のカメラ映像を利用可能とし、かつ家庭内で柔軟にカメラを設置・運用できる仕組みの実現

を課題として設定する。この課題を解決するシステム基盤として、サービス横断型マルチカメラシステムを提案・開発する。キーアイデアは、カメラとサービスの間に映像中継のための基盤を構築しカメラ側とサービス側を疎結合化することである。具体的には、カメラには無線接続可能な安価なネットワークカメラを採用し、事前構成済みのエッジデバイスがカメラ映像を研究室の映像中継サーバーへ転送する。さらに映像中継サーバーが各サービスの要件に応じた複数のプロトコルで映像を再配信することで、複数サービスによるカメラ映像の共用を可能とする。

本システムの実現にあたっては、家庭ネットワーク非依存のエッジネットワーク構築 (A1)、VPN と低負荷映像伝送による外部拠点への映像送信 (A2)、複数サービス向け映像中継サーバーの構築 (A3) の 3 つのアプローチを採用する。

提案システムを実装し著者宅において動作検証を行った結果、家庭側でのネットワーク設定操作を一切行うことなくカメラ映像を研究室サーバーへ伝送し、ブラウザから閲覧できることを確認した。また、カメラ台数を 1 台から 4 台まで変化させた負荷測定を行い、4 台接続時においてもエッジデバイスの平均 CPU 使用率および家庭側ネットワークへの送信帯域が実用

的な範囲に収まることを確認した。

2. 準備

2.1 高齢者と認知症患者の増加

内閣府の「令和 6 年版高齢社会白書」[1] によると、令和 5 年 10 月 1 日時点で日本の総人口は 1 億 2435 万人で、そのうち 65 歳以上人口は 3623 万人であり、高齢化率は 29.1% となっている。高齢化率は今後も上昇傾向であると推定されており、令和 12 年には 30.8%、令和 22 年には 34.8%、令和 32 年には 37.1% に達すると推計されている。また、令和 4 年から 5 年の調査によると、65 歳以上高齢者における認知症の高齢者数は 443.2 万人で有病率は 12.3%、軽度認知障害 (MCI) の高齢者数は 558.5 万人で有病率は 15.5% と推計されている。さらに令和 22 年には 65 歳以上高齢者において、認知症の高齢者数は 584.2 万人で有病率は 14.9%、MCI の高齢者数は 612.8 万人で有病率は 15.6% になると推計されている。

2.2 カメラを利用した高齢者支援サービス

在宅高齢者の生活を支援するため、カメラ映像を用いた見守り・生活支援サービスの研究開発が進められている。これらのサービスは、利用目的や処理内容は異なるものの、家庭内に設置したカメラから得られる映像または画像を入力として利用する点で共通している。

我々もこれまでに、カメラ映像を利用した複数の在宅高齢者支援サービスを開発してきた。把持物体認識記録サービス GORRS (Grasped Object Recognition and Recording Service) は、高齢者や認知症患者が物の置き場所を忘れた際に、その物を最後に把持していた時点の情報を提示することで、置き場所の特定を支援するサービスである [2] [3]。GORRS では、室内カメラ映像から一定間隔で人物の手周辺画像を切り出し、画像入力可能な大規模言語モデルを用いて把持物体を認識・記録する。身支度サポートサービス「モッテコ」は、独居高齢者の外出時における忘れ物を防止するためのサービスである [4]。モッテコでは、カメラで持ち物ボックス内の状態を取得し、物体検出により必要な持ち物が準備されているかを確認する。また、Chen らは、高齢者の移動能力や筋骨格系の健康状態を非接触に評価するため、PoseNet による歩行動態解析と InBody による体組成測定を統合したフレームワークを提案している [5]。この研究では、カメラ映像から歩行時の骨格キーポイントを抽出し、重心移動や方向変化等の動的特徴量を算出する。

このように、カメラを利用した高齢者支援サービスでは、手周辺画像、持ち物確認用画像、歩行動作の連続映像など、サービスごとに必要とする映像の範囲や形式が異なる。一方で、いずれのサービスも家庭内に設置されたカメラ映像を入力として利用する点では共通している。したがって、サービスごとに個別のカメラを設置・管理するのではなく、共通のカメラ映像を複数サービスが用途に応じた形式で利用できる基盤があれば、機器数や管理負担を削減できると考えられる。

2.3 実運用に向けた問題

前節で述べたようなカメラを利用した在宅高齢者支援サービスを実際の高齢者宅で運用することを想定すると、以下の問題

が存在する。

P：サービスごとのカメラ占有に起因する設置・管理・共有の困難さ

既存の各サービスは、それぞれが占有するカメラから映像を取得する構成となっている。そのため、同一の部屋を対象とする場合であっても、サービスの数だけカメラを設置する必要があり、機器コストと管理の手間が増大する。また、各サービスが個別にカメラを管理するため、あるカメラの映像を別のサービスから利用することができない。さらに、現在これらのサービスで想定している Web カメラは、PC に USB 接続して利用する必要がある。そのため、カメラの設置場所は PC 周辺に制限され、部屋の構造や家具の配置によっては死角が生じる。死角を低減するためには部屋ごとに複数台のカメラを設置する必要があるが、サービスごとに個別の Web カメラを用意する構成では必要台数がさらに増加し、設置場所および配線管理の制約がより深刻となる。

複数のカメラ映像を管理する既存技術として、ZoneMinder がある。ZoneMinder は Linux 上で動作するオープンソースの映像監視システムであり、ネットワークカメラ等の映像を取得し、監視、録画、解析、検索、エクスポート等を行うことができる [6]。このため、複数のネットワークカメラ映像を一元的に管理する手段として利用できる。しかし、ZoneMinder は主に映像の監視・録画を目的としたシステムであり、本研究で想定する在宅高齢者支援サービスの共通映像基盤としては十分ではない。第一に、高齢者宅に設置したカメラ映像を研究室等の外部拠点へ集約するためには、家庭側ネットワーク内のカメラへ外部から到達可能にする必要があり、家庭側ルーターのポート開放や VPN 等による到達性確保が別途必要となる。第二に、複数の支援サービスが同一のカメラ映像を利用する場合、サービスごとに必要とする映像形式は異なる。例えば、ライブ映像を必要とするサービスもあれば、一定間隔の静止画のみを必要とするサービスもある。そのため、監視・録画を中心とした既存システムをそのまま用いるだけでは、家庭側の設定負担を抑えつつ、複数サービスが共通のカメラ映像をそれぞれの形式で利用する仕組みを実現することは難しい。

以上より、カメラを利用した在宅高齢者支援サービスを実運用するためには、家庭側のネットワーク環境に依存せずにカメラ映像を外部拠点へ集約し、さらに複数サービスが同一の映像を用途に応じた形式で利用できる仕組みが必要である。この問題に対し本研究では、

C：複数のサービスが共通のカメラ映像を利用可能とし、かつ家庭内で柔軟にカメラを設置・運用できる仕組みの実現を課題として設定する。

3. 提案手法

3.1 目的と設計方針

本研究の目的は、2.3 節で述べた課題 C を解決するため、複数の在宅高齢者支援サービスが共通のカメラ映像を利用でき、かつ家庭側で専門的なネットワーク設定を必要としない映像中継基盤を構築することである。本システムでは、カメラ、家庭

側ネットワーク、映像中継サーバー、支援サービスの責務を分離し、カメラ側とサービス側を疎結合化する。

設計方針は以下の 3 点である。第一に、家庭内にカメラ専用のネットワークを構築し、家庭ごとの Wi-Fi 設定やネットワーク構成の差異をエッジデバイスで吸収する。第二に、家庭側のエッジデバイスから研究室の映像中継サーバーへ映像を送信する push 型の構成とし、家庭側ルーターのポート開放や固定グローバル IP アドレスを不要とする。第三に、映像中継サーバーが受信した映像を複数の形式へ変換・再配信することで、サービスごとの異なる映像利用の要求に対応する。

3.2 要求事項とアプローチ

本システムの設計にあたり、以下の要求を設定する。

R1：家庭側でルーター設定や Wi-Fi 設定を変更せずに導入できること

在宅高齢者宅では、利用者や家族がネットワーク機器の設定を行うことは困難である場合が多い。そのため、家庭側ルーターのポート開放、固定 IP アドレスの設定、家庭 Wi-Fi へのカメラ登録等を不要とし、機器を設置して電源を投入するだけで稼働する必要がある。

R2：複数台のカメラを柔軟に設置・管理できること

在宅見守りでは、部屋の構造や家具の配置によって死角が生じるため、複数台のカメラを柔軟に配置できる必要がある。また、サービスごとにカメラを個別管理するのではなく、共通のカメラ群として管理できる必要がある。

R3：家庭側から外部拠点へ安定して映像を送信できること

カメラ映像を研究室等の外部拠点へ集約するためには、家庭側ネットワークの NAT やファイアウォールの影響を受けにくい映像伝送経路が必要である。また、エッジデバイスとして安価な小型計算機を用いるため、映像伝送時の計算負荷を低く抑える必要がある。

R4：複数サービスが同一カメラ映像を異なる形式で利用できること

支援サービスごとに必要な映像形式は異なる。例えば、ライブ映像を必要とするサービス、ブラウザ上で映像を確認するサービス、一定間隔の静止画のみを必要とするサービスが存在する。そのため、単一のカメラ映像を複数の形式で提供し、各サービスが用途に応じて利用できる必要がある。

これらの要求に対し、本研究では以下の 3 つのアプローチを採用する。A1 では、エッジデバイスをカメラ専用アクセスポイントおよび DHCP サーバーとして動作させ、家庭ネットワークに依存しないエッジネットワークを構築する。A2 では、エッジデバイスと映像中継サーバーを VPN で接続し、カメラ映像を低負荷に送信する。A3 では、映像中継サーバーが受信した映像を集約し、複数サービスへ異なる形式で再配信する。要求事項とアプローチの対応を表 1 に示す。

3.3 全体アーキテクチャ

提案システムの全体アーキテクチャを図 1 に示す。本システムは、各家庭に設置するネットワークカメラ、家庭側のエッジデバイス、研究室等の外部拠点に設置する映像中継サーバー、および映像を利用する複数の支援サービスから構成される。各

表 1: 要求事項と対応するアプローチ

要求	内容	対応
R1	家庭側でルーター設定や Wi-Fi 設定を変更せずに導入できること	A1, A2
R2	複数台のカメラを柔軟に設置・管理できること	A1
R3	家庭側から外部拠点へ安定して映像を送信できること	A2
R4	複数サービスが同一カメラ映像を異なる形式で利用できること	A3

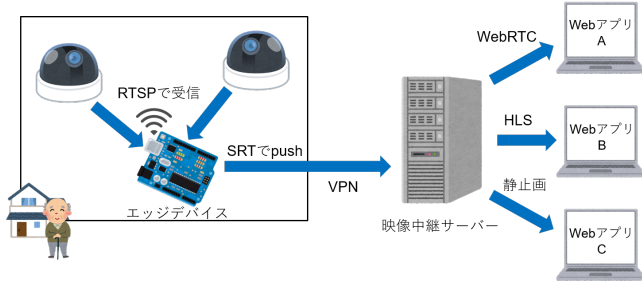


図 1: 提案システムの全体アーキテクチャ

家庭において、ネットワークカメラはエッジデバイスが構築するカメラ専用無線ネットワークに接続される。エッジデバイスはカメラへ固定 IP アドレスを割り当て、RTSP により各カメラの映像を取得する。取得した映像は、エッジデバイスから VPN を介して映像中継サーバーへ送信される。このとき、家庭側からサーバーへ映像を送信する push 型の構成とすることで、研究室側から家庭内のカメラへ直接アクセスする必要をなくす。

映像中継サーバーは、各家庭のエッジデバイスから送信される映像ストリームを受信し、カメラごとのストリーム識別子に基づいて管理する。さらに、受信した映像を WebRTC、HLS、RTSP、静止画等の複数形式で再配信する。これにより、各支援サービスはカメラを直接管理することなく、自身の要件に適した形式で共通のカメラ映像を利用できる。

3.4 A1：家庭ネットワーク非依存のエッジネットワーク

A1 では、家庭内ネットワークの環境差異に依存せず、設置のみで稼働するエッジネットワークを構築する。具体的には、エッジデバイス自体を無線 LAN のアクセスポイントとして動作させ、ネットワークカメラ専用の独立したローカルネットワークを構築する。カメラは家庭の Wi-Fi ではなくエッジデバイスのアクセスポイントへ接続されるため、家庭ごとの Wi-Fi 設定やルーター設定の差異がシステムに影響しない。

また、エッジデバイスは DHCP サーバーとして動作し、ネットワークカメラの MAC アドレスに基づいて固定 IP アドレスを払い出す。エッジデバイス上の映像取得処理はこの固定 IP アドレスを参照するため、カメラの再起動等によりアドレスが変化することなく、安定して映像を取得できる。さらに、エッジデバイスはカメラ専用ネットワークのゲートウェイとして動作し、必要に応じてカメラの外部通信を中継する。これにより、カメラの通信経路をエッジデバイス経由に集約できる。

以上により、家庭側ではカメラを家庭 Wi-Fi へ登録する必要

がなく、エッジデバイスに有線 LAN ケーブルを接続し、各機器の電源を投入するだけでシステムが稼働可能となる。

3.5 A2：VPN と低負荷映像伝送

A2 では、家庭側エッジデバイスから映像中継サーバーへ映像を送信するための伝送経路を構築する。エッジデバイスと映像中継サーバーを VPN で接続することで、家庭側ルーターのポート開放や固定グローバル IP アドレスの設定を不要としつつ、外部拠点への安全な通信経路を確保する。VPN の接続情報はエッジデバイスに事前構成しておくため、家庭側での操作は発生しない。

映像の送信には SRT プロトコルを用いる。SRT はパケットロスの再送制御や遅延変動への耐性を備えた映像伝送向けプロトコルである [7]。本システムでは、カメラから取得した H.264 映像を再エンコードせず、コンテナ形式の変換のみを行って映像中継サーバーへ送信する。これにより、エッジデバイスの計算負荷を低く抑え、安価な小型計算機で複数台のカメラを同時に中継することを可能とする。

また、映像送信時にはカメラごとに一意なストリーム識別子を付与する。この識別子はサーバー側でのストリーム管理に用いられ、後段の配信 URL や静止画ファイル名にも利用される。

3.6 A3：複数サービス向け映像中継サーバー

A3 では、複数サービスが共通のカメラ映像を利用するための映像中継サーバーを構築する。映像中継サーバーは、各家庭のエッジデバイスから送信されたストリームを一括して受信し、カメラごとのストリーム識別子に基づいて管理する。各サービスはカメラではなく映像中継サーバーへアクセスするため、サービス数が増加しても家庭側からの映像送信はカメラあたり 1 ストリームに抑えられる。

受信した映像ストリームは、WebRTC、HLS、RTSP 等の複数のプロトコルで再配信する。低遅延性を重視するサービスは WebRTC や RTSP、ブラウザ互換性を重視するサービスは HLS を選択できる。また、映像ストリームから一定間隔で最新フレームを静止画として切り出し、HTTP 経由で取得可能な API として提供する。これにより、GORRS のように一定間隔の画像のみを必要とするサービスは、映像ストリームを直接処理することなく、最新画像を取得できる。

さらに、サーバーは任意のストリーム識別子を受け入れる構成とする。そのため、カメラや世帯を追加する際にもサーバー側の設定変更を最小限に抑えることができ、識別子から各配信形式のアクセス先を機械的に導出できる。

4. 実装

4.1 利用した機器・技術

本研究の実装には以下の機器および技術を用いた。

- エッジデバイス：Raspberry Pi 3 Model B [8]
- ネットワークカメラ：TP-Link Tapo C200 [9]
- エッジネットワーク（A1）：hostapd（アクセスポイント化）、dnsmasq（DHCP サーバー）

- 映像伝送 (A2) : Tailscale [10] (VPN), FFmpeg (映像取得・SRT 送信), systemd (プロセス管理)
- 映像中継サーバー (A3) : MediaMTX [11] (受信・プロトコル変換), FFmpeg (スナップショット生成), nginx (静止画配信), Docker (コンテナ管理)

実装に用いたエッジデバイスとネットワークカメラの画像を図 2 に示す。



図 2: 実装に用いたエッジデバイスとネットワークカメラ

4.2 エッジデバイスの実装

エッジデバイス上では hostapd によりカメラ専用の無線ネットワークを構築し, dnsmasq によりカメラの MAC アドレスに対して固定 IP アドレスを割り当てる。また, dnsmasq によりエッジデバイスの AP 側アドレスをデフォルトゲートウェイおよび DNS サーバーとして配布し, Linux の IP forwarding と NAT により, カメラ専用ネットワークから上位ネットワークへの通信を中継する。本実装では, 有線 LAN 側および Tailscale 側への転送を許可し, 送信元アドレスをエッジデバイスのアドレスへ変換することで, AP 配下のカメラがエッジデバイス経由で外部と通信できるようにした。映像の中継は FFmpeg により行い, カメラから RTSP で映像を取得し, 映像は再エンコードせず, MPEG-TS コンテナへ変換のうえ SRT で映像中継サーバーへ送信する。この処理はカメラ 1 台につき 1 つの systemd サービスとして常駐化されており, 異常終了時の自動再起動とデバイス起動時の自動実行が設定されている。VPN には Tailscale を用い, エッジデバイスと映像中継サーバーを同一の仮想ネットワーク上に配置する。本実装では, Tapo カメラの RTSP サブストリームである stream2 を用いた。実験に用いたカメラの stream2 は, H.264 形式, 解像度 1280 × 720, 平均フレームレート 15fps の映像であった。

4.3 映像中継サーバーの実装

映像中継サーバーは Docker 上に構築し, MediaMTX と nginx の 2 つのコンテナから構成される。MediaMTX は SRT で映像を受信し, WebRTC, HLS, RTSP の各プロトコルで再配信する。また, ストリームの受信が開始されると FFmpeg が

起動し, 毎秒 1 フレームを JPEG 形式の静止画として切り出し, ストリーム名と同名のファイルへ上書き保存する。nginx はこの静止画をキャッシュ無効の設定で HTTP 配信するため, クライアントは同一 URL へのリクエストにより常に最新のフレームを取得することができる。

エッジデバイスが付与するストリーム識別子 (例: cam001) は, そのまま各プロトコルのストリームパス名 (例: rtsp://<サーバー>:8554/cam001, http://<サーバー>:8888/cam001/index.m3u8) および静止画のファイル名 (例: /snapshots/cam001.jpg) のようになる。MediaMTX は任意の識別子のストリームを受け入れるよう構成しているため, カメラの追加時にサーバー側の設定変更は不要である。

5. 動作検証

5.1 検証の目的

本章では, 提案システムが実際の家庭環境において設置のみで稼働すること, および複数台のネットワークカメラを接続した場合でもエッジデバイスの負荷が実用的な範囲に収まることを検証する。3 章で述べたように, 本システムは高齢者宅への導入を想定しているため, 家庭側でルーターの設定変更, ポート開放, 固定 IP アドレスの設定, カメラごとのネットワーク設定等を必要としないことが重要である。また, 在宅見守りでは死角を低減するために複数台のカメラを設置する必要があるため, カメラ台数の増加に対してエッジデバイスの CPU 使用率, メモリ使用量, およびネットワーク帯域がどの程度増加するかを確認する必要がある。

そこで本検証では, 事前設定済みのエッジデバイスとネットワークカメラ 4 台を著者宅に設置し, 以下の 2 点を確認する。第一に, 家庭側でネットワーク設定操作を行うことなく, カメラ映像を研究室の映像中継サーバーへ伝送し, ブラウザから閲覧できることを確認する。第二に, カメラの接続台数を 1 台から 4 台まで変化させ, 各条件におけるエッジデバイスの負荷とネットワーク帯域を測定する。

5.2 検証環境と手順

検証は著者宅において実施した。研究室において, Raspberry Pi 3 Model B を用いたエッジデバイスと TP-Link Tapo C200 を用いたネットワークカメラ 4 台を事前に設定した。エッジデバイスはカメラ専用のアクセスポイント, DHCP サーバー, VPN クライアント, および映像送信処理をあらかじめ設定した状態とした。家庭側での設置作業は, エッジデバイスを家庭のルーターへ有線 LAN ケーブルで接続し, エッジデバイスおよびカメラの電源を投入するのみである。

まず, 4 台のネットワークカメラをエッジデバイスのアクセスポイントに接続し, 研究室の映像中継サーバーを経由して各カメラ映像をブラウザから閲覧できるかを確認した。次に, カメラ台数増加時の負荷を確認するため, 接続するカメラ台数を 1 台, 2 台, 3 台, 4 台と変化させ, 各条件で測定を行った。各条件では, エッジデバイスとカメラを起動した後, 約 10 分間, エッジデバイス全体の CPU 使用率, 空きメモリ量, およびネットワーク帯域を 1 秒間隔で記録し, その平均値を算出し

た。ネットワーク帯域については、カメラからエッジデバイスへの入力帯域として無線 LAN インターフェース (wlan0) の受信量を、エッジデバイスから家庭内ネットワーク側への外部送信帯域として有線 LAN インターフェース (eth0) の送信量を用いた。

5.3 検証結果

検証の結果、家庭内でルーター設定の変更、ポート開放、固定 IP アドレス設定、カメラまたはエッジデバイスへのログイン操作を行うことなく、機器の設置と電源投入のみでシステムが稼働状態となることを確認した。また、4 台のネットワークカメラのいずれについても、著者宅の映像を研究室の映像中継サーバーへ伝送し、HLS、WebRTC、静止画のいずれにおいてもブラウザから閲覧できることを確認した。検証時のブラウザ画面を図 3 に示す。

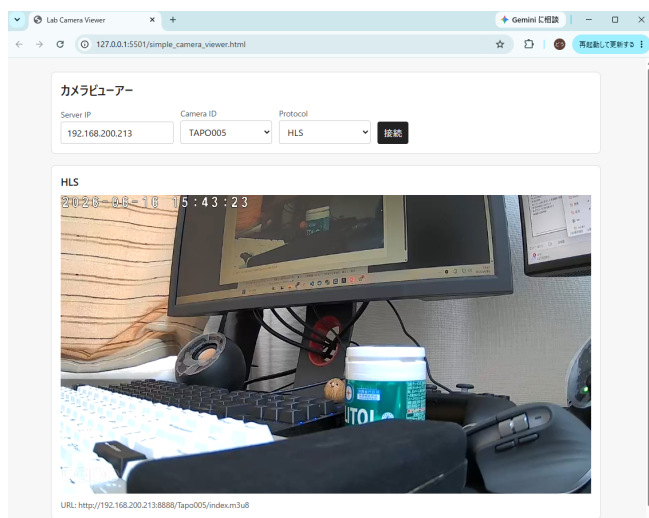


図 3: 著者宅の映像を確認したブラウザ画面

次に、カメラ台数ごとのエッジデバイス負荷の測定結果を表 2 に示す。表 2 より、カメラ台数の増加に伴い、CPU 使用率およびネットワーク帯域は増加した。一方で、4 台接続時においてもエッジデバイス全体の CPU 使用率は 18.35% にとどまり、空きメモリ量も 432.1MB であった。また、外部送信帯域は 4 台接続時でも 2.505Mbps であり、本実験条件では家庭側ネットワークに対する負荷は数 Mbps 程度に収まった。これらの結果から、本実験で用いた 4 台までの構成では、Raspberry Pi 3 Model B を用いたエッジデバイスにより、複数台のネットワークカメラ映像を同時に中継可能であることを確認した。

6. 考 察

動作検証の結果から、事前構成済みのエッジデバイスを用いることで設置時にネットワークの専門的な設定操作を一切必要とせずにシステムが稼働することを確認した。このことは、機器の設定が困難な高齢者世帯に対してもあらかじめ設定済みの機器を設置することで導入可能なシステムを構築できる可能性を示している。

また、カメラ台数を 1 台から 4 台まで増加させた場合の測定結果から、複数台カメラ接続時においてもエッジデバイスの負

荷は実用的な範囲に収まることを確認した。4 台接続時におけるエッジデバイス全体の平均 CPU 使用率は 18.35%、平均空きメモリは 432.1MB であり、CPU およびメモリの逼迫は確認されなかった。これは、エッジデバイス上ではカメラから取得した映像を再エンコードせずに中継しており、映像処理負荷を低く抑えられているためであると考えられる。したがって、本実験条件においては、Raspberry Pi 3 Model B のような小型計算機であっても、少なくとも 4 台程度のネットワークカメラ映像を同時に中継できる見通しが得られた。

ネットワーク帯域については、カメラ台数の増加に伴い、カメラからエッジデバイスへの入力帯域およびエッジデバイスから家庭内ネットワーク側への外部送信帯域が増加した。一方で、4 台接続時の平均外部送信帯域は 2.505Mbps であり、本実験条件では家庭側ネットワークに対する負荷は数 Mbps 程度に収まった。この結果は、複数サービスが各カメラへ個別にアクセスするのではなく、エッジデバイスがカメラあたり 1 本の映像ストリームを映像中継サーバーへ送信し、サーバー側で複数形式に再配信する構成の有効性を示している。

さらに、映像中継サーバーが複数形式で映像を提供することで、要件の異なるサービスが共通のカメラ映像を利用できる基盤が整った。低遅延映像閲覧を必要とするサービスは WebRTC を利用でき、ブラウザ互換性を重視する場合は HLS を利用できる。また、GORRS のように一定間隔の画像のみを必要とするサービスでは、静止画 API を利用することで、各サービス側で映像ストリームを直接処理する必要がなくなる。このように、映像の取得・中継・配信を共通基盤として分離することで、サービスごとのカメラ占有を避けつつ、サービスの要件に応じた映像利用が可能になると考えられる。

ただし、本検証における設置者は著者であり、検証も 1 世帯にとどまる。そのため、高齢者本人や非専門家による設置が容易であるかどうかについては、今後、被験者を伴う設置実験により検証する必要がある。

6.1 今後の課題

第一に、運用の柔軟性に関する課題がある。本システムでは、一度家庭に配備した後にカメラを追加・交換する場合、エッジデバイス内の映像送信設定を変更する必要があるが、家庭側での対応は難しい。サーバー側はストリーム識別子により追加の設定が不要で拡張できる一方、エッジデバイス側には設定作業が残るため、カメラの自動検出等によるエッジ側の自動設定機能の追加が今後の課題である。

第二に、セキュリティに関する課題がある。エッジデバイスとサーバー間の通信は VPN により暗号化されているが、現状の映像中継サーバーは受信・配信に対する認証機構を備えていない。本システムは高齢者宅の映像というプライバシーに関する情報を扱うため、ストリームの送受信に対する認証・認可の導入が必要である。

第三に、性能評価の拡充である。本研究では、カメラ 4 台までの短時間動作におけるエッジデバイス負荷とネットワーク帯域を確認したが、長期運用時の安定性、映像遅延、5 台以上のカメラ接続時の性能、および映像中継サーバー側の負荷につい

表 2: カメラ台数ごとのエッジデバイス負荷の平均値

カメラ台数	CPU 使用率 [%]	空きメモリ [MB]	入力帯域 [Mbps]	外部送信帯域 [Mbps]
1	8.65	497.9	0.629	0.790
2	13.18	476.6	1.031	1.324
3	14.86	451.1	1.406	1.815
4	18.35	432.1	1.953	2.505

ては十分に評価できていない。今後は、長時間連続稼働時のストリーム断やプロセス再起動の有無、配信プロトコルごとの遅延、カメラ台数増加時のサーバー負荷を定量的に評価する必要がある。

今後の展望として、本システムを用いて GORRS 等の既存サービスをネットワークカメラに対応させ、複数サービスによるカメラ共用の効果を実際のサービス上で検証することを予定している。

7. ま と め

本研究では、カメラを利用した在宅高齢者支援サービスの実運用に向けて、サービスごとに異なるカメラを使用すること起因する問題を解決するための、サービス横断型マルチカメラシステムを開発した。具体的には、エッジデバイスをアクセスポイント、DHCP サーバー、ゲートウェイとして動作させることで家庭ネットワーク非依存のエッジネットワークを構築し (A1)、VPN と SRT により家庭側から外部拠点へ低負荷に映像を送信し (A2)、映像中継サーバーによるストリームの集約・プロトコル変換・スナップショット生成により複数サービスへの映像提供を可能とした (A3)。動作検証の結果、家庭側でのネットワーク設定操作を一切行うことなく、設置と電源投入のみでカメラ映像を研究室サーバーへ伝送し、ブラウザから閲覧できることを確認した。また、カメラ台数を 1 台から 4 台まで変化させた負荷測定により、4 台接続時でもエッジデバイスの平均 CPU 使用率は 18.35%、平均外部送信帯域は 2.505Mbps にとどまり、本実験条件では複数台カメラの同時中継が可能であることを確認した。今後の課題としては、カメラ追加・交換時のエッジデバイス側設定の自動化、ストリーム送受信に対する認証機構の導入、長期運用時の安定性や映像遅延を含む性能評価の拡充が挙げられる。

謝 辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP25H01167, JP25K02946, JP25K24389, JP24K02765, JP24K02774, JP23K17006, JP23K28091, JP23K28383 の研究助成を受けて行われている。

文 献

- [1] 内閣府, “令和 6 年版高齢社会白書,” 2024. https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2024/zenbun/06pdf_index.html (Accessed on 2025/02/02).
- [2] T. Shindo, T. Nakata, S. Chen, S. Saiki, K. Yasuda, and M. Nakamura, “Recognizing and recording grasped objects for assisting elderly at home to find missing items,” 2025 IEEE/ACIS 29th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), pp.581–586, 2025.
- [3] 眞銅利典, 中田匠哉, 陳 思楠, 佐伯幸郎, 増田廣介, 露崎雄太,

安田 清, 中村匡秀, “物の置き場所忘れを防止する把持物体認識記録サービス gorrs の実装,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.125, no.400, pp.48–54, 2026.

- [4] 神谷 岳, 中田匠哉, 増田廣介, 露崎雄太, 陳 思楠, 安田 清, 中村匡秀, “外出時の忘れ物を防止する身支度サポートサービス「モッテコ」の開発,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.125, no.423, pp.52–59, 2026.
- [5] S. Chen, L. Kong, Z. Tong, Y. Yamaguchi, and M. Nakamura, “Towards sensor-based mobility assessment for older adults: A multimodal framework integrating posenet gait dynamics and inbody composition,” *Sensors*, vol. 25, no. 18, Article 1878, Sept. 2025.
- [6] ZoneMinder, “ZoneMinder Documentation,” <https://zoneminder.readthedocs.io/en/latest/userguide/introduction.html>, 2026. Accessed: 2026-06-23.
- [7] H.S. Inc., “The SRT Protocol,” <https://haivision.github.io/srt-rfc/draft-sharabayko-srt.html>, 2024. Accessed: 2026-06-16.
- [8] Raspberry Pi Ltd, “Raspberry Pi computer hardware,” <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>, 2026. Accessed: Jun. 16, 2026.
- [9] TP-Link, “Tapo C200 | パンチルトネットワーク Wi-Fi カメラ,” <https://www.tp-link.com/jp/smart-home/tapo/tapo-c200/#specifications>, 2026. Accessed: Jun. 16, 2026.
- [10] Tailscale Inc., “What is tailscale?,” <https://tailscale.com/docs/concepts/what-is-tailscale>, 2025. Last validated: Sep. 30, 2025; accessed Jun. 16, 2026.
- [11] MediaMTX, “Introduction,” <https://mediamtx.org/docs/kickoff/introduction>, 2026. Accessed: Jun. 16, 2026.