エージェント型スライス制御機構に基づくリアクティブネットワーク構成法

門脇伸明 [1,a)]　笹井一人 [2,b)]　北形元 [2,c)]　木下哲男 [2,d)]

外出先での接続やゲストの来訪時や会議など，常時の利用が想定されていない一時的なネットワークを臨時に構築するには，管理者による随時の設定変更が必要になるため，負担の増大を招いている．利用者の複雑な要求に対応したサービスの提供を目的として，利用者の位置やデバイスとの距離，現実世界における振る舞い，社会的役割などの情報を用いて状況に応じてアプリケーションを制御する研究が行われており，IoT 技術やサイバーフィジカルシステムの発展に伴い，実現可能性が高まっている．そこで，本稿では，利用者指向のアプリケーション制御をネットワーク制御へ拡張し，ネットワークインフラが，利用者の活動から意図を推定し，利用者個別に仮想のネットワークの提供を行う，リアクティブネットワーク構成手法を提案する．また，デバイスと利用者の空間的近傍性に応じたネットワークの構成や災害時の屋内避難誘導を想定したロボットが管理ネットワーク外において，他ドメインから自律的にネットワークを借用してタスクを遂行するシナリオを想定した実験を行い，有効性を示す．

1. はじめに

Bring Your Own Device (BYOD)やスマートデバイスの普及により，端末の数が爆発的に増加するとともに，ネットワークの利用形態や目的が多様化している．利用形態が動的に変化するため，事前の静的なネットワーク機器への設定では対応が困難であり，管理者による随時の設定変更が必要になるため，負担の増大を招いている[1]．複雑な利用者の要求に対して，柔軟にネットワーク接続を提供する仕組みとして，複雑な利用者の要求に対して，柔軟にネットワーク接続を提供する仕組みとして， Software-defined Network 技術を用いて利用者の要求や状況を考慮し，動的に利用者に応じたネットワークを仮想のネットワークであるスライスとして構成する研究が行われている[2]．特に，ホームネットワークの分野においては，ネットワークに不慣れな利用者や外部の来訪者，他の家庭とのネットワークや端末の共有などを想定し，セキュリティを保ちつつ，利用者に応じたネットワークを構成する研究が行われている[3][4].

一方，現在のネットワーク環境において，外出先での接続やゲストの来訪時や会議など，常時の利用が想定されていない一時的なネットワークを臨時に構築する場合は，ネットワーク管理者がその都度ネットワーク機器の設定変更を行う必要があり，これには手間と時間を要するため負担となっている．このような利用者の複雑な要求に対応したサービスの提供を目的として，利用者の位置やデバイスとの距離，現実世界における振る舞い，社会的役割などの情報を用いて状況に応じてアプリケーションを制御する研究が行われており，IoT 技術やサイバーフィジカルシステムの発展に伴い，実現可能性が高まっている[5].

本研究では，利用者指向のサービス提供をネットワーク制御へと拡張し，ネットワークインフラ自体が，管理者の代わりとなって，利用者の活動から意図を推定し，それに基づいて柔軟にネットワークの提供を行う,「リアクティブネットワーク構成手法」を提案する．本稿では，提案手法を実現するためのアプローチとして，スイッチやコントローラ上に配置したエージェントがネットワークを制御する，エージェント型スライス制御機構を基にして試作システムを設計する．応用例として，ゲストへの一時的なネットワークの提供を想定し，利用者の現実空間における行動やデバイスと利用者の空間的近傍性に応じてネットワークを構成する実験，および管理ドメインの異なる複数ネットワークにおける，災害時の屋内避難誘導を想定したロボットが管理ネットワーク外において，他ドメインから自律的にネットワークを借用してタスクを遂行するシナリオを想定した実験を行い，提案手法の実現可能性を検証する．

2. 関連研究と技術的課題

自律的にネットワークを制御するための枠組みとして，自律コンピューティング(Autonomic Computing)に基づくネットワーク管理手法が提案されている[7]．しかしながら自律コンピューティングの枠組みは，ネットワーク上の各機器が自律性を持つという枠組みであり，これらの機能を実現するための，状況認識は機器に搭載された情報収集機構に依存しているため，環境によって異なる IoT デバイスおよび多種多様な利用者情報基盤と協調連携を行い，利用者や現実空間の状況を考慮したネットワークの制御を行うことは困難である．

また，デバイスにまたがるネットワーク制御を実現している例として，Software-defined Network (SDN)技術を活用し，利用者の一時的な利用目的に応じて必要なデバイスで構成されるネットワーク構築手法が提案されている[2]．し

[1] 東北大学大学院 情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University
[2] 東北大学 電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University
[a)] kadowaki@k.riec.tohoku.ac.jp
[b)] kazuto@riec.tohoku.ac.jp
[c)] minatsu@riec.tohoku.ac.jp
[d)] kino@riec.tohoku.ac.jp

かしながら，この手法ではネットワークや接続先端末のアドレスなどの論理的仕様を利用者が把握し，明示的に要求を行う必要がある．そのため，管理者が不在の状況では，利用者自らが普段利用していないネットワークにおける論理的な仕様を把握し，一時的な利用目的に応じたネットワークを即座に構築するのは困難である．

さらに，近年では，自律的なネットワーク制御手法としては SDN と知的エージェント技術を組み合わせて用いた手法[8]が提案されている．この手法では，管理主体やポリシが異なるネットワークとしてインターネット上の Autonomous System (AS)に着目し，各 AS ネットワークをエージェントが代表して制御を行う．各ネットワークを担当する複数のエージェント間で協調して動作することにより，攻撃先の AS による分散 DoS 攻撃の検知に連動した発生源 AS における攻撃の遮断など，管理主体の異なるネットワークを横断するオペレーションを効果的に実現している．しかし，こうした管理ドメインの違いによる情報格差や，利用者と管理者の間の意図のギャップは，AS などの大規模なネットワークだけではなく，利用者に近い末端のネットワークにも存在する．そのような場合においては，一次的なネットワーク利用の際の意図のギャップを埋めることは難しく，利用者が不便を受け入れるか，管理者がリスクを取るかというトレードオフが存在している．

そこで本稿では，エージェント型スライス制御機構に基づく，スイッチやコントローラ上に配置したエージェントによる利用者の活動に応じたリアクティブなネットワーク構成手法を提案する．ここでは，利用者側に近いネットワークの管理ドメインの差異に着目し，各ドメインを代表して自律的に制御を行う知的なエージェントが利用者の情報や現実空間の状況を判断するエージェント，エージェント型スライス制御機構と連携することで，センサや IoT デバイスを活用してネットワークが利用者の活動を把握し，利用者個別のネットワークを構成する．

3. リアクティブネットワーク構成法

管理者による一時的なネットワークの構成の流れと手順を図 1 に示す．まず，利用者の要望や挙動などの状況に基づき，利用者のネットワークの利用目的や要件を推定する．次に，推定した要件をネットワークの提供ポリシと照らし合わせ，接続したい端末を網羅するネットワークの仕様に具体化を行う．そして，次に，具体化した仕様がネットワークの利用ポリシに違反しないかを監査し，違反しないようアクセスの制御を仕様として考慮し，提供するネットワークの設計を行う．最後にネットワークの実装として，設計内容を実現するにあたって必要なネットワーク機器の設定コマンドなどに変換を行い，設定を行う．本手法では上述の流れに従い，利用者の活動に応じてネットワークを

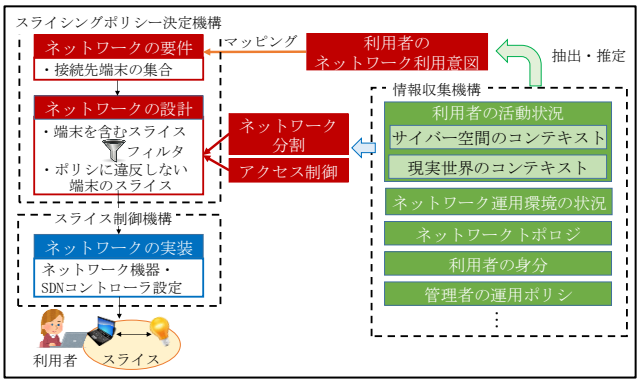

図 1 即時的なネットワーク提供の流れ

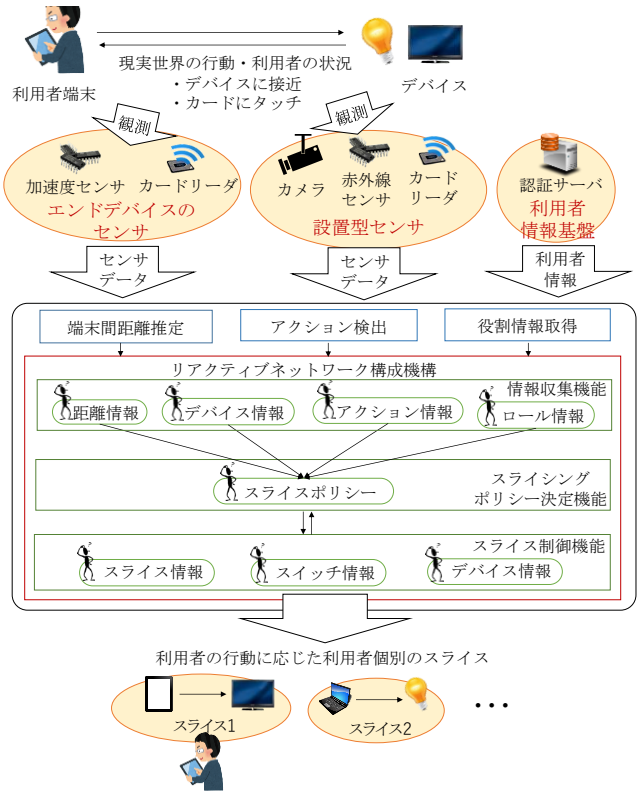

図 2 リアクティブネットワーク構成機構

構成する．

図 2 に，エージェント型スライス制御機構に基づくリアクティブネットワーク構成法の概要を示す．本手法は，多種多様なセンサや利用者情報基盤から断片的に得られる情報を知的なエージェントが統合し，エージェント間の連携により，利用者のネットワークに対する要件を推定する．また，従来のネットワークではサブネットや VLAN などの固定的な端末から構成されるネットワークを用いて実現していたが，従来のサブネットや VLAN によらない端末から構成される仮想のネットワークであるスライスを用いて設計・実装を行うことで，利用者に対して提供するネットワークの自由度・柔軟度を向上する．ネットワーク実装の段階では，スライス制御機構に対してスライス生成要求発行することで，ネットワーク機器への設定を行い，利用者に応じたネットワークを動的に構成する．

3.1 情報収集機能

利用者や状況に応じてネットワークを自律的に構成するために，ネットワークドメインの仕様に加えて，利用者やネットワーク運用環境，利用者がネットワークを通して利用するサービスなどの情報を収集し，把握する機能が必要である．本節では，本機能において収集し，考慮されるべき情報の定義を述べる．

管理者は管理ドメインや組織体系，利用者の所属グループに応じて，ネットワークを VLAN やサブネットに分割して最小のネットワーク単位として運用を行う．本稿で扱う管理ドメイン$d(\in D)$を，以下のネットワークの情報を用いて定義する．

$$d = \{i, G, H, S\} \tag{1}$$

ここでiはサブネットのネットワークアドレスや VLAN ID などのネットワークの識別子，G はドメインを管理もしくは利用する組織の単位であるグループの集合，H を参加する端末の集合，S をドメイン内のネットワークサービスの集合とする．

次に，利用者の利用目的に応じたサービスを提供するために，ネットワーク内で動作している各端末上のサービス$s(\in S)$情報として下記のように定義する．

$$s = \{t, l, h, m\} \tag{2}$$

ここで，tはサービスの種類，lは特定の場所において提供しているサービスの場所，hはサービスをホスティングする端末，mはデバイスやサービスを提供しているソフトウェアの種類を表す．ここで，特定の部屋向けのネットワークなど，物理的な位置に対応して運用されているネットワークドメインであれば，dよりl を導出する．これらの情報をサービス発見プロトコルや機器に設定された情報を元に統合する．以上により，一時的にネットワークを利用し，ネットワーク動作しているサービスやアドレス体系などの論理仕様を知らない利用者が利用を希望するサービスに応じたスライス構築を可能とする．

最後に，管理者が利用者の身元や挙動を元に利用者の利用したいネットワークサービスを推定し，認可するのと同様に，エージェントによって推定された利用者の活動を，センサや認証サーバなどの利用者情報基盤を用いて以下のように表現する

$$u = \{h_u, G, l\} \tag{3}$$

ここでh_uは利用者端末，Gは利用者の所属グループの集合，lは利用者の位置とする．また，ネットワークが把握する利用者や運用しているネットワークドメインdが提供される場所lの環境についての状況に関するコンテキスト情報cの集合Cとして以下で定義する．

$$C = \{d, l, c\} \tag{4}$$

これらの情報は，ネットワーク内のセンサやデバイスおよび利用者情報基盤から，各情報源の仕様や制御知識を保持した知的なエージェントが取得する．一般に，運用環境によって利用可能な情報資源が異なるため，エージェント間で連携することで，センサや利用者情報基盤から取得される断片的な情報を統合し，利用者の活動や社会的役割など情報を補完し，推定する．

3.2 スライシングポリシ決定機能

情報収集機能で取得した情報に基づき，利用者に対して提供するスライスの要件を定める．この要件を基に，エージェント型スライス制御機構に対してスライスの生成を要求することで，動的に利用者の活動に応じたネッワークを構成する．

具体的には，情報収集機能にて収集したコンテキスト情報cや利用者の情報uなどの利用者の活動に関わる情報に基づき，利用者に対してネットワークサービスや接続性を提供する際の要件をポリシP_{pro}として定義し，ポリシや上述の情報から利用目的などのユーザのネットワークの利用意図の推定を行う．推定したネットワークの利用意図に基づき，利用意図を満たすネットワークの要件を推定し，接続先の端末H_{req}を決定する．なお，利用者の活動としては端末やサービスに対応付けられた NFC カードのタッチ, 特定の端末に近づくなどの行動を想定しており，これらのユーザの活動を端末などに紐付けられたセンサや NFC リーダ，カメラなどの情報源より推定する．なお，ネットワークの論理的な仕様に詳しい利用者やロボットなどがネットワークを利用し，明示的に特定の端末の利用を要求し場合は，要求された端末を接続先の端末H_{req}として決定する．

以上により，情報収集機能の情報から抽出したユーザの所属や活動からポリシP_{pro}により利用者uが利用を希望したと推定された端末のリストH_{req}に対して利用者の端末$h_u(\in u)$が接続を行うための仮想のネットワークであるスライスの生成要求Rを発行する．

$$R = \{H_{\mathrm{req}}, u\} \tag{5}$$

なお, 外部からの来訪者などが未知の接続先端末に対して，サービスの種類$t(\in s)$を指定して接続を行いたい端末を指定した場合，指定された種類tのサービスsをホスティングするデバイス$h_s(\in s)$をH_{req}の要素とする．

このように，スライシングポリシ決定機能では，スマート環境の情報源や利用者情報基盤より取得した利用者の所属や活動の情報を基にユーザの利用を希望する端末を推定し，提供するスライスの要件を決定する．

一方で，管理者はセキュリティの観点から，管理ドメインや組織体系，ネットワークの位置を VLAN やサブネットなどのネットワークの単位に対応付けて，その単位でネットワークの不必要な利用を制限するポリシを定める. 特に，外部からの利用者を想定する場合はゲスト用のネットワー

クを個別に用意して特別なポリシを適用する．そのため，スライシングポリシ決定機能では，決定した要件がドメイン単位で定められた管理者によるアクセス制限などのポリシP_{res}に違反していないかを確認した上で，発行されたスライス生成要求Rの端末H_{req}へのアクセスを利用者の端末h_uに対して認可するか否かを判定する．その上で，要求に含まれる端末H_{req}からポリシP_{res}により利用者のアクセスを制限された端末の集合H_{res}を取り除いた端末H_{gra}から構成されるスライス生成要求を最終的なスライス生成要求R'として以下の式に従い生成する．

$$H_{\mathrm{sli}} = H_{\mathrm{req}} - H_{\mathrm{res}} \tag{6}$$

$$R' = \{H_{\mathrm{gra}}, u\} \tag{7}$$

なお，センサなどの情報に基づき，従来のコンテキストアウェア手法などを用いて，ゲストの位置や災害時などの緊急時か否かなどの状況を判断し，活性化するポリシP_{pro}，P_{res}を動的に変化させる．

3.3 スライス制御機能

スライス制御機能は，従来の管理者によって事前に用意された VLAN やサブネットなどのネットワークを超えて，利用者が必要とするデバイスのみで構成される仮想的なネットワークを，利用者個別にスライスとして動的に生成する．スライスを利用者に対して個別に構成することで，セキュアで，動的に変化する様々な利用者の行動に対応したネットワークを提供する．

スライシングポリシ決定機能により，接続を認可された端末と利用者を含めたスライス生成要求R'から，接続先端末の集合H_{gra}の要素と利用者の端末h_uからなるスライスに登録する端末H_{sli}からスライス$v(\in V)$を生成する．

$$v = \{H_{\mathrm{sli}}, t_e\} \tag{7}$$

なお，このスライスは状況が変化し，利用者要求が新たに発行されるか，予め定められた有効期限t_eが過ぎた後削除され，一時的なユーザの状況に応じたネットワークの提供が永続的に続き，セキュリティ上のリスクが増加することを防止する．以上により，利用者の端末と接続先の端末から構成されるスライスを生成することで，専用のスライスを利用者に対して個別に提供する．

3.4 リアクティブネットワーク構成機構

図 3 にリアクティブネットワーク構成機構の連携制御モデルを示す．本機構は(1)情報収集機能，(2)スライシングポリシ決定機能，(3)スライス制御機能の機能を知識として持ったエージェント群と各管理ドメインに配置された管理者の代理に相当するドメイン管理エージェントから構成される．

(1)情報収集機能のエージェント群では，センサやデバイスの制御知識を保持したセンサエージェントやデバイスエージェントが，センサやデバイスを制御して，収集したデータの多種多様な出力形式や動作仕様の差異を吸収し，センサデータやサービス情報，利用者の認証情報を上位のコンテキストエージェント，サービス情報エージェント，ユーザ情報エージェントに送信する．コンテキストエージェントは下位の多様なセンサエージェントと連携することで，断片的な情報を統合し，距離推定手法やアクションの検出手法などの知識を持ったエージェントと連携し，現実空間や利用者の状況などをデータから解釈し，コンテキスト情報として保持する．また，コンテキスト情報から得られた情報を必要に応じてユーザ情報エージェントに対してユーザの活動などの情報を通知する．このように，ネットワーク内の情報に限らず，多様なセンサやスマートデバイスを制御するエージェント群と協調することで，現実空間や利用者の状況の考慮を可能とする．

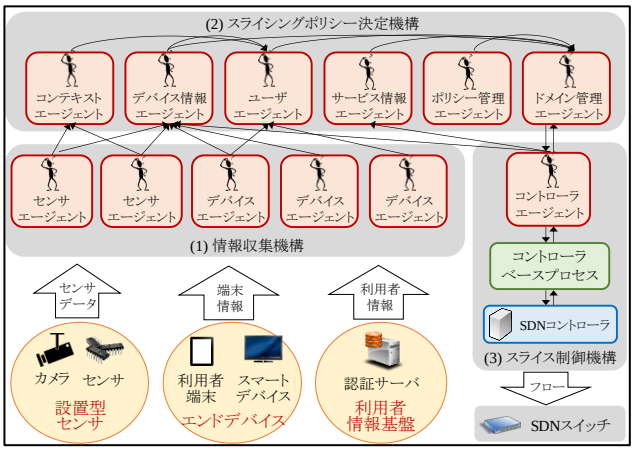

図 3 エージェント型リアクティブネットワーク構成機構

また，サービス情報エージェントは下位のデバイスエージェントから収集されるデバイスの状況や提供サービスの概要などの情報およびサービス発見プロトコルを用いて自らが発見したサービス情報を保持し，スライシングポリシ決定機能にて必要になった際にネットワーク内のサービス情報を提供する．また，ドメイン情報エージェントは下位のデバイスエージェントからの情報や名前解決プロトコルを用いて自らが収集した情報を基にドメインのネットワークアドレスやドメインに参加している端末の情報を保持する．

次に，(2)スライシングポリシ決定機能を持つエージェントとしてスライシングポリシエージェントが，コンテキストエージェントやユーザエージェントと協調することで，各利用者のネットワークに対する要件を推定する．その要件を基に，スライスに参加させる端末が，管理者によって定められたポリシに違反していないかを監査した上で，スライス生成要求を発行し，ドメイン管理エージェントに送信する．ドメイン管理エージェントはスライス生成要求中

の端末に自らの管理するドメイン外の端末が含まれていた場合，他のドメイン管理エージェントにスライス生成の要求を転送し，他のドメインにおけるポリシに反していなければ，スライスに他のドメインの端末を追加するようスライス制御機能を持つエージェントにスライス生成要求を送信する．

(3)スライス制御機能を持つエージェント群は，ポリシに従い，SDN コントローラの制御知識を保持するコントローラエージェントがコントローラを介して SDN スイッチの挙動を制御し，スライスを生成する．なお，ネットワークの規模や管理ドメインの違いによっては SDN コントローラが複数存在することが考えられるため，このコントローラエージェント間で協調して，複数コントローラを含めたネットワークにおけるスライス制御を可能とする．

以上の通り，従来はネットワークで連携することのなかったセンサやスマートデバイス，利用者情報基盤などの情報を知識として保持したエージェントを，SDN コントローラの制御知識を持つエージェントと連携して動作させることで，現実空間や利用者の状況に基づいたスライス制御を実現する．さらに，ネットワークドメインを管理するエージェントがネットワークドメインを代表して制御を行い，他のネットワークドメインのドメイン管理エージェントと協調することで，ドメインの管理主体の差異を考慮したネットワーク制御を行う．

4. 実装と評価実験

4.1 試作システムの実装

3 章の提案に基づき，各エージェントおよびエージェントが制御するプログラムであるベースプロセスの実装を行い，試作システムを作成した．また，SDN 技術として OpenFlow を用いた．OpenFlow コントローラには OpenDaylight を使用し，スライスは，ベースプロセスから REST API 経由で OpenDaylight の Virtual Tenant Network (VTN)生成機能を用いて生成した．スライス$v = \{H_{\mathrm{sli}}, t_e\}$として生成した仮想テナントネットワークにマッピングする端末の MAC アドレスのリストをH_{sli}，VTN のタイムアウト時間をt_eとして実装した．ドメイン情報エージェントはネットワーク機器や端末のアドレス情報を， Link local Multicast Name Resolution (LLMNR)や Address Resolution Protocol (ARP)によりネットワーク内の OpenFlow スイッチや端末の情報を収集する OpenDaylight 内のデータベースを用いて取得した．また，サービス情報エージェントは，Universal Plug and Play (UPnP)のサービス発見プロトコル Simple Service Discovery Protocol (SSDP)を用いたクライアント制御知識およびサービスの種類と機種名の対応付けの知識を保持した UPnP エージェントより，端末とサービス情報を取得する．UPnP の SSDP を用いてサービスを保持

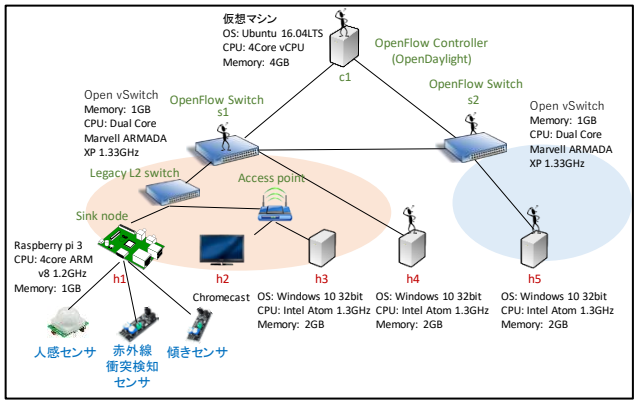

図 4 実験構成図

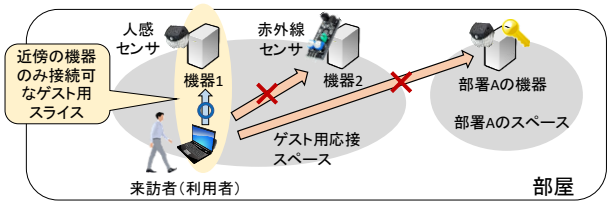

図 5 空間的近傍性を考慮したスライスの構築

表 1 XML の要素と変数の対応付け

XML の要素	対応付ける変数
URLBase	h
modelName	m
serviceType, modelName	t

している端末を探索し，返答メッセージを基にデバイスの提供機能や情報を記した XML データより，サービス情報を取得する． 取得した XML データの要素とサービス情報$s_j = \{t, d, l, h\}$の変数は下記のように対応付を行った．なお，サービスの種類 t に関しては，UPnP において近年の IoT デバイスに適合した分類が実装されていないため，XML の serviceType 要素と modelName 要素から，“smartTV”, “smartLight”などの独自に定義したサービス種類の要素に対応付けを行う知識を UPnP エージェントに保持させた．デバイスやサービスの制御に必要なエージェントは機種名mを基に対応する制御知識を保持するデバイスエージェントを検索し，端末に応じて自律的に連携するための組織を構成する． 本実装では，デバイスエージェントとしてスマート TV とした Chromecast に，指定された URL 上の任意の画像を表示するプログラム及び制御知識を保持した TV Agent, 傾き検知センサと人感センサの 2 値情報の解釈や制御知識を保持した各 Sensor Agent を実装した．このように動作仕様が異なる多様なセンサやスマートデバイスをエージェントにより制御し，エージェントとして抽象化して協調することで，環境によって異なる多様な端末の仕様の差異を吸収する．

実験環境を図 4 に示す．コントローラエージェントはコントローラが動作する c1，センサエージェントとデバイス

エージェントは各機器 h1 から h5，それ以外のエージェントはゲートウェイとなる OpenFlow スイッチとして動作する機器の上に配置した．なお，Chromecast はインターネット接続が必要だが，OpenDaylight によるルーティングの機能の実装が完了していないため，Chromecast 用にインターネットへ接続可能なルータを配置した．

4.2 動作実験 1

エージェント型スライス制御機構の応用例として，現実空間の利用者の活動に連動し，リアクティブにネットワークを構成するシステム動作実験を行う．具体的には，設置型センサや利用者デバイス，利用者認証サーバの情報から，利用者の位置やアクションを検出し，利用者が行いたい行動に応じたアクションを起こした場合に，利用者が接続したいデバイスを推定し，利用者デバイスと接続先デバイスのためのスライスを動的に生成する．本実験では，端末のアドレス情報を知らないなど，ネットワークに不慣れな利用者がゲストとして訪問したネットワークにおいて，従来のようにホスト名やアドレス情報を指定するのではなく，利用者と端末の空間的近傍性に基づいて利用者の利用したい端末を推定し，端末と接続するための利用者個別のスライスを提供するシナリオを想定した動作実験を行った．また，ネットワークによる現実空間の状況の認識の例として，接続先のスマートデバイスに搭載されたセンサを利用したとして想定して，端末に対応付けたセンサを用いて，端末と利用者の近傍性を推定した．具体的には人感センサや赤外線衝突検知センサが反応したという情報をセンサエージェントが検知した場合，全エージェントに対してセンサの対応付いている端末の情報と共にセンサの位置情報を送信する．コンテキストエージェントは，センサエージェントの情報をコンテキスト情報として保持し，利用者がセンサの反応した端末の前にいると判断し，利用者の位置$l_u(\in u)$を端末の位置$l_d(\in \mathrm{s})$と同一にするようにした．この情報に基づきスライシングポリシpとして，端末の位置l_dと利用者の位置l_uが同一になった場合に利用者が当該端末の利用を希望していると判断するものとした．そして，ポリシにより利用者端末h_uと当該端末の集合H_{req}からなるスライス生成要求を発行する．なお，実験には端末 h2，h3，利用者の端末として h4，センサとして人感センサと赤外線衝突検知センサを用いて，人感センサは h2，赤外線衝突検知センサは h3 に対応付づくよう，デバイスエージェントに知識を保持させた．以上により，リアクティブネットワーク構成機構により利用者が必要とするデバイスに接続するための利用者専用のスライスが生成されることを確認する．

表 1 に利用者端末の全端末への通信到達性を測定した結果を示す．実験結果より，利用者が h2 の前に移動した際は h4 からは h2 にのみが通信到達し，h3 の前に移動した際は h4 から h3 にのみ通信が到達し，センサを通して認識した利用者の位置に応じて，スライスが生成され，現実空間の状況に応じて不慣れな利用者に対して接続したい端末に接続可能なネットワークが提供されたことを確認した．

表 2　h4 から各端末への通信到達性

ユーザの位置	h2	h3	h4
h2 の前	○	×	○
h3 の前	×	○	○

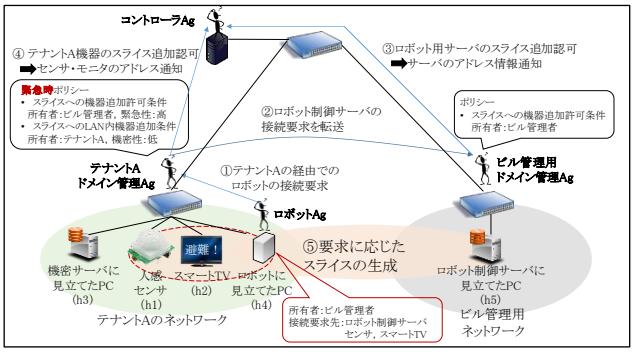

図 6 動作実験 2 のシナリオ

以上の結果より，エージェントとして動作させた OpenFlow コントローラが他のエージェントと連携することにより，利用者に対して個別のスライスが動的に生成可能であることを確認した．

4.3 動作実験 2

本システムに基づく応用例として，災害時の屋内における避難誘導ロボットが災害現場の管理主体の異なるネットワークと協調して，現場のセンサやアクチュエータとなる機器と連携して動作するためのネットワークを構築する例を想定した動作確認実験を行う．この実験により，管理主体の異なる複数ネットワーク間でのオペレーションやロボットを利用者と見立てたときの緊急時の一時的なネットワークの提供が可能かを確認する．

これまで災害時の屋内でのロボットを活用した避難誘導や捜索に関する研究が行われているが[9]，これらは災害時にも到達可能なロボット向けのネットワークが提供されている前提で動作する．しかし，災害時は予期しない断線により用意されたネットワークの使用が困難であり，ロボットが動作する範囲を全て網羅するネットワークを用意するのは困難であると考えられる．また，災害時にロボットと可動式の無線センサネットワークが協調することで，災害時のオペレーションの効率を向上する提案も行われており[10]，災害現場に設置してある管理ドメインの異なるネットワーク内のセンサを活用することができれば，更なる効率の向上が期待される．そこで，本実験では災害時にビル管理者が所有するロボットが利用するビル管理用のネットワークの回線断絶をシナリオとして想定し，管理ドメインの異なるネットワークと連携した実験を行う．

図 6 に示したように，ビル管理者が所有する災害対応や

巡回を行うロボットが下記のフェーズに従って，オペレーションを行う想定で，利用目的に応じたネットワークを動的に構成する動作実験を行う．

① 地震により回線喪失したとして，テナントAからビル管理用のロボット制御サーバに接続
② テナントAのセンサと連携して，巡回
③ テナントAのスマートTVと連携して避難誘導

具体的には，ロボット h6 がビル管理者のネットワークドメインd_B内のロボット制御用のサーバに見立てた端末 h5 に接続し，加えて現場のテナント A に避難の必要がある人の有無を確認するために，テナントAのネットワークd_A内の人感センサのシンクノード h1 や避難誘導の地図を表示するためのスマート TV に見立てた機器 h3 に接続を行い，これらの機器とロボットが連携した避難誘導を行う状況を想定する．なお，本実験でネットワークの利用者とするロボットの属性を，端末$h_u = h6$，位置$l = \text{tenantA}$，所属グループ$g = \text{buldingAdmin}$として，接続先の端末をサービスの種類t =(sensor, smartTV, robotcontroller)を指定して接続要求を発行したと想定する．このサービスの種類に合致する端末を利用者が接続を要求していると推定するポリシ$p_0 \in P_{\text{pro}}$により，接続先端末を決定する．

また，d_Aにおけるアクセス制御ポリシP_{res}として 2 つ定義し，平時のポリシp_1としてテナントA以外の外部利用者は LAN 内の全ての端末に対するアクセスを禁止し，緊急時のポリシp_2として，tenantA以外の利用者による，緊急時対応に不必要な機密データを保持するサーバ h2 へのアクセスを制限するポリシをポリシ管理エージェントに保持させた．これにより，緊急時に限ってネットワーク内の IoT デバイスやセンサなどを利用できるよう想定したポリシを設定した．また，ロボットが普段所属するビル管理者のネットワークドメインは，アクセス制御ポリシとしてビル管理者のグループに所属する端末のみをビル管理用のネットワーク内の端末に接続を許可するアクセス制御ポリシを設定した．また，ネットワークによる現実空間の状況の認識の例としてテナントA内の傾き検知センサのセンサエージェントが複数回振動を検知した時点で，コンテキストエージェントが地震を感知して緊急時だと認識したコンテキスト情報により，平時のポリシp_1から緊急時のポリシp_2が活性化し切り替わる実装とした． つまり，傾き検知センサにより緊急時か否かを検知し，平時は不必要に外部の端末に対して接続を許可しないが，緊急時には公共性の高いビル管理者の保有するロボットなどの端末に対しては機密サーバ以外の端末へのアクセスを許可し，公共性が高いロボットが災害時に限って，現場の IoT デバイスと協調したオペレーションを可能とするネットワークを生成する．

実験手順を以下に示す．

1. テナント A の傾き検知センサが地震による振動を感知し，緊急時のアクセス制御ポリシp_2に切り替え
2. ロボットが回線の破損によりビル管理用のネットワークから切断
3. ロボットが現在地で災害現場のテナント A のネットワークを発見
4. テナント A の管理者エージェントのみに接続可能なオープンな無線ネットワークにロボットが接続
5. ロボット上のエージェントがビル管理用のネットワーク内の既知のロボット制御サーバである端末 h5 との接続を要求
6. ビル管理用のネットワーク管理者エージェントがロボットの接続を許可
7. テナント A とビル管理用のネットワーク管理者エージェント間で協調しロボットと制御サーバの専用スライスを生成
8. ロボット制御サーバから避難誘導の指示を受けて，テナント A の未知のセンサとスマート TV への接続を要求
9. 管理者エージェントが自身のネットワークのデバイス情報を基にセンサとスマート TV の端末を特定
10. 管理者エージェントが，センサとスマート TV をロボットとのスライスに追加し，アドレス情報をロボットのエージェントに通知
11. ロボットエージェントが通知された端末情報を基にセンサとスマート TV に接続
12. ロボットが接続した人感センサから人の存在を感知
13. ロボットがスマート TV に接続し，避難誘導の地図を表示する

実験時のスライス制御機構の動作を以下に記述する．ステップ 1 において，センサエージェントからの発報により地震が感知され緊急時であると状況を認識したコンテキストエージェントが発報し，ポリシ管理エージェントが反応して知識として保持しているポリシをp_1から緊急時のポリシp_2に切り替えた．次にステップ 6 において，ロボットエージェントから接続要求を受け取ったテナントAのドメイン管理エージェントはデバイス情報管理エージェントへの問い合わせの結果，接続要求の端末が自身の管理する端末に一致しないと判断し，他の全てのドメイン管理エージェントに接続要求を転送し，テナント A に接続されたロボット用のスライスの生成をコントローラエージェントに送信する．ビル管理者のドメイン管理エージェントが自身のドメイン内の端末への接続要求に対して反応し，接続要求元がビル管理者のグループに属したロボットであるため，ポリシ管理エージェントが制御用サーバへのアクセスを認可して，ドメイン管理エージェントがコントローラエージェントにスライスへの端末の追加を依頼する．これにより，ドメイン管理エージェントが自律的に反応して協調することで，複数のネットワークドメインを介した端末の接続を実現する．さらに，ステップ 8～9 では，ロボットがテナン

表 3 振動感知前後の h4 から各端末への通信到達性

	h1	h2	h3	h4	h5
振動感知以前	×	×	×	○	○
振動感知以後	○	○	×	○	○

トAのネットワークの仕様やデバイスの情報が未知であるため，サービスや端末の種類を指定してドメイン管理エージェントに要求を送信する．それを受けてドメイン管理エージェントがサービス情報エージェントやデバイス情報エージェントに問い合わせを行い，サービスをホスティングする端末をデバイス情報エージェントが収集した情報を元に特定し，接続要求対象の端末として，スライス生成要求を発行する．その際に，特定したサービスと端末の情報をロボットに対して通知することで，ロボットが接続可能な端末を把握し,行えるオペレーションを自律的に判断した．このように，普段利用しないネットワークにおいて論理的な仕様を把握していなくても，利用したい種類を指定することで，利用者の活動に応じて，ネットワークを提供可能とする．加えて，既存のアプリケーション上のサービス発見プロトコルを利用したサービス発見では，利用者の端末からサービス問い合わせに相当する通信が届くサービスを提供する端末に到達する必要がある．つまり，ゲストを隔離せずにネットワーク全体へ通信が到達可能な状態でサービス発見を行う必要があるが，従来のゲストが隔離されたネットワークではサービス発見が行えない．しかし，本手法により，デバイス情報エージェントがサービス発見を行った上で管理者エージェントにのみ通信が到達可能な状態で問い合わせを行うことで，利用者端末の不必要な接続を防止しつつ必要な端末への接続が可能なネットワークを提供することが可能となる．

以上により，緊急時には利用者であるロボットの要求に応じて動的に，管理者が指定したポリシに違反しない範囲で現場の機器とロボットの連携に必要なネットワークを自律的に構成する例を示した．

なお，緊急事態としてセンサが地震を検知する前後にロボットが全ての端末に対しての通信を要求した際の到達性を測定した結果を表 3 に示す．

緊急事態と判断する前では，テナント A の端末に対して外部の端末からのアクセスを一切遮断しつつも，テナント A のネットワークを用いてビル管理のネットワーク内端末へは通信が行えている．対して，緊急事態と判断してロボットより要求が行われた後は，テナント A の機密サーバ以外に対しては，ビル管理者の端末であるロボットからは通信が到達していることが確認できた．

以上の実験結果より，ネットワーク自身が現実の状況をセンサなどの機器と連携することにより把握し，緊急時と平時の認識を自律的に切り替え，状況に応じてネットワークの挙動を変えたことを確認した．また，緊急時での特定端末への接続の禁止する管理者のポリシに違反しない範囲で，ネットワークの利用者であるロボットの要求に応じて現場の端末と連携した対応を行うためのロボット用のスライスを動的に個別に構築したことを確認した．

以上より，ネットワーク内外の状況を把握し，ロボットなどのネットワーク利用者の活動に応じて，柔軟にスライスの構成を実現したことを確認した．

5. おわりに

本稿では，利用者指向のアプリケーション制御をネットワークインフラへ拡張し，利用者の活動など現実世界の情報からユーザの意図を推定し，利用者個別に仮想のネットワークの提供を行う，エージェント型スライス構成機構に基づくリアクティブネットワーク構成法を提案した．応用例として，現実空間における活動に連動し，デバイスと利用者の空間的近傍性に応じてネットワークを構成するシステムの実験を行った．また，災害時の屋内避難誘導のロボットが管理ネットワーク外にて，他ドメインから自律的にネットワークを借用しタスクを遂行するシナリオを想定した試作システムの動作実験を行い，実現可能性を示した．

参考文献

1) A. Sedigh, C. Campbell and K. Radhakrishnan: BYOT Network Solutions for Enterprise Environment, *Proc. of 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation* (*UKSim2014*), pp. 489-493 (2014).

2) Boussard. M. et al.: Software-Defined LANs for Interconnected Smart Environment, *Proc. of 2015 27th International Teletraffic Congress* (*ITC27*), pp. 219-227 (2015).

3) S. Wang, X. Wu, H. Chen, Y. Wang and D. Li: An optimal slicing strategy for SDN based smart home network, *Proc. of 2014 International Conference on Smart Computing* (*SMARTCOMP2014*), pp. 118-122 (2014).

4) J. Jo, S. Lee and J. W. Kim: Software-defined home networking devices for multi-home visual sharing, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 534-539, (2014).

5) Yurur. O., Liu. C. H., Moreno. W.: A survey of context-aware middleware designs for human activity recognition, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 6, pp. 24-31 (2014).

6) 無線 LAN ビジネス推進連絡会：大規模災害発生時における公衆無線 LAN の無料開放に関するガイドライン第 4 版,（オンライン），入手先 <http://www.wlan-business.org/wp/wp-content/uploads/2017/05/Wi-Fi_Free_Guideline_V4.0-final_ver0100.pdf> (2017).

7) Samaan. N., et al.: Towards Autonomic Network Management: an Analysis of Current and Future Research Directions, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 3, pp. 22-36 (2009).

8) A. Passito, E. Mota, R. Bennesby and P. Fonseca: AgNOS: A Framework for Autonomous Control of Software-Defined Networks, *Proc. of AINA 2014*, pp. 405-412. (2014)

9) B. Tang, C., et al.: Human Mobility Modeling for Robot-Assisted Evacuation in Complex Indoor Environments, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 46, no. 5, pp. 694-707 (2016).

10) A. Ollero et al.: Integration of aerial robots and wireless sensor and actuator networks. The AWARE project, *Proc. of ICRA 2010*, pp. 1104-1105 (2010).