

コア/ペリフェリー構造に基づく 環境適応性をもつネットワークサービスの実装と評価

高木 詩織[†] 荒川 伸一[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{s-takagi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年、IoTの進展に伴い、数多くの新しいネットワークサービスが登場しており、サービスの応答性を向上させるためにMEC (Multi-access Edge Computing)の標準化が進められている。MEC環境にサービスを実装する際には、少ないコストでアプリケーションの振る舞いを柔軟に変更できるサービスの構成を考える必要がある。本研究では、MEC環境を前提とした、遠隔ロボット操作を用いた買い物体験サービスに着目し、環境変動に適応してサービスを向上させる2つのサービスシナリオを検討した。また、生物システムにおける柔軟な振る舞いをするモデルとして知られるコア/ペリフェリー構造を導入し、ネットワーク型の複合現実サービスを設計・実装した。さらに、実装したサービスを用いて、コア/ペリフェリー構造を用いた設計が有効であることを、実装コストおよび遠隔ロボット間の情報共有のオーバーヘッドの観点で示した。

キーワード コア/ペリフェリー構造、マルチアクセスエッジコンピューティング、複合現実、テレグジスタンスサービス、ネットワークロボット

Implementation and Evaluation of a Network-oriented Service with Environmental Adaptability based on Core/Periphery Structure

Shiori TAKAGI[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Yamadaoka 1-5, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: †{s-takagi,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract In recent years, many different new network-oriented services has developed, and Multi-access Edge Computing (MEC) is standardized to improve the responsiveness of services. When deploying services in MEC environment, to consider a service structure that can switch service behaviors flexibly to meet various users' demands and can change the service behavior to real-world environment at low implementation cost is needed. In this paper, we focus on a shopping experience service with remote robot operation and consider two service scenarios to improve the service by adapting to environmental changes. We introduce a core/periphery structure, which is known as a model for a flexible behavior of biological systems, of service components, and design and implement a network-oriented mixed reality service based on the core/periphery structure. Using the implemented application we show that the design based on the core/periphery structure enables to reduce implementation cost and overhead for sharing information among remote robots.

Key words Core/Periphery Structure, Multi-access Edge Computing (MEC), Mixed Reality (MR), Telexistence Service, Network Robots

1. はじめに

近年、IoT (Internet of Things)の進展に伴い、様々な新しいネットワークサービスが登場し情報ネットワークは急激に変化している。新しいネットワークサービスでは、カメラやセン

サーを用いて実世界の情報を収集しクラウドに転送することや、画像処理などの高負荷な処理を行うことなどが考えられる。例えば、VR (Virtual Reality: 仮想現実) や MR (Mixed Reality: 複合現実) 技術とロボットを用いたテレグジスタンスサービスが挙げられる。実際、ANA Avatar [1] では、ロボティクスや物

を触ったときの感覚を疑似的に伝える技術等を用い、離れた場所にあるアバターロボットを遠隔操作して、あたかもそこに自分自身が存在しているかのようにコミュニケーションや作業を行うサービスの開発を進めている。また、特にモバイル端末における AR (Augmented Reality: 拡張現実) アプリケーションの性能が制限される問題を軽減するため、収集した実環境の情報をクラウドに送信し、加工などの処理をクラウドで実行した上でユーザに転送することもある [2]。

これらのユーザ体感型アプリケーションにおいては、アプリケーションレベルの遅延がサービス品質を決める重要な要素となる。しかし、従来のクラウドコンピューティングでは、クラウドまでの地理的な距離や、負荷が集中することによって、数百ミリ秒の遅延が発生する [3]。そのため、Multi-access Edge Computing (MEC) [3]~[5] を用いたネットワークサービスの展開が期待されている。MEC では、サービス機能をクラウドではなくユーザに近いネットワーク外縁部に配置されたエッジサーバに配置する。これにより、通信の地理的な距離を短縮し、また、負荷を分散させることができ、アプリケーションの応答性が向上することが期待されている。

ユーザの多様な要求に応えるため、多くの新しいネットワークサービスが登場していることを踏まえると、MEC を前提としたネットワークサービスを展開するに際しては、できるだけ多くのサービスを収容できる構成を考えることが重要である。しかし、多様なユーザの要求や、端末の発展などの環境の変動に合わせてサービス全体を作り変えると実装コストが大きくなる。また、MEC 環境におけるリソースは、必ずしもクラウドコンピューティング環境と同等ではなく、設置スペースの制約などによって制限され、各ユーザの要求や環境の変動に合わせたサービスを全て収容するのは困難である。したがって、実装コストを抑えつつ、柔軟にサービス内容を切り替えられるサービス構成を検討する必要がある。

我々は、ユーザの多様な要求、エンド端末が置かれている実環境や端末の発展などの開発する上での環境の変動に適応するサービス設計を実現するため、コア/ペリフェリー構造 [6], [7] の研究を行ってきた。コア/ペリフェリー構造は、生物システムにおける柔軟かつ効率的な情報処理機構をモデル化したものであり、情報処理ユニットはコアもしくはペリフェリーに分類される。コアは情報処理の中核をなすユニットであり、システム制約のもと密に構成され、より効率的に情報処理を行う。一方、コアに接続するペリフェリーは多様な構成を持つことが可能であり、システムを取り巻く環境の変化に対して柔軟に対応し、効率的に情報処理を行うコアとともに、柔軟かつ効率的な情報処理機構を形成する。コア/ペリフェリー構造に基づいてサービス設計をすることにより、新たなサービスを展開する際に、サービス全体を作り変える必要がなく、柔軟にサービス内容を切り替えることができ、サービス品質を向上させることが期待できる。情報サービスを収容するためのコア/ペリフェリー構造の利点については、文献 [8] で数値的に検討し、その結果、コア/ペリフェリー構造が様々な情報サービスを収容するための開発コストを削減できることを示した。

また、文献 [9] では、コア/ペリフェリー構造に基づいたサービスの提供シナリオを具現化するため、ユースケースとして、MR (Mixed Reality) とロボットを用いた買い物体験サービスに着目し、実機を用いて実装した。また、ロボット操作に関して、ユーザ側および遠隔地側のデバイスの種類が増加した場合に、コア/ペリフェリー構造を用いたサービス設計が有効であることを示した。コア/ペリフェリー構造による柔軟性を確保するために、享受するユーザの要求や端末の置かれている実環境の変動があっても変わらず提供する機能をコア機能、ユーザの要求や環境の変動によって内容が変わり得る機能をペリフェリー機能とし、エッジサーバにコア機能を配置し、エンド端末にペリフェリー機能を配置することが、サービスの応答性、実装の容易さの面で最も効果的であると考えた。全ての機能をクラウドやエンド端末に実装すると、ユーザの要求や端末の発展などに対応して新たなサービスを開発する際に、サービス全体を作り変えなければならないが、普遍的な機能をコア機能として切り出すことで、さらに新しいサービスを登場させる場合にも、全ての機能を作り変えるのではなく、ペリフェリー機能を追加・変更するのみで対応が可能となる。また、コア機能をクラウドではなく、エッジサーバに配置することで、エンド端末とそれに近い場所にあるエッジサーバの近距離の通信のみでフィードバックループを形成し実環境の変化に対応できる。

本稿では、文献 [9] で示唆したコア/ペリフェリー構造を活用したサービス設計の有効性をより広い観点で示すため、複数のサービスシナリオを設計・実装し、また、新たな評価指標を取り入れ評価した。文献 [9] で実装したサービスシナリオ以外に、サービスを向上させる 2 つのサービスシナリオを検討した。次に、それらのサービスシナリオをコア/ペリフェリー構造を活用したサービス設計指針に基づいて設計・実装した。さらに、実装したサービスを用いて、コア/ペリフェリー構造を用いた設計が有効であることを、実装コストおよび遠隔ロボット間の情報共有のオーバーヘッドの観点で示した。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章で現在開発が進んでいる、また将来的に開発されることが予想される MR サービスについて述べる。次に、3 章で本稿で扱うサービスシナリオおよびコア/ペリフェリー構造を活用したサービス設計の指針について述べる。次に、4 章でコア/ペリフェリー構造を活用した設計指針の有効性を、実装コストおよび情報共有のオーバーヘッドの観点で評価する。最後に、5 章で結論と今後の課題について述べる。

2. 現在および将来のネットワークサービス

本章では、近年開発された、または今後開発が期待されているネットワークサービスについて述べる。

2.1 現在のネットワークサービス

近年、テレグジスタンスサービスが積極的に開発され、社会実装の機運が高まっている。テレグジスタンスとは、まるで離れた場所にいるかのように感じられる体験を提供することを目的とした技術である。TELESAR V [10] は、映像や音声だけでなく、触覚などの情報を送信することで、遠隔地にいるか

のような感覚を得ることができるテレプレゼンスシステムのシステムである。また、ANA Avatar [1] は、ロボット技術や触覚を送信する技術を用いて、遠隔地にいるかのようにコミュニケーションをとり、作業を行うことができる新しい瞬間移動手段として構想されているプロジェクトである。ANA では、遠隔地の水族館を見学できる ANA Avatar Museum や、遠隔地から釣りができる ANA Avatar fishing などの実証実験を開始している。また、ドローンを利用したテレプレゼンスアプリケーションの開発も進められている [11]。

2.2 将来のネットワークサービス

第6世代移動通信システム（6G）ネットワークでは、第5世代移動通信システム（5G）では対応が困難な技術を用いたサービスの開発が可能となる。10年以内には、現在のリモートインタラクション技術は使用されなくなり、ホログラムや五感通信などの新しい技術により、遠隔地とのインタラクションが可能となる [12]。6G ネットワークでは、触覚のインターネットや五感を用いたデジタルリアリティが実現可能である [13]。また、6G ネットワークは水中通信や宇宙通信をサポートし、深海の観光や宇宙旅行が可能になることが示唆されている [13]。

クラウドコンピューティング環境では、通信距離が増大したり負荷が集中するとアプリケーションレベルの遅延が大幅に増加し、サービス品質を左右する重要な要素となる。そのため、MEC の標準化が期待されている。MEC では、コンピューティングリソースとストレージが基地局などのネットワークのエッジに割り当てられ、必要とする処理がよりデバイスに近い場所で実行される。これにより、通信距離の短縮や負荷分散の最適化により、アプリケーションの応答性が向上することが期待される。ETSI Industry Specification Group [14] では、MEC の主要なユースケースとして、動画コンテンツ配信、動画ストリーム解析、AR（拡張現実）を提案し、ソフトウェア開発者向けのガイドラインを提供している。我々の研究グループでは、MEC 環境によってネットワーク型 MR サービスの品質が向上することを実証した [15]。

現在のサービスの主流は音声と映像の伝送であるが、五感を対象とした情報伝送を実現するためには、複数の入力と出力を扱えるサービスシステムの構築が必要である。本稿では、柔軟かつ効率的に情報を処理するための生物モデルであるコア/ペリフェリー構造を活用したサービス設計の有効性を示す。

3. コア/ペリフェリー構造に基づくサービス設計

本章では、想定するサービスシナリオおよび設計指針、実装した機能について述べる。

3.1 想定する基本サービス

提供する基本サービスは、遠隔地のロボットを用いた買い物体験サービスである。遠隔地（ロボット側）では、店舗の様子や店舗が立ち並ぶ通りなどを撮影し、物体認識機能を用いて加工した映像をユーザに提供する。ユーザは提供された映像や遠隔地から送られてきた情報を見ながらロボットを操作する。想定するサービスと提供する機能を図1に示す。

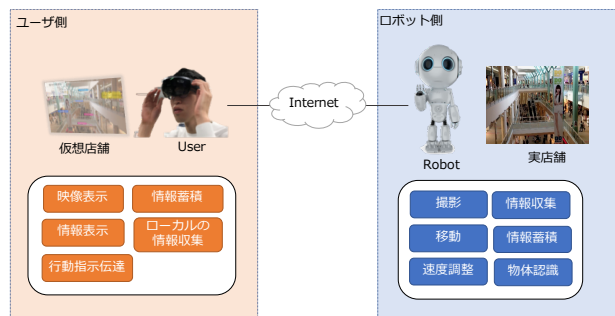


図1: 想定するサービス

3.2 サービスシナリオ

次に、この基本サービスに対して、実環境に適応してサービスを向上させるため、以下の機能追加を考える。

シナリオ1 通る場所によってロボットの動き方を調整するため、人混みや狭い場所で動き方を調整する機能を追加する。

シナリオ2 ユーザの注目度に応じた情報取得のため、注目している商品の詳細な情報を得る機能を追加する。

これらのサービスを実現するためには、映像に対する物体認識の実行と、その結果を用いた情報の蓄積と共有、ロボットの動き方の調整などの機能が必要であり、サービスを実現するには、それらの機能を必要に応じて組み合わせる。

3.3 設計指針

3.2節のサービスシナリオを、コア/ペリフェリー構造の柔軟性を生かした設計で実現する。コア/ペリフェリー構造を持たないサービス設計では、全ての機能をペリフェリー機能として実装することになるため、それぞれのサービスシナリオや想定するシチュエーションに特化した機能が作られる。そのため、さらに機能を追加する場合や、機能の組み合わせを変更することが困難になる。コア/ペリフェリー構造を持つサービス設計では、共通部分であるユーザからロボットへの行動指示の送信と、映像に対する物体認識機能、結果の蓄積をコア機能とし、その他の機能はペリフェリー機能としてコア機能に接続できるように作成する。そのため、環境の変化が発生した場合に、ペリフェリー機能のみを変更すればよいため、機能の追加や組み合わせを短い時間で行うことが期待される。

想定するサービスシナリオでは物体認識機能が共通の機能であるため、物体認識機能とその情報の蓄積をコア機能とし、3.4.2節、3.4.3節で述べる、情報のどのように使用するかをペリフェリー機能として提供する。また、ロボット操作については、ユーザからのメッセージを送信する機能をコア機能、ロボットのスピード調整およびデバイスごとのAPIに合わせた処理を行う機能をペリフェリー機能として提供する。図2、図3に、映像処理および情報共有におけるコア/ペリフェリー構造、ロボット操作におけるコア/ペリフェリー構造をそれぞれ示す。

3.4 実装した機能

3.4.1 映像の処理と情報蓄積（コア機能）

ロボットに搭載されたカメラで撮影された情報は、コア機能

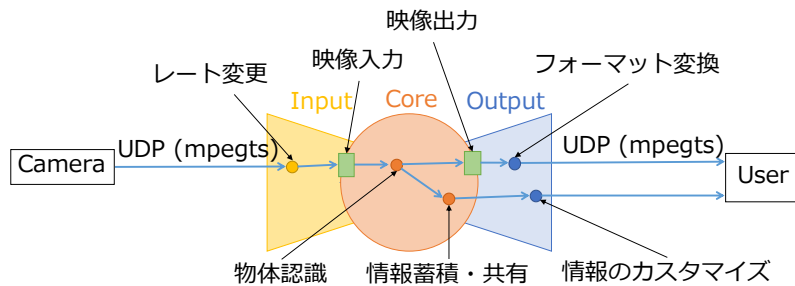


図 2: 映像の処理および情報共有におけるコア/ペリフェリー構造

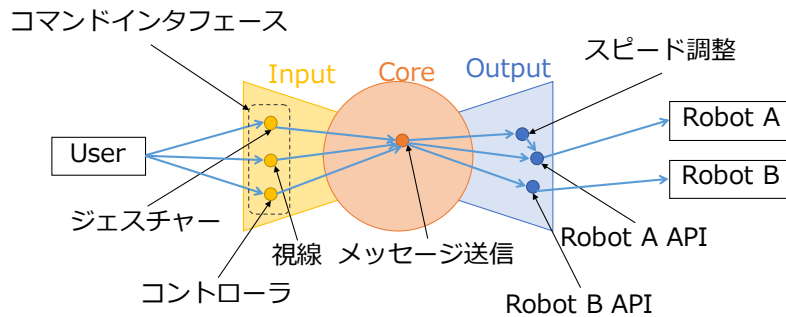


図 3: ロボット操作におけるコア/ペリフェリー構造

によって物体認識が実行される。物体認識には、YOLOv3 [16] を使用している。また、物体認識機能によって得られた結果から、遠隔地の情報として店舗で売られている商品の種類、座標、撮影時刻を取得し、ロボット間で共有する情報として蓄積する。

3.4.2 ロボットのスピード調整 (ペリフェリー機能)

基本的なロボットの移動の機能は、ユーザの操作によってロボットが一定の速度で動くというものである。ロボットの周囲の環境に応じて動き方を変えられるようにするため、物体認識機能によって得られた周囲の情報を用いて、人や障害物にぶつからないようにロボットのスピードを調整する機能を追加する。

物体認識の結果をエッジサーバからロボットに返し、ロボットは返された情報を用いて人混みではスピードを落とすなどのスピード調整を行う。ロボットから送られてくる映像に対して物体認識を実行して結果を返す機能をコア機能とし、人が多い場合にスピードを落とす機能をペリフェリー機能とする。物体認識の結果を受けとったあとの処理はペリフェリー機能としているため、ロボットがいる場所に応じて、人以外の障害物などを避けるように選択することができる。エッジには見えた物体のリストと大きさを保存し、ロボットは対象となる物体の情報のみを参照する。

3.4.3 遠隔ロボット間で共有した情報の提示 (ペリフェリー機能)

基本的なサービスでは、学習済みのモデルを用いた物体認識によって、カメラに映った物体が何であるかという情報を提示する。ユーザの注目度に応じて、周辺の物体の詳細な情報を提示するため、注視の判定と商品のデータベースを用いた情報提示の機能を追加する。

各店舗の商品リストを統合したデータベースを用意し、ロ



図 4: アプリケーションの実行例: 中央に見える chair とは別の場所にある chair が吹き出しで Recommend されている

ボットからユーザに送信している映像の中でユーザが注視している物体の領域を切り出して拡大表示したり、同じ種類の商品でまだ見ていないものを Recommend する。コア機能で保持している情報から必要な情報を選択したり、ユーザが既に注視した物体を削除するなど、各ユーザに応じた情報のカスタマイズを行う。

図 4 に、実装したアプリケーションの実行例を示す。全面にはロボットから送信される映像と物体認識の結果が表示される。左上にはロボットが生成した周辺の地図が表示され、ロボットの現在位置が常時ドットで示されている。また、ユーザへの物体の Recommend が吹き出しで表示される。ただし、表示されている映像を撮影した場所とマップを生成した場所は異なっており、実際の場所とマップ上の座標は合致していない。

4. 評価

本章では、コア/ペリフェリー構造を用いたサービス設計の

有効性を、実装コストおよび遠隔ロボット間の情報共有のオーバーヘッドの観点で評価する。

4.1 実装コスト

遠隔地のロボットが n 種類、ユーザ側のデバイスが m 種類接続されている状態から、デバイスの種類を増やすことを考える。コア/ペリフェリー構造を用いていない実装は、現在使用している MR ヘッドセット HoloLens とロボット Pepper を直接接続するプログラムの実装に基づいて、ユーザ側のデバイスのプログラムに全て記述するものとする。そのため、他のロボットを操作できるようにプログラムを修正する場合、各ロボットの API に応じたプログラムを記述する必要がある。ユーザのデバイスが $m + 1$ 種類になったとき、 $m + 1$ 番目のデバイスについて、ロボットの種類 n 個分の処理を記述する必要がある。また、ロボットの種類が $n + 1$ になったとき、ユーザのデバイス m 種類それぞれに $n + 1$ 番目のロボットに関する処理を記述する必要がある。

コア/ペリフェリー構造を用いた実装では、MQTT を用いたメッセージングシステムによってデバイスの種類の差異を吸収することができるため、プログラムを作成する際には、接続先がどのデバイスであるかを考慮せず、MQTT サーバにメッセージを送信/受信する記述のみをすればよい。そのため、ロボットやユーザのデバイスの種類が増えた場合にプログラムを追記する量が少なくなる。特に、ロボットの種類が増えた場合には、ユーザ側のデバイス上の既存のプログラムに追記する必要がある。プログラムの追記を行うほどプログラムは複雑になり、また、既存のプログラムが複雑であるほど読解に時間がかかり記述を追加するのが困難になると言える。そのため、実装コストは、新しく書かなければならないソースコードの量だけでなく、プログラムの修正時に読まなければならないプログラムの量や複雑さにも比例すると考えられる。そこで、プログラムを読むためにかかるコストを実装コストとし、Cyclomatic Complexity [17] を用いて評価する。Cyclomatic Complexity は、ここでは、プログラムの始まりからプログラムの終わりまでの独立した経路の数で、分岐の数が多いほど高い数値になり、読みにくいと言われている。

図 5 に、コア/ペリフェリー構造を用いた場合と用いていない場合それぞれの設計における Cyclomatic Complexity の変化を示す。コア/ペリフェリー構造を用いない実装では、HoloLens 側のアプリケーションにロボットへのアクセスを全て記述する前提であるため、ロボットの種類が増えるほどプログラム中に分岐を多く書くことになる。そのため、サービス全体の Cyclomatic Complexity の値は $O(m \times n)$ となる。コア/ペリフェリー構造を持つ設計では、分岐を考える必要がないため、値が変化せず、値は 1 となる。そのため、Cyclomatic Complexity の値は、ロボットの種類が増えるほど、コア/ペリフェリー構造を持つ設計とそうでない設計の間の差が顕著になる。

4.2 情報共有のオーバーヘッド

情報蓄積機能で蓄積する情報は常に最新状態にしておく前提で、各ロボット R_1, R_2, \dots, R_n が持つ情報が更新された場合および新しい種類の情報を共有したい場合を想定する。ペリフェ

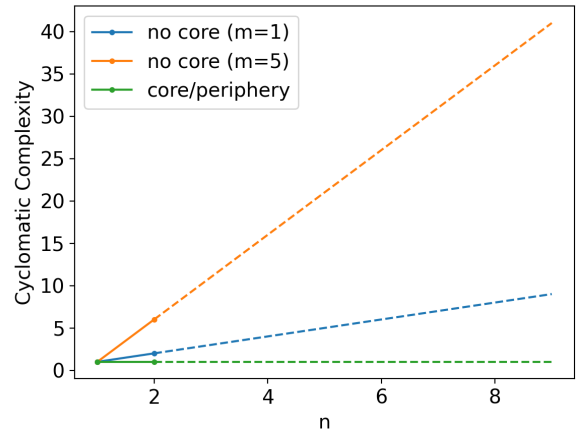


図 5: Cyclomatic Complexity の変化

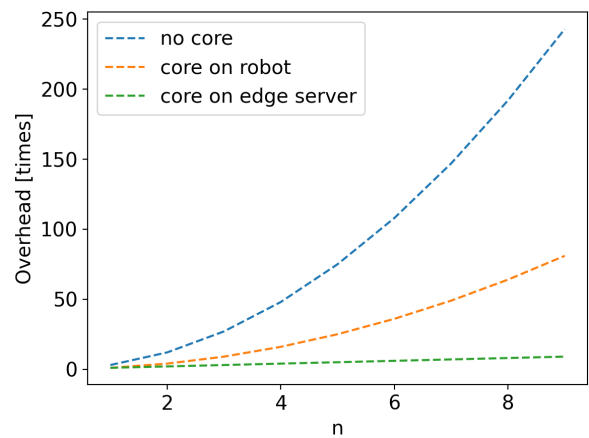


図 6: 情報共有のオーバーヘッドの変化

リー機能はデバイスの特徴やデバイス周辺の環境に特化した機能であるため、デバイス上に実装する。一方、コア機能はサービスシナリオ中の共通の機能であるため、デバイス上以外にも、エッジサーバやクラウドに配置することが可能である。本稿では、ロボット間で情報共有をする機能がペリフェリー機能として実装されている場合、コア機能として各ロボット実装されている場合、コア機能としてエッジサーバに実装されている場合のそれぞれについて、 k 種類の情報を共有するために必要な情報送信の回数を考える。図 6 に、情報共有機能をペリフェリー機能として実装した場合、コア機能としてロボットに実装した場合、コア機能としてエッジサーバに実装した場合それぞれの情報共有のオーバーヘッドの変化を示す。横軸はロボット数 n を表し、縦軸は、あるロボットが持つ情報が 1 度更新されてから情報共有機能で共有している情報に反映されるまでに必要な情報送信の回数を表す。 k の値は、3.4.1 節より 3 としている。

4.2.1 情報蓄積・共有機能がペリフェリーとして実装されている場合

情報蓄積・共有を行う機能がペリフェリー機能として各ロボット内に存在する場合、情報蓄積機能は各ロボットの種類に応じた実装方法で実装されている。また、全てのロボットが持

つ情報蓄積機能に蓄積する情報を最新の状態に保つため、各ロボットは自身が持っている周辺の情報に更新があった際、フラッシングで情報共有を行う。ロボット R_1, R_2, \dots, R_n で情報共有を行う場合、 n 台のロボットが自身以外の $n-1$ 台に対して情報を送信するため、 $O(n^2)$ 回の情報送信が必要となる。ペリフェリー機能として実装する場合、各ロボットの情報の蓄積方法が統一されておらず、情報の種類ごとに分解して送信する必要がある。 k 種類の情報を送信する場合、 $O(k \times n^2)$ 回の情報送信が必要となる。

4.2.2 情報蓄積・共有機能がコア機能としてロボット内に実装されている場合

情報蓄積・共有を行う機能をコア機能として各ロボットに実装する場合、各ロボットの情報の蓄積機能がコア機能として統一されているため、複数種類の情報を1回のフラッシングで共有できる。全てのロボットが持つ情報蓄積機能に蓄積する情報を最新の状態に保つという前提はペリフェリー機能として実装されている場合と同じであるため、ロボット R_1, R_2, \dots, R_n で情報共有を行う場合、 n 台のロボットが自分以外の $n-1$ 台に対して情報を送信するため、 $O(n^2)$ 回の情報送信が必要となる。

4.2.3 情報蓄積・共有機能がコア機能としてエッジサーバに実装されている場合

情報蓄積・共有を行う機能をコア機能として1台のエッジサーバに実装する場合、各ロボットの情報は全てエッジサーバに集約されるため、情報更新があった際には n 台のロボットが1台のエッジサーバに1度情報を送信するのみでよく、 $O(n)$ 回の情報送信で最新の情報を蓄積することができる。また、最新の情報が常にエッジサーバにあるため、各ロボット内に情報蓄積機能を実装する必要はなく、情報を利用・ユーザーに提示したとき（例えば、3.4.3 節の機能における物体を注目したとき）にエッジサーバから各ロボットに情報を送信するため、頻繁にフラッシングを実行するよりも少ない回数で共有できる。

5. おわりに

本稿では、コア/ペリフェリー構造を活用したネットワークサービスの設計の有効性を評価するため、遠隔ロボット操作を用いた買い物体験サービスに着目し、環境変動に適応してサービスを向上させるサービスシナリオを検討した。次に、それらのサービスシナリオをコア/ペリフェリー構造を活用したサービス設計指針に基づいて設計、実装した。さらに、実装したサービスを用いて、コア/ペリフェリー構造を用いた設計が有効であることを、実装コストおよび遠隔ロボット間の情報共有のオーバーヘッドの観点で示した。

今後の課題は以下の通りである。まず、4.2 節で述べた評価について、実機のロボットとカメラを用いた実験を行い、具体的なオーバーヘッドの値を検証する。また、コア機能をエッジサーバに配置することで、デバイス間で通信をする際に遅延が発生する可能性があるため、3.2 章の各サービスシナリオについて実機実験を行い、ペナルティとして発生する遅延の大きさを検証する。

謝辞 本研究の一部は NICT 委託研究「未来を創る新たな

ネットワーク基盤技術に関する研究開発」によるものである。また、第一著者は大阪大学 Di-CHiLD（ダイキン情報科学研究ユニット）の学生研究員プログラムによるサポートを受けている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] “ANA Avatar.” <https://ana-avatar.com>.
- [2] H. Zhanpeng, L. Weikai, H. Pan, and P. Christoph, “CloudRidAR: A Cloud-based Architecture for Mobile Augmented Reality,” in *Proceedings of ACM workshop on Mobile augmented reality and robotic technology-based system*, pp. 29–34, June 2014.
- [3] A. C. Baktir, A. Ozgovde, and C. Ersoy, “How can edge computing benefit from software-defined networking: A survey, use cases, and future directions,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, pp. 2359–2391, June 2017.
- [4] Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher, and V. Young, “Mobile edge computing a key technology towards 5G,” *ETSI White Paper*, Sept. 2015.
- [5] T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, “On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, pp. 1657–1681, May 2017.
- [6] P. Csermely, A. London, L.-Y. Wu, and B. Uzzi, “Structure and dynamics of core-periphery networks,” *Journal of Complex Networks*, vol. 1, pp. 93–123, Sept. 2013.
- [7] V. Miele, R. Ramos-Jiliberto, and D. P. Vázquez, “Core-periphery dynamics in a plant-pollinator network,” *bioRxiv*, July 2019.
- [8] Yuki Tsukui, Shin’ichi Arakawa, Shiori Takagi, and Masayuki Murata, “Design and placements of virtualized network functions for dynamically changing service requests based on a core/periphery structure,” *IEEE Access*, Sep 2020.
- [9] 高木 詩織, 荒川 伸一, 村田 正幸, “コア/ペリフェリー構造に基づくネットワーク型複合現実サービスの実装と評価,” *電子情報通信学会技術研究報告 (NS2019-218)*, Mar. 2020.
- [10] S. Tachi, “Telexistence: Enabling humans to be virtually ubiquitous,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 36, pp. 8–14, Jan. 2016.
- [11] X. Xia, C. Pun, D. Zhang, Y. Yang, H. Lu, H. Gao, and F. Xu, “A 6-DOF telexistence drone controlled by a head mounted display,” in *Proceedings of 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1241–1242, Mar. 2019.
- [12] E. C. Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, L. Maret, and C. Dehos, “6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, pp. 42–50, Sept. 2019.
- [13] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannis, and P. Fan, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, pp. 28–41, Sept. 2019.
- [14] D. Sabella, V. Sukhomlinov, L. Trang, S. Kekki, P. Paglierani, R. Rossbach, X. Li, Y. Fang, D. Druta, F. Giust, L. Cominardi, W. Featherstone, B. Pike, and S. Hadad, “Developing software for multi-access edge computing,” *ETSI White Paper*, Feb. 2019.
- [15] S. Takagi, J. Kaneda, S. Arakawa, and M. Murata, “An improvement of service qualities by edge computing in network-oriented mixed reality application,” in *Proceedings of 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pp. 773–778, Apr. 2019.
- [16] J. Redmon and A. Farhadi, “YOLOv3: An incremental improvement,” *CoRR*, vol. abs/1804.02767, Apr. 2018.
- [17] T. J. McCabe, “A complexity measure,” *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. SE-2, no. 4, pp. 308–320, 1976.