The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	アプリケーション指向ネットワークの自律的構成・管理技術に関する研究
Author(s)	植田, 和憲
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/89486
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

アプリケーション指向ネットワークの自律的構成・管理技術に関する研究

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月　2022 年 3 月

植田　和憲

関連発表論文

1. 学会論文誌発表論文

1. 植田和憲, 岩田誠, 馬場健一, 下條真司, “mesh STA の移動特性を考慮した自律無線メッシュネットワーク構成法,” 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 2, pp. 297–305, Feb. 2020.
2. Kazunori Ueda, Makoto Iwata, Ken-ichi Baba, and Shinji Shimojo, “Multi-overlay information management for IoT-oriented P2P network applications,” International Journal of Space-Based and Situated Computing, Vol. 8, No. 4, pp. 204–213, Mar. 2019.
3. Kazunori Ueda, Makoto Iwata, Ken-ichi Baba, and Shinji Shimojo, “Mass-User Satisfaction for NFV-Based Application Specific Network,” International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 16, No. 9, pp. 55–60, Sep. 2016.

2. 国際会議等発表論文

1. Kazuma Ikenoue and Kazunori Ueda, “Routing Method Based on Data Transfer Path in DTN Environments,” The 21th International Symposium on Multimedia Network Systems and Applications (MNSA-2019), pp. 544–552, Nov. 2019.
2. Kazuma Ikenoue and Kazunori Ueda, “Score-Based Message Ferrying Approach for Evacuees on Delay Tolerant Networks,” The 20th International Symposium on Multimedia Network Systems and Applications (MNSA-2018), pp. 769–774, Oct. 2018.
3. Kazunori Ueda and Yusei Irifuku, “Peer-to-Peer Data Distribution System with Browser Cache Sharing,” The 12th International Workshop on Advanced Distributed and Parallel Network Applications (ADPNA-2018), pp. 590–597, Aug. 2018.
4. Kazunori Ueda, Makoto Iwata, and Ken-ichi Baba, “Multi-Layered Information Management System for IoT-Based P2P Applications,” The 24th Int’l Conf on Parallel and

Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA 2018), pp. 221–227, Jul. 2018.

5. Kazunori Ueda, "Performance Evaluation of Peer-to-Peer Network Applications on Multiple Overlay Networks," The 11th International Workshop on Advanced Distributed and Parallel Network Applications (ADPNA-2017), pp. 750–756, Aug. 2017.
6. Nanami Imada and Kazunori Ueda, "Peer-to-Peer Network System and Application Design on Multiple Virtual Networks," The 10th International Workshop on Advanced Distributed and Parallel Network Applications (ADPNA-2016), pp. 298–302, Sep. 2016.
7. Wataru Kobayashi, Kazunori Ueda, and Yuta Maruoka, "Performance evaluation of routing method based on neighboring node information in WMN," The 9-th International Workshop on Advanced Distributed and Parallel Network Applications (ADPNA-2015), pp. 424–431, Sep. 2015.
8. Kazunori Ueda and Norio Kimura, "Network information sharing system with peer-to-per network applications," The 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS2015), pp. 534–537, Aug. 2015.
9. Shizuya Irimoto, Yuta Maruoka, and Kazunori Ueda, "Performance Evaluation of WMN Routing Methods Considering Amount of Control Packets," The Eighth International Conference on Mobile Computing Ubiquitous Networking (ICMU2015), pp. 80–81, Jan. 2015.
10. Kazunori Ueda and Shingo Yamamoto, "Prototype of peer-to-peer clustering system based on network distance," The 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS2014), I2-3, Sep. 2014.
11. Wataru Kobayashi, Yuta Maruoka, and Kazunori Ueda, "Routing method based on relationships between neighboring nodes in Wireless Mesh Networks," 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, pp. 180–184, May 2014.
12. Kazunori Ueda, Jun-ichi Akase, and Takuya Okubo, "Analysis of peer cluster layers selection criteria for P2P contents distribution systems," The 15th Asia-Pacific Net-

work Operations and Management Symposium (APNOMS2013), Sep. 2013.

13. Yuta Maruoka and Kazunori Ueda, “A method for establishing routes and IPv6 addressing based on the estimated distance from neighboring nodes in wireless mesh networks”, 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, pp. 21–26, Mar. 2013.
14. Kazunori Ueda and Takuya Okubo, “Peer-to-Peer contents distribution system using multiple peer clusters”, The 14th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS2012), pp. 1–6, Sep. 2012.
15. Takuya Okubo and Kazunori Ueda, “Peer-to-Peer contents delivery system considering network distance,” The 13th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS2011), pp. 1–4, Sep. 2011.
16. Kazunori Ueda and Ken-ichi Baba, “Proposal of Initial Route Establishment Method in Wireless Mesh Network,” The Sixth Workshop for Ubiquitous Networking and Enablers to Context-Aware Services (UNECAS 2009), pp. 173–176, Jul. 2009.
17. Kazunori Ueda, Takao Shimayoshi, Toshihiko Hata, Shinji Shimojo, Manzoor Hashmani, Kazutoshi Fujikawa, and Hideo Miyahara, “Network Management Ensuring QoS According To Contents Policies,” Euromedia 2002, pp. 96–103, Apr. 2002.

研究会等発表論文（査読付）

1. 丸岡優大, 植田和憲, “WMN における隣接関係を考慮した経路制御手法の提案と性能評価,” 第 20 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2012), pp. 43–50, Oct. 2012.
2. 丸岡優大, 植田和憲, “無線メッシュネットワークにおける隣接関係を考慮した経路確立手法の有効性検証,” 第 19 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2011), pp. 18–24, Oct. 2011.

その他の研究会等発表論文

1. 山本真吾, 植田和憲, “P2P モデルにおけるネットワーク距離を考慮したクラスタリング機構の試作,” 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント, Vol. 113, No. 492, pp. 47–50, Mar. 2014.
2. 赤瀬隼一, 大久保拓哉, 植田和憲, “複数基準によるクラスタリングを導入した P2P コンテンツ配布システム,” 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント, Vol. 112, No. 378, pp. 73–78, Jan. 2013.
3. 丸岡優大, 植田和憲, “WMN における隣接関係を考慮したルーティングプロトコル MBCR の位置情報生成手法の拡張と性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント, Vol. 112, No. 378, pp. 79–84, Jan. 2013.
4. 高橋武尊, 植田和憲, “無線メッシュネットワークにおける初期経路確立手法の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント, Vol. 109, No. 463, pp. 19–24, Mar. 2010.
5. 大久保拓哉, 植田和憲, “コンテンツ配布のためのネットワーク距離を考慮した構造化オーバーレイ構築手法,” 情報処理学会研究報告. マルチメディア通信と分散処理研究会報告, Vol. 2010, No. 13, pp. 1–6, Mar. 2010.
6. 江波友則, 石本一生, 植田和憲, “MANET におけるノードの隣接関係を基にしたルーティング手法の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメン

ト, Vol. 108, No. 481, pp. 13–18, Mar. 2009.

7. 石本一生, 植田和憲, “アドホックネットワークにおける制御パケットの抑制を目的としたルーティング手法,” 電子情報通信学会技術研究報告. TM, テレコミュニケーションマネジメント, Vol. 107, No.448, pp. 45–50, Jan. 2008.
8. 石本一生, 植田和憲, “アドホックネットワークにおけるアドレス割当手法の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告. TM, テレコミュニケーションマネジメント, Vol. 107, No. 30, pp. 105–110, May 2007.
9. 川田量久, 石本一生, 植田和憲, “P2P ネットワークにおけるクラスタリング手法の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告. TM, テレコミュニケーションマネジメント, Vol. 107, No. 30, pp. 49–54, May 2007.

内容梗概

インターネットをはじめとするネットワークは，接続されるデバイスの多様化に伴って利用用途や利用目的も多様化しており，インフラとしての一般化がより進んでいるといえる．同時に，スマートデバイスの普及を要因として，個人がネットワークを介してアプリケーション（ネットワークアプリケーション）を利用する頻度も増加している．このような状況においては，アプリケーションの品質を高め，ユーザの満足度を高めることが重要である．アプリケーション品質向上のための技術は，単一ユーザやアプリケーション単体での評価や特定の制御手法を対象としたものから始まり，各種の評価手法や制御手法が提案，開発されてきた．

アプリケーションの品質に関しては，アプリケーション側の要件，ネットワーク側の要件があるが，ネットワーク帯域といったネットワーク資源が十分でないようなケースでは，特定のアプリケーションの品質を向上あるいは維持するために，ネットワークにおいてアプリケーションの特性や要件を考慮したネットワーク品質の制御を行う必要がある．本論文では，ネットワーク資源が十分でない環境において，ユーザの満足度を高めることを目的として特定のアプリケーションの品質を向上または維持するためにネットワーク側で必要な処理や制御を行うことをアプリケーション指向，その主体となるネットワークをアプリケーション指向ネットワークとそれぞれ定義する．アプリケーション指向ネットワークの課題を整理した結果，主な課題としていくつかのアプリケーションの組み合わせをネットワークの運用管理として品質向上させる課題，アプリケーションの品質向上をオーバーレイネットワーク（いわばミドルレイヤー）の構築管理で解決する課題，さらに，リンクレイヤーの構成変更で解決する課題があげられ，それぞれはネットワーク運用管理，オーバーレイネットワークの構築管理，ネットワークの構築・構成の各観点で解決方法を考える必要がある．本論文では，アプリケーション指向ネットワークの実現のため，アプリケーション指向ネットワークにおけるユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理，コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法，無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法のそれぞれについてのアプローチに基づく提案手法を示す．

ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理に対しては，アプリケーションを複数の

クラスに分け，SDN (Software Defined Network) をベースとするネットワークにおいて管理する手法を提案する．計測可能なネットワークに関する品質であるネットワーク QoS (Quality of Service) を新たに定式化して定義したユーザ効用に対応づけ，ユーザ効用による定量的な評価を可能とする方法を提案した．また，ユーザの集団の効用についても定式化することで，特定アプリケーションのユーザの満足度を評価できるようにする方法についても提案した．アプリケーション指向ネットワークをモデル化して行ったシミュレーション結果によって，典型的なアプリケーション指向ネットワークにおける運用方針設定のための指針を示すことができた．

コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法に対しては，従来アプリケーションごとに構築，管理してきたネットワークを，基準が共通するもの同士で統合し，物理ネットワークの上位にオーバーレイネットワークとして配置することで，アプリケーションの要件に応じて使用するオーバーレイネットワークを切り替える手法を提案した．また，IoT デバイスが展開する広域かつ大規模なネットワーク環境でのサービスやコンテンツの活用のため，それらに関する処理を代替する委譲サーバを導入し，委譲サーバによる P2P ネットワークを構築することでスケーラビリティを確保する方法についても提案した．物理的な距離ではなくネットワークにおける距離に基づくオーバーレイネットワークとノードの保持コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークとをサポートするプロトタイプによるエミュレーションでの検証の結果，要求するコンテンツの保持率によってオーバーレイネットワークを切り替えることによって検索効率，データ転送効率を高めることが可能であることが分かった．それにより，ネットワークの使用率を下げることができ，アプリケーション品質の向上，ひいてはアプリケーションのユーザの満足度の向上に寄与できると考えられる．

無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法に関しては，ストリーム配信を対象としたアプリケーション指向ネットワークで想定される，固定インフラでない無線ネットワークの提供のために無線アクセスポイントを配置する状況を想定し，無線アクセスポイントの移動特性を考慮した経路制御手法を提案した．具体的には，隣接する無線アクセスポイント間での情報交換によって経路制御を行うとともに，無線アクセスポイントの移動にも追従可能な手法を提案した．シミュレーションによる評価にて，移動率の違いにより提案手法によってパケット転送効率が向上で

きることを示すことができた．

本論文は 5 章から構成され，その内容は以下のとおりである．まず，第 1 章で序論として研究の背景と動機，アプリケーション指向ネットワークの概念，研究の概要について説明する．第 2 章では，ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理に関して，アプリケーション指向ネットワークの特性による分類とその要件について議論するとともに，ユーザの効用，およびユーザ集団の効用の概念を導入し，それに基づいて，アプリケーションを複数のクラスに分け，ネットワークを運用管理のための指針を示すとともにその有効性をシミュレーション結果を通して示す．第 3 章では，コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法に関して，広域な大規模ネットワークにおけるコンテンツ発見・検索を対象としたマルチオーバーレイ情報管理アーキテクチャを提案し，プロトタイプシステムによるシミュレーション結果を通してその有効性について示した．

第 4 章では，無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法に関して，無線メッシュネットワーク技術に対し，構成要素であるアクセスポイントの移動特性を考慮した経路制御に基づくネットワーク構成法を提案し，シミュレーション結果によってネットワーク品質が向上できるケースについて示した．第 5 章では，本論文の成果を要約するとともに，今後の研究課題について述べて，本論文のまとめとする．

目次

第 1 章　序章　1

1.1　研究の背景 1

1.2　研究の概要 10

1.3　本論文の構成 18

第 2 章　ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理　21

2.1　まえがき 21

2.2　アプリケーション指向ネットワーク 24

2.3　ユーザ効用に基づくネットワーク運用指針 27

2.4　シミュレーションによる運用指針の評価 30

2.5　むすび 36

第 3 章　コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法　39

3.1　まえがき 39

3.2　広域ネットワークにおける大規模ノード群に対する管理技術の動向 40

3.3　アプリケーション指向 P2P マルチオーバーレイ情報管理アーキテクチャ . 42

3.4　プロトタイプの設計 48

3.5　むすび 58

第 4 章　WMN におけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法　59

4.1　まえがき 59

4.2　WMN におけるデータ転送機会向上を目的とする研究の動向 61

4.3　WMN におけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法　63

4.4 アプリケーションを対象とした性能評価 72
4.5 むすび 77

第 5 章 結論 **79**
5.1 本論文のまとめ 79
5.2 今後の研究課題 81

謝辞 **83**

参考文献 **85**

第 1 章

序章

1.1　研究の背景

1.1.1　ネットワーク関連技術の発展とインターネット

インターネットは，当初独立して運用されていたネットワークが相互接続された広域のネットワークである．インターネットは世界規模のネットワークであり，インターネットを用いることで遠く離れた場所に存在するコンピュータ同士であってもデータ通信が可能である．ネットワーク規模の拡大やデータ通信の高速化によって，メッセージ交換などのネットワーク上のサービスが従来のサービスを代替することが可能となり，インターネットは日常的に利用されるようになった．

一方で，ネットワークに関連するハードウェアやソフトウェアで取り扱うデータ量の増大に伴い，ネットワーク上を流れるデータ量は飛躍的に増大した．具体的には，ネットワーク規模の拡大に加え，ネットワークの構成要素が増えたことにより収容されるコンピュータの数が増え，個人がネットワークを利用する機会も大幅に増加したことによる．加えて，ネットワークで扱うことのできるデータの大幅な変容，すなわち，伝達する情報の多様化もデータ量の増大に寄与した．かつてマルチメディアという用語が用いられるようになったように，テキストに加え，音声，画像，映像などがネットワーク上で取り扱われるようになった．このように，さまざまな情報がデータ化され，ネットワークを介して転送されるようになったことで，いろいろな用途でネットワークが利用されるようになった．これらより，広域ネットワークあるいはインターネットを介して転送されるデータ容

量が大幅に増加してきた．

また，個人がネットワークを利用する方法の変遷としては，固定の機器による有線アクセスに加え，モバイルデバイスを用いた無線アクセスも広く用いられるようになっていることが挙げられる．無線アクセスには，通信可能な範囲や距離，通信速度，などによってさまざまな種類がある．中でも，携帯電話網やいわゆる無線 LAN と呼ばれる無線アクセスは広く活用されている．

1.1.2　アプリケーションの利用

前述のように，広域ネットワーク，具体的にはインターネットが一般的に利用されるようになったことにより，従来物理的な媒体を用いて交換してきた情報あるいはデータをネットワークを介して大容量かつ高速に交換することが可能となって久しい．具体的な利用用途，利用目的として，メッセージ交換あるいはコミュニケーション，商取引などが挙げられる．メッセージ交換あるいはコミュニケーションの手段として，電子メールあるいは電子メールシステムが広く利用されている．電子メールシステムでは，メール転送のためのサーバソフトウェアであるメール転送エージェントがインターネット上に遍在し，それらが所属する組織によって個々に管理されている．商取引の手段として World Wide Web（以降，WWW）にてコンテンツを提供する Web サーバを利用するオンラインショッピングなどが利用されている．

これらを利用するにはコンピュータ上で稼働するソフトウェアが必要であり，このソフトウェアが組織ネットワークやインターネットへと接続し，必要なデータを交換する．このソフトウェアは，ネットワークアプリケーションソフトウェア，ネットワークアプリケーション，あるいは単にアプリケーションと呼ぶ．前述したような用途，目的のために使用されるアプリケーションは，ネットワークへの接続を前提としたソフトウェアであり，電子メールの送受信のためには電子メールのクライアントとして動作するアプリケーションが，Web サーバへのアクセスのためには Web ブラウザと呼ばれるアプリケーションがそれぞれ必要である．また，近年になってネットワークを介した動画視聴が広く利用されるようになったが，そのために用いられるアプリケーションには，映像配信サービスや動画共有サイトへのアクセスで用いられる Web ブラウザやそのサービスに特化した専用ソフトウェアがある．このように，メッセージの交換，音声通話，動画視聴といったそ

れぞれの用途に対応する各種のアプリケーションが日常的に使用されている．

また，モバイルデバイスの中でもスマートデバイスと呼ばれる機器は，アプリと呼ばれるソフトウェアを導入することにより，さまざまなネットワークサービスを利用することができる．アプリにはコミュニケーションツールなども含まれ，多くの個人がそれを活用するためにスマートデバイスを携帯する機会が多くなっている．また，ハードウェアの小型化，低消費電力化，低コスト化などによって，処理能力の高くない小型の機器でも無線アクセスによってネットワークへ接続することが容易になっている．これらの機器を大量に展開し，それら同士がデータを交換する，あるいはそれらが持つデータを集約して活用することも現実的になっている．特に，そのような機器によって構成されるネットワーク，あるいはそのネットワークを構成することを Internet of Things（以降，IoT）[1]，構成要素となる機器を IoT デバイスと呼ぶ.

このように，特定の用途や目的のためにネットワークを利用するためには，ネットワークを介してデータを転送あるいは交換するためのアプリケーションの利用が前提となる．

1.1.3　ネットワークアプリケーションの課題とアプリケーション指向

ネットワークにおいてアプリケーションを利用する際にユーザが満足感を得られるかどうかは重要な点である．本来，アプリケーションを利用するユーザが満足感を得られるかどうかは主観によるが，ネットワークの利用用途や利用目的によっては単にアプリケーションが利用できたかどうかということに加え，アプリケーションの品質にも依存する．アプリケーションの品質はそのアプリケーションを特徴づける測定可能な値，映像転送アプリケーションであればフレームレートや SN 比などで決定づけられるが，どの性能指標により満足感を得られるかは，ネットワークの利用用途や利用目的，およびアプリケーションによって変化する．また，複数のアプリケーションから得られる満足感を総合的に判断する必要もある．そのため，ユーザが満足感を得られたかどうかだけではなく，どれほど満足できたかという度合についても考慮する必要がある．この，ユーザがどれほど満足感を得られたかの度合を満足度と呼ぶこととする．

ネットワークを介したアプリケーションの利用が一般化するにつれて，ユーザの満足度を高めるという観点からアプリケーションの品質の向上や維持のための技術の重要性が高まっている．音声通話や映像視聴といったリアルタイム性の高いアプリケーションでは，

アプリケーションの品質の向上や維持のためにアプリケーションそのもの，あるいはネットワークにおいても多くの要件を満たす必要がある．日常的に利用するための固定的なネットワークインフラでは，転送容量である帯域やネットワーク機器の処理能力といったネットワーク資源に余裕があり，アプリケーションが必要とする十分なネットワーク帯域が得られることも多く，特別な制御を行わなくてもアプリケーションの品質が高くなることが期待できる．

ユーザが不特定多数であるようなケースや一時的にユーザが集中するようなケース，あるいは，異なるネットワークに存在するコンピュータ同士が送信元から送信先までの経路において複数のネットワークを経由するようなケースでは，すべてのアプリケーションの品質を高めるための十分なネットワーク資源を確保することができず多数のユーザのデータ通信の集中や特定のコンピュータによる多量のデータの転送によって混雑である輻輳が発生し，アプリケーションの品質が影響を受ける．ユーザーの満足度を向上させるため，アプリケーションの品質を意識してネットワークの品質を制御する必要がある．例えば，優先制御により特定のアプリケーションのネットワークの帯域を向上させることにより，アプリケーションの品質を向上させることができる．また，無線ネットワークやオーバーレイネットワークを用いてパケットが配送される経路長を制御することで，遅延を短くしたり，パケットロスを減らすことにより，アプリケーションの品質を向上させることができる．

一方で，非同期かつデータ転送量も少ないテキスト情報の交換やサイズの小さい画像の送信などでは混雑の発生や遅延の増加といったネットワークの品質がアプリケーションの品質へ与える影響は比較的小さく，リアルタイム性が求められる音声通話ではネットワークの寝室によって受ける影響が大きくなるなど，ネットワークの品質とアプリケーションの品質の関係も踏まえる必要がある．

すなわち，アプリケーションの品質はアプリケーションとネットワークの相互作用で決定されるが，ネットワーク帯域のようなネットワーク資源が十分でないようなケースでは，特定のアプリケーションの品質を向上あるいは維持するために，ネットワークにおいてアプリケーションの特性や要件を考慮したネットワーク品質の制御を行う必要がある．

本論文では，ネットワーク資源が十分でない環境において，ユーザの満足度を高めることを目的として特定のアプリケーションの品質を向上または維持するためにネットワーク

側で必要な処理や制御を行うことをアプリケーション指向，その主体となるネットワークをアプリケーション指向ネットワークとそれぞれ定義する．アプリケーション指向ネットワークの実現のための課題には様々なものが考えられるが，大きな課題として，いくつかのアプリケーションの組み合わせをネットワークの運用管理として品質向上させる課題，アプリケーションの品質向上をオーバーレイネットワーク（いわばミドルレイヤー）の構築管理で解決する課題，さらに，リンクレイヤーの構成変更で解決する課題がある．本論文では，これらの課題それぞれに対して，ネットワーク運用管理，オーバーレイネットワークの構築管理，ネットワークの構築・構成に対応させ，これらの観点から課題を解決するための方法について示す．

ネットワーク運用管理の観点では，ネットワーク資源が不足する環境において，アプリケーションを利用するユーザの満足度を評価する指標として，アプリケーションの品質に基づいて定量化したユーザの効用（以降，ユーザ効用）およびユーザの集団の効用（以降，集団ユーザ効用）を定義した上で，各ユーザの利用するアプリケーションを複数のクラスへマッピングし，クラスそれぞれに異なる制御を行うアプリケーション指向ネットワークが考えられる．この制御にはネットワークポリシーを設計するための指針についても示す必要がある．また，オーバーレイネットワークの構築・管理の観点では，ネットワーク上に存在する多数ノードに対して，それらが持つコンテンツを検索し利用するアプリケーションを対象として，ネットワーク資源を節約しながら効率的に検索を行うためのオーバーレイネットワークとしてのアプリケーション指向ネットワークの実現が考えられる．オーバーレイネットワークの構築では，ノードを接続するための基準を複数設けることでオーバーレイネットワークを複数構築し，物理ネットワーク上にマルチオーバーレイネットワークとして配置する．一方で，ネットワークの構築・構成という観点では，アプリケーションの品質を考慮し，それが高くなるための要件を満たすためのネットワークを考える．柔軟にネットワークを構築・構成するための技術として，アクセスポイントを複数配置しそれら同士を無線接続することによって無線ネットワークを提供することができる無線メッシュネットワークに着目し，アクセスポイントの移動特性を考慮することで経路情報の交換負荷を軽減しながら経路に移動頻度の少ないアクセスポイントが含まれやすくなるように経路制御を行う．このことにより，メディアストリームなどのアプリケーションを指向したネットワークが実現可能となる．以下では，これらについて説明する．

ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理

ユーザが日常的に利用するための固定ネットワークとは異なり，一時的な目的のために構築されるネットワークではネットワーク資源の不足が課題となる．そのようなとき，ネットワークで特定の通信に対する制御を行わないとアプリケーションの要求に対して利用できるネットワーク資源が足りないため，各ユーザのアプリケーションに対する満足度が低下する．ネットワーク資源が不足している状況下では，すべてのクラスにおけるアプリケーションの品質の向上・維持が困難であるため，アプリケーションを複数のクラスへとマッピングすることによって，それぞれのクラスごとにアプリケーションの品質を考慮した制御を行う．このようにして，アプリケーション指向ネットワークを実現する．

クラス別の制御を行うために，ユーザのアプリケーションに対する満足度であるユーザ効用，および集団ユーザ効用を定義し，それらを最大化することによってアプリケーションの品質の考慮がなされたとみなす．その際，ユーザ効用，集団ユーザ効用に基づく優先度を各クラスに設定することにより，特定のアプリケーションの品質を考慮した制御を行うことができるようになる．ユーザ効用・集団ユーザ効用やそれらに基づくクラスの優先度は，ネットワークの運用管理において制御対象の優先度となる．また，それぞれのクラスに属するアプリケーションの通信に対する制御内容はネットワークポリシーによって設定されるが，それらはネットワークの利用用途や利用目的によって異なるため，アプリケーションの種別などで画一的に決定することができない．そのため，アプリケーション指向ネットワークにおける対象アプリケーションの品質の向上・維持を目指したときの運用指針を示す必要がある．

コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法

ネットワークが広域化したこと，および，自律分散システムが広く採用されていることによって，ノードやノードの持つコンテンツの検索，見つかったコンテンツの利用，それぞれのためにネットワーク上で多くのデータを転送する必要がある．この場合，コンテンツのヒット率などがアプリケーションの品質となる．都度検索等を行うのは非効率であり，データ交換の過程においてアクセスを行う可能性が高いノード同士を結合して構築されるオーバーレイネットワークを利用することが有効である．オーバーレイネットワーク

の利用は多くのアプリケーションに共通する手法であるが，それぞれのアプリケーションでオーバーレイネットワークを構築するのではなく，外部でオーバーレイネットワークを管理し，その情報を各アプリケーションに提供することで，オーバーレイネットワーク構築コストの削減，検索が可能になるまでの時間や検索時間そのものの短縮，ネットワーク全体のデータ転送量の抑制が可能である．これにより，オーバーレイネットワークを利用したアプリケーション指向ネットワークが実現できる．

特定のアプリケーションに依存せず，より多くの情報をアプリケーション指向ネットワークとして集約できれば，より要求に適したノードやコンテンツなどが利用できる可能性が高くなる．さらに，ノード同士を接続するための指標を複数設けてオーバーレイネットワークを複数構築し，それらを物理ネットワーク上に配置するマルチオーバーレイネットワークとすることで，アプリケーションの求める情報の検索をより効率的に行うことができるようになる．これらにより，ノード情報やコンテンツの検索効率を高めることによって，アプリケーションの品質の向上につながると考えられるが，アプリケーションの要求に応じてどのようなオーバーレイを構築するかが課題となる．

無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法

ネットワークの構築・構成を行う際に，ネットワークの利用用途や利用目的から具体的なアプリケーションの品質を高めようとする場合，そのアプリケーションの要件を踏まえることが必要である．一時的なネットワークを柔軟に構築・構成するために用いることができる技術である無線メッシュネットワークを前提とし，その過程においてアプリケーションの品質の向上あるいは維持が可能となるように経路制御を行う手法が有効である．無線メッシュネットワークでは，構成要素であるアクセスポイント同士を無線で接続することで無線ネットワークを構成するが，アクセスポイントが移動することも想定されており，それをサポートするための経路制御手法を採用している．そのために多くの経路制御のためのデータ交換が行われているが，アクセスポイントの移動特性によってはネットワーク全体で転送される経路データの総量を削減することができるとともに，移動頻度の少ないアクセスポイントが経路に含まれやすくなるよう経路を制御することによって，メディアストリームの配信などのアプリケーションの品質を向上・維持しやすくなると思わ

れる．また，経路制御のために交換されるデータ量の総量を削減することで，他の用途のデータ交換の通信機会が増えることも期待できる．そのような経路制御を行うことを前提にどのようにしてネットワークを構築・構成するかが課題である．

このように，ユーザおよびその集団の効用に基づく運用指針，マルチオーバーレイネットワーク情報管理，アプリケーション要件に基づくネットワーク構築・構成，というアプローチによってアプリケーション指向を実現し，ネットワークを利用するユーザの満足度を高めることを目指す．

1.1.4　アプリケーション指向ネットワークの例

ユーザーの満足度は複数のアプリケーション品質を総合したものであり，その品質の評価は置かれた状況によっても異なる．このようなアプリケーション指向ネットワークの具体例を挙げる．

1. 緊急時ネットワーク（例：災害，テロなどの事件時）
2. イベントサポート型ネットワーク（例：パブリックビューイング，展示会）
3. 従量課金制アクセスネットワーク（例：MVNO (Mobile Virtual Network Operator)）

緊急時ネットワーク

緊急時ネットワークは，一部の通信インフラが使用できないような場合や避難所などの特定の場所に多くの人が集まるような場合に，一時的に構築されるネットワークである．このネットワークは，不特定多数のモバイルデバイスを収容することが要求されるが，十分なネットワーク資源を利用するのが困難であることが想定される．利用用途や利用目的として，初期段階では緊急性の高い情報の収集や人同士のコミュニケーションが重視されるが，時間経過とともに緊急性が低下すると一般的なウェブブラウジングや動画の視聴での利用へとその中心が移行する．コミュニケーションが主な目的である場合，そのために用いられるアプリケーションの品質については前述したとおりである．このようなネットワークの具体的な例として，災害，事故・障害対応，テロなどの際に構築される一時ネッ

トワークが挙げられる．

イベントサポート型ネットワーク

イベントサポート型ネットワークは，開催されるイベントの参加者の持つデバイスを収容するために構築されるネットワークである．ネットワークの規模や必要となる機能は，開催されるイベントの内容に依存する．このネットワークは，開催されるイベントの内容に応じた関連情報の発信や，参加者へのインターネット接続のために構築される．利用用途や利用目的として，開催されるイベントの詳細情報の提供や関連情報の発信のための映像コンテンツの提供，リアルタイムでの催しの映像配信などが挙げられる．開催されるイベントのプログラムに沿ってリアルタイムでの催しの映像配信が行われるような場合，バースト的にストリームが発生し輻輳が発生する．開催されるイベントの内容には依存するものの，基本的には映像配信などのアプリケーションの重要性が高く，そのために用いられる高いビットレートが想定されるアプリケーションの品質を向上させる必要がある．このようなイベントの例として，各種展示会やパブリックビューイングなどが挙げられる．

従量課金制アクセスネットワーク

従量課金制アクセスネットワークは，インターネットアクセス，あるいはネットワーク上で利用するアプリケーションサービス，を提供する事業者のためのネットワークである．このネットワークでは個人のデータ転送量によって課金が行われる．一般的には，一定期間に利用可能なデータ転送量に応じた課金，および，短期間におけるデータ転送量の制限が行われる．前者では，支払う金額に対応した一定期間（例えば月ごと）のデータ転送量の規定値が定められており，その値を超えるとその期間内は低速なデータ転送のみが利用できるようになる．後者では，短期間（例えば 3 日間）のデータ転送量が規定値を超えた場合に，その期間内はデータ転送速度に制限がかかる．そのため，このネットワークのユーザは，月末までにデータ転送量の規定値を超えないようにするためには，利用するスマートホン等のアプリを含むアプリケーションによるデータ転送量や利用頻度をある程度把握した上でそれらを利用することが求められる．そのため，動画の視聴などのデータ転送量の多いアプリケーションの利用頻度が高い場合は，一定期間のデータ転送量が規定

値を超過するのを防ぐために，許容できる範囲内でアプリケーションの品質を下げることでデータ転送量を抑える必要がある．そこで，ネットワークにおいて，データ転送量が多いアプリケーションの品質を考慮することによって，アプリケーションの品質の観点で各ユーザが許容できる程度にトラフィック管理を行うことで，より多くのユーザを収容できるようになる．

1.2　研究の概要

1.2.1　アプリケーション指向ネットワークの実現方法

これまで述べたように，アプリケーションのユーザの満足度に影響を与えるアプリケーションの品質の向上あるいは維持は重要な課題である．ここで，アプリケーションのユーザの満足度をそのユーザの体感品質，ネットワークの資源や制御の議論で用いられる帯域や遅延といったネットワークの性能をネットワーク品質とそれぞれ呼ぶこととする．アプリケーション指向ネットワークやユーザの体感品質，アプリケーション品質，ネットワーク品質についての基本的な概念を踏まえることによって，アプリケーション指向に基づいたネットワーク運用管理にかかわる機能や制御が考慮できるようになる．

アプリケーションのユーザの体感品質は，満足度についても述べたように主観的なものであり，必ずしも定量的な数値でその程度を測れるわけではない．また，ネットワークの利用用途や利用目的，およびアプリケーションの特性に依存する．アプリケーション品質は，先にも述べたように，そのアプリケーションを特徴づける測定可能な性能，あるいは値である．ネットワーク品質は，ネットワークに関する性能を定量的に示すものである．例えば，メディアストリームの配信というアプリケーションであれば，ユーザの体感品質はビデオストリームの品質，アプリケーション品質は実効ビットレートやブロックノイズの発生回数，ネットワーク品質はパケット転送率や遅延・ジッタなどが対応する．ネットワーク品質はアプリケーション品質へ影響を及ぼし，アプリケーション品質はユーザの体感品質へと影響を及ぼす．

本論文では，アプリケーション指向ネットワークを実現する方法として，ユーザの体感品質，アプリケーション品質，ネットワーク品質のそれぞれの特性を考慮した上で，ネットワークを制御してネットワーク品質を向上させることで，アプリケーション品質，ひい

表 1.1　階層ごとの品質の整理とアプリケーション指向実現のための提案

	ネットワークの 運用管理	オーバーレイ ネットワークの 構成法	ネットワークの 構成法
ユーザの体感品質	アプリケーション の組み合わせ	コンテンツ の検索時間	ビデオストリーム の品質
アプリケーション の品質	フレームレート	ヒット率	ビットレート ノイズ
ネットワーク の品質	帯域	ネットワーク距離 ホップ数	パケット転送率
品質実現のための ネットワーク制御	優先制御 ネットワークポリシー	オーバーレイ構成	経路制御

てはユーザの体感品質をも向上させる提案手法について述べる．このような目的の元でネットワーク品質を向上させるためには，物理ネットワークを最下層，オーバーレイネットワークを上位層と考えた場合，各階層における機能に対応したアプリケーション指向に基づく制御技術が必要である．これらの制御技術を用いる階層の機能として，ネットワーク運用管理，オーバーレイネットワークの構築管理，ネットワーク構築・管理に分類することができ，ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理，マルチオーバーレイネットワーク構成法，アプリケーション品質向上のためのネットワークの構成法，という具体的なアプローチがそれぞれの階層に対応した具体的な提案手法の基となる．

表 1.1 にこれまで述べた関係を示す．表 1.1 では，アプリケーション指向ネットワークへのアプローチをネットワークの運用管理，ミドルレイヤであるオーバーレイネットワークの構成法，リンクレイヤでのネットワーク構成法について典型的なアプリケーションを想定し，ユーザ体感品質，アプリケーション品質，ネットワーク品質についての具体的な内容，加えて，各階層におけるネットワーク制御の提案を行う対象となる制御内容を示した．これらのアプリケーションは網羅的ではないが，アプリケーション指向の様々なアプローチを示している．以降，アプリケーション指向ネットワーク実現のための課題，各階層におけるアプローチおよび提案の具体的な内容，階層間の相互関係について示す．

ネットワーク運用管理の観点では，アプリケーションのユーザの体感品質であるユーザ効用とそれに基づくユーザの集合の効用の概念を定義するとともに，それらを利用した評価に基づいてネットワークにおける運用方針設定のための指針を示す．オーバーレイネットワークの構成法の観点では，これまで個々のアプリケーションが構築していたネットワークを共用のオーバーレイネットワークとして統合することで，アプリケーションの要求に応じて適切にオーバーレイネットワークを選択するアプリケーション指向ネットワークの実現を目指す．これにより，マルチオーバーレイネットワークによるアプリケーション指向ネットワークが実現できる．ネットワーク構成法の観点では，アプリケーションの要件に基づいて柔軟にネットワークを構築・構成するための基盤技術として，一時的なネットワークを無線ネットワークによって構築する状況を想定し，有線インフラを用いずアクセスポイントの設置のみで広域の無線ネットワークを構築できる無線メッシュネットワーク技術に着目し，アプリケーション指向に基づいてネットワークを構築・構成するための，アクセスポイントの移動特性を考慮する新しいネットワークの構成法を示す．

図 1.1 に提案するアプリケーション指向ネットワークについての概念を示す．図におけ

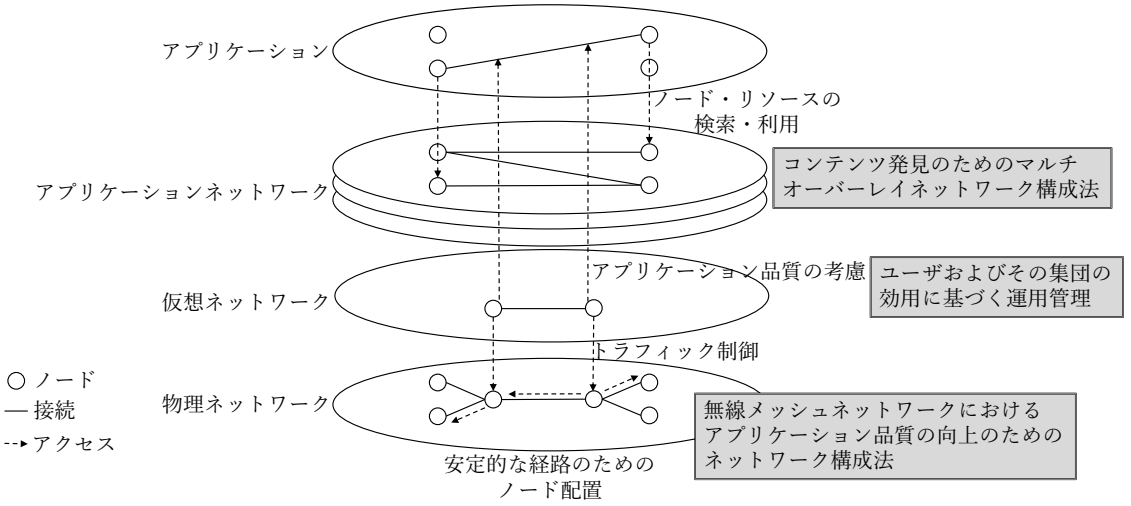

図 1.1　アプリケーション指向ネットワークの各階層における実現と各階層間の関係

る仮想ネットワーク上のノードからアプリケーション階層，および，物理ネットワーク階層へと伸びる矢印は，アプリケーションの特性を反映した指針に基づき決定したネットワークポリシーを反映した制御内容が仮想ネットワーク上のネットワーク機能へと反映され，物理ネットワーク上のネットワーク機器，あるいは汎用コンピュータによってトラ

フィックの制御が行われることを示している．図におけるアプリケーションネットワーク上のノードからアプリケーションの階層へと伸びる矢印は，分散するコンテンツ検索をアプリケーションと考えた場合，複数のオーバーレイネットワークを構築・階層化し，アプリケーションの要求に応じて選択されたオーバーレイネットワーク上の対応ノードをアプリケーションが利用して検索を行うことを示している．図における物理ネットワーク上の矢印は，アプリケーションの階層で接続されているノード間でのメディアストリーム配信が，物理ネットワークにて移動頻度の少ないアクセスポイントが含まれやすい経路を利用できることを示している．

このように，ユーザおよびその集団の効用に基づく管理指針設定，マルチオーバーレイネットワーク構成法，アプリケーション品質向上のためのネットワーク構成法という各アプローチによってアプリケーション指向ネットワークの実現を目指す．以降では，これらのアプローチに基づく提案内容ついて詳細を述べる．

1.2.2　ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理

アプリケーションのユーザの満足度は，アプリケーション品質に大きく依存することはすでに述べた．しかし，ネットワーク資源に余裕がない状況では，すべてのアプリケーションのユーザの満足度を高めることは困難であるため，特定のアプリケーションのユーザの満足度を重視して制御を行う必要がある．具体的には，アプリケーションを複数のクラスに分け，優先するよう設定されたクラスのアプリケーションのパケットやメディアストリームに対して，アプリケーション品質の向上あるいは維持を目的とした制御を行うための，アプリケーション指向ネットワークを実現する．

アプリケーション品質の向上あるいは維持のためには，単位時間当たりのデータ転送量である帯域と遅延やその揺らぎであるジッタなどを指標とするネットワークサービス品質であるネットワーク QoS (Quality of Service) を高めることが有効である [2]．ネットワーク QoS は，ネットワークを流れるトラフィックやパケットを区別，あるいは分類し，それらに対する取り扱いを変えることで向上させることができる．ここでの取り扱いの具体的なものとして，区別したパケットを優先して転送する優先制御や転送量を制御する流量制御などがある．トラフィックやそれらのパケットの分類，それらのパケットに対する制御内容についてのルールはポリシーあるいはネットワークポリシーと呼ばれ，ポリシーは

それぞれのネットワークにおける運用方針に従って個々に定められる [3, 4, 5]．本論文では，ポリシーを運用方針設定と呼んでいる．

アプリケーション品質の評価については，アプリケーション利用時の主観評価や客観的な指標を用いての評価などの各種の評価手法や制御手法が提案，開発されてきた．アプリケーション品質は，アプリケーション QoS[6]，あるいは，QoE (Quality of Experience)[7, 8, 9, 10] と呼ぶこともある．本論文では，アプリケーションのユーザの満足度を示す指標として，ネットワーク QoS およびアプリケーション QoS に基づいたユーザ効用を導入する．また，ユーザ効用の拡張によって個人だけでなく，ユーザの集団の効用についても評価できるユーザの集団の効用についても定義する．

インフラとして構築されたネットワークのように長期に運用することを想定したネットワークでは，固定で配置されているネットワーク機器の制御機能を用いてトラフィックやパケットの制御を行う．一方で，一時的な利用を想定したネットワークやネットワークを構成する機器やデバイスの追加や削除が伴うネットワークでは，それらの変化に追従しながら制御を行う必要がある．そのためには，ネットワークの構成や制御機能の配置を柔軟に変更する必要がある．そのために用いることができる技術として，ネットワークの仮想化である SDN (Software Defined Networking)[11, 12] およびネットワーク機能の仮想化である NFV (Network Functions Virtulization)[13, 14] がある．SDN によってネットワークの構成の変更を行い，NFV によってネットワーク機能を汎用のコンピュータ上に配置することができる．

ネットワークにおける仮想化技術を前提とすることで，トラフィックやそれらのパケットに対する制御を柔軟に行うことを前提とすることができる．これより，ネットワーク環境の変化に追従しながらアプリケーションの品質に影響するネットワーク QoS に関する制御を行い，ネットワーク側でアプリケーションのユーザの効用およびユーザの集合の効用を向上させるための，アプリケーション指向ネットワークを実現する．また，トラフィックやそれらのパケットに対する制御の内容は，ネットワークの運用方針に沿って決定される．この運用方針に基づく運用方針設定は，目的のために利用するアプリケーションの品質向上のための内容となるべきものであるが，ユーザ効用やユーザの集団の効用に対する評価に応じて変化すると考えられる．本論文では，これまでに述べた全体システムを前提としたアプリケーション指向ネットワークの分類に基づき運用方針設定のための指

針について示す．

1.2.3　マルチオーバーレイネットワーク構成法

背景でも述べたように，広域ネットワークにおいて IoT デバイスを想定したアプリケーションやサービスを利用することが想定される．計算資源やストレージが十分でない IoT デバイスを大量に展開するシステムの場合，広域ネットワークに存在する IoT デバイスなどのノードやノードが持つコンテンツを利用するためには検索を行う必要がある．しかし，ノード数や情報量が膨大である場合，IoT デバイスが検索を実行することは困難である．そのため，コンテンツの検索というアプリケーションを想定した場合，IoT デバイスの計算資源やストレージなどの不足が原因でアプリケーションの品質が低下するという課題を解決するために，ネットワークがアプリケーションサービスの支援を行うためのフレームワークの役割を担うことを考える．このとき，アプリケーションの要求に応えることができるようなオーバーレイネットワークを異なる基準ごとに構築し，物理ネットワークの上位に階層的に配置する．このようにして，IoT デバイスの利用するアプリケーションを想定したアプリケーション指向ネットワークを実現する．

自律分散システムを構成する場合，コンピュータや各種デバイスからなるノードを構成要素とし，それら同士の情報交換により検索やコンテンツへのアクセスを実現する．クライアント・サーバ型と呼ばれる集中型のサービス提供形態であれば，アプリケーションは固定的に配置されているサーバに対して検索要求を送ればよい．しかし，自律分散的に構成されたシステムで集中的に情報を管理するサーバの役割を果たすものが存在しない場合は，他のノードへ検索要求の転送を依頼することになる．このとき，転送を依頼する対象となるノードの選定方法として，所持するコンテンツや検索傾向が類似したノードを近隣に配置するようなオーバーレイネットワークを構成し，そのオーバーレイネットワーク上で距離が近いノードを選択する手法がある．このオーバーレイネットワークは，実際の物理ネットワークとは異なるトポロジーを持ち，概念的によりアプリケーションに近いと考えられることから上位に位置づけ，物理ネットワークと階層を形成すると考える．

所持コンテンツや検索傾向の近いノードを近隣に配置して形成されたオーバーレイネットワークを利用して検索等を行う際，集中的に情報を管理せず，自律分散的に情報を交換する場合がある．各ノードが対等の関係であり，サーバなどの役割が固定されていないも

のを P2P (Peer-to-peer) ネットワークモデルと呼ぶが，独自に形成したオーバーレイネットワークを利用するアプリケーションのひとつであるコンテンツ共有において，このモデルを採用したものが複数存在する．しかしながら，それらが独自に P2P ネットワークモデルに基づくオーバーレイネットワークを形成すると，類似のネットワークが形成され，データの管理および転送に関するコストの増加が課題となる．また，検索対象が限定されることによる検索効率あるいは精度の低下によってアプリケーション品質の低下の要因にもなる．

そこで，コンテンツ共有などのアプリケーションでの利用が想定されるオーバーレイネットワークを形成し，各アプリケーションに情報を提供するシステムを考える [15, 16]．これにより，コストや検索の効率あるいは精度の向上を見込むことができる．コンテンツ共有ではこれまで述べたようなコンテンツ傾向や検索傾向といった基準や RTT (Round Trip Time) や TTL (Time To Live) を指標とするネットワーク距離という基準などが存在するため，オーバーレイネットワークも複数存在しえる．本論文では，それらのオーバーレイネットワークを物理ネットワークの上位で階層化し，各アプリケーションの要件に応じて使用するオーバーレイネットワークを切り替えることによって，必要な情報を提供できる全体システムおよびアプリケーション指向ネットワークを提案する．これにより，検索の精度向上が見込まれ，アプリケーション品質の向上が期待できる．

また，これまで述べたシステムは，構成要素であるノードがデータの保存や管理，コンテンツ等の検索機能を備えていることを前提としているため，IoT デバイスで構成されるシステムが稼働するネットワークにそのまま適用することはできない．そこで，計算資源やストレージの性能が高くないデバイスの代わりに前述の機能を持つコンピュータを配置し，オーバーレイネットワークの情報を利用するアプリケーションを稼働させる手法についても提案する．本論文では，計算資源やストレージの性能が高くないデバイスの代わりとなるコンピュータを委譲サーバと呼ぶ．本論文では，委譲サーバを含めたノード群の情報からオーバーレイネットワークを形成し，アプリケーションがそれらのオーバーレイネットワークの情報を利用するための提案システムについても示す．

1.2.4　アプリケーション品質向上のためのネットワーク構成法

柔軟にネットワークを構築・構成することにおいて，利用用途・利用目的やそのために使用されるアプリケーションの要件を前提とする，すなわち，品質を向上させたい，あるいは維持したいアプリケーションの要求を満たすような経路制御を前提とすることで，それらアプリケーションに対するアプリケーション指向ネットワークを実現することができる．具体的には，ストリーム配信をアプリケーションとした場合，経路制御が低負荷で行え，切り替わりの少ない経路が利用できるようにする．

柔軟にネットワークを構築・構成する技術として，アドホックネットワークがある．アドホックネットワークは，移動するノード群がその時の接続状況などから自律的にネットワークを形成するもので，ノードの移動や通信の可否の変化を前提としている．アドホックネットワークでは，移動するノード間でデータを転送し，同様の処理を繰り返すことでデータを目的のノードまで転送する．このように，複数のノードによる転送を繰り返してデータを転送する方法をマルチホップと呼び，マルチホップを行うことを前提としたネットワークをマルチホップネットワークと呼ぶ．マルチホップネットワークでは，各ノードが通信可能なノードからデータの転送先にふさわしいノードを選定する必要がある．アドホックネットワークでは，移動するノード群がそのときの状況に応じてデータの転送先となるノードを都度選定する必要がある．状況に合わせた伝送先ノードの選定のために，経路制御をおこなう必要がある．アドホックネットワークにおける経路制御は，データ転送の際に経路制御および経路確立を行うリアクティブ型の手法，データ転送に先立って事前にそれらを行うプロアクティブ型の手法，リアクティブ型とプロアクティブ型を併用するハイブリッド型，外部からの地理情報の提供を受けてそれに基づいた経路制御を行うジオメトリ型，などがある [17].

アドホックネットワークでは，ノードの移動に応じて通信経路は基本的に変化する．そのため，マルチホップネットワークを一時的な移動ノードに対する無線ネットワークインフラとして利用するためには，変化の少ない通信経路を提供する仕組みが有効である．そのために用いることができるものとして，無線メッシュネットワーク技術 [18, 19, 20, 21] がある．無線メッシュネットワーク技術は，無線アクセスポイントでマルチホップネットワークを構成するためのものであり，アクセスポイントの移動頻度が少なければ変化も少

ない通信経路を構成することができる．標準仕様に基づく無線メッシュネットワークの構成においては，アドホックネットワークで用いられるようなハイブリッド型の経路制御手法が用いられる．これは，アドホックネットワークと同様に無線アクセスポイントの移動や通信状況の変化への対応を可能とするものであるが，無線アクセスポイントの移動頻度が少ない場合には経路制御に関するデータ交換や処理が冗長となる．

このような背景から，移動頻度の少ない無線アクセスポイントが想定され，収容する移動ノードに対して変化の少ない経路を無線ネットワークで提供できる無線メッシュネットワークの構成を通して，利用するアプリケーションの品質の向上あるいは維持を目指す．そのために，本論文では，無線アクセスポイントの移動特性，すなわち，無線アクセスポイントの設置順序や外部ネットワークとの境界に位置するゲートウェイからのマルチホップの場合を含む隣接関係を経路制御に取り入れる手法を提案する [22, 23]．これにより，アプリケーション品質の向上あるいは維持を目的としたアプリケーション指向ネットワークを実現できる．

1.3　本論文の構成

本論文は 5 章から構成され，その内容は以下のとおりである．まず，第 2 章では，ネットワークの運用管理の観点から，ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理というアプローチとして，アプリケーション指向ネットワークを特性によって分類してそのネットワークが備えるべき要件について議論するとともに，ユーザ効用およびユーザ集団の効用を導入し，これらに基づくネットワークの運用方針設定のための指針の提示とその妥当性，有効性の評価をシミュレーションによる結果を通して示す．第 3 章では，オーバーレイネットワークの構成法という観点から，コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法というアプローチとして，IoT デバイスなどが展開された広域かつ大規模なネットワークにおけるサービス，コンテンツ情報管理手法としてのマルチオーバーレイネットワーク情報管理手法を提案する．また，IoT デバイスの代理となる委譲サーバを導入し P2P ネットワークを構築，運用することで，スケーラビリティを確保する手法についても述べる．評価として，具体的なアプリケーションを対象としたプロトタイプシステムによるエミュレーションで得られた結果を通してその有効性についても示す．第 4 章

では，ネットワークの構築・管理の観点から，無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法のアプローチとして，柔軟に無線ネットワークを構築することができる技術である無線メッシュネットワークに着目し，その構成要素であるアクセスポイントの移動特性を考慮した新しいネットワーク構成法について，その中で用いられるアドレス形式やその設定方法，経路制御方法を含めて述べるとともに，シミュレーション結果によってその有効性を示す．第 5 章では，本論文の成果を要約するとともに，今後の研究課題について述べて，本論文のまとめとする．

なお，第 2 章は文献 [24]，第 3 章は文献 [25]，第 4 章は文献 [26] で公表した結果に基づき論述する．

第 2 章

ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理

2.1　まえがき

本章では，ネットワークの運用管理の観点からユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理というアプローチとしてアプリケーション指向ネットワークを特性によって分類してそのネットワークが備えるべき条件について議論する．アプリケーション指向ネットワークの実現のためには，アプリケーションのユーザが感じる品質を高めることが必要であるが，そのためには，アプリケーションの品質，および，ネットワークの品質を高める必要がある．ネットワークの品質を高めることによって，アプリケーションの品質およびユーザの感じる品質を高めることにつながるため，ネットワークの品質を高める具体的な方法が求められる．ネットワーク資源が十分である場合は，特別な制御を行わなくても高いネットワーク品質が保証でき，最終的にユーザの感じる品質も高まると考えられる．しかし，固定的なインフラとして構築されたネットワークとは異なり，一時的に構築あるいは利用されるネットワークでは，ユーザの要求に対してネットワーク資源の不足が課題となる．

一時的に利用あるいは構築されるネットワークでは，すべてのユーザが用いるアプリケーションの要求に対してネットワーク資源が不足することによって，一般に各ユーザの用いるアプリケーションの品質が低下する課題がある．そのため，このようなネットワー

クにおいてアプリケーションの品質を向上または維持するためには，アプリケーションの品質の考慮，すなわちアプリケーション指向に基づく制御が必要である．具体的には，ネットワーク資源が不足している状況ではすべてのアプリケーションの品質を高く維持することは困難であるため，品質を高めるアプリケーションを選択できるようにするためにアプリケーションを複数のクラスに分け，クラスに優先度を設定してそれぞれに異なる制御を行うことができるアプリケーション指向ネットワークを提案する．

そのためには，アプリケーションのクラスごとに，アプリケーションの品質に関する要件をどのように満たすかを定め，制御内容を決定する必要がある．アプリケーションの品質やアプリケーションの要件がどれほど満たされたかは，アプリケーションのユーザの満足感に影響する．前述のような課題を持つネットワークにおいては，各アプリケーションに対する満足感の度合いである満足度を，優先度を設定しながら高めることが求められる．対象となるアプリケーションとして，リアルタイム通信，ストリーミング，Web ベースアクセス，ファイル転送などさまざまな要件を持つものが考えられ，これらのアプリケーションに対する満足度も状況によって異なる．

本提案では，アプリケーションのユーザの満足度を評価する基準として，計測可能なネットワークに関する品質であるネットワーク QoS を新たに定式化して定義したユーザ効用を用いる．アプリケーション指向ネットワークに関する状況の違いに対応するため，単一ユーザのユーザ効用のみを評価するのではなく，ユーザの集団の効用についても定義し，評価に用いる．クラス別のアプリケーションの品質の保証，あるいは評価を行うための方法として，クラスごとにネットワークを仮想化し，それぞれの仮想ネットワークに対して異なる運用方針設定を適用することがあげられる．このように，仮想化技術を用いることで多様な形態，あるいは規模のアプリケーション指向ネットワークを構築，運用，管理することが可能となる．このような技術として利用できるものに SDN (Software Defined Network) や NFV (Network Function Virtualization) がある．

SDN[11, 12] は物理ネットワークを仮想化し，スライスと呼ばれる複数の仮想ネットワークを運用することを可能とする．これまでに，複数のスライスを管理するための提案が多くなされている [27, 28]．NFV は，物理デバイスであるハードウェアとソフトウェアを組み合わせることにより，NFs (Network Functions) を構築，展開，管理するのを可能とする [13, 14]．そのため，ネットワークサービスプロバイダは物理デバイスを新規

に展開することなく容易に新しい NFs を導入することができる．実際のネットワークに VNFs (Virtual Network Functions) を導入するためには，NFV MANO (NFV Management and Network Orchestrator) のような追加の管理機構を適用する必要がある．NFV MANO はネットワーク上のエンド・エンド間のサービスを提供するためのさまざまな資源割当機能をサポートすることも可能である [29, 30, 31].

NFV ベースのネットワークにおける最も有益な特徴のひとつは，従来の仮想化されていないネットワークと比較して，それが一時的なものであってもさまざまなネットワークを柔軟に構築し運用することが可能であるということである．ネットワークの要件が次第に変化するような場合においても，NFV ベースのネットワークは適応的に変更，管理することができる．加えて，仮想化されていないネットワークの構築の手間とコストは一般的に NFV ベースのネットワークと比べて高いため，NFV ベースのネットワークはコスト効率の良い小さい規模にてネットワークを構築し運用することが可能である．

VNF や NFV MANO と SDN とを組み合わせることで，ソフトウェアとハードウェアの両方を分離して SDN における各スライスを柔軟に運用し，管理することができる．したがって，ネットワーク資源，および，コンピューティング資源に関する環境に制約がある場合，エンドユーザに対して価値のあるネットワークサービスやアプリケーションを迅速かつ柔軟に提供する．

このように，仮想化技術を適用することによってアプリケーション指向ネットワークにおいてクラス別のネットワークに関する運用管理が実現可能になる．ただし，先にも述べたように，ネットワーク資源の制約やアプリケーションの品質評価基準はアプリケーション指向ネットワークに関する状況によって異なるため，画一的に評価基準や運用管理方針を設定するのは妥当ではない．そこで，アプリケーション指向ネットワークを分類し，それらに合わせた運用管理に関する指針を提案する．示される指針は，ネットワーク上で柔軟な制御を行えるようにするために NFV が利用できるアプリケーション指向ネットワークを前提として，ユーザの集団の効用に従ってクラス分けされたアプリケーションのトラフィックに対して行われる制御で参照される運用方針設定の設計のために用いられる．図 2.1 に概念図を示す．

以降，想定するアプリケーション指向に基づき制御を行うネットワークの特徴について議論し，アプリケーションを指向するためのメトリックとしてネットワークにおけるユー

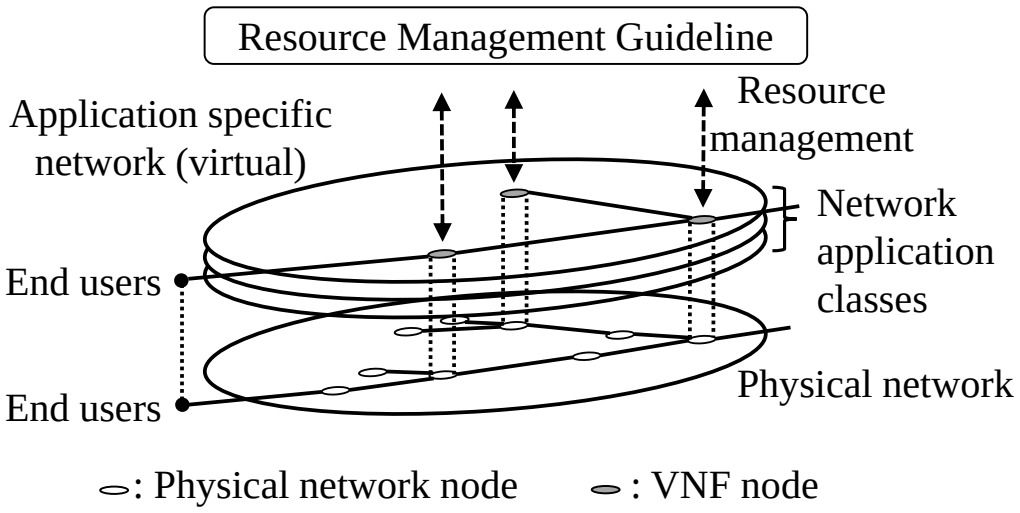

図 2.1　NFV ベースアプリケーション指向ネットワーク

ザ集団の効用を採用する方法について示す．そして，典型的なアプリケーション指向ネットワークを想定したシミュレーションによる評価を通して，それぞれのアプリケーション指向ネットワークに適したネットワークにおける運用方針設定のための指針を提案する．

2.2　アプリケーション指向ネットワーク

2.2.1　アプリケーション指向ネットワークにおけるアプリケーションの分類

アプリケーション指向ネットワークでは，アプリケーションのフローが集中するリンクや転送速度が十分でないリンクにボトルネックが発生する可能性がある．そのようなとき，その影響を軽減するためにアプリケーションをクラス分けし，各クラスに対して適切に運用管理を行う必要がある．

ここでは，アプリケーション指向ネットワークにて展開されるアプリケーションを表 2.1 に示されるようにクラス分けすることを提案する．ここでは，(a) 非常に重要で必ず受け入れられる（重要アプリケーション），(b) ネットワークの特性とネットワーク資源の制約に対応付けて優先される管理可能なアプリケーション（管理可能アプリケーション），(c) その他のバッググラウンドトラフィックに位置づけられるもの（一般アプリケーション）がある．シンプルなシナリオは，管理可能なアプリケーションが厳しい制約下におい

表 2.1　ネットワーク資源制約下でのアプリケーション管理方針

アプリケーションクラス	リソース制約 厳しい <----------> 軽い
重要アプリケーション	最優先
管理可能アプリケーション	余裕のあるとき <----------> 優先
一般アプリケーション	余裕のあるとき

て最重要ではない，あるいは，軽い制約下において他より優先されるときのみサービスを指向した運用と管理に関する方針を導入するものである．

以降，典型的なアプリケーション指向ネットワークの分類例をあげ，その中で用いられるアプリケーションの性質や品質評価基準を考察する．

2.2.2　災害時ネットワーク

甚大な被害のある災害などの緊急の状況下では，多くのユーザのさまざまな要求を満たすための十分なネットワーク資源がないことが想定される．物理的なインフラが急に損傷すると，ユーザは制約の厳しい衛星回線によるインターネットアクセスなどを共有する必要がある．物理インフラに損傷がない状況下であっても，避難所などの特定のネットワーク利用環境において一時的にユーザトラフィックが混雑することが予想される．

このようなネットワークの管理においては，ネットワーク資源は公共事業や食料の配給といったその時の状況に関する重要な情報を収集するユーザへ優先的に割り当てられる．ユーザもまた家族，親戚，友人，同僚といった人々と連絡を取ることを希望し，そのために IP 電話といったリアルタイム性のあるアプリケーションを使用する可能性がある．時間の経過により緊急時の状況が変化すると，ユーザの要求とともにアプリケーションの重要性は変化する．この場合では，状況の変化に応じて必要となるネットワーク機能の変更が可能な VNF を用いてネットワーク資源の制約に従いながら適応的にネットワークの管理を行っていく必要がある．

このようなネットワークにおける管理指針としては，**「重要な情報を含む通信を最優先**

に取り扱うとともに，リアルタイム性のあるアプリケーションを高いユーザ効用の下で一定のユーザ数に提供するために，一定数のアプリケーションのネットワーク体感品質が高まるような帯域制御を行う」ものが考えられる．

2.2.3　大規模なイベントネットワーク

大規模イベントネットワークは，インターネット接続に関するネットワーク資源が限定的である一時的なネットワークである．加えて，ネットワーク上のトラフィックはイベントのタイムスケジュールや時限コンテンツやアプリケーションの使用傾向に依存する．VNF のような柔軟なネットワーク機能は資源に制約のあるネットワークにおいて有用である．このようなネットワークの例として，パブリックビューイング，展示会，国際会議，などが挙げられる．

このようなネットワークでは，広帯域が必要な映像配信が参加者に対して提供されることがある．例えば，パブリックビューイングにおける印象的なシーンのリプレイ映像や技術的なテーマを扱う展示会や国際会議における新製品の宣伝映像などがある．映像が観られるようになった旨のアナウンスが行われると，多数の参加者が映像を同時に視聴する．このことはバースト性のあるトラフィックの原因となる．基本的に，イベント用ネットワークの容量は限定的であり，そのような状況下では輻輳が発生する．さらに，参加者の満足感はビデオストリーミングのようなリアルタイム性のあるアプリケーションの利用可否に依存する．それらの特徴はリアルタイム性のあるアプリケーションは最優先ではなくとも優先されるべきであることを表している．

このようなネットワークにおける管理指針としては，**「リアルタイム性のあるアプリケーションをできるだけ多くのユーザがある程度のユーザ効用の下で利用できるようにするために，ユーザ効用を考慮しつつアプリケーションのフローをなるべく多く受け入れる」**ものが考えられる．

2.2.4　インターネットサービスプロバイダのネットワーク

サービスプロバイダネットワークは，NFV のような仮想化によるアプローチによって柔軟に構築することが可能である．典型的なネットワークの例は，MNO (Mobile Network

Operator) の無線アクセスインフラ上に仮想的に構築される MVNO などがある．MVNO は安価なインターネット接続を顧客に提供する．アプリケーションを効果的に管理することにより，MVNO は無線アクセスインフラとトランジットネットワークの両方の利用コストを削減する．結果として，MVNO はコストを抑えることによって競争力を高めながら適度なインターネット接続サービスを提供することが可能である．そのためには，MVNO は顧客の満足度の総計によって評価され，管理は戦略的に，企業のビジネスモデルに即してアプリケーションを適切に管理する必要がある．

ユーザは，データ量上限を超過した場合に適用される高価な追加チャージ，あるいは速度制限のために顧客は必要以上にネットワーク資源を消費することを望まない．そのため，利用するアプリケーションに対して，できるだけ高い体感品質を保証するよりむしろ許容範囲内で体感品質を下げて提供することで収容ユーザ数を増やすのが望ましい．

このようなネットワークにおける管理指針としては，**「収容するユーザー数を増やしながらも，アプリケーションのユーザ効用が許容範囲に収まるようにする」**ものが考えられる．

2.3　ユーザ効用に基づくネットワーク運用指針

2.3.1　ネットワーク運用指針の提案

これまでに述べたように，アプリケーション指向ネットワークそれぞれには利用が想定され重視すべきアプリケーションが存在し，そのアプリケーションの品質に着目することが重要である．それらのアプリケーションの品質を高めるためには，クラス分けとアプリケーションの特性に応じたネットワークの運用および管理を行いネットワークの品質を高める必要がある．しかし，これまでに示したように，各アプリケーション指向ネットワークによって，アプリケーションの各クラスに対しどのような運用管理を行えばよいのかが変化する．すなわち，同一のアプリケーションであっても，アプリケーション指向ネットワークによってアプリケーションの品質に対する重要性はさまざまであり，それを高めるための管理方針も異なる．

そこで，各アプリケーション指向ネットワークにおける，アプリケーションのクラスに対する具体的な運用指針が必要となる．この指針では，アプリケーションのクラスごとの

品質評価はユーザの効用，および新たに定義した集団のユーザの効用に置き換えられ，それを最大化するためのアプリケーションに対する運用方針が示される．すなわち，想定するアーキテクチャにおいては，指針に沿ってアプリケーションのクラスごとにネットワーク資源に関する運用管理を行いネットワークの品質を高めることになる．この指針は，アプリケーション指向ネットワークの性質，具体的には，ネットワークが構築された目的やネットワークで優先されるべきアプリケーションのクラスにおける品質評価基準に沿って規定される．

ここではアプリケーション指向ネットワークでは，アプリケーションは 3 つのクラスへ分類され，VNF によって管理されるものとする．アプリケーションの管理を行うためにメトリックは必要とされるが，それには従来のフロー毎の QoS あるいは QoE (Quality of Experience) 管理 [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 32, 33] だけではなく，アプリケーション指向あるいはプロバイダ指向のメトリックを含む特徴ベースメトリックを想定する必要がある．

本章では，NFV ベースのアプリケーション指向ネットワークにおける，ユーザ集団とシンプルなアプリケーションを指向したメトリックとしてのユーザ集団の効用に着目する．アプリケーションの各フローは適切にクラス分けされ，制御される．

2.3.2　ユーザ効用

ここで，物理 QoS メトリックをアプリケーション指向メトリックへ変換することで単一のユーザ効用を導入する．本章では，ユーザ効用は図 2.2 に示されるように，Waver-Fechner 則から導かれる式によってビットレートに関連付けられる．Waver-Fechner 則は，物理刺激の実際の強度と知覚との間の関係を示すものであり，QoE の計測のために利用することができる [34]．この法則を参考に，平均ビットレートといったアプリケーションの品質の変化がユーザの感じる品質にどのように影響するかをモデル化する．U がアプリケーションのユーザからなる集合であるとし，U に属するユーザ i に対して，ユーザ効用関数を次のように定義する．

$$S(b_i) = \frac{\log(B_i/b_{MIN})}{\log(b_{MAX}/b_{MIN})}$$

b_i はユーザ i のアプリケーションの平均ビットレートを表す．b_{MAX} および b_{MIN} は，それぞれ，アプリケーションの最大ビットレートと最小ビットレートを表す．b_{MAX} は，

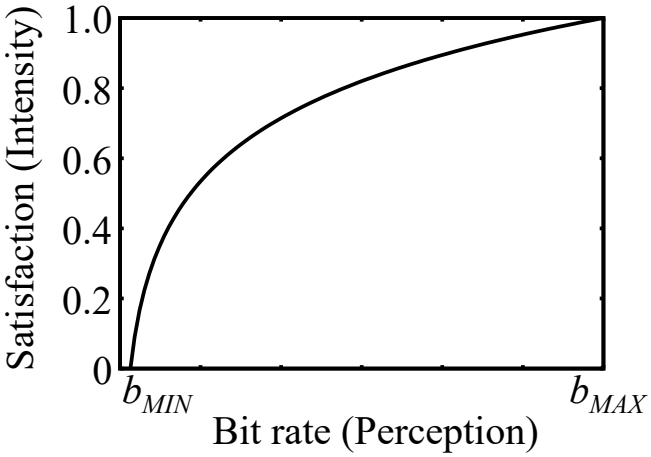

図 2.2　ビットレートに基づくユーザ効用

サービスおよびネットワーク設定から推定された上限値を設定する．b_{MIN} は，最低品質でアプリケーションの実際の使用を保証するための値である．

2.3.3　ユーザ集団効用

ひとりのユーザ効用の拡張であるユーザ集団の効用 S_M は下記のように形式化される．

$$S_M = \sum_{i \in U} w_i S(b_i)$$

このとき，w_i はユーザ i の重みであり，0 か 1 が設定される．全ユーザを対象とした際のユーザ集団の効用はすべてのユーザの重みを 1 として算出する．特定のユーザに着目する場合は，次式のように，それらユーザの重みを 1 とし，それ以外のユーザの重みを 0 とする．

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{(selectedusers)} \\ 0 & \text{(others)} \end{cases}$$

想定しているアーキテクチャにおいては，アプリケーションをクラス分けしており，それぞれのクラスに属するアプリケーションのユーザに効用が存在する．特定のクラスに属するアプリケーションのユーザのみを対象として効用を算出する場合，それらのユーザの重みを 1 とする．

正規化ユーザ集団効用 S_{NM} は，以下のようにユーザ数 $|U|$ で S_M を平均化することで

得られる．

$$S_{NM} = \frac{1}{|U|} \sum_{i \in U} w_i S(b_i)$$

本章では，ユーザ集団の効用に対して重み w_i を 0 あるいは 1 に設定する．重みはより柔軟なメトリクスとして実数を用いることも可能であるが，その有効性は今後の課題とする．

2.4　シミュレーションによる運用指針の評価

2.4.1　想定するネットワーク環境

ユーザ集団の効用を基にしたネットワーク資源管理は，各ネットワークにおけるそれぞれの運用と管理に関する戦略に従って行われる．最適な管理のためには，さまざまなアプリケーションとネットワークについて研究し，その上で，個々の状況に沿ったよりよい制御の仕組みを選択することが必要である．本節では，有用な資源管理指針は，典型的な NFV ベースのネットワーク設定とそこでのいくつかのアプリケーションに関するシミュレーション結果を報告することによって議論される．

ネットワークにボトルネックが存在するときに，資源管理を行う必要がある．二つのアプリケーション指向ネットワークをボトルネックリンクが接続するという最もシンプルな状況を想定する．図 2.3 にて示される想定ネットワークは，ネットワーク NA および NB からなり，ネットワーク NA 上の物理ノードに設定されたひとつの VNF ノードおよびネットワーク NA が提案したユーザ集団の効用によって管理されるものとする．各リンク容量は，有線アクセスリンクあるいは無線ネットワークのバックボーンとして利用しやすい 1Gbps とする．

アドミッション制御，優先制御，帯域制御がネットワーク管理手法として用いられる．アドミッション制御では，フロー数は各ネットワークのネットワークの運用と管理に関する戦略に従って規制される．言い換えれば，各フローはアドミッション制御の結果を経たうえで確立される．優先制御と帯域制御はフローのクラスに従って実施される．

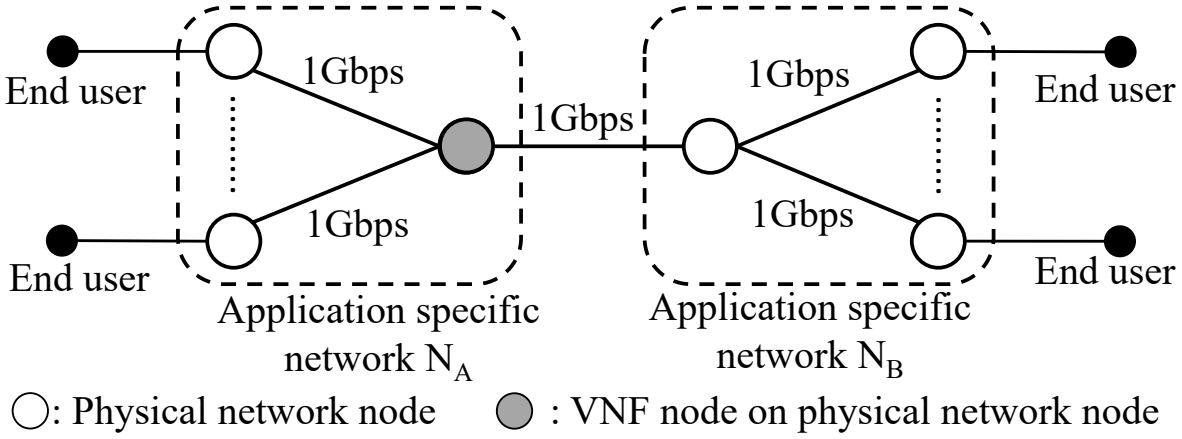

図 2.3　想定ネットワーク環境

2.4.2　シミュレーション環境

シミュレーションでは，アプリケーションの全フローは，表 2.2 に示されるような 3 つのクラス種別へとクラス分けされる．ネットワークにおいて非常に重要なアプリケーションは最も高い優先度のクラス A としてカテゴリ分けされる．例として，公共の情報や食料の配給のその時点での利用可否に関するブロードキャスト配信などが挙げられる．管理可能なアプリケーションはクラス B としてクラス分けされる．例として，リアルタイム映像ストリーミングのためのアプリケーションなどが挙げられる．その他のアプリケーションは最も優先度の低いクラス C として分類される．例として，Web ブラウジングなどが挙げられる．具体的な数値例として，表 2.2 に各アプリケーションクラスに対するシミュレーションパラメータが示されている．クラス A とクラス C に対するトランスポート層のプロトコルとして TCP を設定し，クラス B に対しては UDP を設定した．クラス B のビットレートは映像ストリーム配信といったアプリケーションを想定した場合に十分な品質，画質を確保できるよう 6Mbps に設定した．ネットワークが混雑している状況を想定するため，フロー数とフローの発生間隔は以下のように設定した．クラス A に対するフロー数は 100，クラス B に対しては 100 から 300，クラス C に対しては 50 あるいは 200 とした．各フローは，二つのネットワーク間のボトルネックリンクを通過するとした．シミュレーションでは，各フローが 1 秒以内のランダム時間間隔で発生することとし，シミュレーションは 65 秒で終了することとした．

表 2.2　シミュレーションにおけるアプリケーションパラメータ

		class A (重要)	class B (制御対象)	class C (その他)
プロトコル		TCP	UDP	TCP
ビットレート		可変	固定 (6Mbps)	可変
フロー数		100	100−300	50, 200
CBQ	優先度	1	2	3
	割当帯域割合	0.3	0.6	0.1

接続とキューイングをトレースするため，シミュレータには NS-2 (Network Simulator ver. 2)[35] を採用した．優先制御と帯域制御は CBQ (Class Based Queueing) の機能を用いた．CBQ はネットワーク NA から外部ネットワークへ出ていくフローに対して適用した．優先制御においては，優先度の値として 1，2，および 3 をクラス A，B，および C に割り当てた．リンク帯域の使用割合は混雑した状況を想定し，クラス A，B，および C に対して，0.3，0.6，および 0.1 を設定した．

個々のユーザに対するユーザ効用とユーザ集団の効用の式は先の節で示されたものを使用し，各ユーザに対しては 1 本のフローを対応させた．クラス A およびクラス C の b_{MAX} には，混雑のない状況で計測した値である 4.189Mbps を設定し，クラス B の b_{MAX} には 6Mbps を設定した．すべてのクラスに対して，b_{MIN} には 128kbps を設定した．クラス B の b_{MAX} と各クラスの b_{MIN} は，H.265 (High Efficiency Video Coding: HEVC)[36] の Main tire Level 3 および Level 1 を参照して設定した．

2.4.3　シミュレーション結果と考察

シミュレーション結果では，おのおののユーザ効用は平均ビットレートから算出し，ユーザ集団の効用は前述の式において該当するユーザの重みを設定して算出した．シミュレーション結果のグラフでは，横軸にクラス B にクラス分けされたフローの数をとり，縦軸に各種のユーザ効用の値をとった．

まず，図 2.4 はすべてのアプリケーションクラスを対象としたユーザ集団効用を示した．グラフでは，三角と四角のプロットは優先制御を行った場合であり，丸印と×印が優

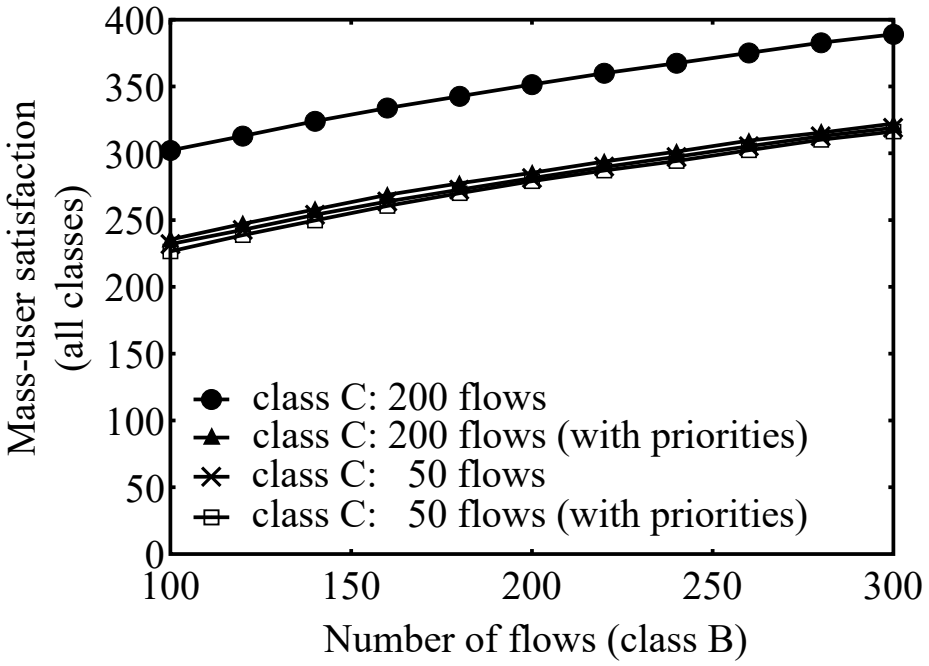

図 2.4　ユーザ集団効用（全クラス）

先制御を行わなかった場合を示している．丸印と三角のプロットはクラス C のフロー数が 200 のときの結果であり，×印と四角のプロットはクラス C のフロー数が 50 のときをそれぞれ示している．丸印と×印で示されるユーザ集団の効用はそれぞれ三角と四角で示されるものを上回っている．

ここで，図 2.5 において示されている正規化ユーザ集団効用が，クラス B のフロー数が増加したときであってもそれほど低下していないことが分かる．クラス B のフロー数を増加させることは，大きい資源制約を引き起こしていることを示している．それゆえ，そのような状況下で管理可能なアプリケーションに対して資源を割り当てることが必要であるときは，割り当てに際してクラスベースのトラフィック管理を行わないほうがよいと言える．この状況には，先の節にて議論した災害時の一時ネットワークの早期フェーズが該当すると考えらえる．具体的には，資源が確保されているために最優先に取り扱われる通信は高い品質を維持できていると同時に，割り当てられている資源があることを前提にリアルタイム性のあるアプリケーションを一定数のユーザに対して許可してもユーザ効用あるいはユーザ集団の効用の低下をある程度抑えることができると考えられる．これは，先に述べた，**「重要な情報を含む通信を最優先に取り扱うとともに，リアルタイム性のあ**

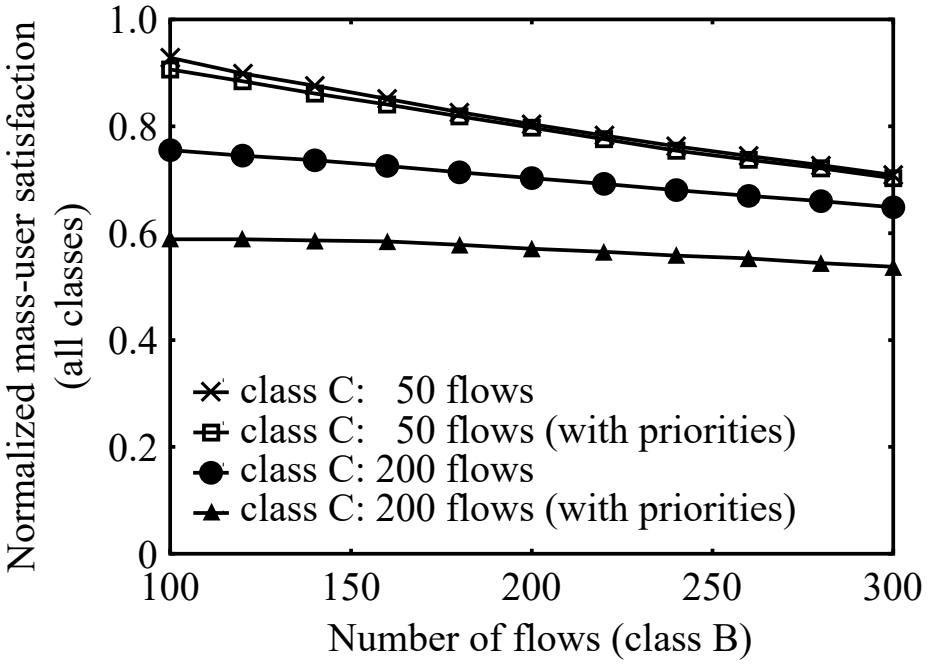

図 2.5　正規化ユーザ集団効用（全クラス）

るアプリケーションを高いユーザ効用の下で一定のユーザ数に提供するために，一定数のアプリケーションのネットワーク体感品質が高まるような帯域制御を行う」という指針に沿っているといえる．

さらに，クラス B のフローをさらに受け入れることが可能である場合を考える．そのようなときは，各クラスのユーザ効用を考慮する必要がある．図 2.6 は，クラス B に着目し，すべてのユーザ効用のうちの 95% を表す箱ひげ図によって正規化ユーザ集団効用を示す．結果において，評価対象とみなされるユーザを上位 95% とするため，外れ値は検討に含めない．この図では，各正規化ユーザ集団効用はフロー数が増加するにつれて減少している．箱ひげ図における髭の下端で表されるユーザ効用も減少している．この結果より，ネットワーク資源の制約が厳しくなるにつれて，全体の 95% のユーザの効用の下限と同様にすべてのユーザの効用の総計を高めるために，ネットワーク資源はクラス B に対してさらに割り当てられるべきであるといえる．この状況は，先の節において議論された MVNO ネットワークに当てはめることができる．具体的には，上位 95% を評価対象としたとき，先の結果と合わせて，帯域制御の対象となるクラスに属するアプリケーションをより多く受け入れても，ユーザ集団の効用という視点ではその低下をある程度抑えられる

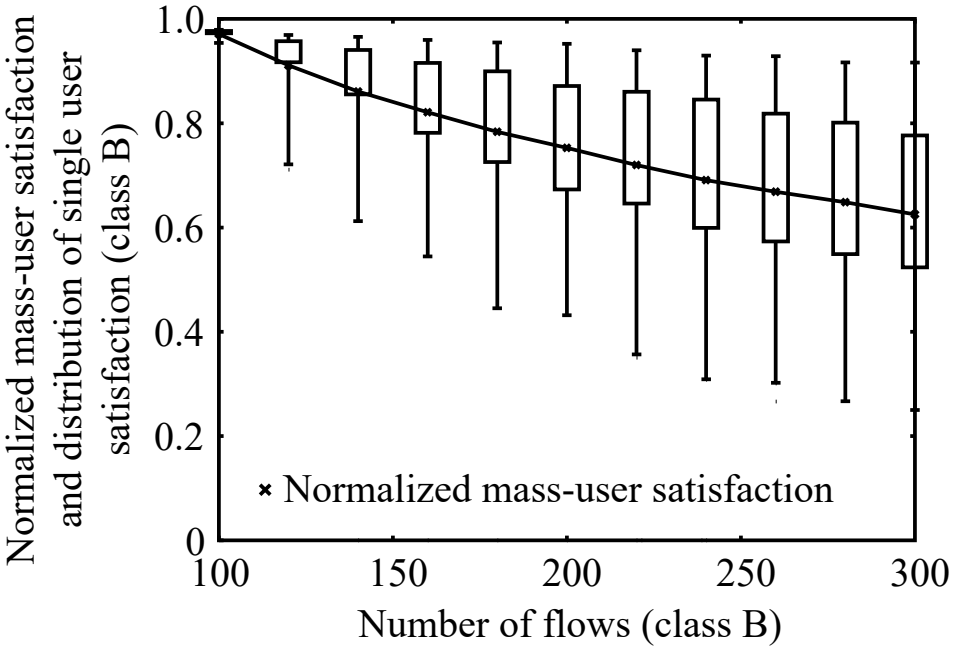

図 2.6　正規化ユーザ集団効用（クラス B）とユーザ効用分布

ことを示している．これは，**「収容するユーザー数を増やしながらも，アプリケーションのユーザ効用が許容範囲に収まるようにする」**という指針に沿っているといえる．

さらに，ネットワーク資源の制約が厳しくなくその他のものよりも優先されることが期待される管理可能なアプリケーションにネットワーク資源が割り当てられるとき，ネットワーク資源はクラスベーストラフィック管理下において可能な限り管理可能アプリケーションに対して割り当てられるべである．これは，大規模イベントにおける時限コンテンツのビデオストリーミングのようなアプリケーションの最小の効用を向上させることができることを示している．具体的には，割り当てる資源を多く確保することができるような場合は，ユーザ集団の効用の低下をある程度抑えられる範囲内で多くのアプリケーションのフローを受け入れられることを示している．これは，**「リアルタイム性のあるアプリケーションをできるだけ多くのユーザがある程度のユーザ効用の下で利用できるようにするために，ユーザ効用を考慮しつつアプリケーションのフローをなるべく多く受け入れる」**という指針に沿っているといえる．

これらの資源管理指針は，典型的な NFV ベースのネットワーク設定シミュレーション結果から導かれるものである．NFV ベースのアプリケーション指向ネットワークの管理目的を明らかにし，アプリケーションの対象ユーザと同様にネットワークにおけるユーザ

集団の効用と正規化ユーザ集団効用に関するバランスを維持することは重要である．

2.5　むすび

本章では，アプリケーションごとに異なる要求を満たすアプリケーション指向ネットワークに対し，ネットワーク運用管理の観点から，アプローチした．さまざまなネットワークにおけるアプリケーションごとの要求を分析し，その要求を満たすためのネットワークにおける運用方針設定の基になる指針を示した．さらに，ボトルネックにおけるアプリケーション間の調整を実現するために，ネットワークメトリックとしてユーザー効用を評価指標としたネットワーク運用指針を提案した．NFV ベースネットワークを想定したシミュレーションを行い，ユーザ集団の効用に基づくネットワーク資源管理指針が典型的なアプリケーション指向ネットワークでのシミュレーション結果を分析することによって示された．

今後の課題として，個々のユーザの効用の導出に関し，さまざまな QoE メトリックとともに，異なるモデルによる効用値の算出や異なる効用関数の導入を行うことが考えられる．今回の効用の算出に用いた効用関数は効用の値が連続的に変化するものを採用しているが，これはメディアストリームの配信をアプリケーションとした際に用いることを想定したものであり，他のアプリケーションにも適用できるとは限らない．そのため，アプリケーション指向ネットワークの適用範囲を広げるために，他のアプリケーションに応じた効用モデルをさらに検討しておく必要がある．また，ユーザ個人の効用に基づいて算出されるユーザ集団の効用についても，今回示した線形のモデル以外のものを採用を検討することが考えられる．これは，ユーザ集団の効用の最適化問題であり，ネットワークの運用方針やアプリケーション指向の内容に応じて既存の最適化問題の解法が適用できる可能性がある．

また，今回の提案あるいは評価では，仮想ネットワークの構築や運用管理について具体的な実現方法を含んでいないため，仮想ネットワークあるいは仮想ネットワーク機能を前提とするネットワーク資源管理指針の適用に関して，複数のスライスにおけるネットワークの運用管理を実現するシステムの設計やそれを実現する際に使用できる VNF あるいは SDN モジュールの調査も検討している．これらにより，実際にアプリケーション指

向ネットワークを設計あるいは構築する際に，ネットワーク構築のために満たすべき要件や選択し得る指針を事前に示すことができるようになる．このことが，アプリケーション指向ネットワークの実現可能性の評価にもつながると期待できる．

第 3 章

コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法

3.1 まえがき

近年においてネットワーク上に分散したファイルや IoT デバイスが提供するセンサー情報を発見し，利用するアプリケーションが広まっている [1]．IoT 環境に展開されたアプリケーションやサービスには多くの利点を持つものがあり，温度センサー, カメラなど様々なセンサーが広域に分散され，計測値や映像を必要なところに配信するといったアプリケーションが考えられる. 必要なセンサー情報をもつセンサーをいち早く発見し，膨大なセンサーの中から必要なものを如何に効率的に見つけるかということが課題となる．これらアプリケーションでは，ネットワーク上に存在するノードが保持，あるいは提供するデータを効率的に検索するためにオーバーレイネットワークが用いられる．本章では，これらのアプリケーションを対象としたアプリケーション指向ネットワークとして，オーバーレイネットワークの構成管理方法を考える.

このような環境は多数の種類の IoT デバイスから構築され，膨大な数の IoT デバイスが存在するため，求めるコンテンツを有する，あるいはサービスを提供する（以下ではまとめてコンテンツと呼ぶ） IoT デバイスを検索することは容易でない．というのも，IoT デバイスの計算資源やストレージは通常貧弱であるため，IoT デバイスが直接コンテンツの検索を行うことは，時間や消費電力のために歓迎されない.

IoT デバイスの計算資源などの不足に起因するアプリケーションの品質の低下という課題を解決するために，ネットワークがアプリケーションサービスの支援を行うためのフレームワークとしての役割を担うことを考える．すなわち，ネットワーク上に IoT デバイスのノード情報や IoT デバイスが提供するコンテンツ等に関する情報を保持する仕組みを設け，アプリケーションが必要とする情報をそこから受け取ることができるようにする．さらに，さまざまな基準によって構成された複数のオーバーレイネットワークを配置し，アプリケーションの要件に応じてオーバーレイネットワークを選択できる方法を提案する．

本章では，アプリケーション指向ネットワークとして IoT デバイスのコンテンツ発見に利用可能なマルチオーバーレイネットワークの構成法について述べる．提案手法の有効性を，検索ヒット率，同一ネットワークからの取得率について比較することによって評価する．評価で用いられるネットワークモデルには日本における光ネットワークモデルのひとつを利用し，委譲サーバは日本の人口分布に従って各都市に配置される．委譲サーバの基本的な機能は既存の P2P エージェントプラットフォームで提供される API を利用する．これらを実装したプロトタイプシステムによって評価する．

3.2 広域ネットワークにおける大規模ノード群に対する管理技術の動向

ここでは，本章で対象とするアプリケーション指向ネットワークである広域ネットワークにおける IoT デバイスからなる大規模ノード群に対する管理技術の動向を述べる．最近では，IoT デバイスを想定したネットワークサービスを提供するための多くのシステムやフレームワークが提案されている．IoT デバイスは，大容量のコンテンツを処理する，あるいは保管するための十分な計算資源あるいはストレージを持たないため，それらのシステムやフレームワークは，IoT デバイスやそれらのコンテンツの情報を集約している．一方で，P2P ネットワークモデルに基づく分散システムでは，個々のピアが他のピアやそれらのコンテンツに関する情報を管理する．ネットワークに関する情報は個々のピアによって維持管理されているが，いくつかのフレームワークではピアやその上で動作するアプリケーションに情報を提供するものもある．以下では，これらのシステムやフレームワーク

について述べる．

3.2.1　IoT デバイス群とそれらの管理アーキテクチャ

IoT デバイスに基づくサービスは多く提供されている．IoT デバイスの種類は多様でありそれぞれの特性があるため，いくつかのアーキテクチャでは仮想的にアプリケーションサービスを提供するためにそれらの計算資源などを集約する [37, 38, 39]．この集約は IoT デバイスの資源管理を柔軟に行うことを可能とする．

しかし，これらのアーキテクチャやシステムにおいては，ひとつのネットワークに存在する IoT デバイスの数に応じて設計を行う必要がある．それに対し，インターネットのような広域のネットワークでのサービス提供を検討するためには，現在のシステムモデルと比較してより多くの IoT デバイスを管理する必要がある．IoT デバイスの数が膨大であるため，IoT デバイスに基づくそのようなシステムを実現するにはスケーラビリティに関して多くの課題がある．IoT ノードを管理するためのブローカを展開し，P2P ネットワークモデルに基づくフレームワークがある [40] が，IoT ノード自身が相互に通信を行うため，これまでに述べたスケーラビリティに関する課題が解消されるわけではない．

3.2.2　P2P ネットワークモデルに基づくノード管理アーキテクチャ

これまでに，多くの P2P ネットワークモデルに基づいたファイル共有アプリケーションが実装され使用されてきた．そのようなファイル共有アプリケーションによっていくつかの問題が引き起こされてきたが，情報分散に対する方式自体は有用であり，音声チャットやオンラインゲームといった P2P ネットワークアプリケーションの基礎的な機能の提供に寄与した．各ピアは他のピアに関する情報を交換することで P2P ネットワークを構築する．その P2P ネットワークはオーバーレイネットワークであり，ピア同士は必ずしも物理的に接続されていなくてもそのオーバーレイネットワーク上で相互に接続される．ピアやそれらが保持するコンテンツに関する情報を集中的に管理するサーバを必要としないピュア P2P ネットワークモデルは，大規模な分散システムに対して特に有用である．本節では，これらの P2P ネットワークモデルにおけるネットワーク管理手法およびアプリケーションに対する情報提供の方法について説明する．

ネットワークトポロジのようなネットワーク情報はアプリケーションにとって有用な情報である．同一のコンテンツが得られるのならば，近隣のネットワークで各ノード同士が通信を行うのが望ましい．以下のように，ネットワーク情報を提供するアーキテクチャがいくつかのワーキンググループによって提案されている．

P4P (Provider Portal for Application) アーキテクチャ [41] は，DCIA (Distributed Computing Industry Association) 内の P4PWG（P4P ワーキンググループ）によって提案されている．このアーキテクチャでは，アプリケーションにネットワーク情報を提供する “iTracker” と呼ばれるヒントサーバを ISP が展開する．ネットワーク情報は，ネットワーク距離，ポリシー，ネットワーク容量を含む．

ALTO (Application-layer Traffic Optimization) プロトコルは RFC (Request for Comments) として標準化されている [42, 43]．RFC は IETF (Internet Engineering Task Force) によって広告される技術文書であり，多くの RFC は事実上の標準仕様として扱われている．各ノードは，ALTO サーバから ALTO プロトコルによってネットワークコストに関する情報を取得することが可能である．

これらのアーキテクチャでは，ネットワーク内のノードに対してネットワーク情報を取得することを可能とするが，ISP がヒントサーバを設置する必要がある．ネットワークが ISP との関連なく個々に構築された場合は，自律的にオーバーレイネットワークを構築するための手法が必要となる．

3.3 アプリケーション指向 P2P マルチオーバーレイ情報管理アーキテクチャ

IoT デバイスを想定したアプリケーションは IoT デバイスによって提供されるサービスやコンテンツに対する情報管理を必要とする．情報管理には，コンテンツ検索やデータ転送についての機能を含む．ネットワーク内に集中型のサーバが存在しない場合，IoT デバイスに関する情報を自律的に分散して伝播することが必要である．しかし，IoT デバイスには多くの種類が存在する上，先に述べたようにいくつかの状況下においてその数量は膨大である．加えて，膨大な数の IoT デバイスで構成されるシステムにおいて，計算資源やストレージの貧弱な IoT デバイスが直接コンテンツの検索を行うことは歓迎されない．

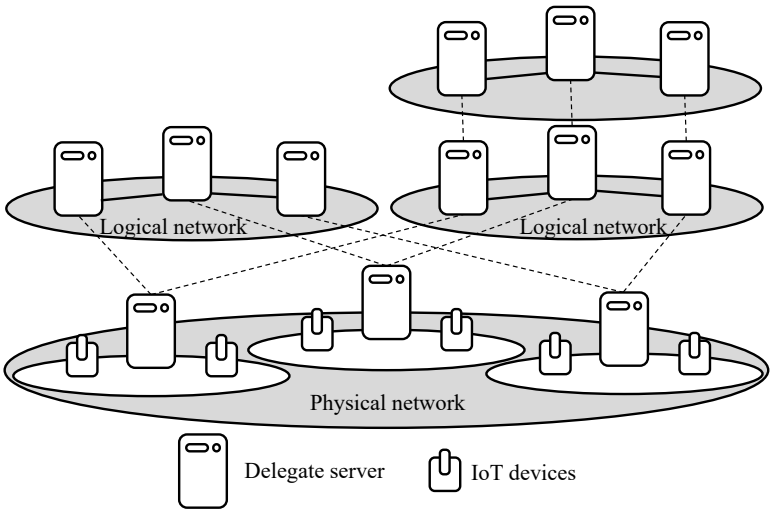

図 3.1　提案システム概要

そこで，コンテンツの検索を効率的に行うための全体システムにおけるネットワークモデルとして P2P ネットワークモデルを採用し，IoT デバイス群を想定した P2P ネットワークアプリケーションのためのマルチオーバーレイネットワーク構成法を提案する．提案システムでは，オーバーレイネットワークはさまざまな基準に基づいて構築され，物理ネットワーク層の上位に配置される．また，IoT デバイスの計算資源やストレージの制限や消費電力を考慮して，十分な計算資源やストレージを備える「委譲サーバ」と呼ばれるサーバを導入する．委譲サーバは，P2P ネットワークモデルにおけるノードであるピアとみなされ，コンテンツ検索やデータ転送に関する機能を実現するためのオーバーレイネットワークを構築する．IoT デバイスのアプリケーションが稼働するピアは，アプリケーションの要件あるいはコンテンツの特性に応じてオーバーレイネットワークを切り替えることにより委譲サーバより IoT デバイスに関する情報を受け取る．図 3.1 に提案システムの概要を示す．

本節では，P2P ネットワークアプリケーションによる，コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法の概要を示す．さらに，複数のオーバーレイネットワークの内容についても説明する．

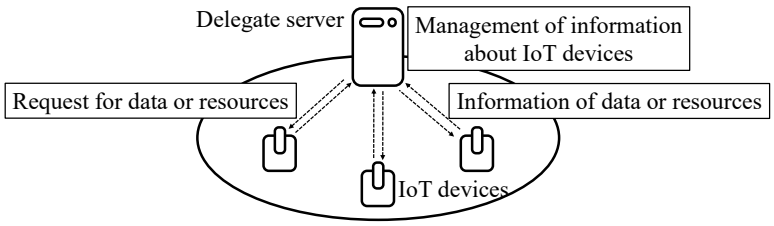

図 3.2　委譲サーバと IoT デバイス

3.3.1　全体アーキテクチャ

IoT デバイスはコンテンツ検索に要する計算資源，ストレージなどの不足を自らが負担できないため，P2P ネットワークモデルにおけるピアの役割を移譲サーバーに委譲する．委譲サーバは，P2P ネットワークモデルにおける構成要素であるピアとしてネットワークを構築し，各 IoT デバイスに代わって情報を交換する．提案システムにおいて，ピアの役割を担う委譲サーバは IoT デバイスに関する情報を管理し，その情報は P2P ネットワークの構築のために使用される．

委譲サーバは配下の IoT デバイスの情報を収集し，それらの IoT デバイスが提供するコンテンツによって特徴づけられる．委譲サーバは IoT デバイスのコンテンツを管理し，配下の IoT デバイスに代わってリクエストに対して応答する．コンテンツが要求されると，移譲サーバはプロキシサーバのようにふるまう．図 3.2 は移譲サーバと IoT デバイスとの間の関係を示す．

3.3.2　アプリケーション指向 P2P マルチオーバーレイ情報管理

提案において構成されるオーバーレイネットワークはピュア P2P ネットワークモデルに基づくものである [15]．ピュア P2P ネットワークモデルは，ピアに関する情報を管理するための集中型のサーバを持たず，すべてのピアは独立してネットワークへの参加や離脱を行う．そのため，コンテンツやピアに対する検索は，オーバーレイネットワーク上のピア間で要求メッセージを交換，転送することで実行される．

P2P ネットワークモデルに基づくいくつかのアプリケーションは，コンテンツやピアの検索に対する情報を収集するため，および，検索の効率を高めるためにピアのクラスタリ

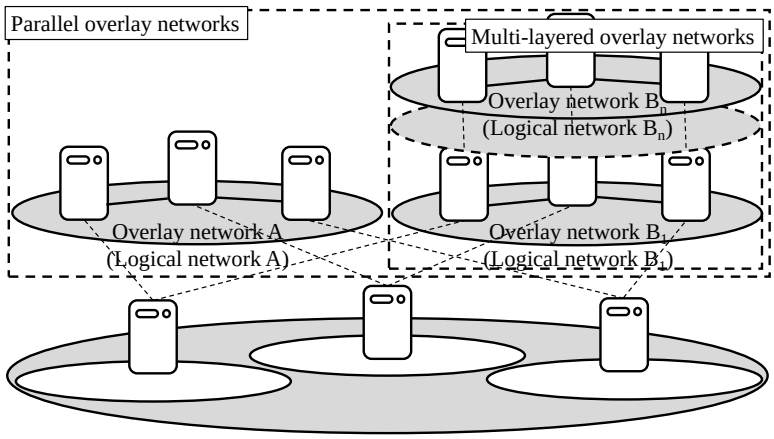

図 3.3　提案システムにおけるオーバーレイネットワーク

ングを採用し，ピア同士，あるいはピアの所属するクラスタ同士の接続によるネットワークを構築する．そのようにして構築されたネットワークは，オーバーレイネットワークとして物理ネットワーク層の上位に階層的に配置される．これらのオーバーレイネットワークはさまざまな手法によって構築される．クラスタリングアルゴリズムはそのひとつの例である．このように，ピア同士の接続によるオーバーレイネットワークを接続させるための基準ごとに構築することによって，オーバーレイネットワークを平面的，階層的に配置するモデルを提案する．図 3.3 に提案におけるオーバーレイネットワークについて示す．

3.3.3　オーバーレイネットワークの構成

先に述べたように，多くの P2P ネットワークアプリケーションはコンテンツやピアを検索するためにオーバーレイネットワークを構築する．オーバーレイネットワークの特性は P2P ネットワークアプリケーションの目的に依存し，オーバーレイネットワーク構築のためのピア間接続の基準もさまざまなものが考えられる．具体的な例として，ネットワーク上の距離という概念によるオーバーレイネットワークや保持するコンテンツの傾向による接続に基づくオーバーレイネットワークなどがある．

ピアが一般的なコンテンツや特別でないピアに関する情報を要求するとき，物理ネットワークにおける距離に基づくオーバーレイネットワークが検索のために用いられる．物理ネットワークにおける距離の算出には，RTT (Round Trip Time) や TTL (Time to Live) を使用することが想定される．基本的には，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネット

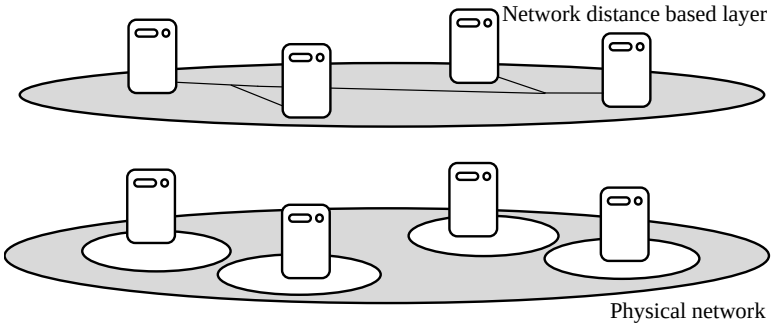

図 3.4　ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワーク

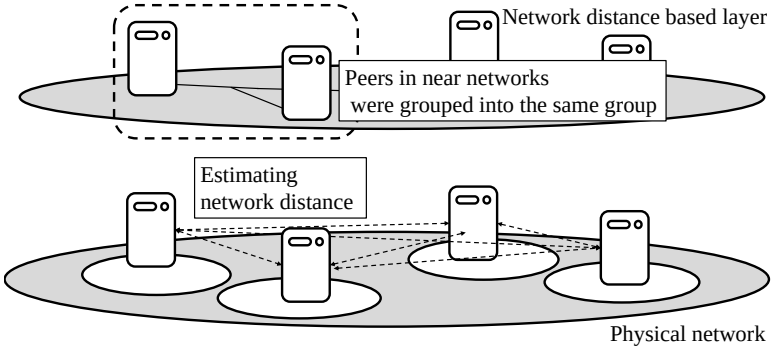

図 3.5　コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワーク

ワークでは，物理ネットワークで近隣に存在するピア同士が同じ，あるいは近いクラスタに所属するようになる．図 3.4 にネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークについての概要を示す．

ピアは特定のピアあるいはコンテンツの情報を要求するとき，コンテンツの傾向に基づくオーバーレイネットワークがそれらの検索のために使用される．ピアが人気の高くないコンテンツやサービスを検索する際，ピアはこのオーバーレイネットワークからそれらに関する情報を得る．図 3.5 にコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークについての概要を示す．

コンテンツ傾向に基づくクラスタリングを行うためにはキーワードマッチングが採用される．委譲サーバの持つコンテンツに関連付けられたキーワードの共通部分の長さによって委譲サーバ間のマッチングスコアが算出される．委譲サーバは，接続のために高いマッチングスコアの委譲サーバを選択する．

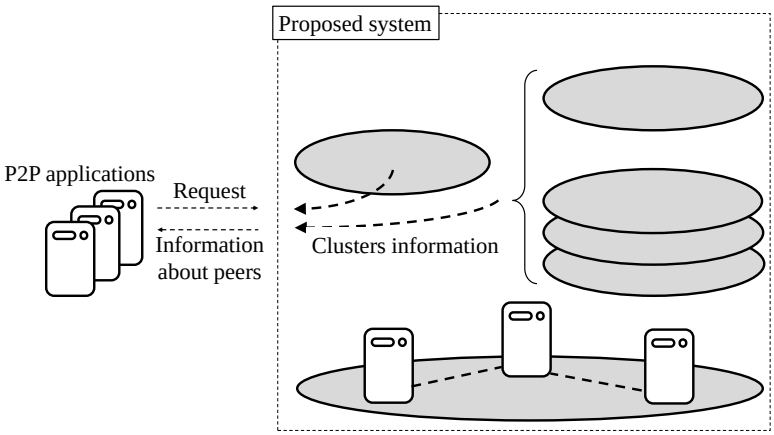

図 3.6　P2P ネットワークアプリケーションへの情報の提供

3.3.4　オーバーレイネットワークを利用した情報の提供

P2P ネットワークアプリケーションは，オーバーレイネットワークを利用してピアとそのピアの持つサービスやコンテンツに関する情報を獲得する．効率的に検索を行うために，コンテンツの特性に応じたオーバーレイネットワークが選択される [16]．図 3.6 に，P2P ネットワークアプリケーションとマルチオーバーレイネットワークに基づく提案システムとの関係を示す．提案システムは，オーバーレイネットワークから得た情報を使用することでピアやコンテンツの検索効率を向上させる．

IoT デバイスのコンテンツはオーバーレイネットワークの情報を使用することによって検索される．その情報は P2P ネットワークおよび IoT デバイスが保有するコンテンツを含む．アプリケーションがコンテンツを検索するとき，そのアプリケーションは P2P ネットワークに所属する委譲サーバからそれらに関する情報を受け取る．P2P ネットワークはさまざまな方法によって構築される．コンテンツ共有システムに対しては，P2P ネットワークが構築されるときに，各ピアが保有するコンテンツの傾向が考慮される．このオーバーレイネットワークは人気の高くない IoT デバイスのコンテンツの検索のために使用される．IoT デバイスのもつ人気のあるコンテンツは多くの委譲サーバによって管理されているため，近隣のネットワークにもそのコンテンツを管理している委譲サーバが存在すると考えられる．しかしながら，あまり人気の高くないコンテンツを管理している委譲サーバの数は比較的少ない．要求されるコンテンツやサービスはコンテンツ傾向に基づくオー

バーレイネットワークを使用することで検索するほうがよい．提案システムの有効性を，コンテンツ検索という観点で，委譲サーバ間で転送される要求メッセージの量と検索ヒット率とローカルネットワーク内での検索ヒット率を計測して評価した．2 つのオーバーレイネットワークの構築機能とコンテンツ検索に対する要求メッセージの転送機能を委譲サーバに持たせた提案システムのプロトタイプを設計した．

本節では，提案システムのプロトタイプを用いたエミュレーションと提案システムの有効性についての評価について述べる．エミュレーションの結果はローカル，すなわち，同一ネットワーク内の委譲サーバ間での転送の違いに関する比較を含む．さらに，検索ヒット率の違いと検索に対する要求メッセージ数についても比較する．要求メッセージはオーバーレイネットワーク上で接続される委譲サーバ間でのみ転送される．宛先の委譲サーバは，オーバーレイネットワークの特定の基準によって選択される．宛先の委譲サーバが要求されるコンテンツを管理していない場合は，再転送先の委譲サーバを選択し，メッセージを転送する．あるいは，応答パケットを送信元の委譲サーバを送信する．

以下では，提案システムのプロトタイプの設計，エミュレーション環境および各条件，エミュレーション結果，について示す．また，エミュレーションの結果に関する議論についても示す．

3.4　プロトタイプの設計

提案システムのプロトタイプ [44] では，物理ネットワークの上位層として 2 種類のオーバーレイネットワークを構築した．システムで使用するオーバーレイネットワーク階層は，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークとコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークによって構成される．

先に示したように，提案システムのプロトタイプは P2P エージェントプラットフォームである PIAX (P2P Interactive Agent eXtensions) [45, 46] の API を利用して実装されている．PIAX を採用した理由は，P2P ネットワークモデルにおけるピアの持つ基本機能についてのライブラリが利用できるためである．PIAX は，P2P ネットワークを構築するための機能を委譲サーバに提供する．委譲サーバは，PIAX の API を用いて P2P ネットワークのメンバーとしての実際の動作エミュレートする．PIAX によるエミュレーション結果

によって性能評価を行う．エミュレーションでの検証は，要求するコンテンツの保持率によってオーバーレイネットワークを切り替えることによって検索効率，データ転送効率を高めることが可能であるかを確かめるために，検索メッセージ数や発見したコンテンツを持つ委譲サーバとのネットワーク距離を計測した．

3.4.1　オーバーレイネットワークデザイン

ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの構築方法として，PIC[47] や Vivaldi[48] が利用可能である．これらの手法は，ネットワーク座標系を構築する方法としても分類される．ノードは，要求メッセージを交換して他のノードからの距離を計測あるいは計算を繰り返し，都度，差分を用いて距離を更新する．差分が閾値よりも小さければ一連の処理を終了する．

上田らによる P2P 手法によるインターネットノードの階層的クラスタリング [49] は，協調クラスタリングアルゴリズムを採用し，かつ，P2P ネットワークモデルに基づいたものである．この手法はクラスタを階層的に構築する．このことは，クラスタが再帰的にクラスタを含むということを意味している．ノードが要求を送るとき，要求メッセージはまず最小クラスタ単位で同一クラスタ内のノードに転送される．その後，所属するクラスタを含む上位クラスタや同じ階層の別のクラスタ内のノードへと転送される．図 3.7 に一連の問い合わせの流れを示す．プロトタイプでは，この手法をネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの構築のための手法として採用する．この手法は，クラスタリング手法であるが，RTT，TTL，ホップカウント等を基準値として採用することでネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを構築するためにも使用することができる．階層クラスタがこの方法によって構築されると，近隣のネットワークに存在するピアを容易に同一のクラスタに分類することができる．

3.4.2　エミュレーション環境

評価においてネットワークの観点でのノード間距離に基づくオーバーレイネットワークを構築するためのネットワークモデルとして実験的に提案されている日本の光ネットワークモデルのひとつ [50] を採用した．このモデルは，ノード，ノード間のリンク，リンクご

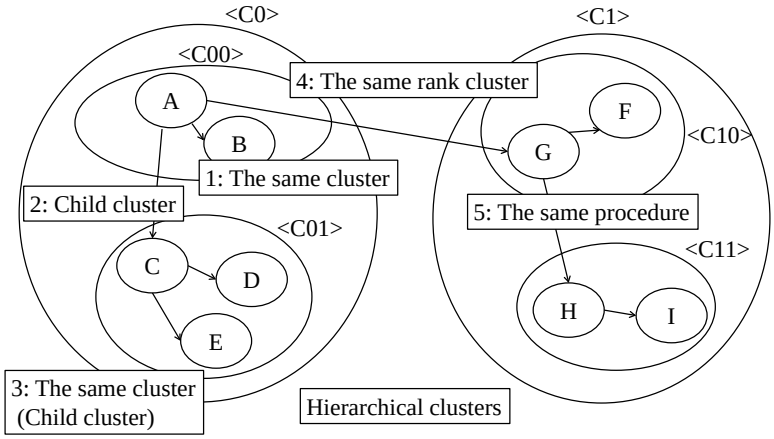

図 3.7　階層クラスタを用いた一連の問い合わせ手順

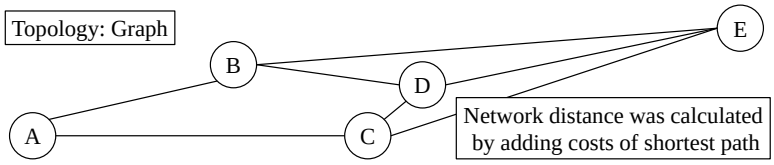

図 3.8　メッシュ型ネットワーク

とのコスト，を含む．ノード間のネットワーク距離は各リンクのコストの和とした．これは，各ノード間のユークリッド距離を用いるのではなく，ネットワークトポロジのモデルを用いて得られる結果に従って性能評価を行うためである．ノードは日本の実際の都市に関連付けられている．モデルは 3 種類あり，ノードの個数が異なる．それらはそれぞれ，12 ノード，25 ノード，48 ノード，である．評価では，各都道府県の人口分布をピアの配置に利用することから 48 ノードからなるネットワークモデルを採用した．

以下では，異なるタイプのネットワークによるエミュレーションの結果を示す．そのネットワークは，メッシュ型ネットワークと階層型ネットワークである．メッシュ型ネットワークは，採用したネットワークモデルの通り，各ノードがメッシュ状に接続されたものであり，送信側の委譲サーバから送信先の委譲サーバまでの距離は単純にそのパス上のコストの和とする．図 3.8 にメッシュ型のネットワークの概念図を示す．階層型のネットワークは，採用したモデルのネットワークが多数存在するものとし，たとえ物理的に近い位置にノードが存在していたとしても，異なるネットワーク間ではゲートウェイとなる必ず特定のノードを経由するパスを設定し，そのパス上の和にてコストを算出する．図 3.9 に階層型ネットワークの概念図を示す．この例では，ノード F とノード G とは物理的に

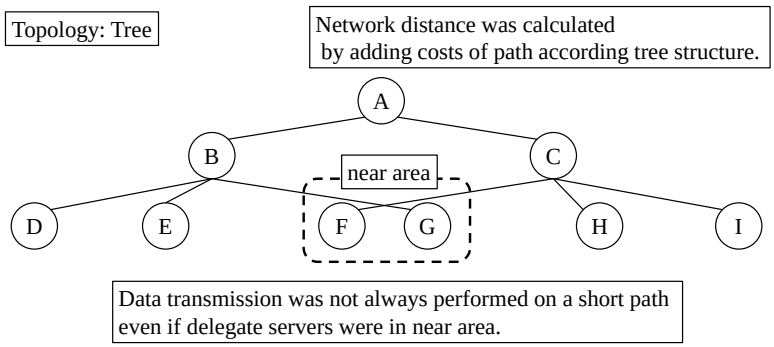

図 3.9　階層型ネットワーク

表 3.1　人気度とコンテンツ分布（ノード数：1,000）

order	degree of commonness
1	100.0%
2	50.0%
3	33.3%
...	...
1000	0.1%

は近いが，これらのノード間のデータ転送はノード A を介する必要がある．

委譲サーバの数は 1,000 とした．委譲サーバの位置は，日本の人口分布を考慮してランダムに決定される．想定するネットワークモデルには 48 ノード存在しているため，基本的に県庁所在地に関連付けた．東京にはノードが 2 つ設定されているため，東京都の 23 区とそれ以外のエリアへと分割してノードを配置した．

コンテンツがどれほど分布しているかを表す指標として人気度を設定する．決定された人気度に基づいて，コンテンツは Zipf の法則 [51] に従って分布させる．Zipf の法則においては，k 番目に人気のあるコンテンツは全体の $1/k$ のノードに保有されているとする．表 3.1 に委譲サーバの数が 1,000 であるときの分布を示す．シミュレーションに要する処理時間の制約から，同一の人気度のコンテンツに対する検索の繰り返し回数は 10 回とした．

3.4.3　マルチオーバーレイネットワークの有効性についての評価

ここでは，エミュレーションの結果について示す．結果には，検索ヒット率，要求メッセージの転送数，ローカルヒット率，が含まれる．検索ヒット率と要求メッセージの転送数は，コンテンツ及びサービス共有システムの基本的な性能の評価のために使用される．加えて，ローカルヒット率を性能評価の基準のひとつとして採用した．ローカルヒット率は，全体ネットワークで転送された全コンテンツとローカルネットワーク内で転送されたデータとの比である．コンテンツがローカルネットワーク内で転送されれば，ネットワーク全体のネットワーク資源が節約できるため，ローカルヒット率をネットワーク資源の消費に関する評価のために使用した．

結果は，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークとネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークをコンテンツの人気度によって切り替えることで計測された．オーバーレイネットワークを切り替えるために使用した閾値は，0.0，0.2，0.5，1.0 である．これらの値は，どれほどのコンテンツがネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの情報を用いて検索されたかを示す．値が 0.0 のときはネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの情報をまったく使用せずに検索されることを示し，値が 1.0 であるときはすべてのコンテンツがネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの情報を使用して検索されたことを示す．0.2 あるいは 0.5 という値は，それぞれ，全体の 20%，50% のコンテンツがネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの情報を使用して検索されたことを示す．

図 3.10 に，メッシュ型ネットワークにおける検索ヒット率に関する結果を示す．これらの結果は，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを使った場合に検索ヒット率が全体を通して高いことを示す．この結果は，多くのケースで委譲サーバが近隣のネットワークから人気度の低いコンテンツを検索することができなかったことを示す．これは，ノードの数に比べて委譲サーバの数が多いわけではなく，近隣のノードで検索が成功する確率が高くなかったためである．

図 3.11 に，メッシュ型ネットワークにおけるコンテンツ検索のためのメッセージの数を示す．これらの結果は，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを用いた場合にコンテンツ検索のためのメッセージの数は全体的に少ないことを示す．これは，検索

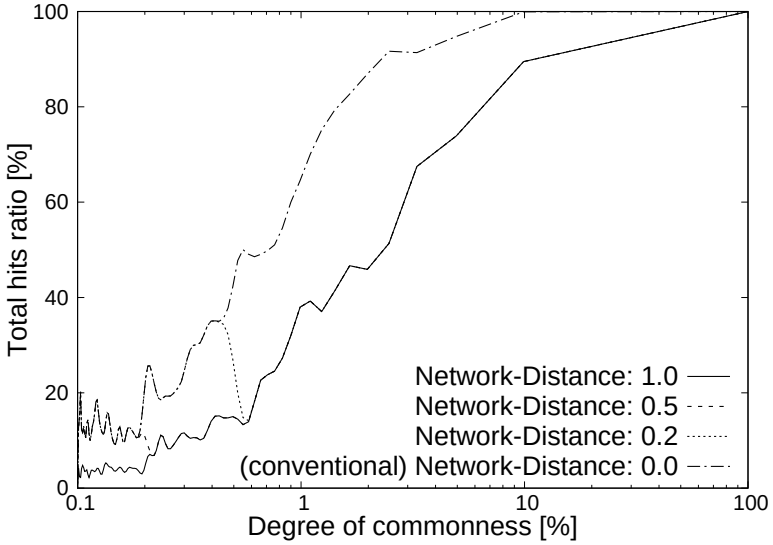

図 3.10　検索ヒット率（メッシュ型ネットワーク）

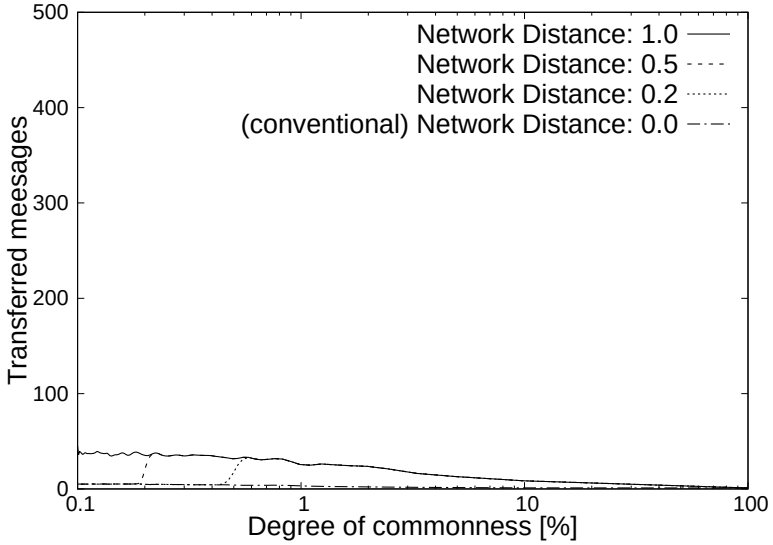

図 3.11　要求メッセージの数（メッシュ型ネットワーク）

ヒット率の数の違いの場合と同じ理由と推測される．

図 3.12 に，メッシュ型ネットワークにおけるローカルヒット率の結果を示す．これらの結果は，人気度が高いとき，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを使用してコンテンツやサービスを検索した委譲サーバが同じネットワーク内でデータを発見できたということを示す．コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを使用する場合，委譲サーバが自身と他の委譲サーバとのネットワーク距離を考慮せずに要求するコンテンツを発見した．これらの結果では，人気度が最大のときにコンテンツ傾向に基づく

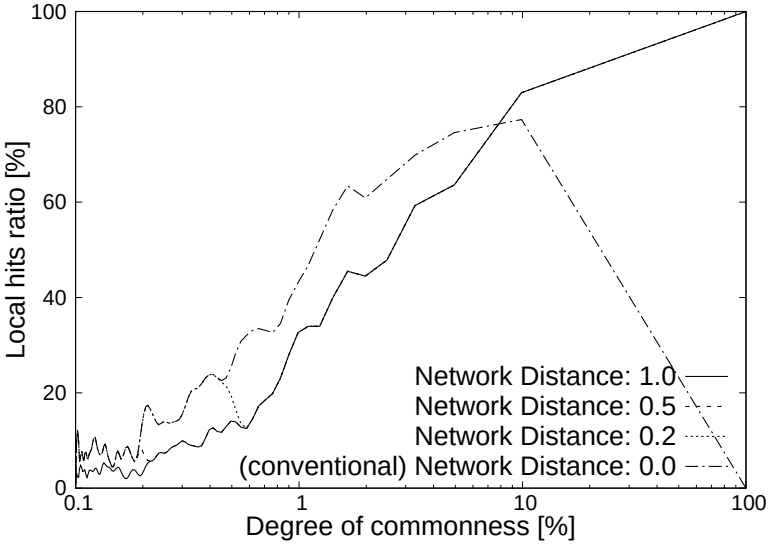

図 3.12　ローカルヒット率（メッシュ型ネットワーク）

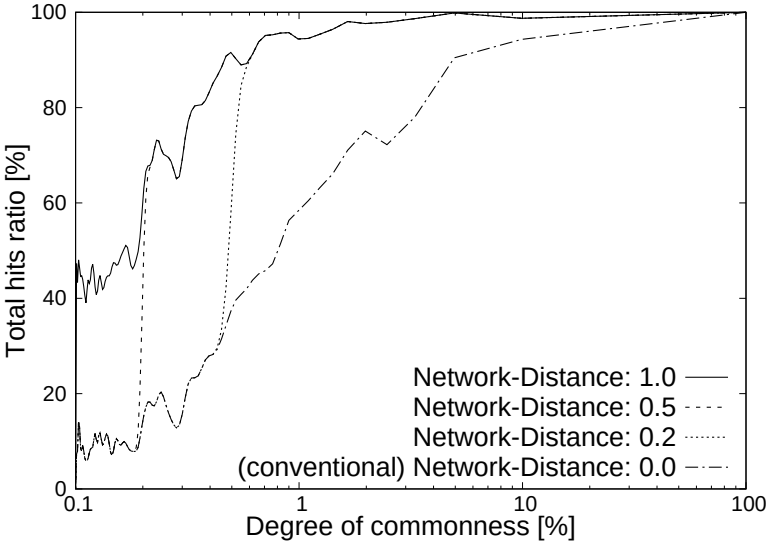

図 3.13　検索ヒット率（階層型ネットワーク）

オーバーレイネットワークを使用した場合のローカルヒット率が 0 になっている．これは，先にも述べたようにコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを使用して検索を行う場合にネットワーク距離を考慮しないことと，試行回数が 10 であったために 0 になったと考えられる．

図 3.13 に，階層型ネットワークにおける検索ヒット率の結果を示す．これらの結果は，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを用いた場合の検索ヒット率が全体的に低いことを示している．基本的には，検索にネットワーク距離に基づくオーバーレイ

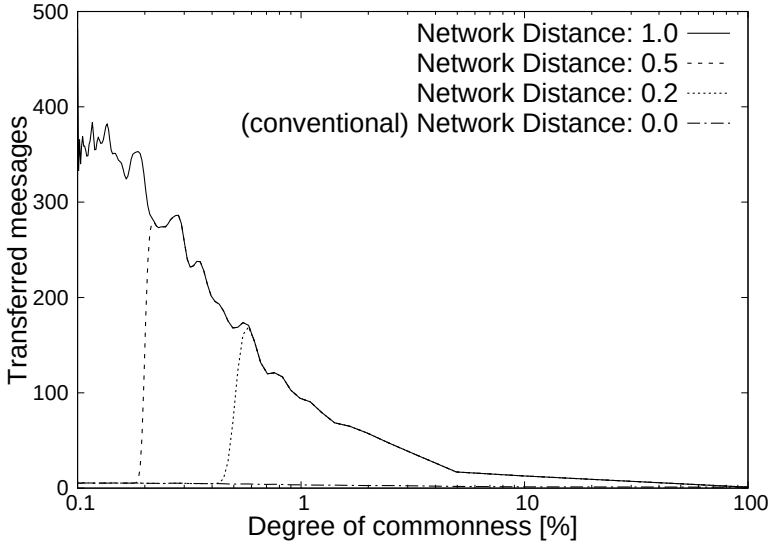

図 3.14　要求メッセージの数（階層型ネットワーク）

ネットワークが使用されたときに比べて検索ヒット率が高くなることが期待されるが，委譲サーバ間のネットワーク距離がメッシュ型ネットワークに比べて長く，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワーク上のクラスタリング効率が低下したことが影響したものと思われる．

図 3.14 に，階層型ネットワークにおけるコンテンツ検索のための要求メッセージの数についての結果を示す．これらの結果は，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを使用する場合，コンテンツ検索のための要求メッセージの数は全体的に少量であることを示している．また，メッシュ型ネットワークでの結果と比べて，その量は多くなっている．図 3.11 と比較すると，要求メッセージの数は選択されたオーバーレイネットワークの特性に依存している．オーバーレイネットワークとしてコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを選択したとき，要求メッセージの数はメッシュ型ネットワークや階層型ネットワークといった物理ネットワークトポロジの影響を受けない．これは，宛先となる委譲サーバが物理ネットワークのトポロジの特性とは独立した要素であるコンテンツの合致度によって選択されるためである．一方で，もっとも近隣のサーバが宛先となる委譲サーバとして選択されるため，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークは物理ネットワークのトポロジの特性を反映するといえる．

それゆえ，図 3.11 と図 3.14 とを比較した場合，要求メッセージの数がメッシュ型ネットワークの場合少なくなる．さらに，それぞれの図で示されるように，常にコンテンツ傾

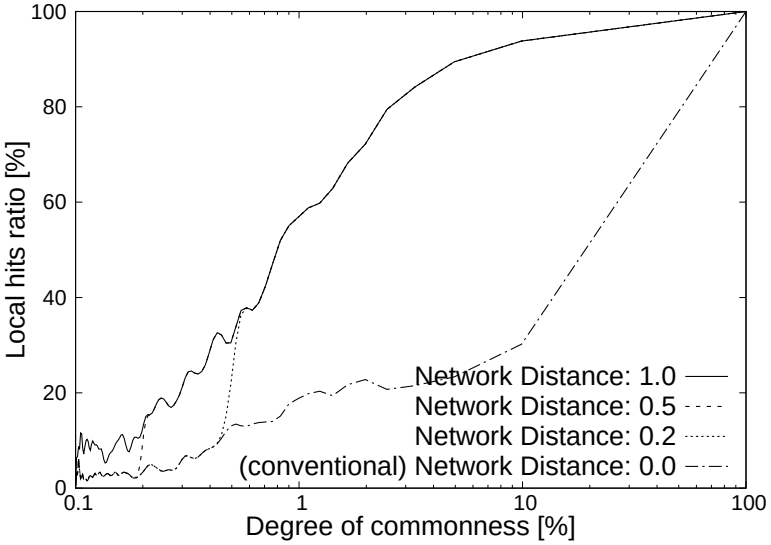

図 3.15　ローカルヒット率（階層型ネットワーク）

向に基づくオーバーレイネットワークが選択されるとき，要求メッセージの数はほぼ同じとなる．より大きな閾値が設定されると，要求メッセージの数も増加する．ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの特性のために階層型ネットワークを用いる場合がメッシュ型ネットワークを用いる場合に比べてこの割合が増加する．

図 3.15 に，階層型ネットワークにおけるローカルヒット率の結果を示す．これらの結果は，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを用いてコンテンツを検索する委譲サーバはローカルネットワーク内で目的となる委譲サーバを発見することができたことを示している．加えて，メッシュ型ネットワークを使用したときに比べ，より高い人気度においてローカルネットワーク内でコンテンツを発見できたことを示している．一方で，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを用いたケースに関しては，人気度が最も高いときを除き全体的に低くなっている．これは，メッシュ型ネットワークの場合よりも委譲サーバ間の各距離が長くなり，ネットワーク距離の影響がより強く表れたものといえる．

図 3.14 では，人気度が低くなるにつれてネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを用いた場合の要求メッセージが増加している．例えば，人気度が 0.2 のとき要求メッセージ数は約 170 である．図 3.15 では，コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを用いた場合とネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを用いた場合のローカルヒット率の差が人気度が高くとき特に大きく，人気度が低くなるにつれ

てその差も小さくなっている．例えば，人気度が上位 20% のとき，ローカルヒット率の差は 30% ほどであるが，そこから人気度が下がるにつれてその差も縮まっていくのがわかる．これらの結果より，どのオーバーレイネットワークを使用するかの閾値を低くすることにより，検索ヒット率，ローカルヒット率，要求メッセージの数，の観点でバランスを取ることができると考えられる．さらに，これらの結果ではローカルヒット率がいかなる人気度においても高いため，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを用いることによってより短いネットワーク距離でデータ転送を行え，ネットワークを経由するトラフィックであるトランジットトラフィックを軽減できていると考えられる．トランジットトラフィックが大きいことは，ホップカウントやパスが長くなることにつながり，ネットワーク資源がより消費されることになる．これより，提案手法を用いることによって，人気度が高い時にはネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを用いることでネットワーク資源の消費軽減が図れ，人気度が低い時にはコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを用いることで検索効率を維持することができるといえる．

しかし，アプリケーションに加え，環境や状況に依存するため，適切にオーバーレイネットワーク選択のための閾値を設定することは容易ではない．ネットワークの規模が小さいときには，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを用いる利点が期待でき，ネットワークの規模が大きいときには加えてコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークも併用するのが望ましい．

3.5　むすび

本章では，アプリケーション指向ネットワークとして IoT デバイスのコンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法を提案した．IoT デバイスの消費電力や負荷を考慮し，委譲サーバー P2P ネットワークを構成し，実際のコンテンツの検索や情報転送を担う方法を提案した．提案した方法により，検索に利用するオーバーレイネットワークを検索対象のコンテンツの人気度に従って選択することによって，コンテンツ発見のアプリケーションの品質を向上させることができるようになる．オーバーレイネットワークでは，ネットワーク資源の消費を抑えながら実用的な検索効率を維持するためにピアである委譲サーバがネットワーク距離や保有するコンテンツの傾向といった基準によってクラスタリングされる．そのためにコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワーク，ネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークの 2 種類のオーバーレイネットワーク構成法を示した．

プロトタイプシステムを用いて行ったエミュレーションでは，日本における光ネットワークモデルのノードの位置に委譲サーバをランダムに配置しコンテンツの検索を行わせた．評価結果より，オーバーレイネットワークを選択するための閾値が約 0.2 に設定されたとき，検索ヒット率，ローカルヒット率，要求メッセージの数，に関してバランスの取れた性能が得られることが分かった．さらに，その閾値が 0.2 よりも小さいときでも許容できる性能を示すことも分かった．このことは，人気度が高いときはネットワーク距離に基づくオーバーレイネットワークを使うことでネットワーク資源の消費を軽減し，人気度が低いときはコンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークを使うことで検索効率の維持が可能であることを意味する．しかしながら，それぞれのオーバーレイネットワークには用いる利点があり，その有効性はアプリケーション，環境，状況に依存するため，オーバーレイネットワークの選択のための閾値は慎重に決定されるべきであり，今後の課題である．

第 4 章

無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法

4.1　まえがき

アプリケーション指向ネットワークを実現するためには，アプリケーションの品質の向上のためにネットワーク品質を高める必要があることは先にも述べた．ネットワーク品質を高めるための方法として，ネットワーク運用管理の観点から優先制御などを行う方法があるが，構成要素の移動などにより構成変更が起こるネットワークに適用するのは困難である．そのため，利用されるアプリケーションの要件を踏まえることによってアプリケーション品質を向上させるネットワークの構成法を考える．

個人の利用するスマートデバイスや IoT デバイスを利用するアプリケーションの一般化により，ネットワーク上のモバイルデバイスの数が増大するとともに，それらによって提供されるコンテンツやそれらを用いるアプリケーションも多様化している．アプリケーションの例として，カメラなどのデバイスからのネットワークを介するストリーム配信などが挙げられる．電源や有線ネットワークがない環境でデバイスを用いる機会やデバイスの種類そのものの数も増加しており，それらを収容するためのネットワークの構成方法は重要な課題の一つである．

これらより，アプリケーションの品質や要件を考慮，すなわち，アプリケーション指向に基づいて，無線ネットワークを構築・構成する手法が求められるといえる．すなわち，ストリーム配信を前提として経路制御が低負荷で安定的な経路が利用可能な無線ネットワークを構成することにより，各デバイスによるストリーム配信を効率化するアプリケーション指向ネットワークが実現できる．

位置や接続先を変更するモバイルデバイスを柔軟に収容するためのネットワークとして携帯電話網を用いると高いコストを要する．そのため，mesh STA と呼ばれる相互接続機能を有するアクセスポイント同士を無線通信によって接続する無線メッシュネットワーク (Wireless Mesh Networking, WMN) 技術を用いることが考えられている [18, 19, 20, 21]. IoT デバイスからのストリーム配信を想定したアプリケーション指向を実現するためには，安定したネットワーク接続が必要である．これは，ストリーム配信のようなリアルタイム性のあるアプリケーションでは，大幅に遅れて到達するデータは使用されず，転送中のデータの喪失による再送を行うことが有効ではないためである．無線メッシュネットワークの構築・構成において安定したネットワーク接続を実現するためには，ネットワークを構成する要素である mesh STA の移動特性を考慮することが必要である．これは，経路が維持されやすくなるように，移動をあまり行わない想定の mesh STA が経路に含まれやすくするようにするためである．これにより，mesh STA の移動によって経路情報が更新され，それが反映されるまでの間に転送中のデータの喪失による再送が行われる頻度を下げることが期待できる．

無線メッシュネットワークでは，mesh STA が移動することを想定し，それら同士の間でのマルチホップ通信のための経路制御を行っている．各 mesh STA は経路制御に用いる情報をネットワーク上で交換する．この情報交換も無線通信で行われるため，そのための通信に起因する衝突等によってデータパケット配送の機会を奪う可能性がある．また，ネットワークの用途や目的，あるいはネットワークの構築方法によっては，mesh STA それぞれの移動特性が異なる．例えば，一時的にネットワークを構築してアクセスネットワークを提供するような場合には，移動頻度が低く長時間同じ位置にとどまる mesh STA や，移動頻度が高い mesh STA などが存在すると想定できる．移動頻度の高い mesh STA に対する経路制御のためには情報交換の時間間隔を縮めることなどが必要であるが，この対策は移動頻度の低い mesh STA に対しては過剰である．一方で，移動特性に合わせた調

整を行うと経路制御や情報管理のために多くのネットワーク資源が必要となり，通常のデータ通信に影響を与える．したがって，移動頻度の低い mesh STA による経路でのネットワーク接続を可能とすると同時に移動頻度の高い mesh STA についてもネットワークへの参加を可能とするための，情報交換の時間間隔によらない経路制御手法が必要である．

そこで本章では，経路制御が低負荷で行え，切り替わりの少ない経路を利用できるようにする，無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワークの構成法を提案する．具体的には，衝突等によるデータパケット配送機会の喪失を回避するため，制御パケットを低減することに着目し，隣接する mesh STA 同士の情報交換のみで自律的にネットワークを構成する手法を提案する．mesh STA は，ネットワーク参加時に隣接する mesh STA から得られた情報を用いてアドレスを設定し，経路制御はこの各 mesh STA に設定されたアドレスに基づく．さらに，隣接する mesh STA からの情報提供に周期的に送信されるビーコンを用いることにより，移動頻度の低い mesh STA に関する通信に対して一定のパフォーマンスを確保し，かつ，移動頻度の高い mesh STA も収容することを可能とする．これらにより，ストリーム配信を行うことを考慮し，それらに対してパケット損失率が低いストリームをより多く確保するための，前経路制御が低負荷であるという性質および移動頻度が低く隣接関係の変化の頻度が少ない mesh STA 間で構成される変更の少ない経路が利用可能であるという性質を満たす，アプリケーション指向ネットワークが実現可能となる．

4.2　無線メッシュネットワークにおけるデータ転送機会向上を目的とする研究の動向

4.2.1　経路制御によるアプローチ

無線メッシュネットワークにおいて，経路の転送レートを個々に調整することでパケット転送効率の向上を図る研究がある [52, 53]．また，複数の経路から不要な経路を削除することで高いスループットを実現できる経路を残す手法もある [54]．これらは予め構築された経路上の転送レートを調整する手法であるため，本論文のような経路制御の方法との併用が可能である．本論文における提案手法と組み合わせることでさらにパケット転送効

率を向上させることができる可能性がある．

無線メッシュネットワークにおける輻輳制御や負荷分散によってパケット転送効率を向上させる手法に関する研究もいくつか行われている．無線メッシュネットワークにおいて輻輳が発生した場合に，標準仕様に含まれるシグナリングメッセージを利用して迂回路を構築する手法 [55] も提案されている．この手法では，固定のグリッド状のネットワークトポロジにおいて外部ネットワークとの通信を前提とした評価を行い通信負荷の偏りや増加に対して有効であることを示している．ただし，リンク状態の変動や mesh STA の移動などを伴う可能性のある実際の環境に近い条件での評価が必要であるとしており，そのような場合における性能については不明である．

4.2.2 制御パケット削減によるアプローチ

制御パケットの転送量を抑えることによってパケット転送率あるいはスループットの向上を達成しようとする研究もある．メッシュネットワークにおいて移動するユーザ端末を探索する際にハッシュ関数の特性を利用する研究 [56] がある．この研究では，mesh STA が担当する領域を分割し，ユーザ端末の情報を保持する mesh STA をユーザ端末の MAC アドレスのハッシュ値によって決定することによってユーザ端末の探索に必要な制御パケットの転送量を抑えることができるとしている．しかし，この手法では， 定期的なフラッディングによって経路に関する情報を交換して経路を設定するプロアクティブ型経路制御プロトコルである RA-OLSR (Radio Aware Optimized Link-State Routing Protocol) の利用を mesh STA 間の経路制御の前提としている．さらに，経路に関する情報をリンク状態の変動や mesh STA の追加や削除の検知のためにも用いるため，フラッディングによる経路制御のためのパケット転送による影響は残る．

また，隣接 mesh STA とユークリッド平面上の位置情報などを交換し，ドロネーオーバーレイネットワークを構築し物理的に直接隣接しない近隣 mesh STA との迂回経路を構築する手法 [57] も提案されている．この手法を用いて制御パケットの交換を隣接 mesh STA との間でのみ行うことで，制御パケット量を減らしパケット転送率を向上できる．ただし，自らの位置情報を取得するための何らかの手段を併用する必要がある．

これらの手法は，ストリーム配信のようなアプリケーションを考慮してネットワークを構築，あるいは，経路制御を行っていない．そのため，特定のアプリケーションの特性に

合わせた制御を行う手法とはいえない．

4.3 無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法

4.3.1 背景

本提案の目的は，無線メッシュネットワーク技術によって構築・構成されたネットワークで十分なネットワーク資源を利用することができない場合に，ストリーム配信の利用といったアプリケーションの品質を向上，あるいは維持できるアプリケーション指向ネットワークを実現することである．具体的には，経路制御が低負荷で行え，切り替わりの少ない経路が利用できる自律的な無線ネットワークの構成法を確立することである．このために，直接通信可能な mesh STA 間でのみ経路制御に必要な制御パケットを交換する方式を導入する．これによって，ネットワーク全体で交換する経路制御情報に起因する負荷を軽減する．さらに，多様な移動特性を持つ mesh STA を収容でき，かつ，変化がおこる頻度の少ない経路にて無線ネットワークを構成するために，移動頻度の低い mesh STA の配下のノードによる通信品質の向上を図る．

したがって，提案手法では，mesh STA が周期的に送信するビーコンを使って，起点となる mesh STA からの距離および経路に関する情報を直接通信が可能な mesh STA 同士で交換し伝播させることによって，制御情報の通信量を抑える方針を採用した．また，新たにネットワークに参加する mesh STA は，受信ビーコン内の情報に加え，ビーコンの受信信号強度から推定した隣接 mesh STA との仮想距離を用い，自らの位置情報（アドレス）の設定および経路制御を行う．この方法により，あまり移動しない mesh STA を含む経路が変化しにくくなり，経路の変化に起因する転送データの喪失やそれに伴う再送処理の頻度を下げることができる．これにより，ストリーム配信といったアプリケーションの品質を高めることができる．

これまでに著者は，推定した mesh STA 同士の隣接関係を用いて経路設計ならびに経路制御のための基本的な手法を提案し [22]，さらに，その IPv6 ネットワークへ適用法を検討してきた [23]．本章では，それらの基礎的検討に基づいて，経路制御が低負荷で行え，

切り替わりの少ない経路が利用できるようにするための，移動頻度の低い mesh STA の通信性能を相対的に高く維持できるネットワーク構成法と経路制御手法を提案する．以下，仮想距離に基づくアドレス設定法およびこれに基づく経路制御手法について述べる．

4.3.2 仮想距離

各 mesh STA は電波範囲内の mesh STA から受信した信号の強度からその mesh STA との距離を推定し経路制御に用いる．直接通信可能な（隣接関係にある）mesh STA 間の推定距離は，実際の物理距離と必ずしも一致しない．よって，これを「仮想隣接距離」と呼び，mesh STA M_i と M_j との間の仮想隣接距離 $vd\langle i,j\rangle$ を式 (4.1) で定義する．

$$vd\langle i,j\rangle = \max\{1 - \sqrt[x]{\frac{WS\langle i,j\rangle}{WS_{max}}}, 0\} \tag{4.1}$$

ただし，$WS\langle i,j\rangle$ は受信信号強度，WS_{max} は事前に定める受信信号強度の上限値である．この式では，受信信号強度が物理的な距離の x 乗に反比例し，上限を 1 として WS_{max} により正規化するモデルを仮定している．よって，$WS\langle i,j\rangle \geq WS_{max}$ の場合，$vd\langle i,j\rangle$ は 0 となる．

任意の mesh STA M_m と M_n 間の仮想距離 $VD(m,n)$ を，式 (4.2) に示すように，マルチホップ通信経路上の仮想隣接距離の和と定義する．

$$VD(m,n) = \sum_{\langle i,j\rangle \in \mathcal{L}} vd\langle i,j\rangle \tag{4.2}$$

ただし，$\mathcal{L}$ は M_m と M_n を結ぶ経路を構成する隣接関係 $\langle i,j\rangle$ の集合である．図 4.1 に示すネットワークでは，$VD(0,j+1)$ は $vd\langle 0,j\rangle + vd\langle j,j+1\rangle$ となる．

4.3.3 仮想アドレス

提案手法における経路制御には，仮想距離に基づいて設定される仮想的なアドレスを用いる．この仮想アドレス D の形式を式 (3) のように定義する．

$$D = [d_1, d_2, ..., d_k, ..., d_N] \qquad (1 \leq k \leq N) \tag{4.3}$$

ただし，d_k および N はそれぞれ，D を構成する第 k 次元の要素およびその次元数を表す．

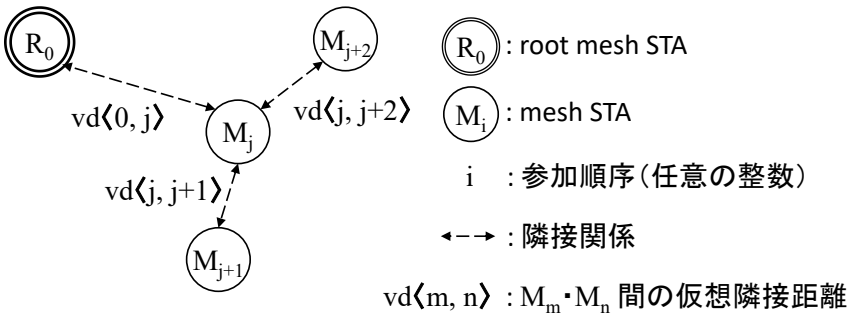

図 4.1　物理的な mesh STA の位置と隣接関係

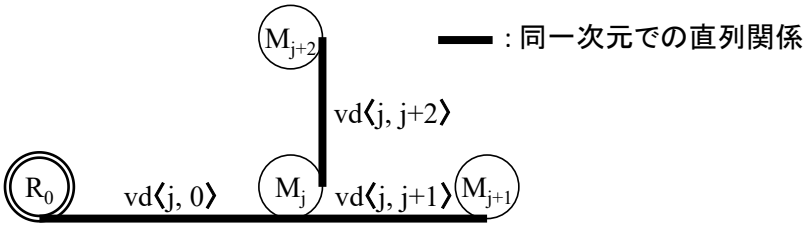

図 4.2　仮想的な mesh STA の位置と隣接関係

mesh STA M_j は，それに隣接する mesh STA M_i の仮想アドレスと仮想隣接距離 $vd\langle i, j\rangle$ に基づいて自らの仮想アドレスを設定する．図 4.2 に，図 4.1 のネットワーク例に対して，M_j，M_{j+1}，M_{j+2} の順に各 mesh STA が参加した場合の仮想的なアドレス空間を表す．図中の直線は，仮想空間上において R_0，M_j，M_{j+1} が互いに通信可能な直列的位置関係にあることを示す．起点 R_0 からの仮想距離を，同一次元上の仮想アドレス値へ写像する．複数の mesh STA が直列的位置関係にない場合，単一の次元では仮想アドレスを表現できない．よって，図 4.3 に示すように，M_{j+1} とは隣接関係にない M_{j+2} が参加した場合には，水平の直線と垂直の直線を組み合わせることで多次元の直列的な位置関係を表現する．

以上のことから，本提案手法において，仮想アドレス D の第 k 項の値は，第 k 次元目として派生した直線の起点となる mesh STA との間の k 次元での仮想距離とする．この定義から，mesh STA M_i の仮想アドレスの各項の総和は，root mesh STA から M_i に至るマルチホップ通信経路の仮想距離となるため，後述する経路選択の基準として活用できる．また，root mesh STA R_0 の仮想アドレスは，全ての項 d_k が 0 となる．最大次元数が N であるとき，仮想空間上の次元である直線の派生は，初めの R_0 からのものを含め N 回

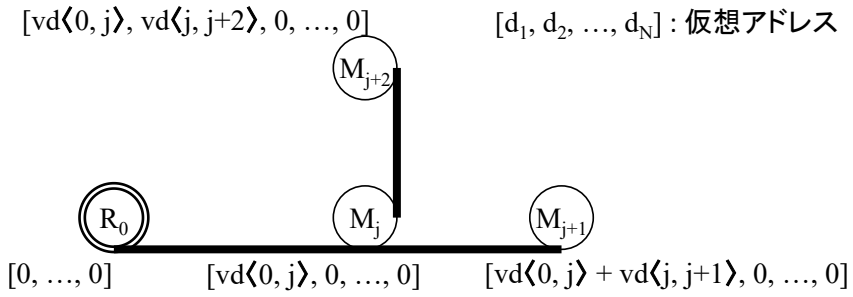

図 4.3 各 mesh STA における仮想アドレス

までしか行えない．

提案手法では，mesh STA はネットワークに参加した際に仮想アドレスに加えて，それに付随する情報を設定する．これらを総称して，仮想アドレス情報と呼ぶ．ただし，リンク状態が変化し仮想アドレス情報が利用できなくなった場合はそれらを再設定する必要がある．よって，既存 mesh STA が自身の仮想アドレス情報を含むビーコンを周期的に送信する．また，新たに参加する mesh STA は周期的に隣接 mesh STA からのビーコンの受信を試みる．

ビーコンは以下の仮想アドレス情報を含む．

- Network ID
- 送信元 mesh STA の仮想アドレス D（N 次元）
- 送信元 mesh STA の端点フラグ（N 次元）

Network ID は形成される仮想空間の同一性の確認のために使用される．具体的には，リンク切断時のネットワークの分割，リンク状態の復帰によるネットワークの再構築，別途構築されたネットワークとの融合，などに利用される．また，端点フラグは，各次元の端点に位置しているかどうかを表し，後述する仮想アドレス設定時に用いる．

この仮想アドレスを用いた隣接状況は，木構造状のネットワークを構成する．これは ZigBee における経路制御手法であるクラスターツリーの手法 [58] と類似している．しかし，仮想アドレスに基づく隣接状況の表現には仮想距離の概念が付加されているため，ネットワーク上の任意の二点間の仮想距離が算出でき，各 mesh STA 内で局所的により少ないホップ数の経路を選定できる特長がある．

4.3.4 自律的なネットワーク構成法

ネットワークへの参加と離脱に対する基本動作

提案手法では，mesh STA は原点ノードである root mesh STA を起点としてネットワークを構成する．新規に参加した mesh STA は，隣接する mesh STA から受信したビーコンに含まれる仮想アドレス情報を基に自らのアドレスを設定する．この仕組みにより，mesh STA を順次ネットワークに組み入れることができる．

具体的には，3.2 節に述べた仮想アドレスの定義に基づいて，新たな mesh STA がネットワークへ参加する際には，

- 同一次元内での参加
- 新たな次元での参加

がある．前者は，仮想空間上で直列的な位置関係に組み込める場合であり，元になる仮想アドレスにおいて使用された項のうち最後尾の項に仮想隣接距離を加算したものを新たな仮想アドレスとして設定する．後者は，仮想空間上で直列的な位置関係に組み込めない場合であり，新たに使用する項を仮想隣接距離の値に設定した仮想アドレスを設定する．例えば，隣接する既存の mesh STA が一つしか存在せずに，それが端点である場合は前者に，端点ではない場合は後者となる．隣接する既存 mesh STA が複数存在する場合には，仮想アドレスの次元を可能な限り抑制しながら，無矛盾なアドレスを設定する必要がある．

各 mesh STA は，通信状況の変化や mesh STA の移動などによりネットワーク参加時に自らの仮想アドレスの基となる情報を得た mesh STA からのビーコンが受信されなかった場合，設定されたタイムアウト時間待機する．一時的なリンクの切断や隣接状況の変化が起こった場合でも，タイムアウト時間内に状況が復帰すれば何も処理は行われない．タイムアウト時間を経過してもビーコンが受信されない場合，mesh STA は自らの仮想アドレスを初期化し，新規参加と同様の処理を開始する．すなわち，直接通信が不可能となった該当 mesh STA との接続を切断し，新たに通信可能となった mesh STA からのビーコンによって再度ネットワークに参加する．これにより，移動する mesh STA を柔軟にネットワークの構成要素とすることができる．なお，仮想アドレスの再設定は，上位のネット

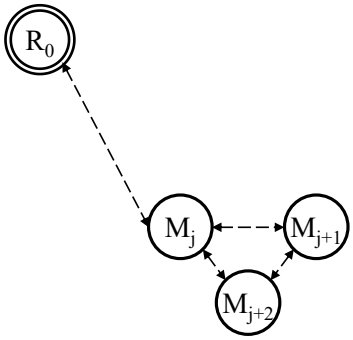

図 4.4 同一次元で参加する場合の新規参加および既存 mesh STA（複数）

ワークアプリケーションによる仮想アドレスの探索が必要になりオーバーヘッドとなる．よって，mesh STA の軽微な移動や，mesh STA 間の電波状況の多少の変化等の場合でも，直接通信できる状況が変化していなければアドレスの再設定は行わない．

仮想アドレスの自律的設定法

新規参加 mesh STA が 2 通りの参加形態のうちどちらを採用するかは，隣接 mesh STA の数，新規参加 mesh STA と各隣接 mesh STA との仮想隣接距離，隣接 mesh STA 間の仮想距離によって決める．仮想アドレスには最大次元数の制約があるが，多くの mesh STA を収容できるようにするために次元数をなるべく抑制する必要があるため，新規 mesh STA は可能な限り同一次元内で参加するようにする．

隣接 mesh STA が複数で，新規 mesh STA が同一次元で参加する場合について，図 4.4 を用いて説明する．ただし，新規参加 mesh STA を M_{new}，仮想空間上で同一直線上の隣接 mesh STA のうち，最も root mesh STA に近いものを M_{near}，最も遠いものを M_{far} とする．この図において，添え字の値が小さい mesh STA から順にネットワークに参加するものとする．そのとき，M_{new} と M_{near} および M_{far} との仮想隣接距離が，M_{near} と M_{far} との間の仮想距離よりも小さい，すなわち，M_{j+2} が新規に参加するとき $vd\langle j, j+2\rangle < VD(j, j+1)$ かつ $vd\langle j+1, j+2\rangle < VD(j, j+1)$ であれば，M_{j+2} は M_{near} である M_j の仮想アドレス情報をもとに同一次元でネットワークに参加する．図 4.5 はそのときの仮想区間上での隣接関係を表す．

新規参加 mesh STA が同一次元上に参加することで隣接しない mesh STA 間の仮想距離

図 4.5　同一次元で参加する場合における mesh STA の仮想的な配置

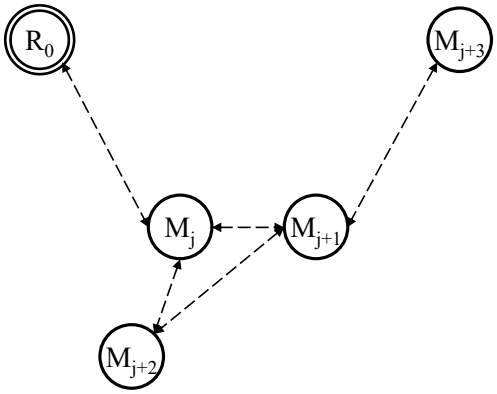

図 4.6　新たな次元で参加する場合 b) における mesh STA の配置

が 1 以下となる場合がある．これは，3.1 節の仮想隣接距離の定義と矛盾する．この場合，経路制御において次ホップとして適切でない mesh STA が選択され，ホップ数が増加する，あるいは，経路がループする，恐れがある．これらを防ぐために，隣接しない mesh STA 間の仮想距離が 1 以下になる可能性が高い場合に，新規参加 mesh STA は新たな次元で参加する．具体的には，以下の場合である．

a)　M_{near} が端点でなく，唯一の隣接 mesh STA である場合

b)　M_{new} と M_{far} との仮想隣接距離が M_{near} と M_{far} との仮想距離よりも長い場合

c)　M_{new} と M_{near} との仮想隣接距離が M_{near} と M_{far} との仮想距離よりも長く，M_{far} が端点でない場合

a) の具体例を図 4.1 を用いて説明する．mesh STA M_{j+2} が参加した時には，隣接 mesh STA は M_j のみであり，かつ，端点ではないので，新たな次元で参加する．よって，M_{j+2} の仮想アドレスは $[vd\langle 0, j\rangle, vd\langle j, j+2\rangle, 0, ..., 0]$ となる．

b) の具体例を図 4.6 に示す．M_{j+2} が新規に参加した場合，M_j が M_{near}，M_{j+1} が M_{far} である．M_{j+2} は，隣接 mesh STA と同一次元内に参加することで後に M_{j+3} が参加してきたときにそれとの仮想距離が 1 以下になる状況を避けるために，新しい次元で参

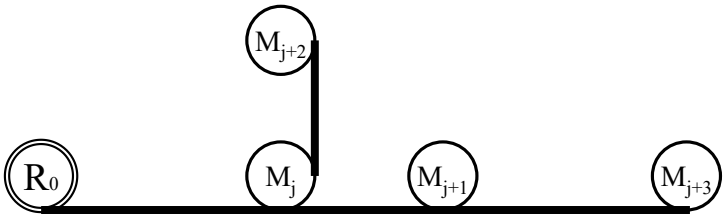

図 4.7 新たな次元で参加する場合 b) における mesh STA の仮想的な配置

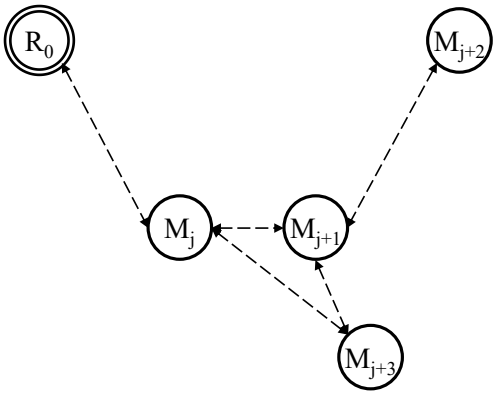

図 4.8 新たな次元で参加する場合 c) における mesh STA の配置

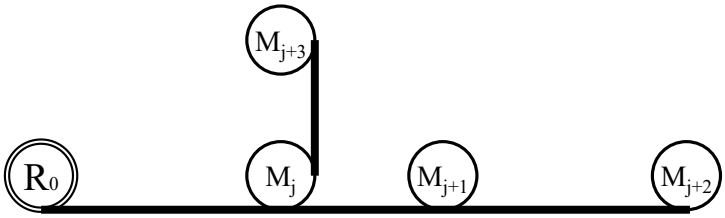

図 4.9 新たな次元で参加する場合 c) における mesh STA の仮想的な配置

加する．図 4.7 はそのときの仮想空間上の位置関係を図示しており，M_{j+2} の仮想アドレスは a) と同様に設定される．

c) の具体例を図 4.8 に示す．M_{j+3} が新規に参加した場合，M_{j+1} が M_{far}，M_j が M_{near} である．このときも，M_{j+3} は，隣接 mesh STA と同一次元内に参加することで M_{j+2} と隣接していないにもかかわらずそれとの間の仮想距離が 1 以下になるのを避けるために，b) と同様に，新しい次元で参加する．図 4.9 はそのときの仮想空間上の位置関係を表している．

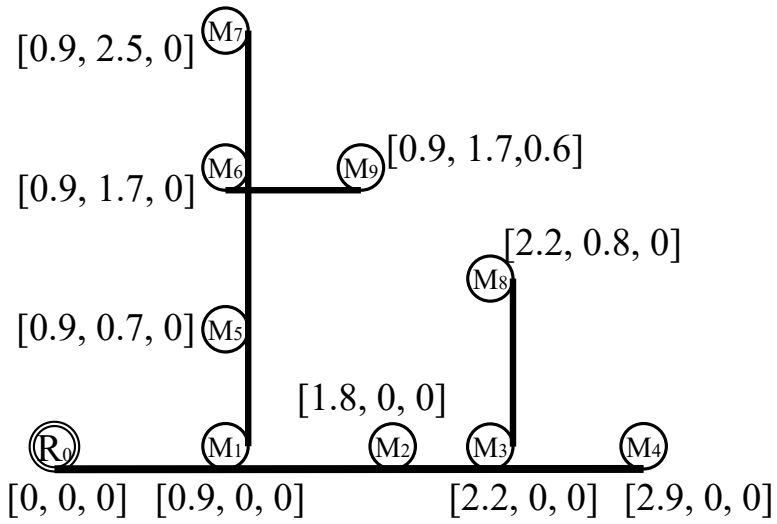

図 4.10　mesh STA 間の多次元隣接関係と各仮想アドレスの例

4.3.5　仮想アドレスを用いた経路制御

mesh STA の仮想アドレスは，root mesh STA からその mesh STA に至る経路がどの直線から形成されるかを表している（図 4.3）．隣接状況を俯瞰的に表現した場合，mesh STA の持つ仮想アドレスの各要素は，root mesh STA および各直線の起点間の仮想距離，および最後の起点から当該 mesh STA までの仮想距離を示しているため，この情報を用いれば経路選択が可能になる．

すなわち，各 mesh STA では，仮想アドレスの値に基づいて隣接する mesh STA の中から宛先 mesh STA に最も近い mesh STA を転送先として選定する．送信元 mesh STA と隣接 mesh STA の仮想アドレス情報のみを用いて自律的に経路選択される．また，この過程において仮想アドレスが表現する隣接関係は考慮されないため，仮想アドレスの観点で隣接していない mesh STA であっても直接通信可能であれば次ホップとして選択することが可能であり，この場合仮想アドレス情報に基づく経路より短い経路が選択できることになる．

図 4.10 の隣接関係図を用いて，経路制御の例を示す．この例では，仮想アドレスの要素数 N は 3 である．各 mesh STA M_j の j はこのネットワークへの参加順序である．送信元が M_8 であり，送信先が M_5 である場合，M_3 および M_1 にて経路選択が行われる．

M_3 では，送信先 M_5 の仮想アドレスと，隣接 mesh STA M_2 および M_4 の仮想アドレスとが比較される．仮想アドレスおよび仮想距離の定義により，M_2 から M_5 までの仮想距離は 1.6（=$1.8-0.9+0.7$）であり，M_4 から M_5 までの仮想距離は 2.7(=$2.9-0.9+0.7$) であるため，転送先として M_2 が選択される．

これらより，提案手法では root mesh STA から伝播するアドレス情報を基に経路制御を行うことができ，ゲートウェイを起点とした木構造を利用する距離ベクトル型の経路制御が可能になる．加えて，仮想アドレスに基づく経路制御によって隣接 mesh STA との仮想アドレス情報交換のみで自律的に経路制御が可能であり，制御パケットを必要最小限に抑えられると同時に，新規参加 mesh STA が隣接 mesh STA とのメッセージ交換で仮想アドレスの設定を行った直後に双方向の経路制御も可能である．よって，数時間あるいは数日のような期間で一時的に設置・変更・撤収されるような一時的な高負荷ネットワークでも，仮想アドレスが自律的に設定されるため，管理・運用コストを低減できることが期待される．

これまで述べたように，提案手法により，新規に参加した mesh STA は隣接する mesh STA からの情報をもとに自らの仮想アドレスを設定し，また，隣接状況の変化に応じてネットワークに対し離脱や再接続を行うことができる．これにより，移動頻度の高低に応じて異なるネットワーク構成法を適用する必要がない．さらに，移動頻度の低い mesh STA が設定した仮想アドレスをもとに経路制御が行われることで移動頻度の少ない mesh STA を含みやすい経路が確保されるため，提案手法はストリーム配信に対して高いネットワーク品質を提供する特徴を備えているといえる．

4.4 アプリケーションを対象とした性能評価

提案方式では，経路制御のためのパケット交換回数が全体的に抑制されるため，ストリーム配信のパケットの送信機会の増加が期待できる．一方で，mesh STA が移動する場合の影響や経路上の mesh STA が得られる情報のみで探索される経路が限られる場合の影響についても考慮する必要がある．そこで，本節では，安定したネットワークを構成するために重要な役割を果たす移動頻度の低い mesh STA を介する通信について，ネットワーク品質の影響を受けやすいストリーム配信を対象に，パケット転送率を指標として性能評

価を行った．実際の空間で無線による通信を行う際には，さまざまな外的要因が考えられるが，今回は基本的な性能の評価を行うため，理想的な空間，通信状況の条件下でのシミュレーションを行った．

4.4.1　想定環境およびシミュレーション条件

提案手法は，移動頻度の低い mesh STA を安定したネットワークを構成するために重要であるとみなし，切り替わりの少ない経路が利用できるようにすることでそれらの配下のノードにて送受信される通信の品質の向上を目指すものである．評価では，ストリームのパケット転送率を通信の品質の指標として採用し，既存手法との性能比較を行った．音声通話などのストリームを想定し，パケット転送率に着目してそれが 50% から 100% のストリームの数をカウントした．ストリーム数は，ネットワーク上のすべてのアプリケーションのストリームを対象として評価した．

想定するネットワーク環境およびシミュレーション条件を以下で述べる．シミュレーションには，ネットワークシミュレータである Qualnet (v. 6.1) を用いた．提案手法を無線メッシュネットワークの標準規格と置き換え可能なように実装し，それ以外のコンポーネントやライブラリは同一とした．使用した無線 LAN 規格は IEEE802.11g である．また，空間モデルは，自由空間モデルとし，信号が受信可能な距離の限界が 100m となるようアンテナの閾値を設定した．これは，評価において隣接状態であるかどうかの判定を行いやすくするためである．

空間は 100m × 1,400m の矩形領域とした．これは，直線状に機器が散在する汎用的な環境を想定したためである．例えば，道路，線路，河川などの周辺に機器を配置するような場合に相当する．1 台の mesh STA を空間の中央に配置し，以降に新規に参加する mesh STA は，他のいずれかの mesh STA との距離が 80m 以内，かつ，20m 以上の条件内でランダムに配置した．これは，mesh STA を配置する際に，mesh STA 同士が通信可能距離の限界に近い距離に位置している状況では通信性能が大幅に落ちることと，あまりに狭い範囲に複数の mesh STA を配置することにあまり意味がないことからである．mesh STA の移動特性として，移動頻度の低い mesh STA と高い mesh STA の 2 種類を想定した．シミュレーションでは，移動頻度の低い mesh STA が静止している期間を想定して評価するために，移動速度は 0 とした．移動頻度の高い，すなわち移動する mesh STA の移動速度

は人が歩行するモデルを想定して 1.12 m/s とし，ランダム時間移動したのちランダム方向に向きを変えるとした．mesh STA の総数は空間の広さを考慮して密集するまで至らないと思われる 40 とし，移動しない mesh STA によって空間をカバーできるよう，移動する mesh STA の割合を全体の 0%（0 台），20%（8 台）とした．なるべく広い範囲を無線通信可能なエリアとすることを想定して中心に位置する mesh STA を root mesh STA とした．

ネットワーク上のストリームとして音声通話データを考え，IP 電話などでの使用が想定されるパラメータとして，パケットサイズは 172B，パケット送信間隔は 20ms，送信時間は 10s，とした．ストリームでネットワークが混雑している状況を想定し，各 mesh STA 配下で発生するストリーム配信は，平均 1.0〜2.0 本のポアソン到着を仮定した．混雑している状況における性能を評価するためにストリームを相当数収容できるようシミュレーション時間は 180s とした．また，外部との通信を想定し，すべてのストリームの送信元あるいは送信先をネットワークの境界となる root mesh STA とした．音声通話などによるストリームでは，コーデックによって具体的な値は異なるものの，パケット転送率はネットワークアプリケーションの体感品質に大きく影響する要素である．そのため，ネットワークの性能評価においてストリームごとのパケット転送率に着目する．具体的には，ネットワークが混雑した状況下においてストリームごとのパケット転送率を算出し，パケット転送率が高い（主に 95-100%）ストリームの本数に着目した．

また，mesh STA のビーコン送信間隔は Qualnet においても採用されている一般的な 200ms を用いた．受信ビーコン情報の更新可能な機会を複数回設けるために，受信ビーコンの有効期限を 2s，mesh STA が受信ビーコン情報から隣接 mesh STA リストを更新する間隔を 500ms とした．この場合，各 mesh STA は，自身の仮想アドレスの基になった仮想アドレスを持つ mesh STA からビーコンが受信できなくなってからおおよそ 2-2.5 秒の間に自らの仮想アドレスを初期化する想定である．

評価における比較手法として，無線メッシュネットワークの標準規格である IEEE802.11s において規定されている HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) を用いた．HWMP では，無線マルチホップネットワークにおけるリアクティブ型の経路制御プロトコルである AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) [17] を基にした RM-AODV (radio metric AODV) を用いる．さらに，root mesh STA が存在している場合は RM-AODV とプロアクティブ型の経路制御プロトコルである TBR (Tree base routing)

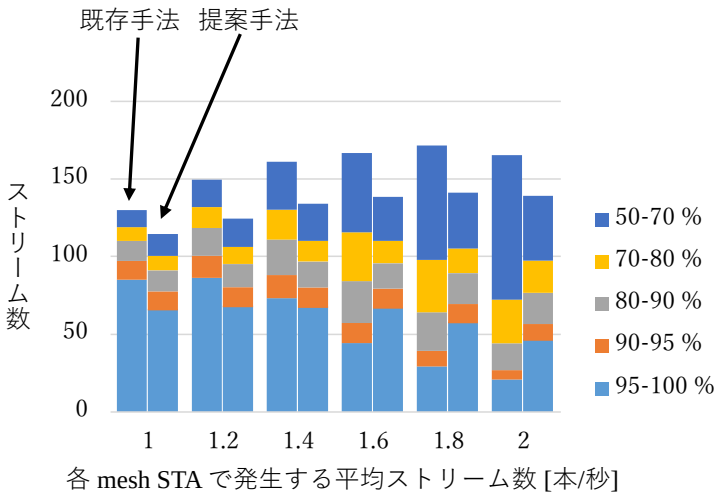

図 4.11　パケット転送率分類別ストリーム数（移動割合：0）

も用いることができる．HWMP は，これらの併用によって，様々な移動頻度の mesh STA を効果的に収容できるよう規格化されているため，比較のための既存手法として選定した．

mesh STA の配置，および，発生するストリームの条件は提案手法と既存手法において同一とした．また，シミュレーションは各条件下で結果のばらつきを考慮して 35 試行ずつ実施し，それらを平均した値を評価結果とした．

4.4.2　シミュレーションによるパケット転送率の評価

まず，移動頻度の低い mesh STA に関する一般的な性能評価として，すべての mesh STA が静止している場合の結果を示す．図 4.11 にて，提案手法および既存手法におけるパケット転送率の分布を示す．横軸は各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数，縦軸はパケット転送率が 50% 以上のストリーム数，を示す．縦軸のパケット転送率が 50% 以上のストリーム数に関しては，パケット転送率がそれぞれ，50-70%，70-80%，80-90%，90-95%，95-100% のストリームごとに分類した．図 4.11 より，パケット転送率が 95-100% のストリーム数に着目すると，各 mesh STA で 1 秒間に発生する平均ストリーム数が 1.6 以上のとき提案手法が優位となり，具体的には，それらの値が，1.6 のときに約 52%，1.8 のときに約 98%，2.0 のときに約 123% の差があった．また，提案手法では，各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数が増加する場合でもパケット転

送率が 95-100% のストリーム数の減少が抑えられている．これは，ネットワークがより高負荷となる状況下でも多くのストリームの品質が保証できたことを示している．このことから，提案手法を適用した場合，負荷の変化に対してパケット転送率が高いストリームの本数が安定しているといえる．また，パケット転送率が 70% 以上のストリーム数に関しても既存手法より提案手法が優位である．一般に音声通話などのストリームでは，具体的な品質あるいは各種の値はコーデック等に依存するものの，パケット転送率が高い（パケットロス率が低い）ことが求められるため，提案手法が有効であることがわかる．

次に，図 4.12 にて，移動頻度の高い mesh STA が全体の 20% の場合の各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数に対するパケット転送率が 50% 以上のストリーム数に関する結果を示す．縦軸のパケット転送率が 50% 以上のストリーム数に関しては，先の結果と同様に分類した．図 4.12 より，パケット転送率が 95-100% のストリーム数に着目すると，各 mesh STA で 1 秒間に発生する平均ストリーム数が 1.8 以上のとき提案手法が優位となり，具体的には，それらの値が，1.8 のときに約 14%，2.0 のときに約 65% の差があった．また全 mesh STA が静止している場合と同様に，提案手法では，各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数が増加する場合でもパケット転送率が 95-100% のストリーム数の減少が抑えられている．このことも，ネットワークがより高負荷となる状況下でも多くのストリームの品質が保証できたことを示している．また，パケット転送率が 80% 以上のストリーム数に関しても提案手法が優位である．いずれの手法においても，すべての mesh STA が静止している場合に比べてストリーム数が多いのは，一部の mesh STA が root mesh STA に近づく機会が増えることによりホップ数が抑えられたためであると考えられる．

これらより提案手法は，音声通話データを想定したストリームのパケット転送率を指標としたとき，既存手法と比べて高いパケット転送率を達成したストリーム数が多くなることがわかった．すなわち，移動頻度の低い mesh STA 配下のノードにて送受信される通信の品質をより保証できることがわかった．さらに，ネットワークの負荷によらず高いパケット転送率を達成したストリーム数の減少が抑えられていることから，データ損失に厳しいストリーム配信などのアプリケーションに対して安定的な品質を保証できるといえる．ただし，パケット到達率の下限を 50% としたとき，既存手法の総数が多くなった．これは，提案手法はその特性上，ホップ数が増加する傾向にあるため，多くの mesh STA

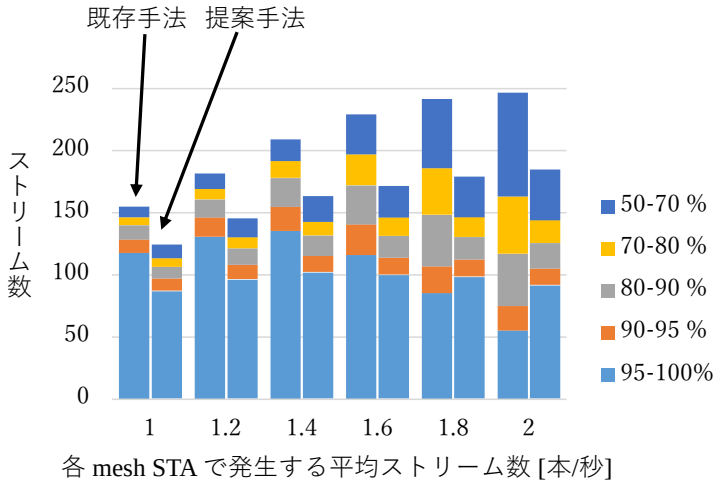

図 4.12　パケット転送率分類別ストリーム数（移動割合：0.2）

による転送を必要とするストリームの品質が低下したと考えられる．

4.5　むすび

無線メッシュネットワーク技術による無線ネットワークの構築・構成においては，端末の移動などにより，ネットワーク資源の不足が懸念され，アプリケーションの品質が劣化することが課題となる．本章では，IoT デバイスからのストリーム配信というアプリケーションに対して安定的，すなわち，移動頻度の少ない mesh STA が経路に含まれやすいネットワークを構築・構成することによって切り替わりの少ない経路が利用できるようにし，アプリケーション品質の向上，あるいは維持のためのアプリケーション指向ネットワークを実現するための提案を行った．

無線メッシュネットワークにおける経路制御には mesh STA 間での情報交換が必要であるが，そのための通信によってデータパケット配送の機会を奪う可能性がある．また，移動頻度の高い mesh STA に対応するために情報交換の機会を増やすことは，移動頻度の低い mesh STA に対しては過剰である．これらの課題に対して，本論文では，mesh STA の異なる移動特性に対して同一の手法でネットワークへ収容することを可能としながら，ネットワークを構成する際に重要な移動頻度の低い mesh STA に関する通信の品質をより保証するための手法を提案した．具体的には，各 mesh STA が，隣接する mesh STA から周期的に送信されるビーコンによる情報交換のみで自らのネットワーク上の位置を設定す

るとともに経路制御を行うことにより経路制御の負荷を軽減した．さらに，シミュレーションによる性能評価において，移動頻度の低い mesh STA 配下のノードが送受信するストリームのパケット転送率が高いストリーム数に関して既存手法より優位であることを示した．

今後の課題として，高負荷時に一部の mesh STA がビーコン受信のタイムアウト処理により，静止している mesh STA でありながら転送先候補から除外されたことによる性能の低下が起きることが考えられる．そのため，mesh STA の移動特性により追従できることを目指し，パケットの転送先候補となる隣接 mesh STA の管理をトークンによって行う方式を検討している．これは，ビーコンの最終受信時刻からのタイムアウトではなく，ビーコンの受信によって加算し，ビーコンの受信に関するタイムアウトによって減算するトークンを用いる方式である．特定の mesh STA がパケットの転送先候補のリストに残されるかどうかをトークンの有無で判断する．この方法を採用することによって，ネットワークが混雑した状況下でも静止している mesh STA がパケットの転送先候補から除外される確率を低下させることができ，さらなる性能の向上が期待できる．

第 5 章

結論

5.1　本論文のまとめ

本論文では，アプリケーションの要件とネットワークの要件とが存在する中，アプリケーションの品質の向上，あるいは維持を目的とすることをアプリケーション指向と定義し，アプリケーション指向の実現のために構築，運用が行われるネットワークをアプリケーション指向ネットワークと定義した上で，アプリケーション指向ネットワークの実現のための方法について示した．具体的には，アプリケーション指向ネットワークの実現に向けた課題の検討において，アプリケーション品質の向上・維持に関する具体的な課題を整理した結果，いくつかのアプリケーションの組み合わせをネットワークの運用管理として品質向上させる課題についてを第 2 章で，アプリケーションの品質向上をオーバーレイネットワークの構築管理で解決する課題についてを第 3 章で，さらに，リンクレイヤーの構成変更で解決する課題についてを第 4 章でそれぞれのアプローチからの提案について示した．

第 2 章では，ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理に対しては，アプリケーションを複数のクラスに分け，SDN によるネットワーク管理が可能であることを前提として，計測可能なネットワークに関する品質であるネットワーク QoS を新たに定式化して定義したユーザ効用，およびユーザ効用に基づくユーザの集団の効用についても定義し，これらをユーザの満足度とみなすことで特定アプリケーションのユーザの満足度に対する定量的な評価を可能とする方法を提案した．また，アプリケーション指向ネットワー

クをモデル化して行ったシミュレーション結果によって，典型的なアプリケーション指向ネットワークにおける運用方針設定のための指針についても示した．

第 3 章では，コンテンツ発見のためのアプリケーション指向ネットワークの構成法に関して，マルチオーバーレイネットワークとして構成し，従来アプリケーションごとに構築，管理してきたオーバーレイネットワークを構築基準が共通するもの同士で統合し，物理ネットワークの上位に配置した上で，アプリケーションの要件に応じて使用するオーバーレイネットワークを切り替える手法を提案した．また，IoT デバイスが展開する広域かつ大規模なネットワーク環境でのコンテンツの活用のため，IoT デバイスやそのコンテンツに関する情報管理や検索処理を代替する委譲サーバを導入し，委譲サーバをピアとみなし P2P ネットワークを構築することでスケーラビリティを確保する方法についても提案した．プロトタイプとしてネットワークにおける距離に基づくオーバーレイネットワークとノードの保持コンテンツ傾向に基づくオーバーレイネットワークとをサポートするシステムを設計し，エミュレーションでの検証の結果，要求するコンテンツの保持率によってオーバーレイネットワークを切り替えることによって検索効率，データ転送効率を高めることが可能であることが分かった．

第 4 章では，無線メッシュネットワークにおけるストリームを対象としたアプリケーション指向ネットワークのための構成法に対しては，無線アクセスポイントを複数配置して無線ネットワークを構築する無線メッシュネットワークを前提とし，無線アクセスポイントの移動特性を考慮した経路制御手法によってアプリケーションとしてストリーム配信を対象としたアプリケーション指向ネットワークの実現を目指した．具体的には，隣接する無線アクセスポイント間での情報交換によって経路制御を行うことによって，経路制御が低負荷で行え，切り替わりの少ない経路が利用できるようにすると同時に無線アクセスポイントの移動にも追従可能な手法を提案した．シミュレーションによる評価にて，移動率の違いにより提案手法によってパケット転送効率が向上できることを示すことができた．

本論文の成果により，ネットワーク運用管理，オーバーレイネットワークの構成法，ネットワークの構築・管理という観点のそれぞれにおいてアプリケーション指向ネットワークが実現可能となった．本論文では，アプリケーション指向ネットワークやその中で用いられるアプリケーションによる提案手法の評価を行い，各提案手法が基盤技術として

利用可能であることを示した．

5.2　今後の研究課題

本論文で述べたアプリケーション指向ネットワークの構築，運用，管理手法に関して有効性の評価を行った．採用したネットワークやアプリケーションは広く用いられているものであるが，汎用性についての議論を深めるためにより多くの可能性を含めた評価を行う必要がある．具体的には，現在展開している，あるいは今後展開が予想される新たなネットワーク環境やアプリケーションを想定したアプリケーション指向ネットワークの特性についての議論，そのネットワークでの情報管理についての要件，などが必要である．

ユーザおよびその集団の効用に基づく運用管理に関しては，今回想定した各アプリケーション指向ネットワークに共通するアプリケーションシナリオのほかにも，それぞれのネットワークにおける特徴的なアプリケーションシナリオが存在することが考えられるため，それらについても検討する必要がある．ネットワークトポロジやアプリケーション種別，アプリケーションパラメータなどに対してより多様な環境を想定した検証を行うことで，それぞれのアプリケーション指向ネットワークにより適した運用管理に関する指針が提示できる．

コンテンツ発見のためのマルチオーバーレイネットワーク構成法に関しては，まず，オーバーレイネットワークの構築と運用にかかるコストを考慮する必要がある．提案したアーキテクチャあるいはシステムでは，具体的なネットワークアプリケーションの動作とは独立にオーバーレイネットワークを構築し管理する．単一のネットワークアプリケーションを対象としたオーバーレイネットワークと異なり，さまざまなネットワークアプリケーションの要求に応えるための情報の維持，管理が必要であるため，その点も含めた有効性の検証も行っていく必要がある．また，提供されるコンテンツやネットワークアプリケーションの求める情報は多様であるため，提案手法におけるマルチオーバーレイネットワークの情報を利用する際のインタフェースやコンテンツ情報のデータフォーマットについても検討が必要である．

無線メッシュネットワークにおけるアプリケーション品質の向上のためのネットワーク構成法に関しては，現在想定しているアクセスポイントの移動特性を考慮した処理内容を

踏まえると，一時的に接続ができない状況への追従に課題があると考えられるため，このような状況も考慮した仕様へと拡張することを検討している．具体的には，接続ができなくなる状況に陥るまでの接続状態を考慮して論理的な接続を切断するかどうかの判断ができるようにする拡張である．これにより，一時的な切断やパケットロスなどの場合と移動するアクセスポイントを収容する場合に対して，同じ処理を行うことでそれぞれへの適切な対応ができるようになる．また，移動などによりアドレスやそこから導かれる隣接関係の整合性が損なわれる場合が考えられるため，アドレスの更新機構などについても検討する必要がある．

謝辞

本研究，および，本論文全般に関して，長きにわたり御指導いただき，非常に有益な御助言を頂戴いたしました大阪大学サイバーメディアセンター 下條真司教授に深謝申し上げます.

本論文をまとめるにあたり，貴重な時間を割いて頂き，懇切なる御指導と有益な御助言を賜りました，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻の原隆浩教授，藤原融教授，鬼塚真教授，松下康之教授，春本要教授，萩田紀博教授に心より感謝の意を表します.

本研究の推進，本論文の執筆の両面におきまして，有益な御指導や御討論，的確な御助言を頂きました工学院大学情報学部情報通信工学科 馬場健一教授に深く御礼申し上げます．また，熱心な御指導や適切な御助言，御討論を頂きました高知工科大学情報学群 岩田誠教授に厚く御礼申し上げます.

本論文の執筆にあたり，多大なる激励と貴重な御意見を頂戴いたしました高知工科大学データ＆イノベーション学教室清水明宏教授に深謝いたします.

本研究の推進において，有益な御助言を頂きました高知工科大学情報学群 横山和俊教授，福本昌弘教授，吉田真一教授に深く感謝いたします.

本論文の執筆にあたり，有益な御助言を頂きました高知工科大学システム工学群 密山幸男教授に深くお礼申し上げます.

本研究を進めるにあたり，多くの御支援を頂きました高知工科大学情報学群およびシステム工学群電子・光系の教職員の皆様に心より感謝いたします.

最後に，本研究の推進，本論文の執筆にあたり，多大なる御理解と御協力を頂いた家族に心より感謝いたします.

参考文献

[1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” Future Generation Computer Systems, vol.29, no.7, pp.1645–1660, Sep. 2013.

[2] Z. Duan, Z.-L. Zhang, and Y.T. Hou, “Service overlay networks: SLAs, QoS, and bandwidth provisioning,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.11, no.6, pp.870–883, Dec. 2003. http://dx.doi.org/10.1109/TNET.2003.820436

[3] R. Roth, et al., “IP QoS across multiple management domains: practical experiences from pan-european experiments,” IEEE Commun. Mag., vol.41, no.1, pp.62–69, Jan. 2003.

[4] P. Georgatsos, et al., “Provider-level service agreements for inter-domain QoS delivery,” pp.368–377, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30193-6_37

[5] H.A. Nguyen, T.V. Nguyen, and D. Choi, “How to maximize user satisfaction degree in multi-service ip networks,” 2009 First Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, pp.471–476, Apr. 2009.

[6] ITU-T, “G.1070: Opinion model for video-telephony applications,” ITU-T Recommendation, Jun. 2018.

[7] ITU-T, “P.10/G.100: Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience,” ITU-T Recommendation, Nov. 2017.

[8] S. Tasaka and N. Misaki, “Maximizing QoE of interactive services with audio-video transmission over bandwidth guaranteed IP networks,” Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE, pp.1–7, Nov. 2009.

[9] K. Piamrat, A. Ksentini, C. Viho, and J.M. Bonnin, “QoE-aware admission control for multimedia applications in IEEE 802.11 wireless networks,” Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th, pp.1–5, Sep. 2008.

[10] F. Agboma and A. Liotta, “QoE-aware QoS management,” Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia, pp.111–116, MoMM ’08, ACM, New York, NY, USA, 2008. http://doi.acm.org/10.1145/1497185.1497210

[11] Open Networking Foundation, “SDN Architecture 1.1,” ONF TR-521, Oct. 2014.

[12] B.A.A. Nunes, M. Mendonca, X.N. Nguyen, K. Obraczka, and T. Turletti, “A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol.16, no.3, pp.1617–1634, Thirdquarter 2014.

[13] The European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “ETSI GS NFV 002 V1.2.1: Network functions virtualisation (NFV); Architectural framework,” ESTI GS NFV 002, Dec. 2014.

[14] R. Mijumbi, J. Serrat, J.L. Gorricho, N. Bouten, F.D. Turck, and R. Boutaba, “Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol.18, no.1, pp.236–262, Firstquarter 2016.

[15] T. Okubo and K. Ueda, “Peer-to-Peer contents delivery system considering network distance,” Proc. 13th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium, pp.1–4, Sep. 2011.

[16] K. Ueda and T. Okubo, “Peer–to–Peer contents distribution system using multiple clusters,” Proc. 14th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium, pp.1–6, Sep. 2012.

[17] C.E. Perkins, E.M. Belding-Royer, and S.R. Das, “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,” IETF RFC 3561, Jul. 2003.

[18] IEEE Standards Association, “IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE Standard 802.11, Nov. 2011.

[19] I.F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, “Wireless mesh networks: a survey,” Computer Networks, vol.47, pp.445–487, Mar. 2005.

[20] 阪田史郎，青木秀憲，間瀬憲一，“アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク,” 電子情報通信学会論文誌 B，vol.J89-B，no.6，pp.811–823，Jun. 2006.

[21] 間瀬憲一，阪田史郎，アドホック・メッシュネットワーク — ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて，コロナ社，東京，2007.

[22] K. Ueda and K. Baba, “Proposal of initial route establishment method in wireless mesh network,” Proc. The Sixth Workshop for Ubiquitous Networking and Enablers to Context-Aware Services, pp.173–176, Seattle, Jul. 2009.

[23] Y. Maruoka and K. Ueda, “A method for establishing routes and IPv6 addressing based on the estimated distance from neighboring nodes in wireless mesh networks,” Proc. 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, pp.21–26, Barcelona, Mar. 2013.

[24] K. Ueda, M. Iwata, K. Baba, and S. Shimojo, “Multi–overlay information management for IoT–oriented P2P network applications,” International Journal of Space-Based and Situated Computing, vol.8, no.4, pp.204–213, Mar. 2019.

[25] K. Ueda, M. Iwata, K. Baba, and S. Shimojo, “Mass–User Satisfaction for NFV–Based Application Specific Network,” International Journal of Computer Science and Network Security, vol.16, no.9, pp.55–60, Sep. 2016.

[26] 植田和憲，岩田　誠，馬場健一，下條真司，“mesh STA の移動特性を考慮した自律無線メッシュネットワーク構成法,” 情報処理学会論文誌，vol.61，no.2，pp.297–305，Feb. 2020.

[27] R. Sherwood, et al., “Carving research slices out of your production networks with OpenFlow,” SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.40, no.1, pp.129–130, Jan. 2010. http://doi.acm.org/10.1145/1672308.1672333

[28] Z. Bozakov and P. Papadimitriou, “AutoSlice: Automated and scalable slicing for software-defined networks,” Proceedings of the 2012 ACM Conference on CoNEXT Student Workshop, pp.3–4, CoNEXT Student ’12, ACM, New York, NY, USA, 2012. http://doi.acm.org/10.1145/2413247.2413251

[29] A. Csaszar, et al., “Unifying cloud and carrier network: EU FP7 Project UNIFY,” Utility and Cloud Computing (UCC), 2013 IEEE/ACM 6th International Conference on, pp.452–457, Dec. 2013.

[30] J. Soares, M. Dias, J. Carapinha, B. Parreira, and S. Sargento, “Cloud4NFV: A platform for virtual network functions,” Cloud Networking (CloudNet), 2014 IEEE 3rd International Conference on, pp.288–293, Oct. 2014.

[31] A. Lombardo, A. Manzalini, G. Schembra, G. Faraci, C. Rametta, and V. Riccobene, “An open framework to enable NetFATE (network functions at the edge),” Network Softwarization (NetSoft), 2015 1st IEEE Conference on, pp.1–6, Apr. 2015.

[32] 吉田裕志，笹島和幸，村瀬　勉，里田浩三，“画面転送システムのための QoE 駆動型レート制御手法,” 電子情報通信学会論文誌，vol.J97-B，no.11，pp.1106–1121，Nov. 2014.

[33] 浦川隼人，小林和朝，高田寛之，“動画配信の QoS 保証のためのトークンバケットパラメータの検討,” 電子情報通信学会論文誌，vol.J94-B，no.5，pp.708–715，May 2011.

[34] P. Reichl, S. Egger, R. Schatz, and A. D’Alconzo, “The logarithmic nature of QoE and the role of the Weber-Fechner law in QoE assessment,” Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on, pp.1–5, May 2010.

[35] VINT Project, “The network simulator - ns-2,” http://www.isi.edu/nsnam/ns/.

[36] ITU-T, “High efficiency video coding ,” ITU-T Recommendation, Jun. 2019.

[37] M. Aazam and E.-N. Huh, “Fog computing micro datacenter based dynamic resource estimation and pricing model for IoT,” Proc. 29th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, pp.687–694, Mar. 2015.

[38] F. Tao, Y. Zuo, L.D. Xu, and L. Zhang, “IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.10, no.2, pp.1547–1557, May 2014.

[39] F. Li, M. Voegler, M. Claessens, and S. Dustdar, “Efficient and scalable IoT service delivery on cloud,” Proc. 2013 IEEE Sixth International Conference on Cloud Computing, pp.740–747, Jun. 2013.

[40] J. Chen, “Devify: decentralized internet of things software framework for a peer-to-peer and interoperable IoT device,” ACM SIGBED Review - Special Issue on Advances in IoT Architecture and Systems (AIoTAS’17), vol.15, no.2, pp.31–36, Mar. 2018.

[41] H. Xie, Y.R. Yang, A. Krishnamurthy, Y. Liu, and A. Silberschatz, “P4P: Provider portal for applications,” Proc. the ACM SIGCOMM 2008 conference on Data communication, pp.351–362, Aug. 2008.

[42] Seedorf, J. and Burger, E., “Application-Layer Traffic Optimization (ALTO) Problem Statement,” IETF RFC 5693, Oct. 2009.

[43] Kiesel, S. Ed., Previdi, S., Stiemerling, M., Woundy, R., and Yang, Y., “Application-Layer Traffic Optimization (ALTO) Requirements,” IETF RFC 6708, Sep. 2012.

[44] K. Ueda, “Performance evaluation of peer-to-peer network applications on multiple overlay networks,” Advances in Network-Based Information Systems, pp.750–756, Aug. 2018.

[45] PIAX, http://www.piax.org/.

[46] M. Yoshida, T. Okuda, Y. Teranishi, K. Harumoto, and S. Shimojo, “PIAX : A P2P Platform for Integration of Multi-overlay and Distributed Agent Mechanisms,” IPSJ Journal, vol.49, no.1, pp.402–413, Jan. 2008.

[47] M. Costa, M. Castro, R. Rowstron, and P. Key, “PIC: practical internet coordinates for distance estimation,” Proc. 24th International Conference on Distributed Computing Systems, pp.178–187, Mar. 2004.

[48] F. Dabek, R. Cox, F. Kaashoek, and R. Morris, “Vivaldi: a decentralized network coordinate system,” Proc. the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, pp.15–26, Aug. 2004.

[49] 上田達也，安部広多，石橋勇人，松浦敏雄，“P2P 手法によるインターネットノードの階層的クラスタリング，” 情報処理学会論文誌，vol.47，no.4，pp.1063–1076，Apr. 2006.

[50] 坂野寿和，築島幸男，長谷川浩，釣谷剛宏，廣田悠介，荒川伸一，戸出英樹，“日本の地域特性を考慮したフォトニックネットワークモデルの検討，” 電子情報通信学会技術研究報告，第 113 巻，pp.1–6，Jun. 2013.

[51] S.D. Kamvar, M.T. Schlosser, and H. Garcia-Molina, “The eigentrust algorithm for reputation management in p2p networks,” Proc. the 12th international conference on World Wide Web, pp.640–651, May 2003.

[52] 坂本貴彦，間瀬憲一，“無線メッシュネットワークにおける最適レート推定のためのリンク品質測定制御法,” 電子情報通信学会論文誌，vol.J95-B，no.7，pp.819–826，Jul. 2012.

[53] 岡田　啓，北原弘隆，間瀬憲一，“無線メッシュネットワークにおけるノード単位送信レート選択手法,” 電子情報通信学会論文誌，vol.J94-B，no.12，pp.1556–1565，Dec. 2011.

[54] 高橋義彦，兼子陽市郎，間瀬憲一，“無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証,” 電子情報通信学会論文誌，vol.J90-B，no.3，pp.311–314，Mar. 2007.

[55] 西沢耕太郎，山本尚生，“無線メッシュネットワークにおけるふくそう制御用シグナリングと連携した迂回路構築アルゴリズム,” 電子情報通信学会論文誌 B，vol.J92-B，no.9，pp.1500–1512，Sep. 2009.

[56] 門馬玲志，山田拓也，山本尚生，“大規模な無線メッシュネットワークにおけるハッシュ関数を利用した STA 位置登録・探索方式の特性評価,” 電子情報通信学会論文誌，vol.J93-B，no.7，pp.1025–1030，Jul. 2010.

[57] M. Ohnishi, M. Inoue, and H. Harai, “Incremental distributed construction method of delaunay overlay network on detour overlay paths,” Journal of information processing, vol.21, no.2, pp.216–224, Feb. 2013.

[58] 鄭　立，ZigBee 開発ハンドブック，リックテレコム，東京，2006.