

## コンテンツセントリックネットワークにおける ストリームデータ配信機構の実装

川崎 賢弥<sup>†</sup> 阿多 信吾<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

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

<sup>††</sup> 大阪市立大学 大学院工学研究科 〒 558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138

E-mail: <sup>†</sup>{k-kawasaki,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp

**あらまし** 近年、IP ネットワークに代わる新世代ネットワークへの期待が高まっており、その一つとしてコンテンツセントリックネットワーク (Content Centric Network: CCN) がある。CCN に関する研究はアーキテクチャのみならずアプリケーションについてもさまざまな基礎的研究がなされているところである。しかしながら現在 CCN 上で実現されているアプリケーションの多くはすべてのコンテンツを独立とみなした個別のコンテンツ取得を前提としており、ストリームデータなど時間系列により生成される一連のコンテンツを取得する手法はあまり検討されていない。本稿では、CCN においてストリームデータを生成・配信するシステム的设计および実装を行う。ストリームデータの伝送において重要となるランダムアクセス性やセッションの柔軟性を実現しつつ、コンテンツ提供ノードへの制御も含めたシームレスなネーミングアーキテクチャとそれを制御するコンテンツセントリックネットワークにより、特に計算資源の乏しい組み込み機器においても簡便なコンテンツ配信機構を実現することを目標とする。提案システムの実現可能性について検証するため、組み込み機器プラットフォームを用いた無線センサネットワークにおいてシステムを実装し、その有効性を確認する。

**キーワード** コンテンツセントリックネットワーク (CCN)、ストリームデータ、ルーティング、資源発見、センサネットワーク

## Design of Communication Architecture to Support Stream-data over Content Centric Networking

Kenya KAWASAKI<sup>†</sup>, Shingo ATA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University  
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Engineering, Osaka City University 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi,  
Osaka, 558-8585, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{k-kawasaki,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp

**Abstract** In recent years, Future Internet is highly expected as an evolution of IP networks. Content Centric Networking (CCN) is promising as one of future communication architectures, and now many researches on this field, not only applications but also architectures, are actively conducted. However, many applications developed over CCN are mainly focusing on delivery of individual content by using name of content for routing. Few studies regarding a deliver of stream-data, which is a series of contents generated periodically, have been done so far. In this paper, we design and implement a system to support stream-data delivery over CCN. With achieving two important features of stream-data, i.e. random access and flexibility, we design a CCN architecture including seamless naming/addressing architecture to enable controls of content providers. Especially we target on embedded devices, which have limited hardware resources, to realize stream-data delivery with ease. Also a development of prototype is conducted to verify the feasibility of our proposed architecture.

**Key words** Content-Centric Networking, Stream-data, Routing, Finding resources, Sensor networking

## 1. はじめに

インターネットはその誕生から約 50 年が経過し、当時想定していなかった事象が多く発生したことにより対処療法的な発展を遂げた結果、インターネット設計思想との乖離が生じ、通信の非効率性などの問題が生じている。このような問題を解決するため、IP に代わる新しいネットワークアーキテクチャに関する研究への期待が高まっている。特にその中でもコンテンツセントリックネットワーク (Content Centric Networking: CCN) あるいはインフォメーションセントリックネットワーク (Information Centric Networking: ICN) が注目されている。

CCN ではコンテンツを通信主体とし、コンテンツの名前を経路制御に直接用いることでコンテンツ主体型の通信を実現する。さらに CCN ルータによるコンテンツキャッシュをサポートし、ユーザの要求に CCN ルータが応答することでネットワーク利用効率の向上や応答時間の短縮など通信性能の大幅な改善が期待されている [1]。

CCN/ICN の利点を活かしたアプリケーションの研究も多く行われている (例えば [2]~[5]) が、それらの研究の多くはコンテンツ取得に関して、独立した単独コンテンツに対する要求および配送が行われているにすぎない。一方コンテンツは、その種類によっては、時系列により生成される一連の情報から構成されることもある。本稿ではこれをストリームデータと呼ぶ。ストリームデータは、いわゆるリアルタイムの動画・音声であるストリーミングデータ以外にも、定期的に生成されるセンサ情報や、インタラクティブなアプリケーションにおけるユーザの入力コマンド系列なども含まれる。しかしながら、このようなストリームデータを一括して扱える CCN アプリケーションはほとんど研究されていない。ストリームデータを統一的に扱うためには、単なる独立コンテンツの取得だけでは不十分であり、コンテンツ取得にともなう制御情報や、時間情報などの指定およびその取り扱いについても考慮する必要があると考える。

本稿では、CCN においてストリームデータを生成・配信するシステムの設計および実装を行う。ストリームデータの伝送において重要となるランダムアクセス性やセッションの柔軟性を実現しつつ、コンテンツ提供ノードへの制御も含めたシームレスなネーミングアーキテクチャとそれを制御するコンテンツセントリックネットワークにより、特に計算資源の乏しい組み込み機器においても簡便なコンテンツ配信機構を実現することを目標とする。また、提案システムの実現可能性について検証するため、組み込み機器プラットフォームを用いた無線センサネットワークにおいてシステムを実装し、その有効性を確認する。

本稿の構成は以下の通りである。はじめに 2. においてストリームデータの統一的なモデルを提案し、それを CCN 上で実現するためのネーミングアーキテクチャおよび各ノードの動作について設計する。次に 3. では設計したストリームデータ配信機構の実装について述べ、4. で実装した機構の動作検証により有効性を確認する。最後に 5. でまとめと今後の課題について述べる。

## 2. CCN 技術を用いたストリームデータ配信機構の設計

本章ではさまざまなストリームデータアプリケーションに適用可能な、CCN によるストリームデータ配信機構の一般化システムの設計を行う。まず、ストリームデータの定義とそのモデル化について行い、次にそのモデルを CCN で実現するために必要となる個別要素について検討する。さらにそれらの動作シーケンスを定義する。

### 2.1 ストリームデータの定義とモデル化

本稿におけるストリームデータとは、「単一ソース (コンテンツ配信元) から時間系列に沿って生成される一連のコンテンツシーケンス」と定義する。ストリームデータの代表例としては、ビデオや音声などの一般的なストリーミングデータや、定期的にモニタリングされるセンサからの観測データなどが挙げられる。

ストリームデータは次に示す要素で構成される複合モデルとして考えられる。

- **オブジェクト** ストリームデータのソース名であり、物理的あるいは仮想化された論理的な資源名が用いられる。物理的な資源名であればオブジェクトは一意に一つのノードとなるが、論理的な資源名の場合には複数の物理的資源が該当することもある。
- **コントロール** オブジェクトに対する制御情報。カメラの Start/Stop や、向きを制御する Direction などが考えられる。ストリームメディアのコーデック指定やビットレート指定なども含まれる。
- **シーケンス** ストリームデータの順序情報。時刻や番号が代表的な値であるが、その他の値も指定可能である。
- **プリファレンス** 受信側の環境を通知することでその環境に適した情報が返送されることを期待する情報。カメラの場合であればクライアントデバイスの解像度や CPU 処理能力などを通知する。これによりオブジェクト側で自動的に判断し最適なビットレートやコーデックなどを決定することができる。
- **フィルタ** 要求するストリームデータが複数存在する場合、フィルタに指定した条件でフィルタリングあるいは集計処理を行う。“A ビル内で最も高い温度”を取得するために Max フィルタを用いるなどが考えられる。

### 2.2 ストリームデータの名前構造

CCN ではコンテンツ名に基づく経路制御が行われるため、名前構造の決定はアプリケーションの本質的な性能に大きな影響を与える。コンテンツ名が果たす役割としては、ルーティング情報であるという他にそのコンテンツが持つ情報を的確に示していることが望まれる。2.1 で述べたモデルを扱うためにコンテンツ名で表現する名前要素について以下に考察を行う。

- **プレフィックス (routing prefix)** プレフィックスは、同様のコンテンツ情報を集約するために用いられる分類名である。例えばセンサ情報の場合、コンテンツは特定のノードからの情報を指定する必要があるが、それらにはノードの位置情報も含まれることになる。プレフィックスを付与することで、同

表 1 ストリームデータの名前構造

Content type	naming
Content	/⟨routing prefix⟩/⟨identifier⟩/⟨version⟩/ ⟨control⟩/⟨sequence⟩
Metadata	/⟨routing prefix⟩/⟨identifier⟩/⟨metadata-name⟩

一領域におけるセンサへの経路情報を一つに集約させることが可能となる。また、コンテンツが特定のノードを対象としない場合についても、関連性の高いコンテンツをプレフィックスによりグループ化することで、効率的な経路制御が可能となる。さらに、名前空間におけるオブジェクト名の衝突を回避する目的にも使用される。

- **ストリームデータ識別子 (identifier, version)** ストリームデータ識別子とは、2.1 で定義したストリームデータの構成要素のうち、オブジェクトを指定するためのものである。また、オブジェクトが更新可能である場合に、更新されたオブジェクトそれぞれを識別するためにバージョンを付与することもできる。

- **コントロール (control)** コントロールはストリームデータの品質を制御するための情報である。具体的には画像の解像度、ビットレート、サンプリングレートなどが挙げられる。ユーザは明示的にコントロールで品質を指定することで、自身の環境に応じたストリームデータを受信することができる。

- **シーケンス (sequence)** シーケンスは受信するチャンクの順序を表す情報である。シーケンスは必ずしも単調増加する数値である必要はなく、動画ではフレーム番号やセンサ情報であれば取得時刻により代用することも可能である。

上で述べた名前要素のうち、ストリームデータ配信者が提供可能なコントロールおよびシーケンス表現は、通信を始める際にはデータ取得者にとって未知の情報である。そのため、これらの情報を取得する手段が必要である。これらの情報を取得するため、ストリームデータごとに定義されたメタデータを用いる。メタデータによる情報取得を次項目で述べる。

- **メタデータ (metadata)** メタデータとは、あるストリームデータの属性情報である。メタデータはキーバリュ型であり、コンテンツ要求者がメタデータのキーを要求すると、その値が応答として返送される。ストリームデータがどのようなキーを保持しているかは metadata をキーとして要求することにより取得可能である。メタデータのコンテンツ名は対応するストリームデータのオブジェクトから決定できる。例えば動画の取得を行う場合、開始時にメタデータを取得し、利用可能なコーデックとフレームレート、ビットレートを得る。これらの情報を組み合わせて動画コンテンツの完全名を構成し、ストリームデータの受信を開始する。

表 1 に以上の名前構造をまとめる。

### 2.3 ストリームデータの要求とフロー制御

ストリームデータは時系列により生成された複数のコンテンツ系列であることから、ストリームデータの取得は一般的に複数のコンテンツを継続的に取得することを意味する。これを実現するためには、通常「ストリームデータの取得開始」「スト

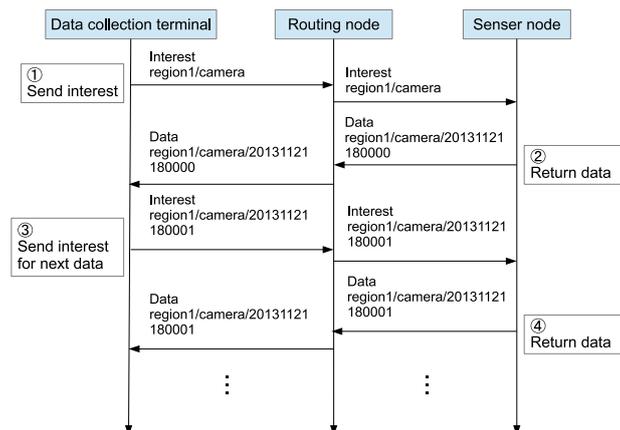


図 1 指定した期間のデータに対する要求時のシーケンス図

リームデータの取得停止」の 2 種類の要求をコンテンツ提供者に送信すればよいことになる。

しかしながら、本稿で対象とする CCN の実装では、単一の要求 (Interest) が複数のコンテンツ (Data) を返すことは認められていない [6]。これは、特定のノードが過度な要求を送出したときに、要求に対する応答量が不明であると、ネットワークによる制御が容易ではないためである。加えて、ストリームデータでは一連のデータが正しく受信されたかどうかを確認し、欠落があった場合再送を要求するなどのフロー制御も必要である。

以上を勘案し、本稿ではストリームデータの要求およびフロー制御について次の通り行うこととする。

- ストリームデータへの要求はチャンク単位とする。すなわち、オブジェクトにシーケンスを付加したものを要求する。
- チャンク単位で逐次要求することで、シーケンスによる要求は、直前のチャンクの受領確認を兼ねることになる。

ストリームデータ取得におけるシーケンスを図 1 に示す。まず、取得したいコンテンツ名を指定した Interest パケットを送信する (図中①)。コンテンツ提供を行う機器は、対応するコンテンツを Data パケットとして返信する (図中②)。ストリームデータ要求者は、引き続きストリームデータを受信したい場合、次のシーケンスを示す情報を付与した Interest パケットを送信する (図中③)。コンテンツ提供者は、次のストリームデータを返送すると同時に、直前のストリームデータが正しく送信されたことを確認することができる。以上を繰り返すことにより、ストリームデータの取得を行う。

## 3. 無線センサネットワークにおける CCN を用いたストリームデータ伝送の実装

### 3.1 無線センサネットワーク概要

本稿で実装する無線センサネットワークの概要を図 2 に示す。実装する無線センサネットワークはノードとセンサ、データ収集用端末によって構成される。本稿ではストリームデータのセンサ情報としてカメラにより撮影した連続画像を考え、撮

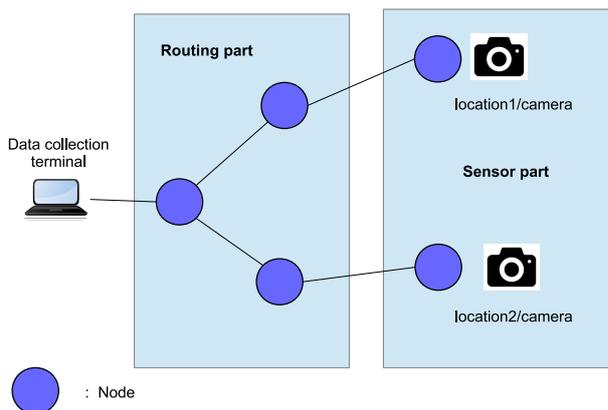


図 2 実装する無線センサネットワークの概要

表 2 Armadillo-420 のハードウェア仕様

プロセッサ	Freescale i.MX257
CPU コア	ARM926EJ-S
CPU コアクロック	400MHz
バスクロック	133MHz
RAM	64MB (LPDDR SDRAM)
フラッシュメモリ	16MB (NOR 型)
無線 LAN	IEEE 802.11b/g/n 対応 (最大 72.2Mbps)
USB	USB2.0×2 (High Speed×1, Full Speed×1)

影した映像をセンシング情報として扱う。ノードはセンサを取り付けたセンシングノードとパケットのルーティングを行うルーティングノードの二種類に分けられる。センシングノードは取り付けられたカメラから得られる映像より定期的にコンテンツを生成し、コンテンツ配信者として動作する。ルーティングノードは Interest および Data パケットのルーティングを行う。データ収集用端末はセンシングノードからのセンサ情報を収集するものであり、ストリームデータ受信者として動作する。

本稿の実装ではノードとして組み込み機器プラットフォームを用いた環境においてストリームデータの配信を確認する。このため、センサが取得したデータを蓄積しておくストレージは実装せず、データ収集用端末からセンサが収集している最新のデータを取得することのみを対象とする。

### 3.2 使用機器

本稿ではノードとして組み込み機器プラットフォームである Atmark-techno 社製の Armadillo-420 を使用した。Armadillo-420 の外観を図 3 に示す。Armadillo-420 はクロックが 400MHz の CPU を搭載し、64MB の LPDDR SDRAM と 16MB のフラッシュメモリを備えた小型の CPU ボードである。Linux2.6 がインストールされており、簡便なプログラムにより表 2 で示すハードウェアを制御することが可能である。

Armadillo に取り付けるカメラには Buffalo 社製の USB 接続 Web カメラを用い、mjpg\_streamer というソフトウェアによってカメラからの映像を取得する。mjpg\_streamer では HTTP 経由で独自転送方式を用いたビデオストリーミングを行う機能



図 3 Armadillo-420 の外観

表 3 コンテンツ名の構成

Content type	naming
Content	/(routing prefix)/(location name)/ (sensor type)/(version)/(data format)/ (frame number)
Metadata (format)	/(routing prefix)/(location name)/ (sensor type)/(metadata-name)
Metadata (frame)	/(routing prefix)/(location name)/ (sensor type)/(version)/(data format)/ (metadata-name)

があるほか、Motion JPEG 形式の動画に必要な JPEG 形式の画像フレームを生成することができる。

また、CCN の実装には PARC で開発された CCNx プロトコル [7] を用いる。CCNx プロトコルは IP ネットワーク上に CCN 通信を行うオーバーレイネットワークを構築する形で実装されているため、物理ネットワーク上に任意のトポロジ構成で CCN ネットワークを構築できる。

### 3.3 無線センサネットワークの実装方法

センシングノードでは mjpg\_streamer を動作させ、接続されたカメラからの映像を jpg 形式の画像フレームとして取得し、フレームごとにコンテンツ化を行う。その際コンテンツに付ける名前の構成を表 3 に示す。表 3 の各要素は 2.2 で設計したコンテンツのネーミング規則と対応している。

- **プレフィックス (routing prefix および location name)** routing prefix と location name は 2.2 におけるプレフィックスと対応している。routing prefix には ccnx:/osaka-u.ac.jp という固定の名前を用いる。location にはセンシングノードを設置する場所の名前を用い、これにより画像フレームが撮影された位置を表現する。

- **ストリームデータ名 (sensor type)** sensor type は 2.2 におけるストリームデータ名と対応し、データの内容を表す名前としてデータを取得しているセンサの種類を考え、本稿ではカメラによる画像取得として、ストリームデータ名を camera としている。

- **バージョン (version)** version は 2.2 におけるバージョンに対応し、センシングを開始した日時が挿入される。センシングを行っている間は同一バージョンの新しいコンテンツを生成していると捉えることができ、センシングを中断、再開した

ときに新規バージョンのコンテンツを生成開始したと考える。

- **データ品質 (data format)** ストリームデータの品質を指定するものであり、コントロールに相当する。本稿の画像取得では、画像データのフォーマットが対応する。mjpg\_streamerでは解像度とフレームレートを指定してjpg画像を生成可能であるため、この部分では解像度、フレームレート、データ形式の3つをコントロールとして指定可能とする。組み込み機器の制約および動作検証の目的のため、解像度がQSIF (176×112) およびQCIF (176×144)、フレームレートが1 [frame/sec]、データ形式はjpgの2種類のコンテンツを生成する。

- **シーケンス (frame number)** 本稿では、シーケンス情報として画像のフレーム番号を使用する。フレーム番号はセンサ機器が生成した画像に付けられた一連の連番整数であり、フレームごとに絶対的に付与されている。

- **メタデータ (metadata)** 実装した無線センサネットワークにおいて本稿ではセンサを配置した位置とセンサ種類については既知のものであるとしており、バージョン情報以降のコンテンツ名については未知であるとしている。そのためコンテンツの完全名を構成できるようにするため2種類のメタデータを定義する。一つは利用可能なコントロールのメタデータで、もう一つはシーケンスのメタデータである。カメラ映像の取得を開始する際にメタデータから利用可能なコントロールおよび最新のシーケンス (番号) を取得し、これらを用いてコンテンツの完全名を構築する。

#### 4. 実験ネットワークの動作検証

本章では3.で実装した無線センサネットワークが正しく動作することを確認するため、カメラで撮影した映像を取得する複数のシナリオを設定し、実験を行う。以下に実験の概要、環境、方法、結果について述べる。

##### 4.1 動作実験の概要

本実験では複数台のArmadilloとPCを無線で接続し、その上でCCNxのオーバーレイネットワークを構築する。2台のArmadilloにはカメラを接続し、それぞれ撮影した映像からコンテンツを生成する。一方のカメラが撮影している映像を要求し、適切な映像データが返信されてくることを確認することによって、最新フレームのコンテンツ名を探索可能であるというランダムアクセス性の確認を行う。次に、もう一方のカメラが撮影している映像を要求し、返信されてくる映像データがシームレスに切り替えられることを確認することで、動的なコンテンツの品質変更能力の確認を行う。

##### 4.2 動作実験の環境

動作実験は図4で示す環境で行う。大阪大学大学院情報科学研究科棟内の研究室、および廊下にArmadilloを3台配置し、3台のArmadilloとデータ収集用端末をアドホックモードで無線接続する。3台のArmadilloのうち2台にカメラを接続してセンシングノードとし、残りの1台をセンシングノードとデータ収集用端末の間を接続するルーティングノードとする。ストリームデータ取得に用いたコンテンツ名をそれぞれ表4のとおり定める。また、コンテンツのバージョン情報はデータの配信

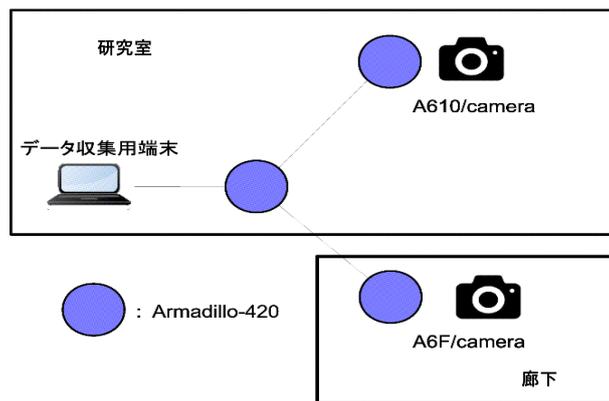


図4 動作実験環境

表4 生成したコンテンツ名

Sensor location	Content name
廊下	ccnx:/osaka-u.ac.jp/A6F/camera/<version no. >/jpg/(QSIF or QCIF)/1/<frame number>
研究室	ccnx:/osaka-u.ac.jp/A610/camera/<version no. >/jpg/(QSIF or QCIF)/1/<frame number>

を開始した日時を用いて表現する。

##### 4.3 動作実験の方法

まずカメラを接続した各Armadilloにおいて、コンテンツのバージョン情報、データ形式、解像度、フレームレートを示したメタデータを生成し、“ccnx:/osaka-u.ac.jp/<location name>/camera/metadata”という名前のコンテンツを作成する。次に撮影データの各フレームに対して表4に示したコンテンツ名を用いてコンテンツを作成する。このとき最新フレーム番号を示したメタデータを生成し、“ccnx:/osaka-u.ac.jp/<location name>/camera/<version no. >/jpg/QSIF/1/metadata”という名前のコンテンツを作成する。

次に、廊下に設置したカメラで撮影した映像データの受信を行う。まず、生成しているコンテンツのバージョン情報や指定可能なデータ形式などの情報を取得するために“ccnx:/osaka-u.ac.jp/A6F/camera/metadata”という名前のコンテンツを要求する。得られたバージョンおよびデータ品質からコンテンツ名を構成し、現在の最新フレーム番号を取得するために“ccnx:/osaka-u.ac.jp/A6F/camera/<version no. >/jpg/QSIF/1/metadata”という名前のコンテンツを要求する。得られたフレーム番号を用いてコンテンツの要求を行うことにより現在の映像フレームを取得する。映像フレームの取得が完了するたびにフレーム番号を1つずつ進めて次のフレームのコンテンツを要求することにより、現在カメラが撮影している映像が取得できていることを確認する。これらの手順により、最新フレームのコンテンツ名が探索可能でありランダムアクセス性が実現されていることが確認できる。本稿で実装した無線センサネットワークではストレージは未実装のため過去のデータを受信できないが、ストレージを実装した場合は、バージョン情報に含まれる配信開始日時、フレームレート、最新フレーム番号の3つの情報を用いることで任意の時刻に生成されたフレームを探索することが可能である。



(a) 廊下のカメラから得られたフレーム (b) 研究室内のカメラから得られたフレーム

図 5 実験で得られた映像フレーム

次に、これまでの操作に続けて研究室内に設置したカメラで撮影した映像データの受信を行う。廊下に設置したカメラから映像データを取得した場合と同様の操作を行うことにより、受信されるデータが研究室内の映像に切り替わることを確認する。

#### 4.4 動作実験の結果

2台のカメラで得られたそれぞれの映像のフレームを図5に示す。ccnx:/osaka-u.ac.jp/A6F/camera/2014-02-04-14-20-40/jpg/QSIF/1/000000025 というコンテンツ名を要求したところ、廊下のカメラから図5(a)のようなjpg形式の映像フレームが受信されることを確認でき、シーケンス番号を増加させていくことで次の時刻のフレームが継続して受信されることを確認できる。

要求するコンテンツ名を研究室内のカメラで撮影しているデータである ccnx:/osaka-u.ac.jp/A610/camera/2014-02-04-14-21-28/jpg/QSIF/1/000000040 に変更したところ、次の受信フレームから図5(b)のように先ほどとは異なるカメラで撮影されたjpg形式の映像フレームが受信される。

これらの結果から、本稿で設計したシステムを適用したアプリケーションでは最新フレームを探索してアクセスする能力を持ち、要求するコンテンツ名を変化させるだけで受信するストリームを動的に変化させることが可能であると考えられる。

### 5. 結論と今後の課題

本稿ではCCN技術を用いたアプリケーションに適用可能なストリームデータ配信システムの設計を行った。設計においてはストリームデータに対するランダムアクセス性やストリームデータの品質を取得中に動的に変化させる能力を実現するための一般的なシステムアーキテクチャについて議論を行った。そして設計したシステムに基づいて無線センサネットワークを実装し、センサとして接続したカメラから動画の各フレームが連続して取得できることを示した。さらに、要求コンテンツ名のみ変更することで動的に取得フレームを変更することが可能であることを示した。

今後の課題としては、無線センサネットワークにおけるデータ蓄積用ストレージの実装や規模の拡大を行った環境における通信能力の評価や複数のデータ収集端末が存在する場合の評価を行うことなどが挙げられる。

#### 文 献

[1] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs, and R. L. Braynard, "Networking named con-

tent," in *Proceedings of 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, December 2009, pp. 1–12.

- [2] V. Jacobson, D. K. Smetters, N. H. Briggs, M. F. Plass, P. Stewart, J. D. Thornton, and R. L. Braynard, "VoCCN: Voice-over Content-Centric Networks," in *Proceedings of the 2009 workshop on Re-architecting the Internet*, December 2009, pp. 1–6.
- [3] D. Kulinski and J. Burke, "NDNVideo: Random-access Live and Pre-recorded Streaming using NDN," NDN, *Technical Report NDN-0007*, September 2012. [Online]. Available: <http://www.named-data.net/techreport/TR007-streaming.pdf>
- [4] B. Han, X. Wang, N. Choi, T. T. Kwon, and Y. Choi, "AMVS-NDN: Adaptive Mobile Video Streaming with Offloading and Sharing in Wireless Named Data Networking," in *Proceedings of IEEE INFOCOM NOMEN workshop 2013*, April 2013.
- [5] Z. Ren, M. Hail, and H. Hellbruck, "CCN-WSN - a lightweight, flexible content-centric networking protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of 2013 IEEE Eighth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, Apr 2013, pp. 123–128.
- [6] L. Zhang, D. Estrin, J. Burke, V. Jacobson, J. D. Thornton, D. K. Smetters, B. Zhang, G. Tsudik, kc claffy, D. Krioukov, D. Massey, C. Papadopoulos, T. Abdelzaher, L. Wang, P. Crowley, and E. Yeh, "Named Data Networking (NDN) Project," NDN, *Technical Report NDN-0001*, 2010.
- [7] "CCNx," PARC, 2013. [Online]. Available: <http://www.ccnx.org/>