

# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing



新熊 亮一 (Ryoichi SHINKUMA Ph. D)

京都大学大学院 情報学研究科 准教授

( Associate Professor, Graduate School of Informatics, Kyoto University )

電子情報通信学会 IEEE

受賞: エリクソン・ヤング・サイエンティスト・アワード, 2007年度 他

著書: 小牧省三(編)ワイヤレスエージェント技術(第3章)丸善, 2008年度

研究専門分野: ネットワークモデル ネットワークアーキテクチャ

## 1. 概要

分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォームの研究について報告する。前半の社会/コンテンツ/通信の多層情報流通プラットフォームは、現実世界、コンテンツの出版/購読 (Pub/Sub)、物理ネットワークの3つの階層で構成され、分散モバイルセンシングによって人々や、場所、商品などの間の社会的関係が数学的にモデル化されており、このモデルに基づいてコンテンツが流通している。すなわち、社会的関係に基づいてコンテンツの配信が制御される情報流通プラットフォームである。後半のアプリ/タスク/リソースの多層情報流通プラットフォームは、分散モバイルセンシングによってモバイル端末が有する通信や計算資源の関係が数学的にモデル化され、資源が分散協調的にタスク処理に使用されることで、アプリケーションが利用可能になるという情報流通プラットフォームである。分散モバイルセンシングにより収集された情報からモデル化を行い、それらのモデルに基づいてコンテンツやサービスといった情報から生み出される価値が流通する点が共通している。

## 2. 社会/コンテンツ/通信の多層情報流通プラットフォーム

第2節では、社会/コンテンツ/通信の多層情報流通プラットフォームについて述べる。情報通信ネットワークにおいて、電子コンテンツは人々や、場所、商品などの社会的関係に基づいて要求/提供されたり、交換されたりするものである。例えば、個人的な写真やビデオといったコンテンツは親しい友人のみに共有するかもしれない。また、毎月テーマパークに訪れるような人なら、そのテーマパークの特別イベントに関するコンテンツを共有したいと思うかもしれない。本節の多層情報流通プラットフォームは、社会的関係を数学的にモデル化し、電子コンテンツの配信に用いる。社会的関係の数学的モデルに基づいたコンテンツ配信をソーシャルキャストと呼ぶ。

### 2. 1 研究の目的

情報通信ネットワークの制御に関する研究には、通信トラフィックが増加する問題に対して、負荷分散を行うといったものが多い。OSPF (Open Shortest Path First) は、ドメイン内のインターネットに用いられる一般的な経路制御プロトコルである。OSPFでは、ネットワーク運用者が各物理リンクにメトリックを設定する。ネットワーク機器ベンダーであるCiscoによれば、各物理リンクにはそのリンクの通信帯域の逆数に比例した値を設定するのが適当である。すなわち、通信帯域の大きい、つまり、高速な物理リンクはメトリック値が小さいため、最短経路として頻繁に使用され、その結果、その物理リンクに対する負荷が非常に大きくなる。ソーシャルキャストは、関係性メトリック[1]を物理リンクに使用する。関係性メトリックは、2つ以上のオブジェクトの関係の強さを定量的に表したものである。例えば、ユーザAがコンテンツXを頻繁にダウンロードしたとすると、ユーザAとコンテンツXの関係性メトリックは大きいはずである。例えば、ユーザAとユーザBがコンテンツYを共有したとすると、ユーザA、ユーザB、コンテンツY三つのオブジェクトの関係性メトリックは大きいはずである。このように、関係性メトリックはコンテンツによって異なるので、コンテンツが配信される際、OSPFのように

# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

## Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing

必ずしも物理的な最短経路が使われないという特徴がある。つまり、関係性メトリックを用いれば、特に負荷分散のメカニズムを導入しなくても自然と負荷が分散されることが期待される。情報通信ネットワークにおいては、負荷分散以外に、コンテンツ配信の遅延を短縮することも重要である。

コンテンツのキャッシュは、遅延短縮に用いられる手段である。人気度の高いコンテンツほど多くのユーザーによって頻繁に要求されるので、キャッシュされやすいが、人気度の低いコンテンツほどキャッシュされにくい。コンテンツの人気度の分布は Zipf 則あるいはべき乗則にしたがうと報告されており、これは、大多数のコンテンツが人気度の低いコンテンツであることを意味している。関係性メトリックは、コンテンツとユーザーの関係性を定量的に表すものである。そこで、関係性メトリックをキャッシュ管理にも用いる。これにより、人気度を用いた場合と異なり、ユーザーごとに異なるコンテンツをキャッシュするようになり、特別

なメカニズムなしに、偏りのないコンテンツのキャッシュを実現できる。

最後に、プライバシーとセキュリティについて述べる。ソーシャルキャストは、これらの観点でも有効である。物理的な最短経路を用いた場合はプライバシーやセキュリティに関する配慮はないが、関係性メトリックが最大となる経路を選んだ場合は、関係のない範囲に物理的にコンテンツを伝播させないという点でこれらにも配慮がなされている。

### 2. 2 システムモデル

図1が階層構造で表した提案システムの全体像である。このシステムは、現実世界の階層、コンテンツの出版/購読 (Pub/Sub) の階層、物理ネットワークの階層の3つの階層で構成される。各階層には、それぞれ関係性メトリック制御機構、Pub/Sub 制御機構、ネットワーク制御機構といった制御機構が存在する。これらの制御機構は相互に連携して運用される。

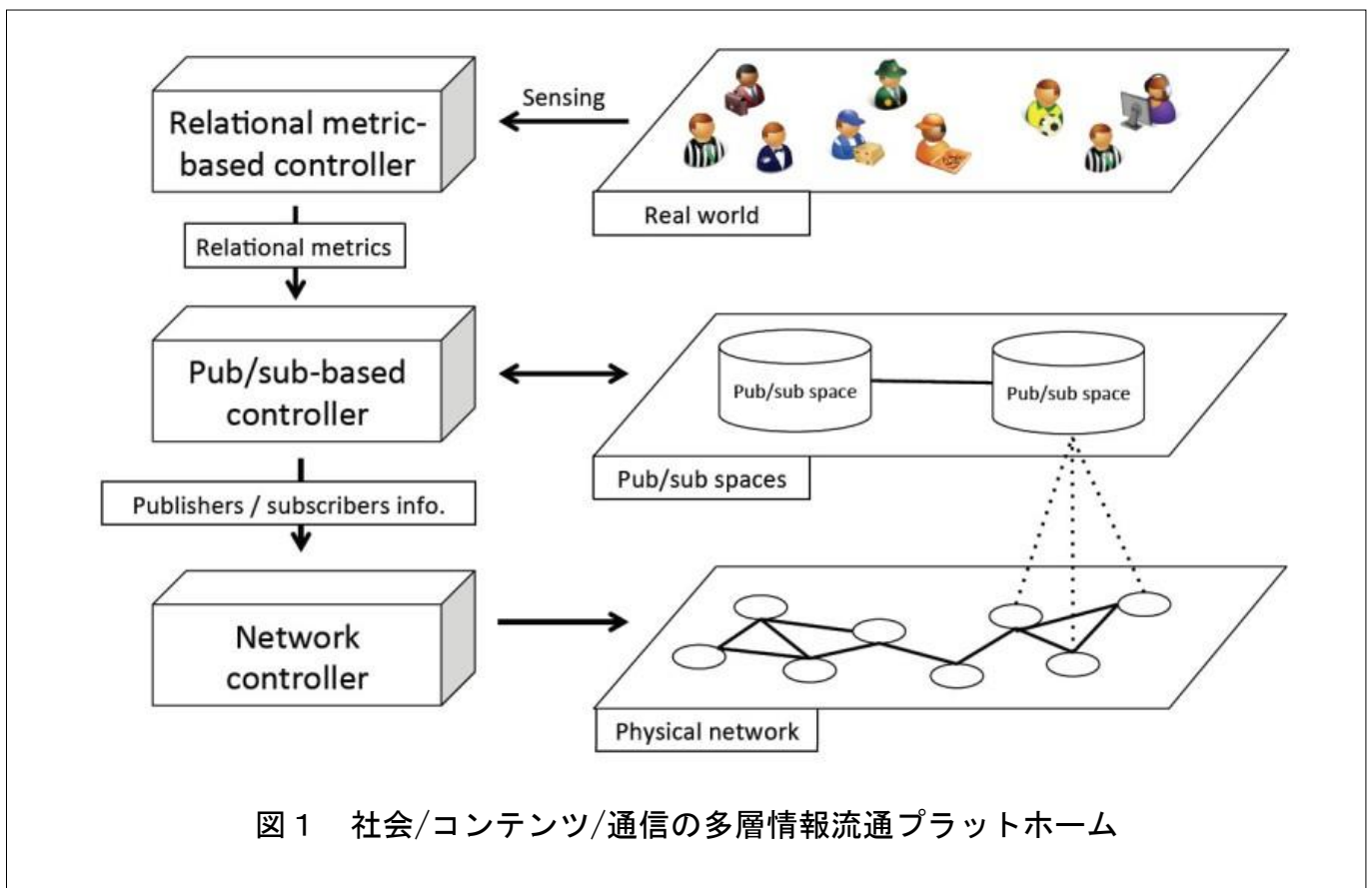


図1 社会/コンテンツ/通信の多層情報流通プラットフォーム

# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

## Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing

以下、各階層の主な構成要素について述べる。関係性メトリック制御機構は、現実世界のセンシングデータから関係性メトリックを生成する。また、関係性メトリックの情報をコンテンツ配信に使用できるよう一階層下の階層に提供する。Pub/Sub 制御機構は、コンテンツの出版、購読すなわちコンテンツの発信、受信を管理し、コンテンツ配信を効率的に行なうために、コンテンツルータとのマッチングを行なう。Pub/Sub 制御機構は、コンテンツの有無やコンテンツの発信者、およびコンテンツの潜在的受信者の管理を行なう。上位の関係性メトリック制御機構から提供される関係性メトリックは、コンテンツの発信者と潜在的受信者のマッチングに用いられる。Pub/Sub 制御機構は、管理情報と関係性メトリックに基づいて、発信されたコンテンツとそれを受信するコンテンツルータを紐づける。例えば、ユーザ A がコンテンツ X を発信すると、そのコンテンツはユーザ A およびコンテンツ X と両方に対して大きい関係性メトリックを有するユーザのみが受信者として選定される。マッチングが行われた後、Pub/Sub 制御機構は、コンテンツ、その発信者、潜在的受信者、それらの間の関係性メトリックの情報を、下位の階層に提供し、物理的ネットワークでのコンテンツ配信を開始させる。ネットワーク制御機構は、物理的なルータやコンテンツを管理する。ネットワーク制御機構には主として 3 つの機能がある。第 1 の機能は物理ルータの状態を管理し、コンテンツと発信者に対し各ルータが有する関係性メトリックに基づいてコンテンツの物理的配信経路を決定することである。ネットワーク制御機構がコンテンツの配信を開始すると、ネットワーク制御コントローラが、Pub/Sub 制御機構によって選定された受信者に対し、コンテンツを到達させるための物理的配信経路を探索する。第 2 の機能は、コンテンツの発見やキャッシュの置き換えを含むコンテンツの管理全般である。ネットワーク制御機構は、コンテンツの位置情報、すなわち、どのルータがどのコンテンツをキャッシュしているかの情報を保持している。コンテンツが配信されると、その配信経路上のルータのキャッシュは置き換えられることになる。置き換え後のキャッシュの更新情報は、ネットワーク制御機構が把握しておく必要がある。第 3 の機能は、

ルータにキャッシュしているコンテンツの再配信を指示することである。この時、ルータは CDN (Content Delivery Network) におけるコンテンツ配信サーバのように振舞う。配信経路が確立されると、ネットワーク制御機構は、経路上のルータがそのコンテンツをキャッシュしていないか確認をし、もしキャッシュしているようであれば、そのルータがコンテンツ発信者の代わりに再配信を行なう。

### 2. 3 提案方式

まず、ルータ  $i$  が次のルータ  $j$  にコンテンツ  $c$  を転送する時に使用される関係性メトリックは、 $i, j, c$  を変数とする関数で与えられる。すなわち、関係性メトリックは  $i, j, c$  の組み合わせで一意に決まる。次に、コンテンツの配信経路を決定するアルゴリズムについて述べる。まず、関係性メトリックの逆数を各物理リンクの距離として用いる。各物理リンクの距離が配信されるコンテンツに応じて計算され、各物理リンクに割り当てられる。ソーシャルキャストは、コンテンツの配信元から配信先までの経路のうち、関係性メトリックの逆数の合計値が最小となる経路を選択する。次に、キャッシュアルゴリズムについて述べる。提案方式では、コンテンツ配信経路上のルータがコンテンツを転送する際にキャッシュを置き換える。ただし、既にキャッシュしているコンテンツのうち、最も関係性メトリックの小さいコンテンツよりも、転送中のコンテンツの関係性メトリックの方が大きい場合に、前者を後者に置き換える。

### 2. 4 シミュレーション評価と結果

提案方式の有効性を計算機シミュレーションにより評価した。シミュレーションモデルでは、約 4,000 台のルータを一様にランダムに配置し、ルータ間のリンク (100Mbps) もランダムに与えた。各ルータには 1 ユーザが接続しているとした。Pub/Sub のコンテンツ (10M バイト) の発信サーバを中央に配置し、すべてのルータはその発信サーバと接続しているとした。コンテンツは論文など学会活動に関するものとし、2010 年の電子情報通信学会技術研究報告として記録されている研究者の活動から関係性メトリックを形成した。

# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

## Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing

シミュレーションでは、ユーザから1ユーザをランダムに選択し、その要求者が関係性メトリックに基づいた確率でコンテンツを要求する。コンテンツの配信サーバから要求者を含めた全ての受信者までの各配信経路が決定される。経路上のルータがすでに要求されたコンテンツをキャッシュしている場合は、そのルータから配信が行なわれ、そうでなければ、配信サーバから配信が行なわれる。物理的な最短経路を常に用い、また、人気度に基づいたキャッシュを行う方式を比較対象とした。

シミュレーションの結果、各ルータのキャッシュ可能なコンテンツ数が1,3いずれの場合においても、提案方式では比較対象に比べ使用される物理リンクが分散されていることが明らかになった。比較対象の方式は、常に物理的な最短経路を使用するため、一部の物理リンクに負荷が集中する。また、遅延時間については、比較対象が3.0秒以内であったのに対し、2.0秒以内にコンテンツを到達されることができるという結果も得られた。最後に、プライバシー/セキュリティの観点からは、比較対象が使用した経路の物理リンクの平均的な関係性メトリックの値は0.4であったのに対し、提案方式では0.6であった。つまり、提案方式は、配信するコンテンツに関係のある経路を使用できていたことから、プライバシー/セキュリティの観点からも優位であると言える。

### 3. アプリ/タスク/リソースの多層情報流通プラットフォーム

第3節では、モバイルサービスに向けたアプリ/タスク/リソースの多層情報流通プラットフォームとして提案しているSOHReS (Service-Oriented Heterogeneous Resource Sharing, ソーレス) [2]について述べる。スマートフォンやタブレットに代表されるモバイル端末の普及以後、人々は多くのサービスをモバイル端末のアプリケーションを通して享受している。例えば、EC (電子商取引) サービスや音楽・映画鑑賞、ナビゲーションなどである。そういったサービスを提供するアプリケーションの実行には、アプリケーションそのものの配布、計算や通信タスクの処理が

必要であり、それには計算、通信、ストレージ資源が必要となる。ナビゲーションサービスを例にとると、地図情報の取得、最短経路の探索、地図画像の取得、ディスプレイ上に地図及び経路を描画する、という一連のタスクで構成されており、それぞれ、Wi-FiやLTEなどの通信資源やCPUやGPUなどの計算資源を使用する。SOHReSは、近隣に存在する端末同士で構成するローカルなクラウドシステムであり、演算処理などのタスク処理から、ストレージや通信帯域などの資源提供、アプリケーションの配布・共有など、モバイルサービスの享受に必要な要素全てをになう。SOHReSでは、近隣の端末との異種資源共有を数学的にモデル化し、タスクの配分を行う。

#### 3. 1 研究の目的

SOHReSの最大の特徴は、計算資源やストレージ資源のみならず、通信資源や情報資源 (アプリケーション) の共有を行う点、端末が利用するサービスに応じたユーザ効用の最大化と端末間の公平性の両面を考慮して配分を行う点である。従来のクラウドコンピューティングでは、主に計算資源とストレージ資源のみが対象であった。また、それらの配分はサービス単位ではなく、ある一つのタスクの処理時間を最小にするように行われる。そのため、サービスの単位でみると無駄な資源配分がなされていた。また、従来のクラウドコンピューティングは、ネットワーク越しに行われるため遅延を避けることはできなかった。SOHReSでは、提供されるサービスに必要なタスクの構成、必要な資源をシステムが把握し、通信資源や情報資源まで含めて最適な配分を行うことで、限られた資源を有効に活用でき、さらにローカルで処理を行うことで、低遅延でサービスを提供することができる。SOHReSでは数学的モデルを用いて資源配分を決定するが、資源の種類が複数あるため単純にはモデル化できない。そこで、SOHReSでは統一的な効用関数を新たに定義し、異種資源共有の利得を同一の次元で定量化する。この統一効用関数では、資源の価値を時間次元で表現する。こうすることで、種類の異なる資源に対しても時間という同一の次元で比較することができ、最適化問題として定式化することができる。

# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

## Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing

### 3. 2 システムモデル

図2に SOHReS のシステムモデルを示す。SOHReS において、資源の共有は、タスクを移譲することにより行われる。先に述べたように、サービスは複数のタスクで構成される。このタスクの一部を別の端末に移譲することで、相手の資源を利用することができる。このように、端末同士でタスクを移譲しあうことで資源の共有を行う。このタスクの移譲やそれに伴う情報交換等は、近隣の端末同士で形成する資源共有ネットワークで行う。資源共有ネットワークは、Wi-Fi や Bluetooth などを用いた無線アドホック通信により形

成される。このネットワーク上では、利用中/利用したいサービスの情報、タスクの移譲に関する情報、タスクの処理結果、利用可能な資源量、位置情報などがやりとりされる。また、資源共有ネットワークごとに、そのネットワークに属する端末の中からローカルリソースコーディネータが選出される。ローカルリソースコーディネータは、計算、通信、ストレージなどの資源量、バッテリー残量や通信の安定性などの接続性を考慮して選出される。ローカルリソースコーディネータは、資源共有ネットワークにおけるタスク配分の最適化問題を解くことで最適な資源共有を導き出す。

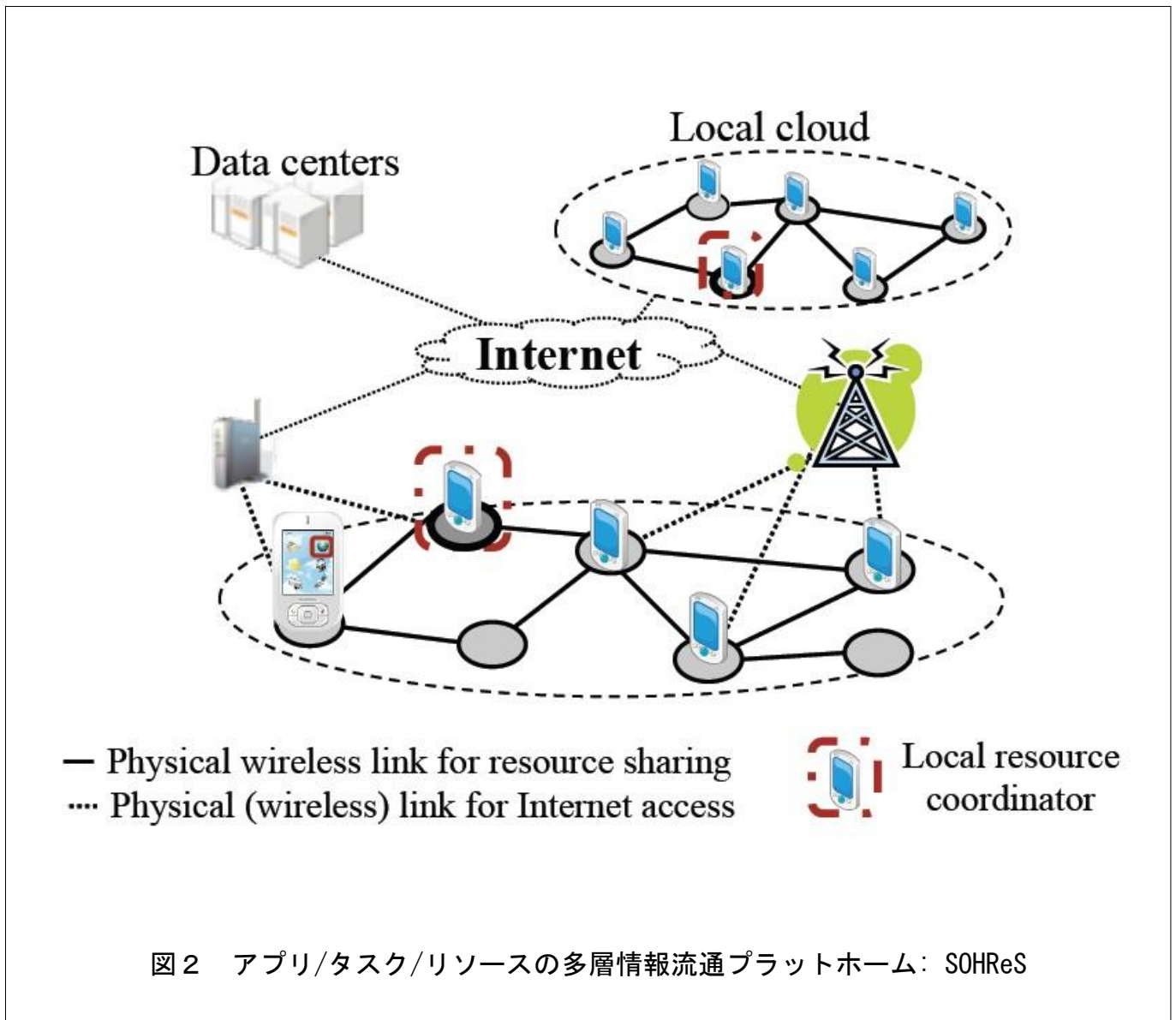


図2 アプリ/タスク/リソースの多層情報流通プラットフォーム: SOHReS



# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

## Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing

資源共有の流れを図3に示す。

- 1) はじめに、端末は資源要求メッセージを送信する。資源要求メッセージには、利用可能な資源の種類と量、処理が必要なタスクの種類と量、端末の物理アドレスおよびネットワークアドレスが含まれる。
- 2) 次に、資源要求メッセージを受け取ったローカルコーディネータは、得られた情報を用いて最適化問題をとき、タスク配分結果を端末に通知する。
- 3) 端末は、通知された配分結果に基づきタスクの移譲を行う。
- 4) 移譲された端末は、タスクを処理し、
- 5) その結果を返す。
- 6) 得た結果をもとに、サービスを構成し、享受する。

本研究では、異種資源の価値を判断する基準としてサービスの待ち時間に着目した。ネットワークサービスに対するユーザの体感品質は、サービス享受までの待ち時間に強く影響を受け、アプリケーション開始か

らサービスを楽しむまでの時間が短ければ短いほどユーザの体感品質は高い。SOHReSにより資源共有することで、サービス待ち時間が削減される。この共有前後のサービス待ち時間の差分を移譲されたタスクに対する利得として定義する。これにより、種類の異なる資源に対しても、それぞれの価値を定量化できる。

### 3.3 異種資源共有の数学モデル

まず、サービス待ち時間について定義する。サービスの基本的な構成は、(a)タスクが直列に接続されたものか、(b)並列に接続されたものとなる。直列にタスクが接続している場合、サービス待ち時間は、それぞれのタスク処理時間の和となる。一方、並列に接続されている場合、サービス待ち時間は、それぞれのタスク処理時間のうち、どちらか大きい方となる。

資源共有により移譲したタスクも並列接続となるため、同様に求められる。一般的なサービスの構成は、(a)と(b)が組み合わさった構成となるため、直列に接続されたタスク列が複数ある中で、最大の処理時間がそ

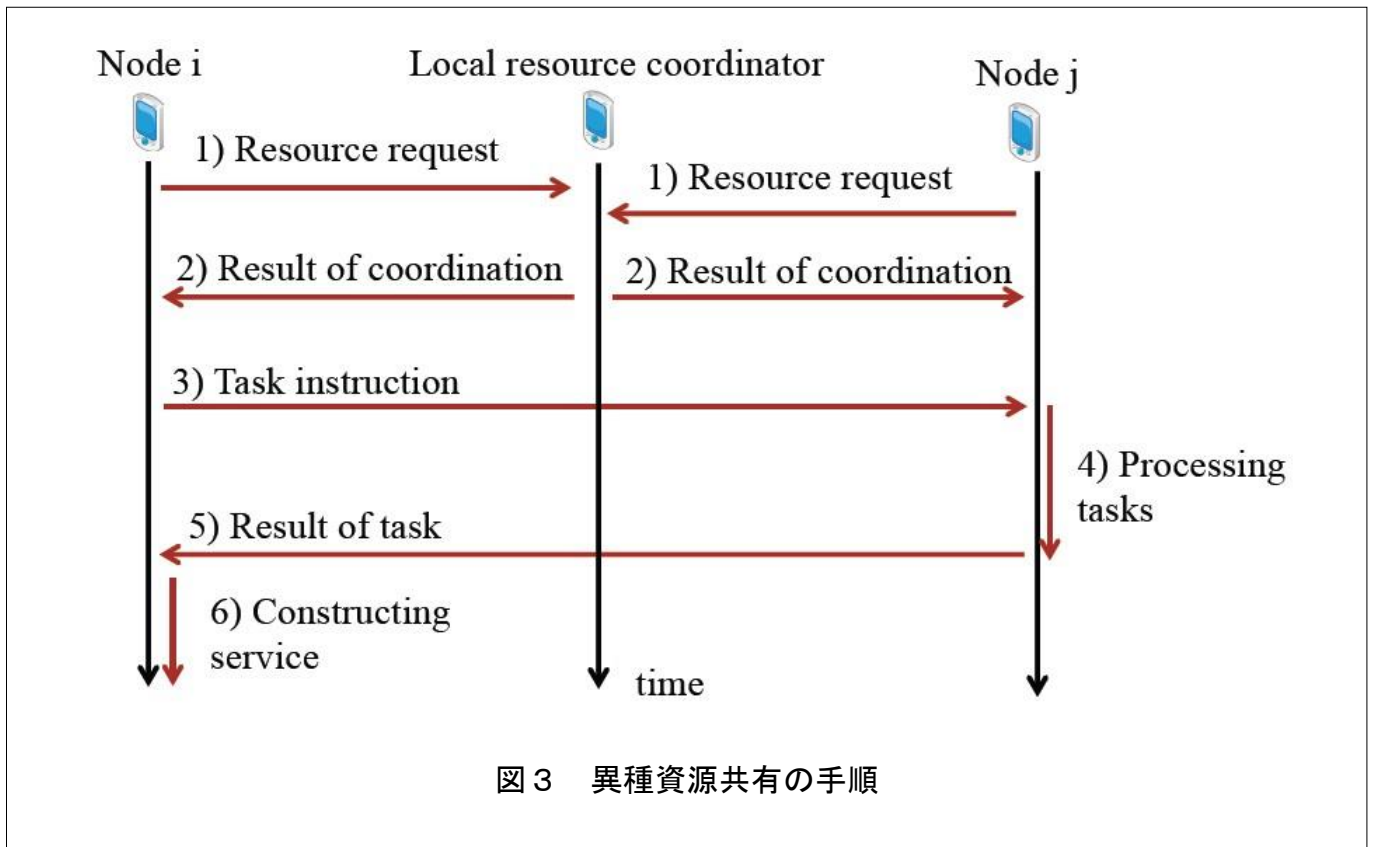


図3 異種資源共有の手順

# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

## Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing

のサービスの待ち時間となる。

異種資源共有を最適化問題として定義する。最適化問題の目的関数としてはいくつか考えられる。一つは、各端末の利得の和の最大化である。これは、資源共有ネットワークのシステム容量を最大化しているに等しい。利得の定義から、この目的関数は凹関数であるため、制約条件が凹関数であれば、大域的最適解の存在が保証できる。一方、端末ごとに不公平が生じる可能性がある。もう一つは、各端末の利得の積の最大化である。これはゲーム理論におけるナッシュ交渉解と呼ばれるものであり、パレート最適性と比例公平性を達成することができる。一方、この目的関数は凹関数ではなく、大域的最適解への収束性を保証することはできないというデメリットがある。制約条件としては、タスク移譲量の制約、消費電力の制約、利得の保証に関する制約がある。タスク移譲量の制約とは、移譲するタスクの量は正でなければならないこと、移譲するタスク量の総和は、元のタスク量以下でなくてはならないことである。消費電力の制約は、異種資源共有により増加する消費電力がある許容値以下でなくてはならないというものである。これはモバイル端末のバッテリーの制約を考慮したものである。いくらサービスが快適に受けられるようになろうとも、消費電力が大きくなるようであれば、資源共有の効用が低下する。これを防ぐため消費電力増加量に対し許容値を設定し、許容値を超えない範囲で資源共有を行う必要がある。最後に利得の保証である。利得が負であるということは、資源共有に参加することでサービス待ち時間が延びてしまうということであり、そのような場合、そのユーザは資源共有を取りやめる可能性がある。そこで、制約条件として加え、損をしない範囲で資源共有を行う。以上を用いて2種類の資源が利用可能な2台の端末が2種類の並列に実行可能なタスクで構成されるサービスを利用する問題を最適化問題として定式化した。詳細は省略する。この定式化された最適化問題を解くことで、最適なタスク移譲量を決定することができる。

### 3. 4 数値解析による評価と結果

提案方式の有効性を数値解析により評価した。数値解析のモデルとして、2台の端末による異種資源共有

を想定した。サービスとしてはナビゲーションサービスを仮定した。ナビゲーションサービスは、通信資源を用いた経路情報および地図画像の取得、計算資源を用いた最短経路探索が含まれる。今回は、経路情報は既に端末のアプリケーションが保持していると想定し、地図画像の取得と最短経路探索は並列に実行できると仮定した。通信タスクを5Mバイトとし、端末*i*の通信資源を評価パラメータ、端末*j*の通信資源を10Mbpsとした。また、計算タスクを50G浮動小数点演算とし、端末*i*の計算資源を12G FLOPS、端末*j*の計算資源を27G FLOPSとした。

評価指標として、最適点におけるサービス待ち時間と公平性指標を用いた。公平性指標は、1であれば両端末が等しく利得を得ていることを意味する。また、端末間で不公平性がある場合、つまり、どちらかの端末の利得が負の場合のみ、この公平性指標の値は1/2を下回る。公平性を考慮しない場合のサービス待ち時間削減量の理論的な性能上限との比較を行なった。

端末*i*の通信資源量に対するサービス待ち時間の平均削減量と公平性指標を評価した。提案方式では端末*i*が通信資源を十分に有している時、性能上限と同程度にサービス待ち時間を削減することができた。公平性指標も常に1/2以上となった。SOHReSを用いた異種資源共有では、常にすべての端末が利得を得ることができたとと言える。

### 4. 今後の展望

昨今のセンシングデータを含む蓄積データから価値を生み出そうとする取り組みは、「ビッグデータ」という呼び名で知られており、情報通信分野において、これに関する研究開発や事業化が盛んに行われている。本研究の分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォームは、分散モバイルセンシングによるデータから価値を生み出すのみならず、多階層構造により、その価値を流通させることができるプラットフォームである。昨今の「ビッグデータ」の取り組みに対しても、先駆的な研究成果であったと言え、今後も本成果の発展が期待される。

# 分散モバイルセンシングによる多層情報流通プラットフォーム

Multilayered Information Platform with Distributed Mobile Sensing

## 参考文献

- [1] R. Shinkuma, H. Kasai, K. Yamaguchi, and O. Mayora, "Relational Metric: A New Metric for Network Service and In-network Resource Control" Proc. IEEE CCNC2012, WIP session, Jan 2012.
- [2] T Nishio, R Shinkuma, T Takahashi, and N. Mandayam, "Service-Oriented Heterogeneous Resource Sharing for Optimizing Service Latency in Mobile Cloud", ACM Mobile Cloud'13 in Conjunction with MobiHoc 2013, July-Aug 2013.

この研究は、平成21年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成22～24年度に実施されたものです。