

Mobicom 2011 参加報告

石原 進^{†1} 山口 弘純^{†2} 重野 寛^{†3}

筆者らは 2011 年 9 月に米国ラスベガスで行われた ACM SIGMOBILE のフラッグシップカンファレンス Mobicom 2011 に出席した。本稿では、同カンファレンス並びに併催ワークショップ VANET の様子と主な発表論文、議論の動向について紹介する。

Report on Mobicom 2011 Conference

SUSUMU ISHIHARA,^{†1} HIROZUMI YAMAGUCHI^{†2}
and HIROSHI SHIGENO^{†3}

We attended ACM Mobicom 2011, the flagship conference of ACM SIGMOBILE, held at Las Vegas in Sep. 2011. In this paper, we introduce the highlight of the conference, the topics of selected papers presented in the conference and its co-located workshop VANET, and the trend in the conference.

1. はじめに

ACM Mobicom (The ACM international conference on mobile computing and networking) は米国 ACM の SIGMOBILE のフラッグシップカンファレンスであり、難関国際会議として知られている。本稿では、2011 年 9 月 19 日から 23 日に米国ラスベガスで開催された Mobicom 2011 ならびにその併催ワークショップの様子と主な発表論文について

^{†1} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

^{†2} 大阪大学大学院情報科学研究科/独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University / JST CREST

^{†3} 慶應義塾大学理工学部/独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Faculty of Science and Technology, Keio University / JST CREST

紹介する。

Mobicom の第 1 回目は 1995 年に米国バークレーで開催され、その後毎年米国を中心に世界各国で開催されており、2011 年の開催で 17 回目を迎えた。Mobicom ではその対象領域として、モバイルコンピューティングとモバイル・無線ネットワークを扱っているが、これまでに同会議から MobiHoc (アドホックネットワーク), MobiSys (システム, サービス, アプリケーション) 等, 対象範囲を限定した関連国際会議が派生している。

今回の会場はラスベガスの中心部 Strip にある The Mirage Resort and Casino であり、スロットマシンが広がるカジノフロアをくぐり抜けた先に整備された会議エリアで本会議とワークショップが行われた。Strip の町並み、カジノフロアの喧噪をよそに、会議エリアは落ち着いたたたずまいであり、アカデミックな雰囲気での会議は開催された。本会議の参加者は 300 名程度であり、半数以上が学生である。また日本からの参加者は筆者ら 3 名を含め 10 名程度であり、平年より若干多めの参加となった。

2. 会議の構成

2.1 本会議のセッション構成

Mobicom の本会議は 3 日間で行われ、すべてシングルセッションの構成である。スケジュールは濃密で、パネルや SIG MOBILE の公開ビジネスミーティングも含めて、朝 8 時あるいは 8 時半から午後 7 時までぎっしりとセッションが詰まっている。会議は、以下に示す 9 個のテクニカルセッションと 2 つのキーノートとパネル、デモ、ポスターセッション、並びにプールサイドでのレセプションとバンケットから構成されていた。



図 1 会場: The Mirage Resort and Casino



図 2 会場周辺

- Enterprise Wireless
- Cellular Networks
- MAC/PHY Advances
- Wireless Access
- Infrastructureless Networking
- Physical Layer
- Applications
- Protocols
- Theory

セッションの構成で特徴的なのは、そこにセンサネットワークという言葉が全く見当たらないことである。過去 10 年の Mobicom のプログラムを見ると 00 年代前半はアドホックネットワークが中心であり、その関連セッションが複数あるのが当然であった。00 年代中盤にはセンサネットワークがそれに置き換わっていったが、徐々にその数は減少し、今年に至ってはプログラムのどこにも sensor という言葉が含まれていない。ただし、アドホックネットワークやセンサネット系の研究の流れからの発展として、Delay / Disruption Tolerant Networking (DTN) に関するものが今回の Mobicom でもいくつか発表されている。最近目立つのは、周波数資源の効率的な使用や無線ネットワークの新しい技法の開発に関するもので、適応的なチャンネル周波数・帯域幅の選択に関するもの、無線 LAN のバックオフのような時間ドメインでの処理を OFDM サブキャリアの選択に置き換えるなどの時間ドメインから周波数ドメインへの処理の置き換えに関するもの、全二重無線通信、無線物理層の特性に適したビデオ伝送などに関する研究である。いわばスマートフォンなどの個人が持ち歩く携帯デバイスを、無線周波数資源を有効に活用して快適に利用するための技術といった色彩が強くなっている。

2.2 ワークショップ

本会議開催の前日と最終日翌日に下記の 5 つのワークショップが開催された。

- 8th ACM Int'l Workshop on VehiculAr Inter-NETworking (VANET 2011)
- 6th ACM Int'l Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation and Characterization (WiNTECH 2011)
- 6th Workshop on Challenged Networks (CHANTS 2011)
- 3rd Workshop on Cognitive Wireless Network (CoRoNet 2011)
- 3rd Int'l Workshop of the Students, by the Students, and for the Students (S3)

このワークショップの構成から、Mobicom がモバイルコンピューティング、無線・モバイルネットワークの総合領域を扱う会議であるとはいえ、参加者の主体は比較的低いプロトコル階層に関する研究者であることが分かる。

興味深いのは S3 である。S3 は複数の大学にまたがった学生チームの運営で実施されており、一般発表だけでなく、招待講演、パネルの講演者もすべて学生である。ワークショップ

の最後のセッションは全 Mobicom 参加者へ公開されており、ベンチャーキャピタリストを招いてスタートアップのアイディアをプレゼンテーションする場となっていた。もともと、Mobicom は学生の参加者の割合が多く、本会議はもちろんポスター、デモ等で学生の存在感が大きい。この雰囲気は DICOMO に近いものがある。日本のコミュニティでもこのようなこのような学生主体の取り組みがあると、研究分野全体が大きく盛り上がっていくと考える。

2.3 論文査読プロセス

本会議には 8 カ国から 29 本の論文が採択された。重複はあるが、産業界からは 10 本、26 本がアカデミックからの投稿論文であり、25 本が学生が著者の論文である。362 本の論文登録があり、実際に投稿されたのは 214 本である。プログラム委員長の説明によれば、論文採択プロセスは以下の通りである。まず 1 回目の査読を論文あたり各 3 名の査読者で行い、108 本まで絞った。さらにそれぞれ 1~2 名の査読者を追加して 2 回目の査読を行って、58 本までに絞り、その後プログラム委員会での議論で採録論文を決定した。採択率は 13.5% である。採択論文 29 本の内 17 本が米国トップ 20 の大学からの投稿であり、4 本が国際的トップ 20 の大学からの投稿だということ、コミュニティにかなり偏りがあることが伺える。実際、常連どころの発表が非常に多い。

3. キーノート

オープニングセッションで行われた Mobicom 本会議最初のキーノートは、“Smart Grid — Opportunities” と題して、UCLA Smart Grid ENergy Research Center (SMERC) の Director, Rajit Gadh により行われた。冒頭、今回の Mobicom の 2 週間前に発生したばかりのカリフォルニア州南部からアリゾナ州、メキシコ北部に至った大規模停電の話題が紹介された。原因はアリゾナとカリフォルニアを繋ぐ高圧電線での送電停止に起因するものさそうである。電力網がスマートであったらこのような事態にはなからなかったとし、需要に応じた価格設定や電気自動車を用いた予備電力の充電等、スマートグリッドの基礎から、SMERC での取り組みまでを紹介していた。特にスマートグリッドの実現に当たっては、ビルなどの多数の電気設備に関しての制御をする必要があるため、Last one Mile の通信が最もエキサイティングな研究課題であると説明された。SMERC での取り組みとして、WINSmartGrid プラットフォーム、Demand Response, EV Integration to the Grid が紹介されていた。WINSmartGrid はスマートビルディングやスマートキャンパス、Home Automation Network (HAN) を実現するオープンかつプラグアンドプレイで動作する無線

でのセンシングと制御の枠組みである。Demand Response はスマートビルディングやスマートホームのための自動化された負荷制御の仕組みである。UCLA でのキャンパス全体にわたったテストベッド、電気自動車との連携、スマートフォンを使った消費電力の見える化などの事例が紹介された。

3日目の朝には、米 National Science Foundation (NSF) の Computer and Information Science and Engineering (CISE) のアシスタントディレクター Farnan Jahanian による “Innovating for Society: Realizing the Promise and Potential of Computing” と題したキーノート講演が行われた。今後のコンピューティングでのデータ量、インターネットトラフィックの増大、クラウドコンピューティングの重要性について触れ、今後の課題として、並列処理、負荷分散、機能配置戦略、ネットワーク等に重点を置くべきであるとの説明が行われた。また、CISE の重点ファunding分野として、スマートヘルス、環境～スマートグリッド、サイバーセキュリティ、人間協調ロボット、IT系教育・労働力確保、ブロードバンド・無線通信インフラがあることが紹介された。特に2010年以後の米国の急激な高齢化を受けたスマートヘルスやロボット、教育問題に関して力点が置かれていた。若い世代、特に高校生のコンピュータ科学への関心が低調であるという問題が指摘され、リサーチコミュニティを含めた積極的な啓蒙活動の必要性が強調された。このような若者の傾向を示すデータとして、米国の高校における Advanced Placement (AP) の試験の受験者に関するデータが紹介された。米国の高校教育には、大学の学部生レベルと同等の講義を提供する AP プログラムと呼ばれるカリキュラムがあり、コースを履修して試験を受けることで、大学の単位を先取りすることができる。2010年に calculus の AP の試験を受けた学生は194,784名、biology については134,871名だったが、コンピュータ科学については14,517名と、一桁も低い状況であった。このような状況を改善するには、研究者であっても、教育の問題にも積極的に関わる必要性が求められる。日本でも若者の間でも理工系離れ、ひいては、この分野への関心が低くなってきていることが懸念されており、大変、気になる話題であった。

4. パネル

二日目の最後に “Future Trends in Mobile Computing: Challenges and Opportunities” と題してパネルが行われた。実はこのパネルセッションは配布されたプログラムには入っていなかったため、急ぎよ企画されたのではないかと予想される。

パネルのモデレータは Texas A&M University の Xi Zhang が務めた。モバイルコンピューティングというテーマはかなり抽象的であり、どのような方向性にまとめていくのか

注目したが、モデレータはモバイルクラウド、コグニティブ無線、フェムトセル、無線マルチメディアネットワークなどをホットトピックとして挙げた程度で各パネリストのプレゼンテーションに移った。パネリストも特定のトピックを意識したというよりは、アカデミア、国防、NSF といった異なる立場からのビジョンを期待した構成となっており、その通りにパネリストの話は多様であった。海軍研究所の Santanu K. Das は underwater network などのトピックを紹介し、UCLA の Mario Gerla は Vehicular Network について、ミシガン大の Kang G. Shin はダイナミックスペクトルアクセス (DSA)、モバイル機器の省電力技術、QoS の今後のモバイルコンピューティング・ネットワークでの重要性について紹介した。NSF の Min Song はファンディングの視点から DSA 等、周波数資源の有効利用技術の重要性を紹介していた。

パネルの主旨とパネリストに期待する内容が明確でなかったためか、ややまとまりを欠いていた感が否めない中、印象的だったのは Mario Gerla の “Vehicular Cloud Computing” というコンセプトであった。この言葉は、一聞すると車両データをいわゆるインターネットクラウドに集約する話であると思えるのだが、良い意味で裏切られた。車両センサーから得られる（あるいは推測される）データは道路コンディションの共有やビデオカメラによるローカルモニタ情報などであり、それらはそもそもローカルに処理されるべきであり、加えてインフラへのアップリンクリソースが限られていることを考慮すると、都市でのホワイトスペースを活用し近隣の車両群で P2P ネットワークを構築してその上で動作するいわゆる「モバイルクラウド」を構成すべきであるといったコンセプトであった。個々のクラウドは共通の目的（データ共有など）をもった近隣車両で構成し、車両間 P2P ネットワークには WiFi 周波数を、クラウド間ネットワークでは 3G あるいは TV 周波数を用いればよいといった指針も示された。移動体によるクラウド自体は新しいコンセプトでなく、例えばアリゾナ州立大の Dijiang Huang による Mobile Cloud Computing、Microsoft Research のモバイル端末協調計算インフラである Mobile Assistance Using Infrastructure (MAUI) などの先行事例もあるが、車両ネットワークといった具体性のあるインフラでの実現においては、車両の移動性の考慮、サービス発見やアドレッシング、共有ストレージ、通信最適化など様々な技術課題と研究テーマが生まれてきそうであり、ユニークでありながら実用性や将来性に期待が持てそうである。

5. 本会議テクニカルセッション

以下、2本のベストペーパーとその他3本のベストペーパー候補となった論文、ならびに

その他の興味深い論文について紹介する。

5.1 ベストペーパー

ベストペーパー候補に挙がった5編が、会議のオープニングで紹介されたのち、2日目までに行われたプレゼンテーション後に最終にかけられ、二日目夜のバンケットの席でベストペーパー2編が発表された。2編のうち1編は無線ネットワーク系、もう1編はアプリケーション系の論文である。

無線ネットワーク系のベストペーパーは、Mobicom 常連のミシガン大のグループによる“E-MiLi: energy-Minimizing Idle Listening in Wireless Networks”という無線 LAN の省電力方式の提案¹⁾である。モバイル機器における WiFi の消費電力は GSM の 14 倍にも上るといふ。中でも WiFi における多くの時間は Idle Listening (IL) に費やされているにも関わらず、IL では WiFi ハードウェアコンポーネントのすべてが wake 状態であり、消費電力が上がる主要因となっている。省電力としてはスリープスケジューリングが一般的であるものの、それでも IL に費やす電力割合は 80%以上と大きい。これに対し、本論文では IL 期間のみハードウェアクロックを下げるというアプローチで対処している。その際、低クロックでパケット受信が可能ないようにプリアンプルをカスタマイズし、サンプリングレートに依存しないパケット検出ならびにプリアンプルによるクライアント区別を可能とすることで、受信クライアントのみがパケット検出後に通常クロックに戻してパケット受信を行う。USRP を用いた性能評価などを行って省電力効果を検証している。

NIC の動作クロックを落とすと言うことは、ハードウェア全体の置き換えを意味し、既存の仕組みを流用することは困難であるという指摘が質疑応答で多数上がり、実用性に関して疑問が残った。また、IL に関する問題はセンサネットワーク用の MAC の研究分野で多くの成果があり、それらがスリープによって解決している問題を E-MiLi ではクロック低下に置き換えているだけではないかという指摘もあった。

もう一方のベストペーパーは、米スティーブンス工科大とラトガース大のグループによる“Detecting Driver Phone Use Leveraging Car Speakers”²⁾である。この論文では、携帯電話とカーステレオを使って、音の伝達時間に基づいて車室内の携帯電話の位置を推定するシステムを提案している。同システムでは、携帯電話から Bluetooth 経由でカーステレオにユーザに気づかれない程度の高周波のピープ音を送り、あらかじめ決めた間隔で左右それぞれのスピーカーから異なるタイミングで音を鳴らせる。これらの音の携帯電話への到着時刻をもとに携帯電話の車室内の位置を推測し、携帯電話を持っているのがドライバーか同乗者なのかを判定する。ノイズや車室内のマルチパスの影響を避けるため、ピープ音

の到着タイミングの検出には以下の様な方法を用いている。携帯電話では音声信号送信後、バンドパスフィルタを用いて特定周波数帯での音声信号強度をモニタし、測定開始からの信号強度の累積値が閾値を超えた時を信号到時刻であるとする。携帯電話 2 種類と、自動車 2 車種を用いて、提案方式の検証が行われており、提案方式が音楽や風音等の背景音に対してもロバストであり、キャリブレーションを行えば 95%程度の正答率が得られることが確かめられている。VANET ワークショップのデモでもカーステレオを鳴らせたまま位置確認を行う様子が披露されていた。

5.2 ベストペーパー候補

ベストペーパー候補に挙がった3編の論文はいずれも無線ネットワーク系の論文である。いずれも全く新しい手法を実装実験の結果とともに提案しており、完成度が高いうえ、今後の発展が期待できる。なお、筆者らはベストペーパーには上述した2件ではなく、以下の3件のうちいずれかが選ばれと予想していた。

米 Wisconsin-Madison 大、ノキア、マイクロソフトのグループは、802.11 無線 LAN において、柔軟にチャンネルを利用するためのモデルとシステム FLUID を提案している³⁾。FLUID では企業向けの無線 LAN で複数のアクセスポイント (AP) が使用するチャンネルの帯域幅、中心周波数を適切に選択できるようにする。例えば、40MHz の帯域を同じ 2 台の AP が使用する場合、40MHz を 2 台の AP が同じ中心周波数で共有する、帯域が重ならないように別々の 20MHz 幅の帯域を使用する、一方が 40MHz を使えば他方が同じ中心周波数で 20MHz を使用するなど、様々な組み合わせが考えられる。著者らは干渉の条件によって最適なチャンネル利用方法が異なることを実測に基づいて示している。中心周波数を同じものとする場合、40MHz を 2 台の AP で使用する方が効率が良いように見えるが、実際には同じ出力を用いる場合、20MHz 幅で通信した方が周波数あたりの出力は高くなるので SNR が良くなり、結果として良好なスループットが得られる。 N ノードのネットワークで最適なチャンネル割当を得るために必要な干渉グラフを作るためには、各リンク、データ送信レート、中心周波数について、 $O(N^2 \cdot k |w| \cdot 2^{|w|+1})$ 回の測定が必要となる。ここで k は選択可能な伝送レート、 $|w|$ は選択可能な帯域幅の数である。この論文ではチャンネルあたり $O(N^2 \cdot k)$ 回の測定で干渉グラフを得るための手法、ならびにチャンネル割当と送信スケジュール方法を提案している。提案手法は一般に入手可能な無線 LAN デバイス 50 台を用いたテストベッドでの測定で、全ての物理層送信レートにおいて平均 59%のスループット向上が得られることが確認されている。この論文では、一見単純に AP の負荷の比に応じて使用帯域幅を割り当てるのが良さそうに見える問題に対して着目し、測定と実装に基づいて効果的な解を示して

いる。この着眼点を評価したい。

ライス大、マイクロソフトのグループは、WiFiにおけるチャンネルアクセスとACK送信に伴うオーバーヘッドを大幅に削減する手法 WiFi-Nano を提案している⁴⁾。WiFiの物理層の送信レートは当初の1Mbpsから1Gbps (IEEE802.11ac)まで速度が向上し、データ送信時間は1500バイトのパケットの場合12msから12 μ sとなり、1/1000となった。しかし、チャンネルアクセスとACK送信にかかるオーバーヘッドは依然として150 μ sのままである。従って、オーバーヘッドの占める割合が非常に大きくなっている。WiFi-Nanoはスロット時間を従来の9 μ sから800nsに減少させることで、このオーバーヘッドを大幅に減少させる。この短いスロット時間を用いると、バックオフタイマがゼロとなったノードが送信を開始する前に、既に送信しているノードのプリアンプルをスロット時間内に検出することができない。この問題に対し、WiFi-Nanoでは他ノードのプリアンプル検出に必要な時間の待ち合わせをすることなく、投機的にプリアンプルの送信を開始することで対処する。他ノードの送信の存在は、巧妙に設計されたラティスフィルタを用いた手法により、自身がプリアンプル送信中に検出する。さらにWiFi-Nanoでは、データフレーム受信後、SIFS時間待つことなくすぐにACKのプリアンプルを投機的に送信する。プリアンプルの送信中に平行して受信フレームのデコードとCRCチェックを行い、エラーが検出された場合にはプリアンプルの送信を中断する。WiFi-NanoはQualnetによるシミュレーションとDSP/FPGAベースのソフトウェア無線 (Lyretech Inc.によるSFF SDR) プラットフォームを用いて実測実験がなされており、最大100%のスループットの向上が得られている。

テキサス大オースチン校のグループはCollision-Resistant Multiple Access (CRMA) という周波数資源の共有のためのプロトコルを提案している⁵⁾。CRMAでは各送信機がOFDMの物理層サブチャンネルを共有する。送信するときには、これらのサブチャンネルのいくつかを選択してそれらに同じフレームの信号を送信する。同一のチャンネルに同じ時間に異なる送信機から送信された信号は、それらが重なり合った状態で受信されるが、各送信機がランダムに選択したチャンネルの組み合わせに関する情報 (=符号) とチャンネルひずみに関する情報を元に、連立方程式を解くことで復元可能である。このアプローチはCDMAが時間方向にPN符号を与えて送信信号との積を取っているものを、周波数方向に適用したものであり、また、ランダム線形ネットワークコーディングをチャンネル選択に適用したものとイえる。Qualnetによるシミュレーションでは、CSMA/CAのMACに比べて30%から50%の性能向上が確認されている。またGNU Radioを使ったテストベッドを用いて静止状態における実験評価が行われている。提案方式は、正確なチャンネル推定を必要とするので、通信環

境が変化しやすい移動環境での対応は課題が残るとされている。

5.3 その他の論文

5.3.1 Opportunistic 通信, DTN, VANET

Opportunisticのアプローチによるデータ通信の信頼性向上や、DTNに見られるリレーによるデータ転送は近年発表の多いテーマである。またそれらに関わりの深い車両間ネットワークに関する研究発表も行われた。ベストペーパーの論文も含め、今回は特に自動車関連が目立った。

無線ネットワークにおけるオーバーヒアは通信容量増加などに対する古典的な手法であるが、既存の手法ではパケットセントリックなヘッダとペイロードのオーバーヒアの利用が主流であった。これに対し、Wisconsin-Madison大のグループは、ContentセントリックなオーバーヒアをIP-layer redundancy elimination (RE)のアイデア (連続パケットのデータ重複を取り除いて送信し、受信クライアントはキャッシュデータを用いて復元する) を適用することで実現する方法を提案している⁶⁾。有線と異なり、無線ではキャッシュを保持しているかどうかは確かでないところがチャレンジの一つであり、これに対して低いオーバーヘッドでキャッシュの存在をトラックできる方法を考案しているところが本手法の特長である。結果として通常の無線転送より20%のグッドプット向上を実現している。

マサチューセッツ大アマースト校のグループによる“R3: Robust Replication Routing Wireless Networks with Diverse Connectivity”⁷⁾は、ルーティングプロトコルでより高性能 (低遅延) なのはMANETなのかDTNなのかというテーマを根拠とした論文である。そのような性能は当然ネットワークコネクティビティに依存するが、様々なコネクティビティが混在する環境ではどうなのかを追究している。パケット転送時に複製することでマルチパス効果による遅延軽減が期待できる一方で複製数は抑制したい。DieselNet (Vehicular DTN) などでのトレース解析では、2つのパスがあれば複製による「利得」は十分であることを示している。その知見を元に、opportunisticリンクも含めたリンク遅延推定をしながら2パスを決定するリンク状態ルーティングプロトコルR3を提案している。また、実遅延と推定遅延との乖離からネットワーク負荷を予測し、2パス (複製) か1パス (転送) かを切り替える仕組みも設計している。VANETテストベッド (DieselNet DTN) とメッシュネットワークによる実証実験を行っている点も強みである。

CMUとGMのグループはVANETの特長を生かした効率的な認証情報ブロードキャストアルゴリズムを発表した⁸⁾。VANETでは安全アプリケーションのために位置情報などをブロードキャストするが、現在のIEEE1609.2のセキュリティ規格では、改ざん防止のた

め各メッセージにデジタル署名を行うことを規定している。ただしこの場合には署名フラグディング攻撃が可能となり、そのような悪意のある大量の署名メッセージの検証のために計算リソースを浪費させられるといった脆弱性がある。また 400MHz のプロセッサで 1 メッセージの検証に 22ms 必要であるために、周辺車両から 10Hz で送出されるメッセージの検証処理は追いつかないといった懸念もある。これに対し、車両は 10Hz で位置情報を送出するため直近の将来に送出する位置情報は現在の場所から高い確率で網羅的に推測可能であるという知見に基づき、移動予測に基づく位置情報シーケンスから Chained Huffman Hash Tree を用いて検証用公開鍵を生成し、その期間に実際に受信するメッセージの高速な検証を可能とする。先に予測した位置情報シーケンスから検証用公開鍵を予め生成しておくというアイデアはユニークであり、VANET の特性に着目した興味深いアプローチであると言える。

5.3.2 無線ネットワーク

ベストペーパー候補となった CRMA と同じく、従来時間ドメインで行われていた処理を周波数ドメインに展開した研究が目立った。

デューク大、サウスカロライナ大のグループは、WiFi の MAC に、時間ドメインでの競合解決に替えて、OFDM サブキャリアを用いた周波数ドメインでの競合解決を導入した Back2F を提案している⁹⁾。既存の WiFi ではフレーム送信をランダム時間遅らせることでチャンネル競合を低減するが、バックオフの間はチャンネルが使用されず、効率が悪い。そこで、Back2F では、ランダムなバックオフ時間を選択する代わりに、OFDM サブキャリアを用いた周波数ドメインでの競合解決を導入する。ノードはランダムにサブキャリアを選択し、競合スロットにおいて同時に送信する。競合スロットを監視すると、各ノードが送信したサブキャリアがわかるので、もっとも優先度の高いサブキャリアを送信したノードが勝者となる。この仕組みを実現するには、送信している間も周囲の信号を受信する必要があるため、送信アンテナとは別に専用の受信アンテナが必要である。また、競合をさらに確実に解決するために、スロット競合に 2 段階で行うことや、一度の競合で複数のノードを優先順位づけし、TDMA に発展させること、また、複数のコリジョンドメインへの適用などが議論されている。

このようなサブキャリアレベルのオペレーションが現実的なのか気になるころであるが、USR/P/Gnuradio を用いた実験からサブキャリア検知性能を評価を行い、SNR 14dB で十分な性能が得られるとしている。また、テストベットの用いた評価から、Back2F は 802.11 に比べて衝突確率を大幅に改善でき、Skype のようなリアルタイムトラフィックで効果が

高いことを示している。このグループでは、ACM Hotnets 2010 でも発表している。また、OFDM サブキャリアを利用した周波数ドメインでの機構については、ACM Sigcomm 2010 でも MSRA のグループから発表があった。今後も展開のありそうな領域である。

UC リバーサイド、Wisconsin-Madison 大のグループは、OFDMA ベースの高密度フェムトセルの無線ネットワークにおける隣接フェムトセル間の干渉の影響を軽減するための手法 FERMI を提案した¹⁰⁾。FERMI では、隣接フェムトセルで互いに干渉しないように OFDMA のサブチャネルを集中制御によって割り当て、各フェムトセルではフレーム送信をそれぞれ独立して行うようにする。同手法はシミュレーションに加え、4 台セルの WiMAX テストベッド上にも実装され、従来のフェムトセル間でサブチャネルの調整を行わない方法に対しての性能向上が確認されている。

5.3.3 物理層技術

デモセッションでもソフトウェア無線実験プラットフォーム WARP を使ったデモを何件も出展して存在感を示していたライス大のグループは、“Beamforming on Mobile Devices: A first Study” という論文を発表した¹¹⁾。第一著者に代わって、ACM MobiSys 2011 の PC co-chair, Dr. Lin Zhong が登壇したこともあり、注目を集めた。この論文では、小型のモバイル機器にビームフォーミング技術を適用することの可否について議論し、十分現実的であることを示すとともに、消費電力の観点からも効果的であるとしている。また、ビームフォーミング技術を搭載したモバイル機器が多数存在する環境で、アップリンク容量の制約を維持しながらモバイルデバイス全体の消費電力を最小化する分散アルゴリズム BeamAdapt を提案している。

モバイルデバイスは、スモール・フォーム・ファクタ、回転や移動、バッテリー駆動といった特徴をもつ。これらの特徴から考えると、ビームフォーミング技術は、アンテナアレイのためのサイズ、絞られたビームパターン、電力消費量が多いといふように、モバイルデバイスの特徴とは相反する特徴を持つ。しかし、この論文では、これらひとつひとつの項目について、すでに技術的にモバイルデバイスにもビームフォーミング技術を適用できることを示している。例えば、機器の回転等についても、WARP Software radio を使用した実験から、10msec ごとに CSI 推定することで、対応できることを示している。さらに、モバイルデバイスからのアップリンクにビームフォーミング技術を適用した際に、消費電力とビームフォーミングのトレードオフについて議論し、BeamAdapt を提案している。WARP ベースのプロトタイプシステムを用いた実験から、受信 SNR を安定的に維持できること、スループットを維持しつつ、消費電力を削減できることを示している。会場からは、モバイルデ

バイスはセンサーリッチなので、それを使うことは考えられないかといった指摘があったが、センサーに頼るまでもなく、現状で、十分に高速なビームフォーミングが可能とのことだった。

MIT の Dina Katabi らは、無線リンクによりモバイルデバイスに映像を配信する際に、それぞれのモバイルデバイスのリンク品質に応じて、緩やかに映像品質が変化するような映像配信のためのクロスレイヤデザイン、SoftCast を発表した¹²⁾。既存の映像配信では、モバイルデバイスごとに異なるリンク品質に映像が適応できないため、個別配信せざるを得ず、スケーラビリティに欠ける。また、デジタル映像は配信品質に対して性能クリフが存在する。すなわち、ある伝送品質を境に、それ以上の受信品質では映像品質は高品質で一定であり、それ以下では視聴不能になるというように、映像品質が極端に変化する。これは現在の映像デジタル符号化ではピクセル値をビットに変換し、オリジナルのピクセル値が持つ数としての特徴をビットが破壊してしまうからである。例えば、わずかなビット誤りがピクセル値で大きな違いになってしまう。したがって、アナログ TV のように、伝送する値とピクセルの値の間に線形な関係が維持されるようにすることが重要である。線形な関係が維持されれば、伝送上な小さな伝送誤り (= 小さな値の変化) は、ピクセル値においても小さな変化である。ただし、アナログ TV では、圧縮も誤り訂正もできず、非効率的である。そこで、Softcast では、従来の映像コーデックでの映像符号化と物理層での誤り訂正符号の二つを、線形変換のみを用いて実現する。SoftCast では、複数の映像フレームを 3D DCT を用いて周波数ドメインに変換し、非ゼロの周波数値についてのみ伝送することで線形な映像圧縮を行う。また、既存の誤り訂正符号の代わりに伝送する値をスケーリングして伝送する。すなわち、意図的に増幅して伝送し、受信後に元にレベルに戻す操作を行う。物理層では QAM の I, Q で、リアル値を用いたコードワードで伝送することで、伝送する値とピクセル値の間の線形関係を維持する。評価では、USRP2 を利用したプロトタイプシステムを用いた評価実験から、単一の映像伝送が異なる品質で受信されると、それに見合った PSNR が得られることが示されている。また、発表では映像のデモンストレーションが見ることができた。

なお、SoftCast と同じセッションで、Katabi のネットワークコーディング関連研究の共著者だった現スタンフォード大の Katti らが同様のテーマで、FlexCast という別の手法を発表している¹³⁾。さらに、Katti のグループは同じセッションで、昨年の Mobicom で発表された全二重無線通信の発展版¹⁴⁾ を発表していた。

5.3.4 アプリケーション

Mobicom はモバイルコンピューティング系の全体をカバーする会議であるものの、アプ

リケーション系は強くないという印象を受ける。これは例年の傾向である。今回発表されたものでは、ベストペーパーとなった車室内の携帯電話の位置特定に関する研究の他、ジョージア工科大のグループの SmartVNC というスマートフォンから PC への遠隔操作をする汎用マクロの設計の提案¹⁵⁾、UC サンタバーバラのグループによる人体による無線 LAN AP からの電波減衰を利用して AP 位置を特定する試みなどがあったが、いずれも類似の研究がありそうであり、発展性にも疑問が残る。特に無線 LAN AP の位置特定の研究は、同様のアイディアに基づく研究が DICOMO2005 で発表されている¹⁷⁾。アプリケーション系に関しては、Ubicomp, Percom, Pervasive 等のユビキタス系の会議や MobiSys の方がよい論文が集まる傾向にあるだろう。

6. ワークショップ: VANET

VANET ワークショップは現在 Mobicom で併催されているワークショップのなかで最も歴史が長いものであり、Mobicom に参加する主目的が VANET に参加することであるという参加者も多い。今年の参加者は 45 名から 50 名程度であった。論文の投稿は全部で 25 編、うち 6 編のフルペーパー、2 編のポジションペーパー、1 編の実践系論文、6 編のポスター論文が採択された。会議の中心となっているのは、米 GM、トヨタ ITC、独メルセデスベンツ、BMW の自動車メーカーであり、発表論文著者の大半は米国かドイツの組織に属している。今回の会議プログラムには、通常論文発表、ポスターの他、1 件のキーノートが含まれていた。さらに、事前プログラムにはなかったパネルが企画された。

キーノートでは、Cisco の Vice President, Flavio Bonomi が “Connected Vehicles, the Internet of Things, and Fog Computing” と題し、クラウドとエンドデバイスに対する中間層としてシステムティックなコンピューティングとストレージの役割を担う Fog Computing について紹介した。Fog Computing による自動車向けのサービスとしては、ビデオ、ゲーム等のエンターテインメントのサポートのための CDN、キャッシング、トランスコーディングがあること、スマートグリッドへの応用があることが述べられた。また、シスコが中心となって取り組む移動体向けの IP モビリティ技術、LISP Mobile および、RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks) の路車間ネットワークへの適用について紹介が行われた。

パネルでは、VANET の中心人物である独カールスルーエ大の Hanns Hartenstein, GM の Fan Bai ら 5 人が登壇し、“With mobile apps, still a need for DSRC” と題した議論が行われた。さまざまアプリケーションをサポートする前提で DSRC は 10 年ぐらい研究開発

されてきたが、セルラーが台頭してきた現在、DSRCは正当化できるのかといった議論が行われた。この背景には、米国で広がっている、なかなか実用化が始まらないDSRCへの先行き不透明感やV2Vを含めてLTEでよいのではという議論など、DSRCへの逆風があると思われる。パネリストはVANETに参加しているメンバーが中心であり、概ねDSRC養護派のように見受けられた。局所性の高い安全系のデータをセルラに流すのは無駄が多い、安全を私企業のセルラー事業者にはゆだねられない、セルラーが繋がらないところでも事故は起こりうるなどの意見があり、DSRCは必要だという認識が示された一方で、安全系、エンターテイメント系、地図系を分けて考え、DSRCの適用範囲を絞るべきだとの考えも示された。

口頭発表のテクニカルセッションは“New Trends in VANETs”, “Safety Applications and Systems”, “Positioning and Practice”の3つのセッションが行われた。最初のセッションでは、無線機の物理的特性に基づく機器特定によるプライバシー問題の軽減方法¹⁸⁾、可視光通信¹⁹⁾、電気自動車の充電スケジューリング問題²⁰⁾といった新しい課題に関する論文が発表された。続く2つのセッションでは、安全系のシステムの実現に関する実用的研究が発表された。以前多く見られたマルチホップ系の発表はなく、実用化に向けた堅実な研究の傾向が見て取れた。

7. まとめ

モバイルコンピューティング関連のトップカンファレンス、ACM Mobicom 2011および併催ワークショップVANETの様子と主な論文について紹介した。モバイル、無線ネットワークに関わる日本の研究者は多いものの、残念ながら、これらの会議での日本からの発表数は非常に少ない。Mobicomには日本からは過去3編のみである。本報告が関連諸氏のMobicomチャレンジの一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Zhang, X. and Shin, K.G.: E-MiLi: Energy-Minimizing Idle Listening in Wireless Networks, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.205–216 (2011).
- 2) Yang, J., Sidhom, et al.: Detecting Driver Phone Use Leveraging Car Speakers, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.97–108 (2011).
- 3) Rayanchu, S., Shrivastava, V., et al.: FLUID: Improving Throughputs in Enterprise Wireless LANs through Flexible Channelization, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.1–12 (2011).

- 4) Magistretti, E., Chintalapudi, K.K., et al.: WiFi-Nano: Reclaiming WiFi Efficiency Through 800 ns Slots, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.37–48 (2011).
- 5) Li, T., Qiu, L. et al.: CRMA: Collision-Resistant Multiple Access, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.61–72 (2011).
- 6) Shen, S-H., Gember, A., et al.: Refactoring Content Overhearing to Improve Wireless Performance, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.217–228 (2011).
- 7) Tie, X, Venkataramani, A., et al.: R3: Robust Replication Routing Wireless Networks with Diverse Connectivity, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.181–192 (2011).
- 8) Hsiao, H-C., Studer, A., et al.: Flooding-Resilient Broadcast Authentication for VANETs, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.193–204 (2011).
- 9) Sen, S., Choudhury, R.R. and Nelakuditi, S.: No Time to Countdown: Migrating Backoff to the Frequency Domain, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.241–252 (2011).
- 10) Arslan, M.Y., Yoon, J., et al.: FERMI: A Femtocell Resource Management System for Interference Mitigation in OFDMA Networks, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.25–36 (2011).
- 11) Yu, H., Zhong, L., Sabharwal, A. and Kao, D.: Beamforming on Mobile Devices: A First Study, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.265–276 (2011).
- 12) Jakubczak, S. and Katabi, D.: A Cross-Layer Design for Scalable Mobile Video, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.289–300 (2011).
- 13) Aditya, S.T. and Katti, S.: FlexCast: Graceful Wireless Video Streaming, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.277–288 (2011).
- 14) Jain, M., Katti, S. et al.: Practical, Real-Time, Full Duplex Wireless, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.301–312 (2011).
- 15) Tsao, C.L, Kakumanu, S. and Sivakumar, R.: SmartVNC: An Effective Remote Computing Solution for Smartphones, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.13–24 (2011).
- 16) Zhang Z., Zhou, X., Zhang, W., et al.: I Am the Antenna: Accurate Outdoor AP Location Using Smartphones, Proc. ACM Mobicom 2011, pp.109–120 (2011).
- 17) 伊藤誠悟, 佐藤弘和, 河口信夫: 無線LANの電波強度分布類似度を用いた方向推定法, DICO2005, pp.549–552 (2005).
- 18) Haas, J.J., Hu, Y-C. and Laurenti, N.: Low-Cost Mitigation of Privacy Loss Due to Radiometric Identification, Proc. ACM VANET 2011, pp.31–40 (2011).
- 19) Liu, C., Sadeghi, B. and Knightly, E.W.: Enabling Vehicular Visible Light Communication (V2LC) Networks, Proc. ACM VANET 2011, pp.41–50 (2011).
- 20) Qin, H. and Zhang, W.: Charging Scheduling with Minimal Waiting in a Network of Electric Vehicles and Charging Stations, Proc. ACM VANET 2011, pp.51–60 (2011).