

MobiSys 2012 参加報告

樋口 雄大^{1,2}

概要：MobiSys (International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services) は、モバイルコンピューティングおよび無線通信システムをテーマとする ACM SIGMOBILE 主催の国際会議である。10 回目を迎える今年は、英国・湖水地方にて 2012 年 6 月 25 日～29 日の 5 日間の日程で開催され、スマートフォンを活用したシステムやアプリケーションを中心に、幅広いトピックで発表が行われた。本稿では、同会議の参加報告として、会議の様子と主な発表論文の概要を紹介する。

Report on MobiSys 2012 Conference

TAKAMASA HIGUCHI^{1,2}

Abstract: ACM MobiSys (International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services) is a premier international conference on the design, implementation, usage and evaluation of mobile computing and wireless systems. This year, the 10th MobiSys conference took place in Lake District, UK from June 25th to 29th, presenting a number of innovative research papers. This report briefly introduces the outline of the conference and the topics of some selected papers presented in the conference.

1. はじめに

MobiSys (International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services) は、モバイルコンピューティング分野における最難関国際会議の 1 つである MobiCom (International Conference on Mobile Computing and Networking) から派生した、モバイルシステムに関する国際会議である。本会議のスコープは、モバイルデバイスを活用したアプリケーションや無線通信システムの設計、実装および評価であり、センシング、位置・コンテキスト推定、データ管理、セキュリティなど、例年幅広いトピックで発表が行われている。スマートフォンの爆発的な普及を背景に、近年は、とりわけスマートフォンを対象としたサービスやアプリケーション、省電力化、通信トラフィックの軽減といったテーマが議論の中心になっている印象を受ける。

10 回目となる今年は、2012 年 6 月 25 日～29 日の 5 日間の日程で、英国・湖水地方にて開催された。会場の Low



図 1 MobiSys 2012 会場 (Low Wood Bay)

Wood Bay ホテルはウインダミア湖の湖畔に位置し、周辺には広大な牧草地が広がる。週末には多くのレジャー客で賑わう湖畔も、平日になると人影は疎らで、落ち着いた雰囲気の中、会議が行われた。前の週にあたる 6 月 18 日～22 日に、同じ英国のニューカッスルでパーベイシブコンピューティングに関する著名な国際会議 Pervasive 2012 (10th International Conference on Pervasive Computing) が開催されたこともあり、両方の会議に参加する研究者も数多く見られた。著者自身も、Pervasive にて、スマートフォン向け位置推定手法に関する論文を発表している [1]。

併催ワークショップおよびポスター・デモセッションを含めると参加者数は 200 名以上にもおよび、会議全体を通して、活発な議論が行われていた。参加者の比率は、米国

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Japan

² 日本学術振興会特別研究員 DC
JSPS Research Fellow

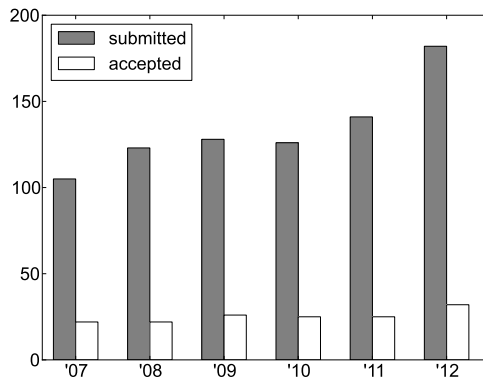


図2 投稿・採録論文数の推移

と欧州で全体の8割を占めており、UbiComp や Pervasive といったユビキタス系の国際会議と比較すると、やや日本人の参加者が少ない印象を受ける。

MobiSys への論文投稿数は過去5年間で大幅に増加しており、同会議への注目の高さがうかがえる(図2)。今年は過去10回の開催の中で最も多い182件の投稿があり、2～8名の査読者による慎重なレビューを経て、32件が採録された。採録率は18%であり、例年と同じく、狭き門となっている。

また、本年からの新しい試みとして、PCメンバーによる採録論文へのコメントが、パブリック・レビューとして MobiSys 2012 の WEB サイト上で公開されている(<http://reviews.mobisys2012.rice.edu/>)。また、同サイトでは、テクニカルセッションにおける質疑応答のダイジェストも閲覧でき、会場の雰囲気を感じ取ることができるようになっている。

2. 会議の構成

2.1 併催ワークショップ

本会議の前後には、以下の6つのワークショップが併催された。

- VANET 2012 (9th ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking, Systems, and Applications)
- HotPlanet 2012 (4th ACM International Workshop on Hot Topics in Planet-Scale Measurement)
- 1st ACM Workshop on Mobile systems for Computational Social Science
- MCS 2012 (3rd ACM Workshop on Mobile Cloud Computing and Services)
- Next Generation Mobile Computing for Dynamic Personalized Travel Planning
- Ph.D. Forum

ITS・車車間通信に関するワークショップである VANET

は、これまで MobiCom と併催されるのが慣例であったが、今年は MobiSys の併設ワークショップとして実施された。これにより、開催時期が例年より早まったが、11件のペーパー発表(投稿数は35件)と13件のポスター発表が行われ、50席程度の会場がほぼ満席になるなど、例年通り活気のあるワークショップとなった。Rutgers University の Marco Gruteser によるキーノート講演では、“A Mobile Systems Perspective on Vehicular Networks” というタイトルで、ITS とモバイルシステムとの効果的な連携に向けた取り組みが紹介された。スマートフォンを通じて個人のプライバシーを保護しながら交通量をモニタリングする手法[2]や、車載スピーカーと携帯電話端末のマイクを用いたサウンドベースの測距によって運転者と同乗者を自動的に識別し、運転中の着信を抑制するシステム[3]など、講演者が過去に取り組んできたプロジェクトを紹介し、次世代の自動車向けネットワークシステムの実現に向けた課題と今後の展望を、モバイルシステム分野の研究の観点から解説した。

2.2 キーノート

本会議の冒頭には、英国の国営医療サービス事業 NHS (National Health Service) の情報部門の最高技術責任者 Paul Jones 博士によるキーノート講演が行われた。同氏は、医療現場における現状と課題を明らかにするとともに、その解決に向けて情報通信技術が果たすべき役割とその可能性について、事例を挙げながら解説した。

2.3 パネルセッション

パネルセッションでは、Robin Kravets (UIUC), Landon Cox (Duke University), Eyal de Lara (University of Toronto), Romit Roy Choudhury (Duke University) の4名をパネリストとして迎え、“Your Mobile, Friend or Foe?” というテーマでディスカッションが行われた。セッションは、チェアの Albrecht Schmidt が以下の4つのサブテーマを提起し、パネリストがそれぞれの見解を述べた後、聴衆も議論に加わるというオープンな形式で進められた。

- Are we asking too much of our mobile phones?
- How can we use the data we can collect from mobile devices?
- Are mobile devices (not just phones) becoming too invasive?
- Is there truly *mobile* systems research or are just small PCs?

2.4 デモ・ポスターセッション

2日目のテクニカルセッション終了後、デモ・ポスターセッションが開催された。26件のデモ発表と15件のポス



図 3 デモ・ポスターセッションの様子

ター発表が行われ、テクニカルセッションと同様、活発な議論が交わされた。日本からは、九州大学・NTT ドコモの共同研究グループと、岩手県立大学から、それぞれポスター発表が 1 件ずつ行われた。個人的に特に目を引かれたのが、Rutgers University の研究グループによるタッチスクリーンデバイス向けの個人認証システム [4] のデモ^{*1}である。手指に装着するリング型のデバイス（トークン）をタブレット端末のタッチスクリーンにかざすと、トークンから電子的な信号が発信される。この信号には、実際に指先でスクリーンに触れたときと同様に、タッチスクリーンの表面の静電容量を変化させる効果があり、タブレット端末側には一連のタッチイベントとして認識される。タッチイベントの発生数やタイミングをもとに、トークンから送信されたビット列を復号することで、個人の識別と認証に必要な情報が得られる。タブレット端末の普及によって、1 台の端末を複数の人と共有する機会が増えているほか、クラウドサービスを介して、複数の端末から同一のアカウントを利用するような利用形態も一般的になっている。さらに、公共の情報インフラとして、パブリックディスプレイの活用も近年活発に検討が進められている。個人認証の手段としては NFC 等が有力であるが、広く普及するまでには至っていない。デバイスにソフトウェアをインストールするだけで利用できるこのアプローチは、手軽さや普及の容易さの点で優位性が高いと感じた。

3. テクニカルセッションの概要

シングルトラックで 8 つのセッションが開かれ、本会議の 3 日間で計 32 件の発表が行われた。本章では、テクニカルセッションにおける発表の中から、いくつかの主要な論文について概要を紹介する。

3.1 スマートフォン・アプリケーション

UCSB (カリフォルニア大学サンタバーバラ校) と Microsoft Research の共同研究グループは、スマートフォンを用いたモーションゲーム SwordFight [5] を提案している。スマートフォン端末を剣に見立てて、他のプレイヤーと

^{*1} オンラインでデモ動画が公開されている。
<http://youtu.be/xmK1jH7iTuU>

表 1 MobiSys 2012 プログラム

Day 1	8:30 — 17:00	Workshops
	14:00 — 17:00	Ph.D. Forum
Day 2	8:45 — 9:15	Opening Remarks
	9:15 — 10:30	Keynote
	11:00 — 12:30	Context & Applications
	14:00 — 15:30	Network I
	16:00 — 17:00	Panel Session
	18:00 — 20:00	Poster & Demos
Day 3	9:00 — 10:30	Systems
	11:00 — 12:30	Location
	14:00 — 15:30	Cellular
	16:00 — 17:30	Security
	17:30 — 18:15	Outrageous Opinions
	19:00 — 21:00	Banquet
Day 4	9:00 — 10:30	Sensing
	11:00 — 12:30	Network II
Day 5	8:30 — 17:00	Workshops

実際に体を動かしながら対戦することができ^{*2}、臨場感とゲーム性に優れたシステムとなっている。このシステムの中核をなす技術は、剣と剣の接触をリアルタイムに検出するための、端末間的高速かつ高精度な測距である。モバイル端末間の距離を高い精度で測定するためには、BeepBeep [6] など、音声ビーコンの到達遅延時間に基づく測距方式が有効である。しかし、従来の方式では、マイクの初期化、録音、トーン検出 (録音された音声进行分析し、音声ビーコンを受信した時刻を特定) などの処理を逐次的に行うため、1 回の測距に 1 秒程度の時間を要していた。一方、高速で移動する端末同士のコンタクトを確実に検出するためには、1 秒間に 10 回以上の頻度で測距を繰り返すことが求められる。そこで提案方式では、測距のためのプロセスをパイプライン化して録音と解析処理を同時並行で行うとともに、最も多くの計算時間を要するトーン検出処理を大幅に高速化している。従来、トーン検出は、テンプレート信号を時間的にスライドさせながら録音された音声との相互相関を算出し、その値が最大となる点をトーン位置として検出していた。この方法では、マッチングのウィンドウが移動するごとに、テンプレート信号の音声サンプル数 W に対して $O(W)$ の計算量が必要となり、100ms の音声の解析に 200ms もの時間を要してしまう。そこで提案方式では、トーンの中で同じ音声パターンを 2 度繰り返すことで信号に周期性を持たせ、相互相関よりも計算コストの小さい自己相関を用いてトーン位置を大まかに絞り込むことで高速化を図っている。自己相関は、前時刻のウィンドウに対する計算結果をもとに $O(1)$ 時間で高速に算出すること

^{*2} こちらも、オンラインでデモ動画を閲覧できる。
<http://www.youtube.com/watch?v=t1FbkuKj808>

ができるが、自己相関のピークと相互相関のピークには一般に微小なズレがある。そこで、自己相関がピークとなる点の近傍に対してのみ相互相関に基づくマッチングを適用することで高速性と精度を両立し、100ms 程度の遅延時間でおおよそ 2cm の測距精度を実現している。モバイル端末間の高精度な測距は、モーションゲームはもちろん、モバイルユーザ群の位置・コンテキスト推定においてもコアとなる技術の一つであり、今後、様々なアプリケーションでの活用が期待される。

Duke 大学と AT&T Labs のグループは、スマートフォンのソフトウェアキーボード上で文字を入力する際に発生する端末の微小な動きを加速度センサとジャイロ스코プで読み取ることで、ユーザがどのキーを入力したのかを高い精度で推定できることを示し、スマートフォンアプリケーションにおける潜在的なセキュリティの問題を指摘した [7]。加速度センサとジャイロの測定値に対して、時間領域・周波数領域のそれぞれで特徴量を定義し、機械学習によってキーの判別を行うことで、入力された英文を最大 80% 程度の高い精度で推論できる。一般的なスマートフォンでは、アプリケーションがモーションセンサを利用する際に特にユーザの許可を得ることは求められないほか、端末の向きに応じて画面の方向を切り替えるために、バックグラウンドでセンサが動作し続けている場合も多く、意外な盲点となっている。スマートフォンのセキュリティに関しては近年特に活発に議論が行われているが、本発表はこれまでにない斬新な切り口であり、会場においても多くの研究者の関心を集めていた。

3.2 省電力化技術

Microsoft Research の Suman Nath は、携帯電話端末を通じた継続的なコンテキストセンシングを目指して、コンテキスト間の依存関係に着目した省電力なコンテキスト推定ミドルウェア ACE (Acquisitional Context Engine) [8] を提案している。推定の対象となるユーザのコンテキストは、“歩行”、“運転”、“ジョギング”など加速度センサのみで検出可能なプリミティブなものから、“屋内にいる”、“一人である”、“会議中”など、GPS や WiFi、マイクといった多くのセンサを組み合わせることで推定を行う必要があるリッチなコンテキストまで、多岐に渡る。当然ながら、センシングに必要な消費電力も、検出したいコンテキストに応じて大きく異なる (表 2)。一般に、人間の行動には様々な制約があり、例えば、自宅にいながら車を運転することは物理的に不可能である。ACE では、こうしたコンテキスト間の依存関係に着目し、GPS など消費電力の大きいセンサを必要とするリッチなコンテキストを、低コストなコンテキストからの推論によって導くことで、大幅な省電力化を実現している。推論に必要なコンテキスト間の依存関係は、相関ルールマイニングによって、過去のコンテキ

スト推定結果の履歴の中から共通のパターンを見つけ出すことで、自動的に認識される。したがって、ユーザによって異なる推論ルールが構築される場合もあり得る。フィールド実験によって収集された 100 名近くの被験者のコンテキスト情報の履歴に対してルールマイニングを適用した結果、平均して 1 人あたり 44 通りの推論ルールが発見され、実際に人の行動には多くの相関性が存在することが確認されている。検出されたコンテキスト情報は一定期間キャッシュに保存され、他のコンテキストの推定に利用される。アプリケーションからコンテキスト情報が要求された時点で、キャッシュ内に存在するコンテキストをもとに必要な情報を推論できる場合には、新たにセンシングを行う必要はない。それ以外の場合にも、要求されたコンテキストを直接センシングする代わりに、低コストなコンテキストからの推論によって最小限の消費電力で必要な結果を導く。ここで問題となるのが、次に検出すべきコンテキストの選択である。例えば、“*IsDriving* → ¬ *AtHome*” という推論ルールがあったとしよう。*AtHome* の属性値 (*True* / *False*) を得るためには、よりコストの小さい *IsDriving* の属性値をセンシングすればよい。*IsDriving* = *True* であった場合には、*AtHome* = *False* という推論が成り立ち、コンテキスト推定が完了する。一方、*IsDriving* = *False* であった場合には、*IsDriving* のセンシングは無駄になってしまう。この条件の下で最適なセンシング対象を選択する問題は、NP 困難である。これに対し、ACE では、動的プログラミングによる最適化とヒューリスティックなアルゴリズムの 2 通りの方法を提案している。アルゴリズムの詳細については論文を参照されたい。確信度の高い推論ルールだけを用いることや、ルールの妥当性の検証を頻繁に行うことによって、推論の失敗は 4% 以内に抑えられている。また、コンテキストのキャッシングだけを行う単純な方式と比較して、消費電力をおおよそ 1/4 に軽減することが可能となっている。ユーザのコンテキストを省電力かつ継続的にセンシングし続けるための技術は、コンテキスト・ウェア・アプリケーションの実用性を高める上で欠かすことができない。今回の提案方式では、推定の対象が *True*, *False* で表される 2 値の属性値に限定されているが、コンテキスト間の依存関係に着目するというアイデアそのものは位置情報などその他の属性値にも応用可能であり、今後のさらなる発展が期待される。本論文は MobiSys 2012 の Best Paper に選出されている。

KAIST の研究グループは、多くの電力を必要とするセンシング処理 (GPS による測位や環境音の分析など) を近隣モバイル端末間で協調して行うことで、継続的な位置・コンテキスト・環境センシングを省電力に実現する協調センシングミドルウェア CoMon [9] を提案している。提案方式では、近隣ノード間で Bluetooth のコネクションを確立し、センシング結果を互いに共有することで、個々の端

表 2 コンテキスト推定と消費電力 [8]

Context	Sensors	Energy (mJ)
Walking, IsDriving, Jogging, IsSitting	Accelerometer (10 sec.)	259
AtHome, AtOffice	WiFi	605
Indoor	GPS + WiFi	1,985
Alone	Mic (10 sec.)	2,895
Meeting, Working	WiFi + Mic (10 sec.)	3,505

末によるセンシングの実行頻度の軽減を図っている。システムの設計にあたって、著者らはまず、米国労働省がインタビュー形式で収集した人々の 24 時間の行動履歴 (誰と何をしていたかの記録) [10] と、MIT に所属する 100 名の被験者が持つ携帯電話端末間で定期的に Bluetooth スキャンを実行することで収集された端末同士の近接性のログ [11] を詳細に分析することで、人が一日の多くの時間を家族や同僚といった知人と一緒に過ごしていることを明らかにしている。このことは、日常生活の中で近隣ノード間の“協調”の機会が豊富に存在することを意味する。また、この分析を通して、友人や家族といった知人同士や、過去に何度も近くに居合わせた人 (例えば、通勤時に同じバスに乗り合わせる人など) は、そうでない人々と比較して、より長い時間近くにいる傾向があることも示している。協調相手の探索やコネクションの確立にかかるオーバーヘッドを軽減するためには、協調相手と長い時間にわたって行動を共にし続けることが望ましい。上記の分析から得られた知見に基づき、CoMon では、ユーザによってシステムに登録された知人の端末や、過去一定の期間、頻繁に遭遇した端末を、優先的に協調相手として選択することで、協調の効率を高めている。また、ユーザに積極的に協調センシングに参加してもらうためには、協調によって片方のノードが一方的にメリットを享受するのではなく、協調に参加した双方のユーザにとって十分なインセンティブがあることが望ましい。センシングにかかる消費電力を軽減したいという要求は原則としてすべての端末に共通しているが、協調によって何を徳たいかという詳細なポリシーはユーザによって異なる。CoMon では、協調に参加する端末の間で、どちらの端末がどのセンシングを担当するかを交渉する仕組みが設けられており、動作中のアプリケーションや利用可能なセンサデバイス、ユーザのポリシーを考慮しながら、双方のノードがメリットを得られるように協調のプランが決定される。Android 端末を用いたフィールド実験を通して、ノード間の協調によって消費電力が大幅に軽減されることが確認されている。

Microsoft Research Asia の Liu らの研究グループは、WiFi テザリングの省電力化に取り組んでいる [12]。多くのスマートフォンがテザリング機能をサポートするようになり、携帯電話のコネクションを WiFi を通じて複数のデバイスで共有するという利用形態が広がってきているが、

テザリング中は端末の消費電力が大きくなるため、バッテリー残量が急速に低下する。発表の冒頭では、Nexus One による実測データが示され、テザリング中にはアイドル状態の消費電力が 20mW から 270mW へと大幅に増加し、トラフィックが流れていない時にも多くの電力が消費されていることが紹介された。一方、アプリケーションごとのパケット到着間隔を調べてみると、アプリケーションの利用時間全体の 70% 以上は、パケットの到着間隔が 200ms 以上となっており、アクセスポイントをスリープさせる機会は豊富に存在する。そこで、Liu らは、パケットロスを発生させることなくアクセスポイントを効率的にスリープさせるためのプロトコル DozyAP を提案している。アイドル時間が閾値を超えると、アクセスポイントはクライアントへスリープ要求を送信し、クライアントが要求に同意する応答メッセージを返答した場合に限り、一定時間スリープモードへ移行する。このプロトコルは非常にシンプルであるが、ノード間で時刻の同期が不要であるほか、スリープ要求や応答が届かなかったり、到着順序が入れ替わってしまったような場合にも、スリープに起因するパケットロスが一切発生しないという利点がある。この仕組みによって、アクセスポイントはアプリケーション利用時間のうち 11~88% の間スリープ状態へ移行し、端末の省電力が 3~37% 軽減されることが示されている。一方、スリープによって生じるネットワークのレイテンシの増加は 0.9%~5.1% と非常に小さく、ユーザが気付かない程度にまで抑えられている。

3.3 センシング

Nanyang Technological University の研究グループは、携帯電話による参加型センシングを通じて、バスが停留所に到着するまでの時間を低コストに見積もる手法を提案している [13]。到着時刻の予測にはバスが路線上のどの地点にいるかという 1 次元の情報があれば十分であるため、消費電力が大きい GPS の代わりに、走行中に乗客の端末から観測される携帯電話基地局の履歴を用いてバスの現在位置を推定している。まず、携帯電話端末のマイクを通じて、バスに備え付けの交通 IC カードリーダーから発せられるビーブ音を検出することにより、それぞれのユーザがバスに乗車中かどうかを判定する。次に、乗客の端末で観測された基地局集合の時系列データを、事前に収集したデータベースと照合することで、乗車中のバスの路線を特定する。問い合わせのあったバス停に到着するまでに経由するセル (同じ基地局集合が観測されるエリア) と、過去に同じ路線のバスが各セルを通過するのに要した時間の履歴から、バス停までの所要時間を見積もることができる。キャンパス間のシャトルバスにおける 7 週間にわたる実証実験によって、到着時間を平均 80 秒程度の誤差で予測できることが示されている。

3.4 モバイル端末向け位置推定技術

Duke University の Wang らのグループは、スマートフォンによるセンシングをもとに、屋内環境でインフラレスなトラッキングを実現する UnLoc と呼ばれる手法を提案している [14]. 屋内では、エレベータやエスカレータ、階段など、特徴的な加速度や磁場のパターンが検出される地点がいくつも存在する. UnLoc では、こうした特徴的なセンサ情報が観測される地点を仮想的な“ランドマーク”に見立て、これらの地点を通過するたびに、自律航法 (pedestrian dead reckoning; PDR) によって推定したユーザの歩行軌跡を補正することで、トラッキングの精度を高めている. ランドマークをもとにユーザの移動軌跡を補正するためには、ランドマークの正しい位置が分かっている必要がある. エレベータやエスカレータについては、フロアマップからその位置を知ることができる. このように、あらかじめ手動で設定されるランドマークは、Seed Landmark と呼ばれる. 建物内の複数の場所にエレベータが存在する場合など、センサのシグネチャは必ずしも建物全体で一意になるとは限らないが、ユーザ端末で観測される WiFi アクセスポイントの集合をシグネチャに含めることで、同じアクセスポイント集合が観測されるエリア内でシグネチャが一意になってさえいれば、センシング結果からランドマークを一意に特定することが可能となっている. ランドマークの数が多いほど、ユーザの歩行軌跡を補正する機会も増えるため、精度の向上が期待できるが、フロアマップをもとに設定できる Seed Landmark の数には限りがある. そこで UnLoc では、ユーザ端末で収集されたセンシング結果から、特定の地点でのみ観測される特徴的なセンサシグネチャを抽出し、システムが自動的に新たなランドマーク (Organic Landmark) を構成する. Organic Landmark の位置は、既存のランドマークによって補正したユーザの歩行軌跡をもとに推定される. 複数のユーザが同一の Organic Landmark を検知した場合には、すべてのユーザの歩行軌跡を考慮してランドマークの位置が再計算される. このように、時間の経過に伴ってユーザ群のセンサ情報と歩行軌跡が集まるにつれ、ランドマークの数が徐々に増加すると共に、新しく構成された Organic Landmark の位置情報の精度も高まっていく. 電子機器の前を通過する際に観測される磁場の歪みや、冷水機で水を飲む時の特徴的な加速度のパターン、廊下の曲がり角で局所的に他の場所とは異なる WiFi アクセスポイントの集合が観測される場合など、それぞれの地点に特有の性質を持ってさえいれば、どのようなセンサシグネチャでもランドマークとして利用することができる. 著者らが大学の建物内やショッピングモールで実施した実証実験では、1 人のユーザが建物内を 2 時間歩きまわるだけでおよそ 30 箇所のランドマークが検出され、トラッキングの中央値誤差は 1.69m に抑えられている.

Johns Hopkins University と Microsoft Research の共同研究グループは、FM 放送波と WiFi のフィンガープリントを組み合わせた高精度な屋内向け測位手法を提案している [15]. 屋内環境におけるモバイル端末の測位には WiFi の受信電波強度に基づく方式が広く利用されているが、2.4 GHz/5GHz 帯を用いる WiFi の無線信号の特性上、室内の物の配置や周囲の人の体による影響を受けやすく、十分な測位精度が得られない場合も多い. また、商用の WiFi アクセスポイントの中には、スループット向上のために周波数ホッピングなどの最適化を行なっているものがあり、利用される周波数チャネルによって観測される RSSI が変動する場合がある. さらに、WiFi の受信電波強度は時間の経過によっても大きく変化するほか、壁などで信号が遮られる地下や駐車場といった場所では、WiFi アクセスポイントが 1 つも観測できず、測位が行えないこともある. そこで提案方式では、FM 放送波のフィンガープリントを併用することによって、従来の WiFi 測位の弱点を補っている. FM 放送波は WiFi に比べて低い周波数帯を利用して (米国の場合 87.8~108MHz)、人体や障害物の影響を受けにくく、受信状況が場所ごとに比較的安定している. また、壁や天井を透過しやすい性質を持つため、屋内の広いエリアをカバーできるという利点がある. FM 放送波のフィンガープリントに基づく測位技術は以前から検討が行われてきたが、そのほとんどは屋外を対象としている [16]. 数百 km 離れた場所から高出力で送信される FM 放送波は、互いに近い地点間では信号の受信状況にほとんど違いが表れず、数十 m 単位の粗い粒度でしか位置を特定できなかった. 一方、FM 放送波のフィンガープリントの屋内測位への応用については、意外なことに、これまでほとんど検討されていない. 屋内では、建物の構造が信号の伝搬に影響するため、屋外とは異なり、場所によって受信状況が大きくばらつく. 著者らは、オフィスビルにおける実証実験の結果から、FM 放送波のフィンガープリントを単独で用いて測位を行った場合でも、WiFi ベースの測位と同等の精度が得られ、3 フロアにまたがる 119 の部屋を 87% (WiFi の場合は 88%) の精度で識別できることを示している. RSSI に加えて、シグナルノイズ比 (SNR) やマルチパスインジケータ、周波数オフセットインジケータといった物理層の詳細情報をフィンガープリントに含めると、精度は 91% まで向上する. さらに、FM ベースの測位と WiFi ベースの測位による位置推定誤差は互いに独立であることから、これらのフィンガープリントを組み合わせることで、さらなる精度向上が可能である. 両方のフィンガープリントを併用した場合には、98% という高い精度で部屋単位の識別が実現される. FM 受信モジュールの消費電力は WiFi と比べておよそ 1/20 と小さいため、消費電力の観点から見ると、少ないコストで効果的に精度向上を図ることができる. ただし、フィンガープリントに

基づく測位手法には、測位のために事前に膨大な学習データが必要になるという共通の課題がある。WiFi 測位向けには、フィンガープリントを自動的に構成する手法 [17] などとも提案されている。こうしたアプローチを参考にしつつ、事前学習のコストをいかに軽減できるかが、今後の課題になってくると考えられる。

Duke University の Sen らの研究グループは、従来 WiFi 測位で用いられてきた RSSI ではなく、より詳細な物理層の情報をもとにシグネチャを構成することで、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ の“スポット”単位の位置認識を実現している [18]。現在市販されている無線カードの中には、RSSI に加えて OFDM のサブキャリア毎のチャネル品質を表す周波数応答を取得できるものがある。数 m 移動しないと値が変化しない RSSI とは異なり、周波数応答は位置が数 cm 移動しただけでも大きく変化するため、周波数応答をもとに WiFi フィンガープリントを構成することで、従来に比べてはるかに細かい粒度で位置を特定することが可能になる。同一地点であっても、時間の経過に伴って周波数応答はランダムに変化するが、長時間にわたって周波数応答を計測し続けると、いくつかのクラスタが表れる。提案方式では、こうした周波数応答のクラスタを地点ごとのシグネチャとして記録し、機械学習アルゴリズムによって事前に学習した位置への分類を行なっている。著者らは、異なるシグネチャを持つそれぞれの位置をピクセル (pixel) と呼んでおり、スポットと区別している。シグネチャは $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ の小さな領域であり、1つのスポットは多数のピクセルから構成される。事前学習フェーズでは、WiFi 受信モジュール (Intel 5300) を搭載した自走式ロボットがスポット周辺をランダムに巡回し、ロボットが通過した経路上のピクセルでシグネチャが収集される (すべてのピクセルを網羅する必要はない)。こうして、各スポットに対して、そのスポット内で収集されたシグネチャの集合が対応付けられる。測位フェーズでは、まず WiFi アクセスポイントの SSID に基づいて大まかな位置を絞り込み、その中から、観測された周波数応答と最もよくマッチするクラスタを含むシグネチャを見つけ出す。このシグネチャに対応するピクセルが属するスポットが、ユーザの現在位置として検出される。このとき、複数のアクセスポイントから一定の期間内に収集されたすべてパケットに対してこのプロセスを繰り返し、多数決によって最終的な推定結果を決定することで、精度を高めている。大学の学生センターや食堂といった混雑した場所で実験を行い、平均 90% という高い精度でスポットを認識できることが示されている。こうした高精度なスポット測位は、日常生活の中で様々な応用が期待される。例えば、店舗において売り場の周辺にスポットを配置しておけば、売り場の前で立ち止まって購入を迷っている顧客に対して自動的にクーポンをプッシュ配信するといったサービスが可能である。 1m の精度があれば、隣り合って配置された

商品のどちらに興味を示しているのかといった詳細な情報まで知ることができる。また、通路の両端にスポットを配置すれば、ユーザがどの通路にいるのかを識別することも可能である。従来のフィンガープリントベースの測位手法は、建物全体にわたってくまなくシグネチャを収集することを想定しているものが多いが、上記のようなアプリケーションでは、検出したいスポットの周辺のみでシグネチャを収集すれば十分である。物理層の情報を用いることで測位精度を飛躍的に高めるというアプローチそのものもさることながら、“スポット測位”という形で、手法のメリットを最大限に活かす動機づけを行なっている点が非常に興味深い。

4. おわりに

本稿では、MobiSys 2012 国際会議の概要と、主要な発表論文を紹介した。システム系の会議ということもあり、提案システムのプロトタイプを Android や Windows Phone といった携帯電話プラットフォーム上に実装し、実証実験によって有効性を検証している論文がほとんどである。斬新な課題設定とアプローチで今後の発展が期待される研究が高く評価されており、既存の枠組みにとらわれない柔軟な発想が求められていると感じる。

本報告が、今後の皆様のご研究に少しでもお役に立てれば幸いである。

参考文献

- [1] Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Clearing a Crowd: Cotext-Supported Neighbor Positioning for People-Centric Navigation, *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Computing (Pervasive '12)*, pp. 325–342 (2012).
- [2] Hoh, B., Gruteser, M., Herring, R., Ban, J., Work, D., Herrera, J.-C., Bayen, A. M., Annavaram, M. and Jacobson, Q.: Virtual trip lines for distributed privacy-preserving traffic monitoring, *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '08)*, pp. 15–28 (2008).
- [3] Yang, J., Sidhom, S., Chandrasekaran, G., Vu, T., Liu, H., Cecan, N., Chen, Y., Gruteser, M. and Martin, R. P.: Detecting driver phone use leveraging car speakers, *Proceedings of the 17th annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '11)*, pp. 97–108 (2011).
- [4] Vu, T., Ashok, A., Baid, A., Gruteser, M., Howard, R., Lindqvist, J., Spasojevic, P. and Walling, J.: Demo: user identification and authentication with capacitive touch communication, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 483–484 (2012).
- [5] Zhang, Z., Chu, D., Chen, X. and Moscibroda, T.: SwordFight: enabling a new class of phone-to-phone action games on commodity phones, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 1–14 (2012).
- [6] Peng, C., Shen, G., Zhang, Y., Li, Y. and Tan, K.: Beep-

- Beep: A High Accuracy Acoustic Ranging System using COTS Mobile Devices, *Proceedings of the 5th ACM conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '07)*, pp. 1–14 (2007).
- [7] Miluzzo, E., Varshavsky, A., Balakrishnan, S. and Choudhury, R. R.: Tappints: your finger taps have fingerprints, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 323–336 (2012).
- [8] Nath, S.: ACE: exploiting correlation for energy-efficient and continuous context sensing, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 29–42 (2012).
- [9] Lee, Y., Ju, Y., Min, C., Kang, S., Hwang, I. and Song, J.: CoMon: cooperative ambience monitoring platform with continuity and benefit awareness, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 43–56 (2012).
- [10] United States Department of Labor: American Time Use Survey, [Online]. Available: <http://www.bls.gov/tus>.
- [11] Eagle, N. and (Sandy) Pentland, A.: Reality mining: sensing complex social systems, *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 10, No. 4, pp. 255–268 (2006).
- [12] Han, H., Liu, Y., Shen, G., Zhang, Y. and Li, Q.: DozyAP: power-efficient Wi-Fi tethering, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 421–434 (2012).
- [13] Zhou, P., Zheng, Y. and Li, M.: How long to wait?: predicting bus arrival time with mobile phone based participatory sensing, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 379–392 (2012).
- [14] Wang, H., Sen, S., Elgohary, A., Farid, M., Youssef, M. and Choudhury, R. R.: No need to war-drive: unsupervised indoor localization, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 197–210 (2012).
- [15] Chen, Y., Lymberopoulos, D., Liu, J. and Priyantha, B.: FM-based indoor localization, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 169–182 (2012).
- [16] Krumm, J., Cermak, G. and Horvitz, E.: RightSPOT: A Novel Sense of Location for a Smart Personal Object, *Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '03)*, pp. 36–43 (2003).
- [17] Chintalapudi, K., Padmanabha Iyer, A. and Padmanabhan, V. N.: Indoor localization without the pain, *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '10)*, pp. 173–184 (2010).
- [18] Sen, S., Radunovic, B., Choudhury, R. R. and Minka, T.: You are facing the Mona Lisa: spot localization using PHY layer information, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*, pp. 183–196 (2012).