

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12019

研究課題名（和文）快適度と省エネルギーを両立する低コストアドオン型BEMSの実現技術

研究課題名（英文）A Challenge for Low-Cost Building Management System Pursuing Human Comfort and Energy-efficiency

研究代表者

山口 弘純（Yamaguchi, Hirozumi）

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：80314409

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、オフィスや公共空間の照明や空調の省エネルギー化を、高価なビルエネルギー管理システム（BEMS）に頼ることなく、モバイル機器で低コストに実現する技術の創出に挑戦している。温湿度と行動センシングにより個人の快適度の常時把握を実現する。これにより、快適度・行動・環境・電力データを間欠的かつ低コストでクラウドサーバに集約するシステムを設計している。また、網羅的なシミュレーションデータを併用することで、それらの低コストセンシングデータから、快適性を損なわない空調制御を予測する手法についても実施している。

研究成果の概要（英文）：This project focuses on the technology to realize low-cost management of lighting and air-conditioning in rooms leveraging mobile sensing devices. Sensing indoor temperature, humidity and behavior of residents in the rooms is used to estimate their comfort levels. The sensed data is aggregated at a cloud server to do such estimation and management.

研究分野：モバイルコンピューティング

キーワード：センシング 行動把握 BEMS 空調制御

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所の長期停止や火力発電用燃料費の高騰、景気上昇による需要増などにより、電力需給の更なるひっ迫が予想される。特にオフィスビルや商業施設におけるエネルギー消費の約 70%を占める照明や空調の省エネ化は喫緊の課題である。東京都では、東京都電力対策緊急プログラムに基づき事業所などでの節電を実施しており、大震災発生年である 2011 年度はピーク電力を約 18%削減した。このとき東京都がオフィスビル等に対して実施したアンケートによれば、温度や空調時間の適正管理やこまめな消灯がオフィス居室や共用部（廊下や休憩場所、駐車場など）で実施され効果を上げたことが分かっており、特に前年度は実施割合 3 割であった執務室空調の 28 設定が当該年度は 7 割で実施され、照度設定は 750 ルクス程度から 500 ルクス程度が主流となった。一方で、「空調の設定温度を 28 にすると実際の室温は 28 を上回ってしまう。快適性を少しでも確保するため、実際の室温が 28 となるよう定期的に確認しきめ細かな室温管理を行った」など人の労力に頼る空調制御が実施されていたり、「何を対策すればどの位使用電力が削減できるかの経験値がなく、やれる箇所をしらみつぶしにやらざるを得なかった」など快適性を極限まで犠牲にして省エネ化を図った事例などが読み取れる。また、「節電のために投資する場合もその投資額を抑制し、比較的短期に回収できることが必要」といったように、厳しい経済状況で省エネルギーにかけるといった投資額にも費用対効果が求められていることもうかがえる。

2. 研究の目的

本研究では、オフィスや公共空間における照明や空調の省エネ化を、ビルトインされた BEMS とは異なる枠組みとコンセプトで実現することを目指す。パーソナルセンシング技術を活用し、個人快適度と個人環境（周辺温湿度や照度）のセンシングと位置把握技術から快適度を推定する技術、ならびに快適度・環境・行動・消費電力のクラウド集約を行う。これらをもとに、室内において快適度と省エネルギーを両立する低コスト・アドオン型エネルギー管理システム (EMS) の道筋を探る。

3. 研究の方法

家屋内の家電や電子機器をネットワークに接続し、居住者の挙動をセンシングし管理することで、利用者に対してより快適な環境を提供するホームネットワーク技術が普及段階を迎えている。加えて近年では、時間帯ごとの電気料金と機器の稼働量の組み合わせから、利用者の負担を最小限にしながら省

エネルギー化に貢献する手法など、人とエネルギーのベストミックスを追求する研究も始まりつつある。これらの傾向はエネルギー消費量が大きいビルなどの大規模建築物に対しても同様であり、例えば一般的なオフィスビルにおける消費電力の約 7 割は空調及び照明機器に起因することから、執務者の不在に応じ、適切な照明と空調を提供することで電力消費の削減を把握するタスク・アンビエントな照明空調システムの開発も進められている。これらにより、ビルの照明空調にかかる総消費電力のうち少なくとも 10%程度の削減が見込めることが知られている。これらのビルエネルギー管理システム (Building Energy Management System, BEMS) では、インフラ設備として固定設置された温湿度計や風量計、CO₂ 計などをもとに換気や温湿度調整を行うが、それらの設備型センサは設置位置や設置数に大きく影響を受ける。設置数が少なければ屋内空間内に死角が発生し、また通路や広場の中央付近では、温度をはじめとする環境情報の正確な取得は難しい。そのため既存の BEMS では、オフィスビルの居住者や商業施設の来訪者の「快適性」を真に表していない場合が多い。にもかかわらず、ビル管理者はそれらをもとに感覚的あるいは画一的な温度設定で空調設備を制御せざるを得ず、過剰な冷暖房などエネルギー損失や快適度損失につながる可能性が指摘されている。さらに、駅地下街や商業施設のレストラン街などでは、多くの人々が来訪することによる人体が発する熱や飲食店舗の熱調理による放射熱の増加などにより歩行者の周辺温度は上昇する可能性があり、体感的快適性の実現はさらに困難となる。

人々の快適度を表す指標として、デンマーク工科大の Fange により定義された温熱環境評価指数 PMV (Predicted Mean Vote) が知られており、これを用いて快適度を測定あるいは推定する方法も提案されている。PMV は熱的快適度のことであり、4 つの環境的要素（室温、平均放射温度、相対湿度および平均風速）と 2 つの人体的要素（着衣量および作業量）に対する被験者の温冷感の 7 段階の主観評価に基づき設定された指標である。PMV は設備設計を始めとする様々な分野で活用されているが、数値の導出において前述の 6 要素の情報が必要であり、それらは設置型センサに依存するため、前述と同様な課題がある。また、既存の PMV 計測機器は非常に高価であり、広い公共空間全体を把握するためにはコストが非常に大きいのが現状である。簡潔な計算式や低コストで取得できる情報から PMV を推定することで、設置型センサ数を減らしながら PMV 値を推定する方法もあるが、それをはじめとした多くの既存手法では、人々による混雑や設置型センサの位置が快適度に与える影響を考慮しきれていないのが現状である。一般に混雑した場合、その集団内に存在する人周辺の空気温度は壁や床

面の空気温度に比べ上昇し、また天井面は熱された空気が集まりやすいため、最も温度が高くなる傾向にある。こういったことから設置型センサの位置に依存した温度差が生じ、快適性を正しく取得することができない。

これに対し、本研究開発では、人々の活動による放熱量をその人周辺の混雑状況から推定し、体感的な快適度を表す PMV に反映する方法を提案する。提案手法では、対象環境における施設設置型センサから得た温湿度情報と、所属する研究グループが開発しているスマートフォンを用いた混雑度推定情報を用いて、混雑発生時に対応した PMV を正しく推定する手法を構築する。流体解析シミュレーションを用いて、歩行者周辺の混雑度と温熱環境との関係性を調査し、その結果から既存研究において取得が困難である歩行者周辺の空気温度を、室内機が測定した吸気温度と混雑度情報から推定する予測モデルを構築している。これにより空間温度を推定し、それを用いて PMV 推定を行う。公共空間における着衣量推定と、商業施設などの公共空間における歩行量に基づく活動量想定により、PMV の推定に従来必要であった 6 つの環境要素の削減や簡易化を実現している。その結果、比較的取得が容易である外気温度 t_{out} [], 湿度 RH[%], 吸気温度 t_{intake} [] および、スマートフォンのセンサデータから推定可能な混雑密度 d_c [人/m³] を用いた PMV 推定を可能としている。これにより、最低限設備側に設置されている固定型温湿度センサに加え来訪者のスマートフォンから混雑推定に必要な加速度データを提供してもらうことで、精度が高い PMV 推定が可能となる。また、7 名の被験者による、個室を用いた実証実験を実施し、流体解析シミュレーションから作成した流入空気温度と歩行者周辺の混雑情報から周辺空気温度を導出するモデルの妥当性検証を実施した。加えて、実施施設内で実験を行い、PMV 計を使い取得した実 PMV 値と、床面に設置した温湿度センサ値ならびに空間内の人口密度から推定する提案手法の PMV 値を比較検証し、本研究の PMV 推定手法の妥当性検証を実施している。

これらの手法に基づき、スマートフォンを用いた PMV センシングシステムを設計している。同システムでは、推定した混雑情報や PMV をクラウドサーバーに集約し、それをユーザにフィードバックすることで、各ユーザが屋内環境全体の混雑度や PMV を把握できる。また、施設管理者側はそれらの情報から空調制御を最適化できる利点がある。

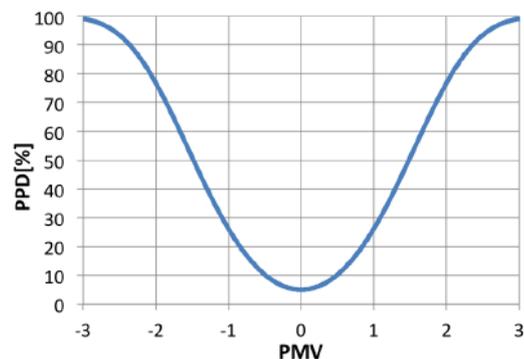
4. 研究成果

PMV (Predicted Mean Vote) は予測平均温冷感申告とよばれる。デンマーク工科大学の Fanger 教授によって提唱されており、1984 年には ISO 7730 として国際標準化されている。PMV は+3 から-3 の範囲で、温熱環境に

対し不満足あるいは不快と感じる人の割合を元に設定される数値であり、下表に示される定義となる。

PMV	温冷感
+3	暑い (hot)
+2	暖かい (warm)
+1	やや暖かい (slightly warm)
0	中立 (neutral)
-1	やや涼しい (slightly cool)
-2	涼しい (cool)
-3	寒い (cold)

PMV が 0 の温熱環境は最も快適であり、対象者の 95%が満足し、 ± 0.5 では 90%が満足する。その温熱環境に不満足あるいは不快さを感じる人の割合は PPD (Predicted Percentage Dissatisfied, 予測不快者率) とよばれる PPD と PMV の関係を下図に示す。



人間の温熱感覚に影響を与える熱平衡における熱収支は、外部環境(気温、放射温度、気流、および湿度)ならびに人的要因(着衣量、および活動量)の 6 要素で決定される。PMV は人体と等価な熱収支モデルから式を算出し、統計実験における人間の温感と結びつけて定義している。ISO における PMV の熱収支モデルを以下に示す。

PMV

$$\begin{aligned}
 &= (0.303 \times e^{-0.03 \times M} + 0.028) \times [(M - W) \\
 &\quad - 3.05 \times 10^{-3} \times \{5733 - 6.99 \times (M - W) - p_a\} \\
 &\quad - 0.42 \times \{(M - W) - 58.15\} \\
 &\quad - 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) \\
 &\quad - 0.0014 \times M \times (34 - t_a) \\
 &\quad - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times \{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \\
 &\quad - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)] \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、M は活動量 (W/m²), W は外部への仕事 (W/m²), $|c|$ は着衣量 (m² · /W), f_{cl} は着衣表面積割増率, t_a は気温 (), t_r は放射温度 (), V_a は気流速 (m/s), p_a は水蒸気圧 (Pa), h_c は対流熱伝導率 (W/ m² ·), t_{cl} は着衣表面温度 (°C) である。詳細は成果を参照されたいが、同式といくつかの仮定、前

提より提案手法では以下の式を導いており、この簡易化された式より PMV を推定する。

$$PMV = 1.90 + 1.79 \times 10^{-4} p_a + 5.03 \times 10^{-3} t_a - 1.53 \times 10^{-9} f_{cl} \times \{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} - 3.86 \times 10^{-2} \times f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)$$

次に、日常的に多数の来訪者で混雑するショッピングモール、商業施設や地下街などを対象としたセンシングシステムを開発している。それらの来訪者の一部がシステムに参加するユーザであり、かつウェアラブル温湿度計やスマートフォン温度計を有していることを前提としているが、施設内の設置型温湿度計からの快適度推定もあわせて行っている。また、屋内空間の快適度推定であることから、風量は常に 1[m/s] 以下であると仮定する。また提案手法では、既存の PMV 推定に対し、来訪者による混雑度を加味することで、より現実に近い快適度を推定する方法を提案する。したがって、既存の PMV 影響要因の他に、混雑情報をリアルタイムに取得する混雑情報に関しては、我々の研究グループにおいてスマートフォンによる混雑度推定技術を開発しており、それにしたがって混雑度を低、中、高のカテゴリに分類する。提案システムは、壁に設置された温湿度センサなどの固定型センサおよび周辺状況をセンシングするクライアントと、センシングされた情報を集約するサーバから構成される。クライアントは室内の温度・湿度および外気温の情報を一定時間ごとにサーバに送信し、一定時間ごとに周辺混雑度分析を行う。加えて移動クライアント上では、Wi-Fi 電波強度による位置推定を行うとともに、ジャイロ・地磁気・加速度センサの情報による PDR を組み合わせた位置推定を行う。各時刻における環境情報・位置情報・混雑情報を携帯電話または WiFi ネットワークを通じて定期的にサーバへ送信するものとする。

サーバ上では、クライアント群から収集したローカルな環境情報・混雑情報から各地点に対して提案手法による PMV 推定を行う。最終的に得られた PMV 値はマップ上に反映され、来訪者や施設管理者にフィードバックされる。これにより空調制御への利用や商業施設のマーケティングの活用が期待できる。

屋内環境において Android 端末(Nexus 5) を用いたデータ収集を実施した。端末上では、提案手法のアルゴリズムを実装したアプリケーションを動作させ、環境音情報から混雑度を推定し、また、WiFi 電波強度や加速度センサ情報から位置推定を実施した。推定した混雑度情報および位置情報は、サーバ上に送信される。サーバ上では Android 端末から得られた情報と音湿度センサからの情報を用いて PMV 値の推定を行い、最終的にはマップ上に PMV 値の可視化を行う。体感する PMV の真値は、下図左の DeltaOHM 社 HD32.3 センサを持ちながら歩行して計測した。このセ

ンサは、黒球温湿度プローブや、熱線プローブなどを接続し、輻射温度や風速などを測定することで正確な PMV 値を測定し記録することができる。HD32.3 で測定すると同時に、我々の研究グループで開発している下図右のモバイルセンサを携帯し読み取った。



(a) WBGT 指数-PMV 値計
HD32.3



(b) モバイルセンサ
SENSIRION SHT1X

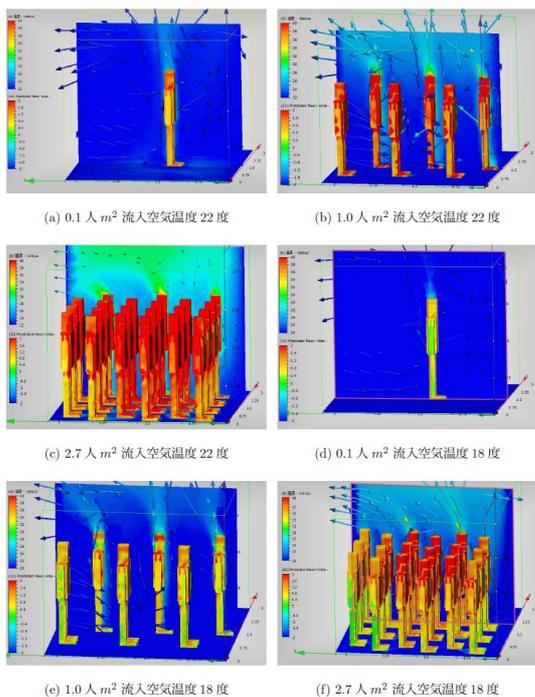
位置推定の精度を調査するため、予め Android 端末(Nexus 5) を用いてフィンガープリント情報を収集し、そのフロア内を被験者 2 名が計 10 分程度の自由な歩行を行った各地点での推定位置誤差は平均 6.5[m]、標準偏差 4.1[m] であった。平均 6.5[m] の推定位置誤差はやや大きいですが、今回対象とする屋内空間や実施条件を考えた場合には十分であると考える。

本実験で PMV および PPD 推定を実施した際に、これらの快適度への影響しうる項目として、壁際と歩行者周辺での空気温度 t_a [] の異なりが存在した。フィールド実験では、壁際に設置されたセンサからの情報と歩行者周辺の温度情報を、様々な場所において約 3 時間取得し比較したところ、歩行者周辺の温度は、壁際の温度に比べ、平均約 1.5 低下していることを確認した。この壁際と移動経路上の温度測定誤差が与える影響に関して、温度差 1.5 における PPD 値への影響を調べた。これによると、他の快適度要因が保持された状態で、1.5 の温度変化が生じた場合、PPD 値は最大 17%の上昇が考えられる。これは、約 6 人に 1 人の割合で不満を感じる人が増加することを表す。

以上より本研究では、快適な空間を設計するためには、壁際の温度計だけでは不十分であり、温度測定可能なモバイル測定器を導入し、歩行者周辺の温度を正しく取得することで、より正確に快適な空間を設計できることがわかった。

次に混雑密度が温度に与える影響を数値化するため、流体力学を用いたシミュレーションを行った。使用したソフトウェアは、数値流体力学(CFD) によるシミュレーション解析が可能な Autodesk 社の Simulation CFD 2015 であり、PMV 推定を行うための設定項目が存在する。シミュレーションでは、屋内空間での廊下を想定し、横幅 3[m]、奥行き 3[m]、高さ 2.5[m] の空間で、前面と背面をそれぞれ空気の流入面と排気面とした。上面と下面と側面 2 つの計 4 つの壁面は、実際の環境で

はその外側にある部屋や屋外の温度や壁面の断熱性によって熱交換が生じるが、シミュレーションでは完全に断熱させる。下図にシミュレーション結果を示す。



図より、頭部周辺と天井周辺の平均温度は、壁面と同様に混雑によって上昇していることがわかる。また、頭部周辺の温度と天井周辺の温度について、それぞれ上昇幅は混雑度のみ依存しており、流入空気温度 t_{in} [] (18度と22度)は影響していないと考えられる。歩行者周辺空気温度の増加量 th [] と、天井周辺温度増加量 tc [] は、式(13)のようにそれぞれ混雑密度 d_c [人/m²] のべき乗関数で近似できる。本研究開発ではその関数を用いたPMV推定を行っており、また7名の被験者による個室での実験も行っている。これらについては成果論文[2]などを参照されたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)のうち、査読有(論文誌・国際会議録)計8件/査読無(研究報告・全国大会等)計3件

- [1] 三浦太樹, 濱谷尚志, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 下田吉之, 人の温熱快適性に配慮した空調制御の改善に関する検討と実証, 情報処理学会第79回全国大会講演集, 2017年3月(査読無)
- [2] Masao Chiguchi, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino and Yoshiyuki Shimoda, Human Thermal Comfort Estimation in Indoor Space by Crowd Sensing, Proceedings of International Workshop on SmartBuildings2016 (SmartBuilding2016),

- pp. 45-50, November 2016 (査読有)
- [3] 三浦太樹, 濱谷尚志, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 下田吉之, 在室者への温熱快適性把握のための室温予測手法と実証に向けた取り組み, 電子情報通信学会技術研究報告, pp. 1-8, 2016年11月 (MoNA研究会) (査読無)
- [4] Keita Nakahara, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino, In-home Activity and Micro-motion Logging Using Mobile Robot with Kinect, Proceedings of the International Workshop On Mobile Ubiquitous Systems, Infrastructures, Communications, And Applications (MUSICAL2016), pp. 106-111, November 2016 (査読有)
- [5] 三浦太樹, 濱谷尚志, 山口弘純, 東野輝夫, 下田吉之, 在室者の温熱快適性把握のためのスポット室温予測手法, 情報処理学会第24回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 66-75, 2016年10月(査読有)
- [6] 三浦太樹, 濱谷尚志, 山口弘純, 東野輝夫, 下田吉之, 流体シミュレーションデータセットに基づく屋内環境の温熱快適性推定に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, pp. 1-6, 2016年3月 (MoNA研究会) (査読無)
- [7] K.Yasumoto, H.Yamaguchi and H. Shigeno, Survey of Real-time Processing Technologies of IoT Data Streams, Journal of Information Processing (IPSJ), Vol. 24, No. 2, pp. 195-202, 2016(査読有・招待論文)
- [8] Takamasa Higuchi, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino, Trajectory identification based on spatio-temporal proximity patterns between mobile phones, Wireless Networks (Springer), Vol. 22, No. 2, pp. 563-577, 2016 (査読有)
- [9] 高藤巧, 藤田和久, 樋口雄大, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 下條真司, トラッキングスキャナとモーションセンサを用いた高精度屋内位置推定手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 353-365, 2016(査読有)
- [10] Takamasa Higuchi, Hiroki Iwahashi, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino, TweetGlue: Leveraging a Crowd Tracking Infrastructure for Mobile Social Augmented Reality, Proceedings of the 11th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC2015), pp. 1030-1035, August 2015 (査読有)
- [11] Kenji Yoi, Hirozumi Yamaguchi, Akihito Hiromori, Akira Uchiyama, Teruo Higashino, Naohisa Yanagiya, Toshikazu Nakatani, Atsuo Tachibana and Teruyuki Hasegawa, Multi-dimensional Sensor Data Aggregator for Adaptive Network

Management in M2M Communications, Proceedings of the 14th IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM2015), pp. 1047-1052, May 2015 (査読有)

〔学会発表〕(計9件)

- [1] 三浦太樹, 人の温熱快適性に配慮した空調制御の改善に関する検討と実証, 情報処理学会第79回全国大会 3S-02, 2017年3月17日, 愛知県名古屋市
- [2] Hirozumi Yamaguchi, Human Thermal Comfort Estimation in Indoor Space by Crowd Sensing, International Workshop on SmartBuildings 2016年11月6日, シドニー, オーストラリア
- [3] 三浦太樹, 在室者への温熱快適性把握のための室温予測手法と実証に向けた取り組み, 電子情報通信学会 MoNA 研究会, 2016年11月17日, 鹿児島県霧島市
- [4] Keita Nakahara, In-home Activity and Micro-motion Logging Using Mobile Robot with Kinect, International Workshop On Mobile Ubiquitous Systems, Infrastructures, Communications, And Applications (MUSICAL2016), 2016年11月30日, 広島県広島市
- [5] 三浦太樹, 在室者の温熱快適性把握のためのスポット室温予測手法, 情報処理学会第24回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, 2016年10月21日, 秋田県仙北市
- [6] 山口弘純, ヒューマンセントリック BEMS と信頼性コンピューティング・ネットワーク技術, 電子情報通信学会 2016年ソサイエティ大会企画セッション, 2016年09月22日, 北海道札幌市(招待講演)
- [7] 三浦太樹, 流体シミュレーションデータセットに基づく屋内環境の温熱快適性推定に関する検討, 電子情報通信学会 MoNA 研究会, 2016年3月1日, 東京都新宿区
- [8] Takamasa Higuchi, TweetGlue: Leveraging a Crowd Tracking Infrastructure for Mobile Social Augmented Reality, 11th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC2015), 2015年8月25日, ドゥブロヴニク・クロアチア
- [9] Kenji Yoi, Multi-dimensional Sensor Data Aggregator for Adaptive Network Management in M2M Communications, 14th IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM2015), 2015年5月14日, オタワ, カナダ

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 弘純 (YAMAGUCHI, Hirozumi)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80314409