



占有センサの特性評価方法に関する研究の調査結果を報告

ベンジャミン・フィーギン Jr.、マイケル・ポブラウスキー

米パシフィックノースウエスト国立研究所の研究者らは、コネクテッド照明での利用を目的とした、さまざまな屋内占有センサの評価方法に関する研究を調査し、実装によってより良い結果を得るために性能評価を行う方法に関する推奨事項を示した。

コネクテッド照明システムの主要な特長の1つは、センサからデータを収集して、そのデータを他の照明システムやビルシステムと共有する能力である。占有センサは、ビルの省エネ対策の一環として広く導入されているが、そうしたセンサの性能のテスト方法については、詳しく説明する文献がほとんど存在せず、比較的洗練されていない状態にある。その結果、ビル内の占有センサの性能を予測することは難しく、実際のところ、省エネ効果という観点において、期待に応えられていない場合も多い。満足のいく成果が得られない理由としては、基盤技術の限界、誤った構成、室内における配置が不適切であるなど、さまざまな要因が挙げられる。誤検出や検出漏れ(人がいるのにいないと判定したり、いないのにいると判定したりすること)などの問題や、特定の状況に適した方法でセンサが作動しないことに不満を感じる占有者によって、センサが取り外されたり無効にされたりする場合もある。

これまで、占有センサを配備する主な目的は、存在をはじめとするより有用な占有情報(カウント、位置、軌跡、アイデンティティなど)ではなく、動きを検出することだった。実を言えば、動きは存在の一部の側面であり、センサの性能に不満を抱く占有者は、セン

サの機能を損ない、得られるかもしれない省エネ効果を放棄してしまっている。市場には、よりうまく存在を検出し、より価値の高い占有情報も検出できる可能性のある、新しい技術が次々と登場している。しかし、照明とビル業界には、そうした新しい技術を特性評価するための新しいより良い方法が必要である。それがあれば、設計者や仕様定義者は、自信をもってそれらの技術を指定することができる。

そこで、米パシフィックノースウエスト国立研究所(Pacific Northwest National Laboratory: PNNL)は、いくつかの占有センサの性能を特性評価するためのテスト方法について、詳しく記述している文献と、限定目的のテスト方法を含む研究論文の調査を行った。屋内空間におけるセンサ性能を特性評価するための最良の方法を特定して確立すること、そして、新しい技術や製品を評価する上で補足が必要かもしれないテスト漏れが存在しないかを確認することが、その目的である。この調査に基づき、屋内環境を対象とする占有センサを特性評価するためのテスト方法に関する推奨事項を作成した。本稿では、これらの推奨事項について、それらの項目が必要だと考えるに筆者らが至った背景や理由とともに紹介する。

現状

「占有」「存在」「動き」という語は広く使われており、同義語として使われる場合もある。「占有」と「存在」は一般的に、非常によく似た状況を指して用いられる。すなわち、定義された空間が何らかの対象物(人間、動物、自動車、自転車など)によって占有されていること、あるいは、対象物がその空間に存在することを表す。動きは単純に、対象物の物理的位置の変化のことである。

ビルに現在導入されているほとんどの占有センサにおいて、安価で簡単に入手できるパッシブ赤外線(passive infrared: PIR)センサが、動きの検出に利用されている。動きという語が占有の同義語として使われるようになったのはそのためである。対象とするパラメータを直接検出または測定する代わりに、それに関連する何かを検出または測定するというのは、多くの一般的なセンサに共通する特徴である。特定パラメータの実際の状態は、「グラウンドトゥルース」(ground truth)と呼ばれ、センサのエラーは、体系的なもの、ランダムなもの、誤判定、何らかの誤った推論による結果を含めて、このグラウンドトゥルースの検出に失敗することを意味する。

筆者らの調査では、空間に入ったか、空間を離れたか、空間にとどまっているかにかかわらず、空間内の対象物を検出するすべての方法に対して、「占有」という語を使用した。存在は、占有の最も基本的な側面であると一般的

にみなされており、省エネ対策では最も一般的に参照される側面である。例えば、室内に誰も存在しなければ、照明を消灯し、サーモスタットを切る必要がある (<https://bit.ly/2R0hnC4>)。

過去の研究に、占有の属性を体系的に分類することを試みたものがあった。チアゴ・テイシェイラ氏(Thiago Teixeira)が2010年に執筆した技術レポートには、筆者らも関与している。このレポートでは、占有センサの性能を表すための5つの「低レベルの時空間属性」(存在、カウント、位置、軌跡、アイデンティティ)を定めるとともに、それまでの手法に基づいて、5つの存在状態(大きな動き、軽微な動き、手の動き、静止、不在)も定めている。

詳しく文書化されているテスト方法の中に、5つすべての時空間属性を評価し、5つすべての存在状態を刺激として印加できるものは見つからなかった。占有の少なくとも1つの時空間属性を評価することを目的に、センサの能力を特性評価する方法が、完全に(あるいはほぼ完全に)記述されている既存文献は、2件しか見つからなかった。Lighting Research Center (LRC)のマニクシア(Maniccia)とデイビス(Davis)による「Occupancy Sensors: Motion Sensors for Lighting Control」と、NEMA Standards Publication WD 7-2011 (R2016: Occupancy Motion Sensors Standard)である。どちらも標準化されておらず、市場で十分に採用されている状態にもない。また、どちらの方法も、障害物(壁や障壁など)が性能に与える影響はとらえられない。その上、動き以外を検出するセンサの特性評価を行う能力や、PIとR以外の技術(室内の壁からの反射を利用して性能を上げることができる、超音波など)を評価する能力において、どちらのテスト方法にも重大な制約がある。

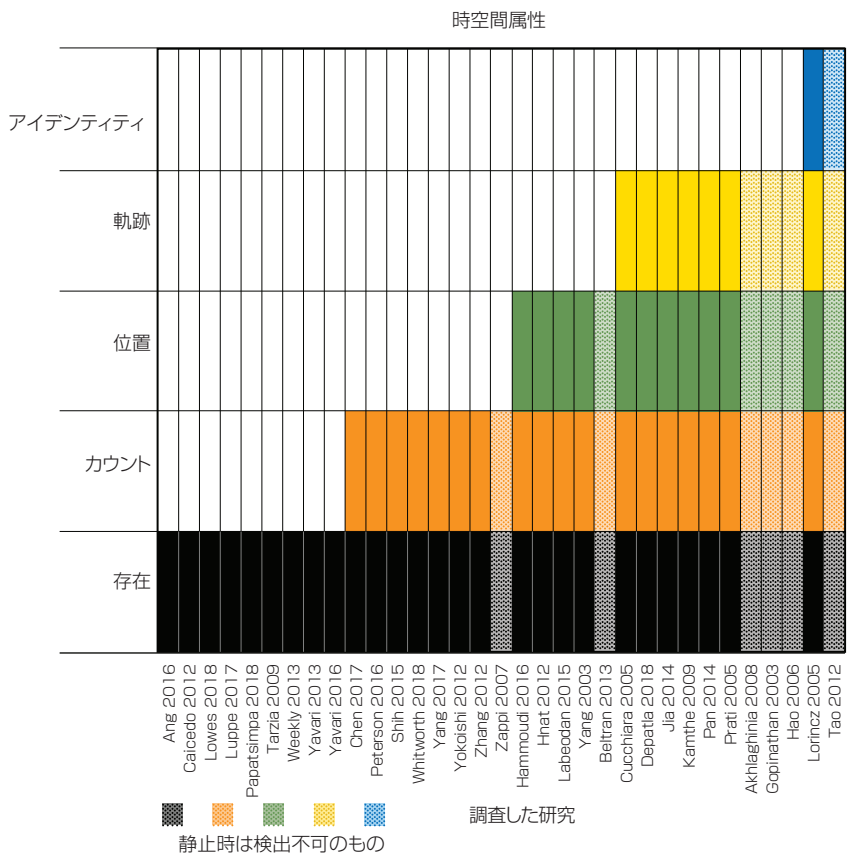


図1 5つの時空間属性を対象に、限定目的のテスト方法を含む研究を調査した。IR技術を利用する、ほとんどのセンサまたはセンサシステムは、刺激生成源が静止したままである場合に、PIRセンサは存在を検出できないこと(検出漏れ)が多い。存在が検出されない場合、存在以外の時空間属性時空間属性を検出する能力の評価は不可能である。高レベルの属性を検出する能力は、それよりも低レベルの属性がまず正しく検出できるかどうかにかかわらず依存するためである。(画像提供: PNNL)

より有効なテスト方法を探すために、過去20年の間に発表された、1つ以上の種類の占有センサの性能を特性評価するためのテスト方法を含む、学術論文やその他のレポートの調査と分析を行った。占有センサの性能を特性評価するための限定目的のテスト方法について記述された、合計33件の研究を調査した。各研究で採用されているテスト方法を、それが評価する時空間属性に基づいて分類し、主要または独自のテスト条件をメモした。省エネを目的とする場合は、存在を適切に検出する能力が特に重要となるため、その能力の評価方法に特に注意を払った。具体

的には、5つの存在状態候補のうちのどれをシミュレーションするかに基づいて、存在のテスト条件を分類した。

今回調査した研究は、すべてを総合すると、6種類の異なるセンサ技術(可視光、赤外線[IR]、産業科学医療用[ISM]バンドの無線周波数、その他の無線周波数、機械式、空気質)を網羅するものになった。センサシステム(複数のセンサで構成されるシステム)を評価した研究の中には、同一または類似のセンサのアレイを利用するものもあれば、異なるセンシング技術に基づくセンサを利用するものもあった。27件の研究は、1つの技術に基づくセン

サまたはセンサシステムを評価したもので、複数のセンサ技術の組み合わせを対象とした研究は6件のみだった。赤外線センサを評価した研究が最も多く、13件だった。

32件の研究で、LRCとNEMAの方法よりも踏み込んだ独自のテスト条件が設けられていた。LRCとNEMAの方法はどちらも、扉や家具などの障害物がないオープンな空間に単一のセンサを設置し、1人の人間または1つのロボットアームを刺激生成源として使用することによって、そのセンサを評価するように設計されている。16件の研究は、複数のセンサで構成されたセンサシステムを評価するもので、8件で出入り口や廊下、9件で閉じた空間が使用されている。また、障害物として家具を使用するものは10件、それ以外の障害物を使用するものは10件だった。20件の研究に、複数の人間またはロボットによって同時にセンサまたはセンサシステムに刺激を与えるというテスト条件が設けられていた。

調査したすべての研究を、評価対象である5つの時空間属性に基づいて分類した。図1はその結果を示している。存在を検出する能力のみを評価したものが最も多く、9件だった。カウント検出能力を評価した研究は8件、位置は5件、軌跡は9件、アイデンティティは2件だった。IR技術を利用するセンサまたはセンサシステムを対象としたすべての研究において、刺激生成源が静止したままである場合に、PIRセンサは存在を検出できないこと(検出漏れ)が多いという結果が示されていた。その場合、存在が検出されないため、存在以外の時空間属性を検出する能力の評価は、定義上不可能である。高レベルの属性を検出する能力は、それよりも低レベルの属性がまず正しく検出で

きるかどうか依存するためである。33件の研究のうちの6件で、存在が検出できなければ、存在以外の時空間属性は検出できなかった。

今後に向けた道すじ

今回調査した文献のほとんどが、特定の占有センサ技術を特性評価するための限定目的のテスト方法を示すものだった。それぞれにおいて、さまざまな種類の独自のテスト条件が設けられていた。占有状態の検出を対象に、ますます多くの技術が、単体または他の技術と組み合わせられて、開発及び改変されており、存在以外の時空間属性の判定においても、ますます成果を上げている状況を見ると、より有効かつ複製可能で、詳しく文書化されたテスト方法の開発が必要だと思われる。そこで、筆者らは屋内環境を対象とした占有センサの特性評価を行うためのテスト方法の要件として、以下の項目を提案する。

- ・5つの時空間属性(存在、カウント、位置、軌跡、アイデンティティ)を評価すること
- ・5つの存在状態(大きな動き、軽微な動き、手の動き、静止、不在)を評価すること
- ・人間、または、独自の特殊な装置を必要としない十分に定義・校正された手段を使用して、占有の5つの時空間属性と5つの存在状態を確立すること
- ・複数のセンサで構成されるセンサシステムに対応できるように、構成上の柔軟性を備えること
- ・定義されたサイズの空間を使用すること
- ・簡単に再現可能で独自の特殊な装置を必要としない、障害物刺激を使用すること

- ・既知の弱点に基づく、偽刺激源を使用すること
- ・テスト対象のセンサシステムよりも明らかに高い精度を備えた手段を用いて、グラウンドトゥールスを定義すること

革新的な占有センサが、これまでのものよりも性能が改善されているとして市場に投入され、中には複数のセンシング技術が組み合わせられたものも存在するが、実際に広く導入される状態にはまだ至っていない。技術に依存せず、さまざまな実装に対して再現可能な結果を生成し、詳しく文書化されたテスト方法が存在しないことが、新しい占有センサの商業的成功を阻む障害となっている。過去の製品で満足する結果が得られなかったユーザーや仕様定義者は、新しい製品で再度挑戦しようという気にならない場合が多いためである。

現在、米国の商業ビルのうち、占有センサが導入されているのは、わずか6~10%と推定される。それらによるエネルギー削減量は、合計で年間約0.1クアッドで、削減可能な量のうちのほんのわずかにすぎない(米エネルギー省によるエネルギー削減予測の詳細については、2019年12月の調査結果を報告した、<https://bit.ly/2UQgi0T>の記事を参照のこと)。用途に適した形でユーザーの期待に沿うように規定・設計された占有センサは、より高いエネルギー削減効果を発揮し、投資回収期間も短くなると考えられる。高い性能を示す製品を正確に特定し、対象用途に適した形で製品を規定できるように支援するテスト方法が考案されれば、コストのかかる大がかりな試行錯誤の実験を行わなければならないという障害が取り除かれ、センサの導入とエネルギーの削減が促進される可能性がある。

参考文献

- (1) M. Javad Akhlaghinia et al., "Occupant behaviour prediction in ambient intelligence computing environment," *J. Uncertain Syst.*, Vol. 2, No. 2, 85-100 (2008).
- (2) I. Bastian Arief Ang et al., "Human Occupancy Recognition with Multivariate Ambient Sensors," 2016 IEEE PerCom Workshops, doi:10.1109/percomw.2016.7457116 (2016).
- (3) A. Beltran et al., "ThermoSense: Occupancy Thermal Based Sensing for HVAC Control," *Proc. Build. Sys.* 13, doi:10.1145/2528282.2528301 (2013).
- (4) D. Caicedo and A. Pandharipande, "Ultrasonic array sensor for indoor presence detection," 2012 Proc. EUSIPCO, Bucharest, 175-179 (2012).
- (5) Z. Chen et al., "Building Occupancy Estimation with Environmental Sensors via CDBLSTM," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 64, No. 12, 9549-9559, doi:10.1109/tie.2017.2711530 (2017).
- (6) R. Cucchiara, "T_Park: Ambient Intelligence for Security in Public Parks," *IEE Seminar Intell. Build. Environ.*, doi:10.1049/ic:20050242 (2005).
- (7) S. Depatla and Y. Mostofi, "Passive Crowd Speed Estimation and Head Counting Using WiFi," 2018 SECON, doi:10.1109/sahcn.2018.8397119 (2018).
- (8) U. Gopinathan et al., "Coded Apertures for Efficient Pyroelectric Motion Tracking," *Opt. Express*, Vol. 11, No. 18, 2142-2152, doi:10.1364/oe.11.002142 (2003).
- (9) K. Hammoudi et al., "Developing A Vision-Based Adaptive Parking Space Management System," *Int. J. Sens. Wireless Comm. Control*, Vol. 6, No. 3, 192-200, doi:10.2174/2210327906666160518120212 (2016).
- (10) Q. Hao et al., "Human Tracking With Wireless Distributed Pyroelectric Sensors," *IEEE Sens. J.*, Vol. 6, No. 6, 1683-1696, doi:10.1109/jsen.2006.884562 (2006).
- (11) T.W. Hnat et al., "Doorjamb: Unobtrusive Room-level Tracking of People in Homes using Doorway Sensors," *Proc. SenSys* 12, doi:10.1145/2426656.2426687 (2012).
- (12) L. Jia and R.J. Radke, "Using Time-of-Flight Measurements for Privacy-Preserving Tracking in a Smart Room," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, Vol. 10, No. 1, 689-696, doi:10.1109/tii.2013.2251892 (2014).
- (13) A. Kamthe et al., "SCOPES: Smart Cameras Object Position Estimation System," *Lecture Notes in Comp. Sci. Wireless Sens. Networks*, 279-295, doi:10.1007/978-3-642-00224-3_18 (2009).
- (14) T. Labeodan et al., "Occupancy Measurement in Commercial Office Buildings for Demand-Driven Control Applications-A Survey and Detection System Evaluation," *Energy Build.*, Vol. 93, 303-314, doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.028 (2015).
- (15) K. Lorincz and M. Welsh, "MoteTrack: A Robust, Decentralized Approach to RF-Based Location Tracking," *Location- and Context- Awareness Lecture Notes in Comp. Sci.*, 63-82, doi:10.1007/11426646_7 (2005).
- (16) T. Lowes, "High Efficacy, Multi-Functional Solid-State Lighting Platform," US Department of Energy Office of Science and Technology Technical Report, doi:10.2172/1434906 (2018).
- (17) C. Luppe and A. Shabani, "Towards Reliable Intelligent Occupancy Detection for Smart Building Applications," 2017 IEEE CCECE, doi:10.1109/ccece.2017.7946831 (2017).
- (18) S. Pan et al., "BOES: Building Occupancy Estimation system using Sparse Ambient Vibration Monitoring," *SPIE Smart Struct. Mater. Nondestruct. Eval. Health. Monit. Diagn.*, 906110-906110 (2014).
- (19) C. Papatsimpa and J.p.m.g. Linnartz, "Propagating Sensor Uncertainty to Better Infer Office Occupancy in Smart Building Control," *Energy Build.*, Vol. 179, 73-82, doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.039 (2018).
- (20) S. Petersen et al., "Establishing an Image-Based Ground Truth for Validation of Sensor Data-Based Room Occupancy Detection," *Energy Build.*, Vol. 130, 787-793, doi:10.1016/j.enbuild.2016.09.009 (2016).
- (21) A. Prati et al., "An Integrated Multi-Modal Sensor Network for Video Surveillance," *Proc. VSSN* 05, doi:10.1145/1099396.1099415 (2005).
- (22) O. Shih and A. Rowe, "Occupancy Estimation Using Ultrasonic Chirps," *Proc. ICCPS* 15, doi:10.1145/2735960.2735969 (2015).
- (23) S. Tao et al., "Person Authentication and Activities Analysis in an Office Environment Using a Sensor Network," *Comm. Comp. Info. Sci. Constructing Ambient Intell.*, 119-127, doi:10.1007/978-3-642-31479-7_19 (2012).
- (24) S.P. Tarzia et al., "Sonar-Based Measurement of User Presence and Attention," *Proc. Ubicomp* 09, doi:10.1145/1620545.1620559 (2009).
- (25) K. Weekly et al., "Low-Cost Coarse Airborne Particulate Matter Sensing for Indoor Occupancy Detection," 2013 IEEE CASE, doi:10.1109/coase.2013.6653970 (2013).
- (26) A. Whitworth et al., "Unambiguous Determination of Oscillation Frequency for Multiple Objects Using Quadrature Doppler Radar," 2018 APMC, doi:10.23919/apmc.2018.8617122 (2018).
- (27) Yang et al., "Counting People in Crowds with a Real-Time Network of Simple Image Sensors," *Proc. 9th IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*, doi:10.1109/iccv.2003.1238325 (2003).
- (28) Y. Yang et al., "CeilingSee: Device-Free Occupancy Inference through Lighting Infrastructure Based LED Sensing," 2017 IEEE PerCom, doi:10.1109/percom.2017.7917871 (2017).
- (29) E. Yavari et al., "Doppler Radar Sensor for Occupancy Monitoring," 2013 IEEE WiSNet, doi:10.1109/wisnet.2013.6488651 (2013).
- (30) E. Yavari et al., "Occupancy Detection Using Radar Noise Floor," 2016 IEEE/ACES ICWITS and ACES, doi:10.1109/ropaces.2016.7465363 (2016).
- (31) T. Yokoishi et al., "Room Occupancy Determination with Particle Filtering of Networked Pyroelectric Infrared (PIR) Sensor Data," 2012 IEEE Sens., doi:10.1109/icsens.2012.6411114 (2012).
- (32) P. Zappi et al., "Enhancing the Spatial Resolution of Presence Detection in a PIR Based Wireless Surveillance Network," 2007 IEEE Conf. Adv. Video Signal Based Surveill., doi:10.1109/avss.2007.4425326 (2007).
- (33) X. Zhang et al., "Water Filling: Unsupervised People Counting via Vertical Kinect Sensor," 2012 IEEE 9th Int. Conf. Adv. Video Signal Based Surveill., doi:10.1109/avss.2012.82 (2012).

著者紹介

ベンジャミン・フィーギン Jr. (BENJAMIN FEAGIN, JR.) とマイケル・ポプラウスキー (MICHAEL POPLAWSKI) は、米パシフィックノースウエスト国立研究所 (Pacific Northwest National Laboratory: PNNL) 勤務。両氏の研究活動は、米エネルギー省 (Department of Energy: DOE) の照明 R&D プログラム (Lighting R&D Program) によって主に支援されており、新しい照明技術のさまざまな側面の特性評価に焦点を当てている。URL: <https://www.pnnl.gov/>