

# 設置位置の自動推定機能を備えたポータブル人感センサーシステム

志垣 沙衣子<sup>1,a)</sup> 廣森 聡仁<sup>1,b)</sup> 山口 弘純<sup>1,c)</sup> 東野 輝夫<sup>1,d)</sup>

概要：居住者の位置行動に応じて照明空調制御や行動推薦などの様々な家庭内サービスを提供するスマートホームが徐々に普及しつつある。一方で、そのようなスマートホーム機能を有さない大多数の既存家屋に対して同様の機能を導入する場合、家屋への埋め込み設置工事等が不要なポータブル型の人感センサーなどがコストの観点からも有効である。しかし、それらの設置位置を決定するためには、家屋の空間的な詳細情報（障害物の有無等）を考慮した設置位置の調整作業ならびにセンサー位置登録作業を行う必要がある。これらは特に高齢者などにとって煩雑であるため、センサーを適当に配置するだけでそれらの作業が完了することが望ましい。そこで本稿では、このポータブル人感センサーを家屋内に設置し、その反応データのみを用いて人感センサーの設置位置関係を自動推定するシステムを提案する。

## 1. はじめに

消費電力センサーをはじめとする各種センサーとそれらを繋ぐネットワーク、また家電その他の設備機器を自動制御する技術を家庭内に導入し、より豊かで快適な暮らしを可能にするスマートホームは、近年の環境問題や省エネルギーへの関心を背景に普及しつつある。特に省エネルギーについては喫緊の課題であり、家庭内の家電の制御を行うHEMS (Home Energy Management System) とスマートグリッドの連携によるデマンドレスポンスなど、様々な取り組みがなされている。また、近年は居住者の行動を把握し、照明空調制御や行動推薦などを行う技術やシステムも研究開発されつつある [1]。

家庭内での居住者の行動推定については、今までにも様々な手法が研究されている [6], [7]。文献 [6] では、居住者に加速度センサーを装着し、ドアや窓の開け閉めや植物の水遣りといった行動を推定する手法を提案している。しかしこれらは装着型または可搬型の端末を前提としているため、居住者に負担を強いる可能性が高い。一方で、最新のスマートホームは居住者の在不在を把握する人感センサーを想定しているものが多い。

これに対し、スマートホーム機能を有さない大多数の既存家屋に居住者の位置行動把握機能を導入したい場合、家

屋への埋め込み設置工事等が不要なアドオン型の人感センサーなどが有効である。しかし、家庭内での設置位置検討のためには家屋内の空間的な詳細情報（障害物の有無等）を考慮し、サービス提供者が現場で設置位置の調整作業やセンサーの位置登録作業を行う必要がある。こういった新サービスを普及させるためには、居住者が自分で手軽に導入できることが望ましい。

そこで本稿では、ポータブル人感センサーを家屋内に複数設置し、その反応データのみを用いて人感センサーの設置位置関係を自動推定するシステムを提案する。本システムは人感センサー集合とサーバーから成り、各人感センサーの反応データをサーバーで集約することで自動推定を実現する。本システムを導入する際、居住者はまず、「各部屋と各廊下に1, 2個ずつ」などの大まかな目安に沿って各部屋や廊下到人感センサーを設置する。その後本システムは数日間の人感センサーの反応データを収集し、居住者の家屋内の移動に伴って人感センサーが順に反応することを利用して設置された人感センサーの相対的な位置関係を推定する。本システムによって、上記のような導入時の煩雑な作業が不要となり、また導入後のセンサーの設置位置の変更等を容易に行えるようになる。

## 2. システムの概要

### 2.1 対象環境と利用するセンサー

開発したシステムのアーキテクチャを図1に示す。本システムでは人感センサーを利用し、居住者の位置を計測する。計測結果はサーバに送信する。サーバは、これらの計

<sup>1</sup> 大阪大学 情報科学研究科

a) s-sigaki@ist.osaka-u.ac.jp

b) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

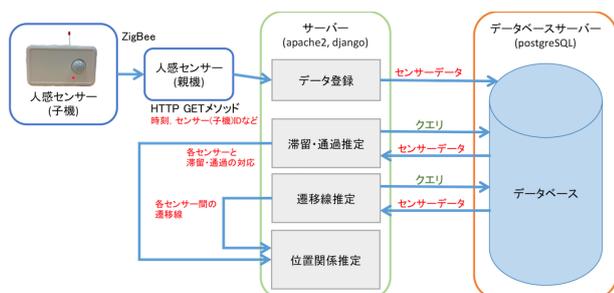


図 1 行動推定システムのアーキテクチャ図

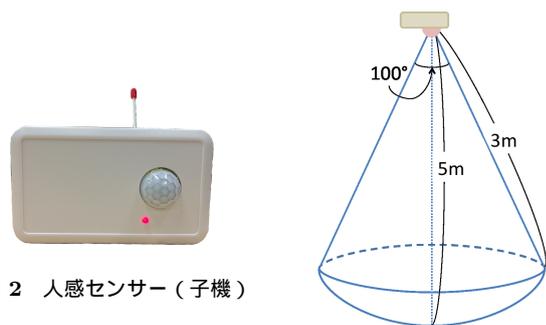


図 2 人感センサー (子機)

図 3 人感センサーの検知範囲

測結果に基づき、家庭内におけるセンサーの「位置」を推定する。

本システムで用いる人感センサー(図2)は、研究グループで独自に開発したものである。消費電力センサー同様、人感センサーも親機と子機から構成されている。親機は Arduino UNO [23] 上に、通信用の ZegBee モジュールに加えて、イーサネットによる通信のため、Ethernet Shield を搭載している。一方、子機は、人の検知のための赤外線モジュールと通信用の ZigBee モジュール TWE-Lite [25] から構成されている。図2に示されるように、子機は幅 69 mm × 奥行 115 mm × 高さ 28 mm、重さ約 200 g であり、電池駆動であるため電源の制約を受けず、天井や壁など様々な場所に設置することができる。

子機は、搭載された赤外線モジュールにより人の存在を検知しており、その検知範囲は図3に示されているように、中心角 100 度、母線の長さ 3 m の円錐の底を、中心線の長さが 5 m になるように滑らかに膨らませたような形状となっている。

子機は 4 秒毎に人が検知範囲内に滞在しているかを判定しており、人を検知した場合にはその旨を ZigBee 経由で親機に送信する。親機は子機から情報を受け取ると、人の存在を検知した子機の情報をサーバーに HTTP の GET メソッドにて送信する。サーバーに送られる子機情報は、子機が人を検知した時刻(秒単位)、子機の ID、親機の ID、親子間の ZigBee 通信の電波強度、バッテリー電圧などである。これらの情報は、サーバーからデータベースサーバーへ送られ、受信した順にデータベースに蓄積される。データベースの管理は、PostgreSQL を用いて行っ

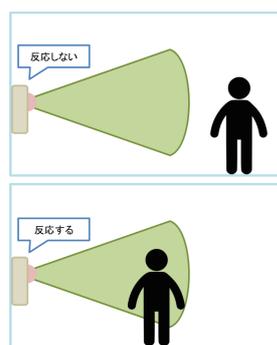


図 4 在不在とセンサーの反応

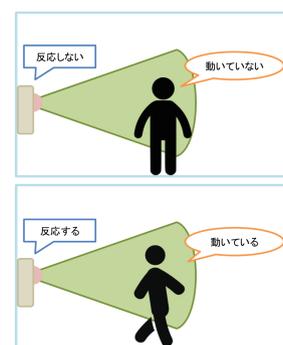


図 5 動きとセンサーの反応

ている。

人が人感センサーの検知範囲に入ると、人感センサーが反応する(図4)。但し、図5に示すように、検出範囲内において、人がしばらく動かない状態が続いた場合、その人は赤外線モジュールにより検知されないため、人が存在していない状態と区別がつかない。

## 2.2 サーバーにおける処理

人が家屋内を動くとき人の動いた範囲にある子機が順次反応し、データベースにはその順に子機の情報蓄積される。従って、データベースに記録されたセンサーイベントの系列からセンサーの相対的な位置関係を推定することが可能である。この推定のアルゴリズムの詳細については、文献 [2] を参照されたい。

サーバーでは、図1のように処理を行っている。

- (1) (データ登録) 人感センサーが人を検知するごとに、サーバーは受信したセンサーデータをデータベースに登録する。数日間のデータ収集を終えると、本システムは以下の各種の推定を順に行う。
- (2) (滞留・通過推定) データベースからある特定のセンサーについてのデータのみ取得し、そのうち連続する反応間の時刻の差を求め集約する。これを全てのセンサーに対して行い、集約したデータに対して教師なし機械学習を行うことで、そのセンサーが人の滞留する部屋などの場所を検知しているのか、人の通過する廊下などの場所を検知しているのかを推定する。
- (3) (遷移線推定) データベースから全てのセンサーデータを取得し、連続して起こる反応とその出現割合を計算することで、それぞれのセンサーの組に対して、その間の隣接関係(他のセンサーの検知範囲を経由せずに往来可能かどうか)を推定する。
- (4) (位置関係推定) (2), (3) の推定結果を集約し、センサー間の相対的な位置関係を推定する。

## 3. 実環境における実験結果

### 3.1 実験環境

開発したシステムを用い、一般家庭における人感セン

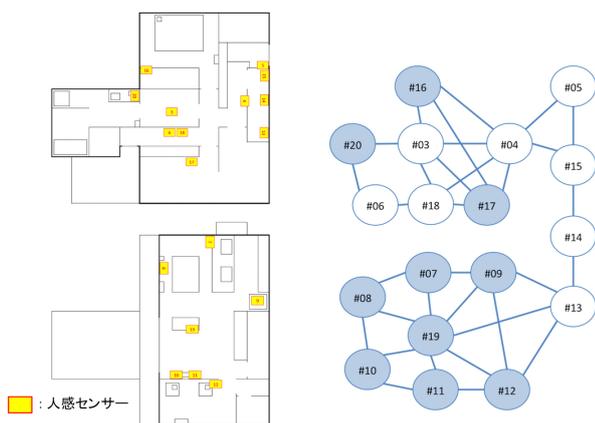


図 6 対象家屋の間取り図  
および人感センサーの配置図

図 7 対象家庭の SMR 図

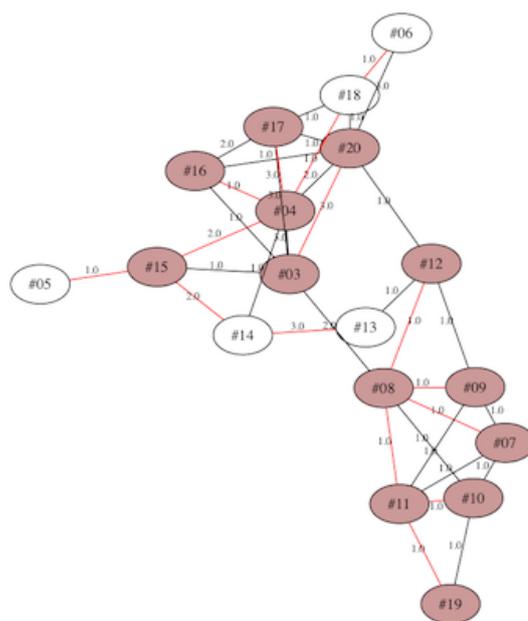


図 8 導出された SMR 図

表 1 人感センサーと設置場所

センサー ID	滞留または通過	設置場所
#03	通過	1F クローゼット
#04	通過	1F 廊下
#05	通過	1F 玄関
#06	通過	1F 廊下
#07	滞留	2F ダイニング
#08	滞留	2F ダイニング
#09	滞留	2F キッチン
#10	滞留	2F リビング
#11	滞留	2F リビング
#12	滞留	2F 書斎
#13	通過	1F-2F 階段上
#14	通過	1F-2F 階段中
#15	通過	1F-2F 階段下・玄関
#16	滞留	1F 寝室
#17	滞留	1F 子供部屋
#18	通過	1F 廊下
#19	滞留	2F リビング
#20	滞留	1F 洗面室

センサーのデータの収集を行った。対象家庭は 3 人家族（父、母、小学 6 年生の子供）、屋内居住面積  $120m^2$  の 2 階戸建であり、設置した人感センサーは 18 台である。対象家屋の間取り図、ならびに人感センサーの設置位置を図 6 に、また人感センサーの設置位置名を表 1 に示す。

これらのセンサーからのデータを 2015 年 2 月 14 日から 4 月 16 日までの約 2 ヶ月間、PostgreSQL サーバに検出タイムスタンプとともにアップロードし、それらのデータを対象として以下の方針で解析を行った。

人感センサーは移動物体が検出された瞬間にそのときの時刻を付与したデータを生成するため、秒単位での検出タイミングが取得されている（なお時刻はセンサーゲートウェイにおいて定期的に NTP 同期した正確な時刻を用いている）。

図 7 に、対象家庭におけるセンサーとそれらを結ぶ遷移線の一部を示す。各ノードがセンサーであり、表 1 におい

て滞留としているセンサーは青く、通過としているセンサーは白く表現されている。ノードに付けられている番号はセンサー ID であり、表 1 と対応している。ノード間を繋ぐ辺は遷移線であり、図 7 中に記載はしていないが、あるセンサー  $(s_i, s_j) (s_i, s_j \in S)$  間の遷移線の長さは  $(s_i, s_j)$  の距離  $d(s_i, s_j)$  である。家庭内での居住者の移動速度はほぼ一定であると仮定すると  $(s_i, s_j)$  間の距離は  $(s_i, s_j)$  の反応イベントの時間間隔  $t(s_i, s_j)$  に比例するため、 $d(s_i, s_j)$  は  $t(s_i, s_j)$  の最頻値として定めている。この図 7 に表される遷移図を、センサー・モビリティ関係図（sensor and mobility relation diagram, SMR 図）とよぶ。

この SMR 図から、例えばセンサー #17 の検知する滞留からセンサー #16 の検知する滞留までは他のセンサーに検知されることなく直接移動できるということが分かり、センサー #05 の検知する滞留からセンサー #12 の検知する滞留までは (#13, #14, #15) という 3 つのセンサーをこの順で経由することにより到達できるということが分かる。

### 3.2 人感センサー値の時間系列によるセンサー・モビリティ通過関係図の導出

2.2 節のアルゴリズムに従って SMR 図を導出し、図 8 のように結果を得た。また、図 8 の SMR 図の可視化に際して、Graphviz[5] というグラフ描画ツールを用いている。手順 (2) で滞留と判断されたセンサーを赤いノードで、通過と判断されたセンサーを白いノードで表し、また手順 (3) で求められた遷移線のうち、各センサーに対する出現割合の最も高かった遷移線を赤い辺で表現している。

以下、導出された SMR 図（図 8）における滞留・通過推定と遷移線推定のそれぞれについて、推定の精度を示す。また、SMR 図で遷移線が存在すると判断された辺のうち、

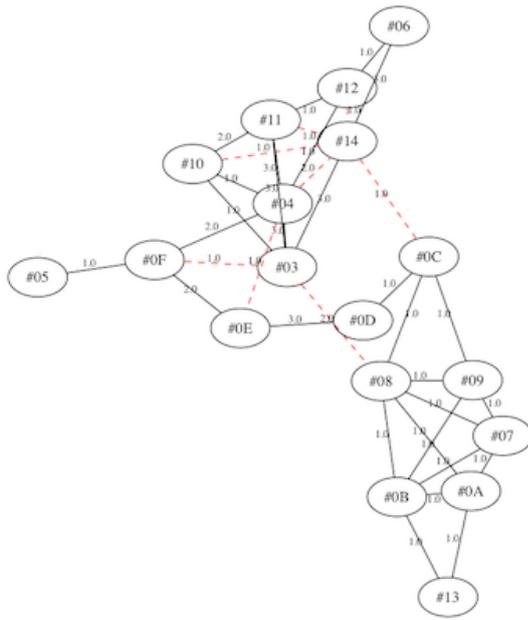


図 9 導出された SMR 図における遷移線の誤検出 (赤破線)

誤検出された遷移線 (他のセンサーに検知されることなく直接移動できない遷移線) を図 9 の赤い破線で示し、その誤りの原因について考察する。

表 1 のとおり、対象家庭に設置された人感センサーの数は 18 個であり、そのうち滞留を検知しているものは {#07,#08,#09,#10,#11,#12,#16,#17,#19,#20} の 10 個である。2.2 節の手順 (2) によって滞留と推定されたものは 13 個で、図 8 中に赤いノードで示されている。このうち 10 個は正しく滞留であるため再現率 (Recall) は 100% であるが、適合率 (Precision) は約 76.9% となっている。実際には滞留ではない (通過を検知している) にもかかわらず滞留として誤検出されたセンサーは、{#03,#04,#15} の 3 つである。センサー #03 はクローゼットを検知範囲とするセンサーであるが、クローゼットはセンサー #20 の検知する洗面室へ向かう通過であると同時にクローゼットの機能を持つ部屋でもあり、人がそこに滞在することも考えられる。このような理由によってセンサー #03 の反応系列に滞留と判断できる特徴が含まれていたことがこの誤検出の原因であると我々は考えている。また、#04,#15 の 2 つのセンサーはどちらも玄関の近くに設置されているセンサーであるが、被験者へのインタビューによると日常的に玄関の側に荷物を置いており、それが #04 や #15 のセンサーの検知範囲を塞いでいることがままあるということで、その荷物がこの誤検出の原因の一つではないかと我々は考えている。

次に、遷移線の推定結果について説明する。実際に家屋内で他のセンサーに検知されることなく直接移動可能な 2 つのセンサー  $\{s_i, s_j\}$  間の遷移線は、往復を除いて 47 本存在する。このうち、各センサーに対して最も出現割合の高い遷移線 (図 8 中の赤い辺) は設置された全センサーの数

表 2 各部屋とセンサーの対応関係

部屋	センサー ID
1F 玄関	{#05}
1F 寝室	{#16}
1F 洗面室	{#20}
1F 子供部屋	{#17}
1F クローゼット	{#03}
階段	{#13,#14,#15}
2F リビング	{#10,#11,#19}
2F ダイニング	{#07,#08}
2F キッチン	{#09}
2F 書斎	{#12}

と同じ 18 本であり、これらは全て正しい遷移線であった。この 18 本の遷移線は、往復を取り除くことで図 8 の赤線で示す 15 本になる。それ以外に推定された遷移線は往復を除いて 22 本であったが、このうち 8 本は実際には直接移動できない遷移線であり、誤検出である。これは、前述のとおり対象とした家庭が 3 人家族であり、3 人がめいめい家屋内で移動することで起こる系列が原因であると考えられる。例えば、ある被験者 A が  $(s_a, s_b, s_c)$  と移動するのと時刻を同じくして別の被験者 B が  $(s_x, s_y, s_z)$  と移動したとすると、サーバー側では 2 人の移動による系列が混在した  $(s_a, s_x, s_y, s_b, s_c, s_z)$  のようなイベント系列が記録され、またこの系列を個人単位に分割することが必要になる。このようにして起こる誤検出によって、推定された遷移線全体 (37 本) のうち、正しい遷移線が 29 本、誤検出された遷移線が 8 本、適合率は約 78.4% となった。これは再現率を考えると遷移線全体 47 本の 6 割程度しか推定できていない計算になるが、図 8 中では全てのノードから全てのノードに移動可能である (到達不可能なノードが存在しない) ことと、表 2 のように部屋ごとにセンサーを纏めて考えると部屋間の移動はほぼ全て網羅できていることを鑑みると、家屋内での居住者の移動を考えるには十分な精度であると言える。

#### 4. おわりに

本稿では、配置が容易なポータブル型人感センサーを複数家屋内に設置し、その反応データのみを用いて家屋内のセンサーの位置関係を推定するシステムについて述べ、そのデモ展示を行った。本システムでは、家屋内に設置された人感センサーを、人の滞留する場所を検知しているセンサーと、人の通過する場所を検知しているセンサーの 2 種類に分類し、センサー同士の間を結ぶ遷移線を推定することで、センサーの相対的な位置関係を推定している。評価実験では、このシステムを実環境に導入して実際に位置関係の推定を行い、その結果、部屋間の移動を網羅することができた。

参考文献

- [1] 中村笙子, 志垣沙衣子, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 大衆の生活ノウハウの定量化とモデル化によるスマートライフ支援システム, 情報処理学会論文誌 (採録決定)
- [2] 志垣沙衣子, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, ポータブル人検知センサーの家屋内設置箇所推定, DICOMO 2015, pp.139-148, 2015
- [3] 村上雅紀, 岡部正幸, 梅村恭司, 赤外線センサによる行動予測の実現性のためのデータ照合, DEIM Forum 2011, 2011
- [4] 江田政聡, 賀新剛, 中根傑, 横山昌平, 福田直樹, 峰野博史, 石川博, 赤外線センサを用いた在席推定に基づく照明制御手法の提案, DEIM Forum 2012, 2012
- [5] Graphviz, Graphviz - Graph Visualization Software, <http://www.graphviz.org/>
- [6] Hardegger, Michael and Nguyen-Dinh, Long-Van and Calatroni, Alberto and Trøster, Gerhard and Roggen, Daniel, Enhancing action recognition through simultaneous semantic mapping from body-worn motion sensors, Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp.99-106, ACM, 2014
- [7] Lane, Nicholas D and Pengyu, Li and Zhou, Lin and Zhao, Feng, Connecting personal-scale sensing and networked community behavior to infer human activities, Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, pp.595-606, ACM, 2014
- [8] Rollins, S. and Banerjee, N., Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2014), Using rule mining to understand appliance energy consumption patterns, pp.29-37, 2014
- [9] Bourgeois, Jacky and van der Linden, Janet and Kortuem, Gerd and Price, Blaine A. and Rimmer, Christopher, Conversations with My Washing Machine: An In-the-wild Study of Demand Shifting with Self-generated Energy, Proceedings of the 2014 International Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '14), pp.459-470, September, 2014
- [10] Sen.se, Mother, Motion Cookies, <https://sen.se/store/mother/>
- [11] Sony Mobile Communications Inc., Smart wear, <http://www.sonymobile.co.jp/product/smartwear/>
- [12] BoxLab, BoxLab Wiki Page, <http://boxlab.wikispaces.com/>
- [13] Ordonez, F.J. and Englebienne, G. and de Toledo, P. and van Kasteren, T. and Sanchis, A and Krose, B., IEEE Pervasive Computing, In-Home Activity Recognition: Bayesian Inference for Hidden Markov Models, vol.13, no.3, pp.67-75, 2014
- [14] 村尾和哉, 藤堂智史, 寺田努, 矢野愛, 松倉隆一, 塚本昌彦, 住宅内に設置した人感センサを用いた住人の移動推定手法, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集, pp.315-322, 2011
- [15] Kientz, Julie A and Patel, Shwetak N and Jones, Brian and Price, ED and Mynatt, Elizabeth D and Abowd, Gregory D, The Georgia Tech aware home, CHI'08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.3675-3680, 2008
- [16] SmartThings Community, SmartThings, <http://www.smartthings.com/>
- [17] Nest Labs, Nest Developer Program, <https://developer.nest.com/>
- [18] Microsoft Research, HomeOS : Enabling smarter homes for everyone, <http://research.microsoft.com/en-us/projects/homeos/>
- [19] Jahn, M. and Jentsch, M. and Prause, C.R. and Pramudianto, F. and Al-Akkad, A and Reiners, R., The Energy Aware Smart Home, Proceedings of 5th International Conference on Future Information Technology (FutureTech 2010), pp.1-8, 2010
- [20] Zhong Fan and Georgios Kalogridis and Costas Efthymiou and Mahesh Sooriyabandara and Mutsumu Serizawa and Joe McGeehan, The new frontier of communications research: smart grid and smart metering, Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking (e-Energy '10), vol.1, no.3, pp.115-118, 2010
- [21] Zhong Fan, Distributed Demand Response and User Adaptation in Smart Grids, Proceedings of IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2011), pp.726-729, May, 2011
- [22] H.Farhangi, The path of the smart grid, IEEE Power and Energy Magazine, vol.8, no.1, pp.18-28, January-February, 2010
- [23] Arduino, Arduino Uno Revision 3, <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [24] ENEGATE, Smart Ecowatt, [https://www.enegate.co.jp/smarteco\\_portal/index.html](https://www.enegate.co.jp/smarteco_portal/index.html)
- [25] 超小型 ZigBee モジュール TWE-Lite, Tokyo Cosmos Electric Co.,Ltd, <http://tocos-wireless.com/jp/products/TWE-001Lite.html>