The 33rd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2019

実環境下における RSSI に基づく IoT センサの状態推定可能性の検討

Examination of the possibility of the state estimation of the IoT sensor based on RSSI under the real environment

高野　祐一 *1　　西垣　貴央 *1　　小野田　崇 *1
Yuichi TAKANO　　Takahiro NISHIGAKI　　Takashi ONODA

*1青山学院大学理工学部
College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

In this research, we investigate the possibility of state estimation of IoT (Internet of Things) sensor using RSSI (Received Signal Strength Indicator). In recent year, IoT is rapidly spreading with the evolution of sensor technology. There are multiple types of IoT sensor, but RSSI is measured regardless a kind of IoT sensors. There are a lot of studies using RSSI. A lot of studies using RSSI and services using IoT (e.g. smart house, monitoring people, and so on) assume that the IoT sensor is normally operating. So, it is not considered with the state of the IoT sensor itself. In this paper, we supposed that the state of IoT sensor is some objects are on the IoT sensors. As a result, there are the possibility of the state estimation from changing RSSI of the IoT sensor under the real environment.

1.　はじめに

パソコンやスマートフォンなど，従来のインターネット接続端末だけでなく，私たちの身の回りにある様々な“モノ”が無線通信し，情報交換を行う仕組みは IoT (Internet of Things) と表現される [1]．近年，IoT センサはセンサ・テクノロジーの進化を背景に，急速に普及している [2]．IoT センサは，温湿度を測る，扉の開閉を検知するなど，用途に応じた種類が存在するが，IoT センサに共通して取得可能な指標に，受信電波強度 (RSSI : Received Signal Strength Indicator) がある．このように汎用性の高い RSSI を用いた研究は多く存在する [3][4][5]．しかし，どの研究も IoT センサが正常に稼働していることが前提であり，IoT センサ自体の状態を考慮していない．IoT センサ自体の状態とは，電池が切れそうな状態，センサが故障しそうな状態，センサの上に物が乗っている状態，センサの位置が設置時から変わった状態などがある．本稿では RSSI に基づく IoT センサの状態推定可能性を検討する．

2.　関連研究

本章では，RSSI を用いた研究例として，時刻同期を行った複数の IEEE 802.15.4 端末を用いて取得した RSSI を利用した人の混雑度推定手法について述べる．本章における混雑度推定とは，空間内に存在するユーザ数を推定することと定義している．具体的には，RSSI の分散を評価することで混雑度推定を行っている．図 1 に提案する混雑度推定のシステムモデルを示す．

図 1 より，端末はシンクノードとセンサノードに分かれている．シンクノードはセンサノードが測定した情報を収集して PC へと出力する．センサノードは空間内の複数箇所に設置する．このセンサノードは端末間 RSSI を収集する．端末間の RSSI は他のセンサノードから送信された計測用パケットを受信したときの RSSI を表す．端末間を人が通過すると，電波の伝播路を人が遮ることによって RSSI が弱まる．従って，端末間 RSSI を調べれば人の有無を推定できる．

連絡先:　高野　祐一，青山学院大学理工学部，a5715036@aoyama.jp

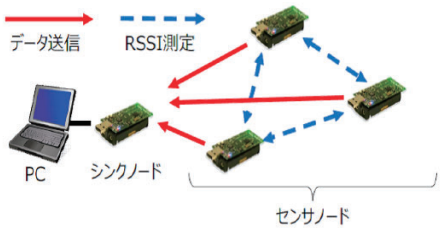

図 1: システムモデル（引用：[5]）

収集した端末間 RSSI の分散を評価することで混雑度推定を行う．RSSI は人の移動の他に温度や湿度によっても変化する．端末間を人が通過することによる RSSI の変化は瞬間的で大きい．一方，温度や湿度による RSSI は緩やかであるため，分散を取ることで環境変動による端末間 RSSI の変化の影響を小さくできる．

図 2 に計測した RSSI の分散と在室人数のグラフを示す．横軸が 11 月 28 日の 10 時 00 分から 12 月 1 日の 10 時 00 分までの時間，左側の縦軸が全体の端末間 RSSI の分散，右側の縦軸が在室人数を表す．図 2 から，人がいる時に分散が大きくなり，人がいない時に分散が小さくなるということが分かる．また，11 月 28 日の 15 時 00 分から 16 時 30 分までの間は在室人数に対して，分散が大きいということがいえる．これは，端末間 RSSI が Wi-Fi などの電波の影響を受けているからと考えられる．

これらの分散を用いて，人の有無の判定を行うと，約 92% の確率で正しい推定ができた．人がいる時に人がいると判定される確率は 87%，人がいる時にいないと判定される確率は約 13% であった．また，人がいない時にいないと判定される確率は 97%，人がいない時にいると判定される確率は 3% であった．また，混雑度推定は約 87% の確率で正しい推定ができた．誤りが生じた要因は，在室人数の増加に伴い，人の移動が多くなるため，端末間 RSSI の分散が予想より大きくなることに起因すると考えられる．

関連研究において提案されている方法は，センサが正常に稼働し，RSSI を取得していることを仮定している．したがって，

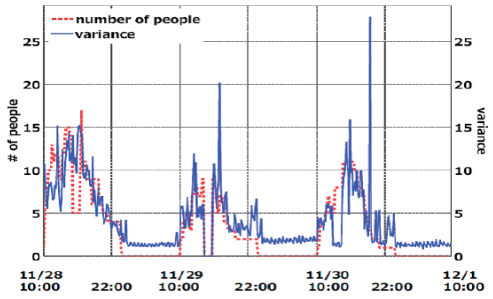

図 2: 端末間 RSSI の全体の分散と実際の在室人数の時間変化 (引用：[5])

IoT センサの状態を推定する必要がある．本稿では，RSSI に基づく IoT センサの状態推定の可能性を検討する．

3. 実験

第 2 章のように，IoT センサを用いた研究はあるが，IoT センサ自体の状態推定を行っている研究は存在しない．実環境下において，IoT センサは電池が切れそう，物が乗っている，設置時から位置がずれているなど，その状態は一定でない．様々な IoT センサを用いたアプリケーションにおいて，IoT センサが正常に稼働しているかを監視するために，IoT センサの状態推定を行うことは必要不可欠である．本研究では，実環境下における RSSI に基づく IoT センサ自体の状態推定の可能性を検討する．

3.1 状態推定の方法

IoT センサの状態推定を行うために，状態変化前と状態変化後で比較を行う．本稿における状態変化前とは，IoT センサを設置した時の状態とする．また，状態変化後とは，IoT センサに物が乗っている状態を想定した．センサ上に物が乗った場合，乗った物によって電波の伝播路は遮蔽される．状態変化前後で RSSI は変化すると考えられるため，関連研究 [5] のような RSSI を用いたアプリケーションでは，理想通りの結果が得られない可能性がある．

本稿では，センサ間に遮蔽物が存在しない見通し内，遮蔽物が存在する見通し外の 2 種類のセンサを設置した．状態変化前として RSSI を 90 分間測定した．また，状態変化後として，それぞれのセンサにおいて，電波遮蔽能力が高いとされるアルミ箔や，ステンレス製の缶，実環境下に多く存在する本を乗せて RSSI を 90 分間測定した．関連研究と同様に，測定した RSSI の 10 分間の分散を計算した．関連研究 [5] のように，RSSI 測定環境下に人がいる状態では，分散が変化し続ける．一方，センサ上に物が乗った状態では，乗った瞬間の RSSI は直前の RSSI と比較すると変化が生じるため，その瞬間の分散は大きく変化する．その後，物が乗った状態が定常状態となる．したがって，状態変化前後の分散が異なるとはいえない場合が考えられる．状態変化前後における分散が異なるかどうか，5 % 水準で等分散の検定を行った．また，センサ上に物が乗った場合，電波の伝播路が遮蔽されることから，RSSI は物がなくなるまで，状態変化前より低い値を示し続けると考えられる．本稿では，RSSI の平均に着目した．測定した RSSI の 10 分間の平均を計算し，それぞれのセンサにおいて，状態変化前後の RSSI の変化が有意な差であるか，5 % 水準で 2 平均間の検定を行った．

3.2 測定環境

関連研究において RSSI を計測していた IEEE 802.15.4 端末は専用の端末が必要である．一方，現行のスマートフォンや，タブレット端末の多くが対応している無線通信規格に BLE (Bluetooth Low Energy) がある．本実験では，センサデータを送信する機器として，INGNICS Technology 社 [6] の BLE ビーコンセンサ，受信する機器として，同社のゲートウェイを用いた．図 3 に，測定機器の設置図を示す．

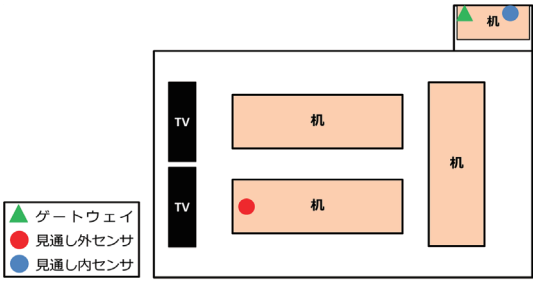

図 3: センサの設置図

図 3 より，緑の三角印にゲートウェイ，青の丸印に見通し内センサ，赤の丸印に見通し外センサを設置した．ゲートウェイから見通し内センサは約 20cm，見通し外センサは直線距離で約 4.6m である．見通し内センサは 5 秒間隔，見通し外センサは 10 秒間隔でデータを送信している．

4. 評価

まず，アルミ箔や，ステンレス製の缶でセンサを包み，密閉した状態で RSSI を測定した．次に，アルミ箔や缶をセンサ上に乗せ，隙間がある状態で RSSI を測定した．最後に，実環境下に多く存在する本を乗せ RSSI を測定した．この 5 つの状態で測定した RSSI を用いて，見通し内・外それぞれのセンサにおいて IoT センサ上に物を乗せた状態かそうでないかの推定可能性を検討する．

4.1 分散による状態推定

見通し内センサにおいて測定した RSSI から求めた 10 分間分散と等分散の検定結果をを表 1 に示す．ただし，表中の「N/A」は計測不可であることを示す．

表 1: 見通し内センサにおける 10 分間の分散と等分散の検定結果

見通し内	アルミ（密閉）	アルミ（被せる）	缶（密閉）	缶（被せる）	本（被せる）
変化前 (dBm^2)	6.30	1.65	2.03	1.83	2.84
変化後 (dBm^2)	N/A	0.00	2.57	1.54	4.77
統計量：F	-	-	1.26	1.19	1.68
P 値	-	-	1.39	1.48	1.37

表 1 より，アルミ箔で密閉した状態では RSSI が測定できなかった．よって，分散は計算不可であった．アルミ箔を被せた状態では，センサを完全に遮蔽していないため，RSSI を測定できた．アルミ箔を被せたことにより，電波の送信方向が定められたため，一定の RSSI が測定され，分散は 0.00 を示した．アルミで密閉したり，被せたりした状態において，分散は

計算できないため，関連研究 [5] のような RSSI の分散を用いた方法は利用できない．また，缶で密閉した状態，缶を被せた状態，本を被せた状態では RSSI を測定できた．しかし，缶で密閉した状態と，缶を被せた状態において，状態変化前後で，等分散の検定を行った結果，ばらつきの違いは認められないといえる．したがって，見通し内センサにおいて，RSSI の分散からセンサ上に物が乗っている状態の推定はできないといえる．

次に，見通し外センサにおいて測定した RSSI から求めた 10 分間分散と等分散の検定結果をを表 1 に示す．

表 2: 見通し外センサにおける 10 分間の分散と等分散の検定結果

見通し外	アルミ（密閉）	アルミ（被せる）	缶（密閉）	缶（被せる）	本（被せる）
変化前 (dBm^2)	25.8	8.68	12.6	7.80	1.94
変化後 (dBm^2)	N/A	18.0	N/A	10.7	0.65
統計量：F	-	2.07	-	1.38	2.99
P 値	-	1.60	-	1.72	1.67

表 2 より，アルミ箔で密閉した状態，缶で密閉した状態では RSSI が測定できなかった．よって，分散は計算不可であった．. アルミで密閉したり，缶で密閉した状態において，分散は計算できないため，関連研究 [5] のような RSSI の分散を用いた方法は利用できない．また，アルミを被せた状態，缶を被せた状態，本を被せた状態では RSSI を測定できた．しかし，缶を被せた状態において，状態変化前後で，等分散の検定を行った結果，ばらつきの違いは認められないといえる．したがって，見通し外センサにおいて，RSSI の分散からセンサ上に物が乗っている状態の推定はできないといえる．

したがって，RSSI の分散だけから，センサ上に物が乗っている状態の推定はできないといえる．

4.2 平均による状態推定

見通し内センサにおいて測定した RSSI から求めた 10 分間平均と，2 平均間検定の結果を表 3 に示す．

表 3: 見通し内センサにおける 10 分間の平均と 2 平均間検定の結果

見通し内	アルミ（密閉）	アルミ（被せる）	缶（密閉）	缶（被せる）	本（被せる）
変化前 (dBm)	-53.92	-50.78	-52.42	-49.36	-50.38
変化後 (dBm)	N/A	-51	-66.1	-51.27	-51.58
統計量：t	-	3.01	23.9	6.65	2.02
P 値	-	3.20E-03	9.0522E-63	9.24834E-10	0.04
判定	-	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05

表 3 より，アルミ箔で密閉した場合は RSSI が測定出来なかった．一般的に，アルミ箔は電波遮断能が高い．センサは電波を発信していると考えられる．しかし，センサはアルミ箔によって完全に遮蔽されているので，電波が外に出ることはない．したがって，ゲートウェイはセンサデータを受信不可で，RSSI は測定不可であった．センサデータが受信されなくなった場合，センサに変化が起きていることが分かるので，センサの状態推定可能であるといえる．

アルミ箔を被せた場合，状態変化前後の RSSI の平均を比較すると，RSSI は 0.22(dBm) 低下した．アルミ箔は，センサを完全に遮蔽していない．よって，ゲートウェイは電波を受信可能であった．RSSI の低下は，アルミ箔を被せた方向で反射した電波が反射・干渉が生じたことが原因であると考えられる．状態変化前の RSSI 平均と，変化後の RSSI 平均で差があるか，対応のある 2 平均間の検定を行った．検定を行うと，5%水準で有意差が得られた（$t(110) = 3.01, p < .05$）．したがって，見通し内センサでは，状態変化前の平均とアルミ箔を被せた状態にある平均を比較すると，状態推定可能性があるといえる．

缶で密閉した場合，状態変化前後の RSSI の平均を比較すると，RSSI は 13.69(dBm) 低下した．センサは缶によって完全に遮蔽されているが，ゲートウェイは電波を受信した．電波はスチール製の缶を透過したと考えられる．状態変化前の RSSI 平均と，変化後の RSSI 平均で差があるか，対応のある 2 平均間の検定を行った．検定を行うと，5%水準で有意差が得られた（$t(109) = 23.9, p < .05$）．したがって，見通し内センサでは，状態変化前の平均と缶で密閉した状態にある平均を比較すると，状態推定可能性があるといえる．

缶を被せた場合，状態変化前後の RSSI の平均を比較すると，RSSI は 1.91(dBm) 低下した．センサは，接地面以外を缶に覆われている．よって，缶と缶との接地面に隙間が生じていたため，電波はゲートウェイに到達したと考えられる．また，缶で密閉した場合の結果から，電波はスチール製の缶を透過することが分かっている．したがって，ゲートウェイは缶を透過して電波も受信したと考えられる．状態変化前の RSSI 平均と，変化後の RSSI 平均で差があるか，対応のある 2 平均間の検定を行った．検定を行うと，5%水準で有意差が得られた（$t(60) = 6.65, p < .05$）．したがって，見通し内センサでは，状態変化前の平均と缶を被せた状態にある平均を比較すると，状態推定可能性があるといえる．

本を被せた場合，状態変化前後の RSSI の平均を比較すると，RSSI は 1.20(dBm) 低下した．センサは，本によって完全に遮蔽されていないため，ゲートウェイは電波を受信したと考えられる．また，本が乗っている面から出力された電波は，本を透過してゲートウェイに到達するため，低い RSSI を示したと考えられる．状態変化前の RSSI 平均と，変化後の RSSI 平均で差があるか，対応のある 2 平均間の検定を行った．検定を行うと，5%水準で有意な差が得られた（$t(109) = 2.02, p < .05$）．したがって，見通し内センサでは，状態変化前の平均と本を被せた状態にある平均を比較すると，状態推定可能性があるといえる．

したがって，見通し内センサにおいて，物を乗せた状態かそうでないかの推定可能性があるという結果が得られた．

次に，見通し外センサにおいて測定した RSSI から求めた 10 分間平均と，2 平均間検定の結果を表 4 に示す．

表 4: 見通し外センサにおける測定結果と 2 平均間検定の結果

見通し外	アルミ（密閉）	アルミ（被せる）	缶（密閉）	缶（被せる）	本（被せる）
変化前 (dBm)	-81.70	-74.51	-74.38	-74.47	-74.94
変化後 (dBm)	N/A	-87.46	N/A	-85.55	-73.23
統計量：t	-	14.78	-	9.32	-5.10
P 値	-	2.11E-23	-	4.21E-14	1.85E-06
判定	-	< 0.05	-	< 0.05	< 0.05

表 4 より，アルミで密閉した場合は RSSI が測定出来なかった．一般的に，アルミは電波遮断能が高い．センサは電波を発信していると考えられる．しかし，センサはアルミによって完全に遮蔽されているので，電波が外に出ることはない．したがって，ゲートウェイはセンサデータを受信不可で，RSSI は測定不可であった．センサデータが受信されなくなった場合，センサに変化が起きていることが分かるので，センサの状態推定可能性があるといえる．

アルミを被せた場合，状態変化前後の RSSI の平均を比較すると，RSSI は 12.96(dBm) 低下した．センサはアルミによって完全に遮蔽されていないため，ゲートウェイは電波を受信することができた．しかし，アルミを被せたことにより，出力された電波同士の干渉が起きたと考えられる．したがって，状態変化後の RSSI は状態変化前と比較して，低い RSSI を示したと考えられる．状態変化前の RSSI 平均と，変化後の RSSI 平均で差があるか，対応のある 2 平均間の検定を行った．検定を行うと，5%水準で有意差が得られた（$t(44) = 14.78, p < .05$）．したがって，見通し外センサでは，状態変化前の平均とアルミを被せた状態にある平均を比較すると，状態推定可能性があるといえる．

缶で密閉した場合は RSSI の計測が出来なかった．見通し外センサにおいて，缶で密閉された状態でも RSSI の計測が出来ていたことから，電波は缶を透過しているといえる．しかし，透過した電波は弱められている．この RSSI はゲートウェイの受信可能範囲を下回る．したがって，RSSI は測定不可であった．センサデータが受信されなくなった場合，センサに変化が起きていることが分かるので，センサの状態推定可能性がある．

缶を被せた場合，状態変化前後の RSSI の平均を比較すると，RSSI は 11.08(dBm) 低下した．センサは，接地面以外を缶に覆われている．よって，缶と缶との接地面に隙間が生じていたため，電波はゲートウェイに到達したと考えられる．状態変化前の RSSI 平均と，変化後の RSSI 平均で差があるか，対応のある 2 平均間の検定を行った．検定を行うと，5%水準で有意差が得られた（$t(37) = 9.32, p < .05$）．したがって，見通し外センサでは，状態変化前の平均と缶を被せた状態にある平均を比較すると，状態推定可能性があるといえる．

本を被せた場合，状態変化前後の RSSI の平均を比較すると，RSSI は 1.71(dBm) 上昇した．センサは，本によって完全に遮蔽されていないため，ゲートウェイは電波を受信したと考えられる．また，見通し外センサの設置場所はスチール製の板に囲まれている．センサから送信された電波は，スチール製の板を透過，または，板によって反射したのちにゲートウェイに到達していると考えられる．センサに本を乗せたことにより，乗せた面から発信される電波は，本によって遮蔽されている．その面から出た電波による反射の影響が少なくなった．したがって，状態変化後の電波は，変化前より高い RSSI を示したと考えられる．状態変化前の RSSI 平均と，変化後の RSSI 平均で差があるか，対応のある 2 平均間の検定を行った．検定を行うと，5%水準で有意な差が得られた（$t(46) = -5.10, p < .05$）．したがって，見通し外センサでは，状態変化前の平均と本を被せた状態にある平均を比較すると，状態推定可能性があるといえる．

したがって，見通し外センサにおいて，RSSI の平均を求めることで，物を乗せた状態かそうでないかの推定可能性があるという結果が得られた．

5. おわりに

本稿では，IoT センサの種類によらず取得可能な RSSI を用いた，IoT センサの状態推定可能性の検討について述べた．物が乗った状態の推定では，測定した RSSI の分散だけでなく，平均を計算することで状態空いての可能性があるという結果が得られた．RSSI の変化は，センサの状態変化の要因によって異なると考えられる．センサに物が乗ると，物を除去するまで，元の RSSI から変化した値を示し続ける．一方，人がいる状態は，退室時には元の RSSI を示すと考えられる．よって，短期間だけでなく，長期間における分析も行う必要がある．

参考文献

[1] Patel, Keyur K and Patel, Sunil M and others : Internet of things-IOT : definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges.

[2] Jean-Christophe Eloy : MEMS デバイスの進化はどこまでいくのか？.

[3] Mohit Saxena, Puneet Gupta, Bijendra Nath Jain : Experimental Analysis of RSSI-based Location Estimation in WWireless Sensor Networks (2008).

[4] Gautham K, Raghav G, Krishnamurthy V, Raajan N : Personnel Security System using Bluetooth Low Energy (BLE) Tag (2013)

[5] 松本 直也, 川崎 慈英, 猿渡 俊介, 渡辺 尚 : 複数の IEEE 802.15.4 端末間の RSSI を用いた混雑度推定手法の検討 (2018).

[6] INGICS Technology : https://www.ingics.com/ (参照 2019 年 2 月 1 日).

[7] 田中 博, 風間 宏志, : よくわかるワイヤレス通信 (2009).