

RFID タグシステムによる 閉所空間における転倒状態検出法の提案

鍛冶良作^{†1} 廣田清美^{†1} 西村拓一^{†1}

RFID タグシステムを利用して、他人の目が届かない閉鎖された空間で人が転倒し動けない状態をロバストに検出する方法を提案する。本手法は、RFID タグとタグリーダを環境に設置して微弱な受信電界強度の変化を測定するため、被検出者にはセンサを装着する必要がない。洗面所において受信電界強度値が転倒状態とその他の状態で大きく乖離するようなタグとリーダの配置決定の一手法を提案し、転倒状態抽出のための受信電界強度の閾値を決定する。さらに、時間幅・電界強度変動幅に基づく条件式を提案し、電界強度の閾値と組み合わせることにより、運動状態を含めた中から転倒状態を誤りなく検出することが可能であることを示す。本手法の妥当性を確認するため、連続稼働実験を通して、検出成功率の時間・電界変動幅依存性を調査する。

Proposal of Detection Method of the State of Fall in Closed Space with RFID Tag System

RYOSAKU KAJI,^{†1} KIYOMI HIROTA^{†1}
and TAKUICHI NISHIMURA^{†1}

Using RFID tag system, we propose a new method to detect a fallen and immovable person robustly in a closed space where no help from others is expected. The main feature of this method is that no sensor needs to be attached to the person because not only tag readers but also RFID tags are installed in the environments. The method can achieve robust detection by analyzing the strength of electric field arrived from each RFID tags. A brute-force method to decide positions of tags and readers is proposed. It deploys multiple tags in the environment and several persons are asked to behave various postures including fallen one. It decides the device positions on condition that all fallen states should be detected robustly using as small number of tags as possible. In addition, we propose a method to detect immovable status by observing the electric field strength fluctuation which is measured in a real lavatory. In order to confirm the validity of the proposed method, we investigate the detection success rate through long-term experiments.

1. はじめに

多くの特別養護老人ホームや病院では、看護師や介護士が24時間体制で看護を行っている。しかし、トイレや洗面所などでの夜間の転倒事故は、発見までに時間がかかることが避けられない^{1)–4)}。夜間の転倒事故の防止や早期発見のために、看護師の巡回を密にすることも考えられる。しかし、既存の人材で巡回業務を増加させる場合、過度な負担の増加がヒューマンエラーを誘発することも指摘されている^{5),6)}。早期発見のために巡回の間隔を短くしても、深夜の転倒が巡回直後に起こる場合には、結局、次の巡回まで発見することができない。実際、巡回の増加という対策にもかかわらず、転倒・転落事故は介護老人保健施設における事故の実に73%の割合を占めていることが報告されており⁷⁾、死亡あるいは生命予後への悪影響の原因となっている⁸⁾。

こうした状況下でセンサ技術およびネットワーク技術を融合させて、高齢者の見守りや看護・介護者の活動を情報技術的な側面から支援しようという機運が高まっている^{9)–13)}。これらの技術を深夜帯の転倒事故の早期発見や予防に応用できれば、老人の安全・安心を確保しつつ、看護師・介護士の負担軽減に大きく貢献できると考えられる。そこで、本論文では、トイレや洗面所などの閉所空間で転倒し動けない状態（自ら緊急ボタンも押せない状態）を検出することを目標とする。

文献9), 10)では、転倒のメカニズムを調査するために、人体装着型の転倒検出センサが提案されている。しかしながら、一般的にホームの入居者や入院患者にセンサを強制的に装着させることは好ましくない⁷⁾。

人体にセンサを装着させずに転倒を検出するために、環境側に各種センサを設置することが考えられる。カメラやマイクは代表的な環境監視型のセンサであるが、トイレなどでは、プライバシーの問題がある^{13),14)}。一方、赤外線センサ、焦電センサは設置位置を工夫することで転倒状態を検出できる可能性があるが、虫や蜘蛛が受光部に入ると誤報を鳴らす、汚れに弱いという弱点があるほか、周囲温度が高くなると誤作動が多くなることが知られている^{11),12),15)}。誤報は看護師・介護士の負担を増加させシステムの信頼性を低下させるため、ロバストな転倒検出法が必要とされていた。

^{†1} 独立行政法人産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

そこで、本論文では、環境センサのみでロバストに転倒を検出する RFID タグシステムを用いた手法を提案する．ここでは、タグリーダーで受信した電界強度から人の姿勢の通常状態と転倒状態を判別できるように、タグとリーダーを配置する．タグからの電界強度は誘電率、体積が大きい人体により大きく変化するが、誘電率、体積が小さな虫や汚れによる強度変化は小さいため、ロバストな転倒検出が可能である．

本手法のように RFID システムを用いた手法として、田中ら¹⁶⁾ は、モノの動きや状態の変化と連動してアクティブ RFID タグの発信電波を遮蔽する手段を設けることにより、アンテナでの受信強度を微弱化させ、対象の状態を検出するシステムを提案した．このシステムによると、ドアが開るとアルミ板がタグを遮蔽するような位置にあらかじめ設置し、電波が受信できなくなることで、ドアが閉まっている状態を検出できるので、状態検知のためのセンサを別途用意する必要がない．しかしながら、人が転倒する姿勢は様々であり、これに連動するようなタグの遮蔽手段を用意することは困難であると考えられる．

また、池田ら¹⁷⁾ は、一対の固定の送受信機を使用して屋内の人の在・不在を精度良く検出するための方法を提案した．このシステムでは、受信機にアレーアンテナを使用して検出精度を高めることが可能な手法であるが、複数の発信機が、電波帯域を共有して情報を送ることができる多元接続を利用していないために、転倒など特定の姿勢を把握するための設置位置を決定する作業が非常に煩雑になる可能性が大きく、現在のところ、そのような用途には使用されていない．

これらの手法と比較すると、本提案手法は、発信機と受信機を環境に設置することは共通するが、電波の遮蔽手段を別途用意する必要がない点、多元接続性を有している点が異なっており、RFID タグ近傍の人の姿勢をロバストに（誤りなく）把握するという用途に特徴がある．

以降、2 章では RFID タグシステムによる転倒検出法を提案し、3 章では、タグとタグリーダーの配置決定のための一手法を提案する．4 章では、連続稼働実験の結果を示すとともに区間変動幅によるフィルタを用いて運動状態を含めた通常の状態から転倒状態だけを誤りなく検出する一手法を提案し、その適用結果から本手法の有効性を示す．5 章でまとめと今後の課題を示す．

2. RFID による転倒検出法の提案

本論文では、夜間など人気のない時間にトイレや洗面所などの閉所空間で転倒し動けなくなっている状態を検出することを目標とし、環境センサのみでロバストに転倒を検出する

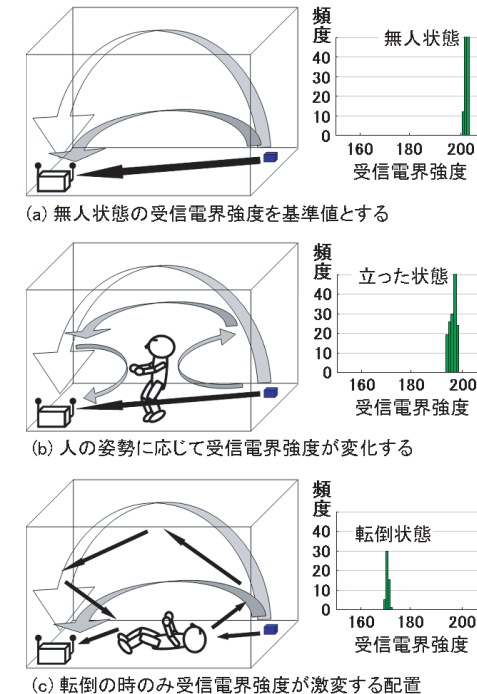


図 1 RFID による転倒検出法の概要
Fig. 1 Outline of fall detection method with RFID.

RFID タグシステムを用いた手法を提案する．以下、提案手法の概要と利点を示す．

2.1 提案手法の概要

本提案では、図 1 (a) に示すように、転倒検出が必要な閉所空間にタグ数枚とタグリーダーを壁や壁内などに設置する．複数のタグはそれぞれの ID を定期的に微弱な電波に載せて発信する．タグリーダーでこれらの受信信号の電界強度を測定し続ける．図 1 (a) のような無人状態では、図 2 の (1) 区間のように受信電界強度はほぼ一定の値をとる¹⁸⁾．今、図 1 (b) に示すように、人体（誘電率約 80）が空間内に侵入し動作し始めると図 2 の (2) 区間のように受信電界強度は大きく変動する．その後、人物が外に出ると図 1 (a) の状態になり、電界強度も図 2 の (3) 区間のように、ほぼ図 2 の (1) 区間と同様の強度に戻る．しかし、人物が空間に侵入後、図 1 (c) のように転倒して動けなくなると、図 2 の (4) 区間の後、(5) 区

間のように強度の時間変化は小さく、かつ直前の無人状態と異なる受信電界強度値となる。本手法では、この時間変化が小さいことと、正常時と異なる受信電界強度値を検出することで転倒状態を検出する。

このためには、タグとリーダを適切に配置することが必要である。洗面所のような閉空間ではマルチパス効果が顕著になり、タグとタグリーダ間の物体により、電波を遮蔽して受信電界強度が低下する場合だけでなく、逆に大きくなる場合もある¹⁹⁾。そのため、タグとリーダの最適配置は容易ではない。事前に空間の壁や物体の誘電率を測定し正確な空間モデルをもとに電界強度の3次元シミュレーションを行って最適配置を決定することも考えられるが、空間モデルの作成も3次元シミュレーションも現状では莫大な手間がかかり実用的とはいえない。そこで、本論文では、RFID タグの多元接続性を活用して、実環境に多数のタグを敷設しリーダで電界強度を同時計測することで、転倒状態だけに反応するタグ配置を決定する手順を示す。また、転倒状態検出法の一例を示し、本手法によりロバストな転倒状態検出法を実現できることを示す。

2.2 提案手法の制約と利点

本提案では、電波の波長として数 m 程度、かつ図 1 (a) に示すように、波長の数倍程度の閉空間の場合に最も効果的である。これは、マルチパスの影響だけでなくタグおよびリーダのアンテナ近傍に誘電率の高い人体が近づくことで、アンテナの放射特性が大きく変化する現象を最大限利用できるからである。

また、本転倒検出法の利点を以下に列挙する。

- 人体への装着負荷がなく、プライバシー問題が小さな手法である。

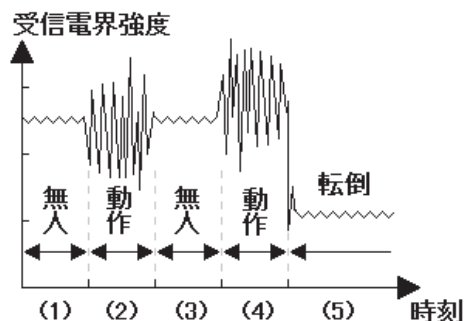


図 2 受信電界強度の時間変化
Fig. 2 Time variation of electric-field-strength.

- 人体が最も大きな誘電体となる閉空間では、ロバストな検出が可能である。
- RFID タグに加速度センサなどのセンサを搭載する必要がなく、通常のタグからの ID 受信強度そのものの変化から検出可能である。
- 電場の飛距離は数 m で十分であるため、現状の RFID システムより省電力化、つまりバッテリー長寿命化が可能である。
- 発信機と受信機の設置位置の決定は通常、発信機の設置候補位置数 m と受信機の設置候補位置数 n を乗じた回数の測定を行う必要があるが、RFID タグの多元接続性を活用することで、受信機の設置場所 1 つについて 1 回の同時測定で、複数の送信機の適切な位置を決定できる。

3. タグ・リーダの配置決定

転倒状態を検出するためには、RFID タグとタグリーダの配置を適切に決定することが重要である。シミュレーションによる配置決定も考えられるが、現実的には高精度なモデル化が困難であり、計算量も現実的ではない。そこで、本論文では、RFID タグの多元接続性を活用して、実環境に多数のタグを敷設し、1 度の電界強度測定で転倒状態検出に適切なタグを選択する手順を示すとともに、リーダのアンテナ位置も同様の作業の反復で適切な配置を決定する手順を示す。初めに実験装置および基本特性を示す。次に、実環境における配置決定手順を示す。

3.1 実験装置

現時点で入手可能な RFID タグシステムとして表 1 に示す RFID タグ、および表 2 に示

表 1 使用したアクティブ型 RFID タグの仕様
Table 1 Spec of active type RFID tag used.

アクティブ型 RFID タグ (キュービックアイディ社 LAS-300T)	
タグ種	LAS300T
送信間隔	1 秒 (ジャンパにて設定変更可能)
送信周波数	315.1 MHz
変調方式	FSK
送信出力	微弱電波 (500 μ V/m 以下 3 m 法)
外形寸法	47.8 (幅) \times 28.6 (奥) \times 8.8 (高) [mm]
質量	約 11 g (CR2032 含む)
電源	ボタン電池 (CR2032) 1 個
アンテナ	ボタン電池ケース兼用型

表 2 使用したアクティブ型 RFID リーダの仕様
Table 2 Spec of active type RFID reader used.

アクティブ型 RFID リーダ (キュービックアイディ社 LAS-300R)	
タグ識別回数	最大 50 個/秒
外部 IF	RS-232C / LAN (10BASE-T)
受信周波数	315.1 MHz
受信距離	伝搬見通しのよい環境で 7 m
その他	タグごとに受信電界強度を 256 段階で出力可能
外形寸法	152.0 × 116.9 × 30.0 [mm]

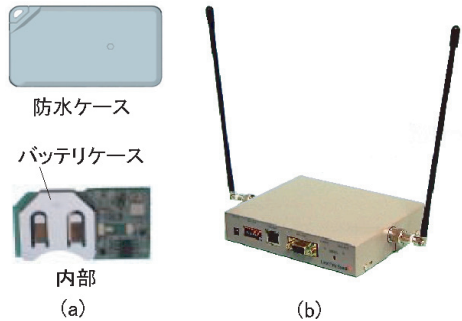


図 3 装置の概観 . (a) RFID タグ, (b) タグリーダ
Fig.3 General view of device. (a) RFID tag, (b) Tag-reader.

すタグリーダを用いて実験した .

それぞれの概観を図 3 (a) , (b) に示す . RFID タグは図 3 (a) に示すようにボタン電池のバッテリーケースとその周辺回路が電波を出すアンテナになっている . タグリーダは図 3 (b) に示すようにホイップ型アンテナを 2 本使用してダイバーシティ受信を行う .

RFID タグは , 縦に立てた状態で水平方向への電波強度が大きくなるように設計されている²⁰⁾ . 垂直偏波のみが強いいため , タグとリーダのアンテナとの相対的な方向が変化すると , 同じ距離でも電界強度値が変化する . また , 人体に添付することによって , 放射特性が大きく変化すると予測される . さらに , 周囲が反射の大きな材料で囲まれている場合には , 多重反射の影響で放射特性からは電磁界分布を予測することが困難である²¹⁾ . 以下で示す方法は , 放射特性が正確に分からなくても適用可能である .

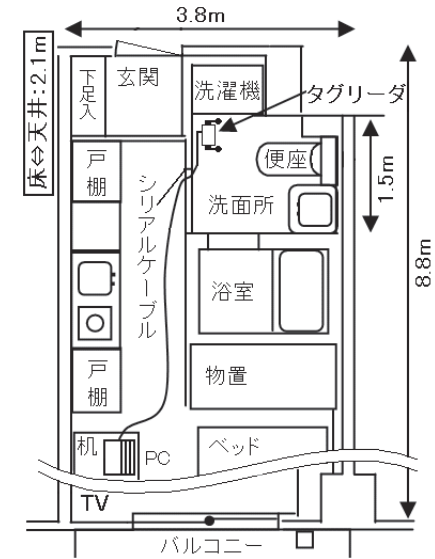


図 4 実験空間の全体図
Fig.4 Global view of the experimental space.

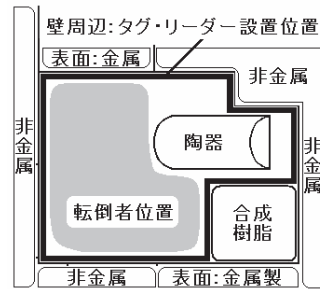
3.2 実験環境

転倒検出実験はワンルームマンションの一室で行った . 図 4 に間取りを示す . RFID タグとタグリーダを洗面所に設置し , データ取得パソコンは居間の机の上に設置した . 洗面所に設置されていた洗濯機の外皮は金属製であり , 洗面所に隣接するユニットバスは内部にも金属製の材質が使用されていた . ドアは枠組み以外は非金属であった . 洗面所の構成材料の概略は図 5 のとおりである .

3.3 転倒状態と正常状態

図 6 と表 3 は , 著者らが想定した洗面所における各種状態を示したものである . 本論文では , 人が転倒し動けなくなっている状態をロボストに検出することが目標である . そこで , 転倒状態としてありうる状態を網羅した図 6 の①から⑤までの状態とその他の正常状態 (動いている状態と , ⑩, ⑪のような比較的静止している状態) とを識別できるかを検証していく .

洗面所内で想定される正常状態には , 洗濯機の前に立った状態や洗面台の前に立った状態



床・天井の材質は非金属である
転倒者の位置は床上50cm以下

図 5 洗面所の構成材料の概略

Fig. 5 Outline of composition material of lavatory.

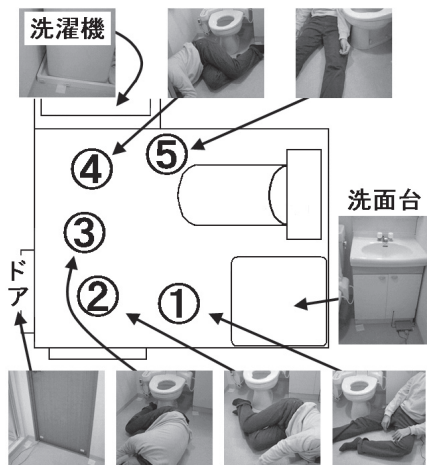


図 6 洗面所における転倒状態

Fig. 6 State of falling in lavatory.

などが考えられるが、ほとんど動かずに立位状態を長時間継続することは難しく、身体の揺れや小さな動きをともなう。この動きにより受信電界強度が時間的に変化するため、転倒して静止している状態と容易に識別できる。したがって、これらの正常状態は運動状態として考え、識別方法は別途 4.2 節で説明する。

表 3 想定した静止状態

Table 3 Assumed geostationary.

状態番号	静止状態時の姿勢
①	洗面所に誰もいない
②	洗面台に向かって転倒 (図 6 ②)
③	浴室ドアに向かって転倒 (図 6 ③)
④	洗濯機に向かって転倒 (図 6 ④)
⑤	便座と壁の間に転倒 (図 6 ⑤)
⑥	便座に座った状態

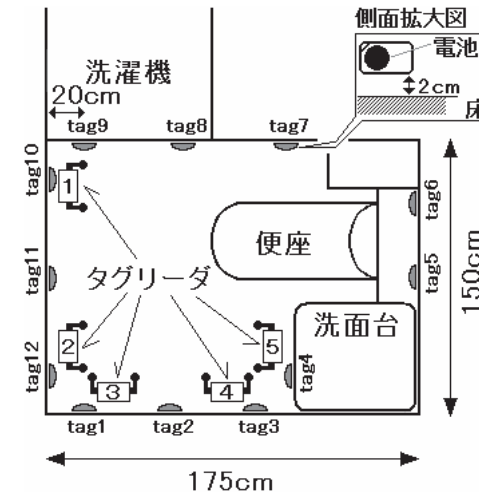


図 7 洗面所に設置した RFID タグとタグリーダ

Fig. 7 RFID tags and tag reader installed in the lavatory.

3.4 実験方法

図 7 は RFID タグとタグリーダの設置位置の概略図である。ここに、12 枚のタグは洗面所の内側の壁の床から 2 cm 上の部分に電池 (兼アンテナ) が壁に向かって左側になるように両面テープで貼り付けた (同図右上の拡大図および図 3 参照)。タグの横方向の配置関係は部屋の左右のコーナーから 20 cm の位置にそれぞれ 1 枚ずつ添付した後でその中間地点にもう 1 枚タグを添付した。よって同じ壁の面内にあるタグどうしの間隔は約 50 [cm] である。

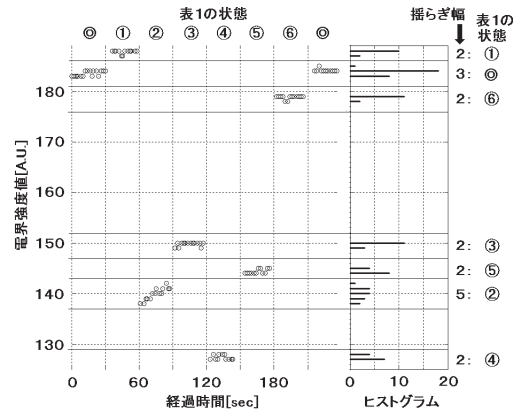


図 8 tag2 からの受信電界強度の時間変化とヒストグラム

Fig. 8 Time variation of electric-field-strength received from tag2 and their histogram.

これは使用波長の 2 分の 1 にあたる．各タグは 1 秒ごとに約 10 ミリ秒送信しているが，事前にタグどうしの発信時刻がずれるように設定した．

タグリーダは 1 台だけ使用した．図 7 の 1 から 5 の位置まで数字の順にタグリーダの位置を変えて受信電界強度を測定した．

RFID タグとタグリーダを固定配置した後は，実験協力者（身長 177 cm）が状態①から⑥を演じた．1 つの状態に対して 30 秒間の測定を行い，12 個の RFID タグの受信電界強度と人の姿勢の関係を調査して，転倒した場合にだけ受信電界強度が大きく変化するようなデバイス配置を決定する．

3.5 静止状態の時の受信電界強度の性質

図 8 は，タグリーダを図 7 の 1 に設置したときの tag2 からの受信電界強度の時間変化とヒストグラムを示している．ここに，左図の黒丸が電界強度値の測定値を示している．電界強度値は表 2 で説明したように 256 段階の整数値で出力されるため，この整数値を測定期間内でカウントしたものを右図にヒストグラムとして示した．姿勢を変えている数秒の間は電界強度値が大きく乱れるので見やすさのために左右両図から省略した．本図から分かるように，表 3 のすべての静止状態はほぼ一定の受信電界強度値をとっている．右図のヒストグラムから分かるように，最も頻度が大きなピークの ± 2 の範囲内に 1 つの静止状態が収まっている．ヒストグラムの右横には各静止状態の電界強度の揺らぎ幅を示しているが，

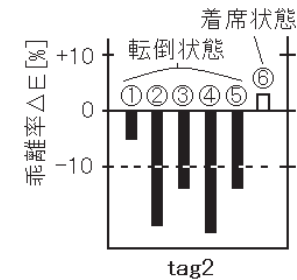


図 9 位置 1 のリーダにおける tag2 からの受信電界強度の乖離率

Fig. 9 Deviation rate of the electric-field strength received from tag2 by tag-reader 1.

状態②の時だけ揺らぎ幅が 5 と大きめである．これは被験者が腕を動かしたことによるものである．

以上から分かるように，静止状態であっても受信電界強度値には揺らぎがともなう．また，転倒状態②～⑤の受信電界強度値はその他の静止状態の受信電界強度値に比べて乖離した値をとっており，大きく 2 つの群を形成している．

3.6 無人状態の受信電界強度からの乖離率

3.6.1 tag2 をリーダ位置 1 で受信した場合

転倒が起きやすく人目が届かない場所は，無人であることが多い．このような環境に上述の装置を設置しておくで，無人状態の受信電界強度の頻度が最も大きくなる．この無人状態の受信電界強度値を基準にとり，次式で乖離率 ΔE を定義する．

$$\Delta E = 100 \times \frac{E_i - E_0}{E_0} \quad (1)$$

ここに， E_i は表 3 の状態 $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ の場合にタグリーダで測定された受信電界強度値である． E_0 は無人状態 $i = 0$ の受信電界強度値である．

図 9 は，図 8 の測定結果に式 (1) を適用した各状態の乖離率を示している．本図から分かるように，転倒状態②～⑤は下方へ 10% 以上乖離しているのに対し，転倒状態①と便座への着席状態⑥は無人状態の電界強度値から 5% 以内の低下にとどまっている．すなわち，閾値を -10% に設定することで，転倒状態②～⑤だけを検出することが可能になる．

3.6.2 tag1 ~ tag12 をリーダ位置 1 ~ 5 で受信した場合

同様の作業をすべてのタグの受信電界強度に対してを行い，さらにタグリーダの位置を図 7 の 1 ~ 5 まで変化させて乖離率を算出した²⁰⁾．図 10 は，上記の算出結果から乖離率の絶対

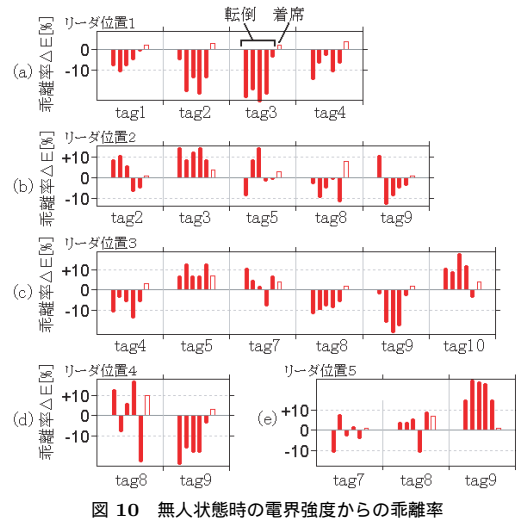


図 10 無人状態時の電界強度からの乖離率

Fig. 10 Deviation rate from the electric-field strength when no one in the lavatory.

値が 10%を超えた場合を抜粋したものである。ここに、図中 6 本の棒グラフが 1 セットで各状態の乖離率を示しており、左から順に状態①～⑥に対応している。転倒状態ではない便座着席状態⑥だけ白抜きの棒グラフにした。図 10 (a)～(e) は順にタグリーダが図 7 の 1～5 の位置で測定したものに对应する。同図 (a) タグリーダ位置 1 の tag2 のグラフは図 9 と同じものである。

図 10 (a) から分かるように、リーダの位置が 1 のとき、tag1～4 の 4 枚のうち少なくとも 1 枚が転倒状態①～⑤に対して乖離率が -10%以下になっている。これに対し、便座に着席した状態⑥に対してはともに +5%程度の値となり、無人状態とほぼ変わらない。乖離率の閾値を -10%にとれば、tag2 が tag3 の乖離率が閾値 -10%以下になった場合に転倒状態であると識別できる。

同様の考察をすべてのリーダ位置、図 10 (a)–(e) に対して行い、転倒状態の識別に必要なタグと乖離率の条件を表 4 にまとめた。本表から分かるように、基本的にはタグの枚数を増加させることで、リーダの位置が 1 から 5 まですべての位置で転倒状態とその他の静止状態とが識別可能である。また、状態の識別に必要なタグの枚数が少なくてよいリーダの位置は図 7 の 1, 4, 5 にあるとき、すなわち、金属壁の近傍にあるときであることが分かっ

表 4 各リーダの位置に対する転倒状態の判別条件と必要タグ

Table 4 The judgement condition of falling state and tags required for each reader's position.

リーダ位置	転倒判別の乖離率条件	使用するタグ番号	必要な全タグ数
1	-10%以下	tag2, tag3	2
2	+10%以上	tag3	3
	-10%以下	tag8, tag9	
3	+10%以上	tag4, tag8, tag9	4
	-10%以下	tag5	
4	+10%以上	tag8, tag9	2
5	+10%以上	tag9	1

た。特に注目したい点は、タグとリーダの間に転倒物体があっても電波は遮蔽されず、逆にエンハンスされる場合が存在することである。具体的には、リーダ位置 5 で tag9 の受信電界強度を観測する場合である。このとき、便座に座った状態は乖離率が 1%程度であるのに対し、転倒時の乖離率はすべてプラス 10%以上である。これは、転倒物体が不在の場合に比べて受信電界強度が 10%以上強くなったことを示している。この原因は、転倒物体による散乱のためにマルチパス環境が変化するためか²²⁾、転倒物自体がアンテナのガイドの役割を果たすためであるか、現在のところ特定できていない。

3.7 基板の配線が異なるタグへの適用結果

ここでは、仕様は表 1 と同じであるが、旧型 RFID タグを用いて、3.1 節から 3.6 節までの実験および分析を行った結果を示す。

新型タグは基板の片面だけに配線がなされているのに対し、旧型タグは基板の両面に配線がある。

図 11 は、リーダ位置が 1 のとき、表 3 の状態①～⑤のいずれかの状態に対して (1) の乖離率の絶対値が 10%を超えたタグについての乖離率を示している。本図から分かるように、転倒状態の判別に利用できるタグの位置は、図 12 に示すように、tag3 と tag6 になった。これは新型タグの結果 (表 4 のタグリーダ 1) と異なっていることに注意されたい。

tag3, tag6 の無人状態の受信電界強度値はそれぞれ、 $E_0 = 202, 180$ となり、 $\Delta E = -10 [\%]$ を考慮して、tag3, tag6 の閾値はそれぞれ、 $E_{th} = 181, 162$ となった。tag3 または tag6 の少なくとも一方の電界強度がそれぞれの閾値を下回れば、転倒状態である。

すなわち、静止状態から転倒状態を抽出する条件式は以下で与えられる。

$$(E_{tag3} < 181) \cup (E_{tag6} < 162) \quad (2)$$

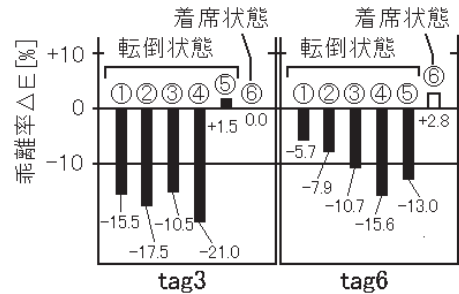


図 11 位置 1 のリーダにおける tag3 と tag6 からの受信電界強度の乖離率

Fig. 11 Deviation rate of the electric-field strength received from tag3 and tag6 by tag-reader 1.

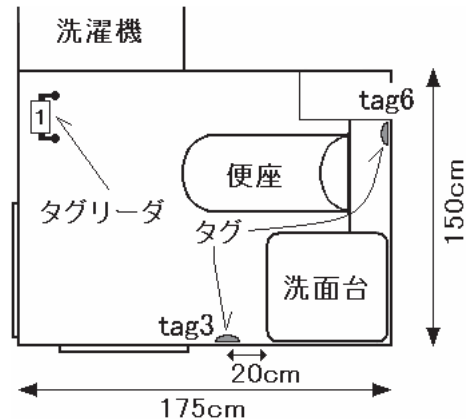


図 12 転倒状態検出可能な RFID タグとタグリーダの配置の一例

Fig. 12 An example of the deployment of RFID tag and tag reader that can detect fallen state.

以上から、タグの基板の配線が変わると、近傍界の性質も大きく変化することが分かる。また、特性が違う 2 種類のタグに対して本章の配置決定方法が有効であることが分かる。次章ではこの旧型タグを用いて連続稼働実験を行う。

4. 転倒状態の検出

3 章では、静止状態の中から転倒状態を判別するためのタグ配置の決定方法を示し、2 種

類のタグについてその有効性を確認した。本章では、3.7 節で求めた旧型タグとその配置を用いて、運動状態を含んだ状態の中から転倒状態を判別する方法を提案するとともに、連続稼働実験を行って提案手法の有効性を示す。

4.1 連続稼働実験

図 13 は 45 分の間に実験協力者（身長 177 cm と 155 cm）が洗面所内で合計 8 回、転倒した姿勢を 1 分間または 30 秒間継続したときの受信電界強度値の時間変化とそのヒストグラムを示したものである。ここで、図 13 (a), (b) はそれぞれ tag3, tag6 のデータである。図の上部に実際に転倒があった時間帯を示し、括弧なしの番号をつけた。図中には、条件式 (2) を満たした時間帯を示し、括弧付きの番号をつけた。なお、条件式 (2) を満たした時間帯の抽出は、以下の手順 (A)–(E) のとおりである。

- 手順 (A) 時刻フラグを初期化して 0 を代入する。
- 手順 (B) データを時系列順に読み込む。
- 手順 (C) 時刻フラグが 0 の場合、条件式 (2) かつ (5) を満たした時刻を開始時刻とし、時刻フラグを 1 に設定し、手順 (B) に戻る。
- 手順 (D) 時刻フラグが 1 の場合、条件式 (2) かつ (5) を満たさなくなった時刻の 1 秒前を終了時刻とし、開始時刻から終了時刻までを時間帯として抽出し、時刻フラグを 0 に戻し、手順 (B) に戻る。
- 手順 (E) 手順 (B) に戻る。

ただし、1 つの転倒時間帯に条件式を満たす時間帯が複数存在する場合には、転倒検回数として重複してカウントしないようにする。

図 13 (a), (b) から分かるように、合計 23 回の時間帯が条件式 (2) を満たしている。実際に転倒した時間帯に含まれない時間帯は、図 13 (a), (b) 中の (1), (5), (13), (19), (23) の独立した 5 つの時間帯である。これらは誤り信号である。8 回の転倒時間帯には少なくとも 1 つの時間帯が存在した。よって、転倒検出成功率は $8/(8+5) = 0.615$ である。

転倒検出成功率の低さ原因は、1 つの静止状態からもう 1 つの静止状態に姿勢を入れ替える動作で電界強度が大きく変化し、閾値を下回るからである。通常の生活ではこのような連続動作が不可避である。よって、条件式 (2) だけでは、転倒状態の検知を誤作動なく行うことができない。以下ではこれを克服する方法を示す。

4.2 期間変動幅フィルタ

3.6, 3.7 節で確認できたように、洗面所で転倒して動けない状態は、閾値を決めることによってその他の静止状態から分離可能である。しかしながら、4.1 節では、動作状態もまた

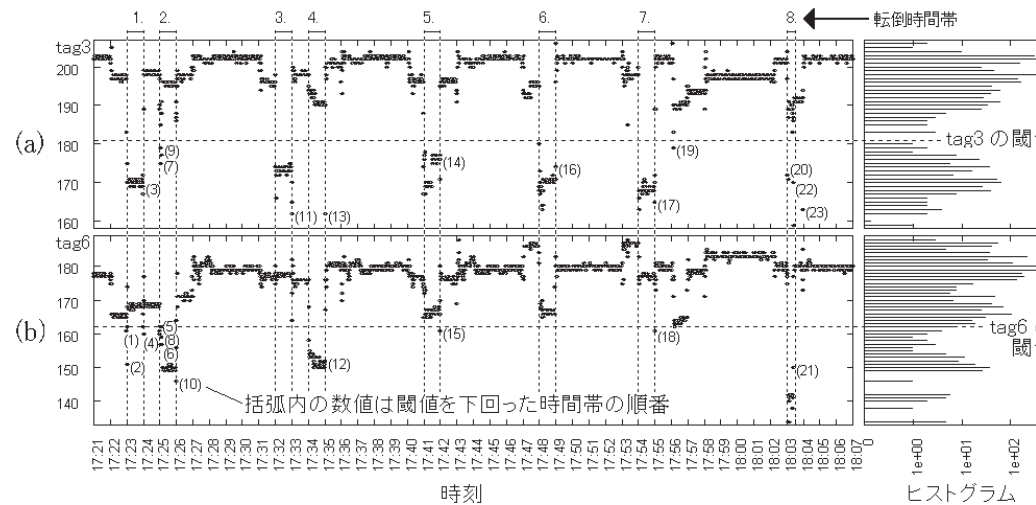


図 13 45 分の間に 8 回転倒したときの RFID tag3 (a) と tag6 (b) の電界強度値とヒストグラム
 Fig. 13 Electric-field-strength of RFID tag3 (a) and tag6 (b) and their histogram when there were eight falls in 45 minutes.

閾値を超える場合があることを示した．通常の生活空間では転倒状態と運動状態とを区別する方法が必要になる．

ここで，転倒して動けない状態は，静止状態であることに着目する．3.5 節で確認したように静止状態におけるすべてのタグの電界強度の変動幅は，ある期間 Δt 全域にわたって小さな範囲に収まっている．これを条件式として表すと以下のようになる．

$$\max_{t_0 - \Delta t < t < t_0} [E_{tag3}(t)] - \min_{t_0 - \Delta t < t < t_0} [E_{tag3}(t)] < E_{dif} \quad (3)$$

$$\max_{t_0 - \Delta t < t < t_0} [E_{tag6}(t)] - \min_{t_0 - \Delta t < t < t_0} [E_{tag6}(t)] < E_{dif} \quad (4)$$

$$(3) \cap (4) \quad (5)$$

ここに， t_0 は着目した期間の最新の時刻， E_{dif} は，静止状態の変動幅，すなわち， Δt 期間内における電界強度の最大値と最小値の差である．3.5 節の分析を 3.7 節の旧型タグに行い， $E_{dif} = 5$ となった． Δt は任意の連続した 10 秒間を示しているが，このパラメータは，転倒状態が何秒続いた場合に抽出するかを決定するパラメータであり，必要に応じて変更する．今回は転倒継続時間が最短で 30 秒であったため，これを抽出するために短めの期間 $\Delta t = 10$ 秒に設定した．

以上から，転倒状態を検出するには，静止状態であり，かつ電界強度が下方へ大きく乖離しているということを考慮して，条件式 (2) かつ (5) を適用すればよい．

4.3 適用結果

図 14 は，図 13 のデータに条件式 (5)， $E_{dif} = 5$ ， $\Delta t = 10$ を適用したものである．ここで，図 14 (a)，(b) はそれぞれ tag3，tag6 のデータである．図の上部に実際に転倒があった時間帯を示し，括弧無しの番号をつけた．図中には，条件式 (2) を満たした時間帯を示し，括弧付きの番号をつけた．本図から分かるように，姿勢を変える際に生じる動作や洗面所に入出入りする動作が除去され，それぞれの閾値 181，162 を境界にしてヒストグラムが 2 つの群に明瞭に分離している．閾値を下回った時間帯数は 23 から 9 に減少し，合計 8 回の転倒時間帯に 1 つずつ含まれている．ただし，図 14 (a) の (5)，(6) については，1 つの転倒時間帯に属している．この理由は，転倒中に時刻を確かめるために時計を見るために 1 度腕の位置を動かしたことによるものである．合計 8 回の転倒はすべて正確に検出されており，転倒時間帯以外では転倒信号は検出されていない．よって転倒検出成功率は 100% である．

最後に，静止状態の時間幅 Δt および変動幅 E_{dif} の性質について考察する．図 15 は転倒検出成功率の時間幅 Δt および E_{dif} 依存性を示したものである．ここで，転倒検出成功

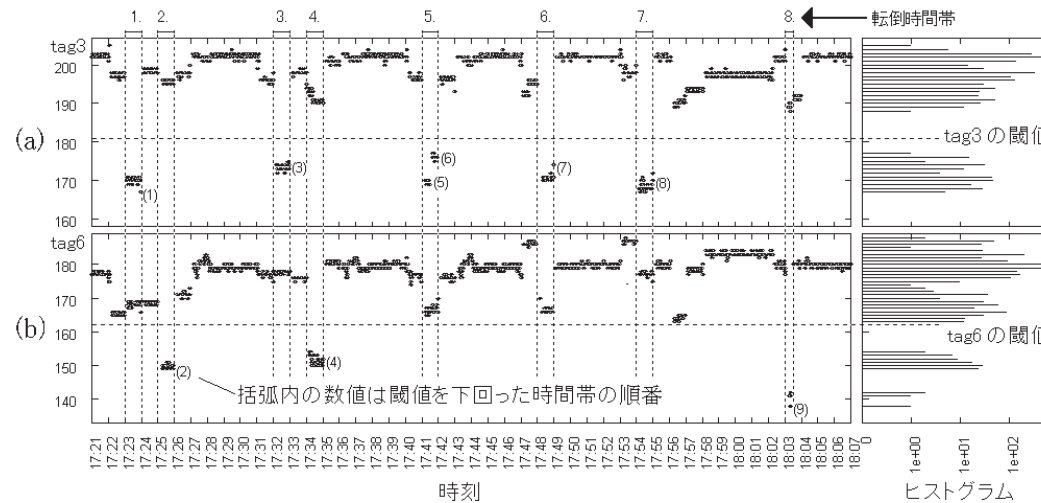


図 14 RFID tag3 (a) と tag6 (b) の長時間のデータを静止状態でフィルタ
 Fig. 14 Filtering long-time data of RFID tag3 (a) and tag6 (b) by still state.

率 P_{suc} は、以下の式で定義される。

$$P_{suc} = \frac{N_{suc}}{N_{real} + N_{fail}} \quad (6)$$

ここに、 N_{real} は実際に転倒していた時間帯数、 N_{suc} は実際に転倒していた時間帯のうち条件式 (2) かつ (5) が満たされた数、 N_{fail} は条件式 (2) かつ (5) が満たされているにもかかわらず、実際に転倒していた時間帯に含まれなかった時間帯数である。なお、一般的な性能尺度として知られている再現率： N_{suc}/N_{real} 、精度： $N_{suc}/(N_{suc} + N_{fail})$ と式 (6) との関係は、それぞれ、以下の式で与えられる。

$$P_{suc} \leq \frac{N_{suc}}{N_{real}}, \quad N_{fail} \geq 0 \quad (7)$$

$$P_{suc} \leq \frac{N_{suc}}{N_{suc} + N_{fail}}, \quad N_{real} \geq N_{suc} \quad (8)$$

式 (6) は、再現率、精度、いずれの指標よりつねに小さいか等しくなり、誤検出がゼロ ($N_{fail} = 0$) のとき、再現率に一致し、再現率が 1 ($N_{suc} = N_{real}$) のとき、精度に一致する。すなわち、式 (6) は、再現率、精度を内包した指標である。

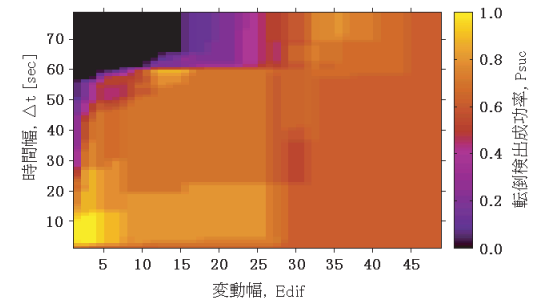


図 15 転倒検出率の E_{dif} (静止状態の変動幅) 依存性
 Fig. 15 Dependence of detection rate of falling on E_{dif} .

なお、1 つの転倒時間帯の中に上記の抽出した時間帯が複数存在する場合がある。この場合には、重複分の時間帯は N_{suc} としてカウントしないようにすることで、 $N_{real} \geq N_{suc}$ を満たす。

図 15 から分かるように、時間幅が 4 以上 10 以下でかつ変動幅が 1 以上 4 以下で転倒検

出成功率は 100%になる。

同図縦軸、静止状態の時間幅 Δt が 4~10 秒の場合、静止状態の変動幅 E_{dif} が大きくなるにつれて、検出成功率は徐々に低下して 60%程度になる。これは、変動幅を大きくとればとるほど、静止状態だけでなく、動いている状態をも検出することになるからである。変動幅を程度に調整することで、まったく動けない状態ではないが、倒れてもがいているなど緊急の助けが必要な状態を検出できる可能性がある。

同図横軸、静止状態の変動幅 E_{dif} が 1~3 の場合、静止状態の時間幅 Δt が大きくなるにつれて、検出成功率は徐々に低下して時間幅 60 秒付近から 0 になる。これは、今回の実験で最も長い静止状態が 60 秒間の転倒状態であるため、これより長い静止状態が存在しないからである。実験では、姿勢を変えるために数秒を要しているために静止している時間は 50 秒程度であったため、時間幅 50 秒以上から急速に検出成功率が低下している。また、1 回の転倒だけは 30 秒以内で打ち切ったのを反映して、時間幅 30 秒近辺から検出成功率が段階的に低下している。これも、姿勢を変えるための時間を指し引くと倒れて静止していた時間は 10 秒程度となり、検出性効率 100%は時間幅 10 秒までになっている。

以上の結果から分かるように、静止状態の時間幅と変動幅を複数設定しておくことによって、完全に動けない転倒状態、ある程度動ける転倒状態、短期間の静止状態を区別して抽出し、緊急の通知が必要な事象を選んで介護師に通知することが可能になる。これは、特に夜間の介護師の見回り負担を軽減することに貢献できる。また、個々人の行動パターンを被験者に煩わしい計測装置を装着させずに、収集・分析する非常に有効な手段となる。特に、異常行動につながる前兆行動が抽出できれば、転倒検出というよりもむしろ転倒予防に貢献できると考えられる。

5. おわりに

RFID タグシステムを利用して、他人の目が届かない閉鎖された空間で人が転倒して動けない状態を口バストに検出する方法を提案した。本手法は、RFID タグとタグリーダを環境に設置して微弱な電界強度の変化を測定するため、被検出者にはセンサを装着する必要がない。実際の洗面所において受信電界強度値が通常の静止状態と転倒状態で大きく乖離するようなタグとリーダの配置決定の一手法を示し、実験で通常の静止状態と転倒した静止状態を判別可能な電界強度の閾値を決定した。さらに、運動状態と静止状態とを区別するために静止状態の時間幅・電界強度変動幅という 2 つのパラメータを有する条件式を提案し、前出の電界強度の閾値と組み合わせることにより、連続稼働させた状態で転倒状態を誤りなく検

出するパラメータの決定方法を示した。介護施設での転倒の大部分をカバーするためには、ベッド周り、廊下での転倒検出や転倒予防が必要となる。これらは今後の課題とする。

謝辞 本研究の一部は NEDO からの平成 20 年度産業技術研究助成事業により実施した。また、本研究の一部は住友電気工業株式会社との平成 18 年度の試験研究「安全安心情報技術に関する研究」により実施した。RFID タグの位置に関する有益な助言をいただきました産業技術総合研究所清水三聡様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Fine, W.: An analysis of 277 falls in hospital, *Geront. Clin.*, Vol.1, pp.292-300 (1959).
- 2) Fine, W.: Geriatric ergonomics, *Geront. Clin.*, Vol.14, pp.322-332 (1972).
- 3) 鈴木みずえ, 江口 清, 岡村カルロス竹男, 嶋津祐子, 高橋秀人, 加納克己, 土屋 滋: 高齢者の転倒経験に関する研究調査—養護老人ホームの居住者を対象として, *日本公衆衛生雑誌*, Vol.39, No.12, pp.927-940 (1992).
- 4) 奥奈津代, 安田久美, 阿部マキ, 川中稚須, 竹迫チエ子, 福永智子, 東さとみ, 吉松昌代, 岩崎フジ子, 猪鹿倉武: 老人病院における転倒について—転倒件数報告書とスタッフの意識調査を比較して, *日本精神科看護学会誌*, Vol.45, No.2, pp.510-514 (2002).
- 5) 品地智子: 術後患者: 事故報告からの分析 (特集もう安心! 転倒・転落を防ぐ), *月間ナーシング*, Vol.21, No.6, pp.24-26 (2001).
- 6) 泉キヨ子: 患者の立場に立った予防ケアとしての転倒・転落防止対策, *看護 (Official Journal of the Japanese Nursing Association)*, Vol.56, No.13, pp.40-42 (2004).
- 7) 社団法人全国老人保健施設協会: 第 4 章身体拘束とリスクマネジメント, *リスクマネジメントマニュアル'06 年版—CD-ROM 付—*有限会社全老健共済会, pp.57-60 (2006).
- 8) 鈴木みずえ, 高橋秀人, 加納克己: わが国における転倒事故死に関する記述易学的研究, *医学と生物学*, Vol.126, No.5, pp.255-258 (1993).
- 9) 吉村拓巳, 堀内郁孝, 東 祐二, 中島一樹, 藤元登四郎, 千原國宏, 田村俊世: 老人転倒モニタの開発とその評価, *電学論 C*, Vol.120-C, No.12, pp.1846-1853 (2000).
- 10) 田村俊世: 長寿社会に向けた生体計測とセンサ, *電学論 E*, Vol.123, No.2, pp.37-42 (2003).
- 11) 影山芳之, 町田洋子, 森田 敦: 高齢者介護施設における転倒事故防止のための人体検出装置の有用性について, *東海大学紀要開発工学部*, Vol.14, pp.47-51 (2004).
- 12) Harrop, P., Das, R. and Holland, G.: *RFID in healthcare 2006-2016*, IDTechEx Ltd. (2005).
- 13) 佐藤貢一, 末田隆敏, 池田由華, 今井 博, 長瀧慶明: 医療・福祉施設を対象にした RFID 技術の適用実験, *大成建設技術センター報*, Vol.39 (2006).
- 14) Fogarty, J., Au, C. and Hudson, S.E.: Sensing from the basement: A feasibility

- study of unobtrusive and low-cost home activity recognition, *Proc. 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.91–100 (2006).
- 15) 奥田晋也, 金田重郎, 芳賀博英: アナログ型焦電センサによる人間の室内位置・身長
の判別法の提案, 情報処理学会研究報告, Vol.2004, No.112, pp.1–8 (2004).
 - 16) 田中 博, 五百蔵重典, 谷中一寿: 遮蔽による受信強度変化を利用した状態検知方式—
扉, 窓の開閉状態の遠隔モニタへの適用とその実証, マルチメディア, 分散, 協調とモ
バイル (DICOMO2008) (2008).
 - 17) 池田昇平, 辻 宏之, 大槻知明: 信号部分空間を張る固有ベクトルを用いた屋内イベ
ント検出, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS, 無線通信システム, Vol.107, No.38,
pp.13–17 (2007).
 - 18) 小西勇介, 中尾敏康, 田口大悟: “リファレンスタグ”を用いたアクティブ RFID タグ
検知精度向上方式, FIT2005 情報科学技術レターズ, pp.311–314 (2005).
 - 19) Fontan, F.P. and Espineira, P.M.: *Modeling the wireless propagation channel*, Wiley
(2008).
 - 20) 鍛冶良作, 廣田清美, 西村拓一: RFID タグシステムによる閉空間における転倒状態
検出法の提案, 情報処理学会研究報告, Vol.2008, No.110, pp.73–80 (2008).
 - 21) Fiumara, V., Fusco, A., Matta, V. and Pinto, I.M.: Free-space antenna
field/pattern retrieval in reverberation environments, *Antennas and Wireless Prop-
agation Letters*, IEEE, Vol.4, pp.329–332 (2005).
 - 22) Henty, B.E. and Stancil, D.D.: Multipath-enabled super-resolution for rf and mi-
crowave communication using phase-conjugate arrays, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.93,
No.24, p.243904 (2004).

(平成 21 年 03 月 28 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



鍛冶 良作

1996 年北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。現在,
産業技術総合研究所情報技術研究部門にて, 微弱電磁波による異常状態検
出技術に関する研究に従事。

廣田 清美

2005 年産業技術総合研究所入所。情報技術研究部門に配属。現在, 微弱電磁波を利用し
た異常状態検出技術に関する研究補助に従事。



西村 拓一 (正会員)

2001 年産業技術総合研究所入所, 2005 年同情報技術研究部門実世界指
向インタラクショングループ長, 2009 年 NEC 出向。時系列データ検索・
認識, 実世界情報支援に興味を持つ。