バッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグの提案

小林 有理¹・馮 東方¹・武田 茂樹²・鹿子嶋 憲一³・梅比良 正弘⁴

¹ 非会員 茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

² 正会員 茨城大学教授 工学部メディア通信工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: shigeki.takeda.tmkyou@vc.ibaraki.ac.jp

³ 非会員 茨城大学名誉教授 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: kenichi.kagosima.em21@vc.ibaraki.ac.jp

⁴ 非会員 茨城大学教授 工学部メディア通信工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: masahiro.umehira.dr@vc.ibaraki.ac.jp

近年, IoT (物のインターネット) と呼ばれる概念が提唱され, インフラ保守においても利用されることが期待できる. 本論文では, UHF 帯パッシブ RFID とセンシング技術を組み合わせることで, バッテリーレスの無線センシングを可能とする技術を提案する. ここでは, インフラ保全において重要と考えられる傾斜/振動センサの実現を目的とする. 提案するバッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグは, アンテナ特性を傾斜/振動センサにより変化させ, 一体で設置される基準タグの特性と比較することで, アンテナ特性変化に起因する RFID タグの特性変化を検出し, 傾斜や振動を検出するものである.

Key Words: UHF RFID, passive, battery-less, inclination and vibration sensor, wireless, IoT

1. まえがき

近年, IoT (Internet of Things, 物のインターネット) と呼ばれる概念が提唱され, インフラ保守においても利用されることが期待できる. また, IoT は, 防犯など安心安全の実現にも有効活用できると考えられる. インフラ保守における IoT は, センシングデータの収集が目的の一つとなる. さらに, 各センサとの通信は保守性や設置・敷設の容易性から, 無線化されていることが望ましい. さらに電池を用いる場合, 交換コストが問題となる. 従って, バッテリーレスでの運用が望まれる.

バッテリーレス化においては, 太陽電池の利用が考えられるが, 発電量が環境に大きく依存する問題があり, 2 次電池と組み合わせて利用する必要があると考えられる. しかし, 電池のコストや経年劣化の影響などが懸念される.

従って, 本論文では, UHF(Ultra High Frequency)帯パッシブ RFID (Radio Frequency IDentification)とセンシング技術を組み合わせることで, バッテリーレスの無線センシングを可能とする技術を提案する. ここでは, インフラ保守において重要と考えられる傾斜/振動センサの実現を目的とする. これまでに, 温度や湿度センサを UHF 帯

パッシブ RFID に組み込む試みは行われている¹⁻³⁾. さらに, 人体の動きを検出するための振動センサを UHF 帯パッシブ RFID と組み合わせる試みについても行われている⁴⁾. しかし, 人体の動作確認用に設置した加速度センサの検出結果と動きセンサの結果との比較により, 動きセンサの妥当性を確認しているのみで, 実運用を目的とした提案にはなっていない.

そこで, 本論文では傾斜/振動センサと RFID を組み合わせたバッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグを提案し, さらに, 傾斜/振動の検出方法についても提案する. 提案法では, アンテナ特性を傾斜/振動センサにより変化させ, 一体で設置される基準タグの特性と比較することで, アンテナ特性変化に起因する RFID タグの特性変化を検出し, 傾斜や振動を検出する. さらに, センサタグの近傍で, センサの状態に関わらずセンサタグが検出されてしまう問題を指摘し, その解決策を提案する. 最後に, バッテリーレスセンサの最大の欠点である読み取り距離が短くなる問題を, センサタグ背後に金属板からなる反射板⁵⁾を設置することで, 2 倍程度に読み取り距離を拡大できることを示す.

2. バッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグ

図-1 に傾斜/振動センサの応用例を示す。建物や橋等に設置されたセンサの状況を人手、もしくは自動車等に搭載したリーダで読み取る。将来的には、ドローン、ロボット、及び自動運転車にリーダを搭載して、センシングデータを収集することも考えられる⁹⁾。さらに屋内において防犯のために、窓や鍵に傾斜/振動センサを取り付け、窓の振動や鍵の開閉に起因する傾斜を検出する(図-2)。図-3 に UHF 帯 RFID と傾斜/振動センサを組み合わせたバッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグを示す。IC は、Alien 社の Higgs4 Strap⁷⁾ である。アンテナについては、この IC とインピーダンス整合が取れるように電磁界解析により設計し、その後、読み取り距離が長くなるように調整した。また図-4 に動作原理を示す。詳細は後程説明する。

図-5 に傾斜/振動センサ(振動(傾斜)スイッチ RBS040200)を示す。また図-6 に傾斜/振動センサの動作原理を示す。内部の金属製のボールが A-B 間や a-b 間を短絡することで、傾きを検出できる。また、振動付加時は、ボールがこの振動に対応して跳ねるため、振動に対応して、端子間の短絡と開放を繰り返す。なお、振動検出時の初期状態においては、センサは ON か OFF のいずれかの状態にあるものとする。

図-3 及び図-4 のように、この傾斜/振動センサを IC (Integrated Circuit) の両側に配置する。図-4 の動作原理に示すように、スイッチにより、アンテナと IC との接続が切り替えられる。スイッチが OFF となり、IC がアンテナから切り離されている場合は、極めてアンテナ特性が劣化した RFID タグとなっている。一方、スイッチが ON の場合は、IC とアンテナが接続され、通常の IC タグの動作となる。従って、スイッチの ON と OFF に対応して、IC タグとして読み取れる場合と読み取れない場合が発生する。

図-1 バッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグの利用イメージ

図-2 屋内での防犯を目的とした利用イメージ

図-3 試作したセンサタグ

図-4 傾斜/振動センサタグの動作原理

図-5 傾斜/振動センサ

図-6 傾斜/振動センサの動作原理

基準タグは、センサタグと直交するように配置することで、電磁結合を抑圧している。基準タグは通常の IC タグ (Smartrac 社 Shortdipole) を使用している。提案手法のように、基準になる IC タグをセンサタグとともに設置することで、アンテナ特性の相対的変化を観測し、傾斜/振動を安定して観測できるようにする。

また、提案するセンサタグでは、アンテナ特性の変化を物理量のセンシングに利用するため、センサ側は完全にバッテリーレスで動作可能である。従って電池交換等のメンテナンスが不要である。

3. 測定環境と測定アプリケーション

図-7 に傾斜/振動センサの評価環境を示す。電波吸収体で囲み、電磁波のマルチパス伝搬の影響を軽減し、センサタグ自体の特性が観測できる環境としている。床に設置した電波吸収体からの距離を確保するために、発泡スチロールを配置し、センサタグ及びリーダと電波吸収体との間隔 (40cm) を確保している。これは、電磁波の伝搬を阻害する物体の無い空間 (自由空間) の伝搬を確保するために必要な第一フレネルゾーン半径を確保するためである。なお、発泡スチロールは、比誘電率が 1 に近く、電磁波に対しては、空気とほぼ同等の性質を有するため、支持材として使用できる。リーダには東北システムズ・サポートの DOTR-910J (250mW, 円偏波)⁹⁾ を用いた。

図-8 は、図-4 の傾斜/振動センサタグを具体化したものである。センサタグと基準タグとの間隔は図-9 のように 3.4cm である。センサタグはプラスチックケース内の発泡スチロールの台の上に配置している。また、基準タグはプラスチックケースからの間隔を確保するために、厚さ 1cm の発泡スチロールの台に貼付している。

図-9 及び図-10 は、傾斜測定時におけるスイッチ ON 状態と OFF 状態の傾斜/振動センサタグの姿勢を示す。本論文では、基本特性を取得するために、このようなスイッチ ON と OFF の状態について、傾斜/振動センサの応答を評価する。より小さい傾斜変化に対する傾斜検出評価については、使用するセンサの特性にも依存するため、今後の検討項目とする。

図-7 基本特性の実験環境

図-8 実験に使用した傾斜/振動センサタグ

図-9 スイッチ ON の状態

図-10 スイッチ OFF の状態

図-11 に測定アプリケーションを示す。リーダに付随する SDK (Software Development Kit) ⁹⁾を用いて開発し、単位時間当たりの認識回数と平均の RSSI (Receive Signal Strength Indicator) を出力できるようになっている。ここで、RSSI とは、IC タグからのリーダへの応答信号の受信電力レベル (デシベル値) に対応した値であり、IC タグとリーダ間の距離が長い場合や、IC タグアンテナの特性が劣化している場合は低い値として観測される。測定時間は任意に設定できる。ここでは、10 秒としている。リーダのトリガを 10 秒間引き続けることで、自動的に 10 秒間の特性が取得できる。設定時間を過ぎた時点で、ログ表示画面にコメントが出力されるため、このコメントによりユーザは引き続けていたトリガを放す。先に述べたように、傾斜/振動センサタグでは、傾斜/振動センサが、傾斜や振動に対応して、アンテナ特性を変化させる。この変化は、リーダ側での読み取り特性に影響するため、これらの単位時間当たりの認識回数と平均の RSSI を観測する。また、特定のタグのみを指定して読み取れるように、各タグ固有の EPC (Electronic Product Code) を読み取り制限条件として指定できるように改良している。

4. 傾斜検出評価

スイッチが ON と OFF の場合 (図-9 及び図-10) の単位時間当たりの読み取り回数及び平均 RSSI と、タグ-リーダ間距離 (センサタグとリーダ間の距離) の関係を図-12 に示す。図-12 は、横軸をタグ-リーダ間距離、縦軸を認識回数/秒 (単位時間当たりの読み取り回数と同一) 及び平均 RSSI とした評価結果である。タグ-リーダ間距離は、図-7 の測定環境の関係で、200cm までとした。

実験結果より、スイッチの ON と OFF に対応して、単位時間当たりの読み取り回数が大きく変化していることがわかる。OFF の場合は、タグ-リーダ間距離が 10cm を超えると読み取れない。この場合は、読み取りが行えないため、平均 RSSI も出力されない。また、スイッチ ON の場合の読み取り回数は、基準タグのそれとほぼ同等であることがわかる。従って、基準タグとセンサタグの単位時間当たりの読み取り回数を比較することで、傾斜を検出可能であることが確認できる。

しかし、タグ-リーダ間距離が 10cm 以下の場合、ON と OFF の両方の状態で読み取りが可能となっており、スイッチの状態を検出できていない。これは特性が劣化したアンテナでも近傍では IC に必要な電力を供給できるためである。しかし、平均 RSSI は、大きく異なっていることがわかる。スイッチが ON 状態での平均 RSSI は、基準タグのそれとほぼ同等であるが、OFF 状態では、

基準タグに対して約 30dB と大きく低下している。従って、タグ近傍では、平均 RSSI を観測することで、スイッチの状態を知ることができる。

このように、傾斜については、単位時間当たりの読み取り回数や平均 RSSI を観測することで、検出可能であることが確認できる。

表-1 に、傾斜の判定方法を示す。ここで、提案する傾斜/振動センサタグは、センサタグ及び基準タグの両方が読み取れる距離以下で使用されるものと仮定する。基準タグが読み取れている場合は、センサタグの読み取り状況により、スイッチの ON と OFF が検出でき、傾斜が認識できる。但し、近傍からの読み取りでは、ON と OFF の状態が区別できないため、基準タグとセンサタグの RSSI の差が、あらかじめ定める規定値以上であれば、OFF と判断する。また、何等かの理由により基準タグが認識できない場合でも、近傍を除けば、センサタグのみが認識される場合はスイッチ ON と判定してよいが、調査はした方がよい。最後に、両方のタグが認識できない場合は、傾斜/振動センサタグの紛失、故障、電磁波伝搬の遮蔽などの問題が発生していると考えられ、傾斜センシングが行えない。また要調査と判断すべきである。以上の考察より、スイッチ ON 状態を正常、OFF 状態を異常と対応付けることが、OFF 状態は要調査となるため有効であると言える。

図-11 リーダ用読み取り回数及び平均 RSSI 測定アプリケーション

図-12 傾斜センシング特性評価結果

表-1 傾斜センシング時の判定方法

		センサタグ		備考
		OK	NG	
基準タグ	OK	スイッチON (但し、基準タグとセンサタグのRSSIの差が規定値以上の場合はOFFと判断)	スイッチOFF (傾斜に関し、要調査)	動作良好
	NG	スイッチON (但し、近傍では状態不明、また要調査とすべき)	・紛失、故障、電磁波遮蔽など問題発生の可能性有り ・傾斜センシング不能 ・要調査	—

図-13 振動強度検出結果 (振動回数 4回/秒, タグ-リーダ間距離 70cm)

図-14 振動強度検出結果 (振動回数 4回/秒, タグ-リーダ間距離 150cm)

図-15 反射板利用時の測定環境

図-16 反射板利用時の最大読み取り距離

5. 振動検出評価

次に、振動検出特性評価を行った。図-7 の測定環境において、指で傾斜/振動センサをたたくことで振動を与えた。具体的には、5cmの高さから1秒間に4回たたく動作を繰り返した。この条件において単位時間当たりの読み取り回数を、タグ-リーダ間距離を2通り変化させて観測した。図-12 において、センサタグの読み取り範囲内の距離で ON 状態において測定した。タグ-リーダ間距離がそれぞれ 70cm と 150cm の場合の結果を図-13 及び図-14 に示す。5 回の試行結果を示している。いずれの距離においても加振により、単位時間当たりの読み取り回数が基準タグに対して明確に低下しており、振動と対応していることが確認できる。なお、今後は、具体的な応用に対して適切な振動センサを選定し、加振装置等を用いた定量的評価を行い、強度や振動回数の検出精度を明らかにしていく。

6. 反射板による読み取り距離の拡大

提案するバッテリーレスセンサは、読み取り距離が 200cm 程度と短い。従って、ここでは反射板⁵⁾の利用により読み取り距離が拡大できることを確認する。反射板により、アンテナ利得が増加し、その結果、読み取り距離が拡大される。反射板は、意図的に設置してもよいが、インフラ管理の場合は金属構造物自身を反射板として利用しても良い。

ここでは、図-15 のように、ホワイトボードを反射板として利用し、屋内の廊下で読み取り距離を測定した。ホワイトボードは、横 175cm、縦 86.4cm である。またホワイトボードの底辺は床から 91cm の場所にある。また、ホワイトボードとセンサタグとの間隔は約 8cm (920MHz の電磁波の波長の約 1/4) としている。

この場合の最大読み取り距離を図-16 に示す。縦軸は、

最大読み取り距離と平均 RSSI である。また比較のために、反射板を使用しない傾斜/振動センサ単体の読み取り距離も示している。読み取り距離は、反射板により、センサタグと基準タグ共に 2 倍程度に拡大され、ON 状態のセンサタグにおいて 540cm である。また、平均 RSSI の下限は-70dB 程度であることが確認できる。

本論文では、特定小電力のリーダを使用しているが、構内においては、高出力のリーダが利用可能であるため、読み取り距離はさらに拡大可能である。以下、これについて読み取り距離を見積もる。

最大読み取り距離 $d_{\max}$ は Friis の伝達公式から以下の式で表せる⁹⁾。

$$d_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 P_t は送信電力、 G_t は送信アンテナ利得、 G_r は受信アンテナ利得、 P_{th} は RFID タグ IC を駆動するための必要最小電力、 τ は RFID タグの電力伝達係数である。電力伝達係数とは、アンテナと IC とのインピーダンス整合状況を評価する指標であり、最大値は 1 となる。到来する電磁波から最大電力を受信する場合がインピーダンス整合状態であり、アンテナの入力インピーダンスと IC のインピーダンスが複素共役の関係になる場合に達成される。920MHz 帯 RFID において、本論文でも使用している特定小電力無線局では空中線電力は 250mW、またアンテナ利得は 3dBi 以下となっている。この場合、式(1)の $P_t G_t$ は 0.5W となる。一方、指定された構内での利用が許されている構内無線局の場合、空中線電力は 1W、またアンテナ利得は 6dBi である。この場合、 $P_t G_t$ は 4W となる¹⁰⁾。従って、構内無線局としてのリーダの利用が許容される場合は、式(1)より $\sqrt{8}$ 倍、つまり約 2.8 倍の読み取り距離が得られる。従って、反射板を利用する場合は 5.4m×2.8=15.12m まで読み取りが可能と見積れる。

7. むすび

本論文では、UHF 帯パッシブ RFID と傾斜/振動センサを組み合わせたバッテリーレス UHF 帯無線傾斜/振動センサタグを提案した。動作原理は、傾斜/振動センサにより、IC とアンテナ間の接続を切断することで、アンテナ特性を変化させ、その変化を一体として設置する基準タグと比較することで検出するものである。傾斜/振動センサの動作原理は、内部のボールが 2 つの端子間の導通と非導通状態を傾斜/振動に対応して切り替えるも

のである。

250mW のリーダを用いて評価した結果、リーダ-センサ間距離が 10cm を超える場合は、認識回数により、傾斜が検出可能であることを確認した。また、10cm 以下においては、基準タグを利用して基準タグとセンサタグの平均 RSSI を比較することで、傾斜の検出可能であることを確認した。これによりセンサタグ近傍から最大読み取り距離まで安定して傾斜検出が可能となった。この場合の読み取り距離は 200cm 程度であった。

さらに、指でセンサタグをたたくことによって発生する振動に関しても、基準タグとの比較により、加振の有無を検出できることを確認した。しかし、振動強度や周波数を定量化するには至っていないため、今後は、具体的な応用を定め、その検出にあった傾斜/振動センサを選定し、定量評価を進めていく。

最後に、反射板の利用により、読み取り距離が 200cm 程度から最大で 540cm まで拡大できることを確認した。

さらに、高出力の構内無線局が利用できる条件であれば、15m 程度まで読み取り距離を拡大できる見通しを得た。

参考文献

- 1) ams : SL900A EPC Class 3 Sensory Tag Chip – For Automatic Data Logging, 2014.
- 2) Occhiuzzi, C. Caizzzone, S. and Marrocco, G. : Passive UHF RFID Antennas for Sensing Applications : Principles, Methods, and Classifications, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 55, No. 6, pp.14-34, 2013.
- 3) Manzari, S. Musa, T. Randazzo, M. Rinaldi, Z. Meda, A. and Marrocco, G.: A Passive Temperature Radio-Sensor for Concrete Maturation Monitoring, *IEEE RFID-TA*, pp.121-126, 2014.
- 4) Occhiuzzi, C. Cippitelli, S. and Marrocco, G. : Modeling, Design and Experimentation of Wearable RFID Sensor Tag, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.58, No.8, pp.2490-2498, 2010.
- 5) 宮坂隆平, 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘 : UHF 帯 RFID による災害電子掲示板に関する検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.71, No.2, pp.119-117, 2015.
- 6) Wang, J. Schluntz, E. Otis, B. and Deyle, T. : A New Vision for Smart Objects and the Internet of Things: Mobile Robots and Long-Range UHF RFID Sensor Tags, <<https://arxiv.org/abs/1507.02373>>, (入手 2016.6.22).
- 7) Alien : Higgs 4 Strap Datasheet Addendum, <<http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/ALC-370-FS-CU%20Higgs4%20Strap%202014-12-21.pdf>>, (入手 2015.6.7).
- 8) 東北システムズ・サポート : DOTR-900J シリーズの魅力, <https://www.tss21.co.jp/product/mobile/rfid/concept.html#_1w250mw>, (入手 2015.6.7).
- 9) Rao, K. V. S. Nikitin, P. V. and Lam, S. F. : Antenna Design for UHF RFID Tags: a Review and a Practical

Application, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.53, No.12, pp.3870-3876, 2005.

www.jaisa.jp/pdfs/150915/001.pdf, (入手 2016.10.19).

- 10) 日本自動認識システム協会 : 920MHz 帯 RFID (パッシブ型) 周波数利用ガイドライン Ver. 1.1, <<http://www.jaisa.jp/pdfs/150915/001.pdf>>, (入手 2016.10.19).

(2016. 10. 27 受付)

A PROPOSAL OF A BATTERY-LESS UHF BAND WIRELESS INCLINATION AND VIBRATION SENSOR TAG

Yuri KOBAYASHI, Dongfang FENG, Shigeki TAKEDA, Kenichi KAGOSHIMA,
and Masahiro UMEHIRA

Recently, the concept of IoT (Internet of Things) has been proposed and technologies based on this concept are expected to be introduced to management of infrastructures. In this paper, a battery-less UHF band wireless inclination and vibration sensor tag is proposed by combining UHF band passive RFID systems and sensing devices. The purpose of this paper is to provide the wireless inclination and vibration sensor for the management of infrastructures. The proposed wireless sensor detects the change of sensor tag antenna characteristics that are caused by changes of sensor statuses by comparing with those of a reference tag antenna that is incorporated with the sensor tag.