The Japan Society of Mechanical Engineers

パッシブ型RFIDタグを用いた構造物診断用力センサシステムの開発

Development of Force Sensor System using Passive RFID Tag for Structural Health Monitoring

鈴木伸吾 (東大)　○正　岡本浩幸 (ライテックス)　池本有助 (東大)
正　村上弘記 (東大)　林新 (産総研)　伊藤日出男 (産総研)　正　淺間一 (東大)

Shingo Suzuki, School of Engineering, The University of Tokyo,
5-1-5, Kashiwano-ha, Kashiwa, Chiba 277-8568, JAPAN
Hiroyuki Okamoto, Ritecs Co. Ltd.
Yusuke Ikemoto, The University of Tokyo
Hiroki Murakami, The University of Tokyo
Xin Lin, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Hideo Itoh, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Hajime Asama, The University of Tokyo

Abstract— In this paper, we develop the novel force sensor system for structural health monitoring(SHM) using the 13.56 MHz band passive RFID. In SHM for buildings and apartment houses, it is important to measure the strain and the static load of the structural member covered with concrete or coating materials. In our system, we assume the force sensor-equipped passive RFID tag that has the A/D converter is placed in near the structural member in the covering materials. And then, from the outside of the covering materials the sensor signal is read without contact as well as the memory data communication to the RFID tag by the RFID reader/writer. So this force sensor system enables to measure the strain and the static load of the structural member covered with concrete or coating materials. In this system, power supply to the RFID tag and the force sensor is achieved by an electromagnetic induction system and therefore this force sensor system does not need battery inside the space covered with concrete or coating materials.

Key Words: Structural health monitoring, Passive RFID Tag, Force sensor

1. はじめに

近年，構造物の長寿命化に伴い，特にビルやマンションにおいて使用期間中にその構造物が健全であることを保証するサービスへの要求が高まっている．構造物は，竣工時に適切な設計によって必要とされる強度を有していても，長期間の使用の中で強度を担う構造部材が損傷を受けていくことで必要とする強度を下回る，すなわち健全性が失われていくことが予想される．そのため，要求性能を下回る可能性がある場合には，適切な補修を行うことで健全性を維持していく必要がある．このとき，要求性能を下回る危険性を検知するには，竣工時から時間軸上に沿って構造部材の損傷度合いを力学的モニタリングすることが非常に重要となる．

しかしながら，ビルやマンションなどの構造物では，構造部材はコンクリートに覆われていることが多い．また，鉄骨構造の場合では防火材や仕上材（化粧板など）の設置により被覆されていることが多いため，竣工後のビルやマンション等の構造物では直接構造部材に触れることは難しい．そのため既存手法では，表面や内部の変状から構造部材の損傷を推定する手法や，施工時に鉄骨や鉄筋にセンサを設置したのち，化粧板貼り付け等の被覆作業を行い計測する手法がとられている．しかし，変状から損傷度合いを推定する手法では，直接構造部材の変形量や荷重を測定することは困難である．また，センサ設置後に被覆する手法では，有線のセンサシステムの場合では配線の取り回し処理などに大きな手間がかかる．一方，無線のセンサシステムの場合では電池を利用しているものが多いため一定期間ごとに電力メンテナンスの手間が必要となる．さらに，メンテナンスの度に被覆を取り除かなければならない[1]．

そこで本研究では，遮蔽物で被覆された内部の構造部材の変形量や荷重を外部から計測することが可能で，かつ設置やメンテナンスの手間が小さく低コストな計測システムを開発することを目的とする．

2. 提案手法

我々は，この目的を実現する手段として今後構造物の維持管理におおいに使われていくことが予想されるRFIDに着目した．近年，RFIDタグを鉄骨や壁パネル，コンクリート内部に設置して構造物の維持管理に利用する研究がなされている[2][3]．そこで，施工時に点検・補修などの履歴管理のために構造部材近辺にRFIDタグを設置することを想定し，設置したRFIDタグに力学センサを備えることで同時に構造部材の変形量や荷重を計測するシステムを提案する．Fig. 1に提案手法の概念図を示す．

力学センサを鉄骨などの構造部材に貼り付け，センサと接続したRFIDタグで構成されるモジュールを遮蔽された内部に設置する．そして，RFIDタグと通信を行うリーダライタにより外部からメモリデータ通信と同様に力学センサ信号を遮蔽物を透過して取得する．さらに，部材情報などとあわせて内部の部材にかかる荷重や変形量を算出する．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

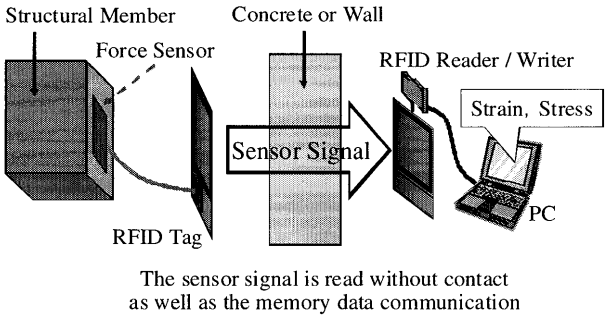


Fig.1 Proposal Method

13.56[MHz] 帯のパッシブ型 RFID(ISO18000-3) を用いることでコンクリートや化粧板などの遮蔽物を通した計測が可能になると考えられる．また，無線で電力供給とデータ通信を行うため電源線や信号線の配線が不要である．そのため，電力メンテナンスや設置にかかる手間が少なくなると考えられる．

なお本稿では，提案システムのように遮蔽物を透過して力学センサ信号を取得し，部材情報などとあわせて内部の力学的な状態量を外部から非接触で得ること非接触力計測と定義する．

3. パッシブ型 RFID 力センサシステム

3·1 RFID タグ/リーダライタ

本研究で使用する RFID タグを Fig. 2 に示す．本 RFID タグは，通信周波数が 13.56MHz 帯のもので，アンテナからの電磁誘導供給方式によって電池レスで動作するパッシブ型 RFID タグ (吉川アールエフシステム，H 56[mm], W84[mm]) である．

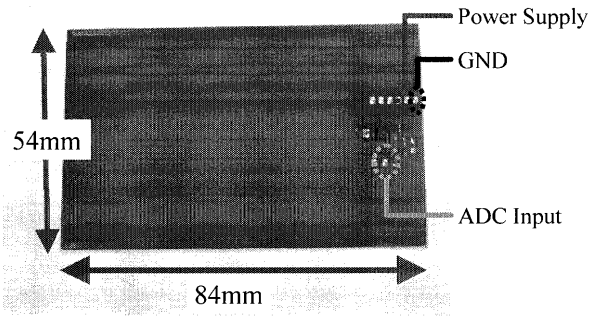


Fig.2 RFID Tag

RFID タグには一般的なメモリの読み書き機能の他に，RFID タグ側の得た電力を外部に供給する端子を有しており，チップ内で整流，平滑された 2.25[V] 直流電圧を外部に供給することができる．本タグの大きな特徴として，RFID タグ内部に 8[bit] の ADC 機能を有している．この機能により可変抵抗素子を GND - ADC 入力端子間に接続し，2.25[V]-ADC 入力端子間に接続した固定抵抗と分圧することで可変抵抗素子の抵抗変化を RFID 通信で読み取ることができる．すなわち，可変抵抗素子にサーミスタなどのセンサを使用することで簡易なセンシングを行える仕様となっている．

使用するリーダライタは市販されている RX5300(吉川アールエフシステム) である (Fig. 3).

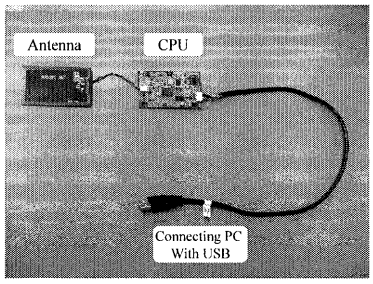


Fig.3 RFID Tag

アンテナは H 37[mm], W 67[mm] の 4 回巻きのものを使用しており，最大 4.4[mW] の電力を RFID タグに供給でき，電力供給端子が無負荷の状態で最大約 100[mm] の通信が可能である．

3·2 力センサ

本システムでは力学センサとして，一般に構造物のひずみや荷重を測定する際に広く利用されている安価なひずみゲージ (共立電子，KFG-5-1k-C1-11) を用いる．ひずみゲージは，貼り付ける部材と連動して変形し，その変形に応じて抵抗変化を生じる．通常この抵抗変化を正確に測定するためにはブリッジ回路を構成して抵抗の変化を電圧に置き換え，さらにその差圧をアンプ回路で増幅することでメータやディジタル値での計測が可能になる．そのため，本センサシステムにひずみゲージを用いるためには，これらの回路を RFID タグからの誘導起電力のみで安定して駆動させる必要がある．しかしながら，RFID タグの ADC 機能や RFID タグ - リーダライタ間の通信にも一定の電力を必要とするため，RFID タグから供給される微少な電力でこれらを安定して動作させることは電力供給の面から困難である．そのため ADC 機能を有するパッシブ型 RFID タグを利用したセンサシステムではサーミスタなどの消費電力が少なく，かつアンプによる増幅を必要としない応答性の良いセンサ素子のものに制限されていた [4][5].

3·3 システム構成

そこで本システムでは，RFID タグを 2 枚使用して，電源供給用と通信用に機能を分離することで，十分な電源供給と安定した非接触通信機能を両立させることを試みた．本システムの構成を Fig. 4 に示す．

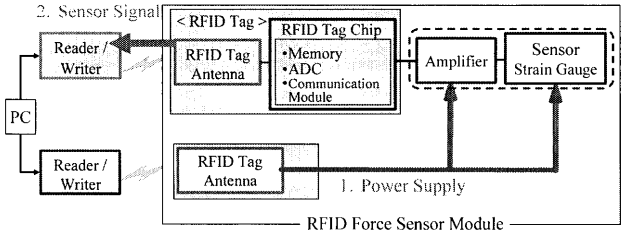


Fig.4 System Configuration

図の下側の RFID タグを電力供給用の RFID タグとし，

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

RFID タグアンテナを介してリーダライタから供給される電力を力学センサおよび増幅器へと供給する．もう一方の RFID タグをセンサから増幅して得られた信号を AD 変換して，センサ信号をリーダライタへ送信するセンシングデータ送信用の RFID タグとする．このように機能を分離することで安定したシステム動作を実現している．

3·4 RFID 力センサモジュール

RFID タグから供給される微小電力で，信号の増幅と力計測の信号処理を安定して行うには，低消費電力の回路設計を行う必要がある．そこで，本研究では以下に示すような低消費電力回路の設計を行った．Fig. 5 に設計した RFID 力センサモジュール回路図を示す．

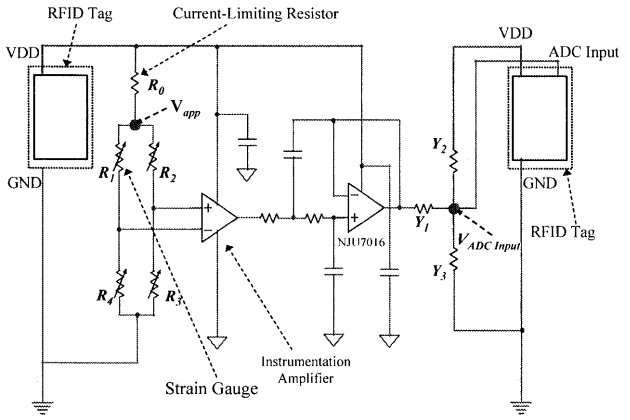


Fig.5 The Circuit of the Sensor Module

センサブリッジ回路，増幅回路およびローパスフィルタは，Fig. 5 の左側の RFID タグから電力供給を行う．回路の駆動は定電圧駆動とし，駆動電圧は RFID タグから供給する VDD–GND 間の 2.25[V] とする．ひずみゲージによるブリッジ回路の前段に電流制限用の固定抵抗を挿入し，センサブリッジ回路の駆動電流は約 0.1[mA] となるように設定した．増幅回路には，低電圧駆動かつ低消費電力でありながらノイズ除去性能を高めるため，3 つの OP アンプ (NJU7016D，新日本無線) を使用し作成した計装アンプを用いている．また，ローパスフィルタは増幅回路と同じ OP アンプを使用したローパスフィルタ (カットオフ周波数 fc=1.6[kHz]) を用いた．

一方，Fig. 5 右側のタグは，センシングデータ取得用のタグであり分圧回路を駆動させている．本タグは，VDD–ADC 入力端子間の固定抵抗がチップ内で最初から接続されている仕様のため，計装用のアンプから出力された電圧を，分圧回路部で分圧して RFID タグの ADC 入力端子に入力している．

RFID タグの ADC 入力端子に入力される分圧された電圧 V_{ADC} は，ひずみゲージによるブリッジの印加電圧を V_{app} とすると次式で表される．

$$V_{ADC} = \frac{1}{Y_1+Y_2+Y_3} \times \left\{\frac{R_1R_2}{(R_1+R_2)^2} K\epsilon A V_{app} Y_1 + 2.25Y_2\right\} \quad (1)$$

ただし，ϵ : 部材に生じるひずみ，K : ゲージ率，A : 増幅率，R_1，R_2 : ひずみゲージの抵抗値，Y_1，Y_2，Y_3 : 分圧用コンダクタンス，である．$Y_1 \gg Y_2$ と設定すれば，増幅器からの出力をほぼフルスイングで ADC 入力端子に入力することができる．

本システムでは，これらのパラメータを RFID タグのメモリ内に保管しており，計測の際にこれらのパラメータ情報を得ることで，得られた電圧値 V_{ADCIN} から変形量を算出する．

4. 評価実験

本センサシステムでは，RFID を利用しているため通信距離により電力供給量が減少し，通信の可不可や計測誤差に影響を及ぼすと考えられる．そこで本システムの有効な非接触計測距離や計測距離毎の計測分解能を評価した．

4·1 実験手法

評価に用いた実験装置のモデル図を Fig. 6 に示す．

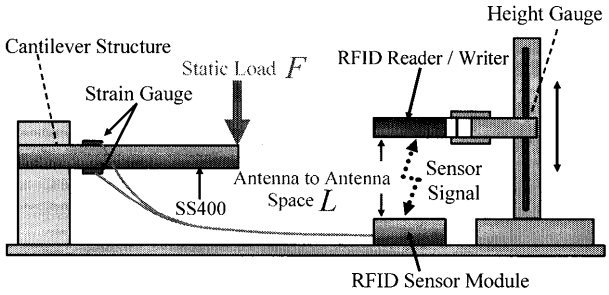


Fig.6 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

鋼材 (SS400) を片持ち支持し，自由端に静荷重を加える．その際に生じたひずみを本センサシステムによって計測することでシステムの計測分解能を評価する．静荷重は 0[N]～200[N] まで 10[N] 刻みで加え，計測は各荷重に対して 10 回ずつ行う．また，ハイトゲージを用いて RFID タグアンテナとリーダライタアンテナ間の距離 L を段階的に変化させながら計測を行うことでシステムの有効な非接触計測距離を評価する．アンテナ間距離 L は 2.5[mm] を起点に 2.5[mm] ごとに増加させる．

鋼材に生じるひずみの理論値は次式で表される．

$$\epsilon = \frac{6x}{bh^2E}\left(F + \frac{wx}{2}\right) \quad (2)$$

ただし，x : 荷重点からひずみゲージまでの距離，b : 鋼材 (SS400) の幅，h : 鋼材の厚さ，E : 鋼材のヤング率，w : 鋼材の密度，である．式 (2) より算出される理論値と本システムにより計測したひずみとの誤差を比較し評価する．

4·2 実験結果・考察

実験結果を Fig. 7 に示す．RFID タグアンテナとリーダライタアンテナ間の距離 L が 10.0[mm]，20.0[mm]，30.0[mm]，32.5[mm] の計測結果を示す．横軸に静荷重の大きさを，縦軸にひずみ量を記した．また，各グラフに破

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

線で式 (2) より算出した理論値を記してあり，理論値と計測値との誤差の平均二乗和 m をグラフ中に記した．

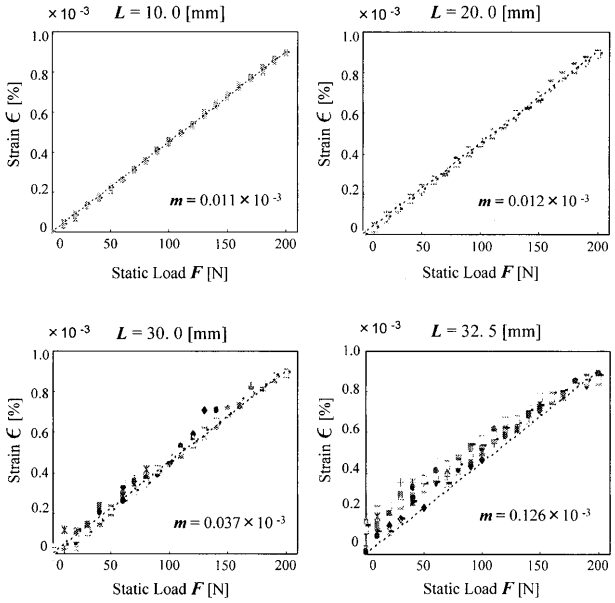


Fig.7 Static Load–Strain diagram

アンテナ間距離 L が 32.5[mm] まで計測可能であった．誤差の平均二乗和 m は，L =20.0[mm] まで約 0.01×10^{-3} であり，以降 L の増加とともに m も増加し，L=30.0[mm] で 0.04×10^{-3} であった．これより，本システムにより RFID タグアンテナとリーダライタアンテナ間の距離が 30[mm] の範囲では約 10×10^{-6}〜40×10^{-6} の分解能でひずみを非接触計測することが可能であると言える．また，非接触での計測が可能な限界である L=32.5[mm] では，m=0.12×10^{-3} と大きな誤差が生じた．これは，通信距離により電力供給量が減少しために電流欠落による整流回路から生じた高周波ノイズが増幅されたことや，電源電圧の低下によりオペアンプにオフセット誤差や発振が生じたためと考えられる．

5. おわりに

本稿では，13.56[MHz] 帯のパッシブ型 RFID タグ / リーダライタを用いることにより，遮蔽物で被覆された内部の構造部材の変形量や荷重を外部から計測することが可能で，かつ設置やメンテナンスの手間が小さく低コストな計測システムを開発した．今後，実環境における本システムの性能評価，耐久性・耐環境性評価などを行っていく．

参考文献

[1] KURATA Narito et al.: “A building Risk Monitoring using Wireless Sensor MICA Mote,” *AIJ, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, B-2, pp.993–994, 2003.

[2] Nagao Yoshimitsu et al.: “An On-Site Inspection Support System Using Radio Frequency Identification Tags and Personal Digital Assistants” *Proceedings of the CIB W78's 19th International Conference on Information Technology for Construction*, vol.2 pp.14–19, 2002.

[3] Morimoto Kazuaki et al.: “Research on Management and Operation System of Building Information by using RFID and Database,” *Journal of Architecture and Building Science*, vol.24, pp.429–434, 2006.

[4] J. Marjonen, R. Alaoja, H. Ronkainen, M. Aberg: “Self-Powered Wireless Temperature Sensors Exploit RFID Technology,” *IEEE CS and IEEE ComSoc*, 2006.

[5] Hongwei Shen, Lilan Li, Yumei Zhou: “Fully Integrated Passive UHF RFID Tag with Temperature Sensor for Environment Monitoring,” *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on ASIC, ASICON'07*, pp.360–363, 2007.

NII-Electronic Library Service