

## 工場内における無線センシングシステム開発研究

坂本 勝\* 中河三千代

## The Development Research of sensing system using Wireless Networks in manufacturing Factory

SAKAMOTO Masaru and NAKAGAWA Michiyo

本研究では、紙関連企業の製造現場における機器異常の早期検知を目的として、センサ・マイコンを用いた計測ユニットと無線ネットワーク技術の組み合わせによる、遠隔監視・データ取得、異常検知を行うシステムの構築を行った。

本システムでは、マイコン及び無線ネットワークを用いることで配線設置等コストの削減をはかり、またサーバ上でセンサ情報を収集する計測用プログラムに機器の振動データから振動の強度・周波数等を解析する機能、電子メールによる異常通知機能等を備えることで、導入が容易で、機器の常時監視・機器異常の早期通知等の機能を実現した。

キーワード：マイコン、無線ネットワーク、リアルタイム OS、高速フーリエ変換 (FFT)、異常検知

## はじめに

紙関連工場等の製造現場では、機器管理にセンサが多く利用されているが、これらは監視用メータ・モニタといった専用機器に接続され、作業員がその場まで移動して確認することによって利用されている。

このため、一括してデータ環視を行うには専用の設備を設ける必要がある。また、センサ等を後から製造機器に付加する場合でも、紙関連の製造現場は、機器の増設などにより機器の配置が入り組んでいることが多く、配線の敷設等に多くのコスト・労力を要する。

また紙関連の製造現場では、生産性を向上させるため製造設備が長時間にわたって稼働している。機器の故障による操業停止は、製造スケジュール・製品コストに大きな影響を及ぼすため、できるだけ避けなくてはならないが、機器の異常の判定は点検を担当する作業員の経験による部分が大きく、非常に難しい問題とされてきた。

そこで本研究では、工場内の適切な位置にセンサを配置し監視を行えるように、近年性能が急速に向上したマイコンとセンサを組み合わせた監視用装置に、無線通信ユニットを組み合わせた無線計測用ユニットを開発した。また、無線計測用ユニットから無線ネットワークを介して送信された振動データ等から、サーバ上で自動的に解析を行うことにより機器の異常について判定が可能な機能をもつ計測用ソフトを構築した。

## 実験方法

## 1. システム構成

本研究では、安価なマイコンボードとセンサ、無線通

信用ユニットを組み合わせ、通信用配線の敷設を行わなくても容易に設置が可能な無線計測用ユニットを構築した。また、無線ネットワークを介してサーバ上でセンサデータの計測・常時監視、振動データの解析と異常判定、電子メールによる携帯端末への異常通知等の機能を持つ計測用ソフトを開発した。そして、それらを用いてシステムを構築し、各機能の検証を行った。本研究で使用した計測システムの概要図を図1に示す。

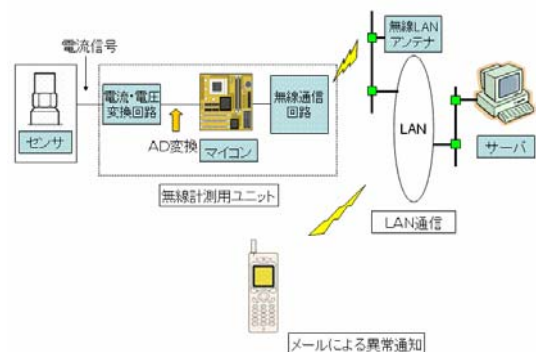


図1 計測システム概要図

このシステムを用いて機器に設置したセンサデータの遠隔監視実験を行い、検証した。

## (1) 無線計測用マイコンシステム

本システムでは、ルネサステクノロジー社製の16ビットCPUであるH8/3069F<sup>1)</sup>を用いたマイコンボードAKI-H8/3069Fを使用し、振動センサからの信号をマイコン内蔵のA/Dコンバータによって取り込む。また無線ネットワーク通信機能を付加するため、無線プロトコルコンバータを組み合わせた無線計測用ユニットを開発した。無線プロトコルコンバータとマイコンボードはシリアル通信ポートを介して通信を行う。このマイコンボードの主な仕様を表1に示す。

\* (現) 産業技術研究所企画管理部

この研究は、「工場内における無線センシングシステム開発研究」の予算で実施した。

愛媛県紙産業研究センター業績第34号

表1 マイコンボードの主な仕様

CPU	H8/3069F (動作周波数 20MHz)
シリアルインターフェース	3チャンネル
入出力ポート	DIOポート : 最大 79点
メモリ	ROM:512k バイト RAM:内蔵(16k バイト), 外付(2M バイト)
AD コンバータ	10 ビット分解能, 8チャンネル
カウンタ	16ビットタイマ: 3チャンネル, 8ビットタイマ: 4チャンネル

(2) センサ

計測に利用するセンサとして、機器の故障の大きな要因となっている振動計測が可能な振動センサを用いた。このセンサの主な仕様を表2に示す。

表2 振動センサの主な仕様

使用最大加速度	98m / s <sup>2</sup>
検出周波数	10Hz ~ 2KHz
対衝撃度	150m / S <sup>2</sup>
質量	40g
測定項目	加速度、速度
出力	DC アナログ出力 (4~20mA)

また、マイコンを用いた計測用ユニットに無線ネットワーク通信を可能とするために無線プロトコルコンバータを付加することとし、PC-LAN-01 ((株) アルファプロジェクト製) を使用した。無線プロトコルコンバータとマイコンボードは、シリアル接続を介してネットワーク通信を行う。主な仕様を表3に示す。

表3 無線プロトコルコンバータの主な仕様

シリアルポート	TTL レベル 3.3V / 5V 対応
通信規格	IEEE 802.11b
通信レート	1200bps ~ 115.2Kbps
使用周波数帯域	2.400~2.4835GHz
通信距離	100~300m(屋外), 35~50m(屋内)
対応プロトコル	TCP/IP, UDP, ICMP, ARP, DHCP, TELNET

また、振動センサの出力は、工場内で一般的に使用されるセンサの中で、ノイズ電圧の発生源が多い場合でも非常に安定した精度で通信が可能な 4~20mA の直流電流信号である。これをマイコンで計測するために、電流電圧変換回路を用いた。

2. 高速フーリエ変換

機器の振動は、発生源の異なる、いくつかの周波数の

振動を重ね合わせた複雑な波形として現れる。また、機械から発生する振動は、機械の構造や各部位、回転数等によって発生する振動の周波数が決まる<sup>2)</sup>。しかし、機械振動をセンサで計測し、波形データを表示することができても、時間的に変化する振動波形から発生源や振動の原因等、機器の異常箇所を直接類推することは困難である。

そこで、振動の解析においてフーリエ変換を用いることとした。このフーリエ変換とは、同じ形を繰り返す周期性を持った波であれば、どんな複雑な波形でも複数の単純な正弦波で表現できるというフーリエ級数の理論を用いて行う変換のことである。フーリエ変換を用いることより、解析したい音・振動の波形が、どのような周波数と振幅を持つ波形の合成で成り立っているか、スペクトル等で分析することができる。

しかしフーリエ変換では、データ量が増えるに従い演算量が幾何級数的に増大するため、高い周波数での振動を解析する場合には計算機の負荷が非常に高くなる。

そこで本研究では、振動解析の方法として高速フーリエ変換 (FFT : Fast Fourier Transform) を用いることとした。FFT は、演算量を減らし、高速に増大する計算量を行うことが可能な計算方法である。

ここで、FFT 解析の概要を簡単に説明する。最初に、対象となる振動のような連続時間系の連続信号を  $g(t)$  とし、そのフーリエ変換を  $G(\omega)$  とすると

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-j\omega t) dt \dots\dots\dots (1)$$

と定義される。

ここで、計算機で測定データを扱うためには、離散表現されたデジタル信号に変換する必要がある。そこで、サンプリング周期  $T$  で  $g(t)$  をサンプリングしたものを  $g[n]$  とし、また  $g(t)$  を周期  $NT$  の周期関数とすると、式(1)は次のように表される。

$$G[k] = \sum_{n=0}^{N-1} g[n] \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \dots\dots (2)$$

これを離散的フーリエ変換という。

これを定義どおりに計算すると、その計算量は  $N^2$  に比例する。そのため、サンプリングデータ数  $N$  が大きくなると計算量が増大するといった実用上の問題がある。ここで、式(2)の指数関数を  $W_N = \exp(-j2\pi/N)$  とすると、周期性から次の式が成り立つ。

$$W_N^k = W_N^{k \pm mN} \dots\dots\dots (3)$$

また、 $W_N^k$  を次のように分解することもできる。

$$W_N^k = W_N^l \cdot W_N^{k-l} \dots\dots\dots (4)$$

この2つの性質を利用し、式(2)の  $W_N = \exp(-j2\pi/N)$  部分を分解すると同じ係数が多数出てくる<sup>3)4)</sup>。これを利用し、計算の順序を変更することによって、その計算量は  $N \cdot \log_2 N$  となり大幅に減少する。このアルゴリズムを用いて、実際の計算機でもフーリエ変換を利用できる

ようにしたものがFFTである。

### 3. 計測用パソコン

無線計測用ユニットから送信されたデータを、ネットワークを介して収集・保存する計測用パソコンとして、CPU: Pentium4 1.8GHz, メモリ: 512Mbyte, ハードディスク: 80Gbyte のものを使用した。

### 4. リアルタイム OS

マイコンの限られた処理能力を活用し、センサの計測・データ処理、ネットワーク通信といった複数の処理を適切なタイミングで実行するため、リアルタイム OS を導入した。組み込み機器用のリアルタイム OS として代表的なものに  $\mu$ ITRON がある。これは、TRON プロジェクトの一環として組込機器用に策定された OS の仕様であり、これに準拠した何種類もの  $\mu$ ITRON 仕様 OS が製作・使用されている。

今回の研究においては、 $\mu$ ITRON 仕様 OS の1つである HOS-V4<sup>5)</sup> を利用した。これはトロン協会によって制定された  $\mu$ ITRON4.0 仕様<sup>6)</sup> に準拠したものである。

図2に  $\mu$ ITRON 仕様 OS におけるタスクと OS の関係を示す。

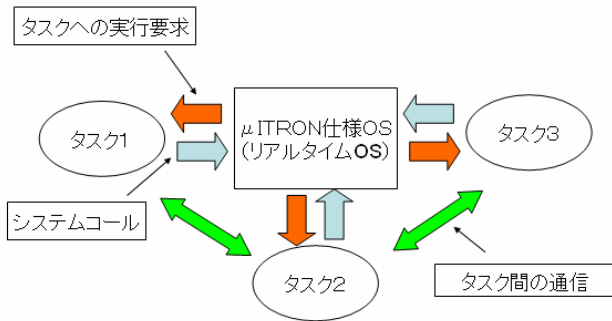


図2 タスクと OS の関係

$\mu$ ITRON 仕様 OS の下では、プログラムはタスクという単位で実行され、OS のスケジューラ機能により、マイコンの動作状況や処理を要求する割り込み情報、タスクの優先度をもとに、それぞれのタイミングごとで優先されるタスクを決定し実行させている。

本研究では、センサ計測、データ処理、ネットワーク通信といったタスク構成のプログラムを作成し、 $\mu$ ITRON 仕様 OS の下で実行させることにより、無線計測用ユニット内のマイコン処理において、リアルタイム性、マルチタスク処理が要求される動作を実現している。

### 5. ネットワーク通信プロトコル

無線計測用ユニットからサーバへのネットワーク通信において、センサデータの送信で頻りにデータ通信を行うことから、ネットワーク通信で一般的に使用されるプロトコルのうち、比較的通信速度が速い UDP (User Datagram Protocol) を使用した。

また、無線 LAN 用機器として、世界的にも標準的規格である IEEE802.11a/b/g に対応した無線 LAN ルータを用

いた。

### 6. 携帯端末

今回、機器に異常が生じた場合に作業者へ迅速な通知を行う目的として、計測用ソフトに電子メールによる異常通知機能を搭載した。その検証実験に用いる携帯端末として、NTT ドコモ FOMA シリーズ P902i を用いた。

## 結果と考察

### 1. 無線計測用ユニットの構築

無線計測用ユニットは、少数の部品を構成し、センサによる計測およびデータ変換、また無線ネットワーク通信機能によるデータ送信の機能を備えることにより、小規模のプログラム変更と設置により、機械振動等の測定が可能となっている。

図3は、今回センサとマイコンを用いて構築した、無線計測用ユニットである。

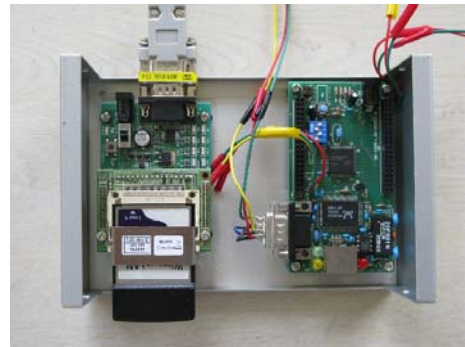


図3 無線計測用ユニット

本システムでは、振動センサを付加した無線計測用ユニットを構築して実験を行った。センサ情報を取り入れるため、マイコンの AD 変換機能を用いて計測を行っている。また、マイコンのシリアル通信機能を用いて、無線通信ユニットと通信することにより、無線ネットワーク通信を行っている。

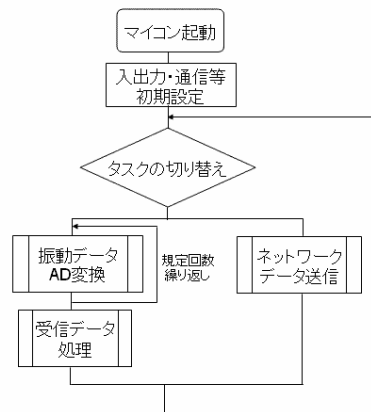


図4 振動センサ用フローチャート

ここで図4にその計測に用いたプログラムの処理フローを示し、マイコン内の処理の流れについて説明する。

この処理フローにおいて、無線計測用ユニット内のマイコンでは、電源投入後に初期化プログラムにより、入出力ポート、カウンタ、各種タイマ、シリアル通信設定等のハードウェア初期化処理が行われる。

その後、計測処理のタスクが起動され、計測動作のプロセスに移行する。振動計測においては、1回の計測プロセス中にごく短いサンプリング周期で大量のデータを取得するため、計測とデータ変換・ネットワークへの送信を平行して行うことは難しい。そこで、プログラムで設定された回数の振動データをAD変換によって全部取得した後に、まとめてデータ変換を行う。この際、計測データは、通信に適したテキスト形式に変換し、また通信のデータ量を減少させるために16進数形式に変換することとした。また変換したデータは、定期的にネットワークにて計測用パソコンに送信される。

## 2. 機器の遠隔監視実験

今回構築した無線計測用ユニット、振動センサを用いて、機器振動の遠隔測定実験を行った。その際に実験で使用した機器・システムの構成を図5に示す。

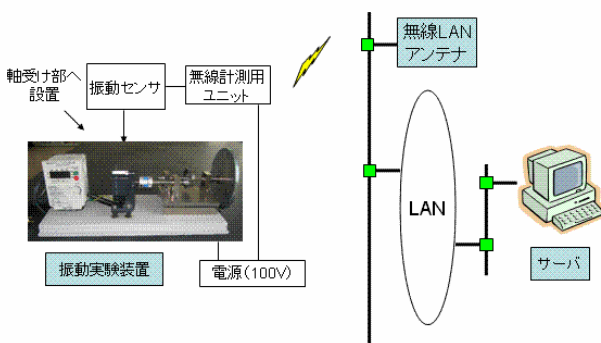


図5 遠隔監視実験の機器構成

計測実験では、1回の振動データ取得・データ変換・ネットワーク送信、データ解析を1プロセスとする。5分間隔で、このプロセスを実行することとして実験を行った。また、無線計測用ユニットでの振動センサのデータ取得は、1m秒間隔で2048回行うこととした。

この他に、マイコンと無線通信用のシリアル通信速度では、通信速度上限である38400bpsにてデータ送信を行うこととして実験を行った。

## 3. 計測用ソフト

無線計測用ユニットから送信された振動データはそのままでは単なる波形データであり、そこから直接に異常の有無を判定することは非常に難しい。

そこで今回の研究では、ネットワークを介して無線計測ユニットからデータを受信し、かつFFT解析により機器の異常を判定する機能を持つ計測用ソフトを開発した。図6に計測用ソフト画面を示す。

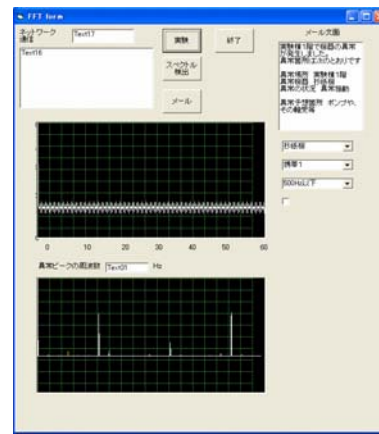


図6 計測監視用アプリケーション画面

本ソフトでは次のような機能を実現した。

- 1) 無線計測用ユニットからネットワークを介してのセンサデータ受信
- 2) 振動データのFFT変換及び変換データから得られるスペクトルグラフの表示
- 3) FFT変換データによる異常判定機能及び異常発生時の携帯端末への電子メールでの自動通知機能

本計測用ソフトはマイクロソフト社のVisual Basicによって開発を行い、測定データ保存用のファイル形式としてCSV形式のものを用いている。

また本計測用ソフトにおいて、機器の振動データから異常を判定するため導入しているFFT機能部分のプログラムは、数値計算に適したC++言語にて作成を行い、Visual Basicで作成したプログラム部分から呼び出して利用できるよう、DLL(Dynamic Link Library)ファイルに変換して組み込まれている。

この他に、FFTによる振動解析を行う際に用いられる窓関数もFFT同様にDLLファイルとして組み込まれており、方形窓関数、ハンギング窓関数、ハンギング窓関数、ブラックマン窓関数、ブラックマン-ハリス窓関数等<sup>4)</sup>が利用可能である。今回行った実験では、比較的良好な結果が得られるハンギング窓関数を用いることとした。

ここで、異常判定の際にFFT解析の結果得られるスペクトルデータは数値データであり、計算機上でスペクトルの情報を用いるためには、何らかの手法でスペクトルのピーク位置を検出する必要がある。

そこで本計測ソフトでは、スペクトルデータの差分処理により、スペクトルのピーク位置を検出する機能を搭載した。その結果、ピーク位置およびスペクトルの強度から計算機上で異常判定を行うことが可能となった。

また本計測用ソフトは、内部に電子メール送信機能を備えており、メールアカウントをプログラム中に登録することにより、メールサーバ等に特別な設定を行わなくとも電子メールによる自動通知機能を容易に導入することが可能である。今回の実験においては、県の公設試験機関用のメールサーバを利用した。

本機能は、一定値以上の強度を持つスペクトルを検出した場合、無線計測用ユニットの IP アドレスや解析データ等を基に自動的に文面を作成し、携帯端末等へのメールによる自動通知するのに用いられる。次の図 7 は、異常が通知された時のメール文面を示したものである。



図 7 メール画面

実験において、異常通知メールは異常検出後、即座に携帯端末に送出されることが確認できた。

4. 計測実験結果

今回開発したシステムの検証のため、FFT 機能が正常に動作しているか確認するためのシミュレーション実験及び、ネットワーク通信を介しての実験装置の回転振動計測・データ解析実験を行った。振動計測実験においては、無線計測用ユニットにて 1m 秒周期で 2048 回センサデータのサンプリングを行うこととした。また、計測データは、データ変換の後、無線ネットワークを介して計測用ソフトが動作するパソコンに送信されるが、これらの一連の周期は 5 分毎とした。ネットワークには愛媛県の公設試験場ネットワーク内の LAN を使用した。

まず最初に、シミュレーション実験の結果について説明する。ここで用いた信号は、計算機上で発生させた次のような正弦波信号のデータである。

$$y = 5 \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \dots \dots \dots (5)$$

ただし周波数は  $f = 20(Hz)$  とし、サンプリング間隔は 1m 秒とした。次の図 8, 9 にその結果を示す。

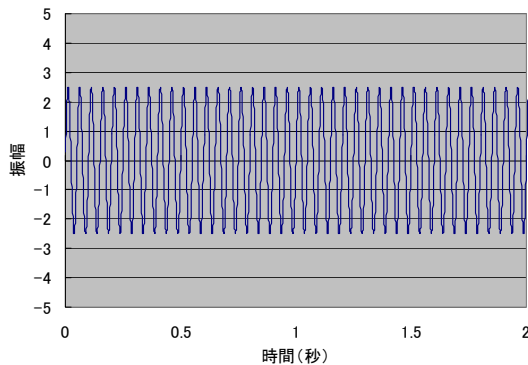


図 8 シミュレーション結果 (正弦波)

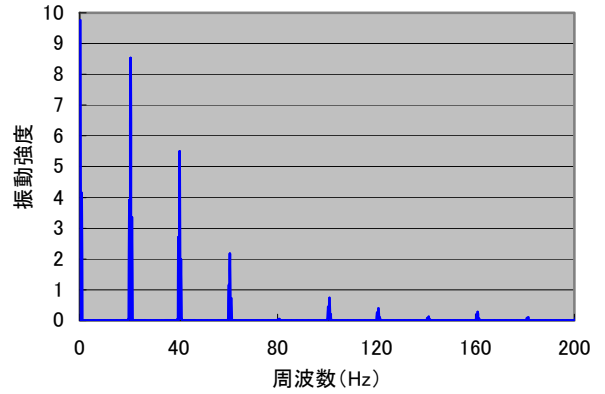


図 9 シミュレーション結果 (振幅スペクトル)

図 8 より、振幅スペクトルは 20Hz の 1 次スペクトル、40Hz の 2 次スペクトルというように、周波数成分のスペクトルが正確に検出されていることが分かる。この結果から、今回開発した FFT プログラムは正常に動作していることが確認された。

次に振動計測実験の結果について説明する。この実験に用いた歯車は、歯数 60 の大歯車、歯数 15 の歯車であり、大歯車の歯の 1 つを欠いたものを使用している。実験では、これを電動モータにて 3000rpm で回転させた際のその振動を計測した。

次の図 10 は、無線計測用ユニットで測定され、無線ネットワークを介して計測用パソコンで受信された振動の時間変化の測定結果を示したものである。

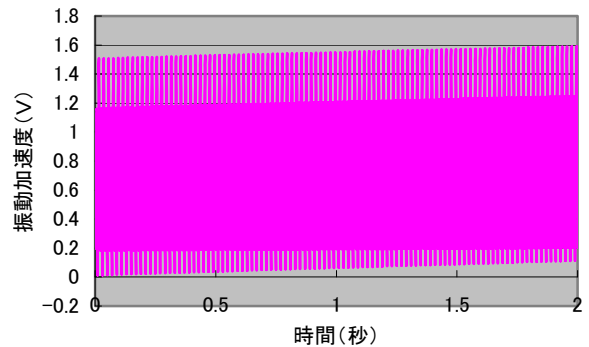


図 10 機械振動の時間変化

この図から、無線計測用ユニットの AD 変換機能を用いてごく短いサンプリング周期で振動計測を行い、無線ネットワークを介して通信を行った場合でも、データの欠落も見られず、順調にデータが受信されていることが分かる。

次に、そのとき計測された振動データについて、FFT 解析を行った結果について説明する。次の図 11 が、その際に得られた振動スペクトルである。

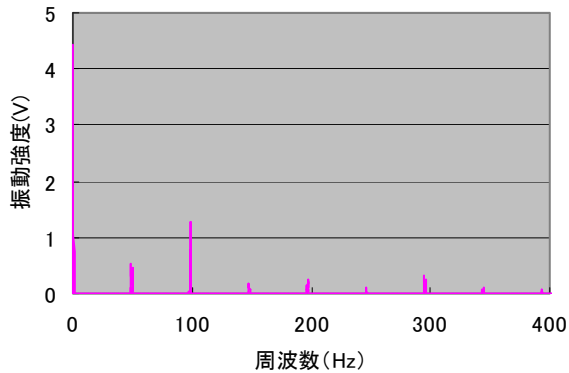


図 11 振動スペクトル図

図より、無線ネットワークを介して得られた振動データからでも、振動の周波数毎のスペクトルが得られていることが分かる。また、FFT による解析から得られた振動スペクトルは 50Hz 付近であり、回転数と歯車の歯数から推定される周波数とほぼ一致していることが分かる。

また、今回開発した計測用ソフトのピーク検出機能を用いて、FFT 解析により得られたデータから自動的にスペクトルのピーク位置を検出した結果について図 12 に示す。

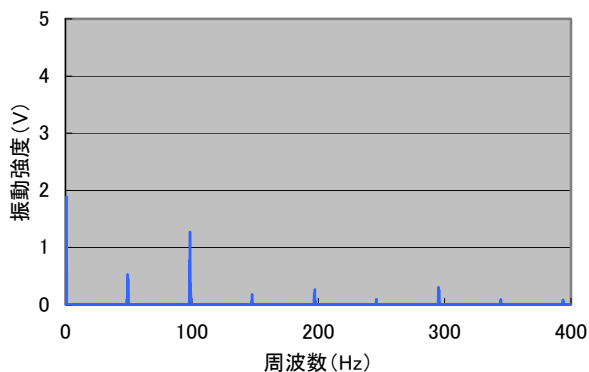


図 12 スペクトル検出位置

FFT によって得られたスペクトルの図 11 と、計測用ソフトによって検出されたスペクトルのピーク位置を示す図 12 とでは、そのピーク位置はほぼ一致していることが分かる。この結果から、今回制作した計測用ソフトにおいて、測定された振動データを FFT 解析し、そのピーク位置の検索を行うことにより機器の振動周波数、振動強度を検出し、異常判定に用いることが可能であると考えられる。

## ま と め

本研究では、マイコン・センサを用いて、無線ネットワークを介しての計測が可能な無線計測用ユニットの開発および機器を常時監視し、振動データなどから機器の異常解析を行うシステムの構築を目指して研究開発を行った。得られた結果は以下の通りである。

1. マイコンとセンサ、リアルタイム OS、無線通信ユニットを組み合わせることにより、小型で、ネットワーク配線敷設の必要がなく、機器に容易に設置することが可能な無線計測用ユニットを開発できた。
2. 無線計測用ユニットからのデータを一括して監視する計測用ソフトを開発した。また計測用ソフトに FFT 機能を搭載することにより、計測された振動データから周波数毎の振動スペクトルを得ることができた。
3. 計測用ソフトに、FFT 解析により得られた数値データからスペクトルのピーク位置を検出する機能を搭載することにより、得られたピーク位置とスペクトルの強度から機器の異常判定を自動的に行う機能を開発できた。
4. 計測用ソフトにメール送信機能を組み込むことにより、機器異常と判定された場合、登録された携帯端末に、電子メールによって異常を通知する機能を開発し、実験により機能の確認ができた。

## 文 献

- 1) (株) ルネサステクノロジ:H8/3069 F-ZTAT ハードウェアマニュアル第 3 版, (<http://japan.renesas.com/>) (2002).
- 2) 坂口良昌: 回転機械診断入門 : 金陵電機株式会社 (2005).
- 3) 佐川雅彦, 貴家仁志: 高速フーリエ変換とその応用: 昭晃堂 (1993). 第 1 章 - 第 2 章
- 4) 三上直樹: はじめて学ぶデジタルフィルタと高速フーリエ変換: CQ 出版社 (2005). p141-145
- 5) 淵上竜司 他: プロジェクト HOS (<http://sourceforge.jp/projects/hos/>).
- 6) 社団法人 トロン協会 ITRON 仕様検討グループ:  $\mu$ ITRON4.0 仕様書 ver. 4.02.00, トロン協会 (<http://www.tron.org/>) (2006).