

ミリ波レーダを用いた非接触型振動測定の有用性の検証

Verification of usefulness of contactless vibration measurement using millimeter-wave radar

電子・機械技術部 電子・情報科 石澤満 浜尾和秀
電子・機械技術部 機械・加工科 坂内駿平 小野裕道
材料技術部 金属・物性科 佐藤浩樹

ミリ波レーダによる非接触型振動測定システムを構築した。ミリ波レーダで測定可能な変位量及び振動数による変位量測定誤差を確認するため、振動試験機 (F-2500BDH/LA25) を用い加速度センサ (DS-5000) から算出した変位量と比較を行った。その結果、振幅 0.01[mm^r]で18%の誤差があるものの、振幅 0.1~3[mm^r]では、6%未満の誤差率で変位量を測定できた。また、振動数による変位量測定誤差は、8%未満であった。測定誤差はあるものの、非接触で振動測定可能であることが確認できた。

Key words: ミリ波レーダ、非接触振動測定、振動試験機、加速度センサ

1. 緒言

近年、AI 技術の普及に伴い、切削加工中の工具の欠損や破損を検知・予知するため、切削加工中の工具先端付近の振動を測定したいという要望がある。しかし、切削加工中の工具先端付近は高温であり、切削液も噴出しているため、加速度センサを設置することができない。そのため、非接触による振動測定手法が求められている。解決策として、レーザドップラ振動計による非接触振動測定も可能であるが、高価であること、測定物に目印のシールを貼る必要があるなど短所がある。一方、ミリ波レーダは安価であるため、レーザドップラ振動計に比べ導入しやすいが、測定精度の十分な知見が得られていない。

本研究では、ミリ波レーダを用いた非接触振動測定プログラムを開発し、測定可能な変位量及び振動数による変位量測定誤差を確認した。

2. 振動測定システム

2. 1. 測定原理

ミリ波レーダは測距、速度検出に用いられ、煙、霧などの悪条件でも使用できるという特徴がある。図1¹⁾に示すとおり、FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 方式のミリ波レーダは送信、受信チャープの周波数差分により得られたビート信号により距離を測定する。ビート信号の周波数が低ければ物体までの距離が近い、周波数が高ければ物体までの距離が遠いことを表す。一方、図2¹⁾に示すとおり振動測定は、同一周波数(距離)ビンにおけるビート信号の位相差により求められる。したがって、図3のとおり振動測定のサンプリングレートはチャープ送信間隔により決まる。ただし、レーダはフレーム周期を設定する必要があり、後述する実験では、図3のように生

データを取得できない時間が存在する。

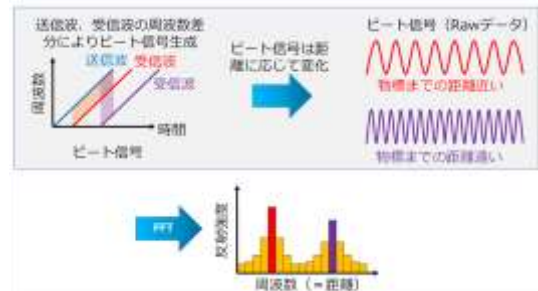


図1 距離測定原理

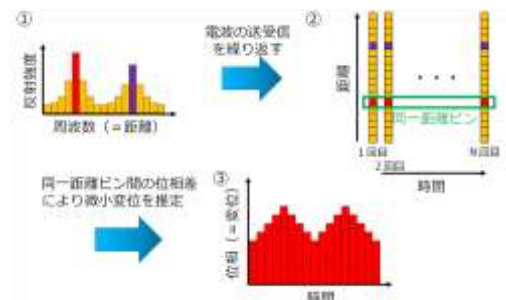


図2 振動測定原理

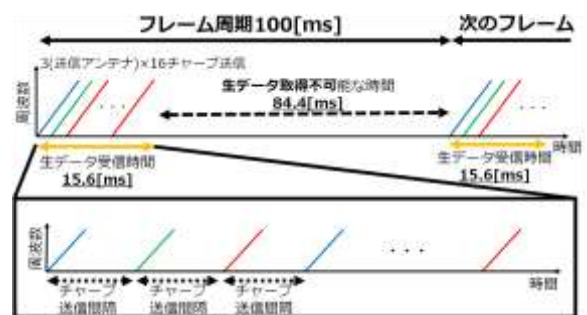


図3 フレーム周期

2. 2. システム構成

本研究で構築した振動測定システムを図4に示す。USBケーブルにより、ミリ波レーダから生データを取得する。次に、pythonの数値計算ライブラリによりフーリエ変換を行い、生データを周波数（距離）データにする。さらに、同一距離ビン間の位相を復元した後、位相差を求め、下式¹⁾より変位量を算出する仕組みである。表1にシステム構成を示す。

$$\Delta d = \frac{\lambda \Delta \varphi}{4\pi}$$

Δd : 変位量 λ : 波長 $\Delta \varphi$: 位相差

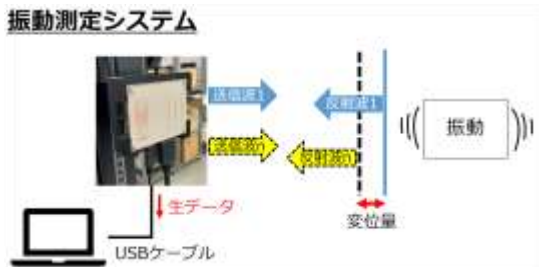


図4 振動測定システム全体図

表1 システム構成

| | |
|-------------------|-------------------------|
| CPU | Core i5 11400H |
| メモリ | 32GB |
| 79GHz ミリ波レーダモジュール | エスタカヤ電子工業（株）製 TITAN T14 |
| 生データ取得方法 | USB |

3. 実験

3. 1. 変位量測定実験

レーダで振動測定可能な変位量を確認するため、図5のとおり振動試験機（F-2500BDH/LA25）を用い、加速度センサ（DS-5000³⁾）との比較実験を行った。レーダチャープ設定、振動試験機の試験条件を表2、3に示す。表2の条件では、連続測定可能なレーダのサンプリングレートは1028[Hz]であり、測定点は16点になる。したがって、振動試験機の設定振動数を64.3[Hz]にした。

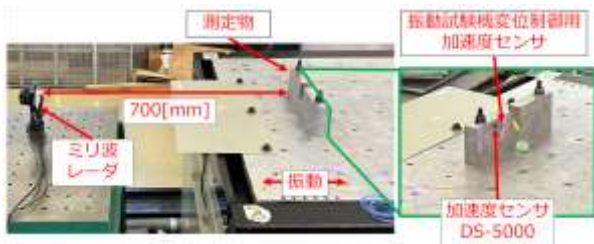


図5 実験時の様子

表2 レーダチャープ設定

| | |
|----------------|----------------|
| 周波数[GHz] | 77~81 |
| アイドル時間[μs] | 267 |
| ランプ時間[μs] | 57.14 |
| フレーム周期[ms] | 100 |
| チャープループ回数 | 16 |
| 1フレーム当たりのチャープ数 | 48(送信アンテナ3×16) |

表3 振動試験機の試験条件

| | |
|-------------------------|--------------|
| 振幅一定[mm ^{PP}] | 0.01、0.1、1、3 |
| 振動数固定[Hz] | 64.3 |
| 各試験時間[s] | 60 |
| 波形 | 正弦波 |
| 振動制御方法 | 測定物背面の加速度センサ |

3. 2. 変位量測定実験結果

振動数64.3[Hz]、振幅1[mm^{PP}]の振動をレーダ及び加速度センサで測定した1周期分の変位量測定結果を図6(a)、(b)に示す。図6(b)は加速度センサから得られた加速度を2重積分により、変位量を算出し、図示した。図6のとおり、レーダで測定した変位でも加速度センサから算出した変位と同様の正弦波が確認できた。

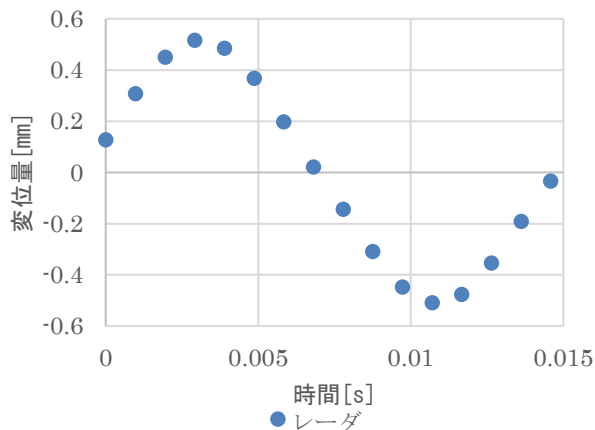
振動試験機の設定値を振動数64.3[Hz]、振幅を0.01~3[mm^{PP}]まで変えた際の振動を測定し、振動6周期のpeak-peak値6か所の平均値を算出した結果を表4に示す。表4より、振幅0.01[mm^{PP}]において、加速度センサとレーダの測定値の間に、18%の誤差があるものの、振幅0.1~3[mm^{PP}]では、6%未満の誤差率だった。

表4 変位 peak-peak 値の平均値比較結果 (N=6)

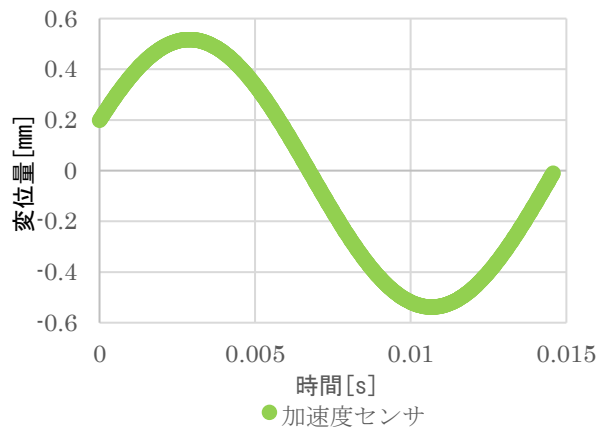
| 振動試験機の振幅 [mm ^{PP}] | 加速度センサ peak-peak 値の平均値 [mm ^{PP}] | レーダ peak-peak 値の平均値 [mm ^{PP}] | 誤差率 |
|------------------------------|--|---|------|
| 0.01 | 0.0114 | 0.00932 | 18% |
| 0.1 | 0.104 | 0.0998 | 4.4% |
| 1 | 1.05 | 1.02 | 3.3% |
| 3 | 3.12 | 3.31 | 5.9% |

3. 3. 振動数による変位量測定誤差実験

振動数による変位量測定誤差を確認するため、振幅を0.01[mm]で固定し、振動数を120、240[Hz]の2通りで加速度センサとの比較実験を行った。レーダチャープ設定は表2と同様である。振動試験機の試験条件は、



(a) レーダで測定した変位



(b) 加速度センサから算出した変位

図6 変位量測定結果（振動数 64.3[Hz]、振幅 1[mm^{p-p}]

振幅及び振動数のみ上記のとおり、変更した。

3. 4. 振動数による変位量測定誤差実験結果

実験結果を前記 64.3[Hz]の測定結果と併せ、表5に示す。表5のとおり、120、240[Hz]ともに8%未満の誤差率だった。

表5 振動数による変位 peak-peak 値の平均値比較結果 (N=6)

| 振動試験機の振動数[Hz] | 加速度センサ peak-peak 値の平均値 [mm ^{p-p}] | レーダ peak-peak 値の平均値 [mm ^{p-p}] | 誤差率 |
|---------------|---|--|------|
| 64.3 | 0.0114 | 0.00932 | 18% |
| 120 | 0.00950 | 0.0102 | 7.3% |
| 240 | 0.00956 | 0.0103 | 7.5% |

3. 5. 考察

変位量測定実験で18%の誤差率が出た要因に次の2つが考えられる。1つ目は、ノイズの影響である。振動試験機が停止した状態で、レーダで変位測定すると-0.006~0.005[mm]の変位が確認できており、このノイズの影響を受けたと考えられる。2つ目は、サンプル数の影響である。評価に使用したサンプル数は6であり、サンプル数が少ないため、ばらつきがあると考えられる。

振動数による変位量測定誤差実験では、120、240[Hz]ともに誤差率は8%未満だったが、測定したい振動数の10倍程度のサンプリング周波数が必要である。したがって、測定したい振動数に応じ、チャープ送信間隔を変更する必要があると考える。

今回の実験では、チャープ送信間隔を変更しなかったが、チャープ送信間隔を短くすれば高周波、チャープ送信間隔を長くすれば低周波の振動を測定することが可能と考える。

4. 結言

本研究では、レーダによる振動測定システムを構築した。また、レーダで測定可能な変位量及び周波数による変位量測定誤差を確認した。その結果、振幅 0.01[mm^{p-p}]で18%の誤差があるものの、振幅 0.1~3[mm^{p-p}]では、6%未満の誤差率で変位量を測定できた。また、振動数 120、240[Hz]における変位量測定誤差は、8%未満だったが、測定したい振動数に応じ、チャープ送信間隔を変更する必要がある。測定誤差はあるものの、非接触で振動測定可能であることが確認できた。回転機器、高温物など加速度センサの取付が困難な機器への変位測定に有効な振動測定手法である。

参考文献

- 1) 高松創. "millimeter-wave-radar-and-their-application-to-vibration-measurement.pdf". アナログ・デバイス株式会社. <https://www.analog.com/media/jp/training-seminars/seminar-materials/2022/radar-seminar/millimeter-wave-radar-and-their-application-to-vibration-measurement.pdf>, (参照 2022-11-30) .
- 2) Gianluca Ciattaglia, Adelmo De Santis, Devis Disha, Susanna Spinsante, Paolo Castellini, Ennio Gambi. "Performance Evaluation of Vibrational Measurements Through mmWave Radars". Remote Sensing. 2021.
- 3) 小野測器-音響振動解析システム O-Solution DS-5000". 株式会社小野測器. https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/data/os_ds/ds5000_osolution.htm, (参照 2023-01-13) .