

## 触診デジタル化による遠隔検査技術

Digitization of Palpation for Mechanical Instruments' Remote Inspection

\*情報技術総合研究所(博士(工学))

†先端技術総合研究所

‡情報技術総合研究所

## 要 旨

機械設備のメンテナンスに関する業界では作業員不足への懸念が高まっており、その対策として、点検・検査業務の遠隔化が検討されている。しかし、点検・検査業務のうち、触覚情報を用いる業務の遠隔化に取り組んだ事例はほぼなかった。そこで三菱電機は、機器の緩みの確認作業をターゲットに、現地の作業員の触覚情報をデジタル化し、それを基に遠隔地から熟練作業員が判定する遠隔化方式を開発した。さらに、現地作業員用のセンサーグローブと、熟練作業員による判定を容易にするための予備判定アルゴリズムを試作し、評価実験を通じて、予備判定として十分な性能を持つことを確認した。この技術は、点検・検査業務の遠隔化だけではなく、触診による遠隔医療など、様々な用途への適用が期待できる。

## 1. ま え が き

我々の生活は様々な機械設備に支えられている。これらを安全に使用し続けるためには、適切なメンテナンスが行われる必要がある。特に重要な機械設備に対しては、熟練作業員が、法令で定める状態を維持できていることを確認する定期検査が義務付けられている。近年、働き方改革や少子高齢化の進行によって、メンテナンス業界での作業員不足の懸念が高まっており、デジタル技術の導入による効率化が求められている。政府のデジタル臨時行政調査会でのアナログ規制の見直し<sup>(1)</sup>でも、遠隔化技術の導入可能性が議論されていた。

視覚情報や聴覚情報を遠隔地に伝送する技術は既に普及しており、検査業務への適用も検討されているものの、作業員の触覚情報に基づいて状態を判定する検査項目(触診)の遠隔化は実現されていない。定期検査では、一度の訪問で複数の検査をまとめて実施するため、全ての検査項目の遠隔化がされていないと、現場訪問に要する時間の短縮にはつながらない。このような背景から当社は、触覚情報を利用している検査をデジタル化し、熟練作業員の現地訪問をなくす技術に取り組むことにした。また、遠隔医療の観点から触診の遠隔化について検討された事例があり<sup>(2)</sup>、今回の検討の成果も将来的に医療を含む様々な業界へ展開できると考えた。

今回の検討でのターゲットの検査項目は、機械設備の検査で触覚情報を利用する項目の多くを占める、機器の緩み状態の確認とした。この検査は、現地で機器を加振する際の手の力や動きをセンサーで取得し、そのデータを遠隔地の熟練作業員に提示することによってデジタル化できると考えた。現地での加振とデータ取得の方式を検討した結果、現地で複数の検査対象物がある場合に対象物間の移動が必要であり、また、作業空間が限られることが多いことから、非熟練である現地作業員がセンサーグローブを着用し機器の加振を行う方式を選定した。今回、この仕組みの実現性を確認するために、現地作業員によるデータ取得用のセンサーグローブの試作と現地での予備判定を行うアルゴリズムの試作と評価に取り組んだ。また、予備判定の後、遠隔地の熟練作業員が、センサーデータを確認し、経験を生かした総合的な見地から本判定を行うことで、効率的かつ信頼性の高い検査業務を実現できると考えた(図1)。

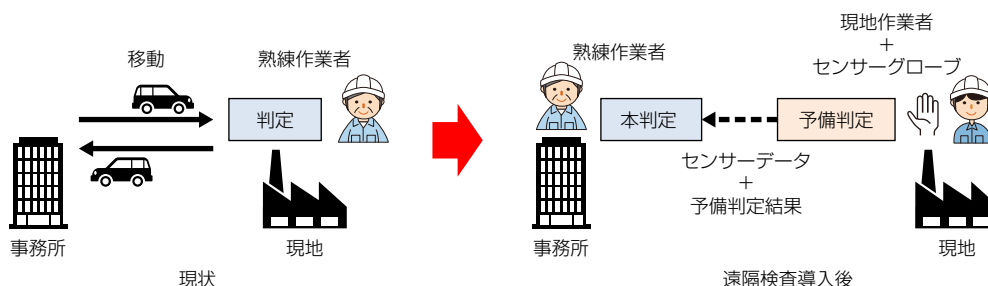


図1-触診のデジタル化による遠隔検査の導入

## 2. 現場でのデータ取得用センサーグローブの試作

提案方式の実現性を確認するために、まず現地作業者が装着するセンサーグローブを試作した<sup>(3)</sup>。

### 2.1 評価対象事象の選定

センサーグローブの試作に先立って、具体的な対象事象について検討した。機械設備の検査で触覚情報を活用する項目の大部分は、機器の緩みの有無の判定で、対象となる部材は、センサーやカバーなど指で把持して加振できるサイズのものが多い。そこで、図2のようにボルトで固定された検査対象物を親指と人差し指で両側から把持して加振する検査を評価対象の事象とした。

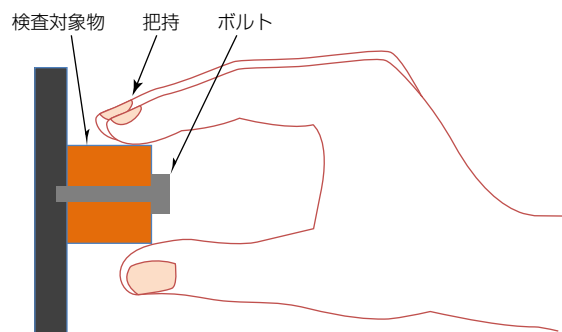


図2-評価対象とする検査のイメージ

### 2.2 センサーの選定とセンサーグローブの試作

加振中のデータ取得に利用するセンサーを選定し、センサーグローブを試作した(図3)。

緩みの判定のために必要なセンサーデータは、加振対象物への加振中の動きとその元になった指からの力の大きさと向きである。作業の対象が変わるたびにセンサーの設置・固定を行うと作業性が低下することから、手側にセンサーを配置することにした。加振中は、検査対象物とは指先だけで接触した状態になるため、指先との“接触力”と“加速度”情報の取得を重視することにした。この配置の制約とシステム構築の容易性を考慮して、検査対象物との接触面である親指と人差し指の先に圧力センサー①、②、人差し指の先に加速度センサー③を配置した。

これらのセンサーを指先に配置する際、作業者が装着する手袋と一体化することで、作業性を損なわず、装着負担も低減できると考えて、作業用手袋にセンサーを固定したプロトタイプを製作した。さらに、センサーグローブはBluetooth<sup>(注1)</sup>でパソコンやスマートフォンと接続できるようにすることで、センサー用の配線が作業者の動作を制約しない構成にした。

(注1) Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc.の登録商標である。

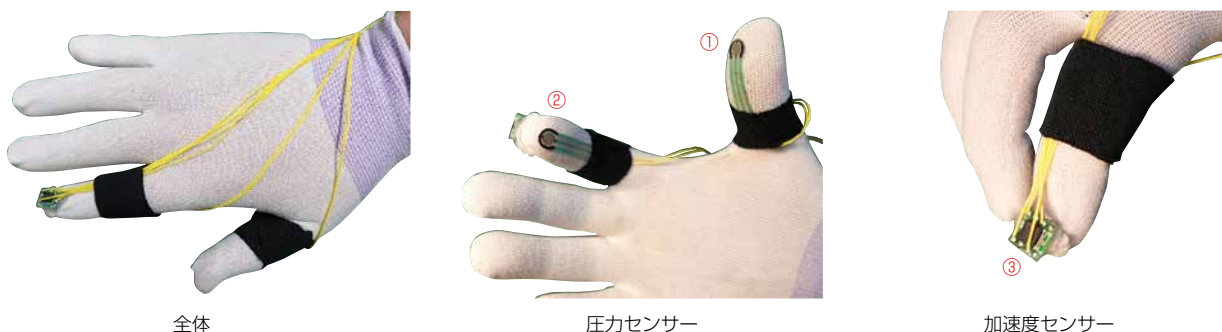


図3-センサーグローブのプロトタイプでの三つのセンサー

### 3. 予備判定アルゴリズム

センサーグローブの試作と併せて、熟練作業による判定の前段階として、緩みの有無の予備判定を行うアルゴリズムの試作を行った。このアルゴリズムは、3.1節に述べる加振良否の判定と3.2節に述べる緩み有無の判定の2段階から成る。加振が適切と判定された場合にだけ、緩み有無の判定に進む。予備判定の後の本判定では、通常と異なる複雑な応答を示した場合や、緩みが小さい場合などに、熟練作業者の経験を基にした総合的な見地からの判定を行う。

#### 3.1 加振良否の判定

加振が適切でないケースには、適切に“把持”できていない場合と、把持できているが“加振動作”の向きや力の大きさが不適切な場合があることから、それぞれの判定を行う。

“把持”の判定は、親指と人差し指それぞれの指先の圧力センサーの値としきい値の関係によって行い、両方とも圧力のしきい値を超えている場合を適切に把持できていると判定する。

“加振動作”の判定は、二つの指の圧力センサーの変動の位相差が、あらかじめ設定した位相差のしきい値を超えている場合を適切な加振と判定する。適切な方向にタイミング良く加振動作を行っている場合、二つの波形が逆位相になる一方、加振方向が異なる場合や十分に把持できていない場合は、周期的な波形が崩れて、逆位相にはならない。図4にタイミングの良い加振によって逆位相が発生している場合と、比較用に同位相になるように開閉動作を行った場合の波形を示す。位相差は、二つの波形に対して、バンドパスフィルター(1～5 Hz)を適用して交流成分を抽出した後、単一周波数の正弦波フィッティングを行うことで周波数を特定し、算出する。

これらの“把持”と“加振動作”、両方の条件を満たす場合を適切な加振として判定し、不適切な場合にはもう一度加振を指示することにした<sup>(4)</sup>。

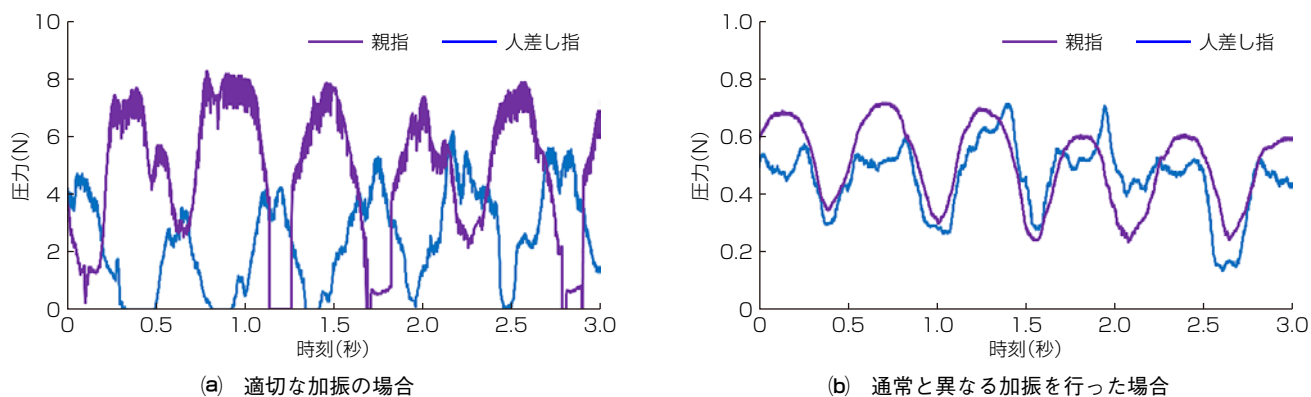


図4-加振時の圧力センサー波形の変化

#### 3.2 緩み有無の判定

加振良否判定によって適切な加振と判定されたデータに対して、緩みの有無を判定する。緩みの有無は、指先の加速度波形での最大振幅を用いて判定した。これは、図5に示すように、金属ブロックのボルト用の穴とボルトの間には遊びがあり、緩みがある場合には加振によってブロックが移動し、遊びの端に衝突する際にパルス状の加速度波形が発生することを利用している。具体的には、1秒ごとの加速度変動の最大振幅を算出し、さらにその最大振幅の計測期間(約10点)の平均を算出し、この値と実験的に設定したしきい値(0.5)を比較し、しきい値を超えた場合に、緩みありと判定することにした。

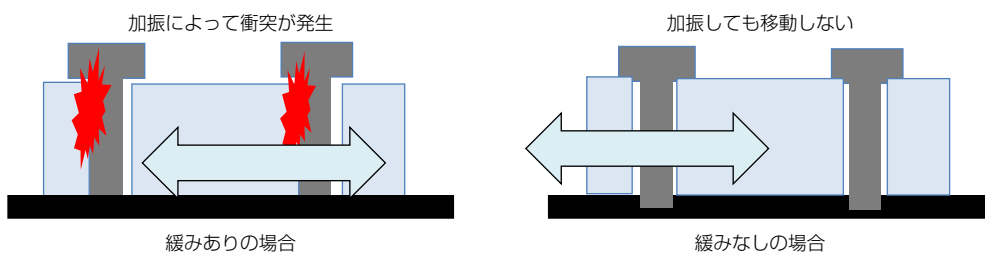


図5-緩みによるパルス状の波形の発生

## 4. 評価実験

センサグローブと予備判定アルゴリズムの有効性を確認するため、治具を製作し、データの取得及び判定を試行した。

### 4.1 評価実験の条件

評価実験のために検査対象物のサイズに合わせた金属ブロックを2本のボルトで固定する形の治具を製作した(図6)。このボルトにはコイルばねを挟んで、ボルトの締め付けをトルクレンチで行うことで、締め付け力を再現可能な形で緩みあり／なしの状態を設定した。評価実験では、センサグローブを着用した被験者に10秒程度加振してもらい、加振良否判定で適切な加振と判定されたデータだけを取得し、緩みあり61件、緩みなし61件の評価用データを取得できた。

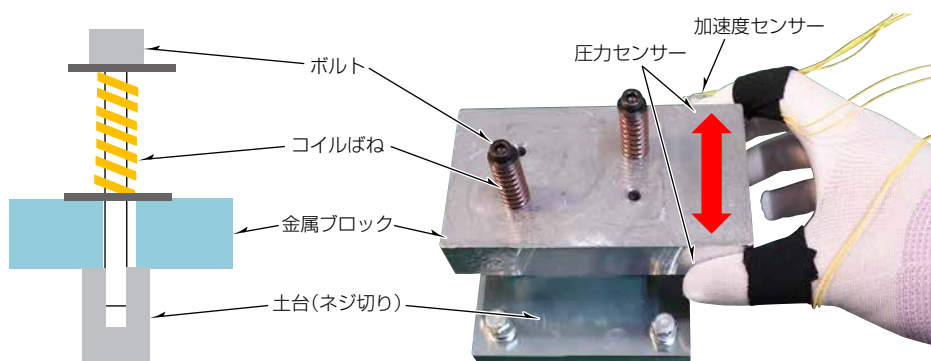


図6-評価用データ取得用治具

### 4.2 実験結果

取得した評価用データを用いて、予備判定アルゴリズムの判定性能の評価を行った。評価用データでは、図7に示すように、緩みありの場合に加速度のピークが大きくなり、緩みなしの場合に加速度のピークが小さくなる傾向を確認した。

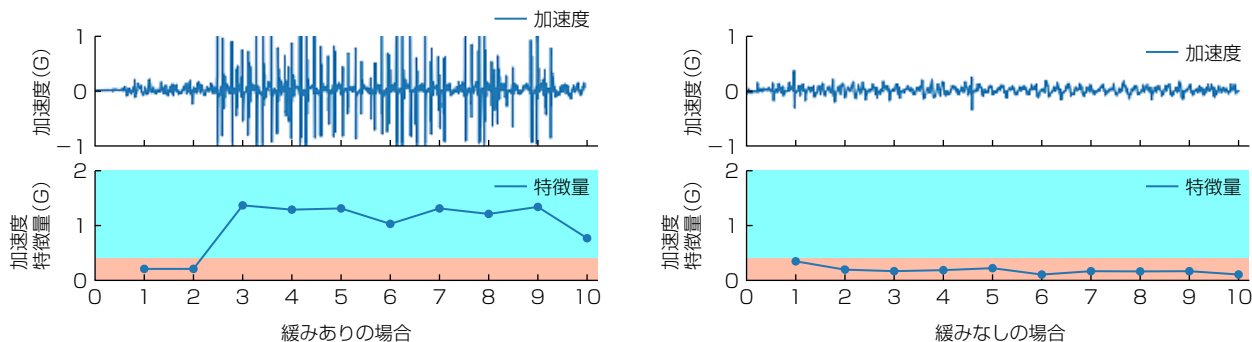


図7-緩み有無による波形の違い

さらに、各データの判定特徴量を算出したところ、図8に示すように全てのデータに対して、治具の設定と完全に一致した判定結果(正答率100%)が得られた。このように予備判定で高い精度が得られれば、熟練作業による本判定では、緩みが小さい場合などの難易度の高い判定に集中することが可能になる。これらの結果によって、今回開発した予備判定アルゴリズムは機器の緩みの検査の遠隔化と効率化に有効であることを確認できた。

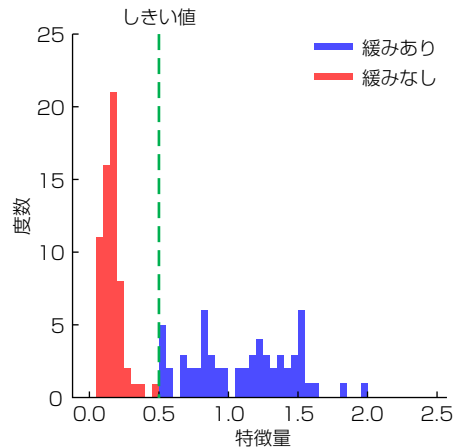


図8-加速度波形から算出した特徴量の分布

## 5. む す び

触覚情報を活用する検査の遠隔化に向けて、現地作業者の触覚情報をデジタル化するために、センサグローブと予備判定アルゴリズムを試作するとともに、緩みの予備判定として十分な性能を持つことを確認した。今後は、形状・サイズ・固定方法が異なる検査対象物に対しての有効性の確認、作業や環境に対するロバスト性の確保や、データの保護・管理の仕組みについて検討していく。触覚情報を含めた作業遠隔化技術の開発を通じて、機械設備のメンテナンスを始めとした様々な業界で、世界中のどこにいても熟練作業による信頼性の高いサービスを容易に利用できる未来の実現を目指す。

## 参 考 文 献

- (1) デジタル庁：デジタル臨時行政調査会  
<https://www.digital.go.jp/councils/administrative-research/#decision>
- (2) 田中由浩：触覚研究の動向，システム／制御／情報，**64**，No.4，119～120（2020）
- (3) 福井孝太郎，ほか：センサグローブを活用した遠隔検査システムの検討，第40回日本ロボット学会学術講演会，2C3-06（2022）
- (4) 小林翔一，ほか：締結状態検査の自動検出方式の開発，2023年電気学会 電子・情報・システム部門大会，GS10-5（2023）