

## ボルト締結力遠隔可視化アプリケーションの開発と評価

菅原光<sup>1</sup> Michail Sidorov<sup>1</sup> 大村廉<sup>1</sup>

**概要：** 構造物の状態管理のために、センサと通信機器を組み合わせたセンサノードを用いた構造物ヘルスマモニタリングの取り組みがおこなわれている。モニタリングの対象によっては大量のセンサノードを扱う必要が生じる。しかし、既存のシステムではそのような状況について十分に考慮されていない場合が多い。そこで本研究では、ボルトに設置したセンサノードを管理・可視化するアプリケーションとして「TenSpect」を開発した。TenSpect ではセンサノードを設置した位置単位で表示するリスト機能、測定データを可視化するグラフ機能、構造物上での設置位置を示す3Dモデル機能を実装した。TenSpect について、8人のユーザーにアンケートベースでタスクを実行してもらい、リスト機能や3Dモデル機能の有効性を評価した。結果として、多数のセンサノードが存在する状況において、個人差はあるものの設置位置をもとにした管理が有効に機能することが示唆された。

## Development and Evaluation of Bolted Joints Tension Monitoring Application

Hikaru Sugawara<sup>1</sup> Michail Sidorov<sup>1</sup> Ren Ohmura<sup>1</sup>

### 1. はじめに

橋やビルなどの構造物および構造物を構成する部材の状態を管理するために、IoT 技術を取り入れた構造物ヘルスマモニタリングがおこなわれている。このような取り組みでは、センサと通信機器を組み合わせたセンサノードを用いてモニタリングを実現している。目的に応じたセンサノードを運用することで、従来に比べて高度な管理や点検が可能となり、作業の効率化や事故防止につながることを期待されている。

センサノードで測定したデータは、アプリケーションの開発やデータの分析に活用される。例えば加速度や変位といったデータは構造物の揺れ、振動を検出するための手が必要となる。大きな加速度が観測された場合や加速度から損傷が予測される場合にユーザーに警告をおこなうシステムが開発されている [1], [2]。部材に注目した研究では、ボルトに目印となるマーカを貼り付けて画像を撮影し、ボルトの緩みを検出する研究がおこなわれている[3]。

既存のシステムでは、設置するセンサノードの数や位置の管理については十分に考慮されていない場合が多い。ボルトのような部材の状態をモニタリングする場合、その情報は局所的なデータである。複数の部材が使用されている場所に設置することを考えると、その中からいくつかの部材にセンサノードを設置してデータを測定する必要がある。そのような設置の仕方を構造物全体に適用した場合、規模

によっては大量のセンサノードをシステム側で扱う必要が生じる。大量のセンサノードが設置された場合、ユーザーが目的とするデータにたどり着くことが困難になると想定されるため、そのような状況においても管理がおこなえるようにする必要がある。また、モニタリングをおこなう中で構造物の一部に異常が発生することが起こり得る。どの場所で異常が生じているのかという情報を扱うことは問題に対応する上で重要であると考えられる。

そこで本研究では、ボルトに設置したセンサノードを管理し、データを可視化するアプリケーションである「TenSpect」を開発した。モニタリングの機能として、センサノードで測定したデータをグラフとして可視化する。TenSpect ではセンサノードがどこに設置されているのかという点に注目し、構造物・設置位置・センサノードという階層構造で管理する。また、3Dモデル上にモニタリングの対象となっている位置を表示する。これらの機能について、仮想の構造物のデータを用意し、ユーザーにタスクを実行してもらうことで評価する。

本論文の構成は次に示す通りである。2章では基盤となる技術や既存の研究について扱う。3章では開発したTenSpectの概要を述べ、4章では開発にあたり検討した事項について述べる。5章では可視化に関する機能の実装で用いたパラメータを一例として示す。6章ではタスクを用いた評価の説明とその結果について述べ、7章では結果をもとにした考察をおこなう。8章ではまとめをおこなう。

<sup>1</sup> 豊橋技術科学大学  
Toyohashi University of Technology

## 2. 関連研究

Sidorov らは、ボルトが材料を押さえつける力（締結力または軸力、以下、「締結力」と呼ぶ）をモニタリングするセンサノードとして **TenSense** を開発した[4]。 **TenSense** をボルトの下に設置することで締結力を測定することが可能である。このようなセンサノードは得られるデータが局所的なデータであるため、複数個設置することが前提となる。そのため構造物全体としては、多数のセンサノードの設置が必要になる可能性が生じる。送信されるデータにはバッテリー電圧のようにセンサノード自身に関するデータも含まれており、また改良により将来的に扱うデータが変更、増加する可能性がある。センサノードがデータを送信する頻度は低く、1日に数回程度である。本研究では、このような特徴を持つセンサノードの管理およびアプリケーションに必要な要素を明らかにすることを目指す。

Suryanita らは、橋梁に設置したセンサノードで加速度・変位を測定し、地震による損傷を予測するシステムを開発した[1]。測定した加速度や変位はグラフを用いて可視化し、予測した損傷レベルが一定以上であれば警告をおこなうことが可能である。構造物に関するモニタリングをおこなっている点では類似しているが、本研究とは異なり構造物自体を主な対象としている。また、モニタリングに大量のセンサノードが必要となることを想定しておらず、そのような状況での管理が十分に考慮されていない。そのため、大量のセンサノードが存在する場合においても管理できる機能が必要である。

Monti らは、大学内にセンサノードを設置し、空気の状態や気温といった情報をセンシング・可視化するシステムを開発した[5]。可視化にはグラフが用いられており、フロアマップや検索機能を用いて特定の場所に関するデータを容易に表示することが可能である。このシステムではセンサノードを設置した位置に基づいた管理がおこなわれている。しかし、あくまで環境に関するデータを測定するものであり、異常なデータが測定された場合にその原因となる場所を示すことはできていない。そのため、センサノードを設置した位置に基づいて管理をおこなうことで特定のデータを容易に表示できるようにし、また異常なデータを示すことができる機能が必要である。

Insa-Iglesias らは、トンネル内壁の画像をもとに検査をおこなうためのフレームワークを開発した[6]。撮影した画像から内壁に生じた欠陥の位置や大きさなどの情報を分析し、トンネルを模したグラフやマップ上、3D 仮想環境内に表示している。これにより、欠陥の位置を直感的に示すことが可能となっている。しかし、モニタリングを目的としないため、センサで測定したデータを扱うような機能は実装されていない。モニタリングをおこなうためには、センサで測定したデータを表示する機能が必要である。

榎本らは、3D モデルを活用した橋梁点検管理支援システムを開発した[7]。3D モデルに損傷の情報を記したピンを配置することで、損傷が生じた場所を直感的に示している。Insa-Iglesias らの研究と同様にモニタリングは目的とされていないためセンサデータを扱うことはできず、損傷の位置や情報を示す機能が重視されている。モニタリングから検査などの対応へつなげることを考えると、これらの機能はモニタリングにおいても必要なものである。

本研究では、システムには以下のような機能が必要であると考えた。

- センサノードを効率的に管理する機能
  - モニタリングをおこなうために測定データを可視化する機能
  - モニタリングを実施している位置を示すための機能
- これらの機能について、実際に実装をおこなう。

## 3. TenSpect

**TenSpect** は、構造物に設置したセンサノードを管理・可視化するアプリケーションである。具体的には、**TenSense** を想定して設計された。**TenSpect** の外観を図 1 に示す。**TenSpect** は構造物において非常に多く使用されることの多いボルトのモニタリングをおこなうため、以下に示す機能を設けた。

- ① 設置した **TenSense** を一覧表示するためのリスト機能
- ② 測定したデータを可視化するためのグラフ機能
- ③ センサノードが設置された位置を示すための 3D モデル機能

以降、各機能について説明する。

① リスト機能では構造物に設置した **TenSense** の管理を実現するために、設置した **TenSense** をリストとして表示する。**TenSense** が複数設置された場合の管理を容易にするため、図 2 のように構造物・設置位置・**TenSense** を階層構造のように扱いデータを表示する。これにより、例えば橋梁の橋脚、支承、橋桁など特定の場所に注目してデータを確認することが可能になる。リストではモニタリング機能の一つとして各 **TenSense** の最新の測定データを表示する。リ

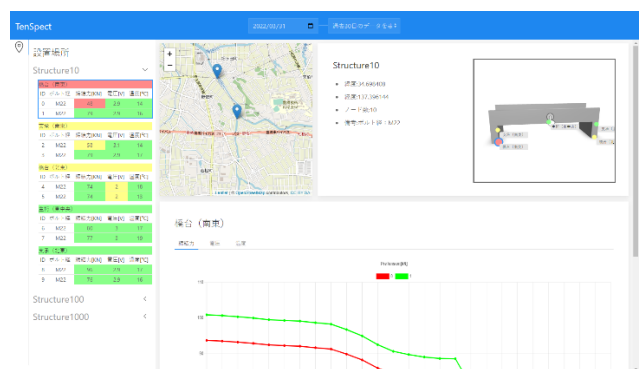


図 1 TenSpect の外観

設置場所				
Structure10				
橋台 (南東)				
ID	ボルト経	締結力(KN)	電圧[V]	温度[°C]
0	M22	48	2.9	14
1	M22	79	2.9	16
主桁 (南東)				
ID	ボルト経	締結力(KN)	電圧[V]	温度[°C]
2	M22	58	5.1	14
3	M22	79	2.9	17
橋台 (北東)				
ID	ボルト経	締結力(KN)	電圧[V]	温度[°C]
4	M22	74	2	18
5	M22	74	2	13
主桁 (東中央)				
ID	ボルト経	締結力(KN)	電圧[V]	温度[°C]
6	M22	80	3	17
7	M22	77	3	19
主桁 (北東)				
ID	ボルト経	締結力(KN)	電圧[V]	温度[°C]
8	M22	96	2.9	17
9	M22	76	2.9	16
Structure100				
Structure1000				

図 2 TenSense を一覧表示するリスト

スト中の設置位置と測定データを表示している部分では、測定データの低下などを強調して示す機能として、複数の色を用いて状態を表示する。状態の判定は TenSense の測定データと事前に設定したしきい値を用いておこなう。安全だと判断したものは緑色（安全状態）、注意が必要だと判断したものは黄色（警告状態）、危険だと判断したものは赤色（危険状態）で示している。設置位置の色については、その位置に設置されている TenSense の状態に連動して変化する。これらの色を確認することで、取り付けられている TenSense の中で異常が発生しているものを発見することが可能である。

② グラフ機能では TenSense を設置したボルトのモニタリングを実現するために、測定データをグラフとして表示する。モニタリングするデータは常に一定ではなく、時間をかけて変化する場合と短い期間で変化する場合に分けることができる。そのようなデータの傾向に合わせてグラフを表示するために、データの期間を 1 日、7 日、30 日から選択して表示する。グラフには、リスト機能上で選択した TenSense が測定したデータを表示する。または、図 3 のようにある位置に設置されている複数の TenSense のデータを同一のグラフ上に表示することができる。このように任意の TenSense のデータを適切な期間でグラフ表示することで、モニタリングを実現する。

③ 3D モデル機能では、構造物上で TenSense がどの場所に設置されているかを視覚的に示すための 3D モデルを表示する。リスト機能の説明で述べたように、TenSpect では TenSense を設置位置単位で管理する。3D モデルには図 4 に示すように設置位置が構造物上でどの位置に存在しているのかを示すためのマーカーを表示する。マーカーの色はリスト機能と同様に緑、黄、赤の 3 色に分けることで、その設置位置の状態を示す。3D モデルはマウス操作により任意の角度から観察することができる。3D モデルから TenSense が設置された位置や状態を読み取ることで、問

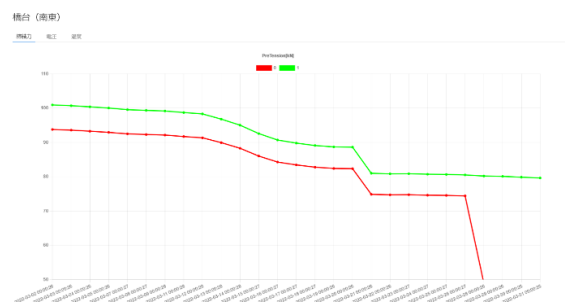


図 3 TenSense の測定データを可視化するグラフ

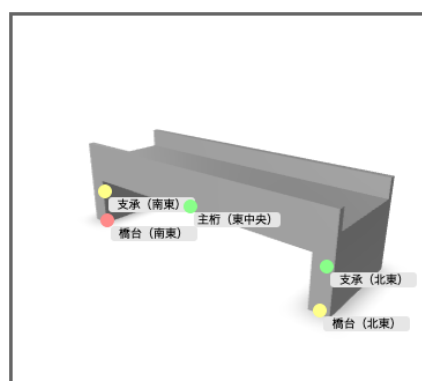


図 4 TenSense の設置位置を示す 3D モデル

題箇所の特定や点検時の参考に行うことができる。

これらの機能では、リスト機能を起点として関連する情報を連動して表示することができる。リストから TenSense を選択した際、該当する TenSense のデータがグラフとして表示される。リストから設置部位を選択した場合では、グラフにはその設置位置の TenSense のデータをすべて表示する。これらのグラフ表示と同時に、対応する設置位置をリスト上と 3D モデル上で強調表示することで、現在どの場所の情報を表示しているのかを示す。

## 4. 設計

モニタリングのために設置するセンサノードは、構造物を構成する部位に分けて管理する。橋梁であれば橋桁や橋台、トンネルであればある一区間（スパン）内で内装板や天井板、附属物を設置するための吊り金具部分など複数の要素で構成されていると捉えることができる[8], [9]。これらの情報を参考にし、アプリケーションで扱う構造物のデータに「モニタリングの対象部位」と「各部位に設置されているセンサノード」という情報を含める。情報の構造としては最も外側のレベルとして構造物、1 つ下のレベルの情報として設置位置（部位）、2 つ下のレベルの情報としてセンサノードが存在する形式になる。構造物に設置したセンサノードについて、通常は構造物や設置位置に関する情報を確認し、必要に応じて各センサノードの情報を詳細に

確認するような使い方が可能になる。

センサノードで測定するデータに対し、状態を判定するためのしきい値を2つ設定する。センサノード種別ごとに測定するデータの内容が異なり、その安全域や危険域なども異なるため、しきい値は個別に定義できるようにする。しきい値は状態表示以外の用途にも利用する。例えば、しきい値をトリガーとして異常発生をメールでユーザーに伝えるような機能を実装することが可能である。

グラフでは、データが取り得る範囲の下限となるような値として基準値を設定しておき、基準値をもとにグラフの範囲を制限して表示する。例えば、ボルトが正常に締結されている状況において、測定した締結力が0 kN 付近の値を取ることは起こり得ない。そのような場合はグラフの下限を定義した基準値をもとに設定することで、測定する値に対して適切な範囲のグラフとなり変化を確認しやすくなる。

3D モデル上にマーカーを配置して設置位置を示すためには、マーカーを表示する座標の情報が必要である。3D モデルは実際にセンサノードを設置する構造物に見立てて情報を表示している。現在、デジタルツインなどの取り組みの一つとして構造物の3D モデル化などがおこなわれつつある[10]。3D モデルとそれに対する座標の情報および位置の名称をデータとして管理することで、構造物上でモニタリングをおこなっている位置を直感的に示すことができる。

データの保存には、データ構造に柔軟性を持つデータベースを選択する。TenSpect で扱うデータは構造物に関するデータと、センサノードが測定したデータである。構造物に関するデータとしては、設置位置と3D モデル上での座標、各設置位置のセンサノードのデータなどを扱う。設置位置とセンサノードのデータは、階層構造として関連付けて扱うことを考えている。センサノードについて、測定するデータは送信頻度が1日に数回程度のものである。1年間モニタリングをおこなった場合、1つのセンサノードあたり数百～数千程度のデータがセンサノードの数だけ追加される。また、センサノードの実装次第では測定データが変更、追加される可能性があるため、データ構造に柔軟性が求められる。データベースには大きく分けてリレーショナルデータベースと非リレーショナルデータベースがある。リレーショナルデータベースはデータの整合性を保ちやすく、非リレーショナルデータベースはデータの構造を事前に定義する必要がなく、変更が容易という利点がある。TenSpect では後者の利点が大きいため、データの保存にはデータ構造の変更が容易な非リレーショナルデータベースを用いる。

## 5. 実装

状態の判定やグラフ表示に用いるパラメータについて、TenSense を使用した場合を一例として示す。パラメータは

センサノードが測定するデータに合わせて設定する必要がある。ここでは3章と同様に TenSense を例とし、TenSense が送信するデータである締結力、バッテリー電圧、温度の3つのデータに関するパラメータを設定した。

締結力に関するパラメータは使用するボルトの種類に依存するため、ボルトの呼び径をM20、強度区分を10.9に仮定して設定した。部材の固定に必要な締結力はボルトの呼び径や強度区分によって異なる[11]。ここでは呼び径M20、強度区分10.9の場合に必要な締結力である161 kNをもとに各パラメータを決定する。締結力がどの程度低下した場合に危険なのかという点については、使用されているボルトの本数や各ボルトの締結力から判断する必要があるため、厳密な定義はおこなわないものとする。ここでは締結力が設置時から10%低下、40%低下した値を目安とする。設置時の締結力を161 kNとしたとき、10%低下した145 kNを警告状態と判定するしきい値、40%低下した97 kNを危険状態と判定するしきい値に設定した。締結力のグラフの基準値としては、97 kN 付近が含まれていれば十分であるとし、90 kN を基準値とした。

バッテリー電圧に関するパラメータは、TenSense の動作電圧を参考に設定した。TenSense は1.6~3.6 V が動作電圧範囲であるため、1.6 V を下回った場合は動作が保証されない[12]。そのため、動作が停止してしまう前に電圧が低下していることを示す必要がある。ここでは動作電圧範囲の50%に相当する2.4 V を警告状態と判定するしきい値、動作電圧範囲の10%に相当する1.76 V を危険状態と判定するしきい値に設定した。バッテリー電圧のグラフの基準値としては、1.6 V を下回った場合でも動作が続いている可能性を考慮し、1.4 V を基準値として設定した。

温度に関するパラメータは、TenSense の動作温度と豊橋市の気温を参考に設定した。TenSense の動作温度範囲は-30~70 °Cである[12]。実際に測定される温度についてはTenSense を設置する場所の影響を受ける。愛知県豊橋市に設置することを想定した場合、2006~2020年の最低・最高気温はそれぞれ1.9 °Cと31.5 °Cとなる[13]。気温が上昇する夏の時期には、測定される温度が30 °Cを超えることが考えられる。また、TenSense の設置場所次第では直射日光が当たり続けることで更に温度が上昇することや内部に熱がこもってしまうことが想定される。温度が低下する場合については、最低気温が1.9 °Cであることから、0 °Cより低い温度が測定されることはほとんど起こらないものと考えられる。そのため30 °Cを警告状態と判定するしきい値、30 °Cと動作温度範囲上限の70 °Cの間である50 °Cを危険状態と判定するしきい値に設定した。温度のグラフの基準値としては、0 °Cより少し低い値として-10 °Cをグラフの基準値に設定した。

## 6. 評価

### 6.1 概要

ユーザーに TenSpect を用いたタスクを実行してもらい、実装した機能について評価をおこなった。TenSpect は構造物ヘルスマonitoringに向けたアプリケーションであるため、分野が近い建築分野に携わる学生や教員、市役所の道路建設課の職員ら 8 名を対象として実施した。実施方法として、Google フォームを用いたアンケートベースで回答を得た。

タスクではセンサノード数により生じる違いを比較するため、センサノード数が 10 個、100 個、1000 個の 3 種類の仮想の構造物を Monitoring 対象として設定した。仮想の構造物は橋梁を想定したものであり、表 1 に示すような設定とした。各構造物について、センサノードの設置位置として「橋台（南東）」「支承（北西）」など複数の設置位置を定義した。各設置位置のセンサノードの数は全体のセンサノード数と設置位置数をもとに均等に配分した。設置位置のいくつかはタスクで解答してもらうために警告・危険状態として表示した。センサノードのデータには、大学近所の橋梁に設置した TenSense で測定したデータから作成したものを使用した。

センサノードの数が異なる仮想の構造物に対し複数の設置位置に異常が発生している状況を想定し、指定した状態になっている設置位置を選択してもらうタスクを設定した。このような設置位置を見つけることができれば、設置されているセンサノードについてその状態を詳しく Monitoring し、必要に応じて現地で調査をおこなうなど適切な対応に繋げることが期待される。各構造物について、タスクとして選択する内容は表 2 に示すものとした。解答は対象の構造物で定義した設置位置を選択肢として提示し、条件に一致するものをすべて選択してもらう形式でおこなった。

表 1 タスクで使用した仮想の構造物の設定

構造物名	センサノード数	設置位置数	警告状態数	危険状態数
Structure10	10	5	2	1
Structure100	100	10	2	2
Structure1000	1000	20	4	4

表 2 指定した状態の位置を選択するタスク

タスク	構造物	選択する内容
(1)	Structure10	警告状態（黄）の位置の名称
(2)	Structure100	危険状態（赤）の位置の名称
(3)	Structure1000	警告・危険状態（黄または赤）の位置の名称

### 6.2 結果

各タスクの結果から正解となる選択肢だけを選択した場合を全問正解とし、人数を数えたものを表 3 に示す。タスク (1), (2) では 8 人中 6 人が全問正解であった。タスク (3) では 8 人中 4 人が全問正解という結果になった。

タスクの結果から各ユーザーの解答の傾向を確認するため、誤った選択肢を選択した場合を不正解、正解の選択肢の中で選択されなかった場合を見落としとして、ユーザーごとにグラフにしたものを図 5 に示す。図 5 より、タスク (1), (2) において不正解の数が 1 のユーザーと見落としの数が 1 のユーザーがそれぞれ 1 人ずつ存在する事がわかる。また、この 2 つのタスクにおける解答の傾向は同一であり、違いが生じていない。タスク (3) においては、不正解の数が 1 以上のユーザーが 3 人、見落としの数が 1 以上のユーザーが 4 人存在し、いずれもタスク (1), (2) から増加していることがわかる。一方、4 人のユーザーは不正解の数、見落としの数がどちらも 0 であり、すべてのタスクにおいて正しい解答を選択することができている。

3 つのタスクそれぞれにおいて、リストや 3D モデル機能についてどのように感じたかアンケートをおこなった。その結果について表 4 に示す。「橋梁のどの位置で Monitoring がおこなわれているか 3D モデルから知ることができる」「注意が必要な場所・センサノードについてリストから知ることができる」といった質問に対して、いずれのタスクの場合においても 4 人以上のユーザーから「同意する」という回答が得られている。残りのユーザーについても、「少し同意する」という回答が得られている。このことから

表 3 各タスクにおける全問正解の人数

タスク	人数
(1)	6
(2)	6
(3)	4

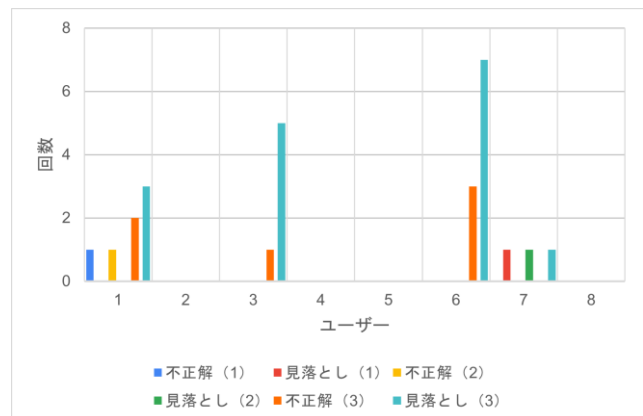


図 5 各タスクにおけるユーザー別の不正解と見落としの回数



表 4 タスク実行後のアンケート結果  
(1:「同意しない」、2:「あまり同意しない」、3:「どちらでもない」、4:「少し同意する」、5:「同意する」)

質問	タスク	回答				
		1	2	3	4	5
橋梁のどの位置でモニタリングが	(1)	0	0	0	4	4
おこなわれているか 3D モデルから	(2)	0	0	0	4	4
知ることができる	(3)	0	0	0	4	4
注意が必要（黄または赤）な場所・	(1)	0	0	0	3	5
センサノードをリストから知ることが	(2)	0	0	0	3	5
できる	(3)	0	0	0	2	6
上記の 2 つの情報によって問題がある	(1)	0	0	0	3	5
場所の大まかな位置や状態を	(2)	0	0	0	2	6
知ることができる	(3)	0	0	0	2	6
センサノードを設置位置と紐づけて	(1)	0	0	0	1	7
管理することで、センサノードを個別	(2)	0	0	0	2	6
に扱うより容易に情報を管理できる	(3)	0	0	0	2	6

ら、今回実装した各機能について、ユーザーからは目的に対し有効に機能すると捉えられているということが言える。

これらの結果より、センサノード数が増加した場合においても問題なく位置を見つけられるユーザーと、センサノード数が増加した場合にタスクを達成することが困難になるユーザーがいることがわかった。また、必ずしもタスクの結果につながるとは限らないが、ユーザーは各機能自体をモニタリングに活用できると感じていることがわかった。

## 7. 考察

特定の状態になっている設置位置を発見するタスクの結果より、センサノード数が増加した場合において個人差はあるが有効にはたらくことが示唆された。センサノード数が 10 個と 100 個の場合、8 人中 6 人のユーザーは正解だけを選択できていた。センサノード数が 1000 個に増加した場合は、4 人のユーザーは引き続き正解だけを選択できており、残りの 4 人は不正解や見落としが増加している。このことから、今回実装したリストや 3D モデルを用いた管理は、センサノード数が 100 個程度であれば異常が生じた位置や情報を正しく知ることには有効である。センサノード数が 1000 個の場合も同様に有効であるが、個人差があることがわかった。

一部のユーザーはセンサノード数が増加した場合に不正解の選択肢を選ぶことが増加したが、それ自体は問題になりにくい。今回は指定した条件に一致するものを選択するタスクであったため、条件に一致しない選択肢を不正解という扱いにしている。実際の運用を想定した場合、異常が生じていないような場所について確認していることになる

が、構造物やボルトの状態をモニタリングするという観点からは問題にならないと考える。

一方、異常が生じている場所が解答で見落とされている問題は改善する必要がある。リストや 3D モデルには設置位置に関する情報が表示されているため、それらを組み合わせせて見てもらうことを想定していたが、一部のユーザーはどちらか一方のみを判断材料としてしまったのではないかと考えられる。センサノード数が増加した場合、それだけリストに表示される情報は増加するため、その中から設置位置の名称を探す過程で見落とししてしまったと考えられる。

3D モデルについては、近くに複数の設置位置が存在するような状況において、名称を表すためのラベルが他と重なってしまい、正しい回答が選択されない原因になったと考えられる。また、アンケート内の自由記述において「ノード数が多い場合に特定の状態のボルトが探しにくくなるため、特定の状態のみ表示する機能があっても良いと思う」という意見が得られた。このことから、モニタリングのための情報について、より必要な情報だけを表示できるよう仕組みが必要である。例えば、指定した条件による検索やフィルタリングのような機能を用いて表示する情報を絞り込むことで、より正確な情報の把握が可能になり、改善につながると考えられる。

## 8. おわりに

ボルトに設置したセンサノードを設置位置に分けて管理し、データを可視化するアプリケーション「TenSpect」を開発した。TenSpect はデータ送信頻度が低く、多数設置して運用する可能性があるようなセンサノードに適用できるものを目指した。アプリケーションの機能としてはセンサノードを設置した位置ごとにまとめ、一覧で表示するリスト機能、センサノードにより測定したデータを可視化するグラフ機能、センサノードを設置した位置を示す 3D モデル機能を実装した。

開発した TenSpect に対して、複数のセンサノードが設置された構造物を仮定し、異常が発生している場所を探してもらうタスクを実施して評価した。評価の結果、センサノード数に関わらず正しい情報を把握し異常が発生している場所を答えられるユーザーとセンサノード数が増加した場合にミスが増えるユーザーに分かれ、個人差はあるものの TenSpect で実装した機能は有効に働くことがわかった。また、タスク実行後の質問では、センサノードを設置位置で分けて示す機能や 3D モデル上に設置位置を示す機能などが有効な機能であると捉えられていることがわかった。これらのことから、大量のセンサノードを扱うシステムにおいてセンサノードを取り付けた位置やその場所といった情報を含めて管理することは、管理上有効に機能することが示唆された。

今後はTenSpectに指定した条件による検索やフィルタリングのような機能を実装し、拡張していく予定である。

## 謝辞

本研究は豊橋市イノベーション創出等支援事業の支援を受けて実施しました。本研究をおこなうに当たり、多大なご協力を戴いたトーヨーメタル株式会社、豊橋市に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] R. Suryanita, M. Mardiyono, and A. Adnan, “Intelligent Bridge Seismic Monitoring System Based on Neuro Genetic Hybrid,” 2017, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.V15I4.6006.
- [2] V. Naraharisetty, V. S. Talari, S. Neridu, P. Kalapatapu, and V. D. K. Pasupuleti, “Cloud Architecture For IOT Based Bridge Monitoring Applications,” in *2021 International Conference on Emerging Techniques in Computational Intelligence (ICETCI)*, Aug. 2021, pp. 39–42. doi: 10.1109/ICETCI51973.2021.9574044.
- [3] Y. Pan, Y. Ma, Y. Dong, Z. Gu, and D. Wang, “A Vision-Based Monitoring Method for the Looseness of High-Strength Bolt,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3101316.
- [4] M. Sidorov, P. V. Nhut, A. Okubo, Y. Matsumoto, and R. Ohmura, “TenSense: IIoT Enabled Sensor Node for Remote Measurement of a Bolted Joint Tension,” in *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, Mar. 2019, pp. 202–211. doi: 10.1109/PERCOM.2019.8767418.
- [5] L. Monti, C. Prandi, and S. Mirri, “IoT and Data Visualization to Enhance Hyperlocal Data in a Smart Campus Context,” in *Proceedings of the 4th EAI International Conference on Smart Objects and Technologies for Social Good*, New York, NY, USA, Nov. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1145/3284869.3284878.
- [6] M. Insa-Iglesias, M. D. Jenkins, and G. Morison, “3D visual inspection system framework for structural condition monitoring and analysis,” *Automation in Construction*, vol. 128, p. 103755, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103755.
- [7] 榎本 真美, 二宮 建, 下川 光治, 服部 達也, 森川 博邦, “橋梁点検 3 次元管理支援システムの開発と社会実験,” 第 83 回 全国大会講演論文集, vol. 2021, no. 1, pp. 339–340, Mar. 2021.
- [8] 国土交通省, “橋梁定期点検要領,” 国土交通省, 平成 31 年 3 月 .  
[https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3\\_1\\_6.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf) (2022/5/20 参照).
- [9] 国土交通省, “道路トンネル定期点検要領,” 国土交通省, 平成 31 年 3 月 .  
[https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3\\_1\\_9.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_9.pdf) (2022/5/20 参照).
- [10] “i-Construction 推進コンソーシアム 3 次元データ流通・利活

用ワーキンググループ.” [https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/3d\\_wg/index.html](https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/3d_wg/index.html) (2022/5/23 参照).

- [11] “ボルトの適正締付軸力/適正締付トルク | 技術情報 | MISUMI-VONA 【ミスマ】.” [https://jp.misumi-ec.com/tech-info/categories/technical\\_data/td01/a0198.html](https://jp.misumi-ec.com/tech-info/categories/technical_data/td01/a0198.html) (2020/5/20 参照).
- [12] M. Sidorov, “TenSense – A Family of Wireless Sensor Nodes Dedicated for Remote Unattended Structural Health Monitoring of Bolted Joints,” 豊橋技術科学大学博士論文, 2020.
- [13] “気象庁 | 過去の気象データ検索.” [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml\\_amd\\_ym.php?prec\\_no=51&block\\_no=0470&year=&month=&day=&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_ym.php?prec_no=51&block_no=0470&year=&month=&day=&view=) (2022/5/21 参照).