

(63) 橋梁プロダクトモデルとセンサ情報の連携に関する基礎的検討

小山 誠稀¹・矢吹 信喜²・福田 知弘³

¹学生会員 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 博士前期課程

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: koyama@it.see.eng.osaka-u.ac.jp

²フェロー会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻

センサを橋梁に多く設置してモニタリングを行うことで、人の手で行う必要がある維持管理業務を大幅に削減できる可能性があると考えられる。通常、センサの設置情報は 2 次元図面などで表現されているため、センサの数が増えるほどセンサの情報を管理することが困難となる。そのため、コンピュータを活用してセンサ情報の管理を容易にすることが求められる。本論文で、橋梁プロダクトモデルの開発と、センサの設置位置、設置方向を表現することで橋梁プロダクトモデルとセンサ情報を連携させるための手法の検討を行った。橋梁の線形データモデルやそのモデル上の点を参照して、センサの設置位置を線形データモデルに対する相対位置として、センサの設置方向をセンサの設置部材のローカル座標系における方向ベクトルとして表現する手法を示した。

Key Words: product model, sensor information model, IFC, sensor installation

1. はじめに

2007年アメリカ合衆国ミネソタ州のミネアポリス高速道路 I-35W 線のトラス橋の崩落事故が発生した。この事故を受けて、国土交通省は全ての橋梁への点検の実施状況について調査を行ったところ、点検を実施していない自治体が数多くあるということが明らかになった¹⁾。日本でも 2012 年に山梨県甲州市にある笹子トンネルの天井板落下事故が発生した。このような重大事故の再発を防止するために、国土交通省は橋梁とトンネルの管理者に対して、2014年から5年に1度近接目視と打音による定期点検を実施することを義務付けた。全国にある約73万橋の橋梁のうち、9割以上を地方公共団体が管理しているため²⁾、地方公共団体で維持管理業務が滞りなく行われることが重要である。しかし、地方公共団体では、維持管理業務に従事する土木技術者及び点検にかかる予算が不足している。今後、建設後 50 年を超える橋梁が増加することが予想されるため、点検業務は重要な業務となる。一方で、橋梁の維持管理に従事する人材が減少することが懸念される。

MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) と無線技術の発展により、センサは省電力化・小型化・低価格化しており³⁾、センサを活用したモニタリングが注目されている。センサによる維持管理では、人の手を必要とする作業を大幅に削減することができ、点検者の技術力によらない点検結果を得ることができる。また、人が近づけないような場所や部材内部などの劣化状況を点検することが可能となるため、点検漏れの減少へとつながる。センサを利用した維持管理を効率的に行っていくためには、多くのセンサを橋梁に設置する必要がある。現在、センサを設置した情報の多くは 2 次元図面で管理されている。センサの設置数が少なければ、図面でセンサの情報を容易に管理することができる。一方で、センサの設置数が増えるほど、多くのセンシングデータを収集・蓄積することができるが、その分、センサの種類、位置、方向などのデータとセンシングデータの関係を把握することが困難となり、収集・蓄積したデータを有効に利用できなくなると懸念される。そのため、コンピュータを利用してセンサの情報管理を自動化することが必要になると考えられる。

今後、橋梁の老朽化の進行が予想される中で、センサを利用して維持管理を効率的に行うことが必要である。その方法として、数多くのセンサを橋梁に設置してセンシングデータを利用することがあげられるが、これらのセンサやセンシングデータの管理をコンピュータによって自動化することが望ましい。

そこで、橋梁プロダクトモデルとセンサ情報を連携することで、センサの設置位置や設置方向を表現するセンサ連携モデルの開発を目的とする。

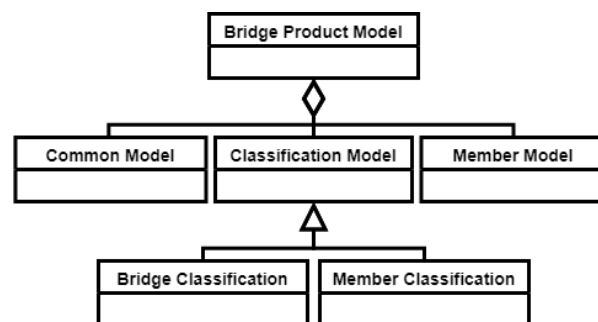


図-1 橋梁プロダクトモデルの構成

2. 既往研究

bSI (buildingSMART International) は建築プロジェクトのデータモデルの標準として IFC (Industry Foundation Classes) を開発し維持管理している。IFC とは、ISO10303 (ISO-STEP : STandard for the Exchange of Product model data) の EXPRESS および EXPRESS-G の規定に従って、建築構造物のプロダクトモデルの仕様を定めたものである。IFC では、建物を構成する要素 (壁、梁、柱など) 毎に、形状、位置、材質などの属性情報の表現方法が定義されており、建設業界で使用されているアプリケーション間でプロダクトモデルの共有と相互運用を可能にする。建築物を対象とした IFC4 は 2013 年に ISO16739:2013 として国際標準化された⁹⁾。しかし、土木構造物を対象としたものは標準化されていない。bSI は 2020 年までに橋梁を対象とした IFC-Bridge の標準化を目指している。

IFC-Bridge は、土木構造物に特化した IFC の拡張の一つである。1998 年にフランスで IFC に基づいた橋梁のデータモデル開発のプロジェクトが始まった。日本や北欧、ドイツなどの国々の関係者の協力を通じて、bSI の正式なプロジェクトとなったが、ソフトウェアへの実装はなされていない。

Jeong ら⁴⁾は、リレーショナルデータベースではなく NoSQL (Not Only SQL) データベースに基づいた橋梁モデルとセンサ情報モデルという異なるデータモデルの統合が可能なデータベースを構築した。橋梁モデルとセンサ情報モデルという異なるデータモデルの橋梁情報をデータエンティティを関連付けることで統合できることを示し、データを抽出して有限要素解析を行った。Jeong らの研究では、センサが橋梁部材のどの位置に設置されているかを表す属性を定義して SensorML を拡張した。しかし、センサがどの方向に設置されていて、どの方向のデータを計測しているかということは定義されていない。そのため、有限要素解析の結果をデータベース内のデータや 2 次元の図面等と比較しながら確認する必要がある。

3. 橋梁プロダクトモデルの開発

本研究では、センサ情報と連携させる橋梁プロダクトモデルの構築を行った。図-1に橋梁プロダクトモデルの構成を UML (Unified Modeling Language) のクラス図で記述した概念図を示す。構築したプロダクトモデルは共通モデル、分類モデル、部材モデルから構成され、分類モデルは下位概念として橋梁分類モデルと部材分類モデルに分類される。

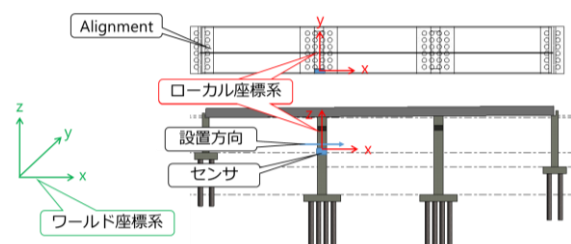
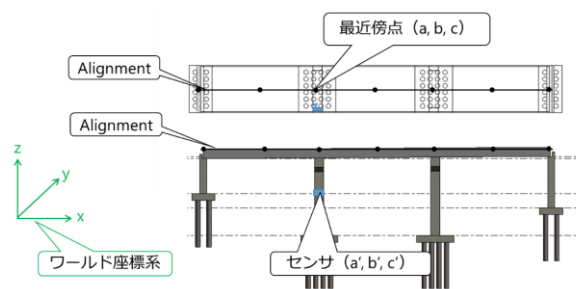
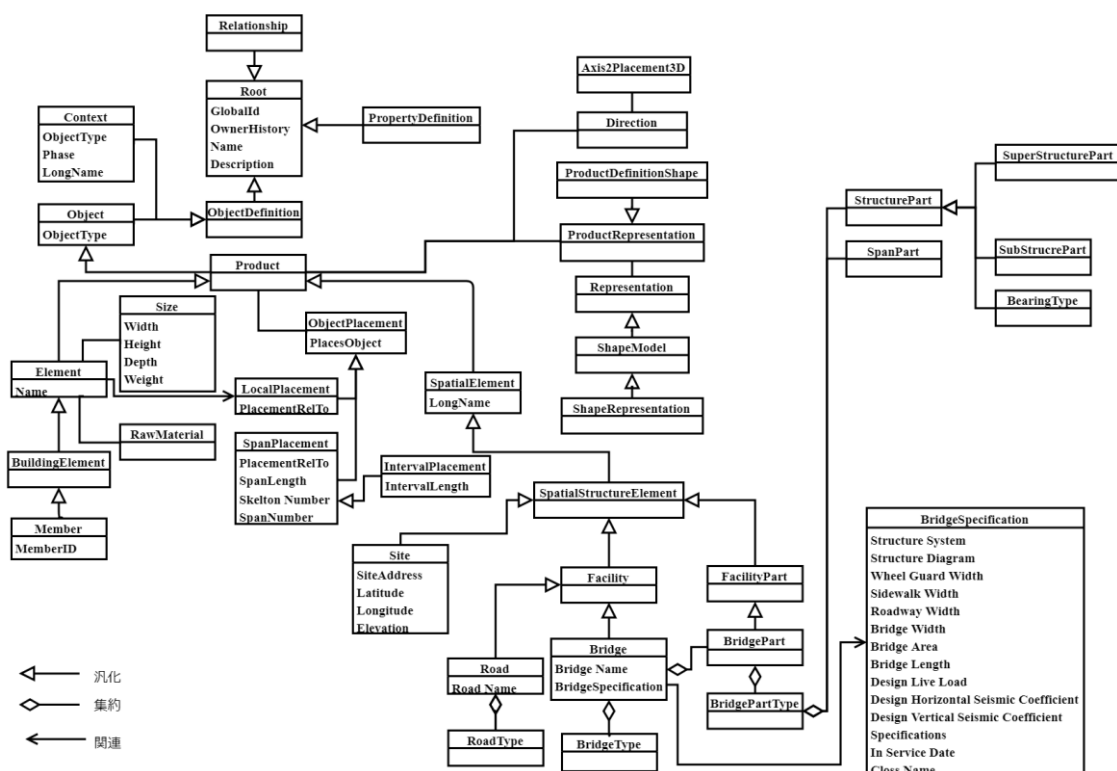
共通モデルは橋梁以外の土木構造物や建築物と共通するデータモデルである。このデータモデルは抽象度の高い上位概念が主な構成要素である。分類モデルは機能や形状、構造で橋梁や部材を分類するデータモデルで、主に空間的な要素を表現する。部材モデルは橋梁を構成する部材を表現するデータモデルである。物理的属性を有した部材を含むため、主に物理的な要素を表現する。図-2に共通モデルと分類モデルの一部を示す。Root を最上位クラスとして各クラスを定義した。Facility クラスが構造物を表し、サブクラスに橋梁を表す Bridge クラスを定義した。橋梁の諸元情報は Bridge クラスの属性としてでなく、プロパティクラスとした。プロパティクラスとすることで、個々の橋梁の諸元情報を表現することが可能となる。

4. センサの設置位置・設置方向に関する検討

センサ連携モデルでセンサの設置位置、設置方向を表現するためにセンサの設置位置、設置方向の表現方法を検討した。検討を行うために bSI が発行している IFC のドキュメント⁹⁾を参考にした。

(1) センサの設置位置

センサの設置位置に最近傍の点である線形データモデル上の点を指定したオブジェクトの位置を表現するクラスを利用して参照する。参照した線形データモデル上の点からセンサの設置位置までの距離をローカル座標系、



あるいはワールド座標系の座標成分の差で表現する。センサの設置位置を座標の差として表現することで、センサの設置位置を線形データモデルに対する相対位置として表現することが可能となる。そのため、ローカル座標系やワールド座標系であることにとらわれず、センサの設置位置を表現することができる。図-3 にセンサの設置位置の表現の概念図を示す。

(2) センサの設置方向

ワールド座標系の直交座標を、 X 軸の正方向を実空間の東、 Y 軸正方向を実空間の北、 Z 軸正方向を XY 平面に対して鉛直上方向として設定する。線形データモデルは平面線形と縦断線形から構成されるが、単純化のために、平面線形のみについて検討を行った。

(i) 線形データモデルが直線である場合

線形データモデルの始点と終点を方向ベクトルとする **Direction** を定義する（以後、**D** とする）。センサを設置した箇所を原点とするローカル座標系を定義する。ローカル座標系の **Z** 軸をワールド座標系の **Z** 軸と一致させ、ローカル座標系の **X** 軸を方向ベクトル **D** と一致させる。方向ベクトル **D** が橋軸方向であるため、ローカル座標系の **X** 軸が橋軸方向を示すこととなる。センサの設置された部材に対して定義したローカル座標系を用いてセンサの設置方向を方向ベクトルによって表現する。図-4 にセンサの設置方向の表現の概念図を示す。

(ii) 線形データモデルがクロソイド曲線である場合
線形データモデル上の点を一定間隔で List に取得する。
この時、センサの設置されている箇所の向心ベクトル上
に点があるように間隔を決定する。センサが設置されて

いる箇所の向心ベクトル上の点を i 番目の点とすると、方向ベクトル $\mathbf{D}$ を $(i-1)$ 番目の点を始点、 $(i+1)$ 番目の点を終点とするベクトルとして定義する。線形データモデルが直線である場合と同様にローカル座標系を定義し、定義したローカル座標系に対してセンサの設置方向を方向ベクトルで表現する。

(iii) 線形データモデルが円弧である場合

線形データモデルの形状を表す関数と、センサの設置位置に最近傍の線形データモデル上の点を取得する。取得した関数と線形データモデル上の点から勾配を求める。求めた勾配を方向ベクトル $\mathbf{D}$ とし、(ii)と同様にローカル座標系を定義し、センサの設置方向を方向ベクトルで表現する。

5. 考察

全ての部材を網羅した橋梁のプロダクトモデルを開発することが望ましいが、橋梁を構成する部材は数多いため、困難である。そこで、維持管理において必要な粒度を明確にして、プロダクトモデルを構築する必要がある。そのため、維持管理のプロセスを表現するプロセスモデルを開発する必要があると考えられる。

橋梁の線形は平面線形と縦断線形に分けられ、平面線形は主に直線、緩和曲線、円弧によって表現される。一方で、縦断線形は直線、円弧、2次関数や3次関数などの関数で表現される曲線によって表現される。関数で表現される曲線は円弧と同様にして線形データモデルの勾配を求めることが可能である。そのため、縦断線形に対しても提案する表現方法で、センサの設置方向を表現することが可能であると考えられる。

6. 結論

本研究では、センサの設置位置と設置方向を表現可能

なセンサ連携モデルの開発を目的として、橋梁のプロダクトモデルを開発し、センサの設置位置と設置方向の表現方法について検討を行った。実際の線形データモデルは平面線形と縦断線形を組み合わせたものであるが、本論文では単純化のために、平面線形を対象としてセンサの設置位置や設置方向の表現方法について検討を行った。

今後の課題として、本論文で検討したセンサの設置位置、設置方向の表現を実装すること、橋梁の維持管理を想定したシステムを開発することがあげられる。

謝辞：本研究の一部は、総務省の平成 30 年度「戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）国際標準獲得型」における「インフラモニタリングにおけるインフラ 3D モデルと IoT センサ情報モデルの異分野間連携に関する研究開発と標準化」の受託研究として実施しているものである。また、本研究は一般社団法人関西情報センター（KIIS）のスマートインフラセンサ利用研究会の協力のもとに行われた。ここに深謝を表す。

参考文献

- 1) 美濃智弘，森川英典：自治体道路橋梁維持管理体制の現状と課題，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.71, No.3, pp.182–189, 2015.
- 2) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報（平成 29 年度），<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/h29/30_03maint.pdf>，（入手 2018.12.17）.
- 3) 矢吹信喜：無線センサネットワーク利用による土木構造物のモニタリングに向けて，電子情報通信学会誌，Vol.97, No.8, pp.684–687, 2014.
- 4) Jeong, S., Hou, R., Lynch, J. P., Sohn, H., Law, K. H.:An Information Modeling Framework for Bridge Monitoring, Advances in Engineering Software, Vol.114, pp.11–31, 2017.
- 5) 工藤里絵：IFC の国際プロジェクトの動向，<https://www.building-smart.or.jp/wp-content/uploads/2018/08/bSJ180919_2-1.pdf>，（入手 2019.1.25）.