

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Development of an Operational Digital Twin Framework for Bridge Infrastructure Using GNSS-Based Monitoring and Physical Verification (GNSS 観測と物理検証に基づく橋梁インフラのための 運用型デジタルツインフレームワークの構築)
氏 名 (Name)	Elfrido Elias Tita
橋梁および交通インフラは現代社会の経済活動を支える極めて重要な基盤であるが、世界的な老朽化、交通需要の増大、過酷な環境暴露、そして限られた維持管理予算という前例のない脅威に直面している。従来の橋梁管理における主要な手法は、数年おきに実施される定期的な目視点検と、損傷が顕在化した後の事後保全に依存している。しかし、これらの手法は断片的かつ静的な評価にとどまり、構造物内部の初期損傷の検知や、将来的な性能劣化の精度高い予測には限界がある。本研究は、こうした課題を解決するために、Building Information Modeling (BIM)、高精度な全地球測位システム (GNSS) による変位モニタリング、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を用いたデータ同化、ランダムフォレスト (RF) による機械学習、および物理ベースの有限要素解析 (FEA) を統合した、長期的な橋梁構造健全性モニタリング (SHM) および交通システム解析のための包括的な「デジタルツイン (DT)」フレームワークを開発・検証したものである。 本研究で提案するデジタルツイン・フレームワークは、単なる視覚的な 3D モデルではなく、物理的な橋梁の状態をリアルタイムで仮想空間に同期させ、構造物のライフサイクル全体にわたる解釈、検証、予測、および意思決定支援を可能にする動的なシステムとして定義される。BIM はこのシステムの幾何学的・意味的背骨として機能し、設計、建設、運用の各段階におけるデータ相互運用性を確保する。物理的なセンサーとデジタルモデルを橋渡しするため、高精度な GNSS モニタリングを採用し、運用荷重や環境要因下での三次元的な変位データを継続的に取得する。本研究の核心的な技術的貢献は、EnKF による状態推定と RF モデルを組み合わせたハイブリッド・データ処理パイプラインの開発にある。これにより、GNSS データ固有のノイズや熱によるバイアスを効果的に低減し、土木構造物のモニタリングに耐えうる高精度な変位情報を抽出することに成功した。さらに、推定された変位データは、地盤・構造物相互作用を考慮した物理ベースの FEA モデルによって検証され、観測された挙動が構造工学的に整合していることを確認している。 このデジタルツイン・フレームワークの実用性は、アセット（個別の橋梁）およびシステム（都市交通全体）の両レベルにおける詳細なケーススタディを通じて実証された。アセットレベルでは、まずプレストレストコンクリート箱桁橋において BIM と FEA の相互運用性を検証し、せん断遅れ現象や構造剛	

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

性の評価への適用性を示した。次に、2018 年に発生した貨物船衝突事故後の一時的なモニタリングを含む、山口県の大島大橋における適用事例では、GNSS モニタリングと FEA の同期により、事故後の構造健全性を迅速かつ客観的に評価し、従来の目視点検では困難な即時的な安全性確認が可能であることを示した。また、曲線鋼連続橋を対象とした 436 日間にわたる長期モニタリングでは、季節的な温度変化に伴う複雑な三次元挙動を捉え、縦方向に最大 43.6mm、横方向に 10.9mm の変位を観測した。この解析により、熱膨張が当初の設計遊間を超え、アバットメント付近で予期せぬ挙動が発生していることを特定し、デジタルツインが異常検知や物理モデルの精緻化に極めて有効であることを証明した。

システムレベルへの拡張として、本研究は東ティモールの首都ディリを対象に、デジタルツイン環境におけるミクロ交通シミュレーションを実施した。これは急速な都市化と交通渋滞という課題に対し、構造物の健全性と交通流の動態をリンクさせる試みである。日平均交通量 (ADT) の算出や起点終点 (OD) 行列の作成に基づき、交通動態がもたらす構造物への負荷と、車両排出ガスによる環境影響 (NO_x および PM₁₀ 濃度) を同時に評価した。この統合的アプローチは、特にインフラ需要が急増する発展途上国において、科学的な証拠に基づく都市計画やインフラ政策を策定するための強力な意思決定支援ツールとなることを示している。

最終的に、本研究の結果は、提案されたデジタルツイン・フレームワークが変位推定の精度を飛躍的に向上させ、センサー計測と物理シミュレーションの同期による早期の異常検知を可能にすることを明らかにした。従来の事後保全的な管理から、予防的、予測的、かつ強靱なデジタル・メンテナンス・システムへの転換を支援する本手法は、世界的な交通ネットワークの安全性と長寿命化を確保するための拡張性の高いソリューションを提供する。本研究は、デジタルツインが将来的に、維持管理コストの最適化と災害耐性の向上を自律的に支援する高度な意思決定システムへと進化するための重要な基盤を築いたものである。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Development of an Operational Digital Twin Framework for Bridge Infrastructure Using GNSS-Based Monitoring and Physical Verification (GNSS 観測と物理検証に基づく橋梁インフラのための 運用型デジタルツインフレームワークの構築)
氏 名 (Name)	Elfrido Elias Tita

Bridges and transportation infrastructure represent the critical lifelines of modern socio-economic activity, yet they face unprecedented threats from global aging, escalating traffic volumes, and increasingly severe environmental conditions. Conventional bridge management systems rely heavily on periodic visual inspections, typically conducted every five years in many jurisdictions, and reactive maintenance policies. These traditional methods provide only static, fragmented assessments that often fail to detect sub-surface structural damage or predict long-term performance degradation before reaching a critical state. This research addresses these deficiencies by proposing and validating a comprehensive Digital Twin (DT) framework designed for autonomous, long-term structural health monitoring (SHM) and transportation system analysis. By integrating Building Information Modeling (BIM), High-Precision Global Navigation Satellite System (GNSS) displacement monitoring, Ensemble Kalman Filter (EnKF) data assimilation, Random Forest (RF) machine learning, and physics-based Finite Element Analysis (FEA), the study creates a multi-layered digital environment capable of synchronizing physical reality with digital simulation in real-time.

The proposed framework conceptualizes the Digital Twin not merely as a 3D visualization but as a dynamic virtual representation that facilitates interpretation, validation, and decision support across the entire infrastructure lifecycle. BIM serves as the semantic backbone, providing the geometric and material data necessary for interoperability between design, construction, and operational phases. To bridge the gap between physical sensors and digital models, high-precision GNSS monitoring is utilized to capture three-dimensional displacement data under operational and environmental loads. A central technical contribution of this research is the development of a hybrid data-processing pipeline that combines the EnKF for state estimation with RF models to mitigate thermal bias and signal noise. This dual-approach addresses the inherent volatility of GNSS data in civil engineering applications, transforming raw coordinate measurements into high-fidelity structural insights. By accounting for environmental variables and sensor uncertainty, the framework ensures that displacement estimations are both accurate and reliable for long-term monitoring. The estimated displacements are further validated through physics-based finite element models, including soil-structure interaction effects, ensuring that observed behaviors are structurally consistent and physically interpretable.

The practical implementation of this Digital Twin architecture is demonstrated through extensive case studies at both the asset and system levels. At the asset level, the framework was first applied to a prestressed concrete box-girder bridge to investigate BIM-FEA interoperability, specifically evaluating shear-lag effects and structural stiffness. The methodology's robustness was further tested following the 2018 vessel collision at the Oshima

Bridge in Japan. In this instance, the Digital Twin enabled an immediate, objective assessment of the structural integrity through synchronized GNSS monitoring and FEA validation, providing a level of rapid response and safety assurance that traditional manual inspections could not match. Furthermore, a 436-day long-term study of a continuous curved steel bridge was conducted to analyze complex 3D behaviors under seasonal thermal cycles. The Digital Twin successfully captured longitudinal displacements of up to 43.6 mm and unexpected lateral movements of 10.9 mm, identifying that thermal expansion had exceeded the original design gaps of the abutments. This longitudinal observation underscores the system's ability to detect structural anomalies and validate physics-based models through continuous, real-time observation.

Expanding the scope to the system level, the research integrates Digital Twin-based BIM with microscopic traffic simulation to analyze urban mobility in Dili, Timor-Leste. This addresses the challenges of rapid urbanization and traffic congestion by linking structural performance with system-level mobility analysis. By calculating Average Daily Traffic (ADT) and developing Origin-Destination (OD) matrices, the framework evaluates the symbiotic relationship between structural performance and traffic dynamics. This system-level approach allows for the estimation of environmental impacts, specifically the concentrations of air pollutants like NO_x and PM₁₀, based on congestion patterns and traffic flow models. This integration demonstrates how Digital Twins can serve as powerful tools for evidence-based urban planning and infrastructure policy, particularly in developing nations where infrastructure demand is rapidly outpacing maintenance budgets.

Ultimately, the results of this research demonstrate that the proposed Digital Twin framework significantly enhances displacement estimation accuracy and enables early anomaly detection through continuous sensing-simulation comparisons. By providing richer lifecycle insights and improved reliability compared to conventional approaches, the framework supports a transition from reactive infrastructure management toward proactive, predictive, and resilient digital systems. The study concludes that the convergence of BIM, high-precision sensing, and advanced data analytics provides a scalable methodology for ensuring the safety and longevity of critical transportation networks globally. This research lays the foundation for Digital Twins to evolve into fully autonomous decision-support systems, capable of optimizing maintenance costs and enhancing disaster resilience through continuous, multi-scale integration across the built environment.

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Elfrido Elias Tita
審 査 委 員	主 査：渡邊 学歩
	副 査：河村 圭
	副 査：山本 浩一
	副 査：中島 伸一郎
	副 査：山田 悠
論 文 題 目	Development of an Operational Digital Twin Framework for Bridge Infrastructure Using GNSS-Based Monitoring and Physical Verification (GNSS 観測と物理検証に基づく橋梁インフラのための運用型デジタルツインフレームワークの構築)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 本論文は、GNSS 観測と物理検証に基づく橋梁インフラのための運用型デジタルツインフレームワークの構築を目的とし、橋梁を中心とした社会インフラの維持管理・運用において、従来の点検・可視化中心のデジタルツインを超えた、実務において意思決定を支援可能な「運用型デジタルツイン (Operational Digital Twin)」の体系化を試みた研究である。 近年、橋梁インフラは老朽化、交通荷重の増大、環境作用の高度化といった複合的課題に直面しており、限られた人的・財政的資源の中で、より合理的かつ予測的な維持管理手法が求められている。本論文は、こうした背景を踏まえ、GNSS による高精度変位計測、BIM によるデジタル表現、データ同化・機械学習による状態推定、有限要素解析による物理的妥当性検証を統合したデジタルツインの枠組みを提示している点に大きな特徴がある。 第 1 章では、橋梁インフラの老朽化や維持管理を取り巻く社会的背景を整理し、従来の点検・管理手法および既存デジタルツインの課題を明確にしている。その上で、観測データの不確実性を前提とした運用型デジタルツインの概念を提示し、本研究の目的、学術的な位置づけ、および論文全体の構成を示している。 第 2 章では、デジタルツイン技術の発展経緯を概観するとともに、橋梁構造物のモニタリング技術、GNSS を用いた変位観測、データ同化および機械学習手法に関する既往研究を体系的に整理している。これにより、インフラ分野における研究動向と、本研究が対象とする課題および学術的ギャップを明確にしている。 第 3 章では、本研究で提案する運用型デジタルツインフレームワークの全体構成を示し、BIM によるデジタル表現、GNSS 観測、データ同化・機械学習による状態推定、有限要素解析による物理検証を統合したシステムアーキテクチャについて説明している。さらに、橋梁管理および交通システムへの拡張可能性についても述べている。	

(様式 9 号)

第 4 章では、BIM と有限要素解析を連携させた橋梁デジタルツインの構築手法について述べている。プレストレストコンクリート箱桁橋を対象に、構造挙動の可視化や性能評価を行うことで、維持管理や構造評価におけるデジタルツインの有効性と実用性を検証している。

第 5 章では、運用型デジタルツインの概念を橋梁単体から都市交通システムへ拡張し、東ティモール・ディリ市を対象とした交通管理への適用事例を示している。交通シミュレーションを通じて、交通効率、渋滞状況、環境負荷を評価し、都市インフラ計画への有効性を明らかにしている。

第 6 章では、船舶衝突事故を受けた橋梁を対象として、GNSS による変位観測と有限要素解析を組み合わせた事後評価を行っている。その結果、従来の目視点検に比べて、迅速かつ客観的に構造健全性を評価できることを示し、異常時対応における運用型デジタルツインの有用性を明らかにしている。

第 7 章では、GNSS 変位データに含まれるノイズや温度影響といった不確実性に対し、Ensemble Kalman Filter および Random Forest を適用している。その結果、高精度な変位推定と不確実性評価が可能であることを示し、デジタルツインの信頼性向上に寄与する知見を得ている。

第 8 章では、GNSS 観測結果と有限要素解析を統合したデジタルツインに基づき、橋梁の異常検知および挙動検証手法について検討している。観測データと解析結果の整合性を確認することで、構造挙動の妥当性評価や異常兆候の検出が可能であることを示している。

第 9 章では、本研究で得られた成果を総括し、運用型デジタルツインの学術的・実務的貢献を整理している。あわせて、本研究の限界を示すとともに、非線形解析の導入、自動化、大規模展開に向けた今後の研究課題と展望について述べている。

公聴会には、学内外から 26 名（対面式 23 名、オンライン 3 名）の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、①有限要素解析における温度影響の取り扱い方法、②地盤—基礎相互作用を考慮した解析における地盤条件の設定、③GNSS 観測結果と有限要素解析結果の差異およびその解釈、④提案したデジタルツイン研究の今後の発展可能性と発展途上国への適用性、⑤交通シミュレーションおよび環境汚染評価を一章にまとめた理由、⑥将来的な実測データによる交通・環境評価結果の検証可能性などであった。いずれの質問に対しても、発表者から研究の前提条件、解析手法の限界、および今後の研究展開を踏まえた的確な回答がなされ、本研究内容を十分に理解していることが確認された。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（学術）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 6 編、参考論文 0 編）

- 1) Elfrido Elias Tita, Gakuho Watanabe, Peilun Shao, Kenji Arii : Development and Application of Digital Twin-BIM Technology for Bridge Management, Applied Sciences, Vol.13, Issue 13, 7435, 2023.6.
- 2) Elfrido Elias TITA, Gakuho WATANABE, Hugo da C. XIMENES, Humbelina M. S. VIEGAS : Initiatives in Dili of Timor-Leste for implementing traffic management using digital twin-BIM technology, Intelligence, Informatics and Infrastructure, JSCE, Vol.5, Issue 1, pp.42-56, 2024.5.

(様式 9 号)

- 3) 西野匠悟, Elfrido Elias Tita, 渡邊学歩, 宮本崇 : RTK-GNSS データを用いた橋梁変位推定におけるデータ同化と機械学習の比較評価 : ロバストな予測と不確実性定量化の視点から, AI データサイエンス論文集, JSCE, pp.538-548, 2025.11.
- 4) Elfrido Elias TITA, Gakuho WATANABE, Takeshi KITAHARA : Thermal Deformation Tracking and Anomaly Detection in Continuous Curved Viaducts Using GNSS Displacement Monitoring with Multi-Point Fixed Metal Bearings, Intelligence, Informatics and Infrastructure, JSCE, Vol.6, Issue 3, pp.120-127, 2025.11.
- 5) Elfrido Elias Tita, Humbelina M. S. Viegas, Gakuho Watanabe : Enhancing traffic management through Digital Twin BIM : A case study in Dili city Timor-Leste, Proceedings of the 2023 Brawijaya International Conference (BIC2023), pp.36-46, 2024.10.
- 6) Elfrido Elias Tita, Gakuho Watanabe, Yushi Tomoeda : BIM-Aided Digital Twin of Long-Span Pratt Truss Modeling and GNSS Displacement Monitoring for Bridge Lifecycle Management, 2025 IEEE Smart World Congress (SWC), pp.1665-1671, 2025.8.