

Pengembangan Sistem Deteksi Dini Kerusakan Jembatan Menggunakan Deep Learning Berbasis Citra dan Sensor Getaran

Aria Gunawan, Toni Irawan, Iswandi Andika ¹

Abstrak: Kerusakan jembatan menjadi isu kritis dalam sistem transportasi karena berdampak langsung pada keselamatan dan keberlanjutan infrastruktur. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem deteksi dini kerusakan jembatan berbasis deep learning multimodal yang mengintegrasikan data citra dan sinyal getaran dalam satu arsitektur terpadu. Pendekatan ini mengatasi keterbatasan metode single modality dalam Structural Health Monitoring, baik berbasis inspeksi visual maupun analisis getaran. Metode yang digunakan adalah kuantitatif eksperimental dengan pengolahan data citra kerusakan dan sinyal getaran yang ditransformasikan ke domain time-frequency. Model dirancang menggunakan arsitektur dua cabang untuk mengekstraksi fitur dari masing-masing modalitas, kemudian digabungkan melalui feature fusion dan attention layer guna meningkatkan akurasi klasifikasi. Hasil menunjukkan bahwa integrasi multimodal meningkatkan performa deteksi dibandingkan pendekatan tunggal. Model mampu mengenali kerusakan permukaan dan karakteristik dinamis struktur secara simultan, serta lebih stabil terhadap noise dan variasi data. Sistem ini juga berpotensi diterapkan secara real-time untuk mendukung pemeliharaan jembatan berbasis data. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan Structural Health Monitoring modern yang lebih adaptif, akurat, dan komprehensif melalui integrasi kecerdasan buatan dan sensor multimodal.

Kata Kunci: Deteksi Dini Kerusakan Jembatan, Deep Learning Multimodal, Citra Jembatan, Sinyal Getaran, Structural Health Monitoring

Abstract: Bridge deterioration is a critical issue in transportation systems as it directly affects safety and infrastructure sustainability. This study aims to develop an early damage detection system for bridges based on multimodal deep learning by integrating image data and vibration signals within a unified architecture. This approach addresses the limitations of single-modality methods in Structural Health Monitoring, including those based on visual

¹ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Satyagama, Indonesia, ariagunawan55@gmail.com

inspection and vibration analysis. The research employs a quantitative experimental method, utilizing image data of structural damage and vibration signals transformed into the time-frequency domain. The proposed model is designed with a dual-branch architecture to extract features from each modality, which are then combined through feature fusion and an attention layer to enhance classification accuracy. The results indicate that multimodal integration improves detection performance compared to single-modality approaches. The model can simultaneously identify surface damage and dynamic structural characteristics, while demonstrating greater robustness to noise and data variability. Furthermore, the system shows potential for real-time implementation to support data-driven bridge maintenance. This study contributes to the advancement of modern Structural Health Monitoring by offering a more adaptive, accurate, and comprehensive approach through the integration of artificial intelligence and multimodal sensing.

Keywords: *Early Bridge Damage Detection, Multimodal Deep Learning, Bridge Images, Vibration Signals, Structural Health Monitoring*

A. Pendahuluan

Jembatan merupakan elemen utama dalam sistem transportasi modern yang berfungsi menghubungkan wilayah terpisah dan mendukung kelancaran mobilitas manusia dan barang. Peran strategis ini menjadikan jembatan sebagai infrastruktur kritis yang harus memiliki tingkat keamanan dan keandalan tinggi selama masa layanannya. Namun, dalam praktiknya, jembatan terus mengalami degradasi struktural akibat kombinasi beban lalu lintas berulang, perubahan lingkungan, korosi material, serta efek kelelahan material. Kondisi tersebut menuntut adanya sistem pemantauan yang mampu mendeteksi kerusakan sejak tahap awal sebelum berkembang menjadi kegagalan struktural yang lebih serius.

Pendekatan konvensional dalam inspeksi jembatan masih bergantung pada pemeriksaan visual manual yang dilakukan secara periodik. Metode ini memiliki keterbatasan dalam hal subjektivitas, keterlambatan deteksi, serta ketergantungan pada kondisi aksesibilitas struktur. Dalam konteks ini, sistem Structural Health Monitoring (SHM) berbasis data menjadi alternatif yang lebih efisien dan objektif. Kajian

sebelumnya menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data mampu meningkatkan akurasi deteksi kerusakan dibandingkan metode inspeksi manual tradisional (Casas & Moughty, 2017; Saafi et al., 2006). Namun demikian, tantangan utama dalam SHM adalah bagaimana mengolah data sensor yang kompleks menjadi informasi yang dapat diinterpretasikan secara akurat.

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan, khususnya deep learning, telah memberikan kontribusi signifikan dalam bidang SHM. Metode ini mampu mengekstraksi fitur secara otomatis dari data kompleks tanpa memerlukan rekayasa fitur manual. Dalam konteks data getaran, convolutional neural network (CNN) dan variannya telah digunakan untuk menganalisis sinyal dinamis struktur jembatan. Sajedi dan Liang (2022) mengembangkan framework ConvLSTM3D yang mampu memproses tensor getaran berdimensi tinggi untuk mendeteksi karakteristik kerusakan secara otomatis. Pendekatan berbasis CNN juga terbukti efektif dalam mengolah data time-frequency untuk meningkatkan akurasi deteksi kerusakan (Talaei et al., 2023). Selain itu, pendekatan drive-by monitoring menggunakan sinyal kendaraan menunjukkan bahwa deteksi kerusakan dapat dilakukan tanpa sensor langsung pada struktur jembatan (Liu Et al., 2023; Corbally & Malekjafrican, 2024). Meskipun demikian, sistem berbasis getaran masih menghadapi kendala sensitivitas terhadap noise dan perubahan kondisi lingkungan yang tidak terkontrol (Casas & Moughty, 2017).

Di sisi lain, pendekatan berbasis citra telah berkembang pesat dalam deteksi kerusakan struktural. Model deep learning berbasis CNN seperti ResNet-50 telah digunakan untuk inspeksi visual jembatan dengan tingkat akurasi yang tinggi (Kruachottikul et al., 2021). Model deteksi objek seperti YOLOv3 dan Faster R-CNN juga digunakan untuk mengidentifikasi berbagai jenis kerusakan seperti retak, korosi, dan spalling pada permukaan beton (Zhang et al., 2018; Cuasay et al., 2024). Selain itu, pendekatan segmentasi seperti Cascade Mask R-CNN memungkinkan identifikasi kerusakan dengan tingkat detail yang lebih tinggi (Cho & Kim, 2021). Transformasi sinyal getaran menjadi representasi citra

seperti scalogram atau encoded images juga telah digunakan untuk meningkatkan kemampuan ekstraksi fitur spasial (Wang et al., 2024). Bahkan, pendekatan berbasis vision tiga dimensi dan Structure from Motion telah digunakan untuk pemodelan kerusakan secara spasial dalam lingkungan BIM (Yamane et al., 2024; Xiao, 2022). Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa representasi sinyal dalam bentuk visual seperti sinusoidal grating mampu meningkatkan performa klasifikasi kondisi struktur secara signifikan (Monteiro et al., 2025).

Meskipun kedua pendekatan tersebut, baik berbasis getaran maupun berbasis citra, telah menunjukkan performa yang baik, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu modalitas data saja. Pendekatan berbasis getaran unggul dalam menangkap karakteristik dinamis struktur, sedangkan pendekatan berbasis citra unggul dalam mengidentifikasi kerusakan visual permukaan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa integrasi kedua modalitas dapat meningkatkan performa deteksi secara signifikan. Model multimodal yang menggabungkan data visual dan sinyal getaran melalui arsitektur jaringan dua cabang terbukti meningkatkan akurasi deteksi dibandingkan metode tunggal (Yin, 2025). Selain itu, integrasi data multimodal juga meningkatkan ketahanan model terhadap data yang tidak lengkap atau noise (Al-Qudah et al., 2024).

Namun demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan dalam pengembangan sistem deteksi dini kerusakan jembatan. Pertama, sebagian besar studi masih berfokus pada analisis pasca-kerusakan, bukan deteksi dini secara real-time. Kedua, integrasi antara data citra dan getaran masih terbatas pada skala eksperimen dan belum banyak diimplementasikan dalam sistem end-to-end. Ketiga, generalisasi model terhadap berbagai kondisi struktur dan lingkungan masih menjadi tantangan utama dalam SHM modern (Casas & Moughty, 2017; Yin, 2025). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem yang mampu mengintegrasikan kedua sumber data tersebut secara simultan dalam satu kerangka deep learning yang adaptif dan robust.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem deteksi dini kerusakan

jembatan berbasis deep learning multimodal yang mengintegrasikan data citra dan sinyal getaran. Sistem ini dirancang untuk menggabungkan keunggulan analisis visual dan analisis dinamis struktur dalam satu arsitektur terpadu. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi deteksi, mempercepat identifikasi kerusakan, serta meningkatkan ketahanan sistem terhadap variasi kondisi lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan kontribusi berupa pengembangan model end-to-end berbasis multimodal deep learning untuk deteksi dini kerusakan jembatan yang lebih akurat, adaptif, dan aplikatif.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis eksperimen komputasional untuk mengembangkan sistem deteksi dini kerusakan jembatan berbasis multimodal deep learning. Sistem yang dibangun mengintegrasikan dua jenis data utama, yaitu citra visual kerusakan dan sinyal getaran struktur. Pendekatan ini dirancang untuk menggabungkan keunggulan masing-masing modalitas dalam satu kerangka analisis terpadu sehingga mampu meningkatkan akurasi dan keandalan deteksi kerusakan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data citra dan data getaran. Data citra mencakup gambar kerusakan permukaan jembatan seperti retak, korosi, dan spalling yang diperoleh dari dataset inspeksi visual serta hasil transformasi sinyal getaran ke dalam bentuk representasi visual seperti scalogram dan encoded images (Wang et al., 2024). Data getaran diperoleh dari sinyal akselerasi struktur jembatan yang dapat berasal dari sensor langsung maupun simulasi model struktur serta respons kendaraan yang melintasi jembatan (Liu et al., 2023; Corbally & Malekjarfarian, 2024). Selain itu, data time-series berbasis 1D CNN juga digunakan untuk memperkuat representasi karakteristik dinamis struktur (Nguyen-Tran et al., 2024).

Tahap pra-pemrosesan data dilakukan secara berbeda untuk masing-masing modalitas. Pada data getaran, sinyal terlebih dahulu dinormalisasi untuk mengurangi pengaruh skala yang berbeda, kemudian dilakukan

transformasi time-frequency menggunakan wavelet transform untuk menghasilkan representasi scalogram yang lebih informatif secara spasial dan temporal (Song et al., 2022). Representasi ini memungkinkan data getaran diperlakukan sebagai citra sehingga dapat diproses oleh jaringan CNN. Sementara itu, data citra mengalami proses resizing, augmentasi, dan normalisasi intensitas piksel untuk meningkatkan variasi data dan mencegah overfitting. Teknik augmentasi meliputi rotasi, flipping, dan perubahan kontras untuk meningkatkan generalisasi model.

Arsitektur model yang digunakan dalam penelitian ini adalah jaringan saraf tiruan dua cabang (dual-stream network). Cabang pertama digunakan untuk memproses data citra menggunakan CNN berbasis arsitektur seperti ResNet atau Faster R-CNN yang mampu mengekstraksi fitur spasial dari kerusakan visual (Kruachottikul et al., 2021; Cuasay et al., 2024). Cabang kedua digunakan untuk memproses data getaran menggunakan 1D CNN atau CNN berbasis representasi time-frequency untuk menangkap pola dinamis struktur (Sajedi & Liang, 2022). Kedua cabang ini bekerja secara paralel untuk mengekstraksi fitur dari masing-masing modalitas.

Setelah proses ekstraksi fitur, dilakukan tahap fusi fitur (feature fusion) yang menggabungkan output dari kedua cabang menjadi satu representasi terpadu. Teknik yang digunakan adalah concatenation layer yang diikuti oleh fully connected layer untuk proses klasifikasi akhir. Selain itu, mekanisme attention juga diterapkan untuk memberikan bobot lebih besar pada fitur yang lebih relevan dalam proses pengambilan keputusan, sebagaimana telah terbukti meningkatkan performa dalam sistem multimodal sebelumnya (Lu et al., 2025; Al-Qudah et al., 2024).

Proses pelatihan model dilakukan menggunakan pendekatan supervised learning dengan fungsi loss categorical cross entropy. Optimasi parameter dilakukan menggunakan algoritma Adam optimizer yang dikenal stabil dalam pelatihan jaringan deep learning. Untuk meningkatkan performa model, digunakan teknik transfer learning dari model yang telah dilatih pada dataset besar untuk mempercepat konvergensi (Liang, 2019). Selain itu, Bayesian optimization digunakan untuk melakukan tuning

hyperparameter agar diperoleh kombinasi parameter optimal.

Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan beberapa metrik, yaitu akurasi, precision, recall, dan F1-score. Selain itu, confusion matrix digunakan untuk menganalisis kesalahan klasifikasi secara lebih rinci. Pengujian juga dilakukan terhadap ketahanan model terhadap noise dan data tidak lengkap untuk menilai robustnes sistem dalam kondisi nyata. Validasi dilakukan menggunakan teknik k-fold cross validation untuk memastikan stabilitas performa model pada berbagai subset data.

Sebagai pembandingan, dilakukan eksperimen terhadap tiga model lain, yaitu model berbasis citra saja, model berbasis getaran saja, dan model multimodal yang diusulkan. Perbandingan ini bertujuan untuk mengukur kontribusi masing-masing modalitas terhadap peningkatan performa sistem. Sistem akhir dirancang sebagai pipeline deteksi dini yang terdiri dari tahapan akuisisi data, pra-pemrosesan, inferensi model deep learning, dan keluaran berupa klasifikasi tingkat kerusakan jembatan. Sistem ini diharapkan dapat diimplementasikan dalam skenario monitoring berkelanjutan untuk mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan infrastruktur secara lebih cepat dan akurat.

C. Temuan dan Pembahasan

Penelitian ini menghasilkan sistem deteksi dini kerusakan jembatan berbasis deep learning multimodal yang menggabungkan data citra dan sinyal getaran dalam satu arsitektur terpadu. Sistem ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan pendekatan tunggal yang selama ini dominan dalam Structural Health Monitoring (SHM). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa integrasi kedua modalitas memberikan peningkatan kinerja yang konsisten pada aspek akurasi, stabilitas prediksi, dan kemampuan generalisasi terhadap variasi kondisi kerusakan.

Tahap pengolahan data menghasilkan dua bentuk representasi utama yang telah melalui proses pra-pemrosesan. Data citra memperlihatkan variasi kondisi kerusakan seperti retak, korosi, spalling, dan ekspos tulangan.

Proses augmentasi meningkatkan variasi data sehingga model lebih stabil dalam proses pelatihan. Pada sisi lain, data getaran yang awalnya berbentuk sinyal time series berhasil dikonversi menjadi representasi scalogram melalui transformasi time-frequency. Representasi ini mempertahankan informasi temporal dan frekuensi secara bersamaan sehingga lebih informatif untuk proses klasifikasi. Pendekatan ini sejalan dengan temuan Song et al. (2022) dan Wang et al. (2024) yang menunjukkan bahwa representasi visual dari sinyal getaran meningkatkan kemampuan ekstraksi fitur pada model deep learning.

Model berbasis citra menunjukkan kemampuan yang kuat dalam mendeteksi kerusakan yang bersifat visual. Arsitektur convolutional neural network yang digunakan mampu mengenali pola retak dan korosi dengan tingkat konsistensi yang baik. Model ini memberikan hasil yang stabil pada dataset gambar dengan variasi pencahayaan dan sudut pengambilan. Hasil ini selaras dengan penelitian Kruchottikul et al. (2021) yang menunjukkan efektivitas ResNet-50 dalam inspeksi visual jembatan. Selain itu, pendekatan deteksi berbasis objek seperti Faster R-CNN juga terbukti mampu mengidentifikasi berbagai jenis kerusakan dengan presisi tinggi sebagaimana dilaporkan oleh Cuasay et al. (2024). Meskipun demikian, model berbasis citra menunjukkan keterbatasan dalam mendeteksi kerusakan yang tidak tampak secara visual karena hanya bergantung pada informasi permukaan.

Model berbasis getaran memberikan hasil yang baik dalam mengenali perubahan karakteristik dinamis struktur. Pola sinyal yang berbeda antara kondisi normal dan kondisi rusak dapat dipisahkan secara efektif oleh model berbasis convolutional neural network. Fitur frekuensi menjadi elemen penting dalam proses klasifikasi. Hasil ini mendukung temuan Sajedi dan Liang (2022) yang menunjukkan bahwa model berbasis deep learning mampu mengekstraksi fitur kompleks dari data getaran berdimensi tinggi. Pendekatan berbasis time-frequency juga terbukti meningkatkan kemampuan deteksi sebagaimana dilaporkan oleh Talaei et al. (2023). Sistem berbasis drive-by monitoring turut memperkuat hasil ini karena mampu mendeteksi kerusakan tanpa sensor langsung pada struktur. Namun, model ini tetap menunjukkan

sensitivitas terhadap noise dan perubahan kondisi lingkungan sebagaimana dikemukakan oleh Casas dan Moughty (2017).

Model multimodal yang mengintegrasikan citra dan getaran menunjukkan performa paling optimal dibandingkan model tunggal. Fusi fitur dari kedua cabang jaringan menghasilkan representasi yang lebih lengkap terhadap kondisi jembatan. Informasi visual memberikan indikasi kondisi permukaan, sedangkan informasi getaran memberikan gambaran respons struktural. Kombinasi ini menciptakan sinergi yang meningkatkan kemampuan klasifikasi secara keseluruhan. Hasil ini konsisten dengan penelitian Yin (2025) yang menunjukkan bahwa model dua cabang berbasis multimodal meningkatkan akurasi deteksi dibandingkan pendekatan tunggal. Selain itu, Al-Qudah et al. (2024) juga menunjukkan bahwa integrasi data visual dan getaran meningkatkan ketahanan model terhadap data yang tidak lengkap.

Perbandingan antar model menunjukkan pola yang jelas. Model berbasis citra unggul dalam mendeteksi kerusakan permukaan, sedangkan model berbasis getaran lebih efektif dalam menangkap kerusakan struktural internal. Namun, model multimodal mengungguli keduanya karena mampu menggabungkan keunggulan masing-masing pendekatan. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan tunggal tidak cukup untuk merepresentasikan kompleksitas kondisi jembatan. Sistem berbasis multimodal memberikan solusi yang lebih komprehensif dalam deteksi dini kerusakan.

Pengujian terhadap kondisi data yang mengandung noise menunjukkan bahwa model multimodal memiliki tingkat stabilitas yang lebih tinggi. Ketika salah satu modalitas mengalami penurunan kualitas data, modalitas lainnya tetap menjaga kinerja sistem. Mekanisme attention dalam proses fusi fitur membantu model dalam memberikan bobot yang lebih tepat terhadap informasi yang relevan. Hal ini mendukung temuan Lu et al. (2025) yang menunjukkan bahwa attention mechanism meningkatkan efektivitas representasi fitur dalam sistem SHM. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan memiliki karakteristik robust terhadap gangguan data.

Secara konseptual, hasil penelitian ini menegaskan bahwa deteksi dini kerusakan jembatan membutuhkan pendekatan yang mampu menangkap berbagai dimensi informasi struktur. Jembatan memiliki karakteristik kompleks yang tidak dapat direpresentasikan hanya melalui satu jenis data. Pendekatan multimodal memberikan representasi yang lebih holistik karena menggabungkan informasi spasial dari citra dan informasi dinamis dari getaran. Hal ini memperkuat arah pengembangan SHM modern yang bergerak menuju integrasi multi sensor dan kecerdasan buatan.

Implikasi penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan berpotensi untuk diterapkan dalam monitoring jembatan secara berkelanjutan. Integrasi antara deep learning dan multimodal sensing dapat digunakan dalam sistem pemantauan berbasis real-time. Sistem ini dapat mendukung pengambilan keputusan dalam pemeliharaan infrastruktur secara lebih cepat dan berbasis data. Selain itu, pendekatan ini dapat diperluas dalam kerangka Internet of Things untuk memperkuat sistem monitoring infrastruktur cerdas.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada penggunaan sebagian data simulasi yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan. Kompleksitas komputasi model multimodal juga masih relatif tinggi untuk implementasi skala besar. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk optimasi efisiensi komputasi serta validasi pada data lapangan yang lebih luas.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi citra dan sinyal getaran dalam satu sistem deep learning memberikan peningkatan signifikan dalam deteksi dini kerusakan jembatan. Sistem multimodal yang dikembangkan mampu meningkatkan akurasi, stabilitas, dan ketahanan terhadap noise dibandingkan pendekatan tunggal. Pendekatan ini membuka peluang pengembangan sistem pemantauan jembatan yang lebih adaptif, akurat, dan siap diterapkan dalam skenario infrastruktur nyata.

D. Simpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem deteksi dini kerusakan jembatan berbasis deep learning multimodal

yang mengintegrasikan data citra dan sinyal getaran dalam satu arsitektur terpadu. Sistem ini dirancang untuk menjawab keterbatasan metode konvensional dan pendekatan single modality yang selama ini digunakan dalam pemantauan kesehatan struktur jembatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi dua jenis data tersebut mampu meningkatkan performa deteksi secara signifikan dibandingkan penggunaan satu modalitas saja.

Model berbasis citra menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengenali kerusakan permukaan seperti retak, korosi, dan spalling. Model berbasis getaran mampu menangkap perubahan karakteristik dinamis struktur yang mencerminkan kondisi internal jembatan. Namun, masing-masing model memiliki keterbatasan jika digunakan secara terpisah. Model citra tidak mampu mendeteksi kerusakan internal, sedangkan model getaran sensitif terhadap noise dan perubahan kondisi lingkungan.

Integrasi kedua modalitas dalam bentuk model deep learning dua cabang memberikan hasil yang lebih optimal. Fusi fitur dari citra dan getaran menghasilkan representasi yang lebih lengkap terhadap kondisi struktur jembatan. Sistem ini mampu meningkatkan akurasi, stabilitas, dan ketahanan terhadap gangguan data. Mekanisme penggabungan fitur juga memberikan kontribusi dalam memperkuat informasi penting yang relevan untuk proses klasifikasi.

Sistem yang dikembangkan memiliki potensi untuk digunakan dalam aplikasi deteksi dini berbasis real-time. Pendekatan ini dapat mendukung sistem pemantauan infrastruktur yang lebih adaptif dan berbasis data. Dengan kemampuan menggabungkan dua sumber informasi utama, sistem ini mampu memberikan evaluasi kondisi jembatan secara lebih komprehensif dan akurat.

Meskipun demikian, implementasi sistem masih menghadapi tantangan terkait efisiensi komputasi dan validasi pada kondisi lapangan yang lebih kompleks. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi model serta memperluas pengujian pada data nyata. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pemantauan jembatan berbasis kecerdasan buatan yang

lebih cerdas, akurat, dan berorientasi pada deteksi dini kerusakan infrastruktur.

Daftar Pustaka

- Al-Qudah, S., Bai, X., Yang, M., & Gao, Z. (2025). Deep learning-based structural health monitoring through the infusion of optical photos and vibration data. *Advances in Structural Engineering*, 28(3), 532-552. <https://doi.org/10.1177/13694332241289173>
- Casas, J. R., & Moughty, J. J. (2017). Bridge damage detection based on vibration data: Past and new developments. *Frontiers in Built Environment*, 3, 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00004>
- Cho, S., & Kim, B. H. (2021). Image-driven bridge inspection framework using deep learning and image registration. *IABSE Conference – Risk Intelligence of Infrastructures*, 269-271. <https://doi.org/10.2749/SEOUL.2020.269>
- Corbally, R., & Malekjafarian, A. (2024). A deep-learning framework for classifying the type, location, and severity of bridge damage using drive-by measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(6), 852-871. <https://doi.org/10.1111/mice.13104>
- Cuasay, R. M., Tan, N. G., Torres, J. N., & Estores, G. (2024). A faster region-based convolutional neural network approach to automated structural damage recognition of reinforced concrete bridge structures. *AIP Conference Proceedings*, 3034(1), 050008. <https://doi.org/10.1063/5.0194714>
- Kruachottikul, P., Cooharojananone, N., Phanomchoeng, G., Chavarnakul, T., Kovitangoon, K., & Trakulwaranont, D. (2021). Deep learning-based visual defect-inspection system for reinforced concrete bridge substructure: a case of Thailand's department of highways. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(4), 949-965. <https://doi.org/10.1007/S13349-021-00490-Z>
- Liang, X. (2019). Image-based post-disaster inspection of reinforced concrete bridge systems using deep learning with Bayesian optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34(5), 415-430. <https://doi.org/10.1111/MICE.12425>
- Liu, J., Xu, S., Bergés, M., & Noh, H. Y. (2023). HierMUD: Hierarchical multi-task unsupervised domain adaptation

- between bridges for drive-by damage diagnosis. *Structural Health Monitoring*, 22(3), 1941-1968. <https://doi.org/10.1177/14759217221081159>
- Lu, N., Cui, J., Zeng, W., Xiao, X., & Luo, Y. (2025). Bridge damage detection framework based on multi-scale feature fusion and multi-attention enhanced residual network. *Structural Health Monitoring*, 14759217251389151. <https://doi.org/10.1177/14759217251389151>
- Monteiro, D. K., Cardoso, J. P., & Miguel, L. F. F., Tavares, A. R., (2025). Bridge health monitoring using deep learning based on sinusoidal gratings. *Structural Health Monitoring: An International Journal*. 14759217251389099. <https://doi.org/10.1177/14759217251389099>
- Nguyen-Tran, H., Bui-Ngoc, D., Pham-Tuan, D., Ngoc-Nguyen, L., Tran-Ngoc, H., Bui-Tien, T. (2024). Damage Detection in Structural Health Monitoring Using a One-Dimensional Convolutional Neural Network—The Z24 Bridge Case Study. *International Conference on Sustainability in Civil Engineering. ICSCCE*. 344. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2345-8_70
- Saafi, M., Robinson, N., & Lazare, S. (2006). Durability Monitoring and Damage Detection in Civil Infrastructure Using Nanotechnology/MEMS-based Devices/Überwachung der Dauerhaftigkeit und Aufspüren von Schäden mit Hilfe der Nanotechnologie und auf MEMS basierten Geräten im Brücken-und Hochbau. *Restoration of Buildings and Monuments*, 12(5-6), 41-54. <https://doi.org/10.1515/RBM-2006-6079>
- Sajedi, S. O., & Liang, X. (2022). Trident: A deep learning framework for high-resolution bridge vibration monitoring. *Applied Sciences*, 12(21), 10999. <https://doi.org/10.3390/app122110999>
- Song, X., Dyogi, J., & Cho, C. (2022). Vibration-based bridge damage detection using image-based pre-trained deep learning network. *SMASIS Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 86274, V001T05A001. <https://doi.org/10.1115/smasis2022-88421>
- Talaei, S., Zhu, X., Li, J., Yu, Y., & Chan, T. H. (2023). Transfer learning based bridge damage detection: Leveraging time-frequency features. *Elsevier*, 57,105052. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105052>

-
- Wang, X., Li, W., Ma, M., et al. (2024). Bridge damage identification based on encoded images and convolutional neural network. *Buildings*, 14(10), 3104. <https://doi.org/10.3390/buildings14103104>
- Xiao, P. (2022). *Three-dimensional vision-based structural damage detection and loss estimation—towards more rapid and comprehensive assessment*. (Doctoral dissertation, University of British Columbia). <https://doi.org/10.14288/1.0422384>
- Yamane, T., Chun, P. J., & Honda, R. (2024). Detecting and localising damage based on image recognition and structure from motion, and reflecting it in a 3D bridge model. *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(4), 594-606. <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2131845>
- Yin, C. (2025). *Multimodal Machine Learning for Structural Damage Detection Integrating Visual and Vibration Data*. (Doctoral dissertation, Carnegie Mellon University). <https://doi.org/10.1184/r1/29450093>
- Zhang, C., Chang, C. C., & Jamshidi, M. (2018). Bridge damage detection using a single-stage detector and field inspection images. *ArXiv*, 1812, 10590. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.10590>