

KOMPYUTER KO'RISHI VA KUBIK SPLAYN INTERPOLYATSIYASI YORDAMIDA SANOAT USKUNALARIDAGI TEBRANISH ANOMALIYALARINI BASHORAT QILISH YO'LCHIYEV Z.Z.

FarDU talabasi yulchiyevziyodjon2005@gmail.com

Annotatsiya. Sanoat uskunalaridagi tebranish anomaliyalarini erta aniqlash avariya xavfini kamaytiradi, lekin bu vazifa ko'p obyektli ishlab chiqarish muhitida doim ham arzon yechilmaydi. Akselerometr va boshqa kontakt datchiklar aniq ma'lumot beradi, ammo ularni har bir uskuna yoki konstruksiyaga o'rnatish, kalibrlash va servis qilish katta xarajat talab qiladi. Ushbu maqolada oddiy video kadrlar orqali tebranishni kontaktiz baholashga asoslangan gibrid yondashuv bayon etiladi. Modelda dastlab optik oqim yordamida kadrlar orasidagi siljish aniqlanadi, so'ng past FPS va shovqin ta'sirida notekis chiqqan signal kubik splayn interpolatsiyasi bilan silliqiladi. Uzoqroq vaqt oralig'idagi amplituda o'sishi esa eng kichik kvadratlar usuli orqali yaqinlashtirilib, qolgan foydali xizmat muddati (Remaining Useful Life — RUL) baholanadi. Tajriba qismi real sanoat obyektidagi uzoq muddatli o'lchovlarga emas, balki MQTT mock oqimlari va SensorFusionArbiter hamda MqttIngestService tuzilmalariga mos simulyatsion ma'lumotlarga tayanadi. Natijalarda xom optik oqim signali uchun global RMSE 0.118 mm bo'lgan bo'lsa, splayn bilan qayta ishlangandan keyin bu ko'rsatkich 0.042 mm gacha kamaydi, MSE esa 0.0017 mm² ni tashkil etdi. C++ native engine Intel Core i9-14900KF va NVIDIA RTX 5080 konfiguratsiyasida bir kadrni o'rtacha 12–14 ms oralig'ida qayta ishladi. Real sanoat sharoitida laboratoriya va maydon validatsiyasi keyingi bosqich sifatida ko'zda tutiladi.

Kalit so'zlar: kompyuter ko'rishi, optik oqim, kubik splayn interpolatsiyasi, tebranish anomaliyasi, eng kichik kvadratlar usuli, RUL, bashoratli texnik xizmat, sanoat uskunalari.

KIRISH

Sanoat uskunasi odatda birdaniga ishdan chiqmaydi. Avval kichik belgilar paydo bo'ladi: tebranish amplitudasi sekin ortadi, chastota tarkibi o'zgaradi, podshipnik yoki rotor ishida barqarorlik yo'qoladi. Bunday belgilar vaqtida kuzatilsa, ta'mirlashni avariya sodir bo'lishidan oldin rejalashtirish mumkin. Amaliyotda bu yondashuv bashoratli texnik xizmat ko'rsatish deb yuritiladi.

Akselerometr kabi kontakt datchiklar tebranishni aniq o'lchaydi. Bunga shubha yo'q. Muammo boshqa joyda: ko'p sonli stanok, nasos, ventilyator, kompressor yoki konstruksiya elementlariga alohida datchik o'rnatish qimmat. Har bir o'rnatish nuqtasi mexanik mahkamlash, kabel, kalibrlash va texnik xizmat talab qiladi. Kichik sex yoki vaqtinchalik qurilish maydonida bunday infratuzilma o'zini oqlamasligi mumkin.

Kompyuter ko'rishi asosidagi yondashuv shu joyda foydali ko'rinadi. Kamera uskunaga tegmaydi, obyektga qo'shimcha massa yuklamaydi va bir nechta nuqtani bitta tasvir maydonida kuzata oladi. Oddiy mobil kamera yoki IP-kamera yordamida tanlangan sohada piksel siljishi aniqlansa, u tebranish signali sifatida qayta ishlanishi mumkin. Lekin bu yo'l ham ideal emas.

Oddiy kamera 30 FPS atrofida ishlaganda tebranish signali uzluksiz emas, diskret va shovqinli bo'ladi. Harakat maksimumi ikki kadr orasida qolib ketishi mumkin. Yorug'lik o'zgarishi, tasvir siqilishi, motion blur va obyekt yuzasida tekstura kamligi optik oqim natijasini buzadi. Shu sababli xom video signalni bevosita diagnostika mezoni sifatida olish yetarli emas. Uni sonli usullar bilan tiklash va silliqilash kerak.

Ushbu tadqiqotning maqsadi optik oqim, kubik splayn interpolatsiyasi va eng kichik kvadratlar usulini yagona gibrid modelda birlashtirish orqali sanoat uskunalaridagi tebranish anomaliyalarini bashorat qilishdir. Model kamera oqimidan olingan siljish nuqtalarini silliq signalga aylantiradi, keyin amplituda o'sish trendi orqali RUL qiymatini baholaydi.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR TAHLILI

So'nggi yillarda kompyuter ko'rishi orqali strukturaviy tebranish va deformatsiyani kuzatish bo'yicha ishlar ko'paydi. Shi va hammualliflar ko'prik konstruksiyasini bosqichma-bosqich ishga tushirish jarayonida video asosidagi tebranish monitoringini qo'llab, kamera orqali real obyekt reaksiyasini baholash mumkinligini ko'rsatgan [1]. Li va hammualliflar chuqur o'rganishga

asoslangan optik oqim orqali kontaktsiz siljish o'lehash masalasini ko'rib chiqib, klassik kuzatuvdan murakkabroq harakat maydonlarini baholashga o'tish tendensiyasini tasdiqlagan [2].

Nie va hammualliflar raqamli kamera yordamida siyrak optik oqim asosida tebranishni kuzatish usulini taklif qilgan. Ularning ishida ORB nuqtalari, ko'p bosqichli optik oqim va chet qiymatlarni kamaytirish orqali maqsadli nuqta harakati barqarorroq kuzatilgan [3]. Bu yondashuv maqolamizdagi dastlabki video-siljish qatlamiga yaqin, ammo keyingi signalni tiklash va RUL baholash alohida matematik zanjir sifatida kiritilmagan.

Gibrid sensor monitoringi ham alohida yo'nalish sifatida rivojlanmoqda. Gonen va Erduran tebranishga asoslangan ko'priik shikastlanishini aniqlashda tezlanish ma'lumotlari va kamera o'lehovlarini birlashtirgan, splayn funksiyalarining fazoviy aniqlik va silliqlashdagi ahamiyatini ko'rsatgan [4]. Zhuang va hammualliflar esa dala sharoitida kompyuter ko'rishi asosidagi deformatsiya monitoringini sharhlab, kalibrlash, yorug'lik, nishon tanlash, aniqlik va algoritmi tezligi kabi amaliy cheklovlarni tizimli ko'rsatgan [5].

Smartfon va portativ kamera asosidagi ishlar past xarajatli monitoring g'oyasiga yaqin turadi. Zhao va hammualliflar shamol turbina konstruksiyasining dinamik xususiyatlarini smartfon va optik oqim yordamida kuzatgan [8]. Chen va Zhou esa smartfon orqali bir nechta nuqtaning dinamik siljishini shovqinli muhitda barqarorroq baholash usulini taklif qilgan [9]. Biroq mavjud tadqiqotlarda ko'pincha real vaqtli kichik tizim, kubik splayn orqali signalni tiklash va eng kichik kvadratlar usuli orqali RUL baholash yagona zanjirda birlashtirilmagan.

Ushbu maqolaning ilmiy yangiligi shundan iboratki, video asosida olingan xom siljish, kubik splayn interpolyatsiyasi va RUL baholash hisoblash jihatdan yengil, tushunarli va muhandis tomonidan tekshiriladigan bitta modelga jamlanadi. Model chuqur qora quti sifatida emas, balki aniq sonli formulalar va oddiy ogohlantirish mezonini asosida quriladi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI VA MATEMATIK MODEL

Video asosida siljish signalini olish

Kamera sanoat uskunasi tanlangan sohasi — ROI ni kuzatadi. Har bir kadrda optik oqim algoritmi shu sohadagi nuqtalarning siljish vektorini hisoblaydi. Amaliy jihatdan asosiy tebranish yo'nalishi tanlanadi va piksel birligidagi siljish oldindan berilgan kalibrlash koeffitsienti orqali millimetrga o'tkaziladi. Natijada vaqt bo'yicha diskret signal hosil bo'ladi:

$$(t_i, x_i), i = 0, 1, \dots, n.$$

Bu yerda t_i -kadrda mos vaqt, x_i esa millimetrdagi siljish qiymati. Kamera 30 FPS tezlikda ishlaydi, kadrlar oralig' $h = 1/fps \approx 0.033$ s bo'ladi. Bu oraliq kichik ko'ringani bilan, yuqori chastotali tebranishda ayrim ekstremumlar kadrlar orasida qolib ketishi mumkin.

Optik oqim qatlami

Lucas–Kanade optik oqim yondashuvi yorqinlik doimiyligi va kichik siljish faraziga tayanadi. Ya'ni obyektning kichik sohasi ikki ketma-ket kadrda juda o'zgarmaydi, faqat joyi biroz siljiydi deb qaraladi. Mahalliy oynada siljish tezligi vektori eng kichik kvadratlar masalasi sifatida topiladi:

$$A^T A[uv]^T = A^T b.$$

Bu yerda u va v tasvir tekisligidagi siljish komponentlarini bildiradi. Maqoladagi modelda optik oqim faqat dastlabki xom signalni olish uchun ishlatiladi. Yakuniy diagnostika signalini xom optik oqimdan bevosita chiqarish maqsadga muvofiq emas, chunki u shovqin va chet qiymatlarga sezgir. Shu sababli keyingi bosqichda signal kubik splayn bilan qayta tiklanadi.

Kubik splayn interpolyatsiyasi

Past FPS, yorug'lik shovqini va tasvir siqilishi sabab olingan siljish signali notekis chiqadi. Kubik splayn interpolatsiyasi har bir $[t_i, t_{i+1}]$ oraliqda uchinchi darajali polinom qurib, diskret nuqtalar orasidagi silliq harakatni tiklaydi:

$$S(t) = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3.$$

Splayn qurilishida uchta asosiy talab bajariladi: funksiya berilgan nuqtalardan o'tadi, ichki tugunlarda birinchi hosila uzluksiz bo'ladi va ikkinchi hosila ham uzluksiz saqlanadi. Tabiiy chegara sharti sifatida quyidagi shartlar olinadi:

$$S''(t_0) = 0, S''(t_n) = 0.$$

Bu shartlardan koeffitsientlarni topish uchun tridiagonal tenglamalar tizimi hosil bo'ladi. Thomas algoritmi bunday tizimni $O(n)$ murakkablikda yechadi. Shu sababli kubik splayn real vaqtga yaqin ishlaydigan C++ native engine uchun qulay: u signalni silliqlaydi, lekin hisoblashni og'irlashtirmaydi.

Eng kichik kvadratlar usuli orqali RUL ni baholash

Kubik splayn qisqa muddatli signalni silliqlaydi. Biroq uskuna eskirayotganini bilish uchun amplituda o'sish trendini alohida baholash kerak. Buning uchun vaqt bo'yicha olingan amplituda qiymatlari ikkinchi tartibli model bilan yaqinlashtiriladi:

$$y(t) = at^2 + bt + c.$$

Koeffitsientlar eng kichik kvadratlar usuli orqali topiladi, ya'ni o'lchangan qiymatlar va model qiymatlari orasidagi kvadratik chetlanishlar yig'indisi minimallashtiriladi:

$$S = \sum [y_i - (at_i^2 + bt_i + c)]^2 \rightarrow \min.$$

Normal tenglamalar orqali a, b va c koeffitsientlar aniqlangandan keyin kritik amplituda chegarasi Acrit beriladi. Model $y(t) = Acrit$ shartini qachon bajarishi topiladi. Hozirgi kuzatish vaqtdan keyingi musbat yechim qolgan foydali xizmat muddati — RUL sifatida talqin qilinadi.

Sensorlarni birlashtirish va ogohlantirish mezon

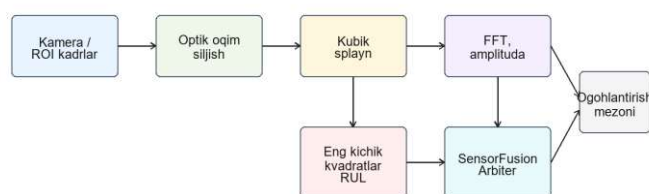
Faqat kamera asosidagi signal har doim yetarli ishonch bermaydi. Tasvir sifati yomonlashsa, optik oqim noto'g'ri siljish ko'rsatishi mumkin. Shu sababli mock IoT maydonlari mavjud bo'lganda SensorFusionArbiter amplituda, chastota va apparat SNR qiymatlarini birlashtirib, umumiy ishonchlilik darajasini hisoblaydi:

$$Ishonchlilik = 0.40 \cdot R_{amplituda} + 0.40 \cdot R_{chastota} + 0.20 \cdot SNR_{apparat}.$$

Ogohlantirish faqat signal kritik chegaraga yaqinlashganda va ishonchlilik darajasi belgilangan chegaradan oshganda chiqariladi. Bu mezon sodda saqlangan, chunki sanoat muhitida model muhandis tomonidan tekshiriladigan bo'lishi kerak.

TIZIM ARXITEKTURASI

1-rasm. Tizim arxitekturasini va sonli qayta ishlash zanjiri



MQTT mock oqimi MqttIngestService tuzilmasiga mos keladi; ishonchlilik = 0.4 amplituda + 0.4 chastota + 0.2 SNR.

1-rasmida taklif etilgan qayta ishlash zanjiri ko'rsatilgan. Avval kamera orqali kadrlar olinadi va ROI tanlanadi. Keyingi bosqichda optik oqim orqali siljish aniqlanadi. Kubik splayn interpolatsiyasi signalni tiklaydi, FFT orqali amplituda va chastota ajratiladi. Eng kichik kvadratlar

usuli RUL qiymatini baholaydi. SensorFusionArbiter esa natijani ishonchlilik mezoni bilan tekshirib, ogohlantirish chiqarish yoki chiqarmaslikni hal qiladi.

TAJIRIBA SHAROITI VA NATIJALAR

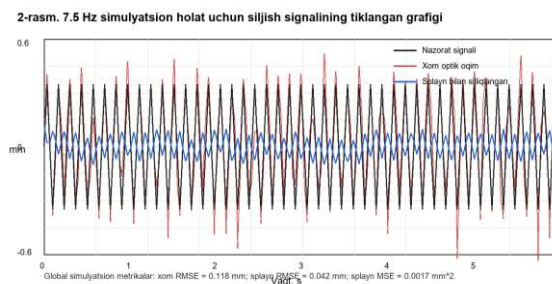
Real sanoat obyektida uzoq muddatli sinov hali o'tkazilmagan. Shuning uchun ushbu maqoladagi natijalar simulyatsion MQTT oqimlari va mock ma'lumotlar asosida olingan. Ma'lumotlar MqttIngestService qabul qiladigan paket tuzilmasiga va SensorFusionArbiter ishlatadigan maydonlarga moslab shakllantirildi.

Sintetik signal sinusoidal siljish, sekin amplituda o'sishi, tasodifiy shovqin va ayrim outlierlardan tashkil topdi. Xom optik oqim signali ma'lum nazorat signaliga nisbatan RMSE va MSE bo'yicha baholandi. Keyin shu signal kubik splayn interpolyatsiyasi bilan silliqqlanib, metrikalar qayta hisoblandi. C++ native engine Intel Core i9-14900KF va NVIDIA RTX 5080 konfiguratsiyasida stress-testdan o'tkazildi.

1-jadval. Simulyatsion tebranish oqimi natijalari.

Holat	Asosiy chastota (Hz)	Amplituda oralig'i (mm)	Xom RMSE (mm)	Splayn RMSE (mm)	Splayn MSE (mm ²)	Birlashtirish ishonchliligi
S1: barqaror motor	5.0	0.18–0.26	0.094	0.035	0.0012	0.71
S2: yengil nomutanosi blik	7.5	0.22–0.36	0.118	0.042	0.0017	0.78
S3: podshipnik yeyilishi trendi	9.0	0.30–0.47	0.126	0.045	0.0020	0.84
S4: yomon yoritilish sharoiti	7.5	0.24–0.39	0.151	0.052	0.0027	0.69
S5: kritik chegaraga yaqin holat	12.0	0.38–0.53	0.137	0.049	0.0024	0.88
O'rtacha qiymat	-	-	0.118	0.042	0.0017	0.78

1-jadvaldan ko'rinadiki, global RMSE 0.118 mm dan 0.042 mm gacha kamaygan. Bu taxminan 64.4% xatolik kamayishini bildiradi. Splayn bilan silliqqlangan signal uchun MSE 0.0017 mm² bo'ldi. Yomon yoritilish sharoitida xatolik oshgani kuzatildi, ammo splayn xom optik oqimdagi notekislikni baribir kamaytirdi. Demak, splayn bosqichi tasvir sifati yomonlashganda ham ma'lum darajada foyda beradi, lekin u noto'g'ri olingan vizual dalilni to'liq tuzatib bera olmaydi.



2-rasmda xom optik oqim signali, nazorat signali va splayn bilan silliqilgan signal ustma-ust ko'rsatilgan. Xom signalda shovqin va ayrim keskin chet qiymatlar bor. Splayn natijasi esa umumiy tebranish shaklini saqlagan holda shovqinni kamaytiradi. Ma'lumotlar orasidagi farq ayniqsa amplituda maksimumlari atrofida seziladi, chunki past FPS sharoitida aynan shu nuqtalar oson yo'qoladi.

2-jadval. C++ native engine ishlash vaqti bo'yicha stress-test natijalari.

Qayta ishlash bosqichi	O'rtacha vaqt (ms/kadr)	95-foizlik chegaradagi vaqt (ms/kadr)	Izoh
ROI kesish va kulrang formatga o'tkazish	1.8	2.3	CPU yo'li
Siyrak optik oqim	4.7	5.6	oyna o'lchami: 21 × 21
Tabiiy kubik splayn	2.1	2.8	Thomas algoritmi
FFT va amplituda ajratish	1.9	2.5	256 namunali oyna
Eng kichik kvadratlar orqali RUL yangilash	1.4	1.9	3 × 3 Gauss eliminatsiyasi
Umumiy native engine	12.9	14.0	stress-test o'rtacha qiymati

2-jadvaldagi natijalar tizim real vaqtga yaqin ishlashga mosligini ko'rsatadi. 30 FPS oqimda bitta kadr oralig'i taxminan 33 ms bo'ladi. Native engine 12–14 ms/kadr oralig'ida ishlagani uchun optik oqim, splayn va RUL yangilash zanjiri amaliy sinovlar uchun yetarli tezlik zaxirasiga ega.

RUL NATIJASINI ALOHIDA IZOH

RUL baholash uchun kritik amplituda chegarasi Acrit = 0.50 mm deb olindi. Simulyatsion kvadratik trend bu chegarani 73.6 ish soatida kesib o'tdi. Oxirgi kuzatilgan nuqtada qolgan foydali xizmat muddati 23.6 soat deb baholandi. Bu qiymat real mashina uchun kafolatli prognoz emas. U hisoblash zanjiri, ogohlantirish va trendni baholash mantiqi to'g'ri ishlashini tekshirish uchun olingan simulyatsion natijadir.

MUHOKAMA

Taklif qilingan usulning asosiy foydasi past FPS va shovqinli optik oqim signalini sonli usullar orqali tiklashidadir. Kamera arzon va kontaktsiz kuzatuv beradi, lekin undan kelgan signal bevosita ideal o'lchov emas. Kubik splayn shu oraliqdagi bo'shliqni qisman yopadi: u signalni silliqilaydi, lekin butun vaqt qatori bo'yicha bitta yuqori darajali polinom majburlamaydi.

Kubik splayn lokal ishlaydi. Bitta oraliqdagi kichik xato butun signal shaklini keskin buzmaydi. Bu xususiyat real video oqimlarida muhim, chunki tasvirda doim mayda shovqin bo'ladi. Eng kichik kvadratlar modeli esa RUL baholash uchun yetarlicha sodda va tushunarli. Muhandis koeffitsientlarni, kritik chegarani va kesishish vaqtini tekshirishi mumkin.

Kamera asosidagi tizim akselerometrqa qaraganda arzonroq va o'rnatish jihatidan yengilroq bo'lishi mumkin. Ayniqsa ikkilamchi uskunalar, vaqtinchalik qurilish maydonlari va ko'p nuqtali kuzatuv talab qilinadigan joylarda bunday model foydali. Shu bilan birga, muhim obyektlarda video monitoring kontakt datchiklarni darhol almashtirishi kerak degan xulosa noto'g'ri bo'ladi. To'g'ri yondashuv — ularni birgalikda ishlatish.

CHEKLOVLAR

Modelning eng katta cheklovi tasvir sifatiga bog'liq. Past yoritilish, kamera tebranishi, motion blur, video siqilish artefaktlari va metall yuzalarda tekstura kamligi optik oqimni xato qilishi mumkin. Splayn bunday xatoni kamaytiradi, ammo xom signal noto'g'ri olingan bo'lsa, matematik silliqlash uni haqiqiy o'lchovga aylantirib qo'ymaydi.

Yana bir cheklov — real sanoat validatsiyasi hali bajarilmagan. Maqoladagi natijalar simulyatsion MQTT oqimlari va mock ma'lumotlarga asoslangan. Shuning uchun ularni dastlabki algoritmik baholash sifatida qabul qilish kerak. Keyingi bosqichda bir xil obyekt kamera va akselerometr yordamida parallel o'lchanishi, amplituda, chastota, faza siljishi, RMSE va RUL barqarorligi solishtirilishi lozim.

XULOSA

Maqolada video asosidagi tebranish monitoringi, optik oqim, kubik splayn interpolyatsiyasi va eng kichik kvadratlar usuli yagona gibrid modelda birlashtirildi. Model oddiy kamera oqimidan xom siljish signalini oladi, uni kubik splayn orqali silliqlaydi va amplituda trendi asosida qolgan foydali xizmat muddatini baholaydi.

Simulyatsion 30 FPS oqimda xom optik oqim uchun RMSE 0.118 mm bo'lgan bo'lsa, splayn bosqichidan keyin bu ko'rsatkich 0.042 mm gacha kamaydi. MSE 0.0017 mm² ni tashkil etdi. C++ native engine Intel Core i9-14900KF va NVIDIA RTX 5080 konfiguratsiyasida 12–14 ms/kadr oralig'ida ishladi. Bu natijalar metodni real laboratoriya validatsiyasiga tayyor holatga olib keladi.

Keyingi bosqichda kamera va akselerometr yordamida bir xil tebranuvchi obyekt sinovdan o'tkazilishi kerak. Shunda amplituda, chastota, faza siljishi, RMSE va RUL barqarorligi real o'lchovlar bilan tekshiriladi. Ana shundan keyin modelni sanoat monitoringi va bashoratli texnik xizmat ko'rsatish tizimlariga bosqichma-bosqich joriy etish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

- [1] H. Shi, M. Zhang, T. Jin, X. Shi, J. Zhang, Y. Xu, X. Guo, X. Cai, and W. Peng, "Computer Vision-Based Monitoring of Bridge Structural Vibration During Incremental Launching Construction," *Buildings*, vol. 15, no. 7, Art. no. 1139, 2025, doi: 10.3390/buildings15071139.
- [2] J.-h. Li, L. Zhu, Y.-Y. Zhu, and R. K.-L. Su, "Noncontact Structural Vibration Displacement Measurement Using Deep Learning-Based Optical Flow Estimation," *Journal of Structural Engineering*, vol. 151, no. 11, Art. no. 04025177, 2025, doi: 10.1061/JSENDH.STENG-14884.
- [3] G.-Y. Nie, S. S. Bodda, H. K. Sandhu, K. Han, and A. Gupta, "Computer-Vision-Based Vibration Tracking Using a Digital Camera: A Sparse-Optical-Flow-Based Target Tracking Method," *Sensors*, vol. 22, no. 18, Art. no. 6869, 2022, doi: 10.3390/s22186869.
- [4] S. Gonen and E. Erduran, "A Hybrid Method for Vibration-Based Bridge Damage Detection," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 23, Art. no. 6054, 2022, doi: 10.3390/rs14236054.
- [5] Y. Zhuang, W. Chen, T. Jin, B. Chen, H. Zhang, and W. Zhang, "A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments," *Sensors*, vol. 22, no. 10, Art. no. 3789, 2022, doi: 10.3390/s22103789.
- [6] Y. Shao, L. Li, J. Li, Q. Li, S. An, and H. Hao, "Out-of-plane full-field vibration displacement measurement with monocular computer vision," *Automation in Construction*, vol. 165, Art. no. 105507, 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105507.

- [7] X. Bai, R. Xie, N. Liu, and Z. Zhang, "Structural Vibration Detection Using the Optimized Optical Flow Technique and UAV After Removing UAV's Motions," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 11, Art. no. 5821, 2025, doi: 10.3390/app15115821.
- [8] W. Zhao, W. Li, B. Fan, and Y. Du, "Dynamic Characteristic Monitoring of Wind Turbine Structure Using Smartphone and Optical Flow Method," *Buildings*, vol. 12, no. 11, Art. no. 2021, 2022, doi: 10.3390/buildings12112021.
- [9] T. Chen and Z. Zhou, "An Improved Vision Method for Robust Monitoring of Multi-Point Dynamic Displacements with Smartphones in an Interference Environment," *Sensors*, vol. 20, no. 20, Art. no. 5929, 2020, doi: 10.3390/s20205929.
- [10] M. Ghyabi and D. Lattanzi, "Computer vision-based video signal fusion using deep learning architectures," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 15, pp. 1609-1624, 2025, doi: 10.1007/s13349-024-00891-w.
- [11] M. Kalybek, M. Bocian, W. Pakos, J. Grosel, and N. Nikitas, "Performance of Camera-Based Vibration Monitoring Systems in Input-Output Modal Identification Using Shaker Excitation," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 17, Art. no. 3471, 2021, doi: 10.3390/rs13173471.
- [12] L. Ngeljaratan and M. A. Moustafa, "Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation," *Engineering Structures*, vol. 213, Art. no. 110551, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110551.
- [13] B. D. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," in *Proc. 7th Int. Joint Conf. Artificial Intelligence*, Vancouver, BC, Canada, 1981, pp. 674-679.
- [14] R. L. Burden and J. D. Faires, *Numerical Analysis*, 9th ed. Boston, MA, USA: Brooks/Cole, 2011.