Forensic Science, 4'2026
ISSN: 3083-6085 (print), 3083-6093 (online)

УДК 343.98:343.14
DOI https://doi.org/10.32782/forensic.science.2026.4.16



Андрій Переїденко
провідний судовий експерт відділу досліджень фотозображень,
відео- та звукозаписів лабораторії досліджень цифрових доказів,
Київський науково-дослідний інститут судових експертиз
Міністерства юстиції України
https://orcid.org/0009-0005-8449-8161



Ярослав Мороз
технік першої категорії відділу досліджень фотозображень,
відео- та звукозаписів лабораторії досліджень цифрових доказів,
Київський науково-дослідний інститут судових експертиз
Міністерства юстиції України
https://orcid.org/0009-0005-2216-6890

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ГАБАРИТНИХ ПАРАЛЕЛЕПІПЕДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ВІДЕОЗАПИСАХ

У статті розглядається проблема підвищення точності просторового позиціонування транспортних засобів на кадрах відеозаписів в умовах складних перспективних ракурсів. ***Метою дослідження*** *є розробка методології точної локалізації габаритів автомобіля, що дає змогу нівелювати «ефект обтічності» сучасних ергономічних кузовів та усунути системні помилки, які виникають під час розрахунку кінематичних параметрів руху.* ***Методологічною основою*** *роботи стали загальнонаукові та спеціальні методи, зокрема принципи проєктивної геометрії, методи комп'ютерного зору, обчислювальної фотограмметрії, а також аналіз експертної практики. Дослідження виконано на матеріалі аналізу відеозаписів дорожньо-транспортних пригод (ДТП), де транспортні засоби зафіксовані під гострим кутом до оптичної осі камери, що унеможливлює пряму візуальну фіксацію їхніх крайніх габаритних точок. Запропонований метод базується на комплексному поєднанні інструментів тривимірного моделювання, аналітичного визначення просторових умов зйомки та зворотного проєктування верифікованої 3D-моделі на площину кадру відеозапису. Ключовим елементом підходу є побудова навколо моделі жорсткого каркаса у вигляді віртуального напівпрозорого орієнтованого паралелепіпеда (Oriented Bounding Box, OBB), площини якого суворо проходять через крайні конструктивні межі кузова. Цей каркас виступає геометричним орієнтиром, який дає змогу точно відновити положення об'єктивно прихованих через ракурс деталей автомобіля.* ***Наукова новизна*** *полягає у розробці наскрізного методу суміщення параметричних 3D-моделей із монокулярним відеорядом на основі обчислених точок сходження, що переводить процес позиціонування об'єктів із площини суб'єктивного візуального оцінювання «на око» у площину суворої геометрич-*

*ної верифікації. **У висновках** підкреслюється, що застосування запропонованого методу мінімізує вплив людського фактора та встановлює жорсткі технологічні межі дослідження. Метод забезпечує отримання об'єктивної геометричної основи та верифікованих початкових даних, що є необхідним фундаментом для будь-яких подальших експертних розрахунків у галузі судової експертизи. Практична цінність роботи полягає у створенні надійного прикладного інструментарію для судових експертів, що суттєво підвищує доказову силу, об'єктивність та верифікованість експертних висновків під час судового розгляду справ, пов'язаних із дорожньо-транспортними пригодами.*

***Ключові слова:** 3D-моделювання, орієнтований паралелепіпед, точність позиціонування, фотограмметрія, реконструкція ДТП.*

Постановка проблеми. У сучасній практиці судової експертизи відеозаписи з камер спостереження, відеореєстраторів та мобільних пристроїв є одним із найважливіших джерел доказової інформації. Дослідження динаміки розвитку дорожньо-транспортної пригоди, встановлення швидкості руху транспортних засобів, їхнього взаємного розташування та траєкторії безпосередньо залежать від точності просторового позиціонування об'єктів у кожному кадрі відеозапису. Проте на практиці експерти стикаються із серйозною проблемою ракурсних спотворень, коли автомобіль зафіксовано під кутом до оптичної осі камери. Ситуація значно ускладнюється тим, що кузови сучасних автомобілів мають складну ергономічну й аеродинамічну форму із заокругленими краями та плавними обводами. За таких умов візуально визначити на двовимірному кадрі крайню передню або задню габаритні точки, які б точно відповідали перпендикулярам до повздовжньої осі автомобіля, стає об'єктивно неможливим. При цьому спроба фахівців позиціонувати транспортні засоби відносно візуально видимих на зображенні частин може призвести до використання заздалегідь недостовірних початкових даних, що, зі свого боку, тягне за собою отримання хибних результатів та зростання похибок у фінальних розрахунках швидкості, прискорення, дистанції тощо.

Питання калібрування камер і визначення параметрів руху за відеозаписами активно досліджуються в криміналістиці. Традиційні підходи зазвичай спираються на плоскі геометричні трансформації, відстеження окремих маркерів на дорожньому покритті та фіксованих орієнтирів на місцевості. Проте більшість існуючих методик розглядають транспортний засіб як спрощену двовимірну модель (точку або прямокутник на площині дороги), що є доцільним за умови перпендикулярної зйомки або наявності ідеальних ортотрансформованих зображень. Проблема врахування просторової геометрії тривимірного обтічного кузова автомобіля в умовах складних перспективних ракурсів наразі залишається недостатньо розв'язаною в методичних джерелах, що створює передумови для суб'єктивізму й експертних помилок.

Мета статті – розробка й обґрунтування науково-методичного підходу до позиціонування транспортних засобів на кадрах відеозапису за допомогою накладання тривимірних моделей, описаних напівпрозорими орієнтованими паралелепіпедами, для мінімізації суб'єктивізму експерта й усунення похибок, викликаних ергономічною формою сучасних кузовів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями використання засобів комп'ютерного зору та фотограмметрії у реконструкціях дорожньо-транспортних пригод приділяється значна увага у світовій науці. Проводяться розробки алгоритмів оцінювання положення камери й умов зйомки, позиціонування та переміщення транспортних засобів, визначення швидкості їх руху тощо.

Водночас у вітчизняній судово-експертній практиці та методичних розробках досліджень фотозображень і відеозаписів основна увага приділяється аналітичним розрахункам та 2D-трансформаціям зображень без залучення тривимірної геометричної верифікації.

Виклад основного матеріалу. Традиційний аналіз відеозаписів часто базується на спробі відстежити рух певної візуальної константи автомобіля, наприклад передньої фари, колісного диска або номерного знака. Проте, коли автомобіль рухається під кутом до камери, через зміну ракурсу видимі межі цих деталей динамічно зміщуються відносно реального габаритного контуру. Спроба провести уявний перпендикуляр від видимого краю бампера до повздовжньої осі транспортного засобу неминуче вносить похибку,

оскільки через заокруглення кузова реальна крайня точка ховається від об'єктива камери.

У сучасній експертній практиці відсутні жорсткі розмежування компетенцій та можливостей експертів залежно від галузей знань та видів досліджень. А фотознімки та відеоматеріали практично втратили статус об'єктів виключно «вузькоспеціалізованих» криміналістичних досліджень (фототехнічна чи відеозаписів). Орієнтовно понад 70 % усіх видів та підвидів судових експертиз використовують візуальну інформацію, зафіксовану на фотознімках та відеозаписах, як об'єкти дослідження та джерела вихідних даних. Наприклад, за наявними методиками проведення судових експертиз визначення швидкості транспортних засобів за відеозаписами може проводитися окремо експертами з фототехнічної експертизи, автотехнічної експертизи, експертизи відео-, звукозапису тощо, а також комісіями судових експертів у різних комбінаціях галузей знань.

Проблематика ж полягає в тому, що поширені спрощені підходи до позиціонування транспортних засобів у міру їх переміщення. Основний недолік таких традиційних рішень полягає в тому, що вони розглядають зображення як плоску картинку і не враховують тривимірну геометрію об'єкта та перспективні викривлення, які виникають під час зйомки під кутом до оптичної осі камери. Коли автомобіль розташований під кутом, значна частина його кузова фізично залишається поза зоною прямої видимості об'єктива камери, а аеродинамічна ергономічна форма із заокругленими краями створює оптичну ілюзію зміщення його габаритних меж (рис. 1) [1].

Працюючи за спрощеними методиками, фахівці нерідко припускаються фундаментальної помилки: вони вибирають як контрольні точки позиціонування крайні візуально видимі краї передньої або задньої частини кузова на 2D-зображенні. А інший, видимий габарит визначається «на око», залежно від положення елементів автомобіля на зображенні розгорнутого кута автомобіля (рис. 2).

Проте через кутовий ракурс та обтічність бамперів чи крил автомобіля ці видимі контури об'єктивно не відповідають дійсним



Рис. 1. Залежність візуально видимих крайніх орієнтирів автомобіля від ракурсу зйомки



Рис. 2. Відображення орієнтовних візуально видимих країв автомобіля Chery Tiggo 4

крайнім конструктивним габаритам, через які проходить перпендикуляр до поздовжньої осі транспортного засобу. Практичні дослідження на прикладі використаного під час написання статті автомобіля Chery Tiggo 4 показують, що за такого підходу визначений за кадром умовний розмір загальної довжини автомобіля може виявитися на 40–50 сантиметрів меншим за його реальні заводські габарити, оскільки справжній край кузова просто «ховається» в зоні перспективного скорочення.

Використання завідомо викривлених первинних даних має лавиноподібний негативний ефект для всього подальшого дослідження. Оскільки розмірні параметри автомобіля є базовою константою для розрахунку його зміщення у просторі між послідовними кадрами відеозапису, дефіцит навіть у кілька десятків сантиметрів призводить до некоректного визначення положення об'єкта на кожному етапі його переміщення. У підсумку всі подальші математичні розрахунки, зокрема визначення подоланої відстані та швидкості руху, здійснюються на хибній геометричний та оптичній базі [2]. Це призводить до викривлення кінцевих результатів і робить висновки експерта вразливими до обґрунтованого спростування в суді.

Для вирішення цієї проблеми пропонується метод просторового моделювання із використанням орієнтованого габаритного паралелепіпеда. Суть методу полягає в тому, що для досліджуваного автомобіля підбирається або будується його точна тривимірна 3D-модель з урахуванням заводських технічних характеристик конкретної марки та моделі. Ця модель жорстко описується віртуальним напівпрозорим паралелепіпедом, шість площин якого проходять суворо через крайні габаритні точки транспортного засобу, які будуть використані під час дослідження. Цей віртуальний короб виконує роль математично точного обмежувача простору [3].

Формування площин паралелепіпеда здійснюється за таким принципом. Передня площина проходить через крайню точку передньої частини кузова автомобіля (найчастіше це рамка державного номерного знака або решітка радіатора), при цьому повздовжня вісь автомобіля є перпендикулярною до вказаної площини. Задня площина проходить через крайню точку заднього бампера або пластикового кожуха запасного колеса. Нижня площина визначається площиною дорожнього покриття і проходить через точки дотику коліс із землею. Верхня площина обмежується найвищою точкою даху та є паралельною нижній площині. Права та ліва площини проходять через крайні виступаючі бічні точки кузова. При цьому включення до цього габариту бічних дзеркал заднього виду залежить від конкретного завдання. У разі потреби у проведенні повздовжніх розрахунків вони свідомо не враховуються, оскільки є рухомими елементами й не визначають основний конструктивний габарит кузова для розрахунку критичних зближень. Але у випадку визначення бічного інтервалу бічні дзеркала заднього

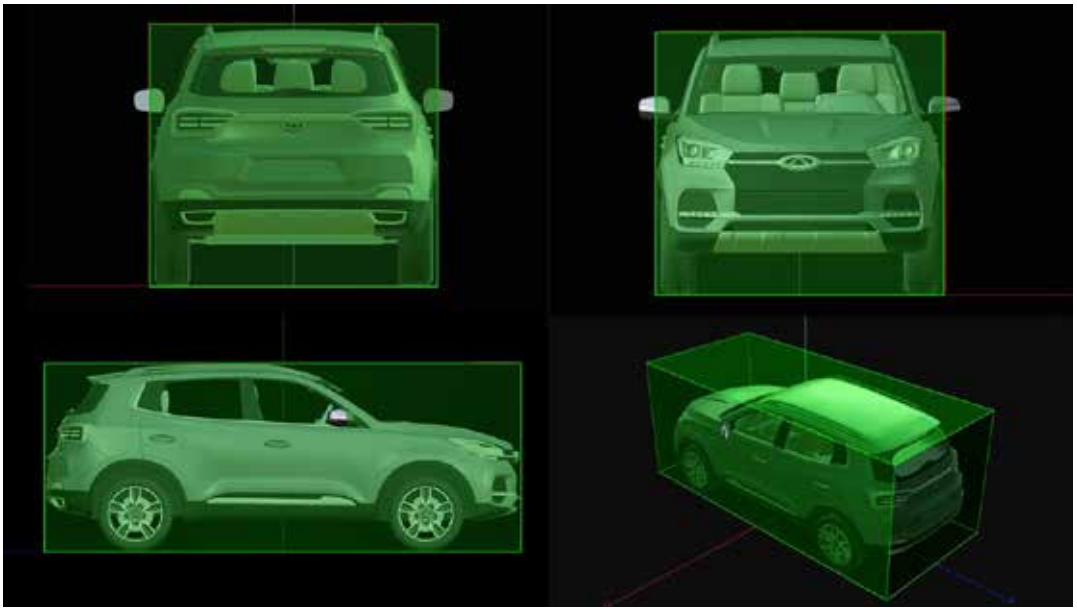


Рис. 3. 3D-модель автомобіля Chery Tiggo 4 описана габаритним паралелепіпедом

виду повинні бути включені всередину побудованої фігури. Створений паралелепіпед налаштовується як напівпрозорий об'єкт із чітко виділеними ребрами та вершинами (рис. 3).

Наступним етапом є синхронізація параметрів камери та віртуального простору. Головна практична мета цього етапу полягає в правильному розташуванні моделі автомобіля відносно об'єктива віртуальної камери, а також у її подальшому налаштуванні. Це необхідно для того, щоб надалі контури реального автомобіля на відеозаписі та контури тривимірної моделі ідеально збіглися. Без такої синхронізації виникають оптичні та перспективні викривлення, які згодом призводять до серйозних похибок у визначенні положення крайніх габаритів кузова.

Для реалізації цього процесу експерт виконує процедуру калібрування віртуальної камери в програмному середовищі. В основі процесу лежить відновлення геометрії простору з використанням так званих точок сходження (vanishing points) паралельних ліній, присутніх на кадрах відеозапису (ліній дорожньої розмітки, бордюр, фасадів будівель тощо). Оскільки через закони перспективи ці лінії на кадрах відеозапису сходяться в умовних точках, їх можна використовувати для точного обчислення просторової орієнтації камери на час зйомки шляхом обчислення її висоти відносно землі, фокусної відстані та кутів її зовнішнього орієнтування: тангаж (кут поздовжнього нахилу вгору / вниз), крен (кут поперечного нахилу кадру вбік) та рискання (кут повороту камери ліворуч / праворуч) [4].

Окремим і обов'язковим кроком є компенсація оптичної дисторсії (викривлення) об'єктива. Сучасні камери спостереження та відеореєстратори часто оснащені ширококутними лінзами, які помітно вигинають зображення ближче до країв кадру. Якщо не усунути цей ефект, прямі лінії перетворяться на дуги, і точно накласти правильну геометричну 3D-модель на викривлене зображення буде неможливо. Виправлення дисторсії повертає кадру його реальні пропорції. Це ліквідує додаткові просторові викривлення та гарантує, що експерт зможе безпомилково зафіксувати координати навіть тих габаритних точок автомобіля, які залишилися поза зоною прямої видимості камери.

Після налаштування віртуальної камери тривимірна модель автомобіля разом із напівпрозорим паралелепіпедом проєктується на двовимірний кадр відеозапису. Експерт, використовуючи шість ступенів вільного переміщення (по осях X, Y, Z та обертання навколо них), здійснює коригування просторового положення моделі, досягаючи ідеального суміщення візуальних контурів автомобіля на відеозаписі з тривимірним каркасом. Напівпрозорість граней паралелепіпеда дає

змогу експерту одночасно бачити і текстуру реального автомобіля на кадрі відеозапису, і чіткі геометричні межі віртуальної 3D-моделі. Модель вважається суміщеною, коли всі видимі елементи автомобіля на відеозаписі (контури частин кузова, вікон, колісних арок, фар, дверних ручок тощо) збігаються з відповідними елементами тривимірної моделі. У цей момент грані напівпрозорого паралелепіпеда автоматично вказують на реальні просторові межі автомобіля, зокрема на ті крайні точки бамперів, які через ракурс зйомки та заокругленість кузова є фізично невидимими для об'єктива камери. Це забезпечує об'єктивне позиціонування автомобіля на площині проїзної частини дороги та унеможливлює суб'єктивний підбір точок експертом (рис. 4) [5].

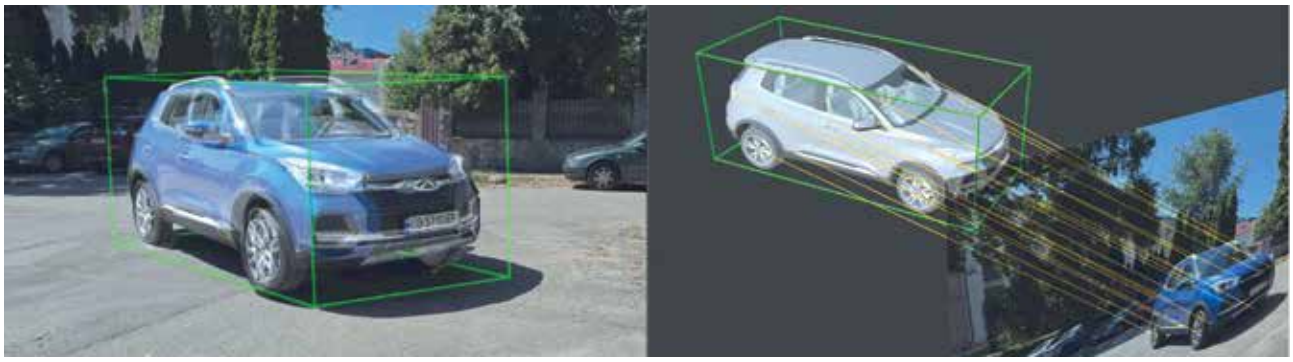


Рис. 4. Проєктування 3D-моделі автомобіля на 2D-зображення



Рис. 5, 6. Відображення реальних габаритних розмірів автомобіля на зображеннях

Запропонований метод побудови орієнтованих габаритних паралелепіпедів радикально вирішує цю проблему шляхом усунення суб'єктивного оцінювання зображення «на око». Оскільки напівпрозорий віртуальний короб описує об'єктивну 3D-модель за її реальними специфікованими габаритами (проходячи через крайні габаритні розміри), його площини виступають суворим геометричним обмежувачем. Навіть якщо крайня точка переднього чи заднього бампера повністю прихована від камери через складний ракурс зйомки, відповідна грань паралелепіпеда чітко проєктує її об'єктивне положення на площину дороги. Це повністю ліквідує вищезгадану похибку позиціонування в 40–50 см, забезпечуючи точність первинних даних і створюючи надійну основу для подальших розрахунків (рис. 5, 6).

Висновки. Запропонований технічний процес застосування тривимірних моделей, описаних напівпрозорими орієнтованими паралелепіпедами, переводить процес позиціонування транспортних засобів на відеозаписах із площини суб'єктивного візуального оцінювання у площину суворої просторової геометрії. Використання віртуального габаритного каркаса дає змогу експерту повністю нівелювати складні ракурсні спотворення та компенсувати «ефект обтічності» сучасних автомобільних кузовів. Цей метод мінімізує людський фактор у позиціонуванні транспортних засобів порівняно з інтуїтивним підбором і «вгадуванням» крайніх точок об'єкта, створює жорсткі технологічні межі для дослідження та забезпечує отримання верифікованих початкових даних, що є необхідним фундаментом для будь-яких подальших експертних розрахунків у галузі судової експертизи.

Список використаної літератури:

1. Choi Y., Kong S.-H. Robust video-based vehicle speed estimation for occluded scenes for forensic analysis of traffic accidents. *Multimedia Tools and Applications*. 2026. Vol. 85. Art. 90. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-026-21222-9.
2. Kocur V., Ftáčnik M. Detection of 3D bounding boxes of vehicles using perspective transformation for accurate speed measurement. arXiv. 2020. Preprint. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.13137.
3. Sochor J., Juránek R., Herout A. Traffic surveillance camera calibration by 3D model bounding box alignment for accurate vehicle speed measurement. *Computer Vision and Image Understanding*. 2017. Vol. 161. P. 87–98. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cviu.2017.05.015.
4. Ospina-Bohórquez A. et al. Comprehensive Forensic Tool for Crime Scene and Traffic Accident 3D Reconstruction. *Algorithms*. 2025. Vol. 18, no. 11. Art. 707. DOI: https://doi.org/10.3390/a18110707.
5. Dubská M., Herout A., Sochor J. Automatic camera calibration for traffic understanding. Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC 2014). BMVA Press, 2014. DOI: https://doi.org/10.5244/C.28.42.

References:

1. Choi, Y., & Kong, S.-H. (2026). Robust video-based vehicle speed estimation for occluded scenes for forensic analysis of traffic accidents. *Multimedia Tools and Applications*, 85, 90. https://doi.org/10.1007/s11042-026-21222-9 [in English].
2. Kocur, V., & Ftáčnik, M. (2020). Detection of 3D bounding boxes of vehicles using perspective transformation for accurate speed measurement. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.13137 [in English].
3. Sochor, J., Juránek, R., & Herout, A. (2017). Traffic surveillance camera calibration by 3D model bounding box alignment for accurate vehicle speed measurement. *Computer Vision and Image Understanding*, 161, 87–98. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2017.05.015 [in English].
4. Ospina-Bohórquez, A., Bedoya-Pantoja, M., Chavarro, J. S., & Gaviria-Ríos, M. A. (2025). Comprehensive Forensic Tool for Crime Scene and Traffic Accident 3D Reconstruction. *Algorithms*, 18(11), 707. https://doi.org/10.3390/a18110707 [in English].
5. Dubská, M., Herout, A., & Sochor, J. (2014). Automatic camera calibration for traffic understanding. In Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC 2014). BMVA Press. https://doi.org/10.5244/C.28.42 [in English].

Andrii Pereidenko, Yaroslav Moroz. Application of segmentation algorithms in terrestrial laser scanning to enhance the accuracy of area calculations of architectural structures

This article addresses the problem of improving the spatial positioning accuracy of vehicles in video frames under challenging perspective angles. The aim of the research is to develop a methodology for

the precise localization of vehicle dimensions, which neutralizes the «streamlining effect» of modern ergonomic car bodies and eliminates systematic errors that occur during the calculation of kinematic motion parameters. The methodological basis of the study comprises general scientific and specialized methods, specifically the principles of projective geometry, computer vision techniques, computational photogrammetry, and the analysis of expert practice.

The research is based on the analysis of video recordings of road traffic accidents where vehicles are captured at an acute angle to the camera's optical axis, making the direct visual identification of their extreme dimensional points impossible. The proposed method relies on a comprehensive combination of 3D modeling tools, the analytical determination of spatial shooting conditions, and the back-projection of a verified 3D model onto the video frame plane. A key element of this approach is constructing a rigid framework around the model in the form of a virtual, semi-transparent oriented bounding box (OBB), whose planes strictly align with the extreme structural boundaries of the vehicle's body. This framework serves as a geometric reference that enables the precise restoration of vehicle parts that are objectively hidden due to the camera angle.

The scientific novelty lies in the development of an end-to-end method for aligning parametric 3D models with monocular video footage based on calculated vanishing points. This shifts the object positioning process from subjective visual estimation to rigorous geometric verification. The conclusions emphasize that applying the proposed method minimizes the human factor and establishes strict technological boundaries for the investigation. The method provides an objective geometric basis and verified initial data, forming an essential foundation for any subsequent expert calculations in forensic investigations.

The practical value of this work lies in creating a reliable applied toolkit for forensic experts, which significantly enhances the evidential weight, objectivity, and verifiability of expert conclusions during legal proceedings related to road traffic accidents.

***Keywords**: 3D modeling, oriented bounding box, positioning accuracy, photogrammetry, traffic accident reconstruction.*

Дата першого надходження статті до видання: 07.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу (CC BY 4.0)