

УДК 004.9

ВИРІВНЮВАННЯ СКАНІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ICP

Аушева Н.М., д-р. техн. наук,
nataauscheva@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0816-2971

Веремійчук І.А., аспірант*,
i.veremiichuk@gmail.com, ORCID: 0009-0009-2279-7659

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ, Україна)

У статті розглядаються проблеми точності 3D-сканування у стоматології, що пов'язані з похибками під час створення тривимірних моделей. Такі неточності зумовлені механічними обмеженнями обладнання та обробкою даних та впливають на якість отриманих моделей, що важливо для застосування в стоматологічній практиці.

Автори пропонують використовувати для створення цілісного 3D об'єкту метод вирівнювання сканів за допомогою алгоритму ітераційного зіставлення найближчої точки (Iterative Closest Point - ICP). Цей алгоритм мінімізує похибки шляхом співставлення координат точок і нормалей поверхні. У роботі також запропоновані модифікації ICP, які включають коригування нормалей і використання матриць обертання, що підвищують точність узгодження підсканів.

Особливу увагу приділено математичному апарату, що лежить в основі покращених алгоритмів, зокрема методам мінімізації відстані між відповідними точками сканів та врахуванню геометричних параметрів поверхонь. Також розглянуто використання вагових коефіцієнтів для зменшення впливу аномальних точок та шуму. Такі інновації забезпечують об'єднання кількох сканів у єдину модель, що дозволяє зменшити шум і неточності. Дослідження демонструють, що якість сканованих точок відіграє ключову роль для ефективності алгоритму.

У статті надано порівняльний аналіз результатів, отриманих за допомогою класичного ICP та вдосконалених варіантів алгоритму, що свідчить про значне зменшення середньоквадратичної похибки.

Покращення точності можливо завдяки збільшенню кількості камер та більш детальному захопленню даних. Експериментальні результати показали, що впровадження описаних методик суттєво покращує якість 3D-моделей. Зазначено, що розроблені методи можуть бути інтегровані в існуючі CAD/CAM системи, що забезпечує ширше їх застосування в стоматологічній практиці. Також підкреслено значення автоматизації процесу вирівнювання, що знижує потребу в ручному втручанні та зменшує ймовірність людської помилки.

Розроблений алгоритм має практичне застосування в цифровій стоматології, особливо у створенні високоточних моделей для

* Науковий керівник – д-р технічних наук, професор Аушева Н.М.

протезування та інших реставраційних процедур. Окрім цього, у статті визначено напрямки подальшого вдосконалення ICP-алгоритмів, що сприятиме покращенню технологій тривимірного сканування у медицині.

Ключові слова: ICP, стоматологія, алгоритми вирівнювання, 3D моделі, сканування.

Постановка проблеми. На теперішній час технологія застосування 3D принтерів у медицині перетворилася на окрему галузь охорони здоров'я, яка динамічно розвивається. Ця технологія активно застосовується і в стоматології. За допомогою стоматологічного сканування вдається створити детальну модель щелеп пацієнтів. Сучасні компанії, які являється лідерами на світовій арені в цифровій стоматології, активно використовують 3D сканування для різних етапів протезування [1]. У процесі 3D-реконструкції важливим є вирівнювання сканів, оскільки воно впливає на точність і якість моделі, яка отримується. Для створення цілісного тривимірного об'єкту з різних ракурсів окремі частини моделі повинні точно збігатися, якщо скани не вирівняти, то алгоритми злиття створюють артефакти і неточності. При зміні положення об'єкта та кута огляду можуть з'явитися деформації, що призводить до корекції перспективних та геометричних спотворень. Саме тому задача створення швидкого та надійного алгоритму вирівнювання, яка дозволить створити модель максимально наближену до оригіналу є актуальною та має практичне застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирівнювання моделей зазвичай використовуються методи Iterative Closest Point (ICP), метод на основі особливих точок або маркерну прив'язку. Розглянемо метод ICP, який може застосовуватися для точного вирівнювання двох або більше наборів тривимірних точок об'єкту. Основне його завдання – знайти жорстке перетворення (обертання та зсув) для того, щоб мінімізувати відстань між відповідними точками у двох наборах даних. Авторами роботи [2] представлено незалежний метод для точної та ефективної реєстрації 3D форм, включаючи різноманітні криві та поверхні вільної форми. Метод обробляє всі шість ступенів свободи та побудований на основі алгоритму ітераційної найближчої точки (ICP). У роботі [3] вивчається проблеми які зв'язані з представленням складних моделей. Знаходячи різноманітні неточності при різних її виглядах. У статті [4] я алгоритм ICP використовується для геометричного вирівнювання тривимірних моделей за наявності початкової оцінки відносного положення. У статті розглядаються різні варіанти ICP, що впливають на всі етапи алгоритму, від вибору та зіставлення точок до стратегії мінімізації. Авторами статті [5] розглядається проблема геометричного вирівнювання двох частково перекриваючись, жорстких, шумних 3D-наборів точок. Представлено новий, природний і простий, варіант популярного алгоритму ICP, який називається Trimmed ICP (TrICP). В роботі [6] розглядається проблема вирівнювання сканів у тривимірних робочих просторах, яка використовується для визначення

зміщення роботів у задачах навігації та картографування. Автори пропонують узагальнення метрики "Metric based Iterative Closest Point" (MbICP) для тривимірного випадку. Основним внеском є розробка математичних інструментів для формулювання ICP з використанням цієї нової метрики, включаючи виведення відстаней "точка-площина". У статті також наведено експериментальні результати для оцінки алгоритмів і комбінацій ICP та MbICP, що демонструють переваги метрики.

У статті [7] розглядається алгоритм вирівнювання у задачах комп'ютерного зору, зокрема в задачах одночасної локалізації та картографування (SLAM). Автори описують теоретичні основи ICP, його застосування в задачах реєстрації поверхонь, а також традиційну класифікацію варіантів ICP. Також проводиться синтез різних типів картографування. Авторами статті [8] розглядається алгоритм, який широко використовується для реєстрації тривимірних точкових хмар, але має недолік — схильність потрапляти в локальні оптимуми, що призводить до неправильних результатів. Автори оцінюють вплив різних факторів, таких як коефіцієнт перекриття, кут, відстань і шум, на ефективність, надійність, точність і швидкість двох варіантів ICP: "точка-точка" і "точка-площина". Авторами роботи [9] було запропоновано гібридний алгоритм для оптимізації локального вирівнювання точкових хмар, отриманих від лазерних сканерів, що використовуються для складних поверхонь. Попередня обробка даних включає статистичну фільтрацію та рівномірне зменшення вибірки. Цей підхід забезпечує підвищення швидкості обробки на 40-50%. Робота [10] розглядає проблеми залежності алгоритму від правильного вибору пар відповідних точок при вирівнюванні тривимірних точкових хмар. Невдалий вибір точок, особливо з маловиразних ділянок, може призводити до повільної збіжності, неправильного вирівнювання або розбіжності, особливо за наявності шуму чи некаліброваних даних. Автори пропонують метод виявлення невизначеності в положенні та стратегію вибору точок, що знижує цю невизначеність шляхом вибору зразків, які обмежують потенційно нестабільні перетворення.

Формулювання цілей статті. Мета — розробка детального алгоритму вирівнювання моделей складної форми на основі методу ICP.

Основна частина. Стандартна і найпоширеніша стратегія сканування у стоматології полягає у створенні кількох лінійних підсканів та їх об'єднання в один скан. Лінійний підскан створюється, якщо вісь обертання та вісь переміщення залишаються нерухомими, а горизонтальна пряма, що рухається з постійною швидкістю паралельно об'єкту сканування, проводить лазерну лінію по об'єкту, створюючи скан об'єкта з одного напрямку огляду. Підскан, який отримано на основі горизонтальної прямої має дуже високу якість. При створенні підскану на основі переміщення та обертання фактичне розташування об'єкта може відрізнятися від оціненого орієнтування та мати похибки. Це, в свою чергу, може призвести до неточностей та шумів у

фінальній 3D моделі об'єкта, тому для усунення цього недоліку необхідно виконати вирівнювання підсканів на отриманих даних.

ICP використовує два набори даних: тривимірні координати точок та нормалі. Значення нормалей точок вважається не досить точним, тому доцільно проводити їх коригування. Для обчислення напрямків нормалей застосовуються два методи: метод головних компонентів (РСА) та тріангуляція на основі найближчих точок. В методі RSA для кожної точки знаходяться сусідні точки на невеликій відстані, обчислюється матриця для всіх сусідніх точок та власні вектори. Власні вектори з найменшим значенням є оцінкою нормалі поверхні. На останньому етапі виконується додаткова перевірка напрямку нормалі (нормаль повинна бути направлена до лазера).

Метод тріангуляції на основі найближчих точок можна використати для лінійних сканів (без обертання осей). В цьому випадку можна застосувати припущення, що сусідні лінійні скани мають послідовні індекси. Після цього можна обчислити нормалі у кожній точці на основі усереднення нормалей трикутних граней.

Розглянемо реалізацію методу алгоритму оптимізації двох підсканів визначеною цільовою функцією:

$$L_{1,2} = \sum_i \left(\bar{n}_i (pt_{1,i} - pt_{2,i}) \right)^2, \quad (1)$$

де i - індекс вказує на окремі, $\bar{n}_i$ - є усередненою нормаллю для цієї пари точок, $pt_{1,i}, pt_{2,i}$ - точки з двох хмар.

На першому етапі кожній точці у першій хмарі точок знаходиться найближча точка у другій хмарі точок. Для кожної пари точок розраховується усереднена нормаль. Розраховується не відстань між точками, а відстань, спроектована на поверхневу нормаль [10].

Для мінімізації відстані між відповідними точками обчислюється жорстке перетворення (матриця обертання та матриця зсуву), тобто вирівнювання підсканів один до одного здійснюється шляхом обертання та переміщення одного підскану до іншого [10]:

$$L_{1,2} = \sum_i \left(\bar{n}_i \cdot (R_1 pt_{1,i} + t_1 - R_2 pt_{2,i} - t_2) \right)^2, \quad (2)$$

де R - матриця обертання, $\bar{n}_i$ - усереднена нормаль для цієї пари точок, $pt_{1,i}, pt_{2,i}$ - точки з двох хмар, $t_n = [t_{n,x}, t_{n,y}, t_{n,z}]^T$ - трансляційний вектор.

Матриця обертання, однак, є нелінійною функцією кутів повороту $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$:

$$\begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & c_\alpha s_\gamma + s_\alpha s_\beta c_\gamma & s_\alpha s_\gamma - c_\alpha s_\beta c_\gamma \\ -c_\beta s_\gamma & c_\alpha c_\gamma - s_\alpha s_\beta s_\gamma & s_\alpha c_\gamma + c_\alpha s_\beta s_\gamma \\ s_\beta & s_\alpha c_\beta & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $c_\alpha = \cos(\alpha)$, $s_\alpha = \sin(\alpha)$, $c_\beta = \cos(\beta)$, $s_\beta = \sin(\beta)$, $c_\gamma = \cos(\gamma)$, $s_\gamma = \sin(\gamma)$.

Щоб розв'язати задачу, лінеаризуємо кути наступним чином: $\sin(x) \cong x \cos(x) \cong 1 \sin^2(x) \cong 0$, $\cos^2(x) \cong 1$.

Завдяки' цим лінеаризаціям матриця обертання тепер стає набагато зручнішою для роботи:

$$R_i = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_i & \beta_i \\ \gamma_i & 1 & -\alpha_i \\ -\beta_i & \alpha_i & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Лінеаризована матриця обертання визнається за схожістю з матричним записом векторного добутку, і тому можемо переписати частину виразу наступним чином:

$$\bar{n}_i R_i \bar{p}_{t_{n,i}} = \bar{p}_{t_{n,i}} \times \bar{n}_i + \bar{n}_i \cdot \bar{p}_{t_{n,i}} = c_{n,i} \cdot \bar{r}_n + \bar{n}_i \cdot \bar{p}_{t_{n,i}}, \quad (5)$$

де $\bar{r}_n = [\alpha_n, \beta_n, \gamma_n]^T$, $c_{n,i} = \bar{p}_{t_{n,i}} \times \bar{n}_i$, i - індекс n - відноситься до індексу підсканування. Функцію витрат можна переписати таким чином:

$$L_{1,2} = \sum_i (k_{1,i} + q_{1,i} + m_1 - k_{2,i} - q_{2,i} - m_2)^2, \quad (6)$$

де $k_{n,i} = c_{n,i} \cdot \bar{r}_n$, $q_{n,i} = \bar{n}_i \cdot \bar{p}_{t_{n,i}}$, $m_n = \bar{n}_i \cdot \bar{t}_n$, $n = 1, 2$.

Взявши часткову похідну кожного з параметрів $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, t_{1,x}, t_{1,z}, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, t_{2,x}, t_{2,y}, t_{2,z}$ дає дванадцять рівнянь. Наведемо приклад для двох параметрів:

$$\frac{\partial L_{1,2}}{\partial r_{n,x}} = (-1)^{n-1} 2 \sum_i c_{n,i,x} (k_1 + q_{1,i} + m_1 - k_2 - q_{2,i} - m_2); \quad (7)$$

$$\frac{\partial L_{1,2}}{\partial t_{n,x}} = (-1)^{n-1} 2 \sum_i n_{i,x} (k_1 + q_{1,i} + m_1 - k_2 - q_{2,i} - m_2) \quad (8)$$

Перейдемо до скороченого запису:

$$V_{n,i} = [c_{n,i}^T, \bar{n}_i^T]^T, X_n = [r_n^T, t_n^T]^T, n = 1, 2. \quad (9)$$

Всі дванадцять рівнянь можна скоротити до двох:

$$\frac{\partial L_{1,2}}{\partial X_1} = 2 \sum_i (V_{1,i} (V_{1,i}^T X_1 - V_{2,i}^T X_2 + \bar{n}_i \cdot (pt_{1,i} - pt_{2,i}))) ,$$

$$\frac{\partial L_{1,2}}{\partial X_2} = -2 \sum_i (V_{2,i} (V_{1,i}^T X_1 - V_{2,i}^T X_2 + \bar{n}_i \cdot (pt_{1,i} - pt_{2,i}))) .$$

Нехай часткові похідні будуть дорівнювати нулю, тоді можемо згорнути даний вираз:

$$\sum_i \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,i} & V_{1,i}^T \end{bmatrix} & -\begin{bmatrix} V_{1,i} & V_{2,i}^T \end{bmatrix} \\ -\begin{bmatrix} V_{2,i} & V_{1,i}^T \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} V_{2,i} & V_{2,i}^T \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \sum_i \begin{bmatrix} V_{1,i} \cdot (pt_{2,i} - pt_{1,i}) \\ V_{2,i} \cdot (pt_{1,i} - pt_{2,i}) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Система (10) є лінійною системою.

Узагальнимо дане отримане рівняння для кількох підсканів: кожний підскан співставляється з кожним наступним. Це дає нам відповідні комбінації $(n(n-1))/2$, де n – кількість підсканувань. Розширення лінійної системи за допомогою нових пар дає наступне матричне рівняння:

$$\sum_i \begin{bmatrix} (n-1) \begin{bmatrix} V_{1,i} & V_{1,i}^T \end{bmatrix} & -\begin{bmatrix} V_{1,i} & V_{2,i}^T \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} V_{1,i} & V_{n,i}^T \end{bmatrix} \\ -\begin{bmatrix} V_{1,i} & V_{2,i}^T \end{bmatrix} & (n-1) \begin{bmatrix} V_{2,i} & V_{2,i}^T \end{bmatrix} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\begin{bmatrix} V_{n,i} & V_{1,i}^T \end{bmatrix} & -\begin{bmatrix} V_{n,i} & V_{2,i}^T \end{bmatrix} & \dots & (n-1) \begin{bmatrix} V_{n,i} & V_{n,i}^T \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ t_1 \\ \vdots \\ r_n \\ t_n \end{bmatrix} = \sum_i \begin{bmatrix} V_{1,i} \cdot \left(\sum_{j=1}^n pt_{j,i} - n \cdot pt_{1,i} \right) \\ \vdots \\ V_{n,i} \cdot \left(\sum_{j=1}^n pt_{j,i} - n \cdot pt_{n,i} \right) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де $V_{n,i}$ – вектор розміром 6×1 для заданої точки у заданому підскані, $\begin{bmatrix} V_{n,i} & V_{n,i}^T \end{bmatrix}$ – добуток двох V -векторів розміром 6×6 , $\sum_i \begin{bmatrix} V_{j,i} & V_{k,i}^T \end{bmatrix}$ – об'єднання точок, які є спільними для підсканів j та k .

В результаті чисельних експериментальних сканувань було доведено, що застосування вирівнювання підсканів збільшує розмір хмарних точок. Було проведено дослідження і виявлено що збільшення залежить від якості відслідковування точок, розширення зменшується при підвищенні якості точок. У найгіршому випадку розширення може перевищувати поріг 50мкм (див.рис. 1). Даний алгоритм чутливий до початкового наближення, тобто якщо початкові точки дуже далекі один від одного, то алгоритм може збігтися в локальний мінімум. Для великих хмар точок працює дуже повільно та має обмеження щодо симетричних об'єктів, тобто може бути хибне вирівнювання.

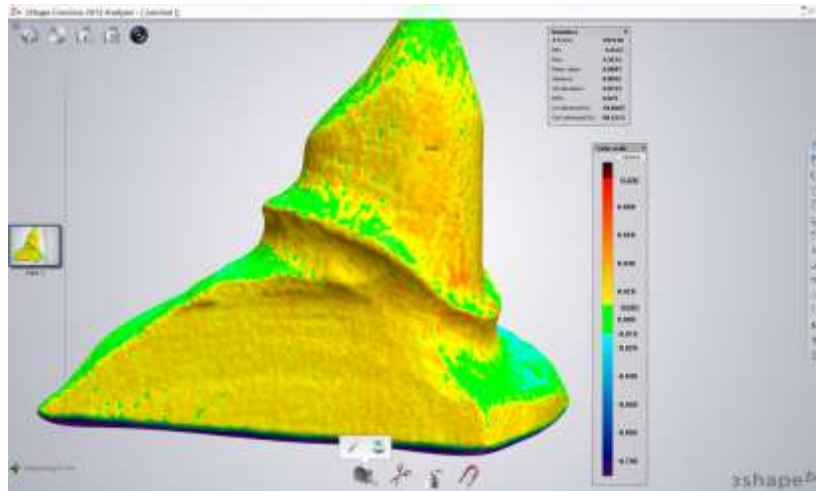


Рис. 1. Вирівнювання об'єкта "золотий штамп"

Висновки. В даній статті було розглянуто алгоритм оптимізації для покращення якості відсканованих даних, а саме вирівнювання шарів сканів на повній поверхні точок. Для вирішення даної задачі використовувався алгоритм ітераційного зіставлення найближчої точки (ICP). ICP використовує два набори даних: тривимірні координати точок та нормалі. В подальшому було проведено чисельні експериментальні дослідження та знайдено деякі неточності, що впливають на скановану модель і розширюють дану хмару точок. В подальшому потрібно розглянути можливість додавання фільтрації для відкидання шумових точок та реалізувати алгоритм для знаходження оптимального вирівнювання без залежності від початкового стану.

Література

1. Logozzo. S., Franceschini. G., Kilpelä. A., et al. A comparative analysis of intraoral 3D digital Scanners for restorative dentistry. *Internet Journal of Medical Technology*. 2011. Vol 5(1). P. 1-18.
2. Besl. P.J., McKay. N.D.. A method for registration of 3-D shapes. *Control Paradigms and Data Structures 4*. 1992. Vol 14(3). P. 239-256. DOI: 10.1117/12.57955.
3. Chen. Y., Medioni. G.. Object modeling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*. 1991. Vol 10(3). P. 145-155. DOI: 10.1016/0262-8856(92)90066.
4. Rusinkiewicz. S., Levoy. M.. Efficient variants of the ICP algorithm. *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001. №1. P. 145-152. DOI: 10.1109/IM.2001.924423.
5. Chetverikov. D., Stepanov. D. Robust Euclidean Alignment of 3D Point Sets. *Image and Vision Computing*. 2002 Vol 23(1). P.299-309. DOI: 10.1016/j.imavis.2004.05.007.
6. Armesto. L., Minguez. J., Montesano. L. A generalization of the metric-based Iterative Closest Point technique for 3D scan matching. *International Conference on Robotics and Automation*. 2010. Vol 24. P. 1367 – 1372. DOI:

- 10.1109/ROBOT.2010.5509371.
7. Hao Bai. (2022). ICP Algorithm: Theory, Practice and Its SLAM-oriented Tax-onomy. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2206.06435>.
 8. Peng Li., Ruisheng Wang., Yanxia Wang., Wuyong Ta. Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration. *IEEE*. 2020. Vol 8. P. 68030 – 68048. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986470.
 9. Yinbao Cheng., Haiman Chu., Yaru Li., et al. A Hybrid Improved SAC-IA with a KD-ICP Algorithm for LocalPoint Cloud Alignment Optimization. *Photonics*. 2024.Vol 11(7). P. 635. DOI: 10.3390/photonics11070635.
 10. Gelfand. N., Ikemoto L., Rusinkiewicz. S., & Levoy. M. Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm. *Fourth International Conference on 3D Digital Imaging and Modelling* (Canada, 6-10 October 2003 y.). 2003. Vol 161. P 260 - 267. DOI: 10.1109/IM.2003.124025.

ICP-BASED SCAN ALIGNMENT

Natalia Ausheva, Ivan Veremiichuk

The article explores the challenges of dental 3D scanning accuracy linked to errors that arise during the creation of three-dimensional models. These inaccuracies result from hardware limitations and constraints in data processing, which directly affect the quality of the final output — an essential factor for dental practice.

To create a solid 3D object, the authors propose a scan alignment method using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm. This approach minimizes errors by aligning point coordinates and surface normals. The paper also introduces modifications to the ICP algorithm, including normalization and application of rotation matrices, which increase the accuracy of subscan matching.

Particular attention is paid to the mathematical framework underlying the improved algorithms, in particular to the methods of minimising the distance between corresponding scan points and accounting for the geometric parameters of surfaces. The use of weighting coefficients to reduce the influence of outlier points and noise is also discussed.

By integrating multiple scans into a single cohesive model, these improvements help reduce noise and discrepancies.

Studies have shown that the quality of the scanned points plays a key role in the algorithm's performance.

The article provides a comparative analysis of the results obtained using the classical ICP and enhanced versions of the algorithm, demonstrating a significant reduction in root mean square error. Increasing the number of cameras and capturing more detailed data significantly enhance accuracy. Experimental results have shown that the proposed techniques lead to substantial improvements in the quality of 3D models.

It is noted that the developed methods can be integrated into existing

CAD/CAM systems, enabling broader application in dental practice. The importance of automating the alignment process is also emphasized, which reduces the need for manual intervention and lowers the risk of human error.

The proposed algorithm is of practical use in digital dentistry, particularly in the design of high-precision prosthetic models and other restorative procedures. Furthermore, the article identifies opportunities for further enhancements to the ICP algorithm, which will contribute to advancements in three-dimensional scanning technology in healthcare.

Key words: ICP, dentistry, alignment algorithms, 3D models, scans

References

1. Logozzo. S., Franceschini. G., Kilpelä. A., et al. (2011). A comparative analysis of intraoral 3D digital Scanners for restorative dentistry. *Internet Journal of Medical Technology* . Vol 5(1). P. 1-18.[in English]
2. Besl. P.J., McKay. N.D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *Control Paradigms and Data Structures*. DOI: 10.1117/12.57955. Vol 14(3). P. 239-256. [in English].
3. Chen. Y., Medioni. G. (1991). Object modeling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*. DOI: 10.1016/0262-8856(92)90066-C. Vol 10(3). P. 145-155. [in English]
4. Rusinkiewicz. S., Levoy. M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling* . DOI: 10.1109/IM.2001.924423. №1.P. 145-152. [in English]
5. Chetverikov. D., Stepanov. D. (2002). Robust Euclidean Alignment of 3D Point Sets. *Image and Vision Computing*. DOI: 10.1016/j.imavis.2004.05.007. Vol 23(1). P.299-309. [in English]
6. Armesto. L., Minguez. J., Montesano. L. (2010). A generalization of the metric-based Iterative Closest Point technique for 3D scan matching. *International Conference on Robotics and*. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509371. Vol 24. P. 1367 – 1372. [in English].
7. Hao Bai. (2022). ICP Algorithm: Theory, Practice and Its SLAM-oriented Tax-onomy. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2206.06435> [in English].
8. Peng Li., Ruisheng Wang., Yanxia Wang., Wuyong Ta. (2020). Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration. *IEEE*. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986470. Vol 8. P. 68030 – 68048. [in English].
9. Yinbao Cheng., Haiman Chu., Yaru Li., et al. (2024). A Hybrid Improved SAC-IA with a KD-ICP Algorithm for LocalPoint Cloud Alignment Optimization. *Photonics*. DOI: 10.3390/photonics11070635. Vol 11(7). P. 635. [in English].
10. Gelfand. N., Ikemoto L., Rusinkiewicz. S., & Levoy. M. (2003). Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm. *Fourth International Conference on 3D Digital Imaging and Modelling (Canada, 6-10 October 2003 y.)*. DOI: 10.1109/IM.2003.1240258. Vol 161. P 260 - 267. [in English].