УДК 004.056.2

О. В. Салієва
К. Р. Салієва

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ПРОСТОРОВОГО МЕТОДУ ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКУ В НАБОРІ ДАНИХ ХМАРНИХ ТОЧОК НА ОСНОВІ КРИВИЗНИ ВЕРШИН

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто проблему вразливості алгоритму вбудовування цифрового водяного знаку в наборі даних хмарних точок на основі кривизни вершин та запропоновано засоби вирішення даної вразливості задля запобігання видозміни чи видалення цифрового водяного знаку, що може бути спричиненою атакою шуму.

Ключові слова: цифровий водяний знак, атака шумового впливу, моделі хмарних точок, кривизна вешин, тріангуляція Делоне, алгебраїчна операторна форма (ASO), нормалізація Пратта, матриця Гесса.

Annotation

The paper considers the problem of vulnerability of the algorithm for embedding a digital watermark in a cloud point dataset based on the curvature of vertices and proposes means to address this vulnerability to prevent modification or removal of the digital watermark that may be caused by a noise attack.

Keywords: digital watermark, noise attack, cloud point models, curvature of vectors, Delaunay triangulation, algebraic operator form (ASO), Pratt normalization, Hessian matrix.

Вступ

За останнє десятиліття методи цифрового водяного маркування та стеганографії набули популярності як ефективні альтернативи для захисту цифрових медіа від втручання, спотворення та підробки. Зокрема, у сфері захисту авторських прав стеганографія надає змогу вбудовувати тонкі, непомітні позначки в цифровий контент. Використання цифрового водяного знаку (ЦВЗ) набуло популярності як ефективний метод захисту прав інтелектуальної власності та запобігання несанкціонованому використанню цифрового контенту [1-2].

Алгоритм водяних знаків для моделей хмари точок на основі кривизни вершин був розроблений Цзін Лю , Яцзе Ян, Дулі Ма, Венцзюань та Хеі Інхуей Ван [3]. Він є вдосконаленою версією їх попереднього алгоритму, що використовується для приховування водяних знаків у 3D моделях. Алгоритм використовує просту систему пошуку вершин, що лежать у вибоїстих областях, для подальшого приховування у цих вершинах інформації. Для цього використовується значення RMSC локального набору [4].

Основна проблема даного алгоритму полягає у використанні тріангуляції Делоне, яка не завжди може дати потрібну полігональну модель. Даний алгоритм може бути дуже чутливим до викидів або невірно визначених точок. Одна аномальна точка може значно вплинути на структуру триангуляції. В окремих випадках трикутники, утворені тріангуляцією Делоне, можуть мати великі кути, що може впливати на якість аналізу даних, а в деяких ситуаціях, особливо при розташуванні точок на колі або прямій, може виникнути вироджена ситуація, коли точки лежать на одному колі, і трикутники отримуються занадто великими та вузькими [3]. Це дуже впливає на загальну якість роботи алгоритму. Також на триангуляцію надзвичайно впливають атаки шумом. Шум може призвести до неправильного розміщення трикутників та погіршити якість тріангуляції, зокрема в областях, де шум значний. Введення шуму у вигляді викидів або видалення деяких точок може призвести до зміни геометрії хмари точок та спричинити аномальні трикутники у результуючій тріангуляції, а додавання шуму може призвести до зміщення кутів трикутників. Це може призвести до того, що трикутники стають менш регулярними та можуть виникнути ситуації, коли кути стають надто гострими або розпливаються.

Метою даної роботи є вдосконалення алгоритму просторового методу вбудовування ЦВЗ в наборі даних хмарних точок на основі кривизни вершин.

Результати дослідження

Для підвищення стійкості алгоритму вбудовування ЦВЗ від атак шумом, пропонується змінити перший етап алгоритму, а саме знаходження вершин-кандидатів. При цьому необхідно використати алгебраїчну регресію сфери з оцінювання алгебраїчного оператора форми (ASO) [5]. Регресія алгебраїчної сфери не призводить до неоднозначної геометричної конфігурації (наприклад, поблизу поверхонь подвійних листів), зазвичай вимагає менших обчислювальних ресурсів і, залишається точною для оцінки головних кривин. Алгебраїчну сферу представлено як 0-ізоповерхню наступної функції скалярного поля (1):

$$f(x) := u_c + u_l^T + u_q x^t x \tag{1}$$

де $u_c \in R$, $u_l \in R^3$ та $u_q \in R$, відповідно постійний, лінійний та квадратичний коефіцієнти сфери. Прив'язка алгебраїчної сфери до N орієнтованих точок $\{\mathrm{p}_{i,n}\}i = 1 \ldots N$ приводить до розв'язку у замкненій формі (2)-(4):

$$u_q(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{2}\frac{\sum_i w_i \boldsymbol{p}_i \cdot \boldsymbol{n}_i - \sum_i w_i \boldsymbol{p}_i \cdot \sum_i w_i \boldsymbol{n}_i}{\sum_i w_i \boldsymbol{p}_i \cdot \boldsymbol{p}_i - \sum_i w_i \boldsymbol{p}_i \cdot \sum_i w_i \boldsymbol{p}_i}, \tag{2}$$

$$u_l(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{\sum_i w_i}\left(\sum_i w_i n_i - 2\, u_q(x) \sum_i w_i p_i\right), \tag{3}$$

$$u_c(x) = -\frac{1}{\sum_i w_i}\left(u_l(x) \cdot \sum_i w_i p_i + u_q(x) \sum_i w_i p_i \cdot p_i\right). \tag{4}$$

де $w_i = w_r(p_i - x)$ – вагова функція розміру опори $r \in R^+$, визначена формулою 5:

$$w_r(x) := K\left(\frac{\|x\|}{r}\right) \tag{5}$$

Ядро гладкого спадання, як правило, визначається поліномом (6):

$$K(\boldsymbol{x}) = (\boldsymbol{x}^2 - 1)^2 \tag{6}$$

Заданий набір параметрів u_c, u_l та u_q характеризує нескінченну множину локальних гіперсфер, оскільки існує нескінченна кількість скалярних полів (на основі скалярних кратних $[u_c,\ u_l,\ u_q]$), які відповідають тим самим коефіцієнтам підбору. Для вирішення цієї проблеми використовується нормалізація Пратта, яка дозволяє обмежити скалярне поле одиничним вектором градієнта на 0-ізоповерхні (7):

$$\hat{u}_c = \frac{u_c}{p(x)}, \quad \hat{u}_l = \frac{\boldsymbol{u}_l}{p(\boldsymbol{x})}, \quad \hat{u}_q = \frac{u_q}{p(\boldsymbol{x})}. \tag{7}$$

де $p := \sqrt{\|u_l\|^2 - 4u_c u_q}$ – норма Пратта. З цих нормованих параметрів, обчислених без втрати загальності на початку R^3, можна отримати дві різні оцінки: середню кривизну $\widetilde{H}$ та виправлений нормальний вектор $\tilde{n}$, які відповідно визначаються як (8)-(9):

$$\widetilde{H} := 2\hat{u}_q, \tag{8}$$

$$\tilde{n} \coloneqq \frac{\hat{\boldsymbol{u}}_l}{\|\hat{\boldsymbol{u}}_l\|}. \tag{9}$$

де $\widetilde{H}$ відповідає оберненому радіусу гіперсфери, а $\tilde{n}$ – нормованому градієнту.

Після розгляду регресії алгебраїчної сфери розглянемо нову оцінку для оператора форми ASO.

Метою є обчислення оператора форми скалярної функції поля f з рівняння (1):

$$W \coloneqq P \frac{\nabla^2 f}{\|\nabla f\|} P \tag{10}$$

де P – матриця перенесення 3 на 2 з двовимірної дотичної площини у тривимірний простір. Нагадаємо, що для будь-якого одиничного напрямку $\boldsymbol{v} = [u \ \ v]^T$, визначеного на дотичній площині, застосування оператора форми як $v^T \mathrm{W} \mathrm{v}$ дає нормальну кривизну поверхні в цьому напрямку.

Використовується лише рівняння (1), а отже, розгляд u_c, u_l та u_q як констант, призводить до симетричного оператора форми, з якого не можна точно обчислити головні кривини. Замість цього пропонується покладатися на згладжуюче ядро рівняння (5), яке використовується в зваженій алгебраїчній сферичній регресії за методом найменших квадратів, щоб диференціювати підібране скалярне поле алгебраїчних поверхонь множин точок (APSS). Дійсно, параметри сфери, наведені в рівняннях (2)-(4), фактично залежать від x через вагове ядро, яке можна диференціювати двічі.

З припасованої алгебраїчної сфери отримуємо наступний градієнт(11):

$$\nabla f(\boldsymbol{x}) = \nabla u_c + u_l + \nabla u_l^T x + 2u_q x + \nabla u_q x^T x \quad (11)$$

та матрицю Гесса (12):

$$\nabla^2 f(\boldsymbol{x}) = \nabla^2 u_c + \nabla u_l + \nabla u_l^T + \nabla^2 u_l x + +2\nabla u_q x^T + x^T x \nabla^2 u_q + 2u_q I_3 + 2x\nabla u_q^T, \quad (12)$$

які у поєднанні з рівнянням (10) визначають ASO. Зауважимо, що кожен вираз у рівняннях (11) і (12) залежить від x, який для наочності опущено. Оскільки $u_l = \left[u_{lx}\ u_{ly}\ u_{lz}\right]^T$ є тривимірним вектором, член $\nabla^2\ u_{lx}$ у рівнянні (12) є добутком тензора 3-го рангу $\nabla^2\ u_l$ на 3-вимірний вектор $x = [x\ y\ z]^T$, що дає (13):

$$\nabla^2 u_l x = x\nabla^2 u_{lx} + y\nabla^2 u_{ly} + z\nabla^2 u_{lz} \quad (13)$$

Позначивши λ_1 і λ_2 двома власними значеннями, а e_1 і e_2 – двома власними векторами оператора форми W, отримаємо такі оцінки для нормального вектора, середньої, гауссової та головної кривини, а також головних напрямків у точки алгебраїчної сфери APSS (14)-(18):

$$\tilde{n}_w \coloneqq \frac{\nabla f(\boldsymbol{x})}{\|\nabla f(\boldsymbol{x})\|}, \quad (14)$$

$$\widetilde{H}_w \coloneqq \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \quad (15)$$

$$\widetilde{K}_w \coloneqq \lambda_1 \lambda_2, \quad (16)$$

$$\tilde{k}_1 \coloneqq \lambda_1, \qquad \tilde{k}_2 \coloneqq \lambda_2, \quad (17)$$

$$d_1 \coloneqq e_1, \qquad d_2 \coloneqq e_2. \quad (18)$$

Аналітичні рівняння (11) і (12) можуть бути реалізовані в одному і тому ж унікальному циклі над сусідніми точками і без значної додаткової пам'яті. Це призводить до ефективного алгебраїчного оператора форми (ASO), що призводить до основної кривизни.

Таким чином даний алгоритм дозволяє отримати форми кривизни, які буду використовуватися для вбудовування водяного знаку. Також даний алгоритм є дуже стійким до шумових атак.

Висновки

У даній доповіді було розглянуто алгоритм вбудовування ЦВЗ в хмарні точки. Розглянуто недоліки даного алгоритму, а саме використання тріангуляції Делоне, яка не завжди може дати потрібну полігональну модель. Таким чином оригінальний алгоритм не є стійким до атак шумом. Даний недолік було усунено шляхом заміни етапу визначення локальної множини, яка описує геометричну особливість околиці кожної вершини на використання алгебраїчного оператора форми, для пошуку відповідних вершин кандидатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Milad T. A., Qianmu L. A Comparative Analysis of Information Hiding Techniques for Copyright Protection of Text Documents. Hindawi. 2018.
2. The Challenges and Limitations of Digital Watermarking: What to Consider. TS2: веб-сайт. URL: https://ts2.space/en/the-challenges-and-limitations-of-digital-watermarking-what-to-consider/#gsc.tab=0.
3. Jing L., Yajie Y., Yinghui W. A novel watermarking algorithm for three-dimensional point-cloud models based on vertex curvature. Sage Journals. 2019.
4. Huang Z., Changshuo W., Shengwei T. Deep learning-based 3D point cloud classification: A systematic survey and outlook. Displays. 2023. Vol. 79.
5. Lejemble T. Stable and efficient differential estimators on oriented point clouds. David Coeurjolly. URL: https://perso.liris.cnrs.fr/david.coeurjolly/publication/lejemble-sgp-2021/.

Салієва Ольга Володимирівна – доктор філософії (PhD) за спеціальністю 125 «Кібербезпека», доцент кафедри менеджменту та безпеки інформаційних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: salieva8257@gmail.com

Салієва Катерина Рустамівна – студентка групи 2КІТС-22м, факультет менеджменту інформаційної безпеки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kate228778@gmail.com

Saliieva Olha V. – Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 125 "Cyber Security", Associate Professor of the Department of Information Systems Management and Security, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: salieva8257@gmail.com

Salieva Kateryna R. – student of the 2KITS-22m group, Faculty of Management Information Security, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, email: kate228778@gmail.com