

М. В. Войченко¹, В. Я. Татарин¹

Національний університет "Львівська політехніка",
¹кафедра комп'ютеризованих систем автоматичної

ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ГАРМОНІЧНОГО ПОЛЯ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗУ ЗУБІВ У ЩЕЛЕСІ

<https://doi.org/10.23939/amm2020.01.093>

© Войченко М. В., Татарин В. Я., 2020

Важливою попередньою процедурою в автоматизованій ортодонції є точне сегментування зубів із 3Д моделі щелепи, що повинна включати якомога менше ручних операцій. Мотивована ультрасучасними загальними методами сегментації сіток, які прийняли теорію гармонічного поля для виявлення сегментів, у цій статті досліджується нова, спрямована на стоматологію структура сегментації зубних сіток. Завдяки спеціально розробленій схемі зважування та стратегії апіорних знань для керування гармонічних обмежень, цей метод може ефективно визначати межі зубів.

Ключові слова: 3Д модель щелепи, сегментація зубних сіток.

An important preliminary procedure in automated orthodontics is the precise segmentation of the teeth from the 3D model of the jaw, which should include as few manual operations as possible. Motivated by ultramodern general methods of mesh segmentation, which have adopted the theory of harmonic field to identify segments, this article investigates a new, aimed at dentistry structure of dental mesh segmentation. Thanks to a specially designed weighing scheme and a priori knowledge strategy for managing harmonic constraints, this method can effectively determine the boundaries of the teeth.

Key words: 3D model of the jaw, segmentation of dental meshes.

Вступ

В останні роки багато зусиль було витрачено на розробку комп'ютеризованих систем для клінічного та дослідницького застосування їх в стоматології. Більшість алгоритмів ортодонтичної діагностики та лікування потребують 3D-моделей зубних сіток, які часто потрібні для видалення, переміщення та перестановки зубів, для імітації результатів лікування. Таким чином, сегментація зубів є важливим кроком у багатьох автоматизованих та напівавтоматизованих комп'ютерних стоматологічних програмах.

Однак сегментація зубів на сітках щелепи залишається складним завданням [1]. Зубні сітки складних розміщень зубів важко сегментувати в силу того, що проміжки між ними нерегулярні. Різні форми зубів ускладнюють окреслення контурів зубів. Артефакти, спричинені помилками сканування або моделювання на клінічних сітках, роблять сегментацію зубів більш складною.

Аналіз літературних джерел

Ручне визначення контурів зубів є дуже трудомісткою задачею. Якщо спроектувати на 2Д поверхню контур розрізаного зуба з яснами, то можна наглядно і просто зрозуміти трудомісткість ручних операцій (Рис. 1). З рисунку видно що у кожного такого перерізу зуба є по дві точки які розділяють ясна і зуб. Але реальні 3Д моделі зубів неможливо представити в 2Д і точок контуру може бути в сотні разів більше.

Загальні підходи до сегментації сіток прямо не підходять для сегментування зубних сіток, оскільки їм не вистачає валідності для обробки складних форм зубів та їх розташування. Інші підходи до сегментації, запропоновані для роботи із зубними сітками, також мають недоліки, такі як трудомісткі або недостатньо точні [2]. Незважаючи на те, що доступні кілька комерційних продуктів у цій галузі, наприклад, “3Shape” [3], їх взаємодія з користувачами інтенсивна і суттєво впливає на точність результатів.

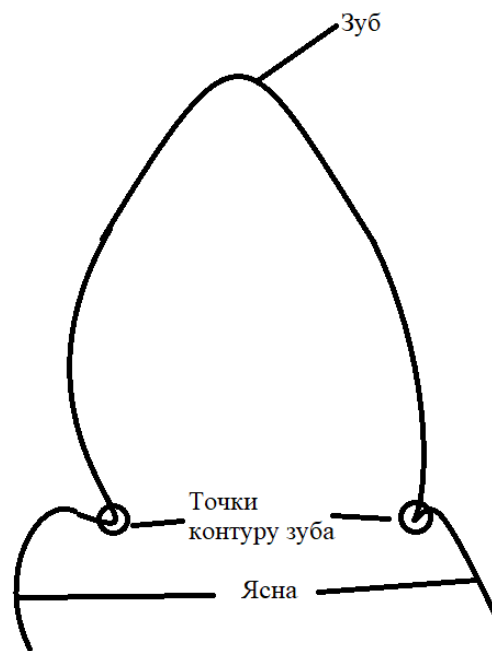


Рис. 1. Контур розрізаного зуба з яснами на 2Д поверхні

Багато методів сегментації зубів використовують кривизну поверхні при ідентифікації потенційних меж зуба, оскільки вони дотримуються найбільш широко цитованого критерію сегментації сітки - правила мінімумів, яке стверджує, що сприйняття людиною зазвичай ділить поверхню на частини вздовж увігнутої розриву дотичної площини [4, 5]. Однак оцінка кривизни поверхні є зазвичай складною і нестабільною.

У комп'ютерній графіці запропоновано численні підходи до сегментації сіток. Деякі з цих алгоритмів автоматизовані, наприклад, кластеризація [6], випадкова прогулянка [7], функція діаметра форми [8], підгонка примітивів [9] та швидкий маршовий вододіл [10]. Більшість із цих методів спрямовані на розподіл різних областей на основі ознак схожості [11], але визначення семантичного підрайону зубів різної форми залишається складним завданням, і жоден із цих методів безпосередньо не підходить для цього конкретного застосування.

Після аналізу алгоритмів був обраний алгоритм автоматичного розпізнавання зубів на 3Д моделі щелепи з допомогою гармонічного поля [12], через його швидкодію, точність та через те що він є повністю автоматичним і не потребує впливу користувача.

Мета роботи

Мета роботи – дослідження можливості автоматичного сementування зубів із 3Д образу щелепи з допомогою гармонічного поля, використовуючи апріорно визначені зважувальні коефіцієнти.

Виклад основного матеріалу

Реалізація алгоритму автоматичного розпізнавання зубів

Реалізація алгоритму пов'язана з наступними проблемами. Такими, як визначення крайових точок моделі, обрахування значень матриць та рішення матричного рівняння з розмірністю матриці в сотні тисяч елементів. Для спрощення розробки програми і вирішення цих проблем був проведений детальний аналіз алгоритму і на основі цього пропонуємо створену нами блок-схему алгоритму програми (рис. 2).

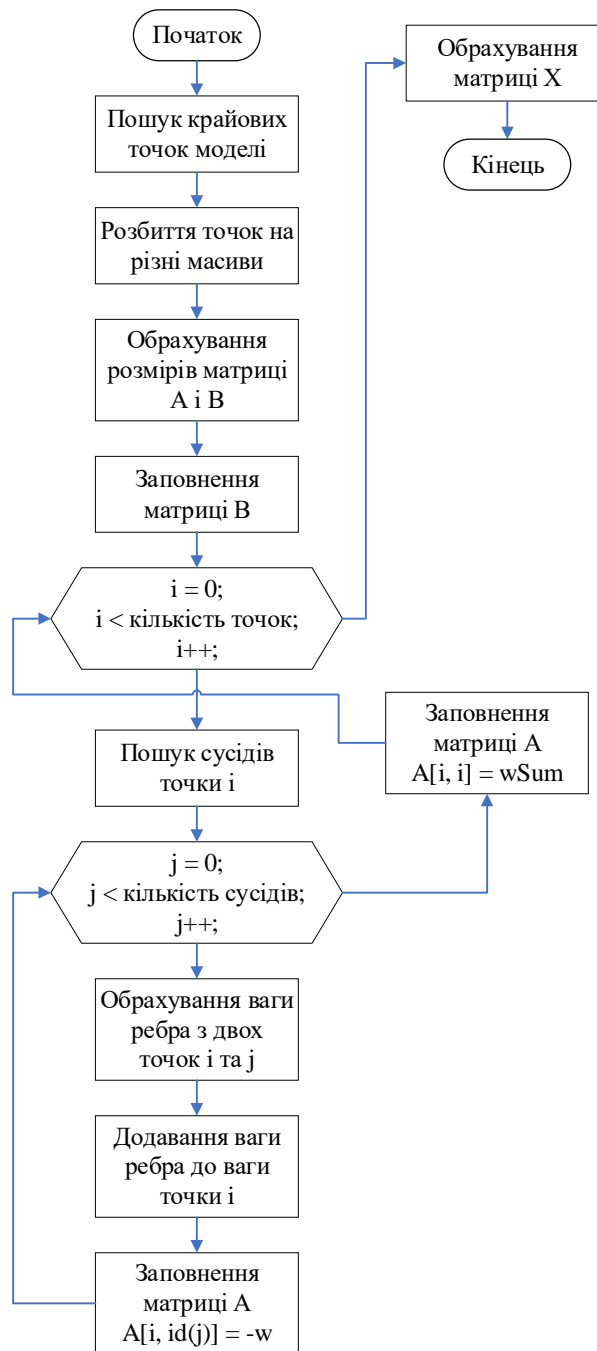


Рис.2. Блок-схема алгоритму для реалізації програмного коду

У запропонованій реалізації даного алгоритму потрібно почати з визначення крайових точок моделі. Для рішення цієї проблеми можна реалізувати алгоритм автоматичного обрізання сітки з допомогою площини [1]. Після визначення площини розрізу можна спростити алгоритм тим, що не різати сітку, а просто точки, у яких відстань до площини менше 0,1 мм, обрати як крайові. І для точності результату потрібно додати до крайових точок додати точки, які лежать на краю сітки. Для визначення цих точок можна використовувати бібліотеку VTK (Visualization Toolkit – інструменти візуалізації) [13] в якій є клас для пошуку крайових точок.

Наступним етапом буде розбиття точок на різні масиви. Потрібно знайти унікальні точки на сітці з допомогою алгоритму водяної краплі [14], після цього їх потрібно розбити на два різні масиви, щоб сусідні зуби розпізнавалися як окремі. Це для того, щоб можна було після визначення гармонічного поля розділити кожен образ зуба, а не відокремлювати їх по одному з цілого образу усіх зубів.

Після цього йде простий етап в обрахуванні розмірів матриць А та В, про які вказувалося в алгоритмі гармонічних полів [12]. Матриця А має містити кількість стовпців рівною кількості точок сітки, кількість рядків матриці А та В співпадають і рівні кількості точок сітки плюс кількість унікальних точок і крайових точок.

Коли розміри матриці В визначені, потрібно заповнити її. Спочатку потрібно пройти по кількості точок сітки і заповнити матрицю В нулями, після цього йдемо по кількості крайових точок і заповнюємо матрицю значеннями 0,5. Далі пробігаємо по всім унікальним точкам і заповнюємо їх нулями або одиницями в залежності від парності зуба.

Наступний етап є самим громіздким і складним – потрібно заповнити матрицю А. Потрібно обійти всі точки сітки і на кожній ітерації визначати сусідів цієї точки. Далі обходимо всі сусідні точки і при кожній ітерації потрібно обрахувати вагу ребра, для цього потрібно визначити котангенси протилежних кутів ребра [12]. Обраховану вагу потрібно додати до ваги точки і від'ємне значення записати в матрицю А. Після того, як всі сусідні точки оброблені, потрібну вагу точки записати в матрицю А.

Наступним і останнім етапом буде обрахування матриці Х. Математичне рівняння дуже просте $A \cdot X = B$. Але матриця А має дуже велику розмірність через те, що залежить від кількості точок сітки, а їх там може бути сотні тисяч, що і робить обрахунок матриці Х дуже складною задачею і забирає багато часу. Для спрощення обрахунку можна використовувати бібліотеку Eigen (розроблена для вирішення складних математичних задач) [15], яка дуже швидка в обрахунку матриць і матриця автоматично заповнюється нулями, якщо елемент не був явно вказаний, що пришвидшує її заповнення. В бібліотеці є клас для рішення матричного рівняння оснований на методі Холеського [16, 17], який при великих розмірах матриць витрачає на їх рішення менше процесорних операцій.

Результати дослідження

На Рис.3 зображено стоматологічну модель, на якій зображено зуби з серйозними проблемами скупчення та відсутніми зубами [18]. Для моделі на Рис.3 представлено два зображення для ілюстрації результатів роботи програми, а саме: ліворуч - вхідна оригінальна сітка, праворуч - сегментовані ясна (темніші) та окремі зуби (світліші) як вихідні дані. На правій ілюстрації можна побачити пунктирну лінію яка демонструє краї зубів, які були визначені алгоритмом.

Як видно на Рис. 3 на правому зображенні є пронумеровані зуби, на їх прикладі можна побачити правильність роботи алгоритму і програми. А саме, зуб під номером один є моляр, форма якого складна для розпізнавання образів, через те, що в таких зубів є чотири виступаючі частини по краях зуба і впадина по центру. Якщо не використовувати зважувальні коефіцієнти, то зуб розпізнається неправильно тому, що його центральна частина буде розпізнана, як частина ясен через її ввігнутість. А з допомогою зважувальних коефіцієнтів центральна частина зуба розпізнається як незначний перепад висоти, тому ця частина буде належати образу зуба.

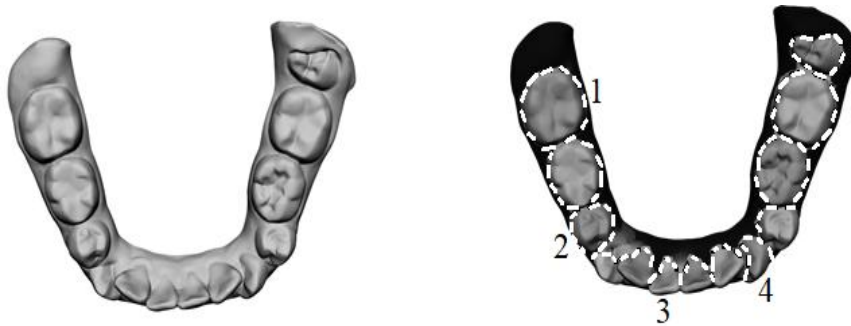


Рис.3: Результати сегментації підходу до різних зубних сіток з проблемами скупчення.

Наступний зуб премоляр під номером два також є складним в розпізнаванні через те, що його найвища частина має великий перепад порівняно з заглибленням у зубі, яке знаходиться по краях зуба. Більшість алгоритмів не розпізнали б його бокову частину, через те, що краї зуба мають заглиблення, як і біля ясен. Алгоритм автоматичного розпізнавання зубів на 3Д моделі щелепи з допомогою гармонічного поля завдяки використанню зважувальних коефіцієнтів знижує значущість цих частин зуба і алгоритм розпізнає бокову частину зуба правильно.

Третій зуб це різець, такі образи зубів складні через їх скупчення. Алгоритми розпізнавання образів зубів часто об'єднують два сусідні зуби в один образ через малу відстань між ними і недостатню точність сканерів, що зменшують розмір впадини між зубами. Представлений в цій статті алгоритм може розпізнати образ зуба не зачепивши при цьому сусідні через те, що обрахування матричного рівняння відбувається лише одноразово.

Ікла представлені під номером чотири є простими в розпізнаванні, але не для всіх алгоритмів тому, що вони мають конусоподібну форму і мають нечіткий перехід між яснами. Алгоритм автоматичного розпізнавання зубів на 3Д моделі щелепи з допомогою гармонічного поля дозволяє валідно розпізнати межі образу зуба не виходячи на ясна.

Висновки

У даній роботі була досліджена проблема автоматичного сегментування зубів у моделях щелепи. Використання алгоритму автоматичного розпізнавання зубів на 3Д моделі щелепи з допомогою гармонічного поля дозволяє вирішити цю проблему. Проте для практичного застосування цього алгоритму слід застосовувати зважувальні коефіцієнти, які пропонуються в даній роботі. Для перевірки продуктивності цих зважувальних коефіцієнтів була розроблена програма, за допомогою якої можна розпізнавати образи зубів із 3Д моделі щелепи. Тестова перевірка даної програми показала, що алгоритм, покладений в її основу є валідним.

Тобто, алгоритм автоматичного розпізнавання зубів на 3Д моделі щелепи з допомогою гармонічного поля дозволяє надійно розпізнавати різноманітні форми зубів, зі складним неправильним прикусом та проблемами скупчення та може гарантувати видалення закритих меж зуба із зубної сітки, на відміну від методів, що базуються на кривизні, що потребують у більшості випадків складних взаємодій із користувачем.

Таким чином, використання алгоритму автоматичного розпізнавання зубів на 3Д моделі щелепи з допомогою гармонічного поля із застосуванням запропонованих зважувальних коефіцієнтів дозволяє провести автоматичну сегментацію зубів і може бути рекомендованим для подальшого застосування.

Список літератури

I. K. Wu, L. Chen, J. Li, and Y. Zhou, "Tooth segmentation on dental meshes using morphologic skeleton," *Computers and Graphics*, vol. 38, no. 1, pp. 199–211, 2014.

2. L. Fan, L. Liu, and K. Liu, "Paintmeshcutting," *ComputerGraphicsForum*, vol. 30, no. 2, pp. 603–611,
3. Rahul Venkatram (2000), "3shape", available at: <https://www.3shape.com/> (accessed 1 October 2020).
4. Y. Lee, S. Lee, A. Shamir, D. Cohen-Or, and H.-P. Seidel, "Meshs cissoring with minima rule and part salience," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 22, no. 5, pp. 444–465, 2005.
5. Z. Ji, L. Liu, and Z. Chen, "Easy mesh cutting," in *Computer Graphics Forum*, vol. 25, pp. 283–291, Blackwell, London, UK, 2006.
6. S. Katz and A. Tal, "Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 3, pp. 954–961, 2003.
7. Y.-K. Lai, S.-M. Hu, R. R. Martin, and P. L. Rosin, "Rapid and effective segmentation of 3D models using random walks," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 26, no. 6, pp. 665–679, 2009.
8. L. Shapira, A. Shamir, and D. Cohen-Or, "Consistent mesh partitioning and skeletonisation using the shape diameter function," *Visual Computer*, vol. 24, no. 4, pp. 249–259, 2008.
9. M. Attene, B. Falcidieno, and M. Spagnuolo, "Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives," *Visual Computer*, vol. 22, no. 3, pp. 181–193, 2006.
10. A. F. Koschan, "Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. II-27–II-32, IEEE, June 2003.
11. A. Shamir, "A survey on mesh segmentation techniques," *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 6, pp.
12. Sheng-hui Liao, Shi-jian Liu, Bei-ji Zou, Xi Ding, Ye Liang, and Jun-hui Huang, "Automatic Tooth Segmentation of Dental Mesh Based on Harmonic Fields" vol. 38, no. 1, 2014.
13. Lisa Avila, Charles Law (1998), "The Visualization Toolkit An Object-Oriented Approach to 3D Graphics", available at: <https://vtk.org/> (accessed 1 October 2020).
14. Y. Kumar, R. Janardan, and B. Larson, "Automatic feature identification in dental meshes," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 9, no. 6, pp. 747–769, 2012.
15. Pierre Zoppitelli (2008), "Eigen", available at: http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page (accessed 1 October 2020).
16. Y. Chen, T. A. Davis, W. W. Hager, and S. Rajamanickam, "Algorithm 887: CHOLMOD, supernodal sparse Cholesky factorization and update/downdate," *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 35, no. 3,
17. T. A. Davis, *User Guide for CHOLMOD: A Sparse Cholesky Factorization and Modification Package*, Department of Computer, Information Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, Fla, USA, 2014.
18. Alban Denoyel (2012), "3D models", available at: <https://sketchfab.com/> (accessed 1 October 2020).

Reference

1. K. Wu, L. Chen, J. Li, and Y. Zhou, "Tooth segmentation on dental meshes using morphologic skeleton," *Computers and Graphics*, vol. 38, no. 1, pp. 199–211, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.cag.2013.10.028>
2. L. Fan, L. Liu, and K. Liu, "Paintmeshcutting," *ComputerGraphicsForum*, vol. 30, no. 2, pp. 603–611,
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2011.01895.x>
3. Rahul Venkatram (2000), "3shape", available at: <https://www.3shape.com/> (accessed 1 October 2020).
4. Y. Lee, S. Lee, A. Shamir, D. Cohen-Or, and H.-P. Seidel, "Meshs cissoring with minima rule and part salience," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 22, no. 5, pp. 444–465, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.cagd.2005.04.002>
5. Z. Ji, L. Liu, and Z. Chen, "Easy mesh cutting," in *Computer Graphics Forum*, vol. 25, pp. 283–291, Blackwell, London, UK, 2006.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2006.00947.x>
6. S. Katz and A. Tal, "Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 3, pp. 954–961, 2003.
<https://doi.org/10.1145/882262.882369>

7. Y.-K. Lai, S.-M. Hu, R. R. Martin, and P. L. Rosin, "Rapid and effective segmentation of 3D models using random walks," *ComputerAidedGeometricDesign*, vol. 26, no. 6, pp. 665–679, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.cagd.2008.09.007>
8. L. Shapira, A. Shamir, and D. Cohen-Or, "Consistent mesh partitioning and skeletonisation using the shape diameter function," *VisualComputer*, vol. 24, no. 4, pp. 249–259, 2008.
<https://doi.org/10.1007/s00371-007-0197-5>
9. M. Attene, B. Falcidieno, and M. Spagnuolo, "Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives," *Visual Computer*, vol. 22, no. 3, pp. 181–193, 2006.
<https://doi.org/10.1007/s00371-006-0375-x>
10. A. F. Koschan, "Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. II-27–II-32, IEEE, June 2003.
11. A. Shamir, "A survey on mesh segmentation techniques," *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 6, pp. 1467–8659, 2007.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01103.x>
12. Sheng-hui Liao, Shi-jian Liu, Bei-ji Zou, Xi Ding, Ye Liang, and Jun-hui Huang, "Automatic Tooth Segmentation of Dental Mesh Based on Harmonic Fields" vol. 38, no. 1, 2014.
13. Lisa Avila, Charles Law (1998), "The Visualization Toolkit An Object-Oriented Approach to 3D Graphics", available at: <https://vtk.org/> (accessed 1 October 2020).
14. Y. Kumar, R. Janardan, and B. Larson, "Automatic feature identification in dental meshes," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 9, no. 6, pp. 747–769, 2012.
<https://doi.org/10.3722/cadaps.2012.747-769>
15. Pierre Zoppitelli (2008), "Eigen", available at: http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page (accessed 1 October 2020).
16. Y. Chen, T. A. Davis, W. W. Hager, and S. Rajamanickam, "Algorithm 887: CHOLMOD, supernodal sparse Cholesky factorization and update/downdate," *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 35, no. 3, 2014.
<https://doi.org/10.1145/1391989.1391995>
17. T. A. Davis, *User Guide for CHOLMOD: A Sparse Cholesky Factorization and Modification Package*, Department of Computer, Information Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, Fla, USA, 2014.
18. Alban Denoyel (2012), "3D models", available at: <https://sketchfab.com/> (accessed 1 October 2020).