

М. В. Войченко, В. Я. Татарин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра комп’ютеризованих систем автоматики

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

<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 за 3D-моделлю щелепи, що повинна передбачати якомога менше ручних операцій. Мотивована ультрасучасними загальними методами сегментації сіток, в яких використано теорію гармонічного поля для виявлення сегментів, досліджується нова, спрямована на стоматологію, структура сегментації зубних сіток. Завдяки спеціально розробленій схемі зважування та стратегії апіорних знань для керування гармонічних обмежень, за цим методом можна ефективно визначати межі зубів.

Ключові слова: 3D-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 розроблення комп’ютеризованих систем для клінічного та дослідницького застосування їх у 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. Отже, 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 складнішою.

Аналіз літературних джерел

Ручне визначення контурів зубів є дуже трудомісткою задачею. Якщо спроектувати на 2Д поверхню контур розрізаного зуба з яснами, то можна наочно і просто зрозуміти трудомісткість ручних операцій (рис. 1). З рисунка 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.

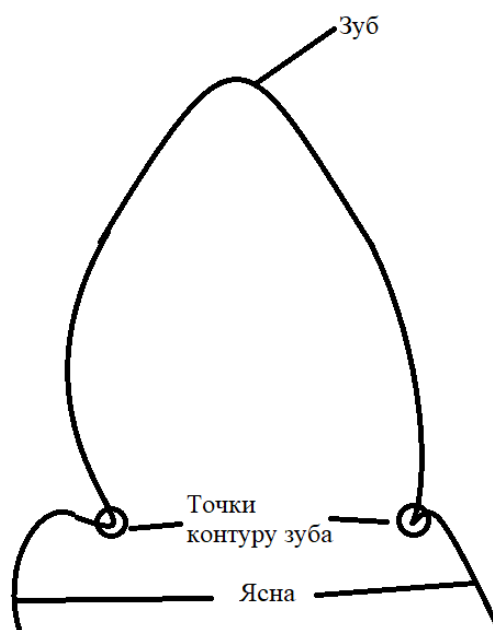


Рис. 1. Контур розрізаного зуба з яснами на 2Д-поверхні

Багато методів сегментації зубів використовують кривизну поверхні при ідентифікації потенційних меж зуба, оскільки вони дотримуються найширше 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 за 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 сегментування 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, обчислення значень матриць та рішення матричного рівняння з розмірністю матриць в сотні тисяч елементів. Для спрощення розроблення програми і вирішення цих проблем було детально проаналізовано алгоритм і на основі цього запропоновано блок-схему алгоритму програми (рис. 2).

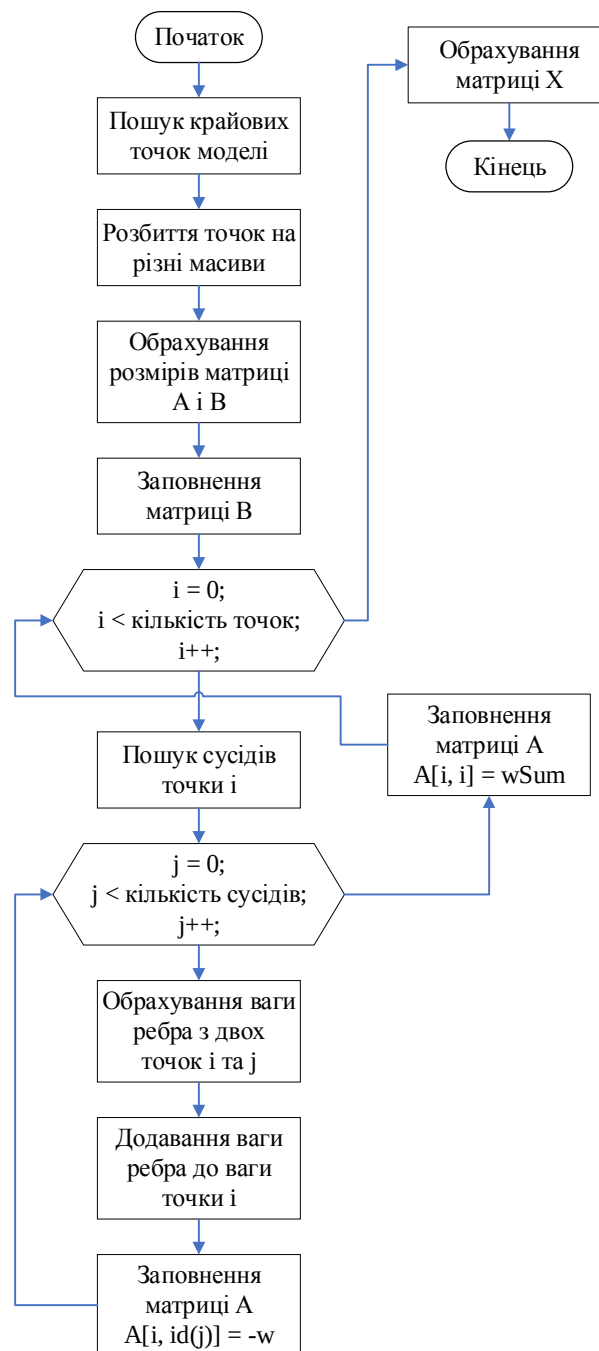


Рис. 2. Блок-схема алгоритму для реалізації програмного коду

У запропонованій реалізації цього алгоритму потрібно почати з визначення крайових точок моделі. Для вирішення цієї проблеми можна реалізувати алгоритм автоматичного обрізання сітки за допомогою площини [1]. Після визначення площини розрізу можна спростити алгоритм тим, що не різати сітку, а просто точки, у яких відстань до площини менша за 0,1 мм, обрати як крайові. І для точності результату потрібно додати до крайових точок 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 за 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 образ кожного зуба, а не відокремлювати їх по одному з цілого образу усіх зубів.

Після цього йде простий етап обчислення розмірів матриць A та B , про які згадано в алгоритмі гармонічних полів [12]. Матриця A має містити стільки стовпців, скільки є точок сітки; кількість рядків матриці A та B однакова і кількість точок сітки плюс кількість унікальних точок і крайових точок.

Коли розміри матриці B визначено, потрібно заповнити її. Спочатку потрібно пройти за точками сітки і заповнити матрицю B нулями, після цього пройти за крайовими точками і заповнити матрицю значеннями 0,5. Потім пробігаємо за всіма унікальними точками і заповнюємо матрицю нулями або одиницями залежно від парності зуба.

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

Наступним і останнім етапом буде обчислення матриці X . Математичне рівняння дуже просте $A \cdot X = B$. Але матриця A має дуже велику розмірність через те, що залежить від кількості точок сітки, а їх там може бути сотні тисяч, що і робить обчислення матриці X дуже складним завданням і забирає багато часу. Для спрощення обчислень можна використовувати бібліотеку Eigen (розроблена для розв'язання складних математичних задач) [15], яка дуже швидка в обчисленні матриць, і матриця автоматично заповнюється нулями, якщо елемент не було явно вказано, що пришиває її заповнення. В бібліотеці є клас для розв'язання матричного рівняння, оснований на методі Холеського [16, 17], який при великих розмірах матриць витрачає на їх розв'язання менше процесорних операцій.

Результати дослідження

На рис. 3 зображено стоматологічну модель зубів із значними проблемами скупчення та відсутності зубів [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 було визначено алгоритмом.

Як видно з 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 за допомогою зважувальних коефіцієнтів центральна частина зуба розпізнається як незначний перепад висоти, тому ця частина належатиме образу зуба.



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

Наступний зуб премолар за номером два також є складним у 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 за 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 обчислення матричного рівняння відбувається лише одноразово.

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

Висновки

Досліджено проблему автоматичного сегментування зубів у моделях щелепи. Використання алгоритму автоматичного розпізнавання зубів за 3Д-моделлю щелепи за допомогою гармонічного поля дозволяє вирішити цю проблему. Проте для практичного застосування цього алгоритму слід застосовувати зважувальні коефіцієнти, які пропонуються в цій роботі. Для перевірки продуктивності цих зважувальних коефіцієнтів розроблено програму, 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 за допомогою гармонічного поля дозволяє надійно розпізнавати різноманітні форми зубів, зі складним неправильним прикусом та проблемами скупчення та може гарантувати виділення закритих меж зуба із зубної сітки, на відміну від методів, що базуються на кривизні та потребують у більшості випадків складних взаємодій із користувачем.

Отже, використання алгоритму автоматичного розпізнавання зубів за 3Д-моделлю щелепи за допомогою гармонічного поля із застосуванням запропонованих зважувальних коефі-

цієнтів дозволяє провести автоматичну сегментацію зубів і може бути рекомендованим для подальшого застосування.

Список літератури

1. Wu K., Chen L., Li J., and Zhou Y. "Tooth segmentation on dental meshes using morphologic skeleton", *Computers and Graphics*, vol. 38, no. 1, pp. 199–211, 2014.
2. Fan L., Liu L., and Liu K. "Paintmeshcutting", *ComputerGraphicsForum*, vol. 30, no. 2, pp. 603–611, 2011.
3. Rahul Venkatram (2000), "3shape", available at: <https://www.3shape.com/> (accessed 1 October 2020).
4. Lee Y., Lee S., Shamir A., Cohen-Or D. and Seidel H.-P. "Meshs cissoring with minima rule and part salience", *Computer Aided Geometric Design*, vol. 22, no. 5, pp. 444–465, 2005.
5. Ji Z., Liu L. and Chen Z. "Easy mesh cutting", in *Computer Graphics Forum*, vol. 25, pp. 283–291, Blackwell, London, UK, 2006.
6. Katzand S., Tal A. "Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts", *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 3, pp. 954–961, 2003.
7. Lai Y.-K., Hu S.-M., Martin R. R., and Rosin P. L. "Rapid and effective segmentation of 3D models using random walks," *ComputerAidedGeometricDesign*, 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", *VisualComputer*, vol. 24, no. 4, pp. 249–259, 2008.
9. Attene M., Falcidieno B. and Spagnuolo M. "Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives", *Visual Computer*, vol. 22, no. 3, pp. 181–193, 2006.
10. Koschan A. F., "Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds", in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on ComputerVision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. II-27–II-32, IEEE, June 2003.
11. Shamir A. "A survey on mesh segmentation techniques", *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 6, pp. 1539–1556, 2008.
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. Kumar Y., Janardan R. and Larson B. "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. Chen Y., Davis T. A., Hager W.W. and Rajamanickam S. "Algorithm 887: CHOLMOD, supernodal sparse Cholesky factorization and update/downdate", *ACM Transactionson Mathematical Software*, vol. 35, no. 3, article 22, 2008.
17. Davis T. A. *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. Wu K., Chen L., Li J. and Zhou Y. "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. Fan L., Liu L., and Liu K. "Paintmeshcutting", *ComputerGraphicsForum*, vol. 30, no. 2, pp. 603–611, 2011. <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. Lee Y., Lee S., Shamir A., Cohen-Or D., and Seidel H.-P. "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. Ji Z., Liu L. and Chen Z. "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. Katzand S. 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. Lai Y.-K., Hu S.-M., Martin R. R. and Rosin P. L. "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. Koschan A. F. "Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds", in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on ComputerVision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. II-27–II-32, IEEE, June 2003.
11. Shamir. A. "A survey on mesh segmentation techniques", *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 6, pp. 1539–1556, 2008. <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. Kumar Y., Janardan R. and Larson B. "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. Chen Y., T. Davis A., Hager W. W. and Rajamanickam S. "Algorithm 887: CHOLMOD, supernodal sparse Cholesky factorization and update/downdate", *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 35, no. 3, article 22, 2008. <https://doi.org/10.1145/1391989.1391995>
17. Davis T. A. *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).