

MARCIN JANASZEWSKI

Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

Katedra Systemów Ekspertowych i Sztucznej Inteligencji, WSInf w Łodzi

LAURENT BABOUT

Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

MICHAŁ POSTOLSKI

Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

Katedra Systemów Ekspertowych i Sztucznej Inteligencji, WSInf w Łodzi

Universite Paris-Est, LIGM-A3SI-ESIEE 2, Francja

ZASTOSOWANIE ALGORYTMÓW ZAMYKANIA I WYPEŁNIANIA TUNELI W KOMPUTEROWEJ ANALIZIE MATERIAŁÓW NA BAZIE TOMOGRAFICZNYCH OBRAZÓW 3D

Recenzent: **doc. dr hab. inż. Roman Szabatin**

Maszynopis dostarczono: 1.01.2010

Artykuł prezentuje szybkie, oryginalne algorytmy zamykania i wypełniania tuneli dla obiektów wolumetrycznych 3D oraz ich przykładowe zastosowania w badaniach materiałów z wykorzystaniem tomografii rentgenowskiej. Pierwsze zastosowanie dotyczy aproksymacji objętości wiązadeł mostowych w popękanej stali nierdzewnej. Następnie zaprezentowano badania nad strukturą poliuretanowych pian auksetycznych. Trzeci przykład dotyczy badań nad zgrzewaniem dwóch płyt będących stopami aluminium. Wszystkie zaprezentowane przypadki pokazują przydatność algorytmów bądź to na etapie wstępnego przetwarzania tomograficznego obrazu 3D lub na etapie ekstrakcji interesujących obiektów.

1. WSTĘP

Wypełnianie i zamykanie tuneli w obiektach wolumetrycznych 3D jest wyznacznikiem w dziedzinie informatyki. Ostatnio w [8] zdefiniowano pojęcie tunelu (otworu 3D) w obiektach wolumetrycznych, który jest ściśle ograniczonym podzbiorem przestrzeni 3D, co jest warunkiem koniecznym realizacji wypełniania. Jednocześnie istnieje potrzeba realizacji zamykania lub wypełniania tuneli w obiektach wolumetrycznych. Miałyby to zastosowanie, między innymi, w nauce o materiałach [2] i medycynie, gdzie zrekonstruowane obiekty na obrazach 3D rentgenowskiej tomografii komputerowej posiadają tunele powstałe w wyniku niedoskonałości procesu akwizycji. Problem ten występuje często podczas badania obiektów o cienkich ścianach. Powstające wówczas tunele istotnie komplikują proces analizy tego typu obrazów.

Analiza światowej literatury pokazuje, że jest wiele algorytmów zamykania tuneli dla obrazów 3D gdzie obiekty reprezentowane są za pomocą zewnętrznej, zamkniętej powierzchni złożonej z wielokątów np. [6, 11, 16]. Istnieje jednak tylko jedna koncepcja zamykania [1] i jedna koncepcja wypełniania [8] tuneli dla wolumetrycznych obrazów 3D, gdzie obiekty reprezentowane są jako zbiory wokseli. Niniejszy artykuł prezentuje algorytmy opublikowane w [1, 8] koncentrując się na możliwościach ich zastosowania w nauce o materiałach. Możliwości zastosowania tych algorytmów w medycynie zaprezentowano np. w [13].

2. PODSTAWOWE POJĘCIA

Podstawowe pojęcia dotyczące analizy wolumetrycznych obrazów 3D, które dalej w skrócie będą nazywane obrazami 3D są zdefiniowane w innych publikacjach np. [4, 10]. W tym rozdziale zostaną zaprezentowane jedynie wybrane pojęcia niezbędne do zrozumienia dalszej części artykułu.

Wolumetryczny obraz 3D jest funkcją, która przypisuje każdemu punktowi dyskretnej przestrzeni 3D wartość 0 lub 1. Punkty posiadające wartość 1 są nazywane czarnymi punktami, natomiast punkty mające wartość 0 są nazywane białymi punktami. Zbiór wszystkich czarnych punktów reprezentuje wolumetryczny obiekt 3D lub krócej obiekt 3D. Zbiór wszystkich białych punktów reprezentuje tło.

Wolumetryczne obrazy 3D otrzymujemy często w wyniku segmentacji obrazów tomograficznych, polegającej na wyróżnieniu z tła tylko interesujące obiekty z punktu widzenia dalszej analizy.

Oznaczmy przez Z zbiór liczb całkowitych, N_+ zbiór liczb całkowitych dodatnich. Niech $E = Z^3$. Nieformalnie *punktem prostym* p obiektu 3D $X \subset E$

nazywamy punkt, który „nie wpływa” na topologię X . Innymi słowy usunięcie p z X nie zmienia topologii X .

Pomijając szczegóły techniczne, oznaczmy przez $A(x, X)$ zbiór punktów z $X \setminus \{x\}$ leżących w sąsiedztwie x a przez $Ab(x, X)$ zbiór punktów dopełnienia X (tła) leżących w sąsiedztwie x . Ponadto niech $T(x, X)$ i $Tb(x, X)$ oznaczają liczbę połączonych komponentów $A(x, X)$ i $Ab(x, X)$ odpowiednio.

Punkt $x \in X$ jest prosty dla X wtedy i tylko wtedy gdy $T(x, X) = Tb(x, X) = 1$.

Ponadto, jeżeli dla $x \in X$, $Tb(x, X) = 1$ to usunięcie punktu x z X nie powoduje utworzenia nowego tunelu w X .

Pojęcie tunelu 3D nie jest łatwe do zdefiniowania. Koncepcję detekcji tunelu w obiekcie 3D zaproponował Kong w [4, 10]. Zgodnie z tą koncepcją w $X \subset E$ występuje tunel wtedy, gdy istnieje pętla wokseli zawarta w X , której nie można transformować do jednego punktu, należącego do X , z wykorzystaniem sekwencji elementarnych przekształceń lokalnych zawartych w X .

3. ALGORYTM ZAMYKANIA TUNELI

Algorytm zaprezentowany przez Aktouf i in. [1] charakteryzuje się liniową złożonością obliczeniową i pamięciową. Wykorzystuje on lokalne właściwości topologiczne wokseli obrazu w celu zamknięcia wszystkich tuneli w obiekcie 3D. Pseudokod tego algorytmu można zaprezentować następująco:

AlgorytmZamykaniaTuneli(wejście: X , wyjście Y)

Generacja prostopadłościanu Y zawierającego X

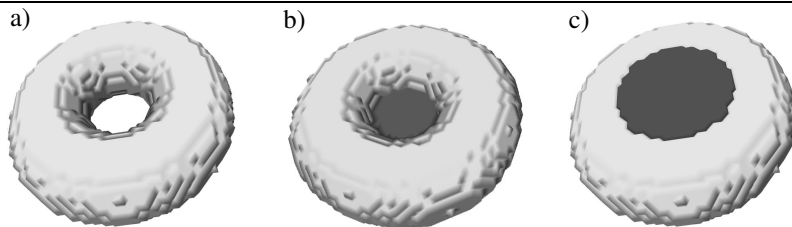
Powtarzaj do momentu aż nie ma punktu do skasowania

Zaznacz punkt $p \in \mathcal{V}X$, który jest najdalej od X i taki, że $T(p, X) = 1$

$Y = \mathcal{V} \setminus \{p\}$

Rezultat: Y

Wynik działania powyższej procedury dla przykładowego obiektu 3D pokazano na rys. 1b). Warto zauważyć, że procedura generuje dla każdego tunelu łąkę, grubości jednego wokseli, która zamyka tunel. Ponadto dzięki wprowadzeniu porządku kasowania punktów względem ich odległości od obiektu 3D łąka jest w „centrum” obiektu. Ponadto rys 1 pokazuje różnicę pomiędzy zamykaniem i wypełnianiem tuneli. Nieformalnie opisując, w przypadku wypełniania otrzymujemy obiekt wypełniający, którego grubość odzwierciedla lokalnie grubość obiektu wypełnianego w pobliżu tunelu. W przypadku zamykania otrzymujemy zawsze „łąkę” zamykającą tunel o grubości jednego wokseli, niezależnie od grubości obiektu wejściowego.

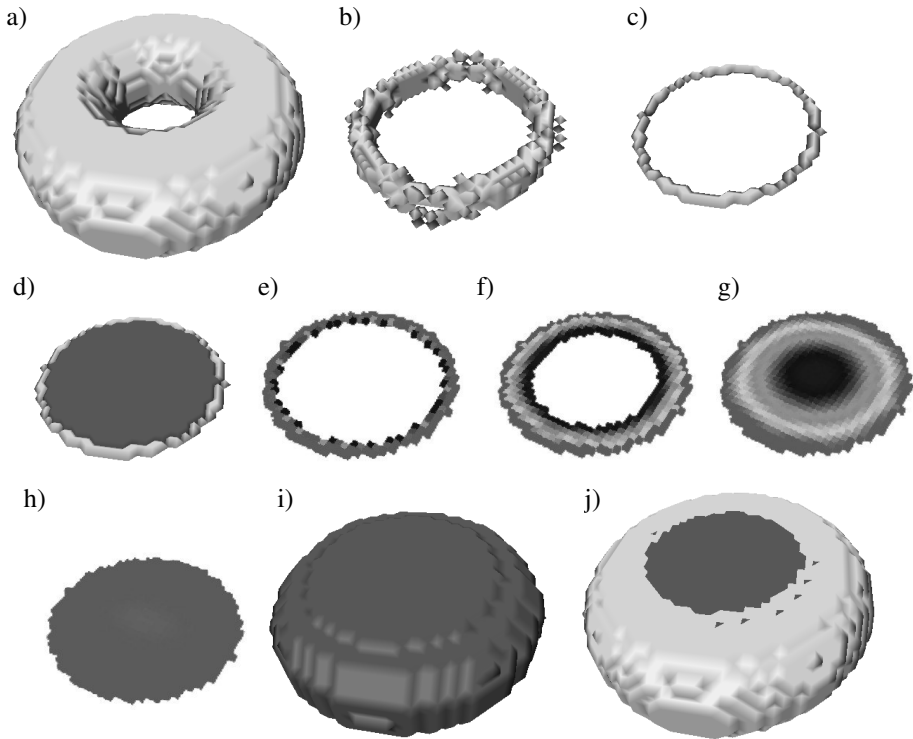


Rys. 1. Wynik działania algorytmu zamykania tuneli dla przykładowego obiektu 3D. a) obiekt wejściowy, b) wynik działania algorytmu dla obiektu wejściowego. Łatę zamykającą tunel zaznaczono ciemnym odcieniem szarości, (c) Wynik wypełniania tunelu na tle torusa

4. ALGORYTM WYPEŁNIANIA TUNELI

Algorytm wypełniania tuneli zostanie zaprezentowany pobieżnie. Szczegółowy opis przekracza rozmiar niniejszej publikacji. Czytelnicy zainteresowani algorytmem mogą znaleźć szczegółową prezentację w [8]. Pierwszy krok algorytmu wypełniania tuneli polega na zastosowaniu procedury generacji filtrowanego Euklidesowego szkieletu FES dla obiektów 3D [5]. Procedura FES na pierwszym etapie generuje oś środkową obiektu (patrz rys. 2b), następnie dokonuje jej filtrowania. Ostatni etap polega na generowaniu szkieletu euklidesowego ograniczonego przez przefiltrowaną oś środkową. Ostatecznie FES zwraca binarny obraz S będący szkieletem obiektu wejściowego X (patrz rys. 2c). Generowany w ten sposób filtrowany szkielet zachowuje cechę centryczności, dzięki zastosowaniu osi środkowej oraz zachowuje topologię obiektu wejściowego dzięki zastosowaniu, na ostatnim etapie, algorytmu generacji szkieletu Euklidesowego. W drugim kroku stosowany jest algorytm zamykania tuneli – opisany w rozdziale 3. Rezultatem jego działania jest binarny obraz 3D, gdzie obiektami są łaty zamykające tunele w S (patrz rys. 2d). Kolejny etap to zastosowanie Filtru uśredniającego, który realizuje propagację grubości obiektu reprezentowanego przez wartości wokseli filtrowanego szkieletu S do łat wypełniających tunele P . Procedura w każdej iteracji oblicza nową wartość każdego woksela łat zamykających tunele, jako wartość średnią jego sąsiadów należących do P lub do S . Algorytm zatrzymuje się, gdy kolejne iteracje nie wprowadzają znaczących zmian wartości wokseli. W wyniku działania tej procedury otrzymujemy obiekt P' , w którym woksela należące do łat posiadają wartości całkowite, dodatnie reprezentujące interpolowaną grubość obiektu (patrz rys. 2e-2h). Na ostatnim etapie program dla każdego woksela x obrazu P' rysuje kule o środku w x i promieniu równym wartości woksela x (patrz rys. 2i).

W ten sposób otrzymujemy algorytm wypełniania tuneli, który posiada następujące właściwości:

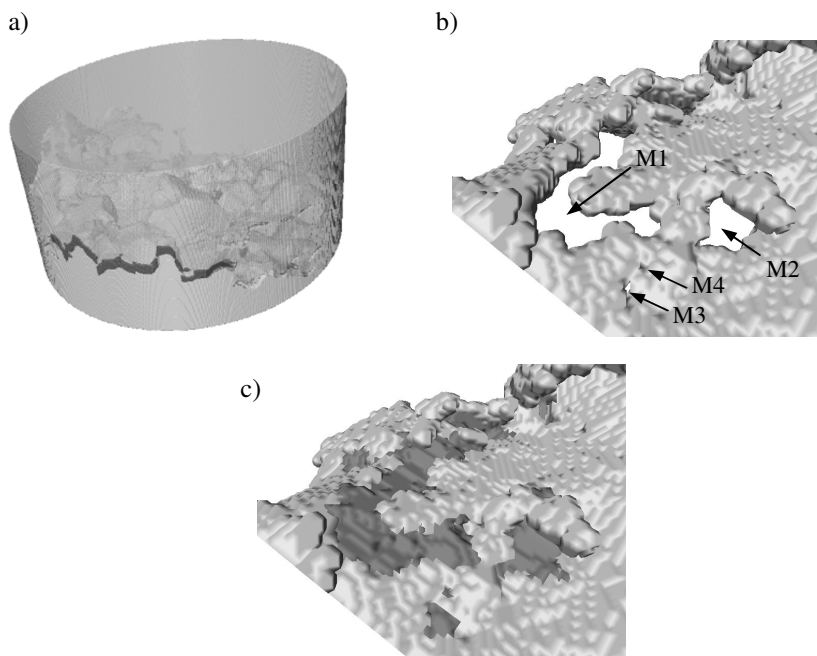


Rys. 2. Wizualizacja wyników działania kolejnych etapów algorytmu wypełniania tuneli dla torusa: a) obiekt wejściowy, b) niefiltrowany szkielet torusa, c) filtrowany szkielet torusa, d) wynik zastosowania procedury zamykania tuneli w filtrowanym szkielecie torusa. Łatę zamykającą tunel oznaczono ciemnym odcieniem szarości, e) wizualizacja wyniku pierwszej iteracji procedury filtru uśredniającego zastosowanego do propagacji grubości torusa do wnętrza łaty zamykającej tunel. Różne odcienie szarości oznaczają różne wartości wokseli, f) 25-ta iteracja procedury filtru uśredniającego, g) 80-ta iteracja procedury filtru uśredniającego, h) ostatnia iteracja procedury filtru uśredniającego; w przypadku torusa jednakowa grubość została rozpropagowana na całej łacie zamykającej tunel, i) wynik działania dylacji przez kule na łacie zamykającej tunel, której woksle reprezentują grubość torusa, j) wynik dodawania torusa do wyniku dylacji; widać, że tunel w torusie został wypełniony i grubość obiektu wypełniającego jest równa grubości torusa

- Dokonuje wypełniania tuneli w wyniku czego otrzymujemy objętości wypełniające tunele.
- Jest łatwy w użytkowaniu: wymaga tylko odpowiedniego ustawienia jednego parametru związanego z filtrowaniem szkieletu.
- Jest szybki, ponieważ większość jego kroków jest optymalna odnośnie złożoności obliczeniowej i pamięciowej

5. ZASTOSOWANIE ALGORYTMÓW ZAMYKANIA I WYPEŁNIANIA TUNELI

Algorytm zamykania tuneli ma szerokie zastosowanie w analizie i przetwarzaniu obrazów tomograficznych. Przykładowo w medycynie wykonywane jest badanie CT klatki piersiowej w celu wizualizacji oskrzeli



Rys. 3. Wizualizacja wyników działania algorytmu wypełniania tuneli: a) próbka austenitycznej stali nierdzewnej wraz z widoczną szczeliną wewnątrz, b) fragment szczeliny, próbka stali stanowi tło; zaznaczono cztery wiązadła mostowe (tunele), c) wynik działania algorytmu wypełniania tuneli, gdzie obiekt wypełniający zaznaczono ciemnym odcieniem szarości

pacjenta. W celu analizy oskrzeli na bazie obrazu tomograficznego 3D najpierw należy dokonać segmentacji drzewa oskrzelowego wygaszając woksele reprezentujące pozostałe tkanki zawarte w klatce piersiowej. Niestety proces segmentacji jest trudny w wyniku występowania tuneli w ścianach oskrzeli. Stąd dodatkowy etap wstępnego przetwarzania obrazu polegający na zamykaniu tuneli jest w tym wypadku bardzo pomocny [14].

Podobnie w nauce o materiałach algorytmy zamykania i wypełniania tuneli mogą być pomocne w procesie rekonstrukcji utraconych fragmentów materiału na obrazie tomograficznym w wyniku niedoskonałości procesu akwizycji. Istnieją również przypadki, gdzie tunele w próbce materiału charakteryzują jego odporność na rozciąganie i korozję. Stąd aproksymacja ich objętości z wykorzystaniem algorytmu wypełniania tuneli otwiera nowe możliwości badawcze w dziedzinie wytrzymałości materiałów. Poniżej zostaną zaprezentowane, bardziej szczegółowo trzy przypadki zastosowania algorytmów zamykania i wypełniania tuneli w nauce o materiałach.

5.1. Detekcja wiązań mostowych w próbce austenicznej stali nierdzewnej poddanej procesowi pęknięć korozyjno-naprężeniowych

Ponad 70% produkcji stali nierdzewnej stanowi austeniczna stal nierdzewna, która ma szeroki zakres zastosowań od elementów konstrukcji maszyn i budynków do bardziej zawansowanych jak aeronautyka czy technika jądrowa. To szerokie zastosowanie związane jest z odpornością na korozję, dobrymi właściwościami mechanicznymi w niskich i wysokich temperaturach, łatwością wytwarzania i relatywnie niskim kosztem. Jakkolwiek odporność na korozję w pewnych warunkach może zostać osłabiona co skutkuje korozją punktową lub międzykrystaliczną. Niniejsza praca jest skoncentrowana na badaniu wpływu tzw. wiązań mostowych na wczesne etapy propagacji szczeliny. Wiązadła mostowe definiuje się jako niewielkie obszary materiału na granicy krystalitów wykazujące podwyższoną odporność na pęknięcia. Jeżeli szczelina napotka taki obszar nie rozrywa go ale otacza, jak rwąca fala powodziowa otacza wzniesienie, które napotyka na swojej drodze. Stąd w obiekcie reprezentującym szczelinę 3D mosty reprezentowane są przez tunele. Wypełnienie tych tuneli umożliwiłoby ilościowy opis właściwości geometrycznych mostów, co ma istotne znaczenie w badaniach nad wytrzymałością korozyjno-naprężeniową stali nierdzewnej [9]. W celu realizacji zadania przeprowadzono eksperymenty na próbce austenicznej stali nierdzewnej, którą poddano działaniu silnej reakcji korozji oraz siły rozciągającej wywołując pęknięcia. Proces propagacji szczeliny rejestrowano z wykorzystaniem mikro-tomografii rentgenowskiej, gdzie jeden woksel zrekonstruowanego obrazu 3D odpowiada objętości $0.343 \mu\text{m}^3$. Eksperyment

został wykonany w Europejskim Synchrotronie w Grenoble [3]. Przykładowe wyniki eksperymentu w postaci obiektu 3D reprezentującego propagację szczeliny oraz algorytmu wypełniania tuneli pokazano na rys 3.

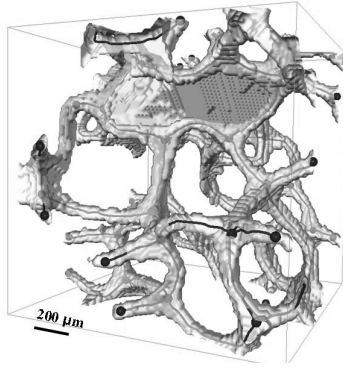
Ilościowy opis wiązań mostowych generowany przez algorytm wypełniania tuneli, może być porównany z wynikami otrzymanymi z tomografu dyfrakcyjnego DCT dla tej samej próbki materiału. Technika ta umożliwia uzyskanie mapy 3D orientacji kryształów co w rezultacie prowadzi do geometrycznego opisu powierzchni zewnętrznych kryształów [9]. Aktualnie przeprowadzana jest analiza wyników DCT i CT w celu wykazania, że wiązadła mostowe tworzą się na specyficznych powierzchniach zewnętrznych krysztalitów.

5.2. Procesy deformacji w auksetycznej piance poliuretanowej

W ostatnich latach najnowsza generacja pianek jest intensywnie badana a jej zakres zastosowań systematycznie rośnie dzięki istotnej właściwości - auksetyczności (ujemna wartość współczynnika Poissona) polegającej na rozciąganiu w kierunku prostopadłym do przyłożonej siły rozciągającej oraz kurczeniu w kierunku prostopadłym do przyłożonej siły ściskającej. Właściwość ta jest wykorzystywana w medycynie (np. rozszerzanie naczyń krwionośnych podczas operacji) lub do budowy filtrów, gdzie efekt wzrostu ciśnienia spowodowanego zanieczyszczeniem filtra jest redukowany dzięki rozciąganiu pianki w kierunku prostopadłym do przyłożonej siły.

Ostatnie badania *in situ* mają na celu lepsze zrozumienie deformacji pianki auksetycznej, na poziomie mikrostrukturalnym, w odpowiedzi na siłę rozciągającą [12]. Badania te pozwoliły prześledzić lokalny proces deformacji polegający na prostowaniu się żeber i rotacji połączeń żeberowych. Innym podejściem mogą być bezpośrednie obliczenia rotacji połączeń żeberowych i żeber na bazie szkieletu w celu realizacji statycznej analizy niezdeformowanej pianki oraz geometrii otwartych por ograniczonych przez pętlę, żeber [7]. Typową wizualizację 3D pianki auksetycznej wraz z wygenerowanym szkieletem zaprezentowano na rys. 4.

Kolejnym krokiem w badaniach nad deformacją pianek auksetycznych może być wyznaczenie dla każdej pętli żeber, macierzy rotacji, którą należy zastosować w celu cofnięcia deformacji pianki tzn. uzyskania pętli z liniowych żeber, które tworzą wielokąt foremny. Okazuje się, że proces deformacji pianki auksetycznej nie modyfikuje sztywności połączeń żeberowych i suma kątów międzyżeberowych jest równa w przybliżeniu sumie kątów odpowiadającego wielokąta foremnego. Kąty między-żeberowe można wyznaczyć bazując na generowanym komputerowo szkielecie pianki. W prezentowanym przypadku algorytm zamykania tuneli jest użyteczny z punktu widzenia wizualizacji (patrz rys. 4). Ponadto może być wykorzystany do identyfikacji pętli żeber i budowy



Rys. 4. Wizualizacja 3D pianki auksetycznej (jasny szary) wraz z nałożonym szkieletem, gdzie ciemno szare krzywe to gałęzie szkieletu a koła to wierzchołki. Przykładowa otwarta pora ograniczona przez jasno szarą pętlę została zamknięta w wykorzystaniem algorytmu zamykania tuneli

mapy 3D lokalnych deformacji. Obliczenia te umożliwią zrozumienie procesu deformacji pianki auksetycznej oraz przyczynią się do lokalnego oszacowania możliwości jej powrotu do oryginalnego kształtu.

5.3. Przepływ materiału w zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem

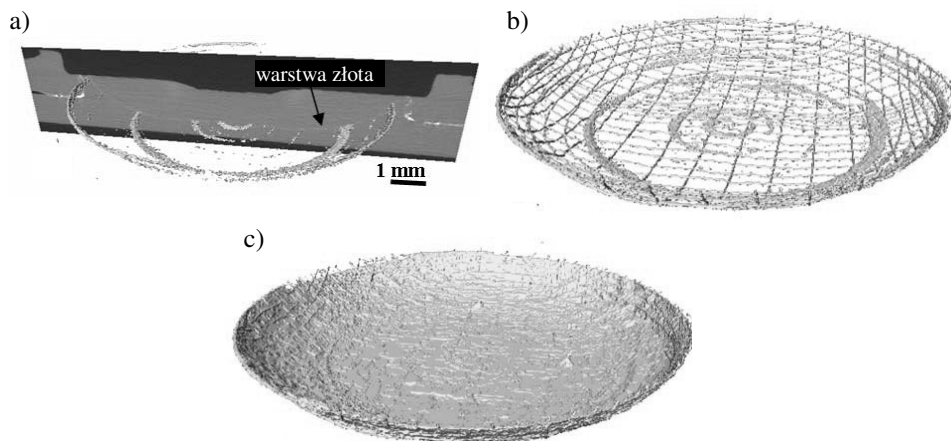
Zgrzewanie jest jedną z najczęstszych metod łączenia dwóch fragmentów materiałów zwykle metali lub termoplastyków. Jakość złącza jest ściśle powiązana z jego mikrostrukturą, poziomem naprężenia szczątkowego, odkształceniami i występowaniem defektów. W ostatnim okresie można odnotować pojedyncze prace dotyczące zastosowania tomografii komputerowej do badania defektów złącza i przepływu materiału [15].

Zgrzewanie tarciove z przemieszczeniem (ZTP) zostało wynalezione, opatentowane i przygotowane do zastosowań przemysłowych przez Instytut Spawalnictwa w Cambridge (Wielka Brytania). W metodzie tej cylindryczne narzędzie z wyprowadzonym trzpieniem i zaopatrzone w kołnierz jest wprowadzane w ruch obrotowy i powoli zagłębiane w obszar złącza między dwoma ustawionymi czołowo elementami. Wskutek tarcia narzędzia o powierzchnie złącza jest wytwarzane ciepło, w wyniku którego mięknie powierzchnie łączonych elementów. Uplastyczniony materiał przepływa do tylnej krawędzi trzpienia narzędzia, gdzie wskutek oddziaływania kołnierza i trzpienia następuje przemieszanie. Stygnąc, przemieszczony materiał tworzy złącze między zgrzewanymi elementami. ZTP tworzy wytrzymałą spoinę w krótkim czasie i przy niewielkim zużyciu energii. Wykorzystywane jest głównie w przemyśle lotniczym do łączenia blach i płyt aluminiowych.

Z punktu widzenia badania jakości łącza istotna jest analiza przepływu materiału podczas procesu spajania. W celu zbadania łącza przeprowadzono eksperyment, z wykorzystaniem tomografii komputerowej, polegający na napyleniu cienkiej powłoki złota na ścianę górną płyty mającej kontakt z trzpieniem. Na rys. 5 widoczna jest warstwa złota dzięki silnej absorpcji promieni rentgena (około 200 razy większa niż aluminium). W prezentowanym przypadku podczas spajania, złoto nie rozpląnęło się równomiernie. Jego rozkład geometryczny przypomina spiralę a łącze ma „kształt talerza”.

W celu uzyskania rozkładu markera po procesie zgrzewania przeprowadzono segmentację złota w tomograficznym obrazie 3D (patrz rys. 5). Autorzy zastosowali segmentację częściowo-automatyczną wykorzystując algorytm zamykania tuneli w celu uzyskania profilu przepływu materiału (patrz rys. 5c). W przeprowadzonej segmentacji manualnie wyodrębniono jedynie siatkę powłoki złota uzyskując rys. 5b. Następnie zastosowano algorytm zamykania tuneli otrzymując obraz 5c.

Niniejsza strategia jest bardzo użyteczna do określenia wpływu parametrów procesu zgrzewania na przepływ materiału w obszarze spoiny.



Rys. 5. Wizualizacja 3D spoiny STP stopu aluminium z wykorzystaniem złotego markera: (a) Przekrój prostopadły spoiny z fragmentami złotego markera po segmentacji na bazie histogramu, (b) siatka markera po manualnej segmentacji, (c) wizualizacja 3D złotego markera po zastosowaniu algorytmu zamykania tuneli

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Niniejszy artykuł prezentuje przykładowe zastosowania algorytmów zamykania i wypełniania tuneli w analizie i przetwarzaniu tomograficznych obrazów 3D prezentujących procesy pęknięć, zgrzewania materiałów oraz deformacji auksetyków. Celem artykułu jest promowanie opisywanych algorytmów, gdyż według autorów mają one szerokie zastosowanie w analizie różnego rodzaju tomograficznych obrazów 3D.

PODZIĘKOWANIA

Prace opisane w niniejszym artykule są częściowo sponsorowane przez Unię Europejską, Szósty Program Ramowy, Marie Curie Transfer of Knowledge Action (DENIDIA, contract No.: MTKD-CT-2006-039546). Opublikowane prace prezentują punkt widzenia autorów i Społeczność Europejska nie jest odpowiedzialna za skutki, jakie może przynieść wykorzystanie wiedzy zawartej w niniejszym artykule.

Prace opisane w artykule są również częściowo sponsorowane przez grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr. 167/6, PR UE/2007/7.

Michał Postolski jest stypendystą projektu "Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń - zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej - zarządzanie uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych" współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Autorzy pragną podziękować prof. Michel Couprie za udostępnienie biblioteki programów komputerowych PINK, która zawiera między innymi implementację algorytmu zamykania tuneli.

Autorzy pragną podziękować również dr. James Marrow i prof. Philip Withers za udostępnienie obrazów do badań.

LITERATURA

- [1] **Aktouf Z., Bertrand G., Perroton L.:** A three-dimensional holes closing algorithm, *Pattern Recognition Letters*, vol. 23, pp. 523-31, 2002.
- [2] **Babout L., Janaszewski M., Bakavos D., McDonald S. A., Prangnell P. B., Marrow T. J., Withers P. J.:** 3D inspection of fabrication and degradation processes from X-ray (micro) tomography images using a hole closing algorithm, in *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques*. Thessaloniki, Greece, pp. 337-342, 2010.

- [3] **Babout L., Marrow T. J., Engelberg D., Withers P. J.:** X-ray microtomographic observation of intergranular stress corrosion cracking in sensitised austenitic stainless steel, *Materials Science and Technology*, vol. 22, pp. 1068-1075, 2006.
- [4] **Bertrand G.:** Simple points, topological numbers and geodesic neighborhoods in cubic grids, *Pattern Recognition Letters*, vol. 15, pp. 1003-1011, 1994.
- [5] **Coupric M., Coeurjolly D., Zrouf R.:** Discrete bisector function and Euclidean skeleton in 2D and 3D, *Image Vision Comput.*, vol. 25, pp. 1543-1556, 2007.
- [6] **Davis J., Marschner S. R., Garr M., Levoy M.:** Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion, *First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2001, pp. 428-438.
- [7] **Gaspar N., Smith C. W., Miller E. A., Seidler G. T., Evans K. E.:** Quantitative analysis of the microscale of auxetic foams, *Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics*, vol. 242, pp. 550-560, 2005.
- [8] **Janaszewski M., Coupric M.,>About L.:** Hole filling in 3D volumetric objects, *Pattern Recognition*, vol. 43, pp. 3548-3559, 2010.
- [9] **King A., Johnson G., Engelberg D., Ludwig W., Marrow J.:** Observations of Intergranular Stress Corrosion Cracking in a Grain-Mapped Polycrystal, *Science*, vol. 321, pp. 382-385, 2008.
- [10] **Kong T. Y., Rosenfeld A.:** Digital topology: Introduction and survey, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 48, pp. 357-393, 1989.
- [11] **Liepa P.:** Filling holes in meshes, *SGP '03: Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2003, pp. 200-205.
- [12] **McDonald S. A., Ravirala N., Withers P. J., Alderson A.:** In situ three-dimensional X-ray microtomography of an auxetic foam under tension, vol. 60, pp. 232-235, 2009.
- [13] **Postolski M., Janaszewski M., Fabijanska A., L. B., Jędrzejczyk M., Stefanczyk L.:** Segmentacja drzewa oskrzelowego z wykorzystaniem algorytmu zamykania otworów, *Zeszyty Naukowe AGH, Automatyka*, pp. 949-948, 2009.
- [14] **Postolski M., Janaszewski M., Fabijańska A.,>About L., Coupric M., Jędrzejczyk M., Stefańczyk L.:** Reliable Airway Tree Segmentation Based on Hole Closing in Bronchial Walls, in *Computer Recognition Systems 3*, M. Kurzyński and M. Wozniak, Eds.: Springer, 2009, pp. 389-396.
- [15] **Schmidt H. N. B., Dickerson T. L., Hattel J. H.:** Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3, *Acta Materialia*, vol. 54, pp. 1199-1209, 2006.
- [16] **Sharf A., Alexa M., Cohen-Or D.:** Context-based surface completion, *SIGGRAPH '04: ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, New York, NY, USA, 2004, pp. 878-887.

ZASTOSOWANIE ALGORYTMÓW ZAMYKANIA i WYPEŁNIANIA TUNELI w KOMPUTEROWEJ ANALIZIE MATERIAŁÓW NA BAZIE TOMOGRAFICZNYCH OBRAZÓW 3D

Summary

The article presents fast, original algorithms of tunnel closing and tunnel filling for volumetric 3D objects and their exemplary applications in material science with the use of X-ray tomography. The first application concerns volume approximation of bridge ligaments in stress corrosion cracking of stainless steel samples. Moreover the authors present research on structure of polyurethane auxetic foam. The third example concerns research on friction stir spot welding of aluminum sheets. All presented cases show usefulness of these algorithms in 3D tomography image processing or extraction of interesting objects from a 3D image.

Politechnika Łódzka
Katedra Informatyki Stosowanej