

ZRYCHLENÍ ANALÝZY DIGITÁLNÍHO OBRAZU VYUŽITÍM GRAFICKÝCH PROCESORŮ

FAST EVALUATION OF LINEAL PATH FUNCTION USING GRAPHICS PROCESSING UNIT

Jan Havelka

Duben 2011

ABSTRAKT

Homogenizační metody jsou stále více využívanější přístupy pro modelování chování heterogenních materiálů. Základním principem homogenizace je nahrazení heterogenní mikro-/mezostruktury ekvivalentním homogenním materiálem. Jestliže se navíc zabýváme náhodnou strukturou je vhodné jednotkovou buňku (PUC) představující periodickou část mikro-/mezostrukturu nahradit statisticky ekvivalentní periodickou jednotkovou buňkou (SEPUC), která uchovává základní materiálové vlastnosti ve statistickém smyslu. Jedním z vhodných statistických deskriptorů pro definování SEPUC je "lineal path function". Jedná se o deskriptor nižšího řádu, jehož hlavní výhodou je schopnost popsat určité informace o fázové spojitosti zkoumaného média. Nevýhodou je naopak jeho vysoká výpočetní náročnost. V příspěvku je ukázáno přeformulování sekvenčního programu, který analyzuje digitální obraz pomocí "lineal path function", napsaném v jazyku C do paralelního schématu napsaném v jazyku CUDA C – Compute Unified Device Architecture - využívající výpočetní kapacitu NVIDIA grafických procesorů.

Klíčová slova: Analýza digitálního obrazu, lineal path function, homogenizace, statisticky ekvivalentní periodická jednotková buňka, grafický procesor.

ABSTRACT

Homogenization methods are still the most approach to modelling of heterogeneous materials. The main principle is to represent the heterogeneous microstructure with an equivalent homogeneous material. When dealing complex random microstructures, the unit cell representing exactly periodic morphology needs to be replaced by a statistically equivalent periodic unit cell (SEPUC) preserving the important material properties in the statistical manner. One of the statistical descriptors suitable for SEPUC definition is the lineal path function. It is a low-order descriptor based on a more complex fundamental function able to capture certain information about the phase connectedness. Its main disadvantage is the computational cost. In this contribution, we present the reformulation of the sequential C code for evaluation of the lineal path function into the parallel C code with Compute Unified Device Architecture (CUDA) extensions enabling the usage of computational potential of the NVIDIA graphics processing unit (GPU).

Keywords: Lineal path function, homogenization, statistically equivalent periodic unit cell, graphics processing unit.

1. ÚVOD

Modelování náhodných heterogenních materiálů je více oborový vědní problém s celou řadou relevantních inženýrských aplikací. Jedním z nejvíce používaných principů je homogenizační metoda, která je založena na předpokladu nahrazení heterogenní mikro-/mezostruktury ekvivalentním homogenním materiálem (Torquato, 2002). V současné době jsou používány nejvíce tyto dva hlavní homogenizační přístupy: (i) výpočetní homogenizace (Zeman & Šejnoha, 2007; Vorel et al., 2011) a (ii) teorie efektivního média (Vorel & Šejnoha, 2009). Zatímco první soubor homogenizačních technik studuje rozložení lokálních polí v typickém heterogenním vzorku materiálu za pomoci numerických metod, tak potom druhá skupina odhaduje odezvu vzorku analyticky na základě geometrických informací studovaného média (např. křivka zrnitosti a další).

My se zde zaměříme na homogenizační techniky (skupina (i) - výpočetní homogenizace) založené na konceptu statisticky ekvivalentní periodické jednotkové buňky, především potom na statistický popis mikro-/mezostruktury zkoumaného materiálu. Generování SEPUC je založeno na optimalizaci vhodných statistických deskriptorů. Jedním z nejčastěji používaných skupin deskriptorů jsou n -bodové distribuční funkce. Jejich hlavním nedostatkem jsou málo hodnotné informace o fázové spojitosti struktury, viz Obr. 1, a proto se zde zaměří na využití komplexnějšího statistického deskriptoru - "lineal path function". Z hlediska výpočetní náročnosti, zejména při optimalizačním procesu SEPUC, je její použití časově velice náročné. Představíme zde proto urychlení výpočtu "lineal path function" pomocí grafických procesorů.



Obr. 1 : Mikrostruktury spongiózní kosti získané počítačovou tomografií (Jiroušek et al., 2008)

Následující odstavec se zabývá popisem "lineal path function". V odstavci 3 je nastíněna algoritmická implementace a v poslední části je ukázáno urychlení výpočtu "lineal path function" využitím grafických procesorů. Obdržené výsledky jsou porovnány se sekvenční verzí programu.

2. LINEAL PATH FUNCTION

"Lineal path function", viz (Lu & Torquato, 1992), patří do skupiny funkcí nižšího řádu zkoumající mikro-/mezostrukturu materiálu. Do této skupiny rovněž patří např. fázové objemové zastoupení, specifický povrch, distribuce velikosti pórů, dvoubodová pravděpodobnost a další, které jsou

speciální případy obecné n -bodové distribuční funkce. n -Bodová distribuční funkce vykazuje podstatný nedostatek, kterým je nepřesná interpretace velkých fázových shluků v popisu struktury, (Lu & Torquato, 1992). Tato vlastnost může hrubě ovlivnit počítané makroskopické vlastnosti zkoumaného média. Naneštěstí, zjevná nevýhoda n -bodové distribuční funkce je již v "Lineal path function" odstraněna a přináší tak více detailních informací o fázové spojitosti. Její matematický popis vychází z definice elementární funkce, pro kterou platí

$$\lambda_r(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \alpha) = \begin{cases} 1, & \text{if } \mathbf{x}_1\mathbf{x}_2 \subset D_r(\alpha), \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (1)$$

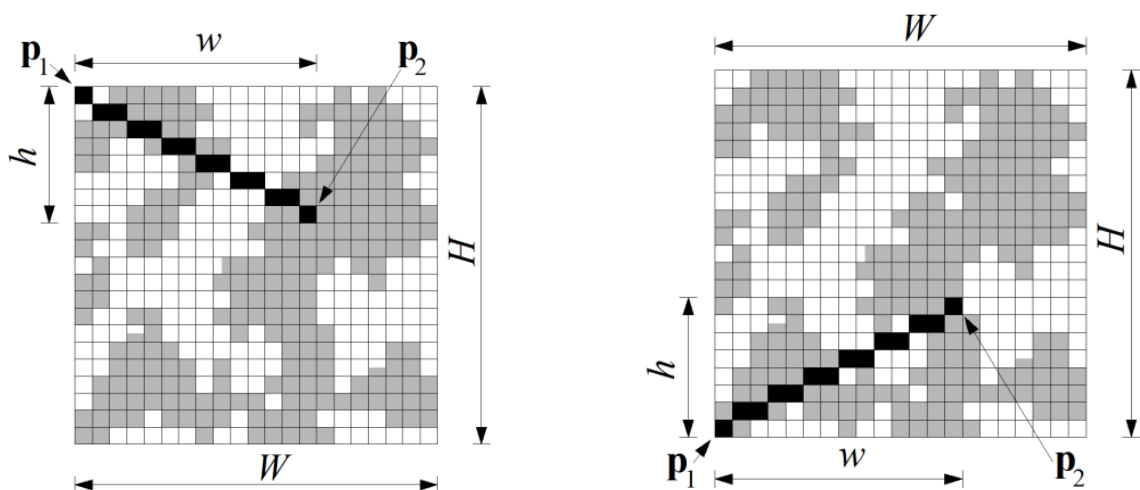
Funkce nabývá hodnoty 1 pro úsek $\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2$ který je celý obsažen ve fázi r vzorku α a hodnoty nula v ostatních případech. "Lineal path function" potom představuje pravděpodobnost, že úsek $\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2$ leží ve fázi r . Funkce je dána předpisem

$$L_r(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \overline{\lambda_r(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \alpha)}, \quad (2)$$

kde pravá strana představuje střední hodnotu elementární funkce. Podmínkou statistické homogenity a isotropie se předpis funkce zjednoduší na následující tvar

$$L_r(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = L_r(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) = L_r(\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\|). \quad (3)$$

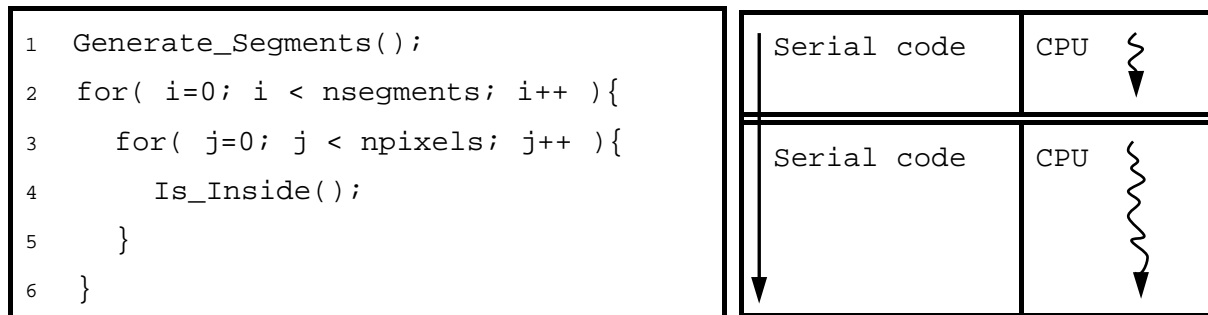
Jestliže body \mathbf{x}_1 a \mathbf{x}_2 mají stejné prostorové souřadnice, tak potom vypočtená hodnota "lineal path function" se rovná objemovému zastoupení fáze r . Na druhou stranu, pro body \mathbf{x}_1 a \mathbf{x}_2 dostatečně vzdálené od sebe je vypočtená hodnota "lineal path function" rovna nule.



Obr. 2: Schéma "lineal path function"

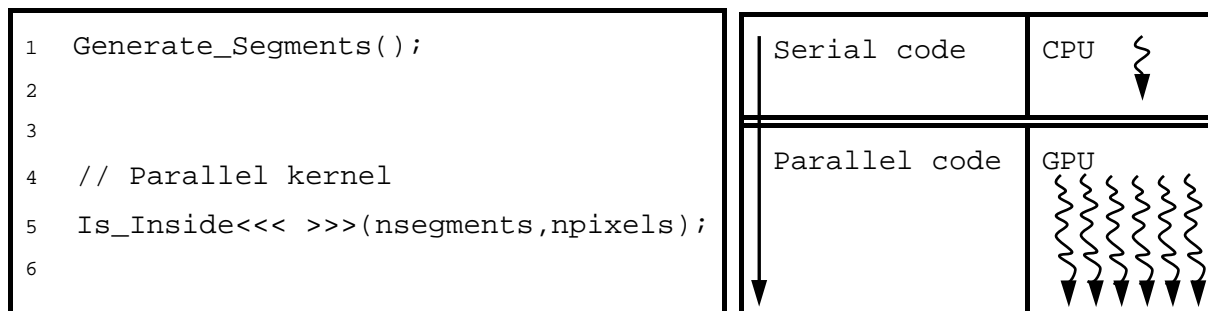
3. ALGORITMICKÁ STRUKTURA

Vytvoření statistické ekvivalentní periodické jednotkové buňky je obvykle založeno na analýze digitálních obrazů, které představují studované medium. Jednotlivé úseky jsou definovány jako soubor pixelů spojující pixel \mathbf{p}_1 – počáteční a pixel \mathbf{p}_2 – koncový. Poloha obecného pixelu \mathbf{p}_i je definována pomocí dvojice souřadnic w ($w \in (1, W)$) a h ($h \in (1, H)$), kde W a H jsou rozměry digitálního obrazu. Soubor úseků obsahující pixely $\mathbf{p}_1 = (1, 1)$ až $\mathbf{p}_2 = (w, h)$ je získán pomocí algoritmu navrženého v (Bresenham, 1965). K vytvoření úplného souboru úseků a zahrnutí tak všech směrů je zapotřebí vytvořit druhou sadu úseků, které začínají v $\mathbf{p}_1 = (1, H)$ a končí v $\mathbf{p}_2 = (w, h)$. Jakmile je soubor úseků definován, výpočet "lineal path function" spočívá v posunu každého vytvořeného úseku po celém digitálním obrazu. Zároveň je spočítáno porovnání, zdali všechny pixely daného úseku naleží do vyšetřované fáze materiálu.



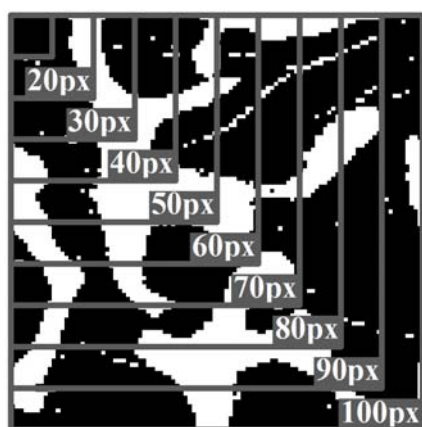
Obr. 3: Schéma sekvenčního kódu

Generování úseků je v rámci výpočtu "lineal path function" pro danou velikost digitálního obrazu provedeno pouze jednou a proto tato část algoritmu nemusí být až tak rychlá. Stěžejní částí algoritmu z hlediska časové efektivity je posun úseků po obrazu a následné vyhodnocení elementární funkce. Tento segment kódu je opakovaně volán pro každý nový obraz vytvořený v průběhu optimalizace statisticky ekvivalentní jednotkové periodické buňky. Sekvenční schéma kódu je ukázáno na Obr. 3.

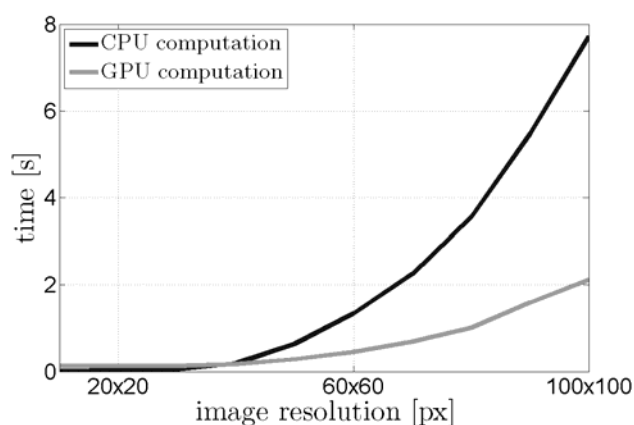


Obr. 4: Schéma paralelního kódu na grafickém procesoru

Jednou z poměrně dostupných a populárních technologií pro urychlení našeho výpočtu je použití grafického procesoru (GPU). Grafické karty jsou určeny převážně pro náročné výpočty 3D vizualizací v počítačových hrách a proto je jejich architektura výrazně odlišná od procesorů (CPU). Jedná se o paralelní architekturu s masivním počtem jednoduchých vláken. Ve speciálních úlohách může proto dosáhnout výrazného urychlení oproti výpočtu na CPU. V současné době je díky společnosti NVIDIA nejrozšířenější architektura CUDA - Compute Unified Device Architecture – s programovacím jazykem CUDA C. V našem algoritmu jsme využili vysoké množství vláken k paralelnímu řešení posunu úseků a porovnání, viz Obr. 4.



(a)



(b)

Obr. 5: (a) Testovaný obrázek; (b) Porovnání výpočtů na CPU a GPU

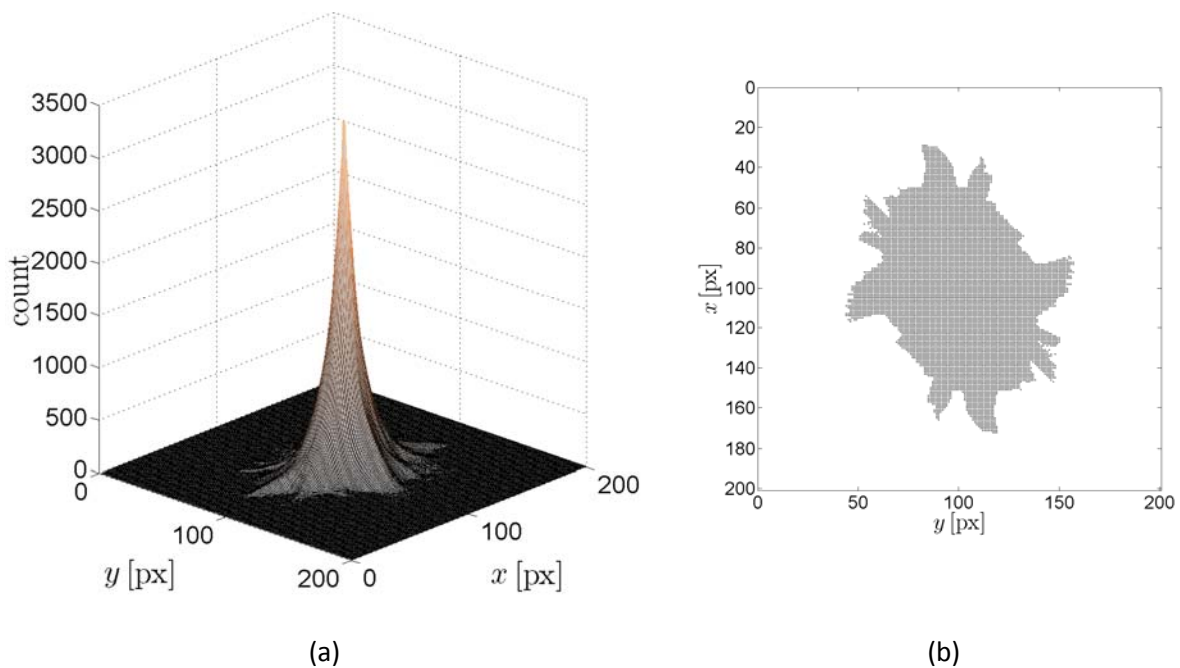
4. VÝSLEDKY A ZÁVĚR

V příspěvku byly porovnány dvě varianty výpočtu “lineal path function” – sekvenční verze a paralelní verze vytvořená pro grafickou kartu, viz Obr. 6. Výpočty byly provedeny na počítači s následujícími parametry: procesor – INTEL Core 2 Duo CPU E 6750 @ 2.66 GHz, operační paměť – 3.25 GB RAM, grafická karta – GeForce 8600 GTS, operační systém – Microsoft Windows XP SP 3 a verze programovacího jazyka – CUDA v. 1.1. Časové porovnání obou výpočetních variant bylo provedeno na digitálních obrázcích s proměnnou velikostí (10x10 px až 100x100 px), viz Obr. 5a. Na Obr. 5b jsou znázorněny jednotlivé časy nezbytné pro vyhodnocení “lineal path function”. Z Obr. 5b jsou patrné následující závěry:

- Při velmi malých rozměrech digitálního obrazu je sekvenční výpočet efektivnější než paralelní verze z důvodu komunikace – kopírování dat na grafickou kartu.
- Při velikosti digitálního obrazu větší než 50x50 px se začnou projevovat výhody paralelního kódu, přičemž uspořádaný čas roste exponenciálně.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za finanční podpory Grantové agentury ČR 105/11/0411 a 105/11/P370.



Obr. 6: (a) Výsledná "lineal path function" (b) Řez "lineal path function" v rovině $z = 0$

LITERATURA

Bresenham, J.E. (1965) Algorithm for computer control of a digital plotter. IBM System journal, 4, 1, pp. 25-30.

Jiroušek, O., Vavřík, D., Jakůbek, J. & Dammer, J. (2008) Correlation of trabecular bone mechanical properties to its microstructure using CT-based FE modeling, in: Proc. Engineering Mechanics, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague.

Lu, B. & Torquato, S. (1992) Lineal-path function for random heterogeneous materials, Physical Review E, 45, 2, pp. 922-929.

NVIDIA Corporation (www) 2701 San Tomas Expressway Santa Clara, CA 95050, USA.
<http://developer.nvidia.com/page/home.html>

Torquato, S. (2002). Random heterogeneous materials. Springer-Verlag, New York.

Vorel, J. (2009) Multi-scale modeling of composite materials. Ph.D. thesis, CTU in Prague, Prague.

Vorel, J. & Šejnoha, M. (2009) Evaluation of homogenized thermal conductivities of imperfect carbon-carbon textile composites using the Mori-Tanaka method. Structural Engineering and Mechanics, 33, 4, pp. 429-446.

Vorel, J., Zeman, J., Šejnoha, M. & Tomková, B. (2011) Homogenization of plain weave composites with imperfect microstructure: Part II-Analysis of real-world materials, submitted for publication.

Zeman, J. (2003) Analysis of Composite Materials with Random Microstructure. Ph.D. thesis, CTU Reports, 7, 3 CTU Press, Prague.

Zeman, J., Šejnoha, M. (2007) From random microstructures to representative volume elements. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 15, 4, S325-S335.