Rovinné triangulace a jejich aplikace

I.Kolingerová

Obsah

A) Definice triangulace

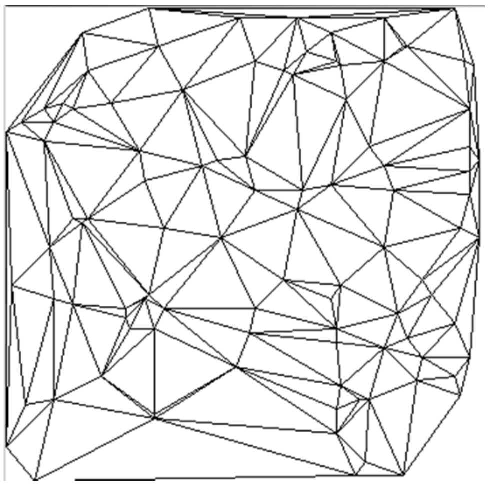
B) Triangulace v 2D

1. Kritéria kvality sítě
2. Hlavní typy
3. Delaunayova triangulace
4. Greedy triangulace
5. Triangulace s minimální váhou
6. Triangulace s omezením
7. Datově závislé triangulace
8. Multikriteriálně optimalizovaná triangulace
9. Aplikace

A) Definice triangulace

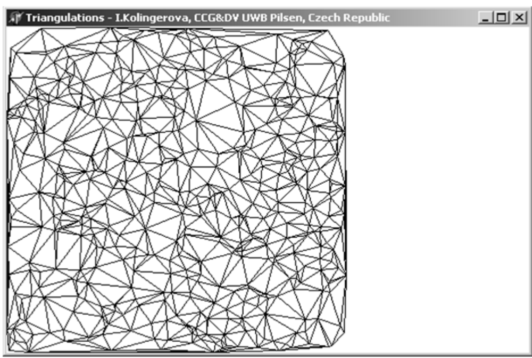
Triangulace $T(P)$ množiny N bodů v E^d - rozdělení $CH(P)$ na simplexy s vrcholy z P

- složitost nejméně $O(N \log N)$ v E^2 a $O(N^2)$ v E^3



AVG 3/36

- Počet hran v E^2:
  - nejvýše $3N$-6
  - přesně $3N$-3-N_{CH} v E^2



AVG 4/36

B) Triangulace v 2D

1. Kritéria kvality sítě

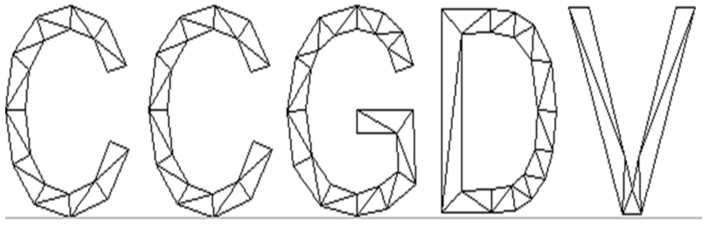
- pro danou množinu bodů mnoho triangulací = > kterou vybrat ?

- „co nejrovnostrannější trojúhelníky“
  = > úhlová kritéria (maximalizace min. úhlů, minimalizace maximálních úhlů) a hranová kritéria (co nejkratší součet délek hran)

AVG 5/36

Další požadavky:

– včlenění určitých povinných hran (constraints = > triangulace s omezením - constrained triangulation)
– zachování nekonvexního tvaru oblasti ...

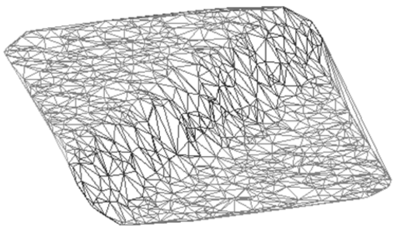


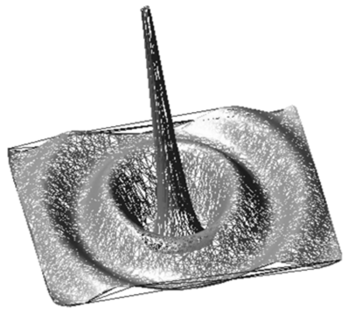
AVG 6/36

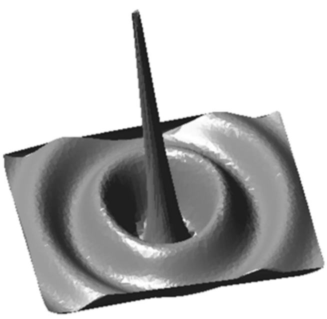
Požadavky na algoritmus:

– nízká složitost v nejhorším i očekávaném případě
– snadnost implementace
– numerická robustnost, malá citlivost na singulární případy
– použitelnost pro vyšší dimenzi
– použitelnost pro přibývání a ubývání bodů
– paralelizovatelnost

FEM varianta: dána pouze hranice oblasti







Příklady triangulací

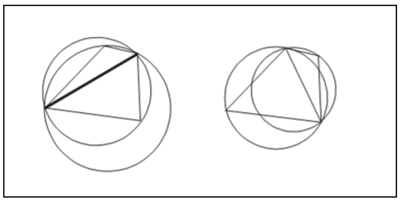
2. Hlavní typy triangulací

- Delaunayova - *DT*
- žravá (hltavá, greedy) - *GT*
- triangulace s minimální váhou - *MWT*
- triangulace s omezením (constrained triangulation) - *CDT, CGT*
- datově závislé triangulace – *DDT*
- multikriterálně optimalizované triangulace

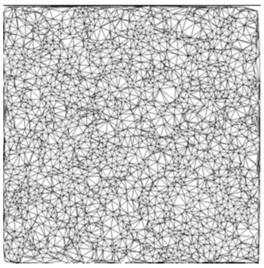
AVG 9/36

3. Delaunayova triangulace

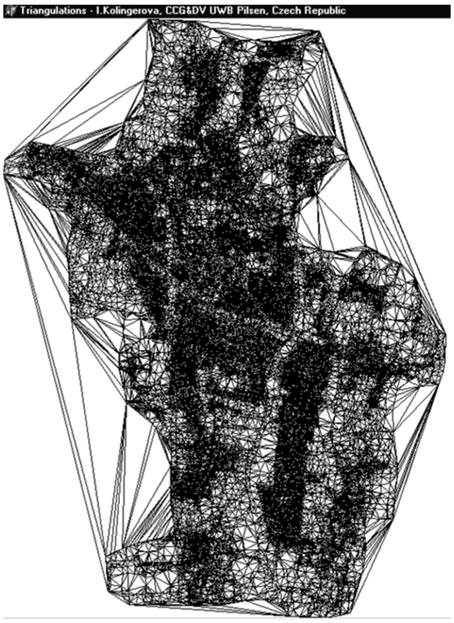
- kružnice opsaná libovolnému trojúhelníku z *DT(P)* neobsahuje ve svém vnitřku žádný bod z *P*



- maximalizuje minimální úhel
- ze všech triangulací trojúhelníky nejblíže k rovnostranným



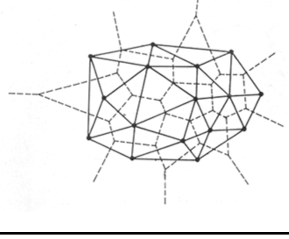
AVG 10/36



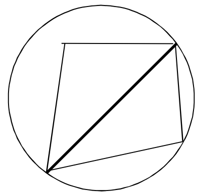
Reálná datová množina
(60 244 bodů,
120 465 trojúhelníků)

Hlavní algoritmy výpočtu *DT*:
- přímé
  - lokální prohazování hran
  - inkrementální vkládání
  - inkrementální konstrukce
  - převod do vyšší dimenze
  - rozděl a panuj
  - zametání ...
- nepřímé - přes Voronoiův diagram

(Etalon: Shewchuk:Triangle)



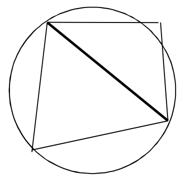
Lokální prohazování

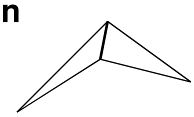


Vstup: ***P* – množina bodů v rovině**

Výstup: ***LOT(P)* – Lokálně optimální triangulace**

1. **begin**
2. Zkonstruuj počáteční triangulaci *T(S);*
3. **while** *T(S)* není lokálně optimální **do**
4. **begin**
5. **If** existuje vnitřní hrana *e*, kt. není lokálně optimální **then**
6. flip hrany *e*;
7. **end;**
9. **end** $O(N^2)$, resp. $O(N)$



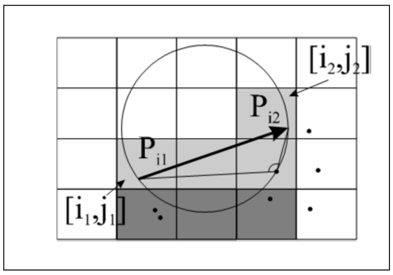


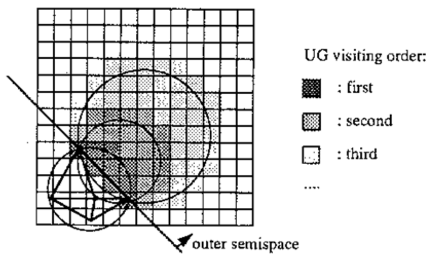
Lokální prohazování

Vlastnosti:

- velmi jednoduché,
- oček.čas. složitost *O(N),*
- paměťové nároky *O(N)*
- není on-line, sériový,
- nemusí fungovat v 3D
- základ výpočtu pro libovolné lokální kritérium (např. pro *DDT*)

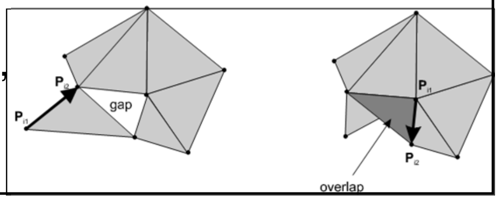
Inkrementální konstrukce



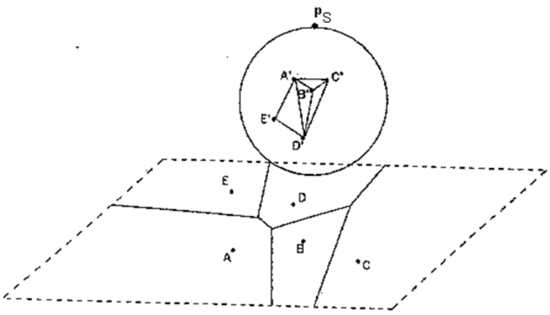


Vlastnosti:

- oček.čas *O(N log N),* velmi pomalé,
- oček.paměť *O(N)*
- není on-line, sériový,
- rozšiřitelný do 3D,
- nestabilní

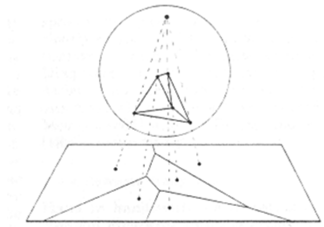


Včlenění do vyšší dimenze



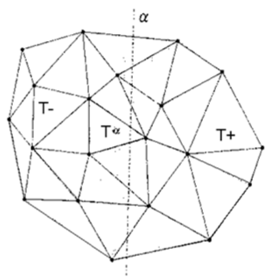
Vlastnosti:

dané algoritmem pro *CH(S)*



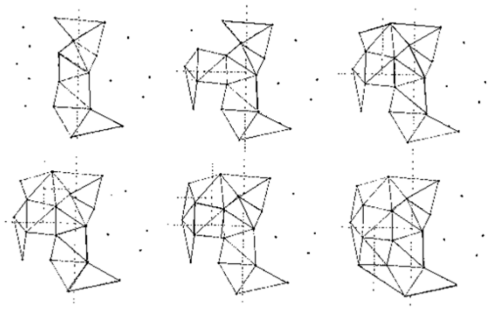
Rozděl a panuj

např. algoritmus De Wall



Dělení DT

do 3 skupin



Některé fáze DeWall

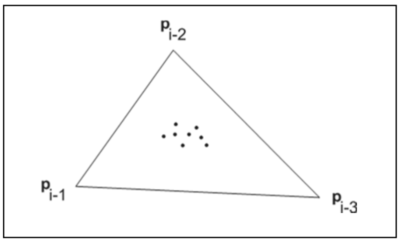
Rozděl a panuj

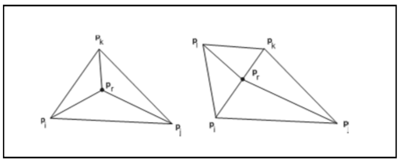
Vlastnosti:

- očekávaný čas *O(N),*
- očekávaná paměť *O(N),*
- není on-line,
- je rozšiřitelný do 3D ,
- náročná implementace,
- často paralelizován

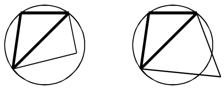
AVG 18/36

Inkrementální vkládání





Počáteční situace   Vkládání bodu



Swap (legalizace)

Inkrementální vkládání

Vstup: ***P* – množina bodů v rovině**

Výstup: ***DT(P)* – Delaunayova triangulace**

1. begin

2. Zkonstruuj počáteční trojúhelník přidáním 3 vnějších vrcholů;

3. Pro všechny body opakuj

4.   **begin**

5.   Najdi trojúhelník obsahující vkládaný bod;

6.   Rozděl trojúhelník;

7.   Rekurzivně legalizuj nové trojúhelníky;

8.   **end;**

9. Odstraň všechny trojúhelníky obsahující přidané vrcholy;

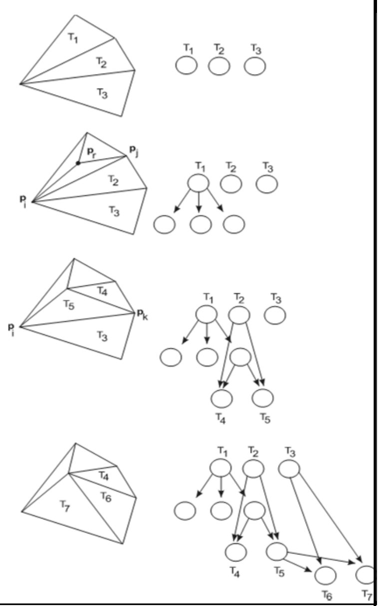
10. end $O(N^2)$, resp. $O(N \log N)$

Inkrementální vkládání

Lokace : hrubá síla
procházka
DAG ….

Vlastnosti (s DAG):

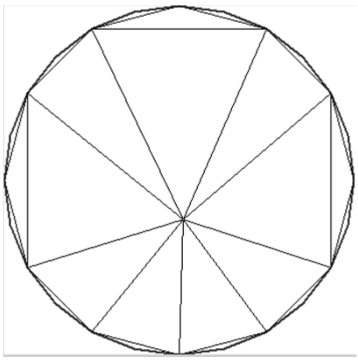
- oček. čas $O(N \log N)$,
- oček. paměť $O(N)$,
- sériový, ale lze paralelizovat
- rozšiřitelný do 3D



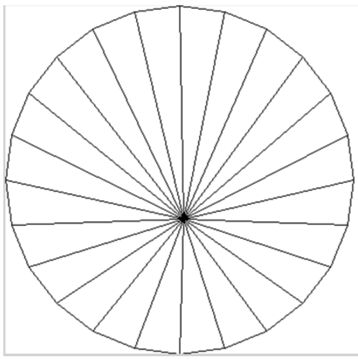
AVG 21/36

4. Žravá (greedy) triangulace

- obsahuje nejkratší vzájemně se neprotínající hrany
- složitost výpočtu $O(N^3)$ až $O(N)$



GT



DT

AVG 22/36

Výpočet *GT*: greedy algoritmus

Vstup: ***P* – množina bodů v rovině**

Výstup: ***GT(P)* – Žravá triangulace**

1. begin

2. Vytvoř všechny možné hrany a seřaď je podle délky vzestupně; $O(N^2 \log N)$

3. Přijmi nejkratší hranu do triangulace;

4. Dokud není triangulace hotova **opakuj** *O(N)*

5. **begin**

6. Vezmi další hranu v pořadí;

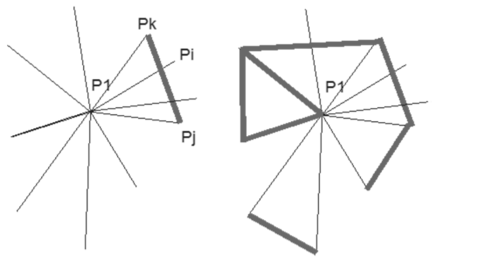
7. Pokud hrana neprotíná žádnou již přijatou hranu, přijmi ji do triangulace;

8. **end**

9. end $O(N^3)$, resp. $O(N^2 \log N)$

AVG 23/36

Jak docílit $O(N^2 \log N)$: Gilbert – test 1 hrany v *O(log N)*

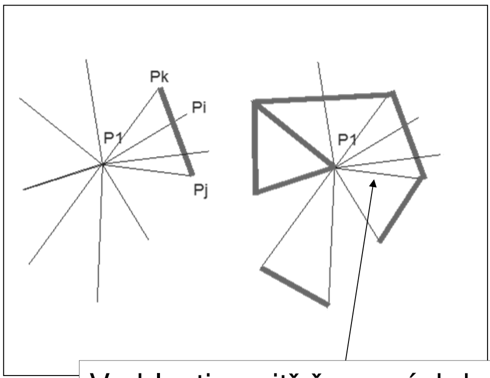


Příklad situace (červené hrany= už přijaté hrany triangulace)

- *N*-1 sektorů
- pro každý udržovat 1 hranu nejbližší do středu
- pro každý bod udržovat jednu hvězdu
- hranu testovat v hvězdě jejího počát. bodu
- přijatou hranu vložit do *N*-2 hvězd

Aktuální hrana p_1p_i - protíná nejbližší hranu k p_1 v daném sektoru? (Sektor $p_jp_1p_k$)

AVG 24/36



V oblasti uvnitř červených hranic (=už přijaté hrany triangulace) budou hrany přijaty

- Datová struktura: segmentový strom (sektory hvězdice jsou listy stromu, v uzlech jsou hrany nejbližší ke středu hvězdice)

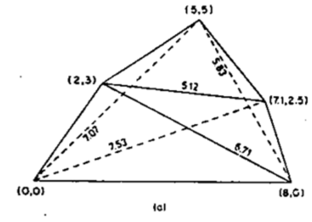
$O(N^2 \log N)$ čas, *$O(N^2)$* paměť

AVG 25/36

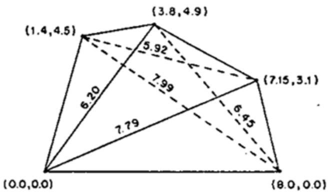
5. Triangulace s minimální váhou (Minimum weight triangulation, *MWT*)

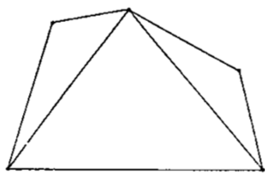
- váha = součet délek hran
- minimální váha ze všech triangulací *P* - globální extrém
- není známo, zda jde spočítat v polynomiálním čase
- nejznámější aproximace: *GT*
- přesný výpočet pomalý, pro velké *N* nemožný => v praxi se *MWT* neužívá

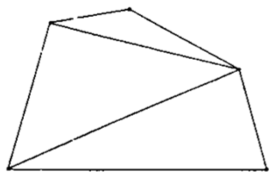
AVG 26/36



Příklad, kde *DT* <> *MWT*
<> *GT*





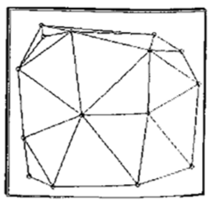


DT (plná čára) *MWT* *GT*

AVG 27/36

Metody konstrukce:

- brutální síla
- polynomiální řešení pro speciální datové množiny
- podgraf MWT
- přibližné řešení

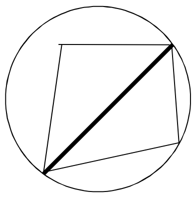


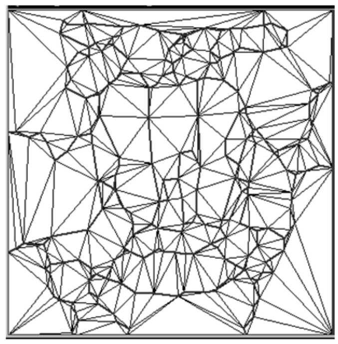
Příklad *MWT* pro *N*=15

AVG 28/36

6. Triangulace s omezením (*CDT*, *CGT*)

- do triangulace vnuceny povinné hrany
- *CGT*: napřed povinné hrany, pak greedy algoritmus
- *CDT*: nutná modifikace definice





přes povinnou hranu „nevidím“
=> neswapuji

AVG 29/36

7. Datově závislé triangulace (*DDT*)

- bere v potaz také výšku bodů
- např. úhel mezi normálami 2 sousedních trojúhelníků
- minimalizovat sumu:

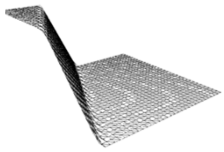
$$ABN = \arccos \frac{\boldsymbol{n_1 n_2}}{|\boldsymbol{n_1}||\boldsymbol{n_2}|}$$

$$ABN_{sum} = \sum_{i=1}^{nE} (ABN_i)^2$$

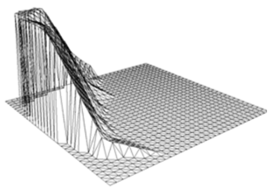
n_1, n_2 – normály soused. trojúhelníků,
nE – počet vnitřních hran triangulace

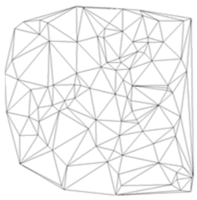
AVG 30/36

DDT se hodí pro:

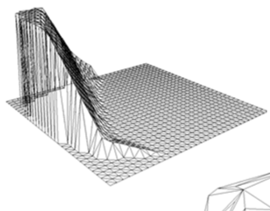


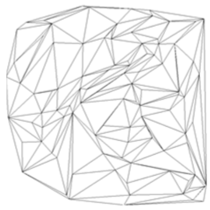
- triangulace bez uvažování výšky nerespektuje ostrý zlom





- s uvažováním výšky



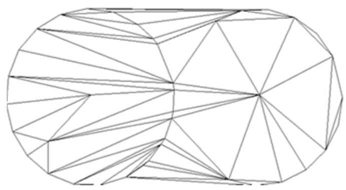


8. Multikriteriálně optimalizované triangulace

- kombinace různých kritérií lokálních i globálních
- genetická optimalizace – není zaručen úspěch

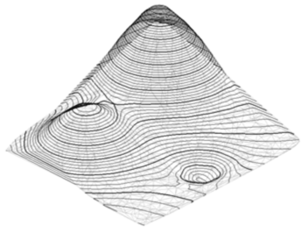
=> vzít 1 z počátečních triangulací DT nebo GT se známými vlastnostmi, genetika vylepší nebo ne ☺

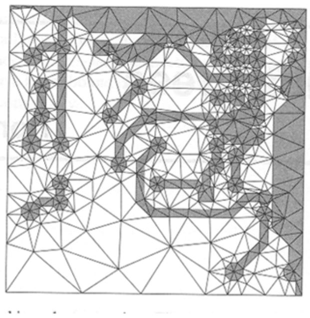
- velká volnost kritérií, ale velmi pomalé



9. Aplikace

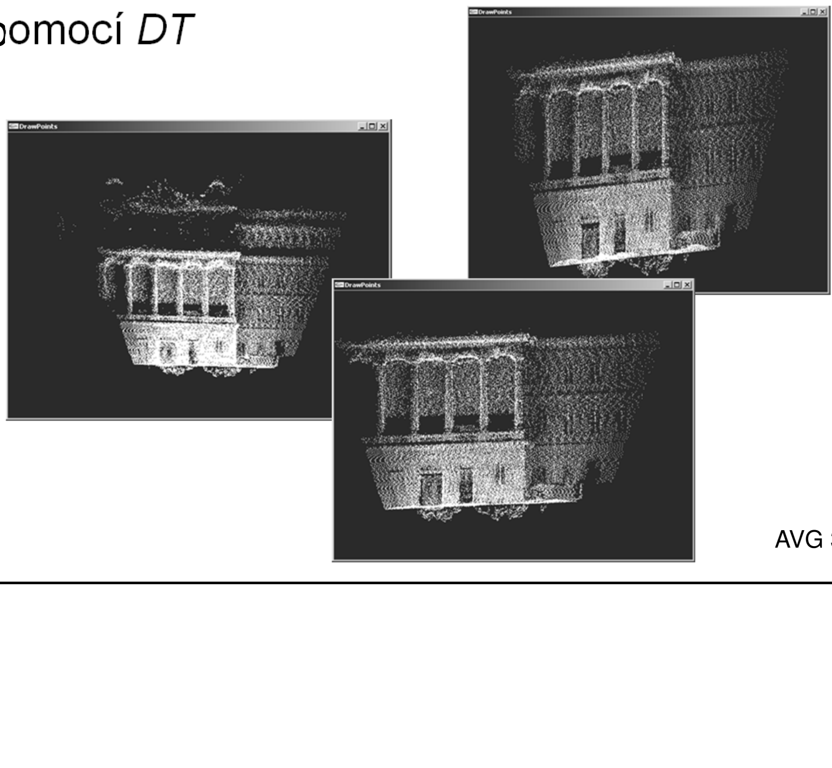
- GIS
- vizualizace a interpolace vědeckých dat
- robotika
- rozpoznávání obrazů
- trojúhelníkové sítě pro FEM
- počítačové sítě (min.kostra)
- přírodní vědy
- problém obrazové galerie …





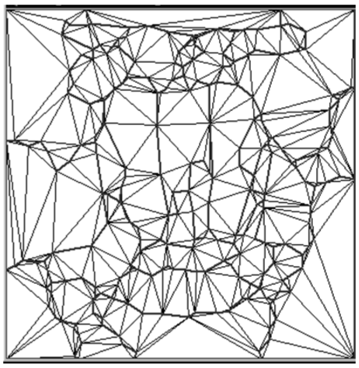
AVG 33/36

Odstranění „outliers“ bodů pomocí *DT*

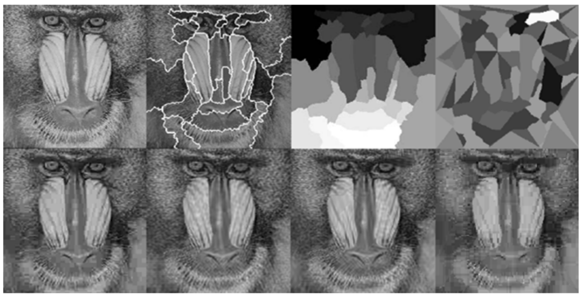


AVG 34/36

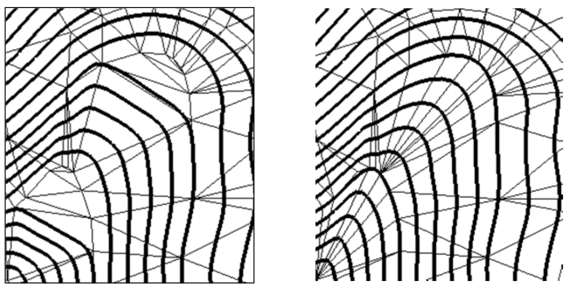
Triangulace oblastí
v dig.obrazu
pro aproximaci



Více informací: J.Polec, M. Partyk



Vylepšování vrstevnic pomocí constraints



Vložení constrained edge zlepší tvar