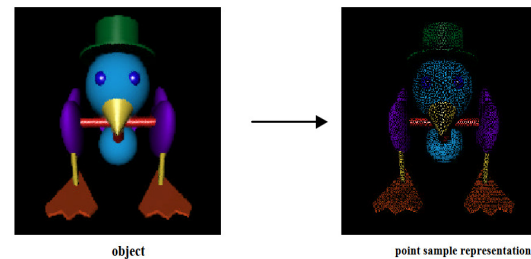


Zpracování a zobrazení mračen bodů

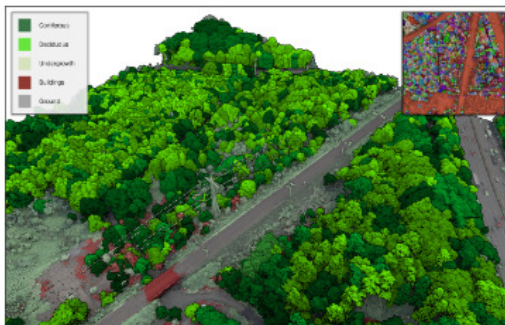
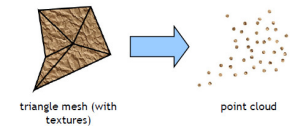
I.Kolingerová

Mračno bodů (1)

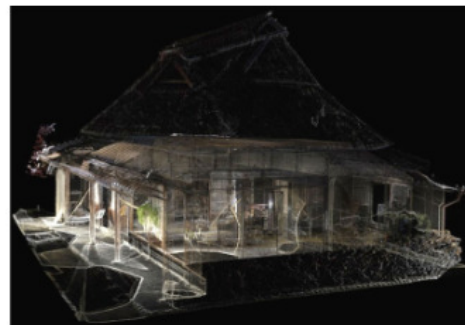


(Grossman and Dally, 1998)

- Soubor prostorových bodů bez garantované struktury nebo pořadí
- Pro každý bod je dána jeho pozice, případně další atributy (barva, intenzita, odrazivost ...)
- Body získány přímo (např. LIDAR) nebo vzorkováním povrchu
- Ukázka (zde NPR zobrazení)



Kartografická vizualizace
(Wegen 2022)



Zobrazení vnitřní struktury
(Hasegawa, 2018)



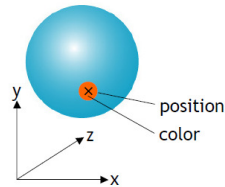
Umělecká abstrakce
(Xu, 2004)

Mračno bodů (2)

- Způsoby zobrazení:
 - **Rasterizace bodů** – reprezentace body stejné velikosti na obrazovce, možnost hw akcelerace, ale nebezpečí rušivých mezer mezi body – vadí, pokud body reprezentují plochu, pak vhodné vyhlazování (např. v prostoru obrazu)
 - **Splatting** – bod zobrazen jako „billboard“, měřítko měněno se vzdáleností od pozorovatele, často transparence, nutno ale odhadovat, často i ukládat parametry každého splatu (velikost, orientace), typicky nutných více průchodů – řešení viditelnosti a barev. přechodů (blending)
 - **3D glyphy** – bod zobrazen tvarem, např. koulí, paraboloidem, zaplněny díry při menší výpočetní náročnosti než splatting, zvlášť vhodné pro částicové simulace
 - **Nevratná konverze** – převod na jinou reprezentaci, např. hladkou plochu, objem, výpočetně náročnější, jeden vstupní bod neodpovídá jedné entitě v nové reprezentaci – nemožný návrat
 - **Ray tracing bodů** – např. kužely nebo válce místo paprsků, výpočet hustoty (RT místo renderování lze použít i v předchozích metodách)
 - **Deep learning a neural rendering** – klasická rasterizace nebo splatting, pak zaplnění děr a vyhlazení přes neuronové sítě, ale nutnost trénovacích obrazů, trénování několik hodin

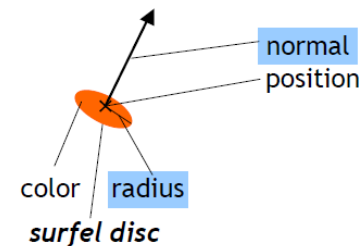
Mračno bodů (3)

- V případě, že jde o vzorky z plochy, bod \sim elementu plochy, tzv. surfelu (SURFace ELeMent) – popis plochy v malém okolí, mezi body typicky interpolace

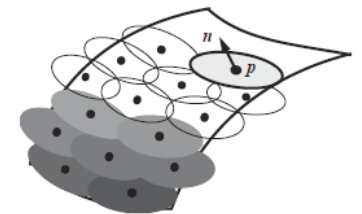


(Zwicker)

- Pro lepší vizualizaci je potřeba více atributů
- Užití kruhového nebo eliptického disku



(Zwicker)



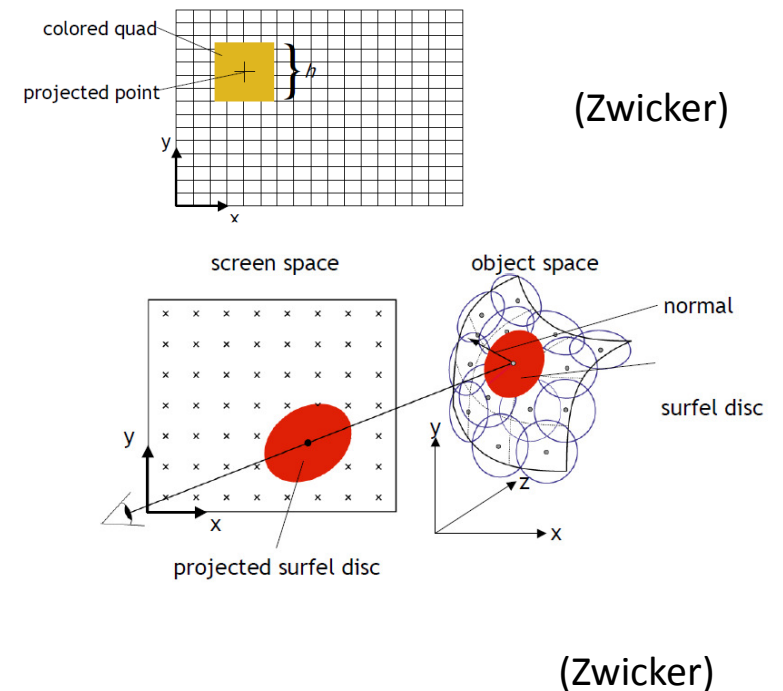
(Sainz, 2004)

Mračno bodů (4)

- Využití „quads“:
 - Vykresli barevný čtverec se středem v promítaném bodě a délkou hrany h ,
 $h = 2rs$, kde

r - poloměr disku,
 s - měřítkový faktor z projekce
a dalších transformací

- Využití projekce disků:
 - Promítne surfel disk z objektového do obrazového prostoru
 - Výslednou elipsu přizpůsob orientaci povrchu

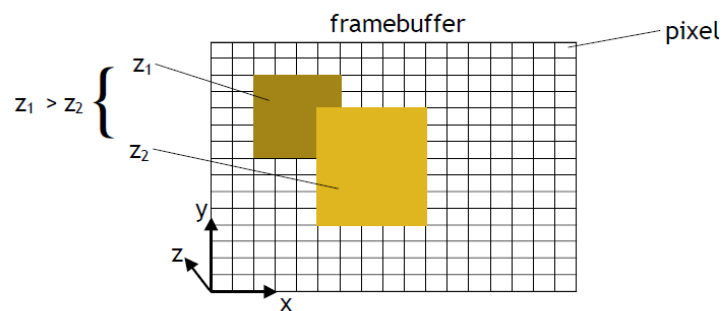


Mračno bodů (5)

- Porovnání obou způsobů:
 - Quads
 - Nižší kvalita zobrazení (primitiva neodpovídají orientaci plochy)
 - Vystínování rychlé
 - Podporováno hw (OpenGL GL_POINTS)
 - Projekce disků
 - Přesně naopak

Mračno bodů (6)

- Zobrazení výsledku pomocí Z-bufferu

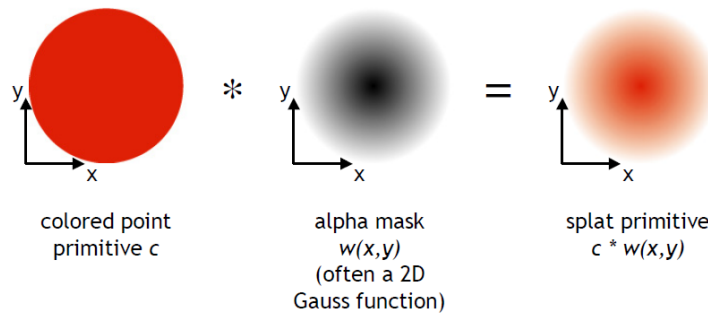


(Zwicker)

Mezi objekty se nedělá barevný přechod

Mračno bodů (7)

- Zobrazení výsledku pomocí techniky splatting
 - tzv. aditivní alfa-blending



Splat se zkombinuje s alfa maskou

$$c(x, y) = \frac{\sum_i \overset{\text{color of splat } i}{c_i} \overset{\text{alpha of splat } i \text{ at position } (x,y)}{w_i(x, y)}}{\sum_i w_i(x, y)}$$

(Zwicker)

- Nutná normalizace, protože suma vah nemusí být 1

$$\sum_i w_i(x, y) \neq 1$$



no normalization

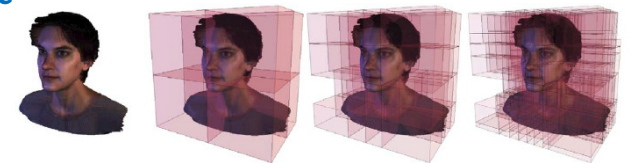


normalized

(Křivánek, 2003)

Mračno bodů (8)

- Hw urychlení:
 - GPU, komplikace: hw vyladěn především na trojúhelníky
 - WebGL – Web-based shadery, např. Potree (Martinez-Rubi, 2015), Firefly (Gurwich, 2023) – pro velká data je vhodné přenášet a renderovat data ze serveru postupně
- Datové struktury:
 - Kvůli velikosti dat typicky data na disku, v paměti jen část – streaming, LOD
 - Octree (nevyváženost), kd-tree (lepší, ale pracnější konstrukce a změny)
 - V případě užití GPU nutno vyhnout se rekurzivnímu průchodu
- Vizualizace – užíván klasický fotorealismus i NPR



(Sainz, 2004)

Mračno bodů (9)

- Pokud data nebyla vzorkována z plochy, ale jde např. o LIDAR data, odlišnosti:
 - Proměnná hustota
 - Mohou obsahovat body na vodorovných nebo svislých plochách
 - Různorodost bodů (vegetace x stavby x terén) – komplikace pro LoD datové struktury – spojování odlišných typů nežádoucí
- Vzhledem k typicky velkému objemu dat užití tzv. out-of-core metod (tj. data nejsou v paměti celá najednou)

Mračno bodů (10)

Ukázka NPR vizualizace:



(Wegen, 2024)

Vstup: LIDAR body a jejich intenzita jasů,
vlevo: přímá rasterizace bodů s normalizovanou intenzitou,
vpravo: NPR zobrazení – falešné barvy podle sémantiky, uvažováno zastínění okolím (ambient occlusion),
zdůraznění hran aj.

Mračno bodů – příklad A (1)

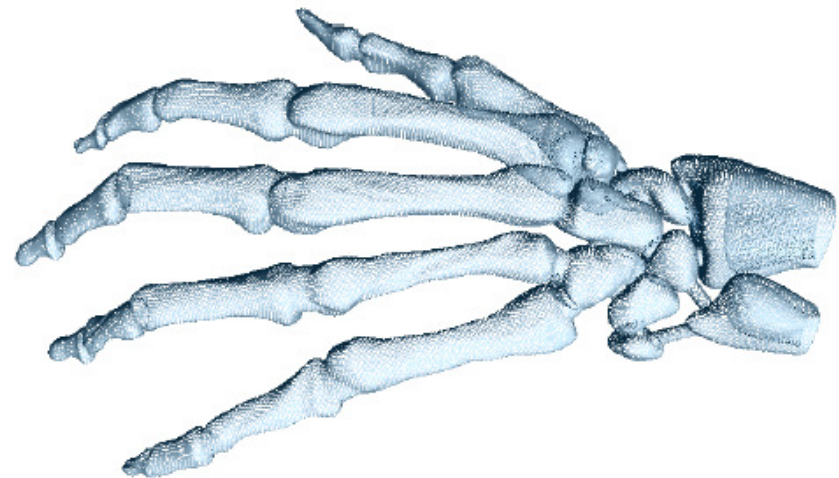
- Př.: Vizualizace v obrazovém prostoru (Rosenthal, 2008)
 - užití GPU, takže rychlé
 - vstupem body s normálami (pokud nejsou, výpočet proložením roviny metodou nejmenších čtverců z k sousedů bodu)
- 1. Zobrazení bodů – osvětlení, promítnutí, neviditelnost
- 2. Vyplnění děr - zobrazené body mohou být na obrazovce vzájemně dál, než je velikost pixelu
- 3. Vyhlazení – cílem hladký přechod mezi barvami
- 4. Antialiasing (volitelně)
- 5. NPR dopňky (volitelně) - tzv. illustrative rendering

Mračno bodů – příklad A (2)

1. Zobrazení bodů

- Promítnutí (osvětlených) bodů s normálami do obrazového prostoru – Phong, perspektiva, vyřazení bodů s normálami směřujícími „dozadu“, využití OpenGL depth bufferu pro rozhodování o bližších bodech v daném pixelu

(327 tis. bodů)



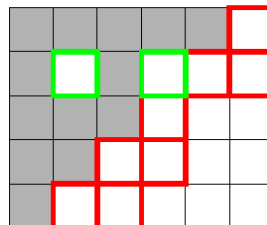
(Rosenthal, 2008)

Mračno bodů – příklad A (3)

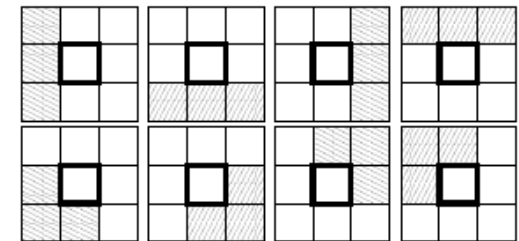
2a) Vyplnění míst, kde je chybně vidět pozadí

- Kontrola jen těch pixelů, které nesousedí jen s pixely pozadí, s využitím kombinace masek 3x3 (pokud shoda s maskou, pixel nevyplňovat)

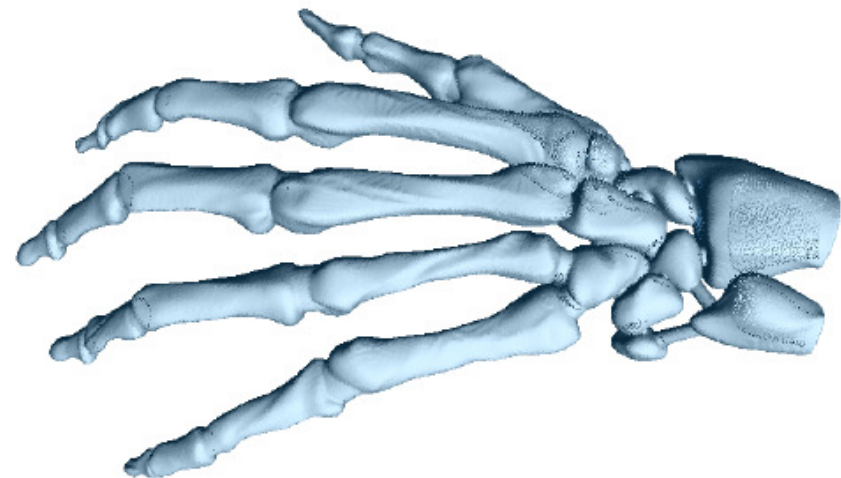
Šedé pixely – vyplněné,
bílé – pozadí,
zelený rámeček – díry k vyplnění,
červený rámeček – nesmí se vyplnit,
jsou za obrysem



- Případné zaplnění pixelu podle sousedního pixelu s nejmenší hloubkou
- Počet iterací podle velikosti děr



Bílé pixely – pozadí, černé – pozadí nebo popředí

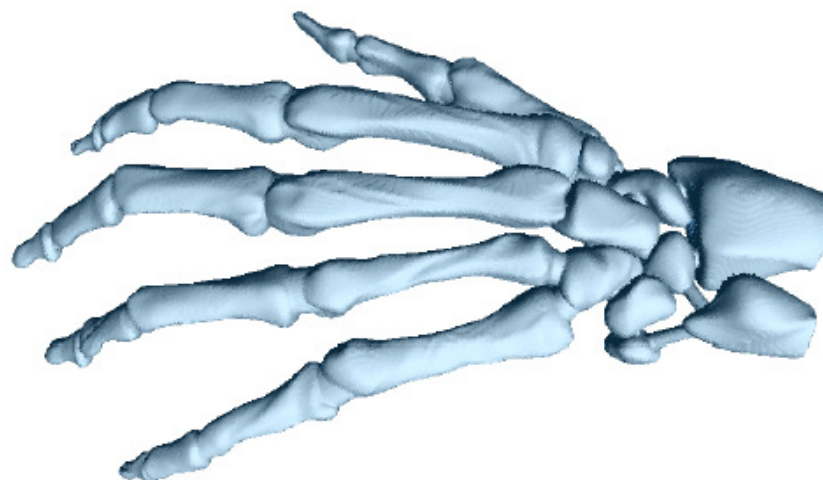


(Rosenthal, 2008)

Mračno bodů – příklad A (4)

2b) Vyplnění míst, kde jsou chybně vidět zakryté části „plochy“

- Dvě přivrácené části plochy ve stejné oblasti obrazovky se nesmí „moc“ lišit v hloubce, minimum známo (trochu „magie“)
- S využitím kombinace masek 3x3 se zaplní jen to, co má, podle sousedního pixelu s nejmenší hloubkou
- Více iterací podle velikosti děr



(Rosenthal, 2008)

Mračno bodů – příklad A (5)

3. Vyhlazení

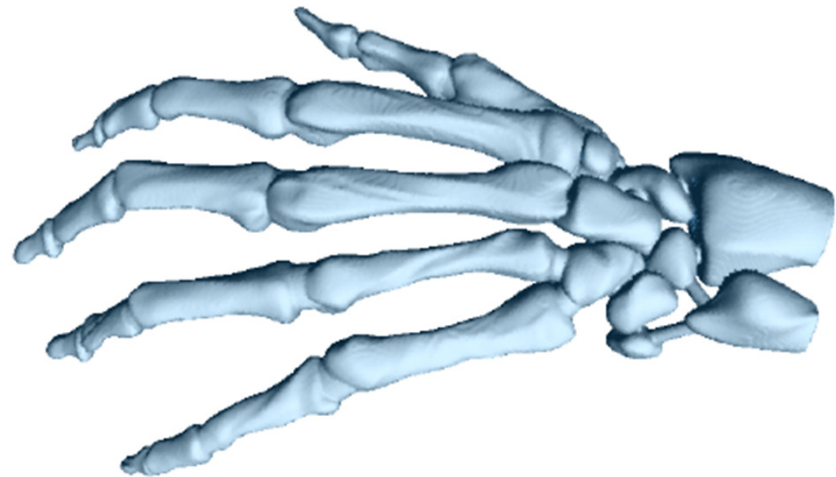
- Pixely nepatřící pozadí se filtrují Gaussovským filtrem velikosti 3x3 (rovnoměrný by moc rozmazal)

$$\frac{1}{9} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Box filter

$$\frac{1}{16} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 2 & 4 & 2 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Gaussian filter



(Rosenthal, 2008)

Mračno bodů – příklad A (6)

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

4. Antialiasing

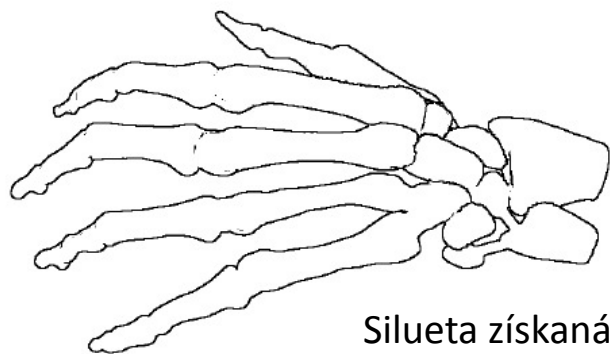
- Filtr na hodnotu hloubky v pixelech na rozhraní pozadí a objektu, případně na rozhraní přední a zadní části objektu, např. Laplace4 3x3, výsledek silueta
- Prahování výsledku vysokou hodnotou - AA jen na rozhraní pozadí a objektu, nízkou – i „sklady“ na ploše
- Kombinace siluety a barvy – výsledek antialiasing



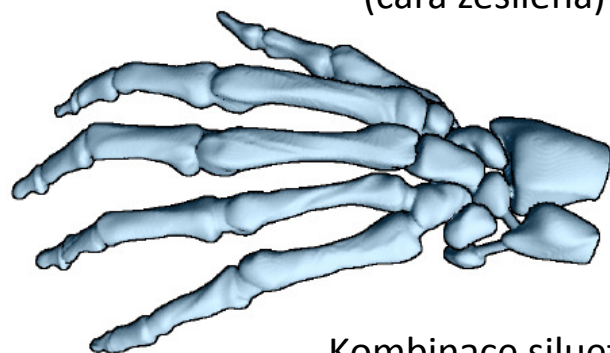
(Rosenthal, 2008)

Mračno bodů – příklad A (7)

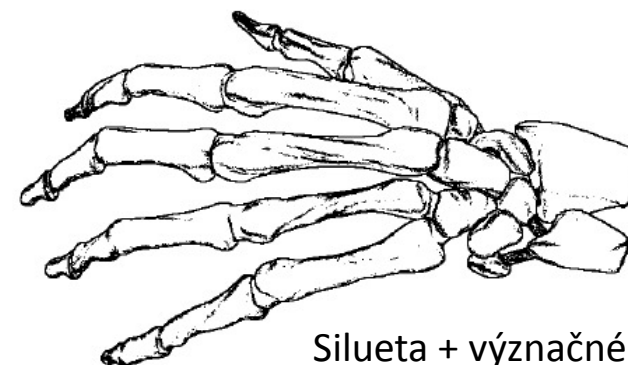
5. NPR doplňky



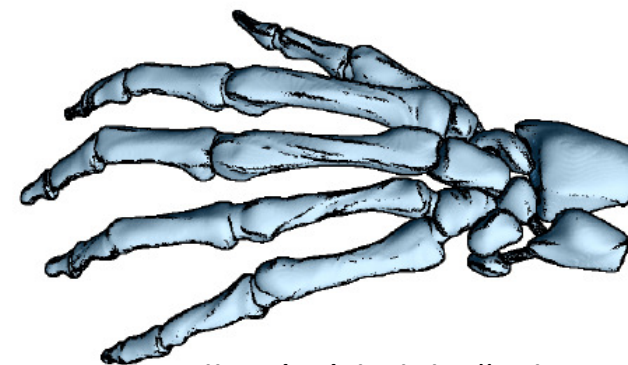
Silueta získaná v AA
(čára zesílena)



Kombinace siluety a osvětlené plochy



Silueta + význačné rysy



Celkový výsledek všech uvedených kroků

Mračno bodů – příklad B (1)

- **Př.:** (Richter, 2015)
 - **Interaktivní out-of-core zobrazení rozsáhlých mračen bodů** (několik miliard) z geo oblasti s využitím kd stromů, body zobrazovány odlišně podle jejich klasifikace (vegetace, stavby, terén)
 - **Uvažované atributy:** barva, třída objektu (vegetace/stavba/terén/voda), normála, „míra vodorovnosti“, globální výška (tj. vzhledem k ostatním bodům téže třídy), lokální výška (tj. vůči okolním bodům téže třídy)
 - **Užité vizualizační techniky** – každá pro jinou třídu, každá na jeden průchod, pak zkombinováno v G-bufferu (specializovaný frame b., v něm barva, hloubka a normála):
 - Splats: OK, ale u překrývajících se bodů stejné třídy problém s vnímáním rozdílů hloubky
 - Sféry: užity místo plochých disků pro zvýšení 3D dojmu (např. vhodné pro vegetaci)
 - Obrysy: splat rozdělen na vnější a vnitřní části, vnější kreslen výrazněji (Xu, 2003)
 - Solid rendering: pro fasády apod. – řídké body, v 2. průchodu zaplnit prostor mezi body pomocí QUADS

Mračno bodů – příklad B (2)

Hlavní problémy:

- Fasády – při letec. snímkování typicky mnohem menší hustota bodů než na vodorovné ploše, je vidět „skrz“, bez zaplnění těžké vnímat jako plochu
- Při zanedbání vzdálenosti od kamery těžké správně vnímat rozdíly hloubky
- Překrývání bodů a díry – vizuální artefakty
- Je vhodné odlišit plochy (terén), struktury (střechy), fuzzy oblasti (vegetace)

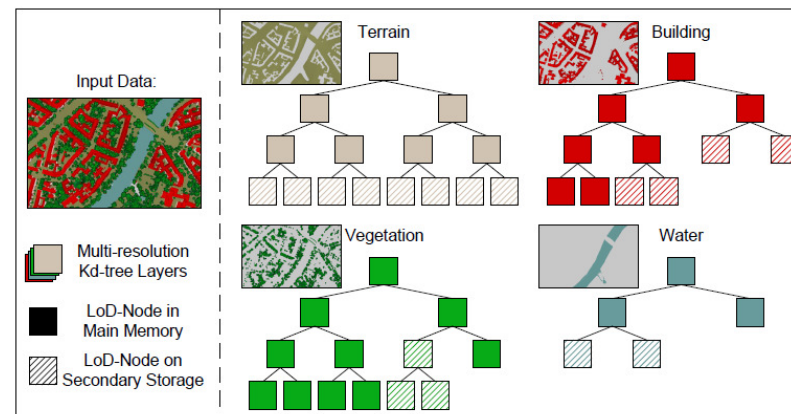


(Richter, 2015)

Vlevo: Mračno bodů vizualizované bez ohledu na klasifikaci bodů (GL_POINTS, velikost 3 pixely), texturované podle letecké fotografie, vlivem pevné velikosti bodu ovlivněné perspektivou v obr. dole díry, nahoře nadbytek bodů; vpravo: různá klasifikace bodů, zaplnění děr na fasádách, pročištěné pozadí

Mračno bodů – příklad B (3)

- Užitá struktura s několika kd-stromy (layered, multi-resolution kd-tree)
 - Oddělené dělení (subdivision) podle třídy
 - Adaptivní, víceúrovňový LoD
 - Lze zobrazit jen některé třídy objektů
 - Lze vybrat různý LoD pro různé třídy a ty zobrazit odlišnou technikou



(Richter, 2015)

- Kořeny všech tříd v hlavní paměti, uzly LoD jsou/nejsou v GPU na základě velikosti projekce jejich obalové koule, práh podle dostupné paměti, typu jejich zobrazení, možnostech GPU, aktuálních požadavků uživatele na detail zobrazení této třídy

Mračno bodů – příklad B (4)

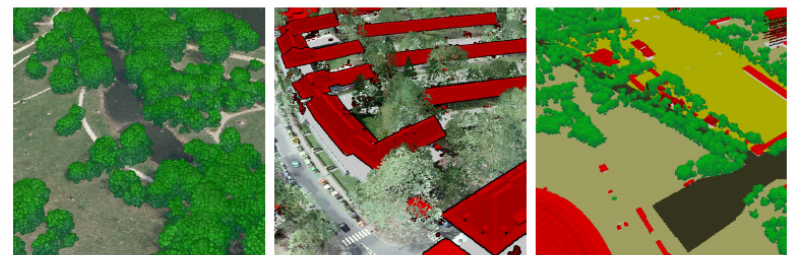
- Ukázka výsledků – vegetace, stavby, terén:
 - a-f, i – splaty
 - g – sféry
 - h,j,l – siluety
 - k – solid rendering



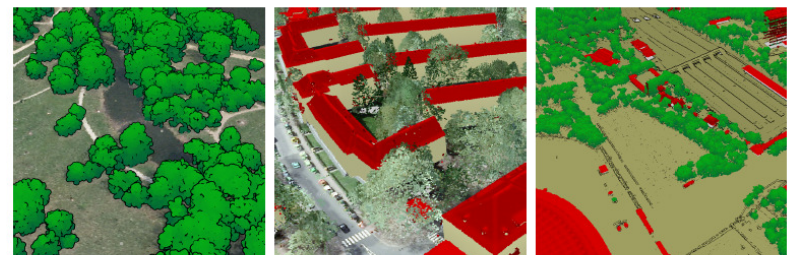
(a) Point Splats; aerial image colors. (b) Point Splats; aerial image colors. (c) Point Splats; aerial image colors.



(d) Points Splats; global height. (e) Point Splats; aerial image colors and object class information. (f) Point Splats; global height.



(g) Point Spheres; local height. (h) Silhouette Rendering; horizontality. (i) Point Splats; object class information.



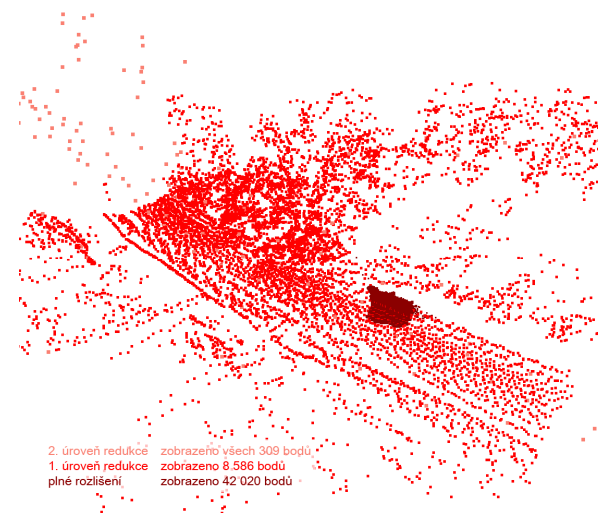
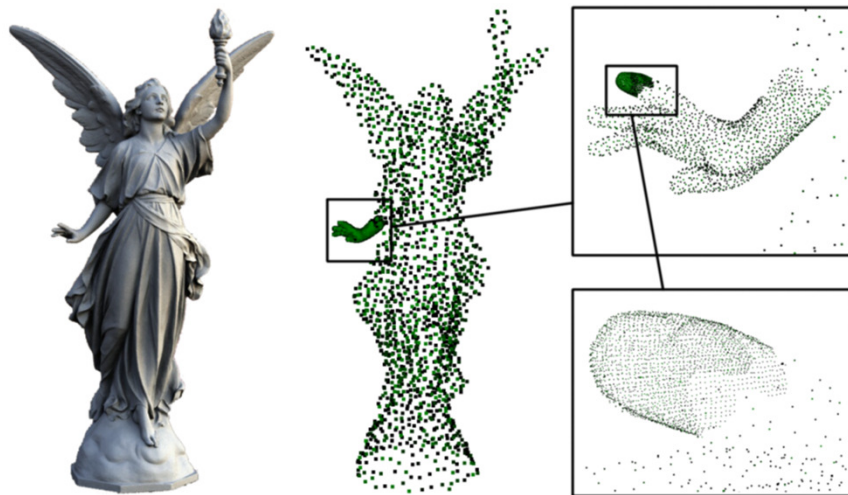
(j) Silhouette Rendering; local height. (k) Solid Rendering; horizontality. (l) Silhouette Rendering; global height.

(Richter, 2015)

Mračno bodů – příklad C -domácí ukázka (1)

- Hierarchická manipulace s velkými geodetickými daty (Skála a spol., 2013)
 - Motivace: bodová mračna v geo oblasti rozsáhlá, požadována i generalizace dat pro různá „měřítka“, ale i dostupnost detailních dat
 - Hlavní myšlenka: Udržovat v paměti model v nízkém rozlišení, vybrané části ve větším detailu
 - Postup:
 1. Víceúrovňové shlukování data streamu, většina uložena na disk
 2. Interaktivní prohlížení dat s možností LOD a případnou dynamickou triangulací (tj. do triangulace jde přidávat a odebírat body)

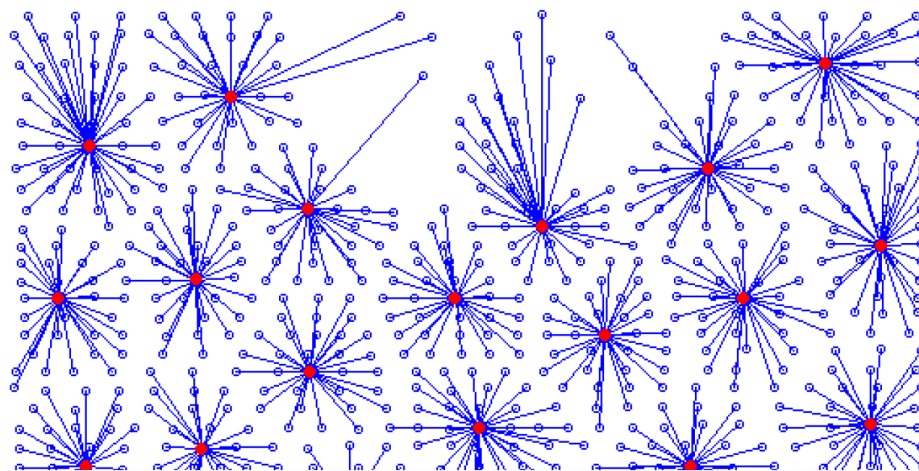
Mračno bodů – příklad C -domácí ukázka (2)



(Skála, 2013)

Mračno bodů – příklad C -domácí ukázka (3)

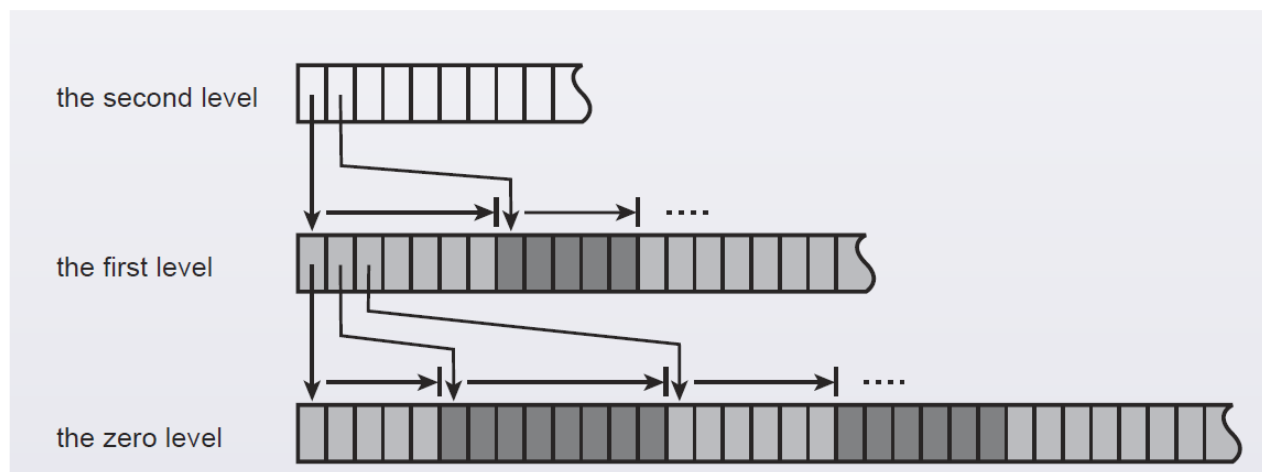
1. Shlukování – skupina podobných bodů (typicky geometricky blízkých) nahrazena jedním reprezentantem – středem shluku



(Skála, 2013)

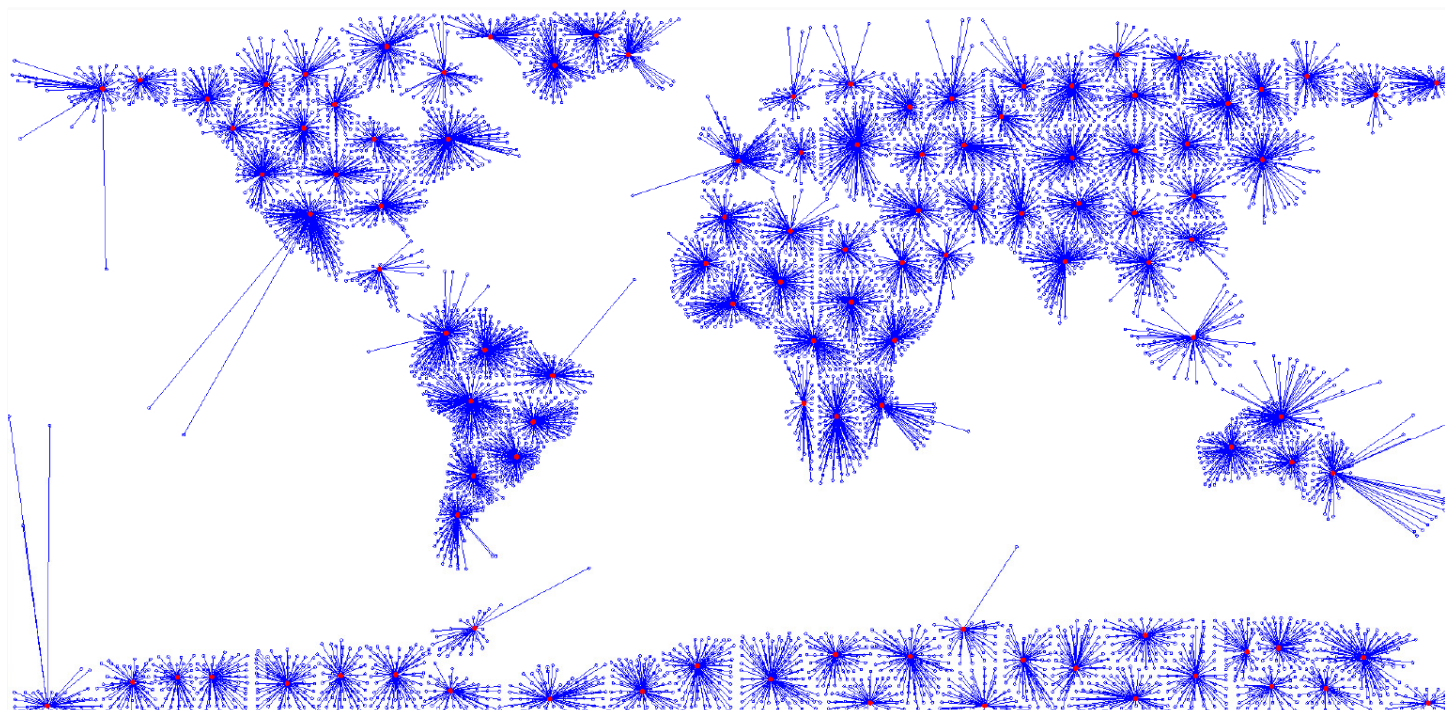
Mračno bodů – příklad C -domácí ukázka (4)

- Shlukování prováděno na data streamu, v jednom průchodu, po blocích, hierarchicky
- Výsledky uloženy do binárních souborů
- Efektivní přístup k jednotlivým bodům v libovolné úrovni hierarchie



(Skála, 2013)

Mračno bodů – příklad C -domácí ukázka (5)



Digitální model Země GTOPO30, 310 mil. bodů
United States Geological Survey

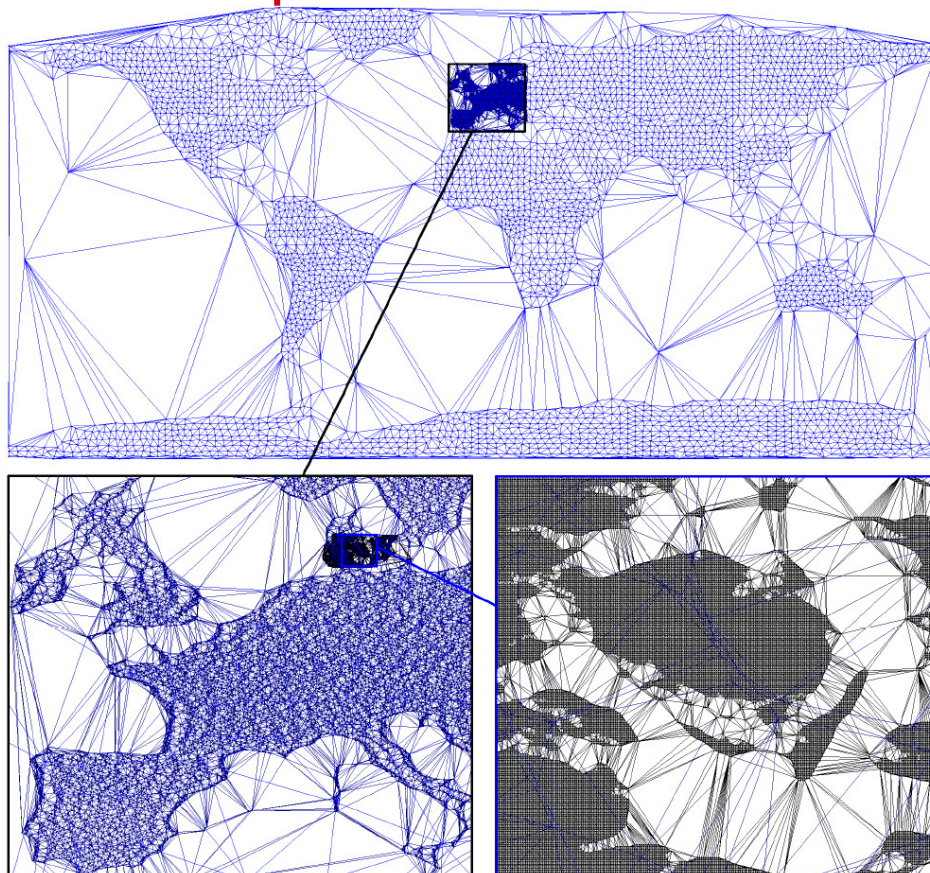
(Skála, 2013)

Mračno bodů – příklad C -domácí ukázka (6)

2. Interaktivní prohlížení dat

- Zobrazena nevyšší úroveň hierarchie bodů, místní zjemňování a naopak redukce podle aktuálního požadavku – shluky se v reálném čase rozbalují nebo zabalují
- Na začátku programu triangularizována nejvyšší úroveň dat, podle potřeby dynamické změny

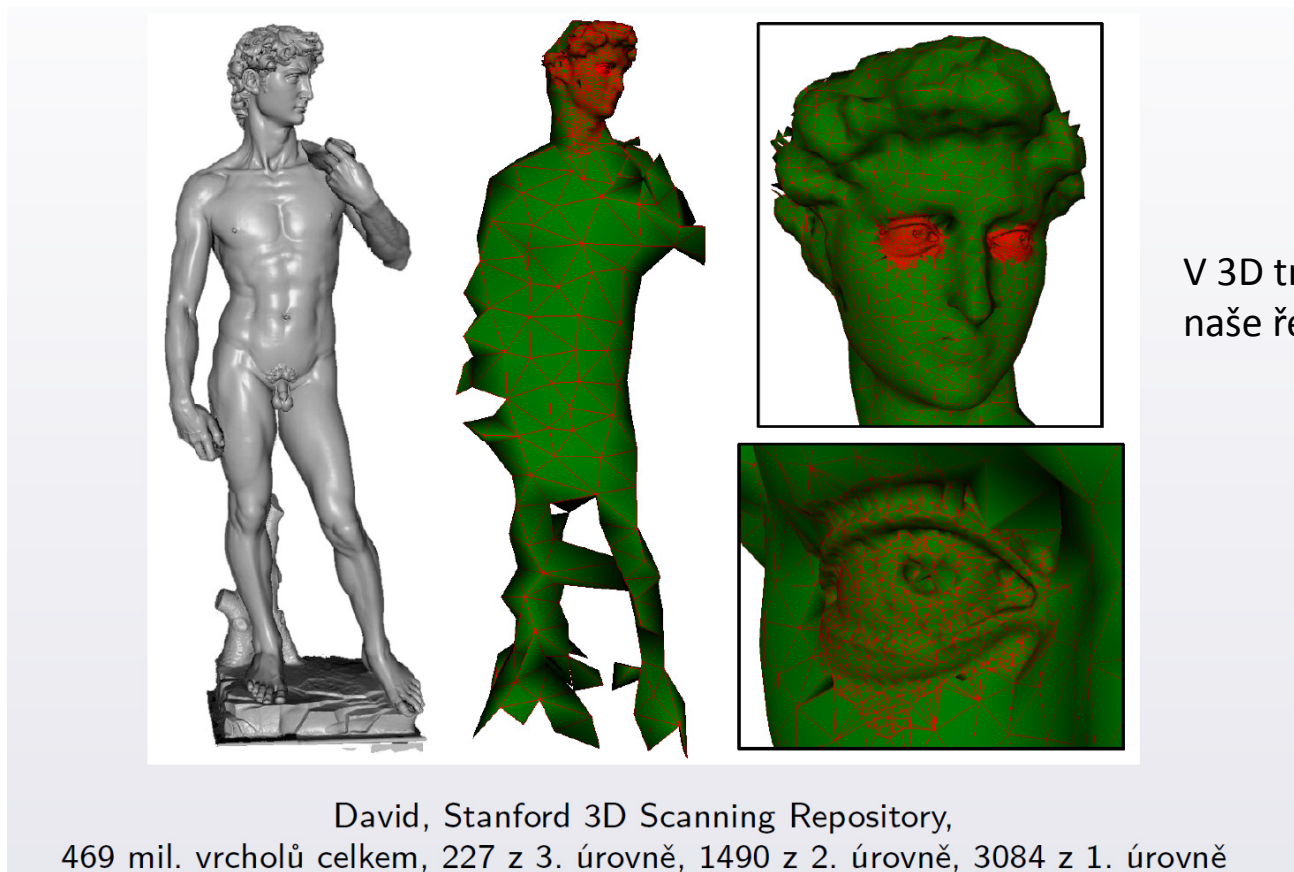
Mračno bodů – příklad C -domácí ukázka (7)



Digitální model Země GTOPO30, USGS,
310 mil. vrcholů celkem, 3600 vrcholů na nejvyšší úrovni

(Skála, 2013)

Mračno bodů – příklad C -domácí ukážka (8)



V 3D triangulace složitější problém,
naše řešení zde ne zcela dotaženo

(Skála, 2013)

Mračno bodů – souvislosti

- Při skenování modelu na shluk bodů nutno řešit registraci – spojení bodů z více skenů do jednoho „správného“ shluku
- Při skenování nepřesnosti, odraz ovlivněn také materiálem



Pohled shora (Štroner, 2013)

- Problém převzorkování – současné metody vzorkují povrch zbytečně podrobně
- Typické úlohy s mračnem bodů: odstraňování šumu, zahušťování, ředění
- U geodat např. odstraňování vegetace, digitální modely terénu, výpočet lokálních charakteristik dat (planarita, sféricita, ...) – typicky využití PCA

Mračno bodů – aplikace (1)

- Architektura, památkářství, stavebnictví (kontrolní měření, zjišťování reálného stavu objektu, změřeny všechny nepravidelnosti, nikoliv teoretické „dokonalé“ tvary, dopravní stavby, terénní útvary, podzemní prostory)



Zdroj: <https://www.g4d.cz/referenc/kategorie/3d-laserove-skenovani-technologickych-celku?id=2> [cit. 2018-09-25, 18:27].

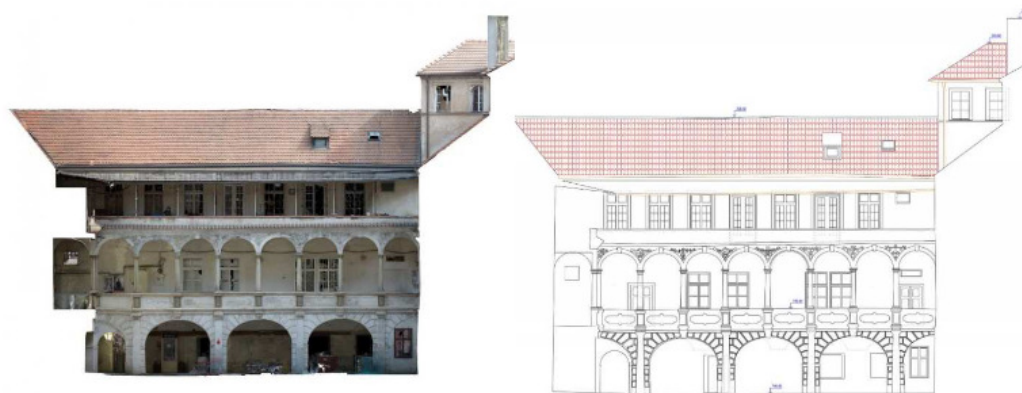
Historický dům v centru Prahy
laserově naskenovaný



Půdorys a řez historickým domem (Malec, 2018)

Mračno bodů – aplikace (2)

- Ještě k budovám



Skutečný (vlevo) a virtuální (vpravo) stav fasády (Malec, 2018)

- Rozpoznávání objektů – překážek, stromů, výpočet objemu dřevní hmoty, monitorování stavu přírody, automobilový průmysl – kontrola přesnosti karosérie aut , syntéza s obrazovými daty (např. výtvarno)

Dynamická ukázka: <https://www.geovap.com/cs/mobilni-mapovani/mracno-bodu>

Mračno bodů – software

- CloudCompare
 - Sw pro vizualizaci a zpracování mračen bodů, umí i trojúh. sítě a dig. Obráz
 - Také projekce, registraci, výpočty vzdáleností, statistika, segmentace, odhad geometrických rysů
 - V C++ s Qt
 - Open Source
- LidarView.com
- Plas.io

Literatura (1)

- (Grossman, 1998) Grossman, J.P. and Dally, W.J.: Point sample rendering, in Proc. EG workshop in Rendering Techniques, EGSR, pp.181-192, https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6453-2_17
- (Gurwich, 2023) Gurwich et al.: Firefly: A Browser-based Interactive 3D Data Visualization Tool for Millions of Data Points, The Astrophysical Journal Supplement Series, 2023, DOI 10.3847/1538-4365/acb59f
- (Hasegawa, 2018) Hasegawa, K. et al.: Application of stochastic point-based rendering to laser-scanned point clouds of various cultural heritage objects. Int. J. Autom. Technol., 12(3):348±355, 2018. doi: 10.20965/ijat.2018.p0348 2, 11, 12,13
- (Křivánek, 2003) Křivánek, J.: Representing and rendering surfaces with points, TR DC-PSR-2003-03
- (Malec, 2018) Metody 3D sčítání objektů, bakalářská práce, Vysoká škola technická a ekonomická, Ústav technicko – technologický, České Budějovice, 2018
- (Martinez-Rubi, 2015) Rubi, O. et al.: Taming the beast: Free and open-source massive point cloud web visualization, 10.13140/RG.2.1.1731.4326/1.
- (Richter, 2015) Richter, R., Discher, S., Döllner, J.: Out-of-core visualization of classified 3D point clouds, in: 3D Geoinformation Science. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12181-9_14
- (Rosenthal, 2008) Rosenthal, P., Linsen, L.: Image-space point cloud rendering, CGI 2008

Literatura (2)

- (Sainz, 2004) Sainz, M. and Pajarola, R.: Point-based rendering techniques, Computers & Graphics 28, pp. 869-879, 2004
- (Skála, 2013) Skála, J.: Algoritmy pro manipulaci s velkými geometrickými daty, disertační práce, FAV ZČU, Plzeň, 2013, na projektu spolupracovali I. Kolíngerová, V. Čada a další členové KGM FAV
- (Štroner, 2013) Štroner, M. et al.: 3D skenovací systémy, ČVUT Praha
- (Wegen 2022) Wegen, O. et al.: Non-photorealistic rendering of 3D point clouds for cartographic visualization. Abstracts of the International Cartographic Association, 5:161,2022. doi: 10.5194/ica-abs-5-161-2022 2, 4, 9, 11, 12, 14
- (Wegen, 2024) Wegen, O. et al.: A Survey on Non-photorealistic Rendering Approaches for Point Cloud Visualization, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3402610>
- (Xu, 2004) H. Xu, H. et al.: PointWorks: Abstraction and rendering of sparsely scanned outdoor environments. In Proc. 15th EG Workshop on Rendering Techniques, EGWR, pp. 45±52, 2004. doi:10.2312/EGWR/EGSR04/045-052 1, 2, 11, 12, 13, 14
- (Zwicker) Zwicker, M.: Point-Based Rendering, ETH Zürich