

Závěr:
Při konstrukci mechanismů v praxi se může postupovat dvěma základními způsoby. Jedním způsobem se navrhuje mechanismus podle požadované trajektorie jednoho nebo více bodů. Druhý způsob postupuje opačně, u navrženého mechanismu se sleduje trajektorie a mechanismus se modifikuje tak, aby se trajektorie co nejvíce přibližovala požadované. Náš program odpovídá řešení problému druhým způsobem, i když nesledujeme trajektorie bodů.

I když se jedná o verzi 1.0, mohli by se vyskytnout za běhu programu drobné chyby, které by však neměli mít vliv na běh programu. Za případné chyby se předem omlouváme.

Za všechny připomínky a informace předem děkují autoři.

POČITAČOVÉ SPRACOVANIE A VIZUALIZÁCIA MEDICÍNSKÝCH ÚDAJŮV

Vojtech Jankovič, Eugen Ružický,

*Katedra aplikovanej matematiky MFF UK, Univerzita Komenského
Mlynská dolina, 842 15 Bratislava, Slovensko.*

0. ÚVOD.

V rôznych oblastiach vedeckého výskumu sa stretávame s potrebou preskúmania, popísania a vizuálneho zobrazenia vnútorných štruktúr nepriesvitného nehomogénneho 3D objektu bez akéhokoľvek zásahu doň. Nás, v našom príspevku budú zaujímať predovšetkým prístupy používané na spracovanie medicínskych dát, rekonštrukciu trojdimenzionálnych objektov a vizualizáciu.

Na získanie informácie o kvalitatívnom i kvantitatívnom rozložení hmoty vo vnútri objektu sa v súčasnosti používa niekoľko neinvazívnych snímkovacích metód. Najpoužívanejšími sú klasické röntgenové snímkovanie, počítačová tomografia (CT), nukleárna magnetická rezonancia (NMR), ultrazvuk, pozitronová emisná tomografia (PET). Textúra snímkov závisí od fyzikálnych a chemických vlastností skúmaných štruktúr a taktiež od použitej metódy. V prípade CT snímkov je štruktúra rezu popísaná vypočítanou funkciou polohy, ktorej hodnoty sú tzv. Hounsfieldove čísla. Hounsfieldovo číslo vyjadruje strednú hodnotu oslabenia röntgenového žiarenia pri prechode jednotkovým objemom danej látky.

Štandardne sa používa na vizualizáciu dvojrozmerné zobrazovacie zariadenie (CRT obrazovka, tlačiareň, plotter, digigraf a pod.). Existujú však špeciálne zariadenia, ktoré umožňujú vytvoriť skutočné trojrozmerné obraz, tzv. true 3D display, prípadne vyvolať v ľudskom mozgu vnem veľmi podobný tomu, ktorý získa priamym pozorovaním okolitého reálneho sveta. Jedná sa o stereografické premietanie (virtuálna realita), holografii, techniky mnohoohniskových zrkadiel alebo techniky rotujúceho LED panelu [Udup83], [Harr85], [StFr91]. Túto oblasť však spomíname len okrajovo. Hlavnú pozornosť venujeme zobrazovaniu na dvojrozmerné výstupné zariadenie, tzv. pseudo 3D display.

1. FORMULÁCIA PROBLÉMU

Z rôznych dôvodov nemožno získať CT snímky celého objektu. Najčastejšie máme k dispozícii súbor CT snímkov reprezentujúcich navzájom rovnobežné konštantne vzdialené rezy (5-10 mm) konštantnej hrúbky (2-5 mm). Zaujima nás ako popísať celý skúmaný objekt a ako ho potom následne zobrazíť na 2D zobrazovacom zariadení.

Pretože pri počítačovej manipulácii nedokážeme pracovať so spojitými CT snímkami, ukazuje sa účelné tieto vhodnou formou diskretizovať. Po diskretizácii dostávame 3D diskretnú scénu v zmysle nasledovných definícií [Jank91], [Udup83].

Definícia 1.: Pod 3D diskretným priestorom rozumieme pravouhlý rovno-
bežnosten $X \times Y \times Z$ ($X, Y, Z \in \mathbb{N}$), ktorý je rozdelený tromi sústavami
paralelných rovín kolmých na jednotlivé osi ($x = \text{konšt.}$, $y = \text{konšt.}$,
 $z = \text{konšt.}$) na malé pravouhlé rovnobežnosteny nazývané voxle. Každý
voxel v vieme reprezentovať usporiadanou trojicou $v = (x, y, z) \in \mathbb{N}^3$,
pričom $1 \leq x \leq X$, $1 \leq y \leq Y$, $1 \leq z \leq Z$.

Definícia 2.: Pod 3D diskretnou scénou rozumieme usporiadanú dvojicu
 $V = (S, F)$, kde

$S = \{v : 1 \leq x \leq X \wedge 1 \leq y \leq Y \wedge 1 \leq z \leq Z\}$ sa nazýva oblasť V a

$F: S \rightarrow I$ (funkcia hustoty) je zobrazenie množiny S do množiny
hustôt (intenzít) voxelov I . Väčšinou sa I uvažuje ako podmnožina
množiny celých čísel. V prípade, že $I = \{0, 1\}$ hovoríme o 3D binárnej
diskretnéj scéne.

Pre $k \in \{1, 2, 3, \dots, Z\}$ máme $V_k = (S_k, F)$, kde $S_k = \{v : 1 \leq x \leq X \wedge 1 \leq y \leq Y \wedge z = k\}$ a V_k nazývame k -tým plátom scény V .

2. METÓDY RIEŠENIA PROBLÉMU

Hľadanie riešenia vyššie formulovaného problému zvyčajne vyžaduje
nasledovné postupy. Rozdelili sme ich na tri časti. Prvá časť obsahuje
postupy predspracovania CT plátov do formy vhodnej na ďalšie
spracovanie, druhá časť obsahuje postupy rekonštrukcie a

reprezentácie 3D modelu a tretia časť obsahuje postupy vizuálneho
spracovania a zobrazovania 3D modelu. Výber prístupu v druhej časti
závisí pri konkrétnej aplikácii od požiadaviek na rýchlosť
spracovania, kvalitu zobrazenia a potrebu zachovania informácie o
povrchu objektov. Spôsob vizuálneho spracovania je vo väčšine prípadov
priamo daný použitou metódou reprezentácie 3D modelu.

- Predspracovanie CT plátov.
- Vytvorenie 3D modelu.
- Vizuálne spracovanie 3D modelu.

2.1. PREDSPRACOVANIE CT PLÁTOV

2.1.1. Identifikácia objektu záujmu

V 3D diskretnéj scéne $V = (S, F)$ má každý voxel priradenú intenzitu
podľa kvality tkaniva, ktoré reprezentuje. Na základe tejto intenzity
identifikujeme tie štruktúry, ktoré nás zaujímajú. Určíme prahovaciú
množinu D ($D \subseteq I$) tak, aby obsahovala Hounsfieldove hodnoty látky, z
ktorej je štruktúra zložená. Potom zobrazíme scénu $V = (S, F)$ do binárnej
scény $V' = (S, F')$ pomocou prahovacej funkcie F' , ktorá je daná
predpisom:

$$F'(v) = \begin{cases} 1, & \text{ak } F(v) \in D \\ 0, & \text{ak } F(v) \in I - D \end{cases}$$

Ak tento postup opakujeme pre všetky pláty, rozdelíme voľbou
množiny D scénu S na dve komplementárne podmnožiny:

objekt záujmu $O = \{v : F'(v) = 1\}$ a pozadie $T = S - O = \{v : F'(v) = 0\}$.

Výsledkom je 3D binárna scéna, v ktorej voxelom patriacim objektom
záujmu prislúchajú hodnoty 1 a voxelom patriacim pozadiu hodnoty 0.

S vytvorenou 3D binárnou scénou sa podstatne jednoduchšie a hlavne
rýchlejšie manipuluje, znižujú sa nároky na pamäť.

2.1.2. Vytvorenie obrysov

Obrysy sú dôležité pri všetkých algoritmoch rekonštruujúcich povrch
3D objektu. Ich nájdanie má význam až po identifikácii objektov

záujmu, t. j. po vytvorení binárnych plátov. Vychádzame z toho, že prienik povrchu hľadaného objektu s k-tým plátom je obrys tej časti objektu, ktorá je týmto plátom reprezentovaná.

Definícia 3.: Obrys množiny voxlov B je taká jej podmnožina, ktorej každý prvok má aspoň jedného (priameho) suseda nepatriaceho do B.

V prípade binárneho plátu je danou množinou množina všetkých voxlov s intenzitou 1 a jej obrys tvoria všetky tie voxle s intenzitou 1, ktoré majú aspoň jedného priameho suseda s intenzitou 0.

2.1.4. Vyplnenie scény

Jedným zo základných problémov pri 3D rekonštrukcii z CT plátov je problém vyplnenia scény. Musíme si uvedomiť, že ak chceme čo najvernejšie vyobraziť skúmaný reálny objekt, je nevyhnutné, aby sme pracovali s maximom plátov zo scény V. Ak tomu tak nie je, strácame zákonite isté množstvo informácie, ktoré môžeme len do určitej miery rekonštruovať zo známych plátov.

Ponúkajú sa nám dve cesty riešenia tohto problému:

1. Doplnenie chýbajúcich plátov bez identifikácie objektov záujmu tak, aby vznikla kompletná scéna bez ohľadu na rozloženie intenzity. Tento postup sa používa hlavne pri 3D prístupoch.

- interpolácia intenzít;
- replikácia intenzít;

2. Doplnenie chýbajúcich plátov po identifikácii objektov záujmu berie do úvahy identifikovaný objekt záujmu. Vo všeobecnosti mu predchádza nájdenie obrysov:

Ak máme identifikované dvojice obrysov na susedných plátoch, môžeme pristúpiť k zahusťovaniu obrysov. Postupovať budeme po jednotlivých dvojiciach obrysov, z ktorých každý charakterizuje jednoducho súvislú oblasť. Obrys je charakterizovaný obrysovou množinou, t. j. postupnosťou vrcholov $C = \{(x_i, y_i), 1 \leq i \leq N\}$.

Máme teda dva rovnobežné rezy R_s (start - štartovací), R_o (goal -

cieľový) 3D objektu popísané obrysmi $C_s = \{(x_i^s, y_i^s), 1 \leq i \leq N_s\}$ a $C_o = \{(x_i^o, y_i^o), 1 \leq i \leq N_o\}$. Úlohou je nájsť obrys 3D objektu v ľubovoľnom reze ležiacom medzi a rovnobežnom s R_s a R_o , ktorý zodpovedá predpokladanému tvaru tohto objektu.

Po vyriešení tohto problému pre každú dvojicu obrysov, novovytvorené obrisy vložíme do príslušných plátov tak, aby bol prechod od jedného obrisu k druhému čo najplynulejší. V nami definovanom diskretnom priestore pracujeme s obrysom v takzvanej rastrovej forme, t. j. každý obrisový bod je voxel a za hranu obrisu sa považuje sled voxlov spájajúcich dva susedné obrisové body. Na rozdiel od rastrového poznáme ešte tzv. vektorové prístupy, ktoré pracujú v spojitom Euklidovskom priestore, kde obrisový bod je bod priestoru a za hranu obrisu sa považuje úsečka spájajúca dva susedné obrisové body. Dôvodom, prečo sa používajú aj vektorové prístupy je používanie vektorových zobrazovacích zariadení a hlavne lepšia vizuálna názornosť a blízky vzťah k reálnym aplikáciám.

Vo vektorových prístupoch teda vyriešime úlohu zahusťovania obrysov v spojitom priestore a potom vytvorené obrisy transformujeme do rastrovej formy. V rastrových prístupoch pracujeme priamo v diskretnom priestore.

I. Vektorové prístupy riešenia.

Základná myšlienka všetkých prístupov je nasledovná:

Ak dokážeme vhodným spôsobom navzájom pospájať zodpovedajúce dvojice obrisových bodov z obrysov C_s a C_o , dostaneme systém čiar spájajúcich oba obrisy. Ak teraz urobíme prienik roviny, v ktorej má ležať novovytvorený rez s týmto systémom, dostaneme množinu bodov, ktorú môžeme považovať za obrisovú množinu v tomto reze. Takýmto spôsobom možno vytvoriť obrys v ľubovoľnej rovine ležiacej medzi R_s a R_o . Zachovanie predpokladaného tvaru závisí od typu spojovacích čiar a kritérií na výber zodpovedajúcich bodov, ktoré tieto čiary spájajú. Podľa typu spojovacích čiar a z toho vyplývajúcej kvality vyplnenia a zobrazenia môžeme známe prístupy rozdeliť do troch skupín:

- SPÁJANIE ZODPOVEDAJÚCICH BODOV ÚSEČKAMI;

Obrysovú body na susedných plátoch sa spájajú tak, aby priestor medzi obrysmi bol zaplnený trojuholníkovými, prípadne štvoruholníkovými záplatami (z ktorých nás momentálne budú zaujímať len ich hrany). Prístupy sa líšia vo voľbe kritérii výberu zodpovedajúcich bodov.

- SPÁJANIE ZODPOVEDAJÚCICH BODOV LOMENÝMI ČIARAMI;

Pod lomenou čiarou rozumieme postupnosť úsečiek, v ktorej koncový bod predchádzajúcej je začiatočným bodom nasledujúcej. Spájanie lomenými čiarami je v určitom zmysle zovšeobecnením predošlého prístupu, spájania úsečkami. Rozdiel je v tom, že v tomto prípade sa úsečkou nespojí štartovací obrys s cieľovým ale sa spájajú novovypočítané obrysy, ležiace medzi nimi. Jednou z metód ako vypočítať nové obrysy medzi dvoma obrysmi pri zachovaní predpokladaného tvaru popisovaného objektu je Dynamická elastická interpolácia [LiLi88], [LiCh89]:

Táto metóda je založená na výpočte tzv. silového poľa (DS) medzi dvoma obrysmi C_s a C_o , ktoré je výsledkom "stláčania" a "rozťahovania" obrysu C_s tak, aby vznikol obrys C_o . V prvom kroku sa vypočítajú body nového obrysu, ktorý leží medzi C_s a C_o a je "podobnejší" C_o ako bol C_s .

$$W^0(i) := C_s(i)$$

$$W^1(i) = W^0(i) + DSC(x_i^1, y_i^1)$$

Ak pospájame koncové body nahradzovacích vektorov dostaneme nový obrys, ktorý tvorí lepšiu aproximáciu obrysu C_o ako bol obrys W .

V ďalšom kroku sa za C_s zoberie novovypočítaný obrys a proces sa opakuje. V k-tom kroku

$$W^k(i) = W^{k-1}(i) + DSC(x_i^k, y_i^k)$$

Pri vhodnej voľbe riadiacich parametrov sa po konečnom počte krokov novovypočítaný obrys len o málo líši od obrysu C_o . Iteračný proces končí, ak je splnené

$$\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} DSC(x_i^k, y_i^k) < \epsilon$$

- SPÁJANIE ZODPOVEDAJÚCICH BODOV KRIVKAMI.

Najrozpracovanejšou metódou spájania krivkami je metóda založená na splajnoch. Zdrojové obrysy sa aproximujú uzavretými krivkami popísanými B-splajnami a spojenia medzi nimi kardinálnymi splajnami. Táto technika je časovo veľmi náročná a pri nedostatočnom počte obrysových bodov môže dôjsť k podstatnej zmene obrysov. Ak sú však vytvorené krivky dobrou aproximáciou obrysov, výsledné zobrazenie dáva veľmi dobrú predstavu o tvare rekonštruovaného 3D objektu.

II. Rastrové prístupy.

Ako sme už uviedli vyššie, rastrové prístupy pracujú v diskretnej scéne, kde každý obrysový bod je voxel a za hranu obrysu sa považuje sled voxelov spájajúci dva susedné obrysové body. V tomto prípade sa nepracuje len s obrysom oblasti ale aj s jeho vnútrom. Vo všetkých algoritmoch sa na základe určitého kritéria zisťuje, ktoré voxel v scéne medzi plátni patria objektu (1) a ktoré pozadiu (0) [Jank91].

2.2. VYTVORENIE 3D MODELU.

Rozhodujúcou fázou celého procesu spracovania a vizualizácie medicínskych údajov je spôsob vytvorenia 3D modelu skúmaného objektu a jeho následné zobrazenie.

Na základe toho, v akom type priestoru modelujeme 3D objekt, môžeme rozdeliť známe techniky na

- vektorové (spojitý Euklidovský priestor);
- rastrové (diskrétna scéna).

Vektorové prístupy sú historicky prvé, ktoré boli aplikované na spracovanie a vizualizáciu medicínskych údajov. Sú založené na tom, že model sa vytvára v spojitom 3D Euklidovskom priestore popisom jeho povrchu. Vyžaduje predspracovanie zdrojovej scény (identifikácia objektov záujmu, nájdenie obrysov) a vytvorenie popisu povrchu. Keďže objekt je popísaný len svojou hranicou (povrchom), nezachováva sa

informácia o jeho vnútornom zložení. Na druhej strane sa tým však výrazne redukuje množstvo údajov a znižuje pamäťová náročnosť. Druhým nedostatkom týchto prístupov je, že pri akejkolvek zmene objektu záujmu, je nutné uskutočniť všetky operácie predspracovanie plátov a popisu povrchu objektu odznova. Ďalším veľmi vážnym nedostatkom je, že objekty skúmania nie sú vo všeobecnosti jednoducho popísateľné ako 3D telesá (nemožnosť popisu povrchových plôch) a preto každé vyjadrenie je len aproximáciou skutočného tvaru objektu.

2.2.1. VEKTOROVÉ MODELOVANIE

Podľa rozmeru geometrických prvkov popisujúcich povrch 3D objektu, delíme známe prístupy na 1D prístupy a 2D prístupy.

I. 1D PRÍSTUPY

Podstatou 1D prístupov je získanie predstavy o vonkajšom povrchu objektu a jeho schématické naznačenie. 3D model sa popisuje 1D primitívmi - uzavretými lomenými čiarami alebo krivkami, ktoré vhodným spôsobom charakterizujú jeho povrch. Pri popise povrchu 3D modelu sa vychádza z nasledovnej schémy:

Na každom pláte nájdeme obrys. V prípade, že pláty sú príliš ďaleko od seba dochádza k potrebe zahustenia obrysov. Ak dostatočne zahustené obrisy správne zoradíme a zobrazíme pomocou algoritmov viditeľnosti, dostávame priestorovú reprezentáciu povrchu celého objektu.

Vylepšením metódy zobrazenia obrysov je tzv. drôtový model (wire frame), t.j. schématické naznačenie povrchu nielen čiarami obrysov ale aj spojovacími čiarami medzi susednými obrysmi, ktoré vzniknú spojením bodov na susedných obrysoch.

1D metódy sa používajú jednak samostatne na schématické zobrazenie 3D modelu, jednak v kombinácii s inými metódami na zobrazenie povrchu väčšieho objektu obsahujúceho menšie kvalitnejšie zobrazené objekty. Výsledky 1D spracovania vo forme drôtového modelu (systém obrysov a spojovacích čiar) sa tiež ďalej využívajú ako vstup pre niektoré 2D prístupy hľadania a popisu povrchu 3D objektu.

Výhodou 1D prístupov je veľmi nízka časová náročnosť pri vytváraní

3D modelu, rýchle zobrazenie a manipulácia so zobrazeným 3D modelom (rotácia, zmena smeru premietania a bodu pohľadu, animácia a pod.). Nevýhodou je nemožnosť podrobne popísať a zobraziť povrch zložitejších štruktúr.

II. 2D PRÍSTUPY

Podstatou 2D prístupov je popisovanie povrchu rekonštruovaného 3D modelu pomocou systému 2D záplat - dvojrozmerných n-uholníkov alebo plôšok.

Vo všeobecnosti je postup pri 2D vektorových prístupoch nasledovný:

Na všetkých plátoch identifikujeme objekty záujmu a nájdeme obrisy. Vytvoríme 1D drôtový model a popíšeme vzniknuté 2D plôšky medzi 1D obrysovými a spojovacími čiarami, ktoré vytvárajú záplaty pokrývajúce povrch 2D objektu [Udup83]. Povrch popísaný systémom záplat tvorí dobrú aproximáciu objektu a umožňuje využiť tradičné techniky realistického zobrazovania 3D objektov.

Výhodami 2D prístupov sú významná redukcia pôvodných dát a možnosť realistického zobrazenia objektov. Nevýhodami sú neuchavenie informácie o vnútri objektu a tým potreba vykonávať celé predspracovanie i samotnú rekonštrukciu pri akejkolvek zmene objektu.

2.2.2. RASTROVÉ MODELOVANIE

Rastrové (volumetrické) prístupy predstavujú novú, kvalitatívne vyššiu triedu metód spracovania a vizualizácie medicínskych údajov. Vzhľadom na zdrojové údaje, ktoré sú v diskretnej forme netreba robiť transformáciu do spojitého priestoru. Väčšina z metód bola vyvinutá špeciálne na tieto účely a preto úspešne prekonáva hlavné nedostatky vektorových prístupov.

Vo všeobecnosti volumetrické prístupy, na rozdiel od vektorových, pracujú s komplexnou informáciou o celom objekte (povrch i vnútro). V

závislosti na rozmere diskretných geometrických primitívov, ktoré tvoria model, môžeme známe prístupy rozdeliť na:

- 1D prístupy;
- 2D prístupy;
- 3D prístupy;

I. 1D prístupy

1D prístupy sú založené na jednorozmerných digitálnych primitívoch - postupnostiach voxlov. Tieto postupnosti predstavujú orientované obrysy pozostávajúce z obrysových voxlov [Udup83], [Jank90] zoradených v určitej orientácii. Z orientovaných obrysov sa vytvorí informačný strom, v ktorom synovia zodpovedajú obrysom, ktoré ležia vo vnútri oblasti popísanej obrysom, ktorý zodpovedá otcovi. Týmto stromom a systémom obrysov je jednoznačne charakterizovaný každý plát.

Na vizualizáciu takto popísaného digitálneho modelu sa používajú zobrazovacie metódy uvedené v ďalších podčastiach.

II. 2D prístupy

2D prístupy popisujú objekt pomocou digitálnych plošných segmentov - stien povrchových voxlov. Povrch popísaný pomocou stien má všetky základné topologické i geometrické vlastnosti [ArFr81]:

Definícia 4.:

Stena (face) je usporiadaná dvojica voxlov (o, t) .

Nech O je objekt záujmu a T je pozadie. Hranicou medzi O a T nazveme množinu

$$P(O, T) = \{(o, t) \mid o \in O \wedge t \in T \wedge o \text{ je stenovo susedné s } t\}$$

Definícia je dobrá, čo vidno z nasledovných vlastností:

- i) Hranica má dobre definované vnútro (O) a vonkajšok (T) .
- ii) Je toľko hraníc koľko je súvislých komponentov objektu.
- iii) Ak O a T sú incidentné (existuje voxel $o \in O$ a voxel $t \in T$ tak, že o a t sú stenovo susedné), potom $P(O, T)$ je Jordanova plocha t.j. je

uzavretá, súvislá a každá cesta zdnu von zachytáva nejakú stenu.

Tieto vlastnosti významne zjednodušujú a urýchľujú prácu algoritmov vytvárajúcich výsledné vizuálne zobrazenie. Na odstránenie neviditeľných línií a stien je najvhodnejší z-bufer algoritmus alebo špeciálne B-T-F a F-T-B techniky.

III. 3D PRÍSTUPY.

Podstatou 3D prístupov nie je hľadanie obrysov a reprezentácia povrchu, ale reprezentácia celého objektu pomocou 3D primitívov nesúcich informáciu o vnútornom rozložení hmoty.

Základnou metódou je uchovávanie informácie o celej trojrozsomernej scéne vo forme systému dvojrozmerných plátov. Jej výhodou je, že možno priamo použiť vstupné údaje z CT (prípadne ich interpolovať) a tiež veľmi rýchly prístup k jednotlivým voxelom. Na druhej strane však je táto metóda pamätovo veľmi náročná a vyžaduje špeciálne hardwarové zariadenia. Na zníženie pamätovej náročnosti bolo vyvinutých niekoľko vhodných dátových štruktúr, určených na uchovávanie a manipuláciu s 3D diskretnou (binárnou) scénou [Srih81].

Metóda oktálneho stromu - symetrické rekurzívne indexovanie

Po vytvorení binárnej scény sa jej štruktúra uloží do oktálneho stromu. Oktálny strom je jednokoreňový strom, ktorého každý vrchol je buď terminálny alebo má osem synov. Oktálny strom sa vytvára nasledovným spôsobom: koreň zodpovedá rozdeleniu scény tromi navzájom kolmými rovinami ($x = \text{konšt.}$, $y = \text{konšt.}$, $z = \text{konšt.}$) na osem rovnakých častí. Každéj časti zodpovedá jeden syn. Ak je podčasť homogénna, syn je terminálnym vrcholom stromu, v opačnom prípade sa rozvetvuje podobným spôsobom na osem ďalších vrcholov. Ak je vrchol terminálny a zodpovedá v binárnej scéne pozadiu tak obsahuje "0". V prípade, že zodpovedá objektu obsahuje "1". Táto reprezentácia je veľmi vhodná pri zobrazovaní objektu (odstraňovanie skrytých častí), tak ako aj pri zisťovaní prieniku, prípadne pri výsekoch [Srih81], [FrGo85].

Metóda oktálneho stromu - asymetrické rekurzívne indexovanie

Odlišuje sa od predchádzajúcej metódy v tom, že deliace roviny nerozdeľujú scénu na osem rovnakých častí. Vzniká tým potreba pamätania si ďalších informácií, avšak vo všeobecnosti má zodpovedajúci oktálny strom menej úrovní [Srih81].

Metóda binárneho stromu - dynamické indexovanie

Dátovou štruktúrou v tomto prípade je binárny strom vytváraný nasledovne: Neterminálny vrchol zodpovedá rozdeleniu scény len jednou z rovín tak, že jeden zo synov je už terminálny vrchol reprezentujúci homogénnu podčasť. Ak je táto podčasť nad (vpravo, za) rovinou, tak je to ľavý syn, ak je pod (vľavo, pred) rovinou, tak je to pravý syn. V tomto prípade má binárny strom omnoho viac úrovní, ale jeho prehľadávanie je rýchlejšie ako u oktálneho stromu [Srih81].

Výhodami 3D prístupov založených na stromových dátových štruktúrach sú šetrenie pamäti a rýchle vykonávanie mnohých operácií, pretože stačí navštíviť len niektoré vrcholy stromu. Nevýhodami sú zložitosť prístupu k údajom a veľké predspracovanie pri príprave oktálneho alebo binárneho stromu [FaZa89].

2.3. VIZUÁLNE SPRACOVANIE 3D MODELU

Z hľadiska typu použitého 3D modelu a metodológie vytvárania výsledného obrazu, rozdeľujeme známe techniky do dvoch základných skupín:

- surface rendering - vizuálne spracovanie povrchu objektu;
- volume rendering - vizuálne spracovanie objemu objektu.

2.3.1. Surface rendering

Surface rendering je metóda vizualizácie objektu popísaného 2D povrchovými elementami (n-uholníkové rovinné záplaty, priestorové plošné segmenty vyššieho stupňa, steny voxelov), na ktoré sa aplikuje lokálny, resp. globálny iluminačný model.

Na kvalitné zobrazenie vektorového 3D modelu popísaného systémom 2D primitívov sa používajú klasické algoritmy viditeľnosti, farbenia a tónovania [FDFH87]. Na zlepšenie názornosti možno tiež použiť metódy umožňujúce spriesvitnenie niektorých častí zobrazovaného objektu, prípadne použiť drôtový model na schématické znázornenie okolitých menej významných štruktúr. Rotácia a animácia je v tomto prípade veľmi časovo veľmi náročná a preto sa týmito metódami doporučuje vytvárať hlavne statické zobrazenia skúmaného objektu.

Na odstránenie neviditeľných pŕoch rastrového 3D modelu sa okrem rastrovej implementácie z-bufer algoritmu, používajú aj dva nasledovné algoritmy. Založené sú na pozorovaní, že medzi každými dvoma voxelami (riadkami, stĺpcami, plátni) 3D diskretného scény vieme rozhodnúť, ktorý je bližšie a ktorý ďalej od pozorovateľa, to znamená vieme ich usporiadať tak, že žiaden vzdialenejší nezakrýva žiaden bližší.

B-T-F (Back to front) technika [FrGo85]:

Určí sa smer pohľadu a pláty sa usporiadajú od najvzdialenejšieho po najbližší. Zoradené pláty sa berú postupne v tomto poradí a vykresľujú sa len voxel prislúchajúce objektu (označené 1). Tým dostaneme zobrazenie viditeľných častí objektu bez akýchkoľvek ďalších algoritmov odstraňovania skrytých línii a plôch.

F-T-B (Front to back) technika [FaZa89]:

Určí sa smer pohľadu a pláty sa usporiadajú od najbližšieho po najvzdialenejší. Zoradené pláty sa berú v tomto v poradí. Pre každý voxel sa zistí pozícia (jeden alebo viac pixlov), na ktorú sa má zobraziť. Ak je táto pozícia prázdna označí sa ako obsadená a voxel sa zobrazí. Ak nie je voľná pokračuje sa ďalším voxelom. Takýmto spôsobom sa zabezpečí, že sa nevykresľujú všetky voxel prislúchajúce objektu, ale len tie, ktoré sú v danom smere viditeľné. Pretože operácie v CPU sú podstatne rýchlejšie ako grafické operácie je táto technika efektívnejšia ako predošlá (na každú pozíciu sa zobrazí najviac jeden voxel a nie niekoľko).

Na kvalitné zobrazenie rastrového 3D modelu sa používajú modifikácie klasických algoritmov (diskrétny ray tracing) alebo novovyvinuté techniky vychádzajúce z vlastností popisu 3D objektu v digitálnej scéne (kontextové techniky, gradientové tónovanie, hĺbkové tónovanie) [ChHe85], [GeVa89], [Farr83].

Hĺbkové (dištančné) tónovanie je metóda vytvorenia ilúzie priestorového obrazu pomocou priradenia rôznych stupňov intenzity jedného odtieňa farby vrstvám voxlov, na základe ich vzdialenosti od svetelného zdroja. Tento postup síce neumožňuje reálne zobrazenie osvetleného objektu, ale je postačujúci pre priestorové pochopenie jeho "hĺbky" (depth cue).

Hĺbkové tónovanie je veľmi rýchle v prípade použitia B-T-F, F-T-B alebo z-bufer algoritmov odstránenia neviditeľných plôch, pretože nevyžaduje, v podstate žiadne ďalšie výpočty. Pri týchto prístupoch totižto vieme, ktorý voxel sa, na ktoré pixle zobrazovacej plochy zobrazí. Ak si okrem tejto informácie zachováme aj vzdialenosť príslušného voxla od pozorovateľa (je to priamo obsah z-bufera), intenzita v každom pixli zobrazovacej roviny je daná vzťahom

$$I(i,j) = I_{\max} \cdot (D-d(i,j))/D.$$

I_{\max} je maximálna intenzita príslušného odtieňa farby (biela), $d(i,j)$ je vzdialenosť voxla, ktorý sa zobrazí na pixel $p(i,j)$ od pozorovateľa a D je vzdialenosť najvzdialenejšieho voxla celej zobrazovanej diskkrétnej (binárnej) scény od pozorovateľa.

Hĺbkové tónovanie sa využíva hlavne pri aplikáciách, ktoré vyžadujú rýchle zobrazovanie v reálnom čase (získanie predbežnej predstavy o 3D objekte) a pri vytváraní dynamických obrazov (animácia).

2.3.2. Volume rendering

V tomto prístupe sa požadovaný 2D obraz (spätná (numerická) projekcia objemu) získava tak, že v objektovom priestore si určíme zobrazovaciu rovinu (nemala by prechádzať 3D scénou). Do tejto roviny sa premietne rovnobežným premietaním celá scéna tak, že každej zobrazovacej priamke bude prislúchať súčet intenzít všetkých na nej

ležiacich voxlov. Dostaneme neprehľadné zobrazenie hustoty v 3D scéne. Ak však každému voxlu vhodne priradíme váhovou funkciu v závislosti na jeho intenzite, dosiahneme zvýraznenie objektov záujmu a potlačenie (spriesvitnenie) pozadia (napr. simulácia rontgenového snímkovania).

Výsledné zobrazenie sa vöčšinou nepoužíva samostatne ako jeden obraz. Buď sa vytvára dvojica obrazov pre stereoprojekciu alebo séria obrazov pre imitáciu priestorového rozloženia objektu záujmu. V tomto prípade sa 3D scéna otáča okolo niektorej osi a premieta sa do tej istej zobrazovacej roviny. Takýmto spôsobom je možné vytvárať dynamické zobrazenie meniacej sa 3D scény (napr. bijúce srdce) [FaZa89], [Harr85], [Suto86].

Najnovšie práce v oblasti spätnej numerickej projekcie ukazujú nové možnosti zobrazovania touto technikou. Najsľubnejšie sa javí metóda nazvaná Volume rendering [DrCa88], [NeFi90]. Pri tejto metóde sa upraví diskrétna scéna na základe požiadaviek užívateľa. To znamená, že pred vytváraním vážených súčtov po jednotlivých zobrazovacích priamkach sa každému voxlu scény priradia určité charakterizujúce hodnoty. Tieto hodnoty budú závisieť od percentuálneho zloženia voxla, od modelovaných fyzikálnych vlastností materiálov a tkanív skúmaného objektu a od požiadaviek na potlačenie alebo zvýraznenie niektorých štruktúr. Potom sa zobrazovacie priamky, pozdĺž ktorých vykonávame súčty považujú za lúč rontgenového žiarenia prechádzajúci diskrétnou scénou odzadu ku zobrazovacej ploche. Prechodom cez diskrétnu scénu mení lúč v každom voxli ležiacom na zobrazovacej priamke svoje charakteristiky (intenzita žiarenia, smer šírenia a pod.). Charakteristiky výsledného lúča sa vhodne farebne reprezentujú a zobrazia na zobrazovacom zariadení do jedného pixla. Ak takto každému pixlu zobrazovacieho zariadenia priradíme farebnú reprezentáciu príslušného súčtu, dostaneme kvalitné zobrazenie 3D diskkrétnej scény predom zvolenou farebnou selekciou rôznych štruktúr.

Vo všeobecnosti počítame intenzitu lúča B_n postupne prechádzajúceho voxelami v_1, v_2, \dots, v_n podľa iteračného vzťahu [FaZa89] ($j = 0, 1, 2, \dots, n-1$)

$$B_{j+1} = B_j \cdot \exp(-a_{j+1}) + b_{j+1},$$

kde a_{j+1} je utlmenie intenzity pri prechode lúča cez voxel v_{j+1} (v_i : $a_i \geq 0$) a b_{j+1} je zosilnenie (emitovanie) intenzity pri prechode lúča

cez voxel v_{j+4} ($\forall i: b_i \geq 0$). Hodnota B_0 je intenzita pozadia.

Táto metóda umožňuje vytvárať veľmi kvalitné realistické zobrazenie, a čo je veľmi dôležité, najmä pri medicínskych aplikáciach, umožňuje interaktívne vytvárať výseky, prípadne kombinovať viacero zdrojových dát. Jej nevýhodou je veľká časová i pamäťová náročnosť.

2.3.4. Vytváranie dynamických obrazov.

Dynamické zobrazenie poskytuje komplexnejšiu informáciu o skúmanom objekte a umožňuje lepšie pochopiť jeho priestorové charakteristiky. Najčastejšie sa používa na zobrazovanie činnosti v čase sa meniacich orgánov (srdce a cievny systém, kĺby a pohybové ústrojenstvo).

Najvhodnejšie na vytváranie dynamických obrazov sú 3D prístupy, ktoré umožňujú zobrazovanie v reálnom čase (hĺbkové tónovanie).

Špeciálne predspracovanie scény však umožňuje použiť aj iné prístupy na vytváranie dynamických obrazov. V práci [BaEi87] je uvedená aplikácia priestorového (cuberille) 2D prístupu [ChHe85]. 3D model sa zobrazí v rôznych uhloch otočenia okolo oboch osí rovnobežných so zobrazovacou rovinou. Tieto obrazy sa uložia do pamäti vo forme zobrazovacej matice (každému prvku matice zodpovedá jeden obraz). Podobne sa spracujú modely toho istého (dynamicky sa meniaceho) objektu (srdce, cievy) v iných časových momentoch. Spracované obrazy sa uložia ako ďalšie vrstvy teraz už trojrozmernej matice. Potom užívateľ jednoduchým pohybom po matici vyvoláva obrazy a vytvára tým ilúziu skutočného pohybu v čase sa meniaceho 3D objektu (4D zobrazenie).

3. ZÁVER.

Vo svojom príspevku podávame stručný prehľad základných a najpoužívanejších postupov pri spracovaní medicínskych (CTD) údajov, rekonštrukcii a vizualizácii 3D objektov. Vzhľadom na svoj charakter, príspevok nemôže obsahovať podrobný popis všetkých uvedených algoritmov. Čitateľa, ktorý má hlbší záujem o uvedenú problematiku preto odkazujeme na citaovanú odbornú literatúru, prípadne priamo na autorov, ktorí sú ochotní poskytnúť ďalšie informácie.

4. LITERATÚRA

- [ArFr81] - Artzy, E. - Frieder, G. - Herman, G. T.:
The Theory, Design, Implementation and Evaluation of a Three-Dimensional Surface Detection Algorithm, in: Computer Graphics and Image Processing, Vol. 15, 1981, pp. 1-24.
- [BaEi87] - Barrett, W. A. - Eisenberg, H.:
Dynamic Three- and Four-Dimensional Display of Skeletal and Cardiac Anatomy, in: Proceeding of 8th Annual Conference of National Computer Graphics Association, National Computer Graphics Association, McLean, VA, 1987, pp. 35-44.
- [DrCa88] - Drebin, R. A. - Carpenter, L. - Hanrahan, P.:
Volume Rendering, in: Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, August 1988, pp. 65-74.
- [Farr83] - Farrell, E. J.:
Color Display and Interactive Interpretation of Three-Dimensional Data, in: IBM Journal of Research and Development, Vol. 27, No. 4, pp. 356-366, July 1983.
- [FaZa89] - Farrell, E. J. - Zappulla, R. A.:
Three-Dimensional Data Visualisation and Biomedical Applications, in: CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering, Vol. 16, Issue 4 1989, pp. 323-363.
- [FDFH87] - Foley, J. D., - van Dam, A., - Feiner, S. K., - Hughes, J. F.:
Computer Graphics Principles and Practice, Addison-Wesley, 1987.

- [FrGo85] - Frieder, G. - Gordon, D. - Reynolds, R. A.:
Back-to-Front Display of Voxel-Based Objects, in:
IEEE Computer Graphics and Applications, 1985.
- [GeVa89] - Geist, D. - Vannier, M. W.:
PC-Based 3-D Reconstruction of Medical Images,
in: Computers and Graphics, Vol. 13, No. 2,
1989, pp. 135-143.
- [Harr85] - Harris, L. D.:
Display of Multidimensional Biomedical Image
Information, in: Three-Dimensional Biomedical
Imaging, Vol. 2, R. A. Robb, Ed., CRC Press, Boca
Raton, FL, 1985, pp. 125-139.
- [ChHe85] - Chen, L. S. - Herman, G. T. - Reynolds, R. A. -
Udupa, J. K.:
Surface Shading in the Cuberille Environment, in:
IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 5,
Dezember 1985, pp. 34-43.
- [Jank91] - Jankovič, V.:
3D Reconstruction of Medical Objects from Serial
Cross Sections (Interslice Interpolation), in:
Proceedings of the Seventh Spring School on
Computer Graphics and its Applications,
Bratislava, ČSFR, pp. 67-77.
- [LiLi88] - Lin, W. C. - Liang, C. C. - Chen, C. T.:
Dynamic Elastic Interpolation for 3-D Medical
Image Reconstruction from Serial Cross Sections,
in: IEEE Transaction on Medical Imaging, Vol. 7,
No. 3, 225-232, September 1988.
- [LiCh89] - Lin, W. C. - Chen, S. Y. - Chen, C. T.:
A New Surface Interpolation Technique for
Reconstruction 3D Objects from Serial Cross-
Sections, in: Computer Vision, Graphics, and
Image Processing 48, 124-143 (1989).
- [NeFi90] - Ney, D. R. - Fishman, E. K. Magid, D. -
Drebin, R. A.:
Volumetric Rendering of Computed Tomography Data:
Principles and Techniques, in: IEEE Computer
Graphics and Applications, March 1990, pp. 24-32.
- [Srih81] - Srihari, S. N.:
Representation of Three-Dimensional Digital
Images, in: Computing Surveys, Vol. 18, No. 4,
Dezember 1981, pp. 399-424.
- [StFr91] - Stytz, M. R. - Frieder, G. - Frieder, O.:
Three-Dimensional Medical Imaging: Algorithms and

- [Suto86] - Suto, Y.:
Three-Dimensional Displays of Medical Images
Using X-ray CT and MRI, in: The Toshiba Medical
Review No. 16, 1986.
- [Udup83] - Udupa, J. K.:
Display of 3D Information in Discrete 3D Scenes
Produced by Computerized Tomography, in:
Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 3, 1983.