Potenciál viditelnosti a jeho výpočet

Eduard Sojka

katedra informatiky FEI, Vysoká škola báňská
tř. 17.listopadu, 708 33 Ostrava-Poruba

Potenciál viditelnosti poskytuje informaci o každém obraze scény, který lze získat z libovolně situovaného místa pozorování v prostoru. Na základě podobnosti obrazů lze v prostoru vymezit oblasti tak, že obrazy scény získané z každého bodu zvolené oblasti považuje pozorovatel za podobné nebo za shodné. Při překročení hranice oblasti dojde ke změně, kterou pozorovatel vnímá jako odlišný obraz. Potenciál viditelnosti zachycuje existenci těchto oblastí a vztahů mezi nimi. Potenciál viditelnosti je zajímavý a relativně nový pojem počítačové grafiky. Byl zaveden v souvislosti se zkoumáním mechanismů lidského vidění a jeho uplatnění v počítačové vědě se zdá slibné.

Článek se zabývá výpočtem potenciálu viditelnosti pro 2D a 3D scény. Scény se mohou skládat z libovolného počtu konvexních i konkávních těles ohraničených rovinnými plochami. V článku jsou vysvětleny a definovány potřebné pojmy. Jsou uvedeny teoretické vztahy a vlastnosti použité pro výpočet. Je prezentován algoritmus výpočtu potenciálu viditelnosti. Algoritmus je prakticky implementován pro 2D/2.5D scény. Jsou naznačeny možnosti využití potenciálu viditelnosti v praxi.

visual potential, aspect graph, visibility

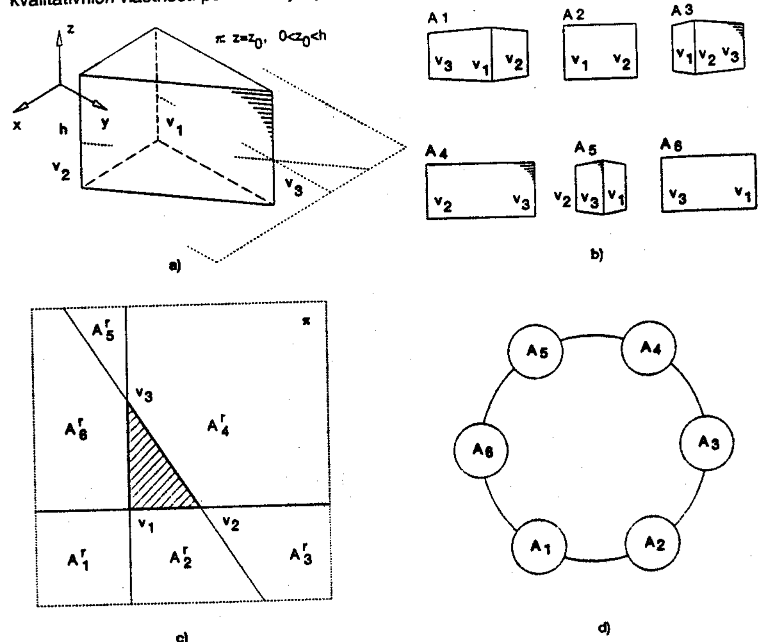
Potenciál viditelnosti zachycuje zkušenost pozorovatele při sledování scény z různých míst v prostoru. Každé poloze pozorovatele odpovídá jediný obraz scény, který pozorovatel vnímá. Tento obraz je tvořen množinou viditelných ploch, kontur, hran a vrcholů scény a nazýváme jej aspektem. V prostoru existují souvislé oblasti takové, že že obrazy vnímané z bodů jedné oblasti považuje pozorovatel za podobné nebo za shodné. Tyto oblasti nazýváme oblastmi aspektů. Jestliže se pozorovatel v prostoru pohybuje, může dojít k objevení se plochy, kontury, hrany nebo vrcholu, které dříve nebyly viditelné. Naopak některé z uvedených útvarů mohou být při pohybu skryty. Takovou náhlou změnu vjemu nazýváme vizuální událostí. Existenci aspeků, vizuálních událostí a vzájemných vztahů mezi nimi lze znázornit pomocí grafu - potenciálu viditelnosti.

Uvažujme těleso dle obr.1a. Jedná se o kolmý hranol výšky h s podstavou ve tvaru trojúhelníka, která leží v rovině xy. Sledujeme, jaký bude vjem pozorovatele v závislosti na místu pozorování. Pro jednoduchost předpokládáme, že pozorovatel může vykonávat pouze pohyby v rovině π: $z=z_0$, $0<z_0<h$. Za uvedených předpokladů zjišťujeme, že pozorovatel může v závislosti na poloze vnímat šest aspektů. Na obr.1b jsou všechny tyto aspekty vyobrazeny a označeny A_1 až A_6. Pokud nejsou plochy hranolu rozlišeny např. barvou nebo texturou, pak je možné uvedených šest aspektů rozdělit na základě podobnosti na dvě skupiny: $\mathcal{A}_1=\{A_1,A_3,A_5\}$ a $\mathcal{A}_2=\{A_2,A_4,A_6\}$. Aspekt A_i vnímá pozorovatel, pokud se nachází uvnitř oblasti A^r_i aspektu. Oblasti A^r_1 až A^r_6 jsou vyznačeny na obr.1c. Při přechodu pozorovatele mezi dvěma oblastmi aspektů dochází k vizuální události - náhlé změně vjemu pozorovatele. Na obr.1d je znázorněn potenciál viditelnosti ve formě grafu. Uzly grafu představují jednotlivé aspekty, hrany pak přechody mezi nimi - tj. možné vizuální události.

Využití potenciálu viditelnosti se zdá přirozené např. při navigaci ve scénách, při rozpoznávání objektů a rekonstrukci popisu objektů na základě znalosti jisté množiny jejich obrazů atd.

Uvedená třída úloh nachází uplatnění např. v robototechnice. K řešení úlohy rozpoznání lze zřejmě využít znalosti jisté množiny aspektů rozpoznávaného objektu a grafů potenciálu viditelnosti známých vzorových objektů. Stejných údajů lze využít také pro řešení úlohy navigace ve scéně. Při rekonstrukci popisu objektu lze využít analýzy tvaru a rozměrů oblastí známých aspektů.

Potenciál viditelnosti představuje poměrně nový pojem. Jeho teoretické základy položili Koenderink a van Doorn v pracech [1] až [4], které byly vedeny snahou přispět k objasnění mechanismů lidského vidění. V práci [1] autoři vyšetřují důsledky vzájemného translačního pohybu pozorovatele a rovinné plochy. Zavádějí pojem pohybová paralaxa a vyšetřují její vlastnosti. V [2] je prezentován náčrt teorie diferenciální perspektivy. Autoři zde věnují pozornost studiu invariantních vlastností vnímaných obrazů, protože předpokládají, že tyto vlastnosti hrají úlohu v lidském vidění. Ze stejných důvodů je práce [3] věnována studiu singularit ve vnímaném obraze. Pojem potenciálu viditelnosti a myšlenka jeho uplatnění jako modelu vnímání a vyhodnocování zrakové informace člověkem je prezentována v [4]. Poukazuje se zde též na možnost použití potenciálu viditelnosti ke klasifikaci tvarové složitosti těles. Vyšetřováním kvalitativních vlastností polí se zabývají Andronov et al. v [5].



Obr.1 *Pro těleso ve tvaru trojbokého hranolu (a) vnímá pozorovatel pohybující se v rovině π aspekty A_1 až A_6 (b). Oblasti aspektů jsou A^r_1 až A^r_6 (c). Aspekty lze uspořádat do grafu (d).*

Algoritmizaci výpočtu potenciálu viditelnosti bylo zatím věnováno jen poměrně málo pozornosti. Dosud publikované algoritmy řeší pouze speciální případy. Plantinga a Dyer [6] popisují algoritmus výpočtu potenciálu viditelnosti jednoho mnohostěnu. Algoritmus pro výpočet potenciálu viditelnosti 2.5D objektů publikovali Maripuri a Zeid [7]. Uvedený algoritmus vyžaduje, aby rovinná oblast reprezentující objekt byla ohraničena jediným polygonem, který je konvexní nebo smí mít naximálně jedinou posloupnost konkávních vrcholů. Algoritmus, který popisujeme v naší práci, žádná podobná omezení nepředpokládá.

Aspekt, oblast aspektu

Uvažujme scénu v E^3 obsahující tělesa ohraničená rovinnými plochami. Tělesa jsou popsána svojí hranicí - jsou známy vrcholy (v), hrany (e) a plochy (f) každého tělesa. V a E jsou množiny všech vrcholů a všech hran těles scény. Z libovolného místa v prostoru vnímá pozorovatel obraz scény, který je tvořen uzly a hranami. Aspektem v bodě p nazveme planární graf $A_p=(V_p, E_p)$, kde V_p je množina uzlů a E_p množina hran obrazu. $E_p \subseteq V_p \times V_p$.

Označme V^v_p množinu těch uzlů, kde uzel obrazu odpovídá jistému vrcholu scény - tj. existuje zobrazení: $V^v_p \to V$. Uzly z této množiny nazýváme v-uzly. Dále označme V^t_p množinu těch uzlů, které vznikly jako průsečíky obrazů dvou hran scény. Každý takový průsečík má tvar písmene T a mění se v něm viditelnost vzdálenější hrany. $V^t_p \to E \times E$ je zobrazení přiřazující uzlu obrazu odpovídající hrany scény. Uzly z množiny V^t_p nazýváme t-uzly. Množina všech uzlů obrazu je $V_p=V^v_p \cup V^t_p$.

Pro identifikaci aspektu zavedeme množinu $A^0_p \subseteq (V \cup (E \times E))$. A^0_p zahrnuje všechny vrcholy scény, které jsou z daného místa viditelné a všechny dvojice (e_i, e_j) hran scény takové, že v obraze vnímaném pozorovatelem existuje průsečík e_i-e_j.

Dále zavedeme relaci ekvivalence aspektů. Uvažujme aspekty v bodech p a q. Pro potřeby výpočtu potenciálu viditelnosti považujeme aspekty za ekvivalentní, právě když jsou si rovny množiny A^0_p, A^0_q: $A_p=A_q \Leftrightarrow A^0_p=A^0_q$. Při jistých pohybech pozorovatele v prostoru se pozorovaný vjem ve smyslu uvedené definice ekvivalence aspektů nemění. Souvislou množinu bodů v prostoru, kterým odpovídají ekvivalentní aspekty, nazýváme oblastí aspektu a označujeme A^r. $A^r=\{x \in E^3: A_x=\text{const}\}$.

Poznámka: Nebude-li v dalším textu nutné výslovně zdůrazňovat, že se aspekt vztahuje k jistému konkrétnímu bodu, pak subskript vynecháme a použijeme značení A, V^v, V^t, A^0.

Vizuální událost

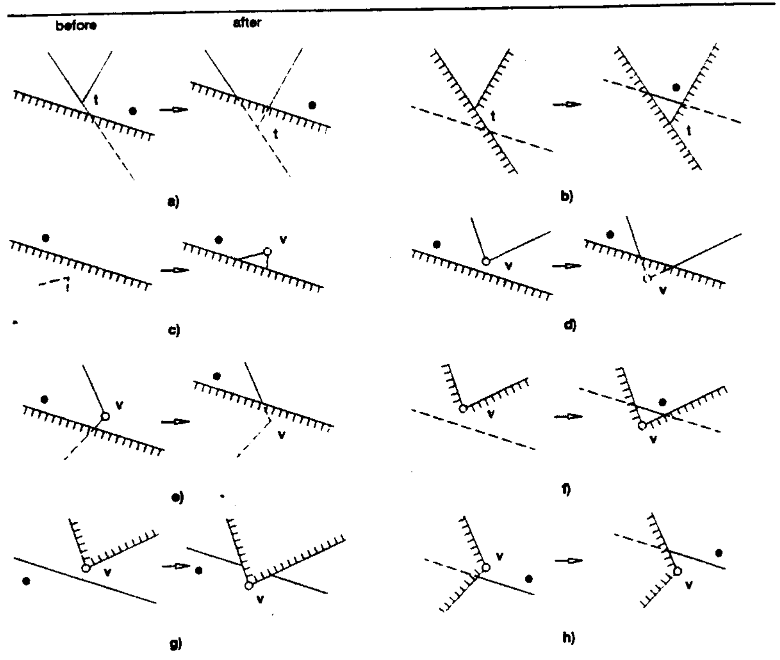
Uvažujme body p a q a jim odpovídající aspekty A_p a A_q. Vizuální událostí nazveme takovou změnu aspektu $A_p \to A_q$, kdy $A^0_p \neq A^0_q$. Body p a q lze při tom zvolit tak, že vzdálenost $d(p,q) \to 0$. Vizuální událost tedy představuje náhlou změnu, kdy se ve vnímaném obraze (aspektu) objevují nové uzly a hrany nebo mizí uzly a hrany dříve existující. Pro množiny A^0_p a A^0_q platí:

$$A^0_q = A^0_p \cup A^0_{pq} - A^0_{qp} \qquad (1)$$

$$A^0_p = A^0_q \cup A^0_{qp} - A^0_{pq}$$

Množina A^0_{pq} obsahuje vrchol nebo dvojice hran. Při přechodu pozorovatele z bodu p do bodu q se objeví obraz vrcholu nebo průsečík obrazů dvojice hran obsažené v A^0_{pq}. Množina A^0_{qp} je vytvořena analogicky, avšak pro pohyb z bodu q do bodu p.

S ohledem na klasifikaci uzlů aspektu na t-uzly a v-uzly lze hovořit též o t a v-vizuální události. K t-vizuální události dochází interakcí t-uzlu a hrany aspektu. Podobně interakcí v-uzlu a hrany aspektu dochází k v-vizuální události. Podrobnější rozbor je proveden na obr.2.



Obr.2 V obraze lze rozlišit dva typy vizuálních událostí: K t-události dochází interakcí t-uzlu a hrany aspektu: Skrytí t-uzlu (a). Objevení se hrany (b). K v-události dochází interakcí v-uzlu a hrany aspektu: Objevení se/skrytí vrcholu (c), (d), (e). Objevení se hrany (f). Rozštěpení hrany (g). Přechod hrany (h).

Oblast vizuální události

Oblastí vizuální události nazýváme oblast $U^{r+} \subseteq E^3$. Protne-li trajektorie místa pozorování uvedenou oblast, pak v obraze vnímaném pozorovatelem dojde k odpovídající vizuální události (rovnice 1). Oblasti vizuálních událostí jsou tvořeny přímkovými plochami. Segmenty oblastí vizuálních událostí vytvářejí hranice mezi oblastmi aspektů.

Předpokládejme nejprve, že plocha, na které leží oblast vizuální události, neobsahuje vnitřní body žádného tělesa scény - smí obsahovat pouze body náležející hranicím těles. Oblast vizuální události určenou za tohoto předpokladu označme U^{r+}_0.

Pro t-událost je oblast U^{r+}_0 tvořena přímkovou plochou, která je definována třemi různými hranami v_iv_j, v_kv_l, v_mv_n scény (obr.3a) v obecné poloze. Plochu lze popsat rovnicí:

$$\mathbf{x}(u,w) = \mathbf{x}_m(u) + w\,\mathbf{r}(u) \qquad (2)$$

kde

$$\mathbf{x}_m(u) = \mathbf{v}_m + u\,\mathbf{q}_{mn}, \quad \mathbf{q}_{mn} = \mathbf{v}_n - \mathbf{v}_m$$

$$\mathbf{r}(u) = \mathbf{x}_m(u) - \mathbf{x}_i(u)$$

z podmínky $(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i) = \lambda\,(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_i)$, $\lambda \in R$ získáme:

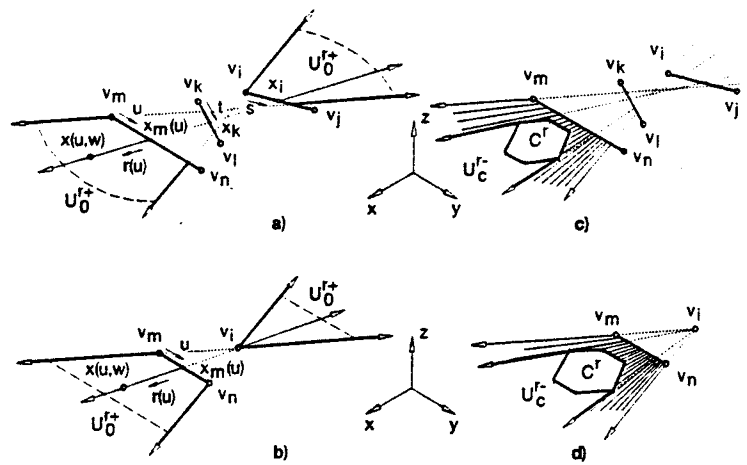
$$t = \frac{(q_{ij}q_{ki}q_{mi}) - u(q_{ij}q_{ki}q_{mn})}{(q_{ij}q_{kl}q_{mi}) - u(q_{ij}q_{kl}q_{mn})} \qquad (3)$$

$$s = \frac{(q_{ki}q_{kl}q_{mi}) - u(q_{ki}q_{kl}q_{mn})}{(q_{ij}q_{kl}q_{ki}) - (q_{ij}q_{kl}q_{mi}) + u(q_{ij}q_{kl}q_{mn})} \qquad (4)$$

$$r(u) = q_{im} + uq_{mn} - s(u)q_{ij} \qquad (5)$$

kde t a s mají význam dle obr.3a. $q_{ij} = v_j - v_i$, $(q_{ij}q_{kl}q_{mn})$ je smíšený součin vektorů $q_{ij}\cdot(q_{kl} \times q_{mn})$. Podobně po záměně indexů. Oblast U^{r+}_0 musí vyhovovat podmínce:

$$0 \le u \le 1,\ 0 \le t \le 1,\ 0 \le s \le 1,\ (w \ge 0) \vee (w \le -1) \qquad (6)$$



Obr.3 Oblast U^{r+}_0 pro t-vizuální událost (a) a v-vizuální událost (b). Oblast U^{r-}_c pro t-vizuální událost (c) a v-vizuální událost (d).

V-událost lze považovat za speciální případ t-události, kdy se hrany v_iv_j a v_kv_l (obr.3a) protínají. Určení oblasti U^{r+}_0 je zde jednodušší. Jedná se o rovinnou oblast (obr.3b) popsanou rovnicí:

$$\mathbf{x}(u,w) = \mathbf{v}_i + w\,\mathbf{q}_{im} + u\,w\,\mathbf{q}_{mn} \qquad (7)$$

kde $\quad q_{im} = v_m - v_i,\ q_{mn} = v_n - v_m,\ 0 \le u \le 1,\ (w \ge 1) \vee (w \le 0) \qquad (8)$

Uvažme nyní dále také situaci, kdy oblast U^{r+}_0 obsahuje vnitřní body těles scény. Označme C^r oblast řezu těles scény plochou U^{r+}_0. Na ploše U^{r+}_0 lze rozlišit oblasti U^{r+}_c a U^{r-}_c. Z bodů oblasti U^{r-}_c nelze vyšetřovanou vizuální událost pozorovat, protože místo jejího vzniku je skryto tělesy scény. Protíná-li trajektorie bodu pozorování oblast U^{r-}_c, nedochází proto k vizuální události. Výslednou oblast U^{r+} vizuální události, lze pak stanovit jako rozdíl

$$U^{r+} = U^{r+}_0 - U^{r-}_c \qquad (9)$$

Pro t i v-vizuální událost jsou tvary oblastí U^{r-}_c naznačeny na obr.3c, 3d. Hranice oblasti U^{r-}_c jsou tvořeny částmi hranice oblasti řezu C^r a částmi těch přímek plochy U^{r+}_0, které procházejí vrcholy oblasti C^r. Sestavení oblasti U^{r+} lze řešit jako dvourozměrnou úlohu na ploše U^{r+}_0. Řešení dvourozměrné úlohy bude podrobněji diskutováno později.

V_i, e_{ij} plocha

Všechny možné oblasti v-vizuální události sestrojené pro jistý vrchol v_i tělesa vytvářejí spolu s plochami těles scény plochu v E^3, kterou nazýváme v_i-plochou. V_i-plocha rozděluje prostor na oblasti V^{r+}_i, V^{r-}_i. Z každého bodu uvnitř oblasti V^{r+}_i lze pozorovat vrchol v_i. Ze žádného bodu uvnitř oblasti V^{r-}_i vrchol v_i pozorovat nelze. Pro tělesa ohraničená rovinnými plochami má v_i-plocha tvar mnohostěnu s rovinnými stěnami. Některé body v_i-plochy mohou ležet v nekonečnu.

Podobně všechny možné oblasti t-vizuální události sestrojené pro jistou dvojici hran e_i, e_j vytvářejí spolu s plochami těles scény a spolu s oblastmi v-událostí sestrojenými pro každý z koncových bodů hran e_i,e_j a zbývající hranu plochu v E^3, kterou nazýváme e_{ij}-plochou. E_{ij}-plocha rozděluje prostor na oblasti E^{r+}_{ij} a E^{r-}_{ij}. Z každého bodu uvnitř oblasti E^{r+}_{ij} lze pozorovat průsečík obrazů hran e_i, e_j. Ze žádného bodu uvnitř oblasti E^{r-}_{ij} průsečík obrazů hran e_i, e_j pozorovat nelze. E_{ij}-plocha má tvar mnohostěnu, jehož stěny jsou tvořeny přímkovými plochami. Některé body e_{ij}-plochy mohou ležet v nekonečnu.

Určení oblastí aspektů v trojrozměrné úloze

S využitím dosud uvedených závěrů je již možné zkonstruovat algoritmus určující oblasti aspektů. Algoritmus pracuje takto:

- Generuj systematicky všechny dvojice vrchol-hrana a trojice hran pro zadanou scénu.
- Pro každou uvedenou dvojici nebo trojici urči oblast U^{r+}_0. Zjisti, zda U^{r+}_0 protíná tělesa scény. Urči oblast řezu C^r a hranice oblasti U^{r-}_c. Sestav výslednou oblast U^{r+} vizuální události.
- Nalezni oblasti aspektů jako všechny nejmenší souvislé konvexní oblasti vzniklé dělením E^3 oblastmi vizuálních událostí a plochami těles scény.

Tvoří-li scénu jediné konvexní těleso, pak lze algoritmus podstatně zjednodušit. Stačí vyšetřovat pouze dvojice vrchol-hrana takové, že hrana i vrchol náleží téže ploše tělesa. Tvrzení vyplývá ze vztahu (9): S výjimkou uvedeného případu je totiž pro konvexní těleso $U^{r+}_0 \subseteq U^{r-}_c$, takže $U^{r+}=0$. Náleží-li vrchol a hrana téže ploše konvexního tělesa, pak dále $C^r=0$ a $U^{r+} = U^{r+}_0$.

Aspekt a vizuální událost v dvourozměrné úloze

Uvažujme scénu tvořenou množinou disjunktních souvislých polygonálních oblastí v E^2. Každá oblast je popsána polygonem, který ji ohraničuje. Množina všech vrcholů scény je V. Pohyby pozorovatele jsou možné pouze v rovině scény. Pojmy vyslovené pro scény v E^3 zde lze odpovídajícím způsobem zjednodušit.

Aspektem rovinné scény je planární graf $A_p=(V_p,E_p)$. Každý uzel grafu je obrazem některého vrcholu scény - tj. existuje zobrazení $V_p \to V$. Množina $A^0_p \subseteq V$ obsahuje ty vrcholy scény, které lze pozorovat z bodu p. Předpokládáme existenci pouze v-vizuálních událostí. V-vizuální událost pozorovatel vnímá jako objevení se nebo zmizení obrazu vrcholu v_i za obrazem vrcholu v_j (v_i-v_j událost). Oblasti vizuálních událostí mají tvar polopřímky nebo úsečky. V_i-plochy jsou polygony

(v_i-křivky). Oblasti $V^{r+}{}_i$ a $V^{r-}{}_i$ jsou polygonální oblasti.

Řešení dvourozměrné úlohy lze využít také pro 2.5D scény. Předpokládáme, že 2.5D scéna je tvořena kolmými hranoly výšky h_k se základnou ve tvaru polygonální oblasti v rovině $z=z_k$. Počet hranolů je n. Jestliže se pozorovatel pohybuje v rovině $z=z_0$, $\max(z_1,\dots,z_n)<z_0<\min(z_1+h_1,\dots,z_n+h_n)$, pak lze problém řešit jako dvourozměrnou úlohu.

Určení oblasti vizuální události ve dvourozměrné úloze

Uvažujme přímku v_iv_j, která je určena vrcholy $v_i,v_j \in V$. Přímka má rovnici:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{v}_i + t\,\mathbf{q}_{ij}, \quad \text{kde} \quad \mathbf{q}_{ij} = \mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i, \quad t \in R \tag{10}$$

Úsečka v_iv_j je hranou oblasti reprezentující objekt scény. Pro body na úsečce v_iv_j platí $0 \le t \le 1$. Definujme polopřímku l_{ij} jako část přímky v_iv_j, pro kterou $t \ge 1$. Podobně pro polopřímku l_{ji} $t \le 0$. Lze vyslovit následující tvrzení:

1. Oblast v_i-v_j vizuální události je tvořena polopřímkou l_{ij} nebo její částí.

   Tvrzení 1 je ilustrováno na obr.4a, kde je znázorněna scéna obsahující oblast ve tvaru trojúhelníka. V uvedeném příkladě lze pozorovat 6 aspektů s oblastmi $A^r{}_1$ až $A^r{}_6$. Oblasti vizuálních událostí jsou tvořeny polopřímkami l_{ij}, které byly získány systematickým generováním spojnic v_iv_j. Např. oblastí v_1-v_3 vizuální události je polopřímka l_{13} s počátkem v bodě v_3. Oblasti aspektů jsou ohraničeny polygony, které se skládají z oblastí vizuálních událostí a hran objektu scény. Některé hrany polygonu mohou ležet v nekonečnu.

2. Leží-li libovolný vnitřní bod x úsečky v_iv_j ($0<t_x<1$) uvnitř oblasti reprezentující některý objekt scény, pak žádná část přímky v_iv_j netvoří oblast vizuální události.

   Na obr.4b je znázorněn objekt ve tvaru čtverce. Polopřímka l_{13} není oblastí v_1-v_3 vizuální události, protože v_1v_3 leží uvnitř tělesa. Vrchol v_1 nelze pozorovat z bodu r ani z bodu l. Při přechodu pozorovatele přes polopřímku l_{13} nedochází k vizuální události. Obdobně pro polopřímky l_{31}, l_{24}, l_{42}.

3. Nechť x_k jsou průsečíky polopřímky v_iv_j s hranicí oblasti reprezentující objekt scény takové, že poloha bodu x_k na polopřímce v_iv_j je $t_{xk}>1$. x_m je bod, pro který $t_{xm}=\min(t_{x1},\dots,t_{xn})$. Pak úsečka $v_jx_m \subset l_{ij}$ je oblastí v_i-v_j vizuální události.

   Pro oblast na obr.4c určuje spojnice v_1v_3 polopřímku l_{13}. Oblastí v_1-v_3 vizuální události je však pouze úsečka $v_3x_1 \subset l_{13}$. Při přechodu pozorovatele mezi body r_1, l_1 dochází k vizuální události; při přechodu mezi body r_2, l_2 k vizuální události nedochází. Oblast v_i-v_j vizuální události je tvořena pouze částí polopřímky l_{ij} od vrcholu v_j po nejbližší průsečík s oblastí reprezentující scénu.

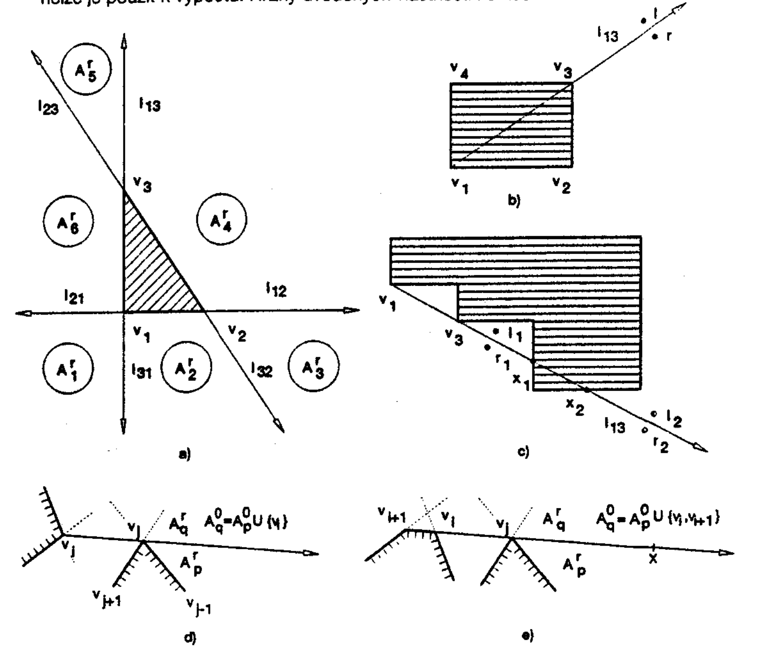
4. Nechť v_j je konkávní vrchol oblasti reprezentující objekt scény, pak žádná polopřímka l_{ij} ani její část není oblastí v_iv_j vizuální události. Některé body spojnice v_iv_j totiž buď leží uvnitř tělesa (viz.T.2) a nebo l_{ij} vstupuje do tělesa bezprostředně v bodě v_j (viz.T.3).

5. Průsečíky oblasti libovolné vizuální události s oblastmi zbývajících vizuálních událostí dané scény dělí oblast vizuální události na segmenty. Každý segment oblasti vizuální události je součástí hranice právě dvou oblastí aspektů. Podobně je oblastmi vizuálních událostí na segmenty dělena také každá hrana scény. Každý segment hrany je součástí hranice právě jediné oblasti aspektu. Oblasti aspektů jsou konvexní polygonální oblasti.

6. Nechť A_p a A_q jsou aspekty. Oblasti $A^r{}_p$ a $A^r{}_q$ obou aspektů sdílí společný segment oblasti v_i-v_j vizuální události tak, že oblast $A^r{}_q$ leží na levo a oblast $A^r{}_p$ na pravo od přímky v_iv_j (obr.4d). Pak $A^0{}_q = A^0{}_p \cup \{v_i\}$ a $A^0{}_p = A^0{}_q - \{v_i\}$, když $(\mathbf{q}_{ij} \times \mathbf{q}_{j,j-1}) \ge 0 \wedge (\mathbf{q}_{j,j+1} \times \mathbf{q}_{ij}) \ge 0$, nebo $A^0{}_q = A^0{}_p - \{v_i\}$ a $A^0{}_p = A^0{}_q \cup \{v_i\}$, když $(\mathbf{q}_{ij} \times \mathbf{q}_{j,j-1}) \le 0 \wedge (\mathbf{q}_{j,j+1} \times \mathbf{q}_{ij}) \le 0$. Při tom $\mathbf{q}_{ij} = \mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i$, $\mathbf{q}_{j,j-1} = \mathbf{v}_j - \mathbf{v}_{j-1}$, $\mathbf{q}_{j,j+1} = \mathbf{v}_{j+1} - \mathbf{v}_j$ jsou vektory hran odpovídající oblasti scény.

7. Obsahuje-li scéna n>2 vrcholů ležících v přímce, pak se oblasti aspektů mohou překrývat. Na obr.4e prochází bodem x 3 oblasti vizuální události: v_i-v_j, v_{i+1}-v_j, v_i-v_{i+1}.

8. Nechť hrana v_rv_{r+1} některé oblasti scény je součástí konvexního obalu scény. Pak v_rv_{r+1} je součástí hranice oblasti aspeku, pro který platí $A^0 = \{v_r, v_{r+1}\}$. Uvedené tvrzení lze dále zobecnit: Nechť v_rv_{r+s} je hranou konvexního obalu scény a vrcholy v_i $r<i<r+s$ jsou konkávní vrcholy některé oblasti scény. Pak posloupnost hran $v_rv_{r+1},\dots,v_{r+s-1},v_{r+s}$ je součástí oblasti aspektu, pro který $A^0 = \{v_r, v_{r+1},\dots,v_{r+s}\}$. Tvrzení má bohužel pouze ilustrativní charakter- nelze je použít k výpočtu. Hrany uvedených vlastností nemusí totiž existovat.



Obr.4 Polopřímky l_{ij} jsou oblastí v_i-v_j vizuální události (a). Prochází-li úsečka v_iv_j oblastí reprezentující objekt scény, pak žádná část l_{ij} není oblastí vizuální události (b). Polopřímka l_{ij} je oblastí vizuální události pouze pro nejbližší průsečík s oblastí reprezentující objekt scény (c). $A^0{}_q$ lze stanovit pomocí vztahu $A^0{}_p = A^0{}_q \cup \{v_i\}$ (d). Oblasti v_i-v_j události se mohou překrývat (e).

Algoritmus výpočtu oblastí aspektů dvourozměrné scény

Vstupem algoritmu je množina polygonů v E^2, které reprezentují objekty scény. Výstupem je množina polygonů, které reprezentují oblasti aspektů, případně také množina A^0 viditelných vrcholů pro každý aspekt. Výpočet probíhá tak, že se nejprve vytvoří seznam všech možných oblastí v_i-v_j vizuálních událostí. Oblasti aspektů se pak určí jako nejmenší souvislé konvexní oblasti vzniklé dělením E^2 oblastmi vizuálních událostí a hranami objektů scény. Algoritmus pracuje takto:

- Generuj systematicky všechny přímky v_iv_j jako spojnice vrcholů v_i, v_j: $v_i, v_j \in V$, $2 \le i \le |V|$, $j<i$.
  - Pro každou přímku v_iv_j projdi všechny objekty scény. Pro každý objekt vypočítej průsečíky přímky s hranicí objektu a vyšetři vzájemnou polohu přímky a objektu. Mohou nastat tyto případy:
    1. Polopřímka v_iv_j vyšetřovaný objekt neprotíná: V tomto případě se polopřímka v_iv_j může v intervalu $t \ge 1$ stát oblastí v_i-v_j vizuální události. Je však možné, že tento interval bude v následujících krocích zúžen při zpracování dalších objektů. Analogicky lze současně vyšetřovat také polopřímku v_jv_i.
    2. Polopřímka v_iv_j protíná vyšetřovaný objekt. Existuje alespoň jeden průsečík x tak, že $0<t_x<1$: V tomto případě žádná část polopřímky v_iv_j ani polopřímky v_jv_i nemůže být oblastí v_i-v_j ani v_j-v_i vizuální události. Další zpracování přímky v_iv_j není potřebné.
    3. Polopřímka v_iv_j protíná vyšetřovaný objekt. Bod x je průsečík s minimální souřadnicí t na polopřímce v_iv_j. Při tom $t_x>1$: V tomto případě se polopřímka v_iv_j může v intervalu $1 \le t \le t_x$ stát oblastí v_i-v_j vizuální události. Je však možné, že tento interval bude v následujících krocích zúžen při zpracování dalších objektů. Analogicky lze současně vyšetřovat také polopřímku v_jv_i.

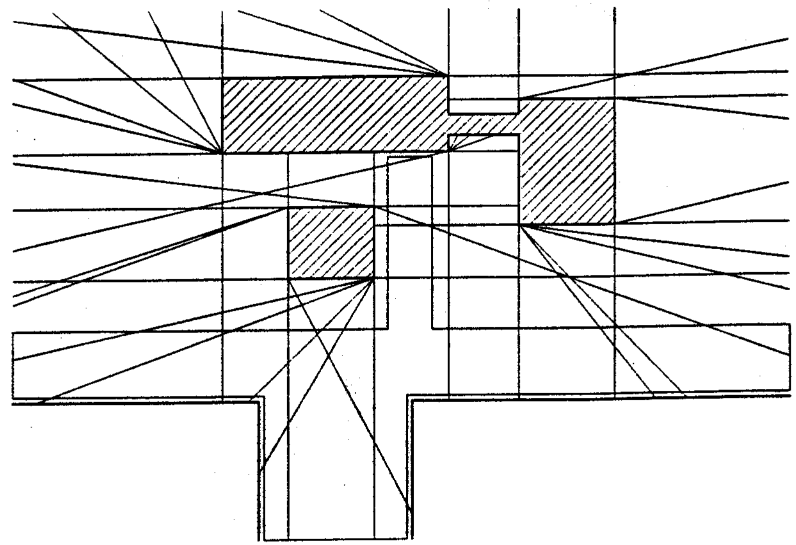
  Proces zpracování přímky v_iv_j je ukončen zpracováním všech objektů a určením oblastí vizuálních událostí ležících na přímce nebo zjištěním, že žádná část přímky nemůže být oblastí vizuální události. Zjištěné oblasti (jedná se o úsečky nebo polopřímky) jsou zařazeny do seznamu oblastí vizuálních událostí.
- Pro každou oblast ze seznamu oblastí vizuálních událostí vypočítej průsečíky se všemi ostatními oblastmi seznamu. Průsečíky seřaď podle souřadnice t na vyšetřované oblasti. Průsečíky rozdělí vyšetřovanou oblast na segmenty. Zjištěné segmenty zařaď do sezmamu segmentů. Podobně urči segmenty také pro každou hranu objektů scény.
- Ze seznamu segmentů vyber libovolný segment. Dále vybírej navazující segmenty (včetně těch, které s vybraným segmentem splývají) tak dlouho, dokud nevytvoří uzavřený konvexní polygon. Polygon ohraničuje oblast aspektu. Je-li seznam segmentů neprázdný, pokračuj sestavením dalšího polygonu.

Má-li algoritmus současně pro každý aspekt sestavit také množinu A^0 viditelných vrcholů scény, pak se poslední krok algoritmu modifikuje takto: Pro první sestavenou oblast aspektu urči množinu viditelných vrcholů A^0_0. K tomu použij libovolnou metodu - například metodu paprsků vedených z vnitřního bodu oblasti A^r_0 do všech vrcholů scény. Po sestavení hranice některého aspektu dále postupně sestavuj hranice aspektů sousedících. Množinu viditelných vrcholů při tom určuj podle vztahu $A^0_j = A^0_i \cup \{v_k\}$ nebo $A^0_j = A^0_i - \{v_k\}$.

Implementace, příklad výpočtu

Popsaný algoritmus byl prakticky implementován v jazyce C++ na personálním počítači. Použití potenciálu viditelnosti se zdá slibné například při řešení problémů počítačového vidění. Jenu z možných aplikací v tomto směru uvádějí např. Maripuri a Zeid [7]. Zde jsme zvolili jiný příklad: Využití potenciálu viditelnosti k hodnocení estetického účinku exteriéru architektonicky náročných staveb. Tělesa scény představují hlavní hmoty navrhované stavby, aspekty odpovídají pohledům, které může pozorovatel vnímat z míst vymezených oblastmi aspektů. Na základě znalosti oblastí aspektů lze zcela systematicky prověřit mnoho pohledů na zamýšlené

dílo. Jednotlivým pohledům lze také přisuzovat různou váhu v závislosti na na velikostech oblastí aspektů a v závislosti na tom, jaké množství pozorovatelů lze v jednotlivých oblastech očekávat. Na obr.5 je zázorněna scéna představující architektonicky náročnou stavbu. Vyšrafované oblasti představují navrhované budovy, nevyplněné plochy jsou budovy dříve existující. Jsou zde vyznačeny oblasti aspektů - tj. míst odkud pozorovatel vnímá různé pohledy. Vytečkované plochy představují místa s vysokým výskytem pozorovatelů - incidujícím aspektům je třeba věnovat zvýšenou pozornost.



Obr.5 Využití oblastí aspektů k prověření estetického účinku architektonického díla. Existující zástavba je vyznačena plně, navrhované budovy jsou vyšrafovány, oblasti aspektů jsou vyznačeny tence. Místa s vysokým výskytem pozorovatelů jsou vyznačena tečkovaně - odpovídající aspekty (pohledy) je vhodné systematicky prověřit.

Závěry

Článek se zabývá výpočtem potenciálu viditelnosti pro 2D a 3D scény. Nejprve je diskutována 3D úloha. Scény se mohou skládat z libovolného počtu konvexních i konkávních těles ohraničených rovinnými plochami. V článku je vysvětlen pojem potenciálu viditelnosti a je upřesněn pojem aspektu pro uvedenou třídu scén. Jsou uvažovány dva typy vizuálních událostí, které jsou nazvány t a v-vizuální událost. Je zaveden pojem oblast vizuální události a je prezentována metoda jejího určení. Je načrtnut algoritmus výpočtu oblastí aspektů pro 3D scény. Pro 2D scény jsou dříve vyslovené pojmy a závěry odpovídajícím způsobem zjednodušeny. Jsou shrnutry principy využité pro řešení 2D úlohy. Je popsán algoritmus výpočtu oblastí aspektů a množin viditelných vrcholů pro 2D scény. Scéna se může skládat z libovolného počtu polygonů. Každý polygon může být konvexní nebo konkávní s libovolným počtem posloupností konkávních vrcholů. Algoritmus byl prakticky implementován v C++ na personálním počítači.

Literatura:

[1] Koenderink,J.J. - van Doorn,A.J.: Local structure of movement parallax of the plane. J.Opt.Soc.Am. 66 (1976) No 7 pp 717-723

[2] Koenderink,J.J. - van Doorn,A.J.: Invariant properties of the motion parallax field due to the movement of rigid bodies relative to an observer. Optica Acta 22 (1975) No 9 pp 773-291

[3] Koenderink,J.J. - van Doorn,A.J.: The singularities of the visual mapping. Biological Cybernetics 24 (1976) pp 51-59

[4] Koenderink,J.J. - van Doorn,A.J.: The Internal Representation of Solid Shape with Respect to Vision. Biological Cybernetics 32 (1979) pp 211-216

[5] Andronov,A.A. - Leontovich,E.A. - Gordon,I.I. - Maier,A.G.: Qualitative theory of second-order dynamic systems. New York: J.Wiley Sons 1973

[6] Plantinga, W.H. - Dyer, C.R.: An algorithm for constructing the aspect graph. Proc. IEEE 27th Symp. on Foundations of Comput. Sci. (1986) pp 123-131

[7] Maripuri,S.R. - Zeid,I.: Generating aspect graphs for nonconvex polyhedra. Computer-Aided Design 22 (1990) No 5 pp 258-264

[8] Preparata,F.P. - Shamos,M.I.: Computational Geometry - an introduction. New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo: Springer-Verlag 1985

Ray tracing volume data with subvoxel precision

Miloš Šrámek

Institute of Measurement Science

Slovak Academy of Sciences,

Dúbravská cesta 9, 842 19 Bratislava,ČSFR

Volume visualization (VV), represents a wide plethora of methodologies aimed at processing of 3D scalar data, with a common goal to give a 2D presentation of desired data feature. It can be traced back to late seventies, when the first attempts to render 3D tomographic data on 2D screen came true. Since then, VV has widespread to such diverse branches as seismic measurements, meteorology, molecular structure analysis, confocal microscopy, CAD and astrophysical simulation are. However, due to wide exploration of various 3D medical imaging technologies (CT, MRI, PET ...), medicine still remains the VV basic domain.

Recently, an important task of quality and visual acceptability of rendered images is going to foreground. Since a distinguishing ability of the input data is usually limited by the scanning device, the only way how to e.g. display small details of an object of interrest in acceptable visual quality is to interpolate the input data.

In the contribution, a subvoxel precision volume visualization system based on ray tracing algorithm is presented. A trilinear interpolation scheme was chosen to find an exact surface–ray intersection points due to its computational simplicity and relatively low temporal demands. An effect of this approach is demonstrated by comparison of pairs of images, rendered either by standard and subvoxel precision approach.