

# Zkouškové otázky z předmětu PGR001

## 3D počítačové vidění

Václav Hlaváč  
České vysoké učení technické v Praze  
Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky  
160 00 Praha 6, Jugoslávských partyzánů 3  
<http://people.ciirc.cvut.cz/hlavac>, [vaclav.hlavac@cvut.cz](mailto:vaclav.hlavac@cvut.cz)

23. prosince 2022

Písemka u zkoušky z obrazové části se skládá z šesti otázek, z nichž každá je hodnocena pěti body. Otázky budou především vybírány náhodně z následujícího seznamu. Při zadávání písemky mohou být otázky modifikovány nebo nahrazeny jinými. Tento seznam otázek může být také rošiřován.

- 
1. Jaké jsou rozdíly mezi analýzou obrazu (počítačovým viděním) na jedné straně a počítačovou grafikou na druhé straně? Uveďte dva příklady, které rozdíly demonstrují.
  2. Interpretace (porozumění) obrazu lze matematicky vyjádřit s využitím přístupu teorie formálních jazyků jako *zobrazení*:  $pozorovaná\ obrazová\ data \rightarrow model\ teorie$ . Modelem teorie je konkrétní svět, v němž “teorie” platí. Jedné “teorii” může odpovídat více různých světů. Interpretaci lze chápat také jako *zobrazení*:  $syntax \rightarrow sémantika$ . Při interpretaci je využívána sémantika, tj. znalost o konkrétním světě. V analýze obrazů počítačem obvykle chápeme, že obrazy představují určité objekty. Uveďte dva praktické příklady úloh zpracování obrazu, v nichž je interpretace využívána. Jak je interpretace v těchto úlohách konkrétně využita?
  3. Zpracování signálu a nižší úroveň digitálního zpracování obrazu typicky neinterpretuje zpracovávaná data. Vysvětlete (nejlépe v matematickém vyjádření), co to je interpretace. Co interpretace při zpracování obrazů na jednu stranu přináší a čím použití metod omezuje?
  4. Proč je porozumění obecným (trojrozměrným) scénám v počítačovém vidění těžké? Uveďte několik důvodů se stručným komentářem. (V přednášce jsem uvedl šest důvodů.)
  5. Lokální a globální zpracování.
    - Diskutujte stručně rozdíl mezi lokálním a globálním přístupem v analýze obrazu. Uveďte výhody a nevýhody obojího.
    - Uveďte se stručným komentářem dva příklady lokálních operací.
    - Uveďte se stručným komentářem dva příklady globálních operací.
  6. Vysvětlete pojem spojitá obrazová funkce  $f(x, y)$  nebo  $f(x, y, t)$ . Vysvětlete, co jsou parametry  $x, y, t$ . Uveďte několik příkladů reálných obrazových funkcí sejmutých s pomocí různých fyzikálních principů. Hodnota funkce  $f$  tedy bude odpovídat různým fyzikálním veličinám.
  7. Co je to kvantování obrazu? Jak a v jakém zařízení se kvantování realizuje? Kolik kvantizačních úrovní zhruba rozliší u monochromatického obrazu člověk? Co je v obraze patrné, když je kvantizačních úrovní méně, než by mělo být?
  8. Uvažujte digitalizaci dvojrozměrného obrazu. Zde se stejně jako při digitalizaci jednorozměrného signálu stanovuje vzdálenost ekvidistantních vzorků podle Shannonovy věty o vzorkování. Pro dvojrozměrné obrazy je potřebné kromě stanovení vzdálenosti mezi vzorky (což se řeší podobně jako u jednorozměrného signálu) vyřešit další záležitost. Jakou? Jak se záležitost typicky řeší a jaké výhody či nevýhody tato řešení mají? Poznávám, že se neptám na kvantování.

9. Relace souvislosti mezi dvěma pixely binárního digitálního obrazu (tj. existuje mezi nimi cesta) definuje rozklad obrazu (tj. množiny) na třídy ekvivalence (tj. oblasti). Jaké tři vlastnosti musí relace splňovat, aby byla ekvivalencí. Ověřte platnost těchto tří vlastností pro relaci souvislosti.
10. (a) Definujte (i) oblast a (ii) konvexní oblast ve dvojrozměrném obraze. Nakreslete příklad konvexní a nekonvexní oblasti.  
(b) Definujte konvexní obal.  
(c) Pro nekonvexní oblast z bodu (a) zakreslete konvexní obal.
11. Napište definiční vzorec Shannonovy (též informační) entropie. Vysvětlete veličiny ve vzorci. K čemu se Shannonova entropie používá obecně? Uvažujte šedotónový obraz. Uvedte alespoň dvě použití Shannonovy entropie v digitálním zpracování obrazu.
12. Při pořizování obrazu trojrozměrného (3D) světa kamerou se geometrie zobrazení reprezentuje modelem dírkové kamery (tj. perspektivní projekcí), ve kterém se 3D bod  $(x, y, z)$  promítne do obrazové roviny jako  $(x', y')$ . Nakreslete odpovídající obrázek (stačí o dimenzi menší, tj. plošný). Předpokládejte, že znáte 3D souřadnice  $(x, y, z)$ , ohniskovou vzdálenost  $f$ , tj. vzdálenost obrazové roviny od středu promítání. Odvoďte vztah pro  $x'$ .
13. K čemu slouží optická soustava (především objektiv) u fotoaparátu. Popište roli objektivu neformálně z fyzikálního hlediska.
14. Fungování objektivu fotoaparátu se obvykle na praktické úrovni vysvětluje teorií geometrické optiky. Za jakých předpokladů se může být zjednodušený model geometrické optiky použit? Podotýkám, že o něco složitější fyzikální model je model vlnové optiky.
15. Srovnajte na konceptuální úrovni z pohledu pořízení obrazu vlastnosti dírkové komory a objektivu složeného z čoček.
16. Vysvětlete, co je přirozená vinětace. Projevuje se přirozená vinětace více u normálních objektivů nebo u širokouhlých objektivů? Zdůvodněte (v lepším případě odvoďte), proč k přirozené vinětaci dochází.
17. Vysvětlete, co je to radiální zkreslení objektivu. Jak se v sejmutém obraze projevuje a jak se opravuje?
18. Vysvětlete pojem hloubka zaostření (hloubka pole) u optického objektivu. Jaký (obvykle ovladatelný) parametr objektivu umožňuje měnit hloubku zaostření?
19. Představte si, že snímáme 3D scénu, jejíž elementární ploška odráží jistou záři  $L$  do kamery. Na světlocitlivém čipu kamery v pixelu  $x, y$  to odpovídá ozáření  $E$ , které je přímo úměrné hodnotě obrazové funkce  $f(x, y)$ , tj. jasů (přesněji záři). Na jakých vlastnostech elementární plošky a zdrojů světelné energie závisí hodnota  $f(x, y)$  (jas, barva) pro pevně zvolenou  $x, y$ ? Formulujte i předpoklady tohoto radiometrického modelu a nakreslete obrázek.
20. Uvažujte nejjednodušší radiometrický model pořízení obrazu, tj. bodový světelný zdroj v nekonečnu, elementární plošku s lambertovskou (plně difuzní) odrazivostí. Při znalosti směru ke zdroji světla, pozorovateli a lokální orientaci uvažované plošky povrchu, dané např. vektorem normály, umí počítačová grafika vypočítat jas (barvu) elementární plošky. Inverzní úloha, která by se hodila počítačovému vidění, je neřešitelná.
  - (a) Proč?
  - (b) Jaké to má důsledky?
  - (c) Jak se neřešitelností inverzní úlohy vypořádává počítačové vidění?
21. Vysvětlete pojem “dvojsměrová distribuční funkce obrazu” označovaná zkratkou BRDF. K čemu se BRDF používá?
22.
  - Jaké odrazivostní vlastnosti má lambertovský povrch?
  - K čemu se zjednodušené odrazivostních vlastností daných lambertovským modelem používá? Uvedte alespoň dva příklady použití.

23. Co řeší v radiometrii rovnice ozáření? Zkuste úlohu formulovat (asi Vám pomůže, když si nakreslíte obrázek a označíte v něm veličiny) a naznačit myšlenky odvození (vzorce nejsou nezbytně nutné).
24. Charakterizujte předzpracování obrazu. Co je vstupem a výstupem předzpracování obrazu? K čemu předzpracování obrazu slouží? Uveďte tři příklady použití metod předzpracování.
25. Charakterizujte dvojrozměrnou konvoluci. K čemu se dvojrozměrná konvoluce používá v digitálním zpracování obrazu?
26. Pro vyjádření afinních geometrických transformací obrazu se s výhodou využívají homogenní souřadnice. Vysvětlete, co jsou homogenní souřadnice. Jakou výhodu pro vyjádření afinních geometrických transformací přinášejí. (Nápověda: Vzpomeňte si na jazyk pro popis stránky PostScript).
27. Necht' je geometrická transformace (zahrnující změnu měřítka, rotaci, posun a zkosení) v rovině popsána afinním vztahem

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1x + a_2y, \\y' &= b_0 + b_1x + b_2y.\end{aligned}\tag{1}$$

- (a) Kolik nejméně vřícovacích bodů potřebujete znát, chcete-li spočítat koeficienty afinní transformace (1).
- (b) V praxi se obvykle použije více vřícovacích bodů, což bude odpovídat přeřčené soustavě rovnic (1). Proč se používá nadbytečný počet vřícovacích bodů?
- (c) Jakou metodou se obvykle přeřčená soustava rovnic řeší?
28. Při geometrických transformacích diskřétních obrazů je nutné aproximovat hodnotu obrazové funkce  $f(x, y)$ . Proč? Uveďte alespoň dvě metody pro takovou aproximaci (nejlépe obrázkem, vzorcem ...).
29. Vysvětlete vztah pojmů hrana (v obraze), hranový bod (edgel) a hranice oblasti.
30. Jaké výborné vlastnosti hranových bodů se využívají ve 3D počítačovém vidění při 3D rekonstrukci (SfM, úloha tvar z pohybu, angl. shape from motion)?
31. Ve 3D počítačovém vidění se v úloze SfM (shape from motion) hojně využívá zájmových bodů nebo zájmových oblastí. Proč? Jak? K čemu?
32. Vysvětlete princip detekování bodů zájmů (např. Harrisových rohů).
33. Formulujte úlohu segmentace dvojrozměrného obrazu. Co je vstupem a co je výstupem? Uveďte dva příklady segmentačních úloh a metod pro ně vhodných.
34. Vysvětlete v kontextu úloh segmentace dvojrozměrného obrazu pojem oblast a pojem objekt. Naznačte konkrétní segmentační úlohu a napište, jaký je v ní vztah mezi těmito dvěma pojmy.
35. Segmentace se opírá o sémantiku konkrétní úlohy, tedy o apriorní schopnost využít interpretace obrazu. Ukažte na příkladě, jak konkrétně se tím zpracování obrazu zjednoduší.
36. 3D počítačové vidění. Formulujte úlohu (případně několik úloh). Co je vstupem, co je výstupem úloh 3D počítačového vidění?
37. David Marr (1945-1980, autor nového modelu porozumění vizuálnímu obrazu, vlivný pro oblast výpočetní neurovědy) formuloval úlohu a k ní teorii 3D počítačového vidění, která úlohu dovolila zkoumat počítačovými metodami. Vysvětlete základní myšlenky teorie a úlohy, kterou řeší. Opřete se o pojmy vstupní ikonický obraz, prvotní náčrtek, dvou a půl rozměrný náčrtek, 3D reprezentace vztahena k objektu.
38. Marrův model porozumění vizuálnímu obrazu 3D scény zůstává již od osmdesátek jedinou šřeji přijímanou teorií, i když její použitelnost je velmi omezená. Marrův podnět vedl k rozvoji metod souhrnně nazývaných shape from X (tvar z). Vyjmenujte alespoň pět takových metod.
39. Jedním z široce používaných výsledků Marrova modelu porozumění vizuálnímu obrazu 3D scény je tvar ze stínování, také tvar z pohybu (angl. shape from shading, shape from motion, SfM). Formulujte, jakou úlohu SfM řeší.

40. Vysvětlete, co je projektivní prostor.
41. Co jsou homogenní souřadnice? Jaká je hlavní výhoda použití homogenních souřadnic při jejich použití pro projekci?
42. Co je to homografie? Jaká jsou dvě nejběžnější použití homografie v počítačovém vidění? Formulujte tyto dvě úlohy a napište, na co se používají.
43. 2D homografie zobrazuje rovinu na rovinu.

$$\alpha \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \alpha \neq 0,$$

kde  $H - [3 \times 3]$  je matice homografie. Popište, jak získáte hodnoty matice homografie  $h_{11}, \dots, h_{33}$  z korespondencí ve dvojici obrázků vázaných 2D homografií. Stačí myšlenka výpočtu. Nepotřebují vzorce. Neodvozuje.

44. Co je to dvojpoměr v projektivní transformaci? Vyjádřete obrázkem. Na co se dvojpoměr v počítačovém vidění používá?
45. Projektivní transformaci lze vyjádřit v maticovém tvaru jako matici  $M$  o třech řádcích a čtyřech sloupcích. Co je vstupem a výstupem takto vyjádřené projektivní transformace. Napište vztah.
46. Projektivní matici  $M$  lze faktorizovat (tj. vyjádřit jako součin dílčích matic).

$$\mathbf{u} \simeq M \mathbf{X} = K \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & -R\mathbf{t} \\ \mathbf{0}^\top & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}.$$

Pojmenujte dílčí matice a napište k čemu jsou. Jaký je rozměr matice  $K$ ? Jaký má matice  $K$  speciální tvar?

47. Co je matice vnitřních kalibračních parametrů  $K$ ? Napište ji a vysvětlete její parametry.
48. Vnější kalibrační parametry jsou popsány rotační maticí  $R$  a vektorem  $\mathbf{t}$ . Vysvětlete, k čemu tyto parametry jsou. Jak se vnější kalibrační parametry stanovují?
49. Formulujte úlohu kalibrace jedné kamery při známé 3D scéně. Vysvětlete, jak se vypočte projektivní matice  $M$ . Kolik nejméně bodů v korespondenci potřebujete pro výpočet matice  $M$ ? Proč?
50. Uvažujte úlohu kalibrace jedné kamery při známé 3D scéně. Pro výpočet projektivní matice  $M$  potřebujete nejméně šest bodů v korespondenci. Obvykle se používá mnohem více bodů. Proč? Vysvětlete stručně slovy postup, který se k odhadu parametrů matice  $M$  používá.
51. Předpokládejme, že jsme při kalibraci jedné kamery již spočítali projektivní matici  $M$ . Nyní potřebujeme matici  $M$  rozložit tak, abychom získali matici vnitřních kalibračních parametrů  $K$  a vnější kalibrační parametry, tj. rotační matici  $R$  a translační vektor  $\mathbf{t}$ . Naznačte, jak tento rozklad uděláte?
52. Uvažujte dvě perspektivní kamery. Co je epipolární omezení? Jaký je jeho význam? Vyjádřete obrázkem.
53. Jak se epipolární omezení vyjadřuje matematicky? (náповěda: bilineární transformace) Napište.
54. Formulujte úlohu korespondence v analýze (intenzitních) obrazů. Co úloha korespondence hledá? Co je jejím vstupem? Co je jejím výstupem?
55. K čemu se v analýze (intenzitních) obrazů a ve 3D počítačovém vidění používají algoritmy hledání korespondence?
56. Úloha korespondence (intenzitních) obrazů je v úlohách 3D vidění z principu špatně podmíněná. Napište tři možné příčiny pro tuto špatnou podmíněnost.

57. Jaké algoritmy se používají pro hledání korespondencí mezi dvěma intenzitními obrazy? Naznačte princip dvou kvalitativně odlišných algoritmů. První algoritmus nepředpokládá nic dalšího, než že část obrazů se překrývá. Druhý algoritmus využije jisté (v předmětu probírané) znalosti k principiálnímu zjednodušení algoritmu hledání korespondence.
58. Úlohu hledání korespondence lze ulehčit dodatečnými technickými prostředky. Uveďte výčet jmen metod, na které si vzpomenete. Jednu z metod popište podrobněji, ale přesto stručně.
59. Jaké senzory používané v robotice, např. samoříditelných autech, měřící hloubku v obraze pracují na principu doby letu energie?
60. Vysvětlete stručně princip fungování radaru.
61. Vysvětlete stručně princip fungování lidarů.
62. Vysvětlete stručně princip získávání hloubkové mapy pomocí senzorů založených na triangulaci. Popište princip (a) snímače s laserovou rovinou; (b) dvou stereo kamer a (c) snímače se strukturovaným světlem.
63. Jaké senzory používané v robotice, např. samoříditelných autech, měřící hloubku v obraze pracují na principu triangulace?
64. Výsledkem pořízení hloubkové mapy např. stereo kamerou, lidarem nebo radarem je mrak bodů v souřadné soustavě pozorovatele. Hloubková mapa je mrakem bodů s  $(x, y, z)$  souřadnicemi. Jaké údaje u takové hloubkové mapy postrádáme, abychom s nimi mohli dále pracovat a vytvořit popis 3D povrchu?
65. Dalším krokem při přechodu od 3D mraků bodů k 3D povrchu je spojení bodů mraků do sítě bodů, např. do trojúhelníkové sítě. Vysvětlete proč se to dělá? Jaký je princip postupu?
66. Pro registraci překrývajících se mraků bodů (nebo hloubkových map) se používá ICP (Iterative Closest Points) algoritmus. Vysvětlete předpoklady jeho použití, základní myšlenku, vlastnosti. Jaké předpoklady data musí splnit, abyste mohli ICP algoritmus použít?