

Analýza pohybu

Karel Horák



Rozvrh přednášky:

1. Úvod.
2. Úlohy analýzy pohybu.
3. Rozdílové metody.
4. Estimace modelu prostředí.
5. Optický tok.

Analýza pohybu

Karel Horák

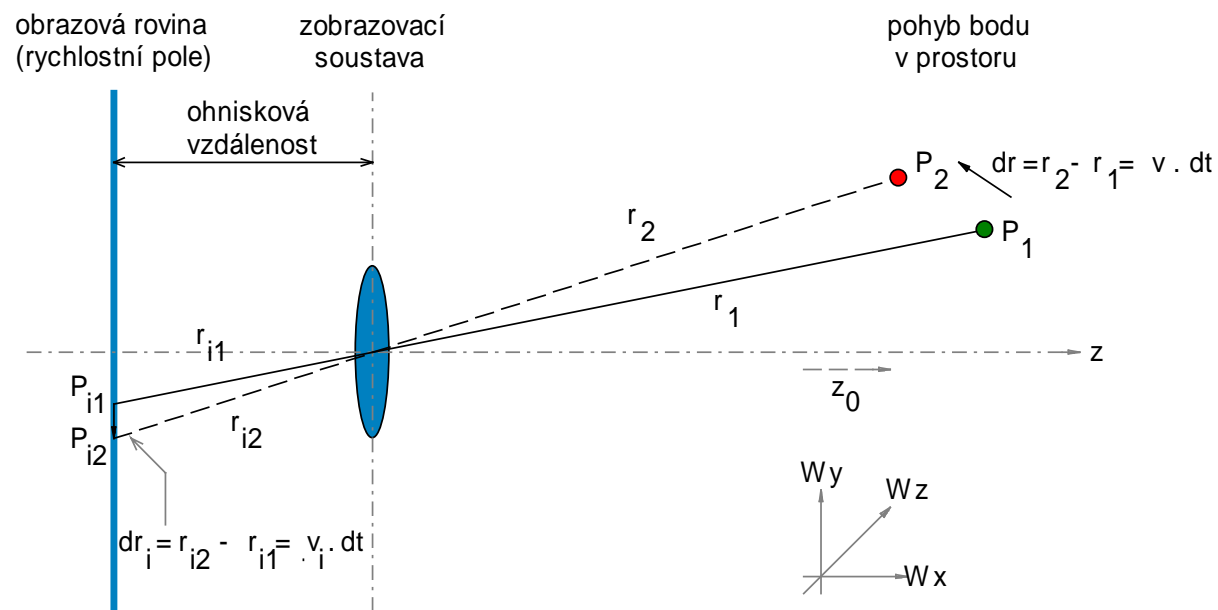


Rozvrh přednášky:

- 1. Úvod.**
2. Úlohy analýzy pohybu.
3. Rozdílové metody.
4. Estimace modelu prostředí.
5. Optický tok.

Úvod – definice

- ▶ Záznam pohybu objektu v obrazové rovině snímáče:
 - objekt (pro jednoduchost redukovaný na bod) se pohybuje z P_1 do P_2
 - změna polohy objektu = dr
 - změna polohy obrazu objektu = dr_i



Úvod – definice

► Analýza pohybu:

- detekce a klasifikace pohybu objektů v reálné scéně
- snímání pohybu = redukce spojitého 3D signálu na diskretní 2D signál \Rightarrow ztráta informací o skutečném pohybu v prostoru i času vlivem vzorkování a kvantizace
- obecné snímání = projekce (redukce dimenze)



Karl Friedrich Schinkel (1830) – The Invention of Drawing

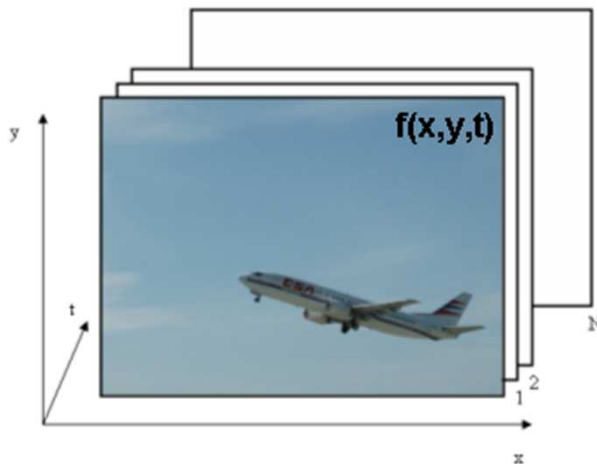
Úvod – obrazová sekvence

- ▀ Zpracování statického obrazu (jeden snímek):
 - extrakce informací z obrazu bez vazby na předchozí dění ve scéně
 - bez apriorních informací složitá interpretace

$$g(x, y) = \{P(x, y), \forall x, y \in Z^+\}$$

- ▀ Zpracování dynamického obrazu (sekvence snímků):
 - staticky: snímky sekvence jsou zpracovány odděleně, stejně jako u statického obrazu
 - dynamicky: je využito informace třetího rozměru (předchozí poloha, maximální změna polohy objektu,...)

$$f(x, y, t) = \{P(x, y, t), \forall x, y, t \in Z^+\}$$



Úvod – reprezentace pohybu

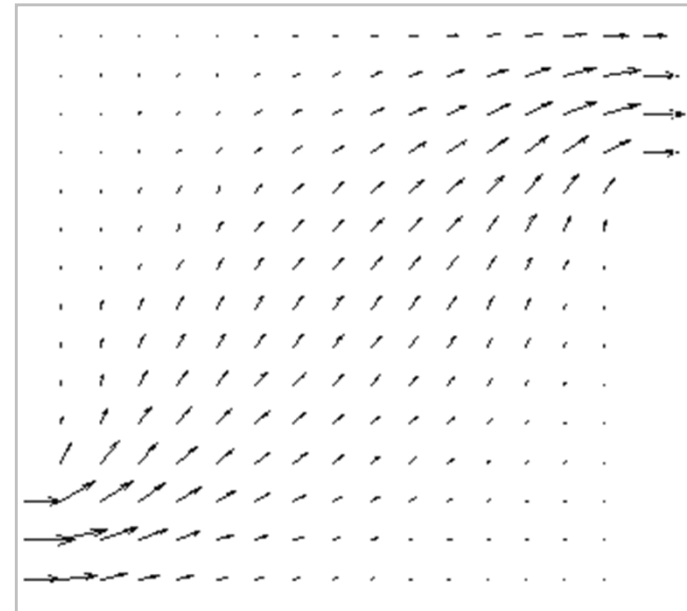
► Reprezentace pohybu v číslcové podobě:

- binární mapa: jednoduchá reprezentace pohybujícího se objektu (log. 1) a statického pozadí (log. 0)
- rychlostní pole: každý bod obrazu rychlostního pole má přiřazen dvousložkový vektor rychlosti $v = (\text{směr}, \text{amplituda})$

Binární mapa



Rychlostní pole



Úvod – aperturní problém

► Aperturní problém:

- nejednoznačný pohyb v obraze způsobený konečnými rozměry snímacího čipu a objektivu (apertury)
- prostorově omezená projekce nenesení jednoznačnou informaci o směru skutečného pohybu



► Fyzikálně odlišné pohyby jsou obrazově nerozeznatelné:

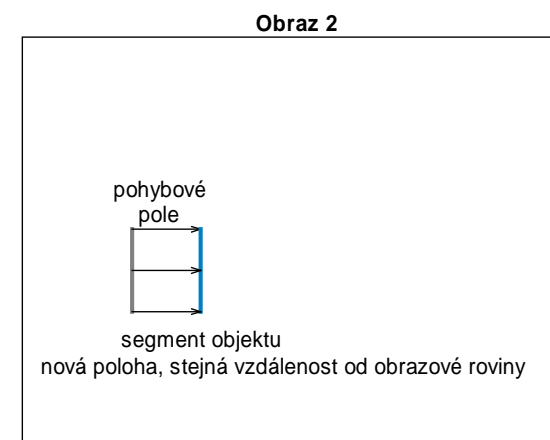
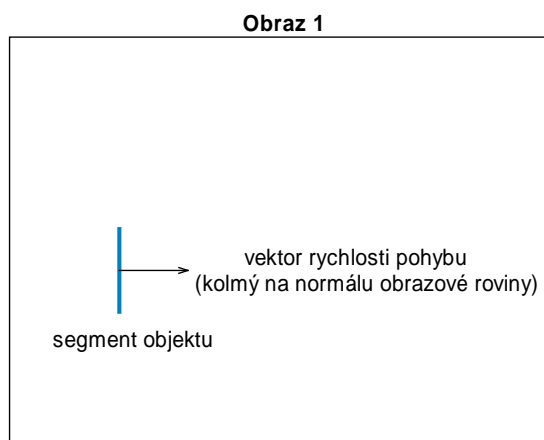


Úvod – projekční problém

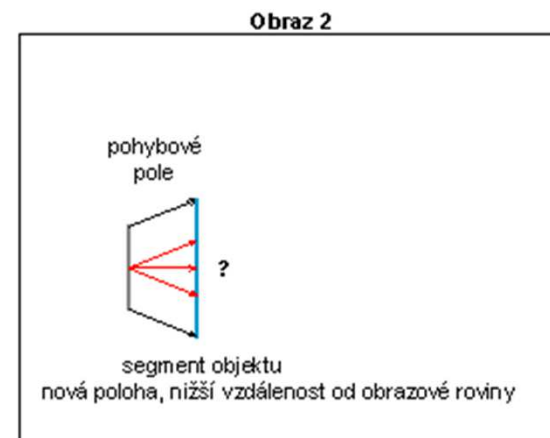
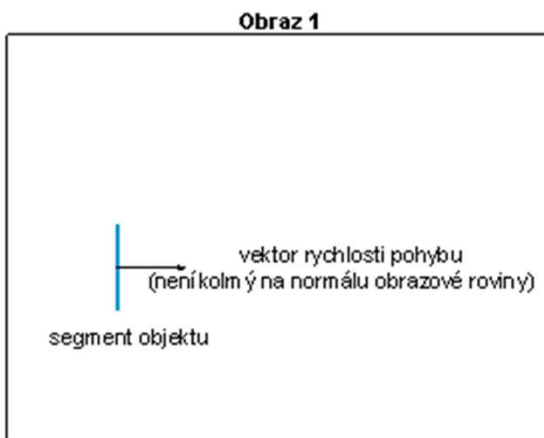
Projekční problém:

- objekt se přibližuje resp. oddaluje od obrazové roviny
- úsek objektu ve scéně se postupně zvětšuje resp. zmenšuje \Rightarrow je zobrazen více resp. méně obrazovými body, než na předchozím snímku

Jednoznačné zobrazení pohybu:



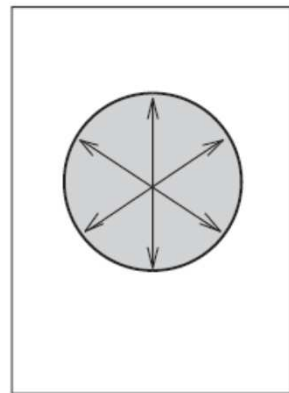
Nejednoznačné zobrazení pohybu:



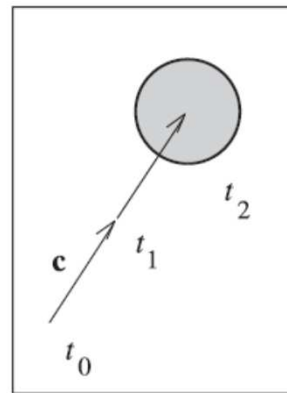
Úvod – omezení pohybu

► Zjednodušující předpoklady o pohybu tuhých těles:

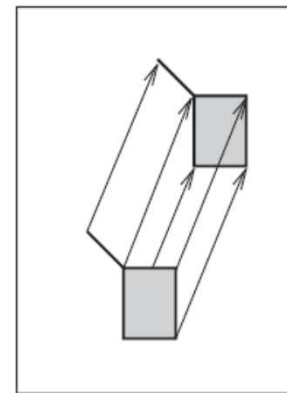
- maximální rychlost (a): na následujícím obrazu se objekt může zobrazit jen do omezeného okolí jeho předchozí polohy (kruh o poloměru $v \cdot dt$ se středem v původní poloze)
- maximální zrychlení (b): velikost změny polohy mezi okamžiky t_1 a t_2 je omezeno velikostí změny polohy mezi okamžiky t_0 a $t_1 \Leftarrow$ konečná hmotnost objektu určuje konečné zrychlení
- pohybová korespondence (c): topologické vlastnosti objektu se nemění (nezávislost na homeomorfní tr.) tj. tuhá tělesa mají stabilní konfiguraci bodů



(a)



(b)



(c)

Úlohy analýzy pohybu – cíl

- ▶ Cíl analýzy pohybu = dva komplementárně spojené cíle:
 - detekovat smysluplný a významný pohyb
 - vyhnout se falešné detekci pohybu (šum, stíny, změna osvětlení scény atd.)

- ▶ Problémy / výzvy:
 - nerelevantní pohyb v obraze
 - změna vzhledu objektu
 - stíny (oddělení objektu a stínu)
 - lokalizace dočasně statických objektů
 - překrývající se objekty
 - dynamické snímání dynamické scény

Analýza pohybu

Karel Horák



Rozvrh přednášky:

1. Úvod.
- 2. Úlohy analýzy pohybu.**
3. Rozdílové metody.
4. Estimace modelu prostředí.
5. Optický tok.

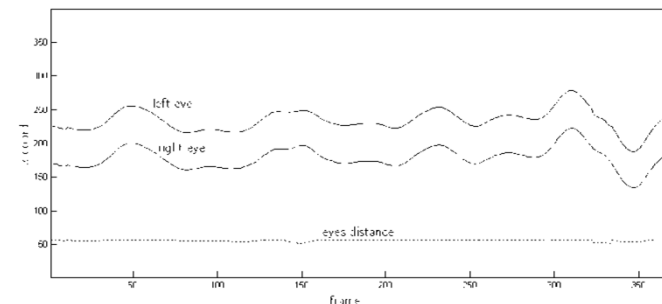
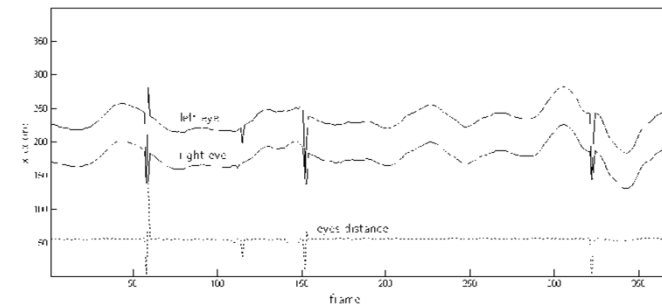
Úlohy analýzy pohybu – motivace

- ▶ Základní motivační třídy úloh pro analýzu pohybu v obraze:
 - analýza pohybu očí
 - analýza pohybu člověka
 - dopravní monitoring
 - rekonstrukce tvaru z pohybu pro identifikaci předmětů

Úlohy analýzy pohybu – motivace

- ▶ Základní motivační třídy úloh pro analýzu pohybu v obrazu:
 - analýza pohybu očí
 - analýza pohybu člověka
 - dopravní monitoring
 - rekonstrukce tvaru z pohybu pro identifikaci předmětů

- ▶ Detekce kůže → rozpoznání obličeje → lokalizace očí → detekce mrkání → stanovení únavy řidiče

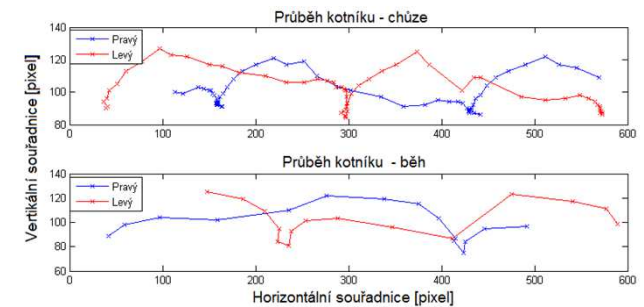


Úlohy analýzy pohybu – motivace

▮ Základní motivační třídy úloh pro analýzu pohybu v obrazu:

- analýza pohybu očí
- analýza pohybu člověka
- dopravní monitoring
- rekonstrukce tvaru z pohybu pro identifikaci předmětů

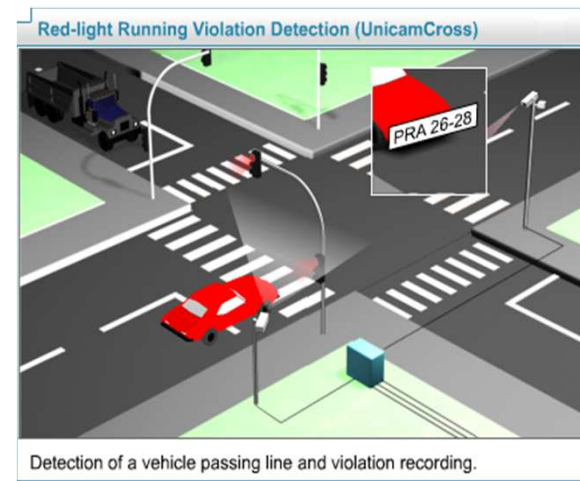
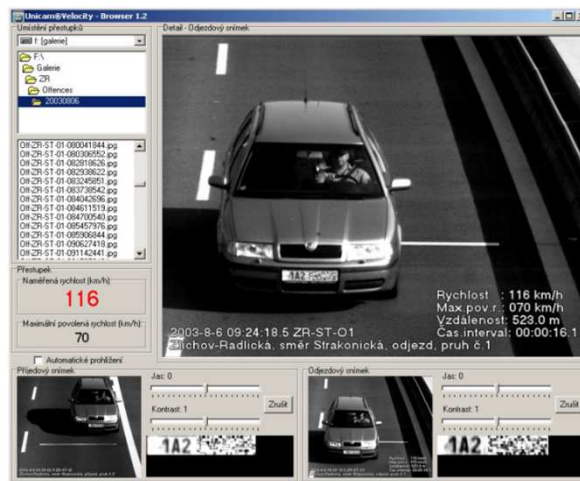
▮ Určení pohybu → rozpoznání osoby → lokalizace kloubů → identifikace pomocí bipedální lokomoce



Úlohy analýzy pohybu – motivace

- ▶ Základní motivační třídy úloh pro analýzu pohybu v obrazu:
 - analýza pohybu očí
 - analýza pohybu člověka
 - dopravní monitoring
 - rekonstrukce tvaru z pohybu pro identifikaci předmětů

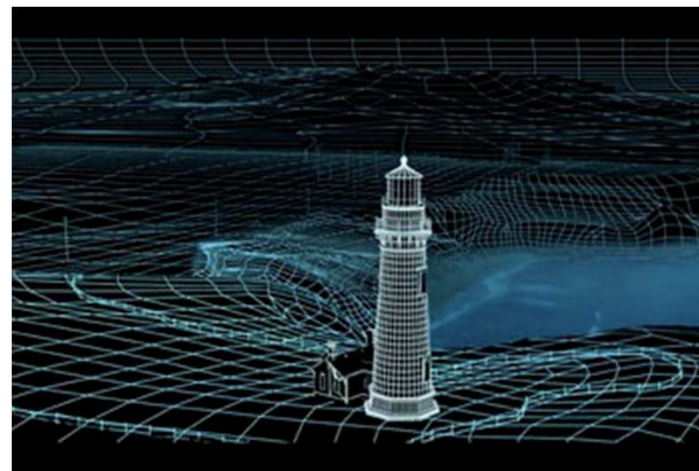
- ▶ Detekce pohybu → rozpoznání vozidla → lokalizace RZ → OCR/OCV → vyhodnocení přestupku



Camea Unicom System

Úlohy analýzy pohybu – motivace

- ▮ Základní motivační třídy úloh pro analýzu pohybu v obraze:
 - analýza pohybu očí
 - analýza pohybu člověka
 - dopravní monitoring
 - rekonstrukce tvaru z pohybu pro identifikaci předmětů



Úlohy analýzy pohybu – typy

- ▶ Podle relativního pohybu snímací soustavy a snímané scény mohou nastat obecně čtyři situace:
 - kamera v klidu, objekty v klidu
 - kamera v pohybu, objekty v klidu
 - kamera v klidu, objekty v pohybu
 - kamera v pohybu, objekty v pohybu

- ▶ O analýze pohybu v obrazu mluvíme v posledních třech případech

- ▶ Základní typy úloh:
 - detekce pohybu (např. video dohled)
 - lokalizace a popis pohybujících se objektů (např. predikce trajektorie objektu)
 - stanovení vlastností objektů v prostoru (např. rekonstrukce geometrických vlastností)

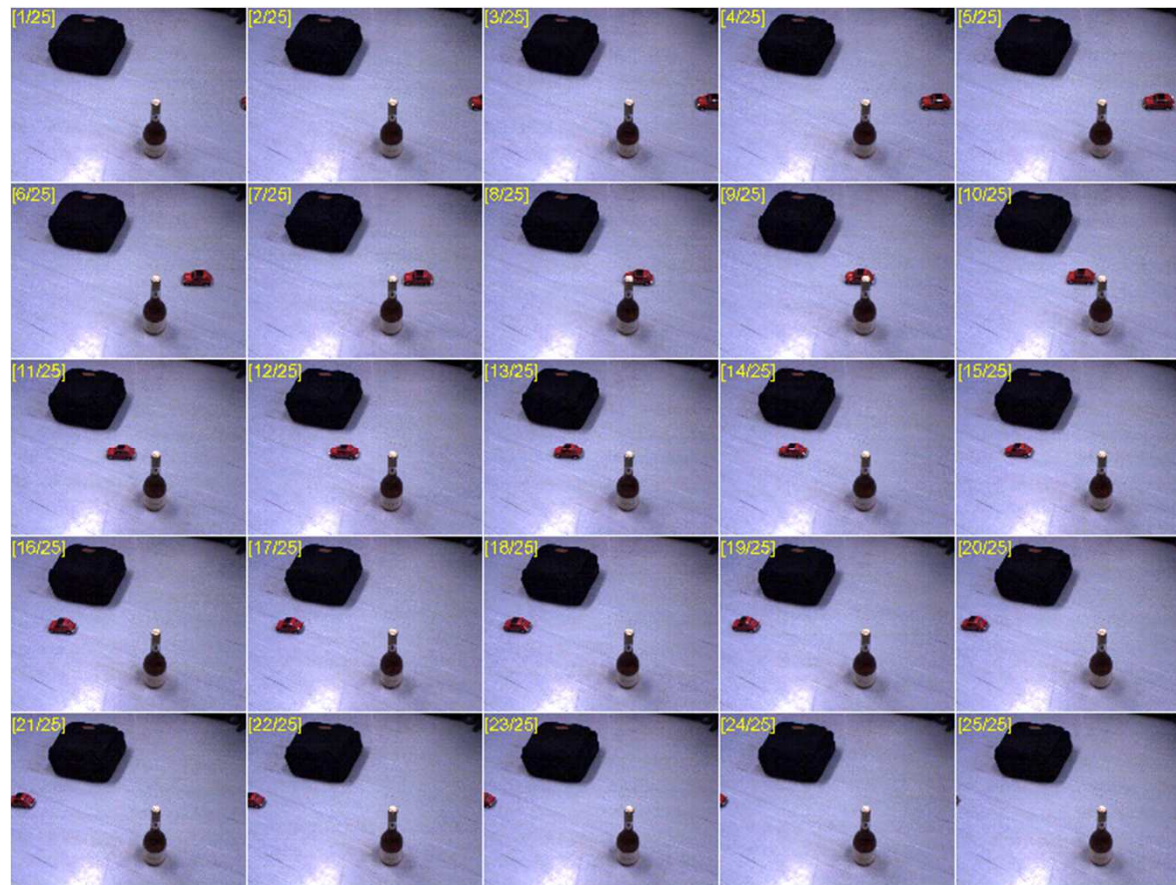
Úlohy analýzy pohybu – typy

- ▶ Nezávislá analýza pohybu:
 - provedena bez ohledu na polohu pohybujících se objektů v obraze (bez segmentace)
 - bodově (pixelově) orientovaná
 - blokově orientovaná

- ▶ Závislá analýza pohybu:
 - provedena segmentace objektů (lze využít předpoklady o pohybu tuhých těles)
 - rychlostní pole
 - rozdílové metody

Úlohy analýzy pohybu – časování

- ▮ Rychlost snímání – interval mezi snímky sekvence:
 - ekvidistantní: konstantní interval mezi po sobě jdoucími snímky
 - neekvidistantní: řízení začátku expozice snímku
 - vnitřní událost (např. dynamické pořízení snímku podle výsledku algoritmu)
 - vnější událost (např. přítomnost objektu – optická závora)



Analýza pohybu

Karel Horák

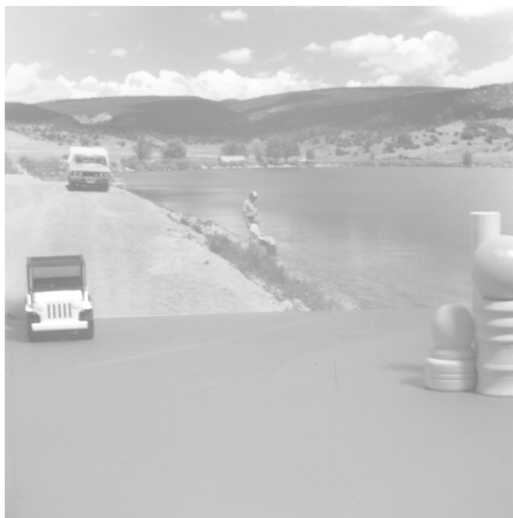
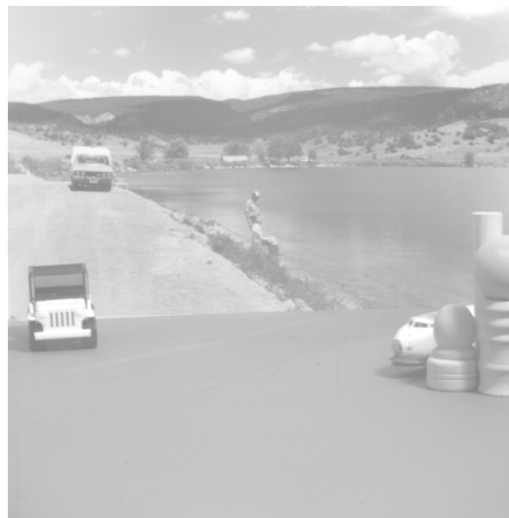
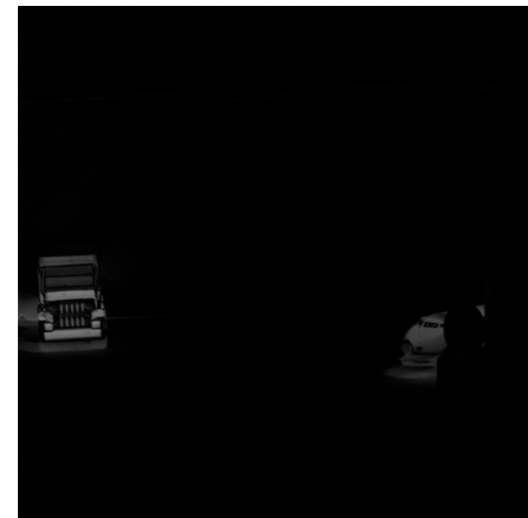


Rozvrh přednášky:

1. Úvod.
2. Úlohy analýzy pohybu.
- 3. Rozdílové metody.**
4. Estimace modelu prostředí.
5. Optický tok.

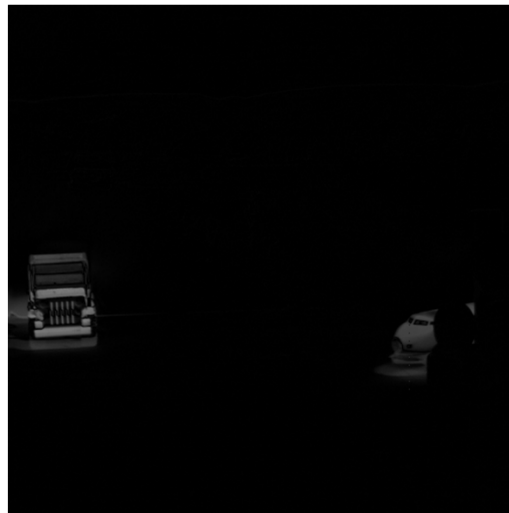
Rozdílové metody – úvod

- ▶ Jednoduché metody detekce pohybu založené na výpočtu rozdílu obrazů sekvence $\{f_1(x,y), f_2(x,y), \dots, f_n(x,y)\}$ pořázených v různých časových okamžicích $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$
- ▶ Rozdílové metody – definice:
 - pokud odpovídající si obrazové body v obrazu $f_1(x,y)$ a obrazu $f_2(x,y)$ se liší o více, než stanovený práh ϵ , došlo v tomto bodu (x,y) k významnému pohybu

 $f_1(x,y)$  $f_2(x,y)$  $|f_1(x,y) - f_2(x,y)|$ 

Rozdílové metody – úvod

- ▶ Významný pohyb mezi snímky f_1 a f_2 na souřadnicích (x,y) může být způsoben čtyřmi stavy:
 - $f_1(x,y)$ je element pohybujícího se objektu, $f_2(x,y)$ je element nepohybujícího se pozadí (nebo obráceně)
 - $f_1(x,y)$ je element pohybujícího se objektu, $f_2(x,y)$ je element jiného pohybujícího se objektu
 - $f_1(x,y)$ i $f_2(x,y)$ jsou elementy stejného pohybujícího se objektu v místech různého jasu
 - vlivem šumu a jiných nepřesností při snímání

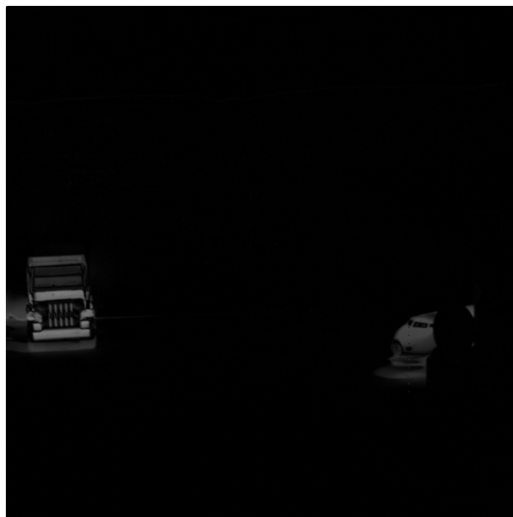


Rozdílové metody – rozdílový snímek

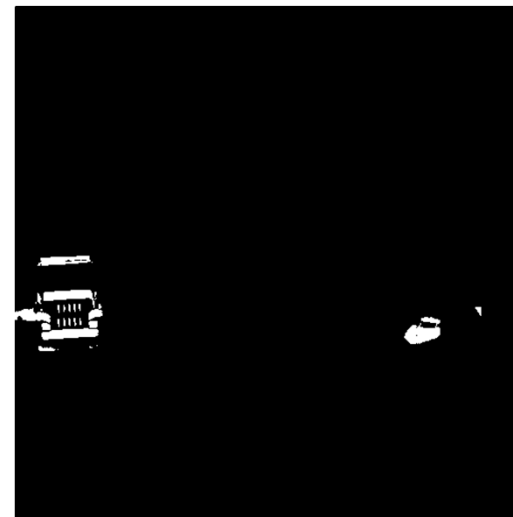
- ▶ Rozdílový snímek:
 - jednostranný = odečet hodnot $f_2(x,y)$ od $f_1(x,y)$, záporné hodnoty jsou satureovány
 - oboustranný = absolutní rozdíl $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$, záměnnost $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$
 - kumulovaný = vážený součet jednostranných nebo oboustranných rozdílových snímků sekvence

- ▶ Rozdílový snímek vs. binární rozdílový snímek (binární mapa pohybu):

$$|f_1(x,y) - f_2(x,y)|$$



$$|f_1(x,y) - f_2(x,y)| > \epsilon$$

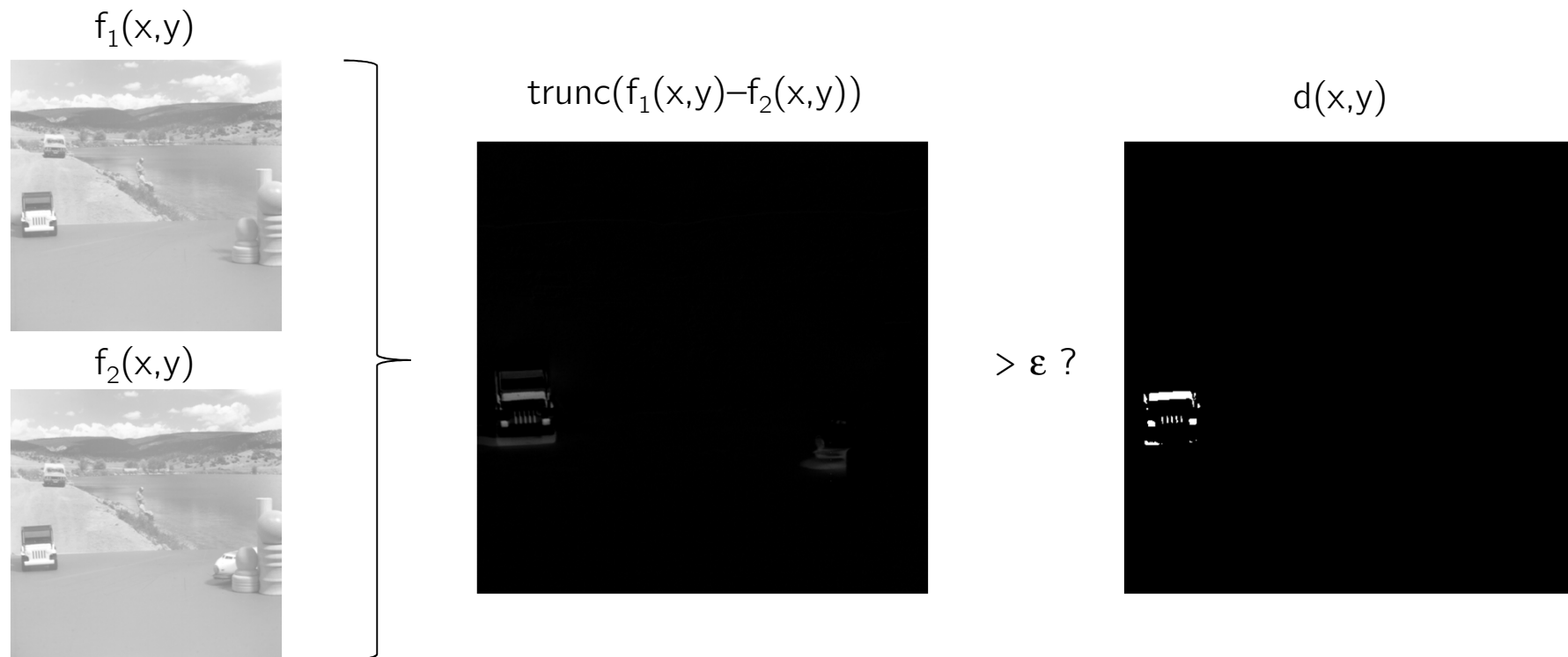


Rozdílové metody – rozdílový snímek

► Rozdílový snímek:

- jednostranný = odečet hodnot $f_2(x,y)$ od $f_1(x,y)$, záporné hodnoty jsou saturovány
- oboustranný = absolutní rozdíl $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$, záměnnost $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$
- kumulovaný = vážený součet jednostranných nebo oboustranných rozdílových snímků sekvence

$$d(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{trunc}(f_1(x, y) - f_2(x, y)) < \varepsilon \\ 1 & \text{trunc}(f_1(x, y) - f_2(x, y)) \geq \varepsilon \end{cases}$$

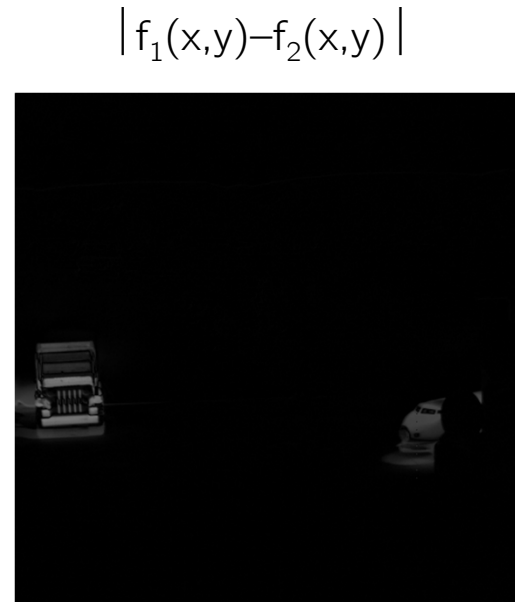
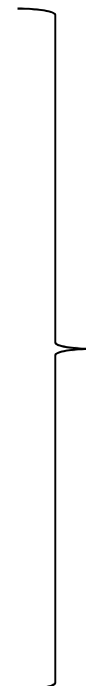
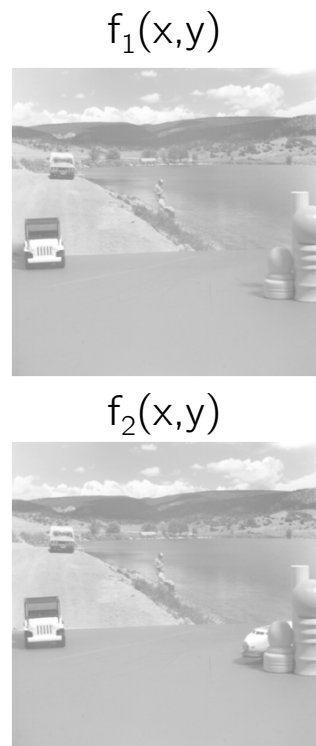


Rozdílové metody – rozdílový snímek

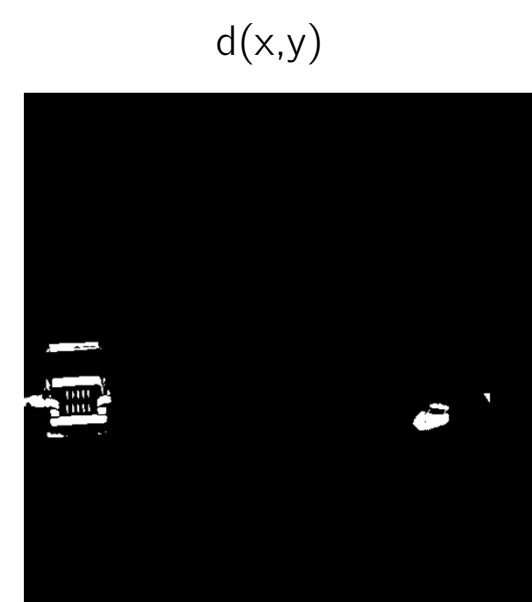
► Rozdílový snímek:

- jednostranný = odečet hodnot $f_2(x,y)$ od $f_1(x,y)$, záporné hodnoty jsou satureovány
- oboustranný = absolutní rozdíl $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$, záměnnost $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$
- kumulovaný = vážený součet jednostranných nebo oboustranných rozdílových snímků sekvence

$$d(x,y) = \begin{cases} 0 & |f_1(x,y) - f_2(x,y)| < \varepsilon \\ 1 & |f_1(x,y) - f_2(x,y)| \geq \varepsilon \end{cases}$$



$> \varepsilon ?$



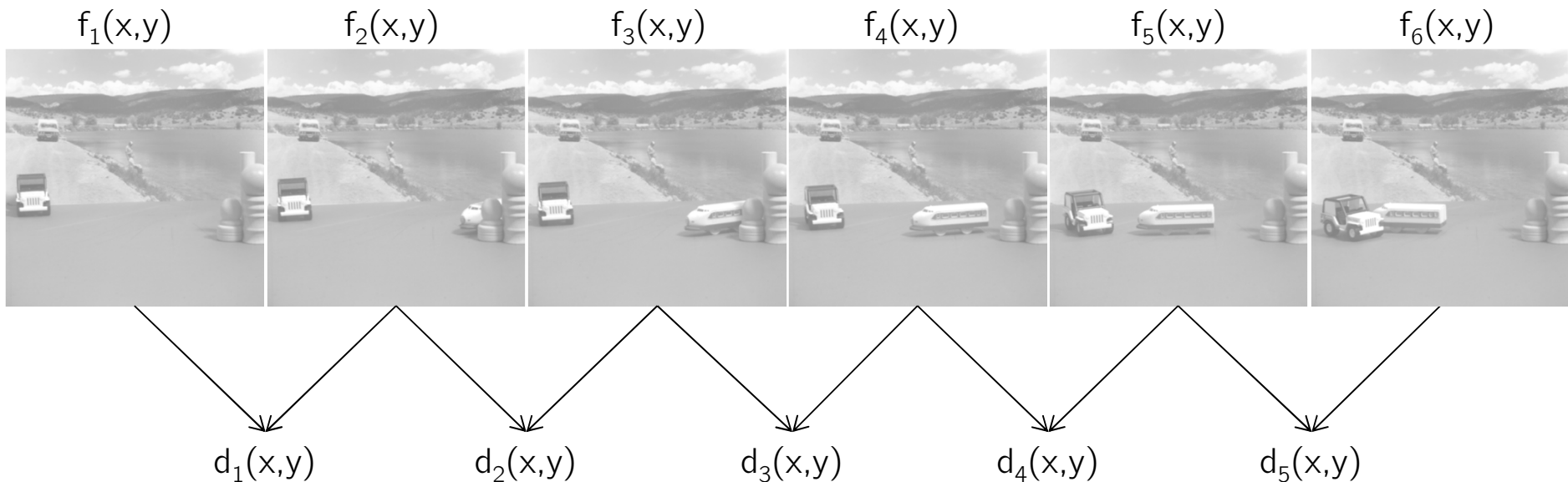
Rozdílové metody – rozdílový snímek

▀ Rozdílový snímek:

- jednostranný = odečet hodnot $f_2(x,y)$ od $f_1(x,y)$, záporné hodnoty jsou saturovány
- oboustranný = absolutní rozdíl $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$, záměnnost $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$
- kumulovaný = vážený součet jednostranných nebo oboustranných rozdílových snímků sekvence

$$d_{kum}(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} w_i \cdot d_i(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} w_i \cdot |f_i(x, y) - f_{i+1}(x, y)|$$

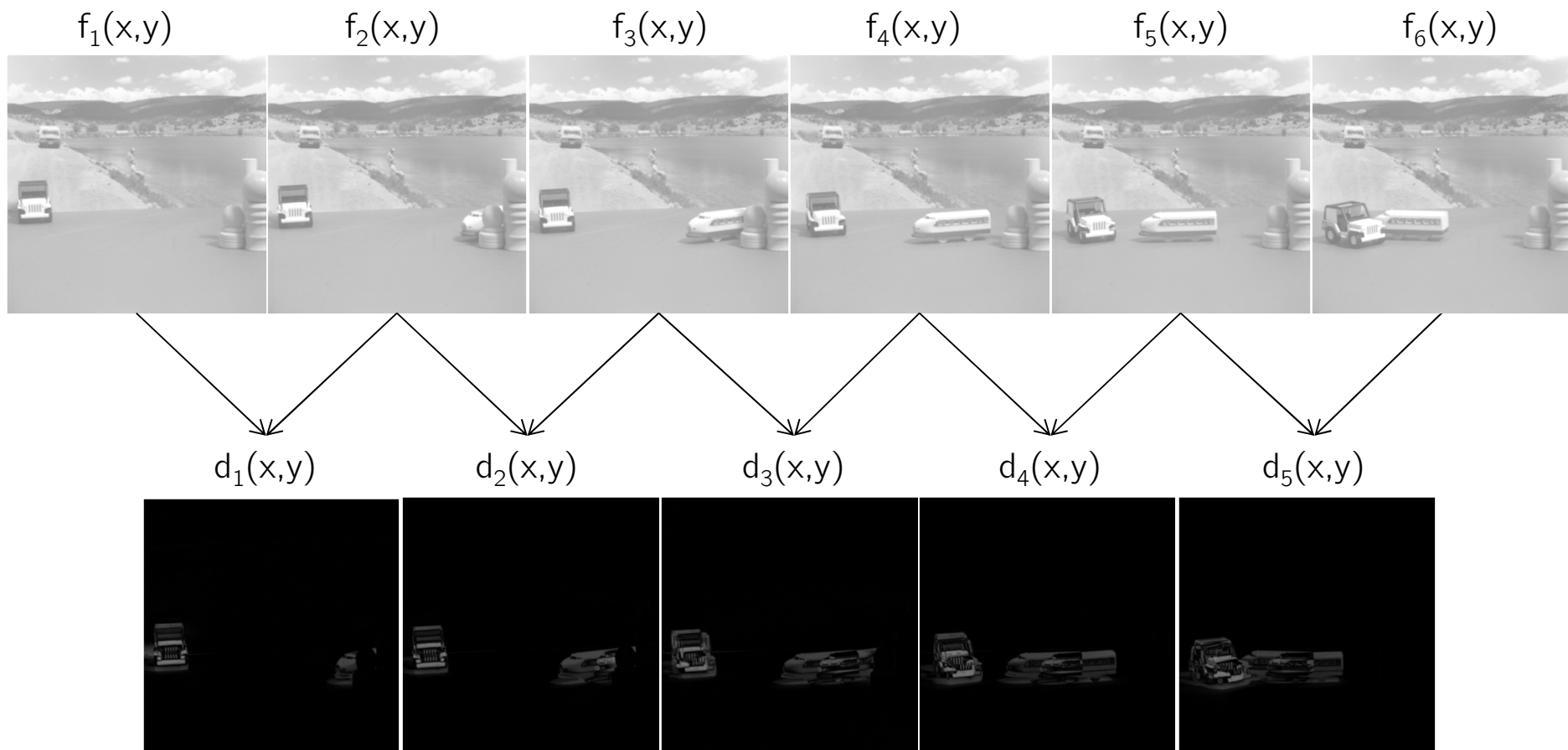
▀ Pokud mají mít rozdílové snímky stejnou váhu $\Rightarrow w_i = 1/(N-1)$



Rozdílové metody – rozdílový snímek

► Rozdílový snímek:

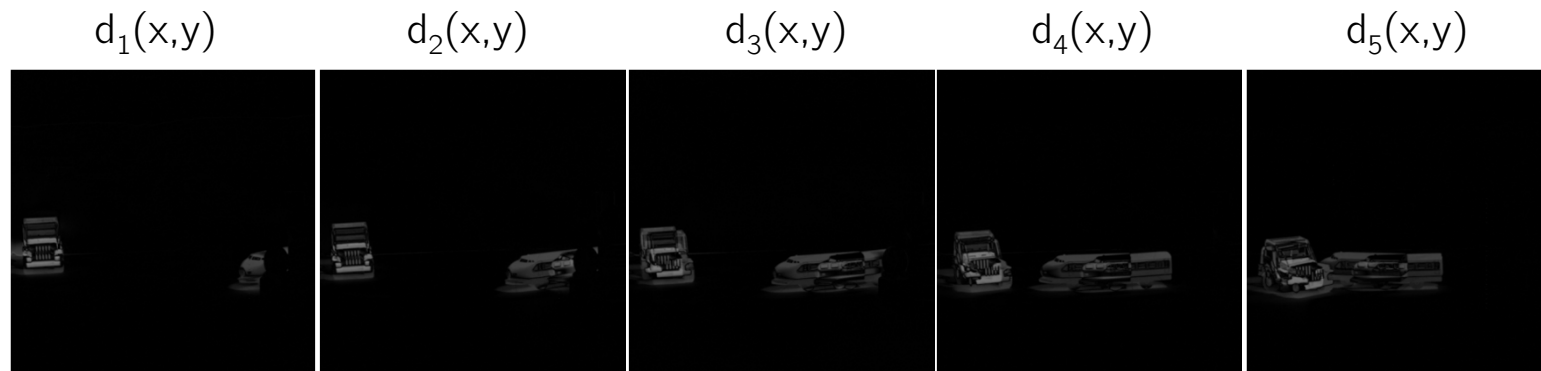
- jednostranný = odečet hodnot $f_2(x,y)$ od $f_1(x,y)$, záporné hodnoty jsou saturovány
- oboustranný = absolutní rozdíl $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$, záměnnost $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$
- kumulovaný = vážený součet jednostranných nebo oboustranných rozdílových snímků sekvence



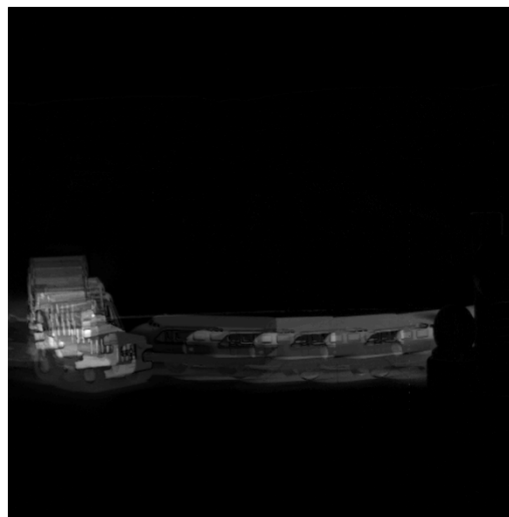
Rozdílové metody – rozdílový snímek

► Rozdílový snímek:

- jednostranný = odečet hodnot $f_2(x,y)$ od $f_1(x,y)$, záporné hodnoty jsou saturovány
- oboustranný = absolutní rozdíl $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$, záměnnost $f_1(x,y)$ a $f_2(x,y)$
- kumulovaný = vážený součet jednostranných nebo oboustranných rozdílových snímků sekvence



$$\sum_{i=1}^{N-1} w_i \cdot d_i(x, y) =$$



Rozdílové metody – vlastnosti

► Jednostranný rozdílový snímek:

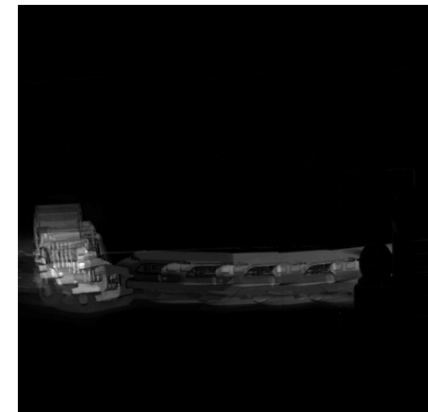
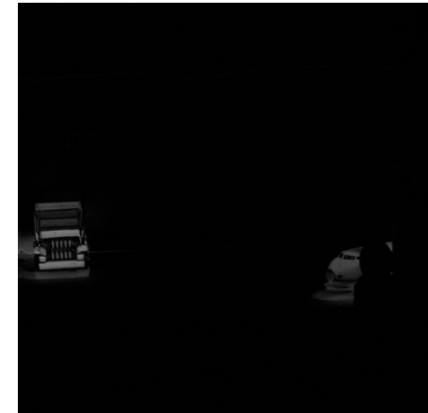
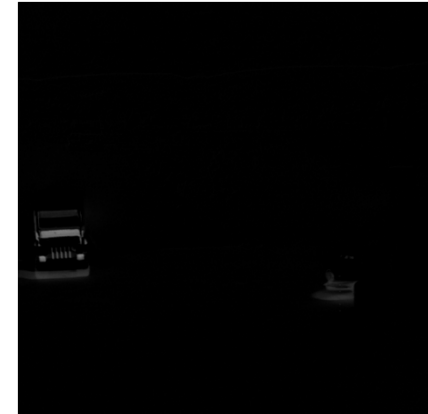
- vyhodnocuje pohyb pouze v místech, kde $f_1(x,y) > f_2(x,y)$
- nezáměnnost operandů tj. $d(f_1, f_2) \neq d(f_2, f_1)$
- základní nevýhoda: nenese informaci o směru pohybu

► Oboustranný rozdílový snímek:

- vyhodnocuje pohyb ve všech místech, kde $f_1(x,y) \neq f_2(x,y)$
- záměnnost operandů tj. $d(f_1, f_2) = d(f_2, f_1)$
- základní nevýhoda: nenese informaci o směru pohybu

► Kumulovaný rozdílový snímek:

- přebírá vlastnosti jednostranného nebo oboustranného rozdílového snímku, podle toho, který je pro sumaci použit
- základní výhoda: nese informaci o směru pohybu



Analýza pohybu

Karel Horák



Rozvrh přednášky:

1. Úvod.
2. Úlohy analýzy pohybu.
3. Rozdílové metody.
- 4. Estimace modelu prostředí.**
5. Optický tok.

Estimace modelu prostředí – statický model

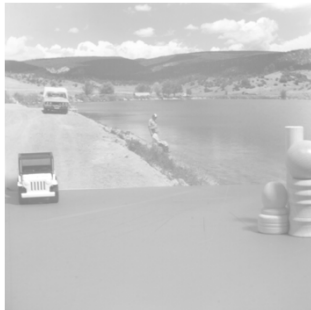
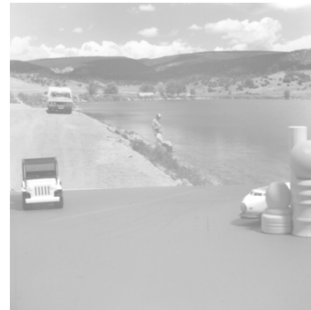
- ▶ Nevýhoda diferenčního snímku dvou po sobě následujících obrazů:
 - nedetekuje části pohybujících se objektů v místech, kde se nemění jejich jasová úroveň
↓
 - nezaznamená pohyb homogenní části objektu

- ▶ Řešení:
 - odhad nejpravděpodobnějšího statického modelu prostředí $b(x,y)$, tj. sestavení statické části scény
 - použití modelu $b(x,y)$ jako referenčního obrazu pro výpočet rozdílového snímku:

$$d(x, y) = \begin{cases} 0 & |f(x, y) - b(x, y)| < \varepsilon \\ 1 & |f(x, y) - b(x, y)| \geq \varepsilon \end{cases}$$

Estimace modelu prostředí – statický model

- ▶ Výpočet statického modelu prostředí $b(x,y)$:
 - pořídít obraz čistého prostředí tj. prostředí bez pohybujících se objektů
 - průměrný/mediánový snímek série obrazů prostředí/scény
 - použít tzv. naivní řešení, kdy první snímek sekvence reprezentuje obrazovou funkci modelu prostředí

 $f_1(x,y)$  $f_2(x,y)$  $f_3(x,y)$  $f_4(x,y)$  $f_5(x,y)$  $f_6(x,y)$  $f_7(x,y)$  $f_8(x,y)$  $f_9(x,y)$  $f_{10}(x,y)$ 

Estimace modelu prostředí – statický model

- ▮ Výpočet statického modelu prostředí $b(x,y)$:
 - pořídít obraz čistého prostředí tj. prostředí bez pohybujících se objektů
 - průměrný/mediánový snímek série obrazů prostředí/scény
 - použít tzv. naivní řešení, kdy první snímek sekvence reprezentuje obrazovou funkci modelu prostředí

$$b(x, y) = f^0(x, y)$$



Estimace modelu prostředí – statický model

- ▶ Výpočet statického modelu prostředí $b(x,y)$:
 - pořádit obraz čistého prostředí tj. prostředí bez pohybujících se objektů
 - průměrný/mediánový snímek série obrazů prostředí/scény
 - použít tzv. naivní řešení, kdy první snímek sekvence reprezentuje obrazovou funkci modelu prostředí

- ▶ Pokud není k dispozici scéna bez objektů:

průměr



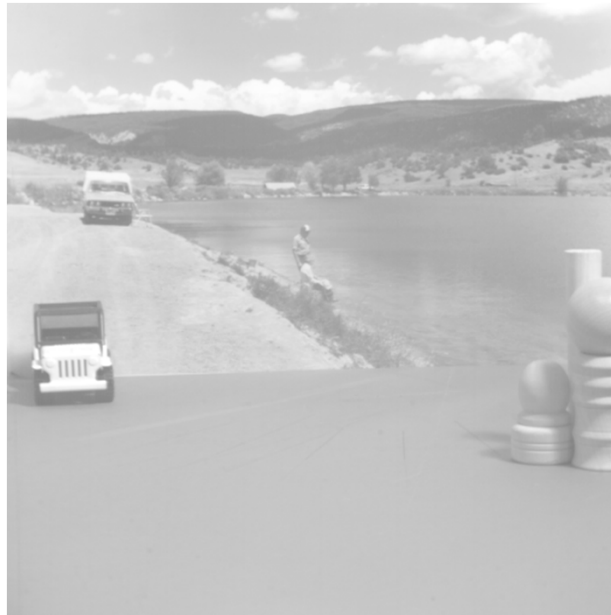
medián



Estimace modelu prostředí – statický model

- ▶ Výpočet statického modelu prostředí $b(x,y)$:
 - pořídit obraz čistého prostředí tj. prostředí bez pohybujících se objektů
 - průměrný/mediánový snímek série obrazů prostředí/scény
 - použít tzv. naivní řešení, kdy první snímek sekvence reprezentuje obrazovou funkci modelu prostředí

$$b(x, y) = f_1(x, y)$$



Estimace modelu prostředí – dynamický model

► Dynamický model:

- sestaven na začátku sekvence jako statický model
- během snímání aktualizován

► Aktualizace dynamického modelu prostředí $b(x,y)$ – iterativní algoritmus:

1. vypočti rozdílový snímek $d_1(x,y)$ posledních dvou obrazů sekvence f_i a f_{i-1}
2. pokud $d_1(x,y)$ vykazuje významnou změnu, scéna je dynamická, model prostředí se neaktualizuje, pokračuj v další iteraci od bodu 1
3. scéna je statická: vypočti rozdílový snímek $d_2(x,y)$ obrazu f_i a modelu $b(x,y)$
4. pokud $d_2(x,y)$ nevykazuje významné lokální změny (scéna je statická bez objektů) aktualizuj model $b(x,y)$ např. pomocí lineárního zapomínání $b(x,y) = \alpha \cdot f_i(x,y) + (1-\alpha) \cdot b(x,y)$, $\alpha = 0.001$
5. pokračuj v následující iteraci od bodu 1

Analýza pohybu

Karel Horák

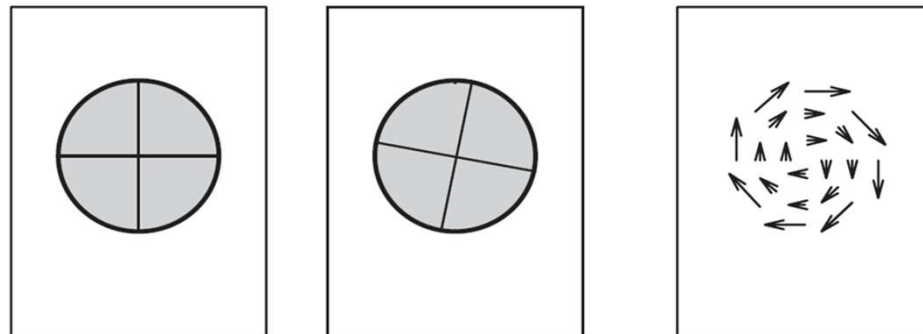


Rozvrh přednášky:

1. Úvod.
2. Úlohy analýzy pohybu.
3. Rozdílové metody.
4. Estimace modelu prostředí.
- 5. Optický tok.**

Optický tok – definice

- ▶ Optický tok = reálný pohyb objektů v obrazu za časový interval dt
- ▶ Re prezentace optického toku:
 - dvourozměrné pole $\Phi(x,y)$ shodných dimenzí jako vstupní obraz
 - každý prvek $\Phi(x,y)$ je obsahuje dvojrozměrný vektor rychlosti (v_1, v_2) odpovídající amplitudě a směru pohybu objektu v daném bodu
- ▶ Dva snímky sekvence a grafická interpretace pole odpovídajícího optickému toku:



- ▶ Vlastnosti optického toku:
 - závislost na aperturním problému
 - závislost na změně osvětlení scény
 - zaznamenává i relativně nevýznamný pohyb (výsledek závisí na interpretaci hodnot $\Phi(x,y)$)

Optický tok – odvození

- Dynamický obraz = jasová funkce polohy a času $f(x,y,t)$:
 - tato funkce určuje hodnotu jasu v místě (x,y) a čase t
 - hodnotu jasu po elementární změně souřadnic a času lze vyjádřit:

$$f(x + dx, y + dy, t + dt) = f(x, y, t) + \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial t} dt = f(x, y, t) + f_x dx + f_y dy + f_t dt$$

pozn.: rozvinutí změny jasové funkce do Taylorovy řady prvního řádu

- Pro nalezení bodové korespondence mezi dvěma po sobě jdoucími snímky platí předpoklad konstantní jasové hodnoty vyšetřovaného bodu tj. platí:

$$f(x + dx, y + dy, t + dt) = f(x, y, t)$$

- Dosazením druhé rovnice do první lze obdržet definiční vztah optického toku:

$$f_x dx + f_y dy + f_t dt = 0 \Rightarrow f_x \frac{dx}{dt} + f_y \frac{dy}{dt} = -f_t$$

Optický tok – odvození

- ▶ Cíl výpočtu optického toku = určit vektor rychlost \mathbf{v} :

$$\vec{v} = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right)^T$$

- ▶ Výpočetní náročnost pro stanovení odhadu optického toku:
 - stanovení odhadu optického toku z definičního vzorce je výpočetně extrémně náročné
 - využívá se zjednodušení: rozdílové metody pro zjištění míst, kde došlo k pohybu a výpočet optického toku v blízkém okolí
 - optimalizované diferenciální algoritmy: Lucas-Kanade, Horn-Schunck, Buxton-Buxton

