

## Automatizace a robotizace ve strojírenství

# Senzorika pro vizualizaci technologické scény

# Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

Vlastimil Hotař, ZS 2021

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény*

Vizualizací technologické scény je myšleno použití (nejčastěji) **snímačů obrazu** (průmyslových kamer) pro detekci objektů v rámci **výroby a technologického postupu** pro:

- řízení,
  - regulaci,
  - kontrolu a
  - sledování
- činnosti strojů, zařízení a výrobního procesu.

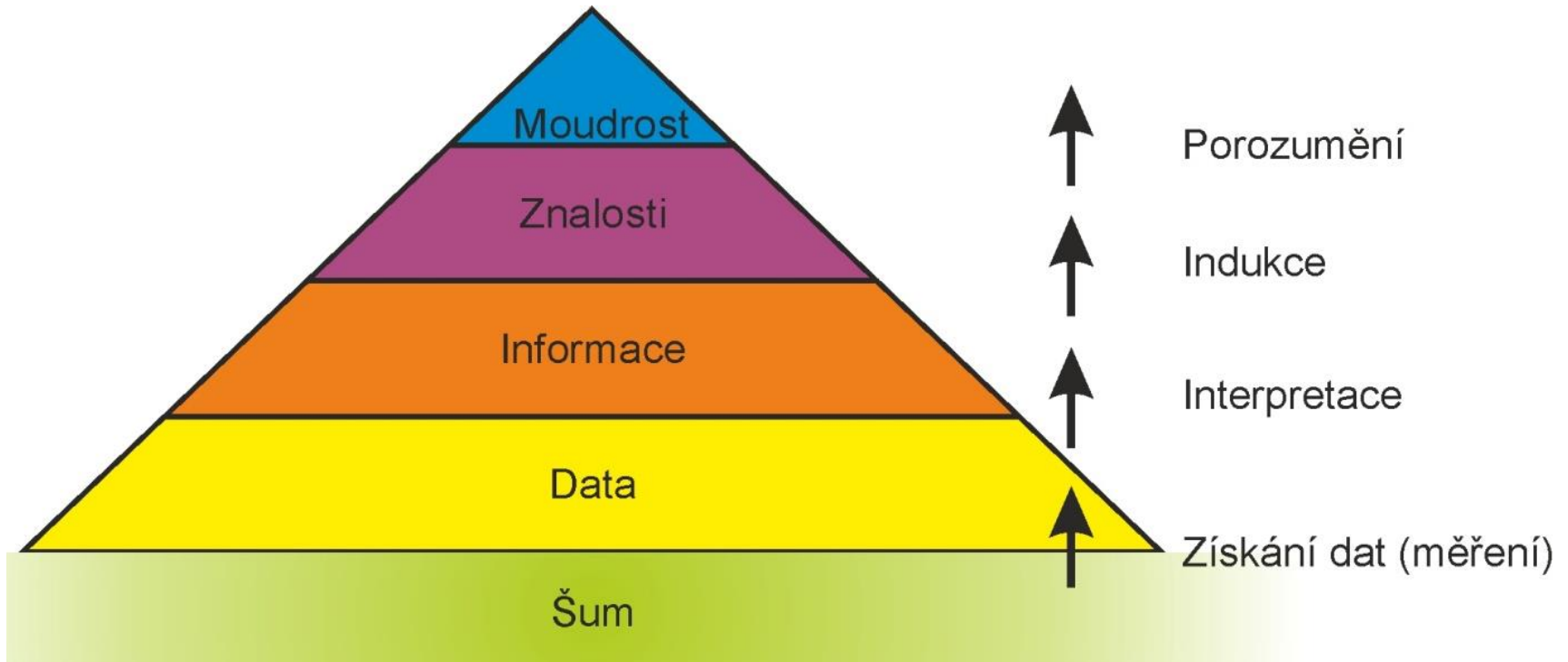
## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény*

Jedná se například o umístění kamery pro zjištění:

- polohy výrobků v bednách pro jejich automatické vybírání (tzv. bin-picking),
- úplnosti výrobku,
- vad,
- polohy,
- rozpoznání.

U **servisní robotiky** může pomocí kamer docházet k detekci objektů a osob v okolí stroje, atd.

## Senzorika pro vizualizaci technologické scény



*Znalostní pyramida rozšířená o šum a procesy vedoucí k posunu o úroveň výše*

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény*

Kamery (snímače obrazu) získávají **obrazová data**, která jsou následně **sdílěna a interpretována** na informace.

Získání obrazových dat pomocí optického elektromagnetického záření je **radiometrické měření** za použití vhodných snímačů - citlivých na sledované spektrum záření.

Podmínkou zůstává uspořádání jednotlivých buněk v senzoru do **vhodného rastru**, ten je nejčastěji volen ve **dvozměrném maticovém uspořádání**.

Jednotlivé „**buňky**“ snímače (odborně nazývány pixely) **měří dopadající záření v daném časovém intervalu**.

Nejčastěji je snímači pro optické záření měřena **intenzita a vlnová délka** elektromagnetického záření.

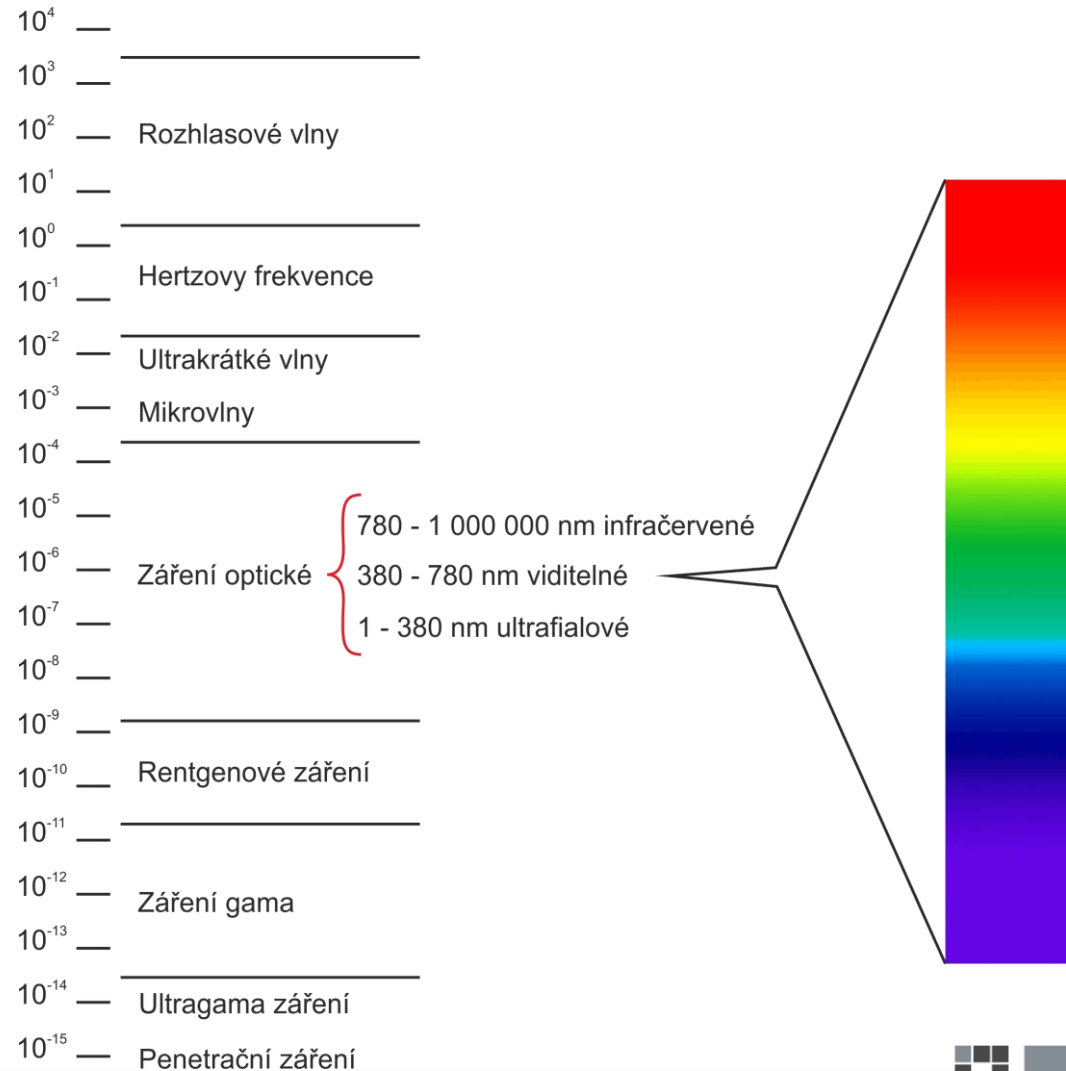
## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény*

Běžné kamery využívají **viditelného spektra elektromagnetického záření (VIS)** s přesahem do **blízkého ultrafialového záření (od 300 nm, NUV)** a **blízkého infračerveného záření (do 1 000 nm, NIR)**.

Tímto je definován **rozsah detekovaného spektra**.

# Senzorika pro vizualizaci technologické scény

## Elektromagnetického záření



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény*

V praxi jsou dnes nejčastěji používány snímače:

- CMOS APS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Active Pixel Sensor)
- CCD (Charge-coupled device) snímači.

Oba pracují na stejném principu, **vnitřního fotoelektrického jevu**.

Foton po interakci s atomem dokáže přemístit některý z jeho **elektronů ze základního do excitovaného stavu**.

**V polovodiči** je možno uvolněný valenční elektron přitáhnout k přiloženým kladným **elektrodám**, které jsou ale od polovodiče izolovány.

Vznikají tak **potenciálové jamky** (miniaturní obrazové buňky), které jsou následně **vyčítány, zesíleny a digitalizovány**.



## Senzorika pro vizualizaci technologické scény - Princip CCD

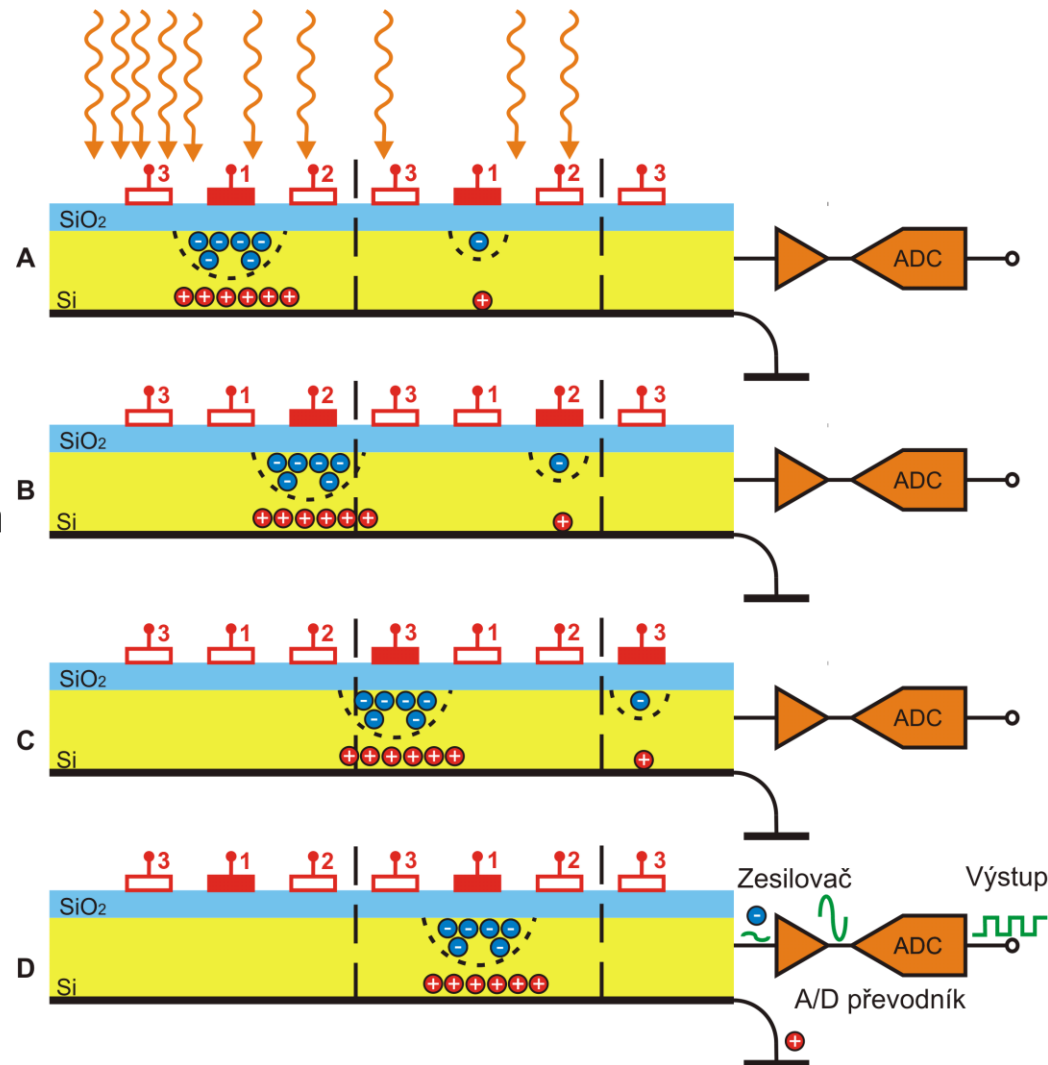
Princip činnosti CCD snímače:

A – expozice obrazu, na elektrody 1 se přivede kladné napětí a otevře se závěrka (na snímač se nechá působit světlo);

B – snímání obrazu, na každé buňce jsou umístěny další dvě elektrody (2, 3), na elektrodách 2 se začne pozvolna zvyšovat napětí, zatímco na elektrodách 1 se souběžně snižuje;

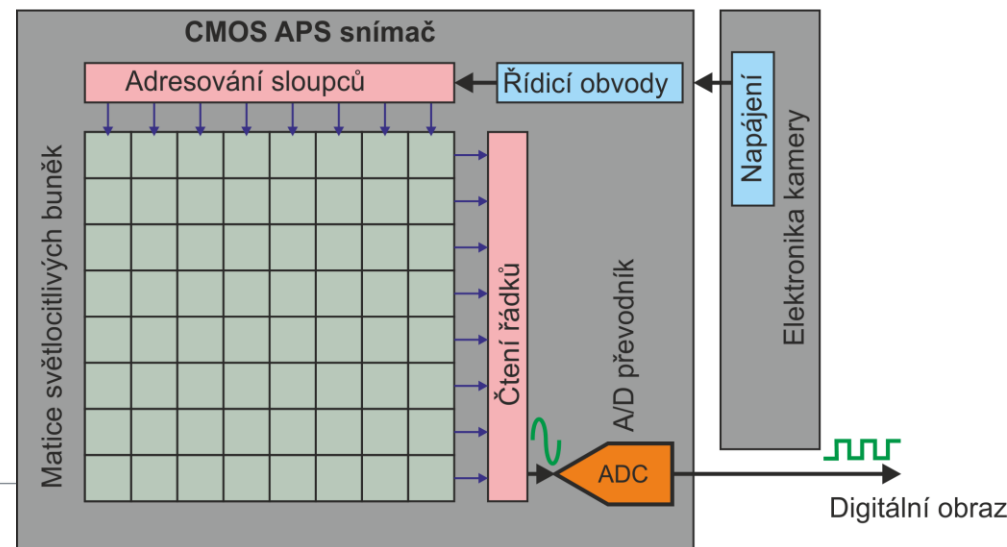
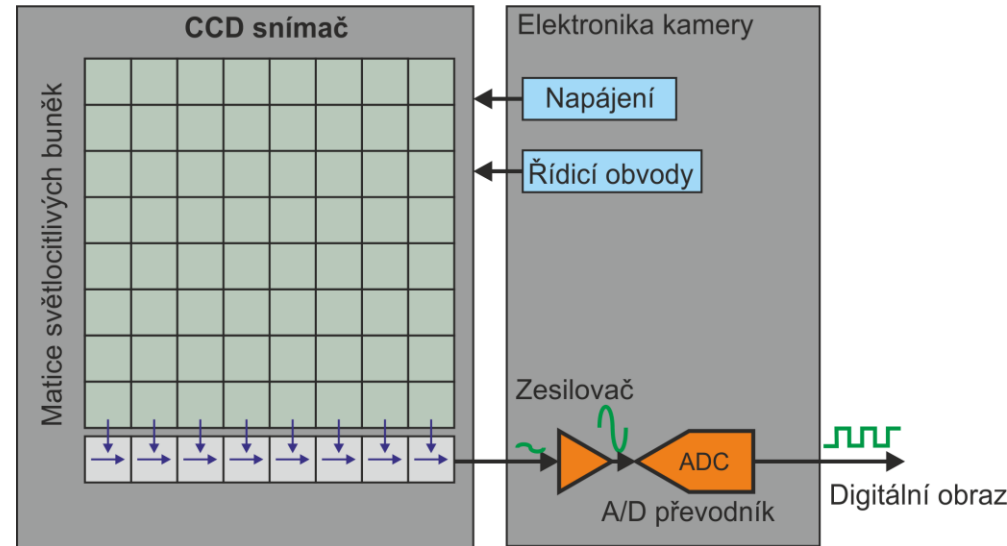
C – pokračování snímání obrazu, na elektrodách 3 se začne pozvolna zvyšovat napětí, na elektrodách 2 se souběžně snižuje;

D – zesílení signálu a převod na digitální výstup



# Senzorika pro vizualizaci technologické scény - **CCD vs. CMOS APS**

Rozdíl mezi CCD a CMOS APS je ve vyčítání elektronů



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény - CCD vs. CMO APS*

U **CCD** snímače je použit **posuvný registr** a buňky jsou postupně vyčítány, zesilovány a pomocí A/D převodníku je signál digitalizovaný.

U CMOS APS jsou buňky snímače **vyčítány přímo**. Snímač funguje na principu použití tranzistoru, kdy každá buňka má svůj zesilovač a A/D převodník. Může být díky tomu přímo adresována a čtena pomocí jejích X, Y souřadnic na snímači.

***Fill factor** je poměr plochy citlivé části buňky (fotodiody) vůči celkové ploše buňky. Pojem se používá i v jiných oblastech techniky.*

Parametr	CCD	CMOS APS
Signál vystupující z pixelu	Paket elektronů	Napětí
Signál vystupující z čipu	Napětí (analogový signál)	Bity (digitální signál)
Rychlost	Nízká, sekvenční čtení	Vysoká, maticově adresované buňky
Citlivost	Velmi dobrá, lze dosáhnout kvalitního obrazu, lepší barevná věrnost snímků	Za snížených světelných podmínek může být problém dosáhnout kvalitního zobrazení, horší rozlišení barev
Dynamický rozsah	Vysoký	Průměrný
Šum	Malý, velká kvalita obrazu	Je větší s ohledem na nižší fill factor (část světlocitlivé buňky je zakryta elektronikou)
Odběr energie	Odebírá více (uvádí se až 50 x více než CMOS APS)	Relativně malý
Složitost čipu a náklady na vývoj	Menší	Velké
Složitost systému	Velká, mnoho obvodů je mimo čip	Menší, většina obvodů je přímo na čipu
Cena	Vysoká, jedná se o specializovanou výrobní technologii	Levnější, je využíváno standardní technologie výroby logických obvodů



## *Senzorika pro vizualizaci ... – Kvantování, datová hloubka*

Digitalizace signálu představuje kvantování **podle požadované datové hloubky**, tedy na požadovaný **počet úrovní jasu**.

Jestliže je pro získání obrazových dat o obrazovém elementu (pixelu) použito  $b$  bitů, je počet úrovní jasu

$$k_j = 2^b$$

Jedná se o **radiometrické rozlišení**. V současné době většina kamer pracuje s 10 až 12 bity na pixel.

U 10 bitů, respektive 12 bitů monochromatického obrazu lze na jednom pixelu získat 1 024, respektive 4 096 úrovní jasu.

Pro většinu aplikací ovšem postačuje u monochromatického obrazu **8 bitů** na pixel, což představuje **256 hodnot**.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – **Rozsah spektra***

Uvedený fyzikální princip CCD a CMOS APS, který využívá polovodičů na bázi křemíku, má širší rozsah detekovaných vlnových délek než má lidské oko.

Konkrétně je uváděn rozsah spektra **300 až 1 000 nm**.

**Blízké infračervené elektromagnetického záření (NIR) ve vlnových délkách 750 až 1 000 nm není viditelné lidským okem, v pořízeném obrazu se tak mohou objevit nečekané odrazy.**

V případě vyšší intenzity NIR záření může dojít snadno k přetečení kapacity jednotlivých obrazových buněk a přebytečné elektrony se pak roztečou do okolních buněk (pixelů).

Výsledkem je **znehodnocený snímek**.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Rozsah spektra*

Pro záznam pouze ve VIS oblasti spektra je proto používán **IR-cut filtr**, který odfiltruje záření z NIR oblasti a zabrání infračervené složce, aby se uplatnila v získaných obrazových datech.

IR-cut filtry mohou výrobci umístit přímo na **ochranné sklíčko** umístěné před senzorem (u monochromatických kamer) nebo na barevné filtry u kamer pro snímání v barevné škále.

Tyto filtry mohou být také umístěny **v optice objektivu**.

Tímto je definován **rozsah detekovaného spektra**.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Závěrka*

Elektronická závěrka:

- **Celková závěrka** (global shutter) se vyznačuje tím, že senzor je vystavován světlu v jediném časovém okamžiku. Obrazová data z horní, střední a dolní části senzoru jsou přenášena téměř současně.
- **Rolovací závěrka** (rolling shutter, line scan) je většinou levnější a na rozdíl od celkové závěrky dochází k načítání jednotlivých řádků s buňkami (celého snímku) postupně shora dolů. Protože je snímek načítán postupně v řádcích, ale je zobrazován vcelku, mohou být kolmé hrany pohybujícího se objektu zobrazené na výsledném snímku jako šikmé. Senzory s rolovací závěrkou jsou **levnější**, ale nejsou vhodné pro **úlohy s pohybem kamery** nebo při **pohybu** ve snímané technologické scéně.



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Závěrka*



*Rolovací závěrka*

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Barevná škála*

V současné době je v průmyslové praxi nejrozšířenější využití monochromatických kamer (kamer snímajících v šedé škále).

Vedle měření jasu, je možné získat i informace o vlnové délce, přesněji získat **barevnost sledovaných objektů** v podobném vyjádření tak, **jak je vnímá lidské oko**.

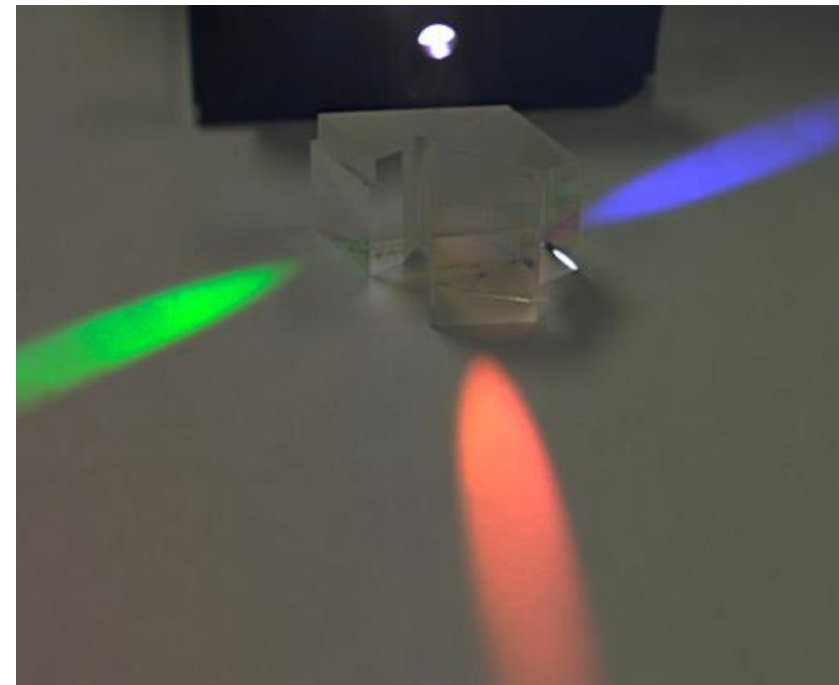
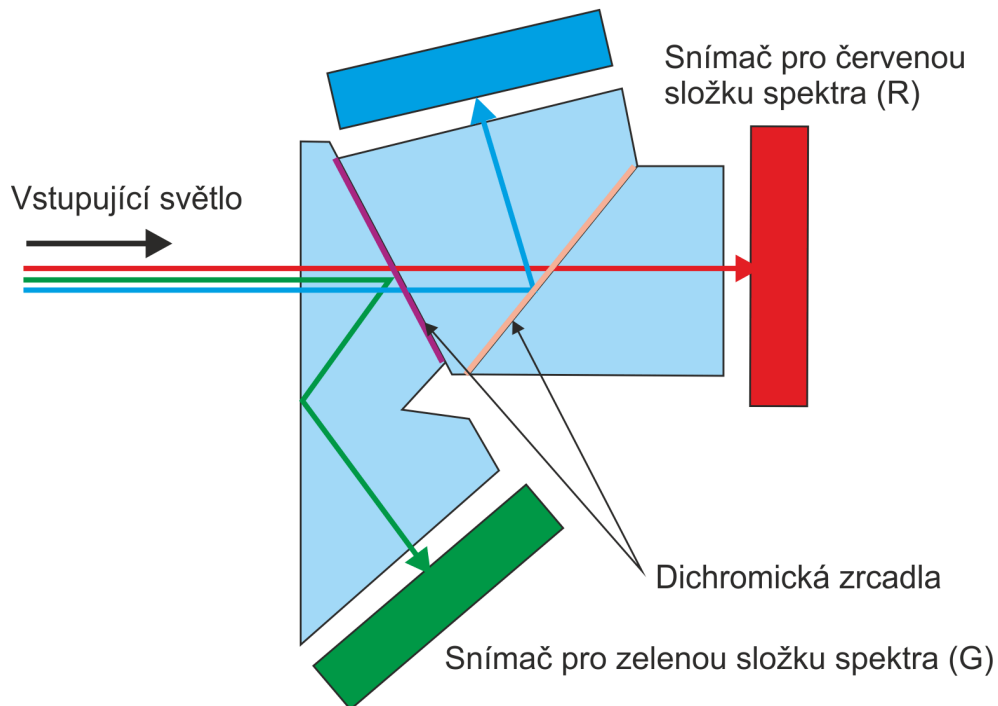
Pro získání barevného obrazu je možné využít dvou základních principů:

- tříčipové uspořádání a
- jednočipové s barevným filtrem.

## Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Barevná škála

**Tříčipové uspořádání** je založeno na rozložení bílého denního světla na primární barvy červenou (R), zelenou (G) a modrou (B) soustavou optických hranolů se dvěma polopropustnými (dichromatickými) zrcadly s nanesenými barevnými filtry.

Snímač pro modrou složku spektra (B)



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Barevná škála*

Tato optická soustava **rozdělí obraz** na obrazy pro tři CCD snímače, které zaznamenávají **jednotlivé barevné složky** obrazu.

Výsledkem je tak **prostorová matice** o třech hladinách.

Výhody:

- plné rozlišení RGB snímků,
- vysoká citlivost (protože světlo je zpracováno v původní podobě jeho jednoznačnými charakteristikami).

Nevýhody:

- vysoká cena,
- větší rozměry a hmotnost,
- požadavek speciální (dražší) optiky.

## Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Barevná škála

**Jednočipové snímání s barevným filtrem** je založeno na umístění šachovnicového vzoru přímo před jednotlivé pixely jediného snímače.

Většinou je využíváno **tří základních barev modelu RGB**, kde problém s uspořádáním do matice je řešen pomocí barevných filtrů, nejčastěji tzv. Bayerova filtru.

	0	1	2	3		$X_{S-2}$	$X_{S-1}$
0	G	B	G	B		G	B
1	R	G	R	G		R	G
2	G	B	G	B		G	B
3	R	G	R	G		R	G
$Y_{S-2}$	G	B	G	B		G	B
$Y_{S-1}$	R	G	R	G		R	G

RGB (RGBG)

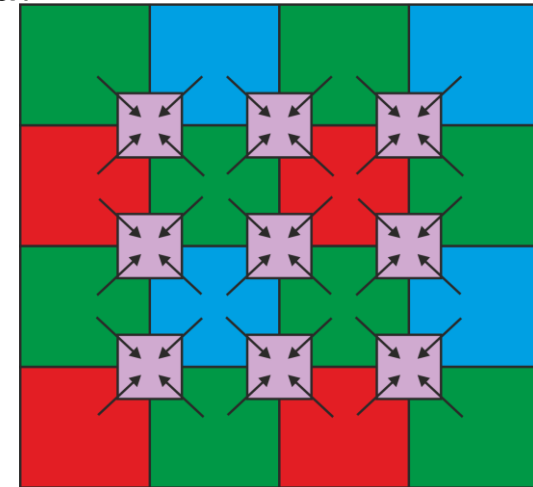
## Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Barevná škála

Filtr má **dvojnásobný počet zelených buněk** oproti buňkám červeným a modrým.

Důvodem je, že lidské oko je nejcitlivější na žlutozelenou barvu a informace o této barvě je tak pro lidské oko nejdůležitější.

Obraz se načte běžným způsobem a teprve dalším zpracováním se plnohodnotné barvy jednotlivých pixelů **interpolují** z nejbližších pixelů jednotlivých barev RGB, nejčastěji **ze sousedních 4 pixelů**.

Při detailním pohledu jsou pak drobné **detaily „rozpité“**.



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Velikost snímače*

Tento parametr významně ovlivňuje **citlivost** a tím i míru **šumu**.

Větší snímač při stejném rozlišení má větší buňky, na které dopadá více záření, což vede k nižšímu šumu a obraz je tak kvalitnější.

Na druhou stranu je nutné počítat s vlivem ohniskové vzdálenosti objektivu představeného před snímač na zorný úhel a tím i na zorné pole.

Velký snímač potřebuje pro dosažení stejného zorného úhlu objektiv s delší ohniskovou vzdáleností.

S prodlužováním ohniska objektivu také **klesá hloubka ostrosti**, což v některých technických aplikacích může být nežádoucí.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Velikost snímače*



S velikostí snímače klesá hloubka ostrosti (vlevo malý snímač, vpravo velký snímač)



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Velikost snímače*

Velikost snímače je uváděna v palcích a jedná se o hodnotu, která **nekoresponduje přímo s velikostí snímače**, pro přepočítání je potřeba použít tabulky.

Obecně je u průmyslových aplikací trend ke **zmenšování velikosti snímače** při stejném plošném rozlišení (běžně 1/2“ až 2/3“, více se uplatňují senzory velikosti 1“).

Pro praktické využití je potřeba si uvědomit, že **senzory s menší světlocitlivou buňkou vyžadují intenzivnější osvětlení**.

## Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Velikost snímače

Velikosti běžně užívaných optických snímačů

Typ	Poměr Š:V [-]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Diagonála [mm]
1/6"	4:3	2,300	1,730	2,878
1/4"	4:3	3,200	2,400	4,000
1/3.6"	4:3	4,000	3,000	5,000
1/3.2"	4:3	4,536	3,416	5,678
1/3"	4:3	4,800	3,600	6,000
1/2.7"	4:3	5,270	3,960	6,592
1/2"	4:3	6,400	4,800	8,000
1/1.8"	4:3	7,176	5,319	8,932
2/3"	4:3	8,800	6,600	11,000
1"	4:3	12,800	9,600	16,000
4/3"	4:3	18,000	13,500	22,500



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – **Plošné rozlišení***

**Plošné rozlišení**, tedy vzorkování, je vzdálenost mezi nejbližšími snímanými (vzorkovacími) body v obraze (obrazovými buňkami, pixely).

Otázku plošné vzorkovací frekvence (vzdálenosti vzorkovacích bodů) řeší **Shannonova věta o vzorkování**.

Z věty vyplývá, že vzorkovací frekvence musí být **alespoň dvakrát větší než nejvyšší zajímavá frekvence ve vzorkovaném signálu**.

V případě použití nižší vzorkovací frekvence (nižšího rozlišení) může dojít k **tzv. aliasingu**.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Plošné rozlišení*

O rozlišení snímače tak primárně rozhoduje **požadovaná přesnost měření**.

Vzhledem ke zmíněným podmínkám, musí být **rozlišení alespoň dvakrát vyšší než požadovaný nejmenší měřitelný rozměr**.

Nicméně tato teoretická přesnost a s ní související opakovatelnost měření je snižována:

- vlivem šumu v obraze,
- interpolací barevného obrazu,
- ztrátovou kompresí obrazových dat a
- dalšími vlivy.

Je tak třeba počítat s rezervou, která závisí jak na **snímaném objektu**, tak **nabídce senzorů** s patřičným rozlišením.

Zkušenost ukazuje, že pro zpracování obrazu je třeba vzorkovat **minimálně 5krát jemněji**, než je teoretická mez daná vzorkovací větou. Rozlišení by tak mělo být minimálně **pětkrát větší než je teoretická mez**.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Plošné rozlišení*

**Běžné průmyslové kamery** dnes mají plošné rozlišení okolo **5 Mpx**, existují ovšem i kamery s rozlišením 47,5 Mpx (7 920 x 6 004 pixelů).

Při tomto rozlišení je třeba řešit **přenos** velkého objemu dat z kamery do vyhodnocovací jednotky, což je řešeno několikanásobným rozhraním Camera Link nebo CoaXPress.

V současné době je špičkou v rozlišení kamera **shr411CCX**, která má plošné **rozlišení 151 Mpx** (14192 x 10640 pixelů), velikost senzoru 53.36 x 40.01 mm, při rychlosti snímání 6,1 fps pro 4 linie CoaXPress.



<https://www.svs-vistek.com/en/industrial-cameras/svs-camera-detail.php?id=shr411CCX>

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Časové rozlišení*

**Časové rozlišení** snímačů nebo také **frekvence** či **rychlost snímání** je důležitý parametr při získávání snímků z relativně rychlých procesů.

Při volbě kamery je tak třeba znát **rychlost procesu**, který bude snímán a **s rezervou** zvolit příslušnou kameru.

Frekvence snímání se uvádí v **počtu snímků za sekundu** (fps – frames per second).

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Časové rozlišení*

V současné době se běžně hodnoty pohybují **od 3 fps** (barevné kamery s 16 Mpx CCD senzory, např. u kamery JAI AB-1600CL) až **po 750 fps** („rychloukamery“ s rozlišením VGA, výhradně CMOS APS snímače).

Běžná frekvence snímání u kamer s plošným rozlišením 5 Mpx se pohybuje v současné době **od 10 do 250 fps**, což je postačující pro většinu průmyslových aplikací.

Některé kamery umožňují rychlý záznam pouze ve zvolené **oblasti zájmu** (ROI, Region of Interest).

Příkladem může být kamera Basler acA2500-60um s větším snímačem (1“), která při specifikaci ROI 640 x 480 může zaznamenat **až 978 snímků za sekundu**.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Rozhraní*

**Rozhraní (interface)** je používán pro komunikaci kamery s vyhodnocovací jednotkou.

Dostupných je několik typů rozhraní, každý nabízí trochu jiné vlastnosti a hodí se pro jiný typ aplikací.

Výběr kamery do jisté míry závisí na možnostech komunikace se systémem pro zpracování obrazu.



## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Rozhraní*

Někdy výrobce kamer nabízí stejný model ve dvou a více variantách lišících se právě typem připojení, o jeho volbě rozhoduje především:

- **rychlost přenosu dat**, tedy objem dat, který je odeslán do počítače za danou časovou jednotku,
- **latence**, tedy zpoždění mezi pořízením snímku a jeho zobrazením/doručením ke zpracování,
- **vzdálenost**, na kterou mají být data přenesena (vzdálenost mezi počítačem a kamerou),
- **způsob napájení** (komunikační rozhraní může zajistit i napájení kamery),
- **zpoždění příkazů** (přicházejících z počítače do kamery a obráceně, důležité především při snímání rychlých procesů),
- **možnost připojení více kamer** (je-li vyžadována),
- **zatížení procesoru CPU nebo GPU**,
- **cena a další.**

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Rozhraní*

Dnes se používají tyto typy rozhraní:

- USB 3.0,
- Gigabit Ethernet (GigE Vision),
- Camera Link a
- CoaXPress.

Starší rozhraní jsou:

- USB 2.0,
- FireWire (IEEE 1397 a/b) a
- analogové.

## *Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Další parametry*

Dalšími parametry je:

- rozsah expozičních časů,
- formát výstupních dat,
- možnosti řízení kamery (vstupy),
- závit objektivu,
- způsob upevnění kamery,
- napájení,
- odolnost vůči okolním vlivům (krytí, odolnost proti vibracím, odolnost proti mechanickému namáhání, rozsah teplot a vlhkosti okolí kamery při provozu, ...) a
- další (výrobce kamery a senzoru, ...).

## *Senzorika pro vizualizaci – Vyhodnocovací jednotka*

Průmyslové kamery jsou pomocí uvedeného rozhraní připojeny k **vyhodnocovací jednotce**, nejčastěji k PC.

Samotné získávání obrazu není většinou automatické po připojení kamery, ale je třeba mít **nainstalovány potřebné ovladače** a základní **software** od výrobce kamery.

Základní software často umí jen **zobrazit obraz z kamery**, ovládat **parametry kamery**, **pořídit snímek**, případně i **záznam**.

Úprava, zpracování a analýza obrazu jsou již záležitostmi složitějšího **programování** nebo **parametrizace** v uživatelsky přívětivém prostředí.

## *Senzorika pro vizualizaci – Vyhodnocovací jednotka*

Místo PC může být použit **kompaktní a odolný systém** uzpůsobený pro průmyslové aplikace (Compact Vision System, CVS).

Kompaktní systém je vlastně počítač **optimalizovaný** pro zpracování obrazu s **minimalizací mechanických prvků**, které významněji limitují užití klasických počítačů v průmyslové praxi.

Takovéto systémy jsou pak snadno propojitelné a obsahují širší škálu nástrojů pro práci s pořízeným obrazem, která nevyžaduje znalost programovacích jazyků. Nutno je ovšem počítat s **vyšší cenou**.

## Senzorika pro vizualizaci – **Objektiv**

**Objektiv** představuje systém optických elementů tzv. čoček a soustředí obraz na snímač.

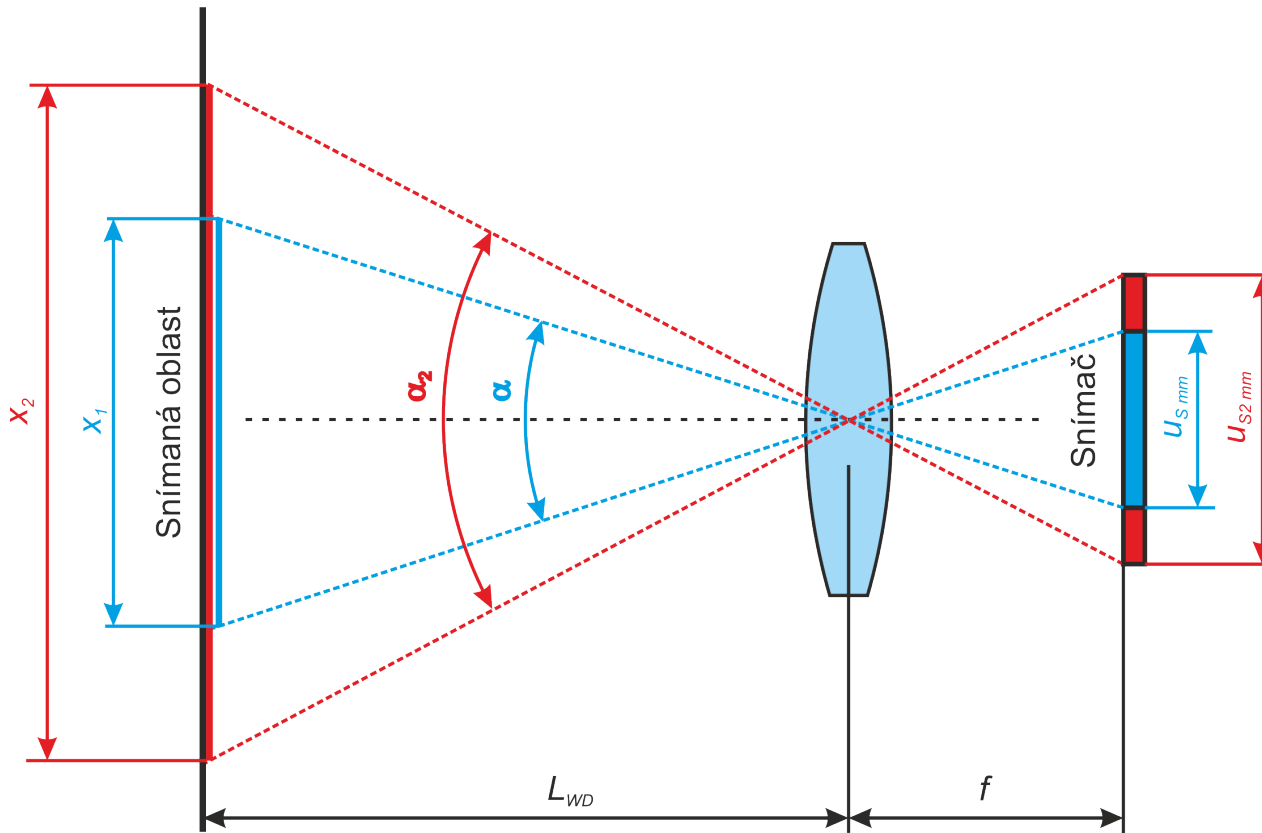
U převážné většiny objektivů pro spektrum VIS, NIR a NUV je možné pomocí **kroužku na objektivu obraz zaostřit.**



## Senzorika pro vizualizaci – Objektiv

Hlavním parametrem je **ohnisková vzdálenost**:

- určuje úhel záběru,
- je závislá na velikosti čipu.



## *Senzorika pro vizualizaci – Objektiv*

Většina objektivů pro průmyslové aplikace má **pevnou ohniskovou vzdálenost**.

Pro daný typ kamery s danou velikostí snímače je **třeba určit objektiv**, který bude mít **vhodný úhel záběru**, umožňující snímání celé scény z požadované vzdálenosti.

Vychází se z **velikosti oblasti zájmu**, která je určena maximální velikostí předpokládaného snímaného objektu (bez nutnosti výměny objektivu).

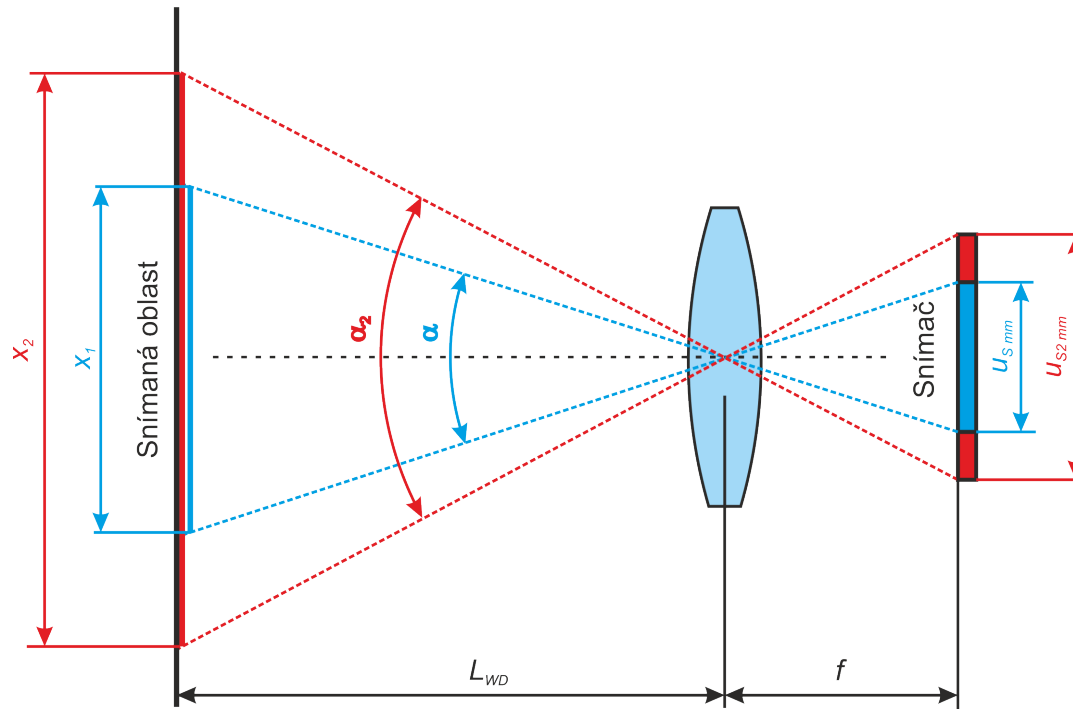
Oblast by měla být s rezervou nakonec větší, a to i s ohledem na pokles rozlišení a kontrastu objektivu směrem k okrajům.



## Senzorika pro vizualizaci – Objektiv

Vztah mezi velikostí oblasti zájmu ( $x_1$ , [mm]), velikostí snímače ( $u_s$ , [mm]), pracovní vzdáleností kamery ( $L_{WD}$ , [mm]) a ohniskovou vzdáleností ( $f$ , [mm]). Matematicky je pak možno vyjádřit vztah z poměrů:

$$\frac{u_s}{x_1} = \frac{f}{L_{WD}}$$

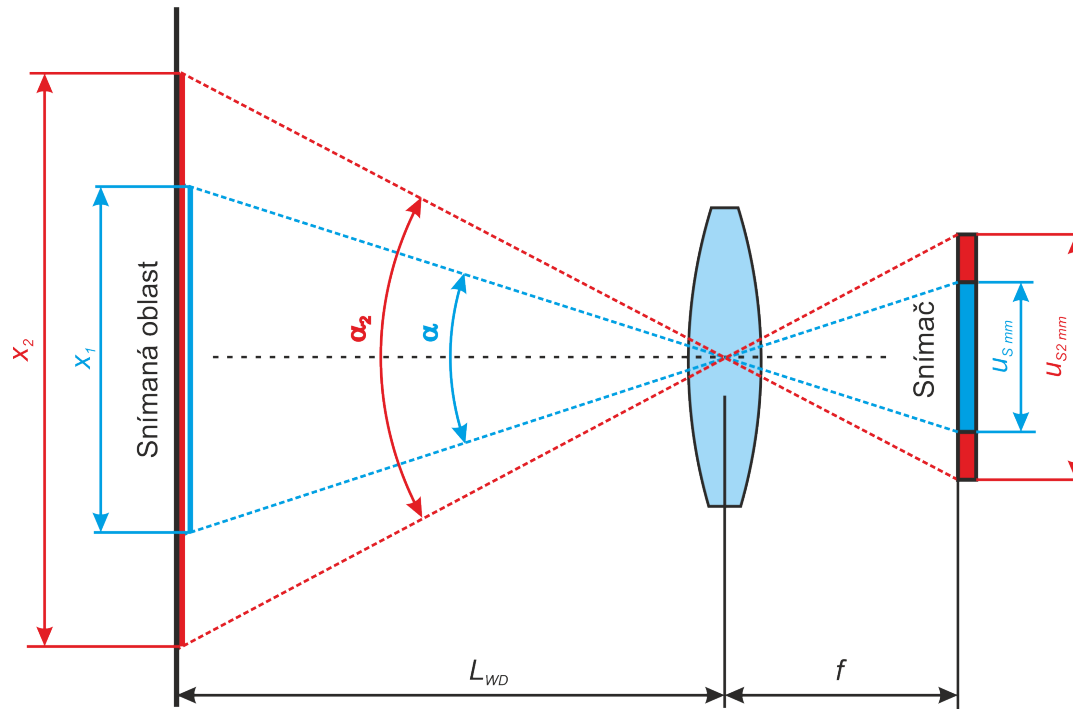


## Senzorika pro vizualizaci – Objektiv

Z uvedeného lze pak odvodit vztah pro ohniskovou vzdálenost [mm]:

$$f = L_{WD} \cdot \frac{u_s \text{ mm}}{x_1}$$

Velikost snímače je uváděna v palcích, je tak třeba použít tabulku, která uvádí velikosti optických snímačů v mm.



## Senzorika pro vizualizaci technologické scény – Velikost snímače

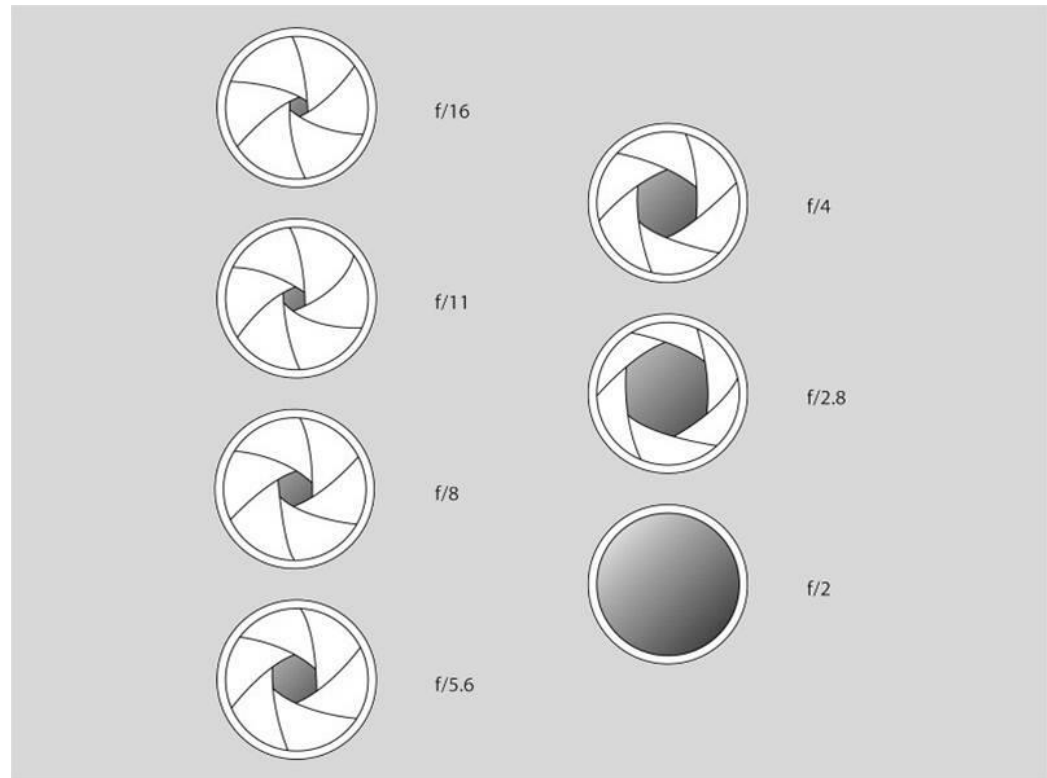
Velikosti běžně užívaných optických snímačů

Typ	Poměr Š:V [-]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Diagonála [mm]
1/6"	4:3	2,300	1,730	2,878
1/4"	4:3	3,200	2,400	4,000
1/3.6"	4:3	4,000	3,000	5,000
1/3.2"	4:3	4,536	3,416	5,678
1/3"	4:3	4,800	3,600	6,000
1/2.7"	4:3	5,270	3,960	6,592
1/2"	4:3	6,400	4,800	8,000
1/1.8"	4:3	7,176	5,319	8,932
2/3"	4:3	8,800	6,600	11,000
1"	4:3	12,800	9,600	16,000
4/3"	4:3	18,000	13,500	22,500



## Senzorika pro vizualizaci – Clona

V objektivě bývá zabudována **mechanická clona**, která dovoluje regulovat množství světla procházející objektivem. Je to velmi důležitý nástroj pro ovlivnění expozice.



[https://shopdelta.eu/iris\\_l21\\_aid792.html](https://shopdelta.eu/iris_l21_aid792.html)

[https://www.idnes.cz/technet/audio-foto-video/co-musi-umet-kazdy-objektiv-aby-fotky-staly-za-to-podrobny-pruvodce.A071108\\_120848\\_tec\\_foto\\_jlb](https://www.idnes.cz/technet/audio-foto-video/co-musi-umet-kazdy-objektiv-aby-fotky-staly-za-to-podrobny-pruvodce.A071108_120848_tec_foto_jlb)

## *Senzorika pro vizualizaci – Expozice*

Vedle správného zaostření, nasvětlení scény, volby vhodného objektivu, snímače a dalších faktorů, je třeba na snímač přivést **požadované množství světla a vzniklý signál správně zesílit.**

O tom rozhoduje **expoziční**, která je závislá v optickém spektru elektromagnetického záření na třech hlavních faktorech:

- doba expozice (čas expozice, rychlost závěrky),
- clona a
- zisk (gain, kontrast, u komerčních fotoaparátů známé jako ISO).

## *Senzorika pro vizualizaci – Expozice*

***Doba expozice*** určuje, jak dlouho je otevřena závěrka a snímač je tak vystaven působení světla přicházejícího ze scény.

## Senzorika pro vizualizaci – Expozice

**Clona** je průměr otvoru, kterým prochází světlo, tedy je **to fyzické omezení množství světla** přicházejícího na snímač.

Clona je většinou součástí objektivu,  $N_c$  je clonové číslo [-] a platí pro ně vztah:

$$N_c = \frac{f}{C}$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost [mm] a  $C$  je průměr otvoru clony [mm]. Ze vztahu vyplývá závislost clonového čísla na průměru otvoru clony a ohniskové vzdálenosti.

Je tím ovlivněno i množství dopadajícího světla procházející optikou kamery, tedy expozice.

## *Senzorika pro vizualizaci – Expozice*

Zesílení signálu ze senzoru neboli **zisk** (anglicky označováno gain) ovlivňuje u snímačů přímo **míru šumu**.

U fotoaparátů na kinofilmy se vyjadřuje jako **ISO** citlivost.

V technické praxi nemá smysl normovat vlastní zesílení pro digitální snímače – kamery, protože citlivost senzorů na světlo je různá.



## *Senzorika pro vizualizaci – Expozice*

Pomocí tří uvedených parametrů lze **nastavovat expozici**.

Platí, že stejné expozice lze dosáhnout různou **kombinací všech tří faktorů**, ale nezíská se stejný obraz.

Pro rychle se měnící scénu je nutné snímat v kratších časech. Pak je nutné otevřít clonu (nastavit malé clonové číslo) nebo více zesílit vystupující signál ze snímače.

**Otevřením clony se sníží hloubka ostrosti**. Vzdálenější a bližší části scény od zaostřeného objektu jsou pak rozostřené, což může v některých případech úloh v průmyslové praxi být nežádoucí.

Druhá možnost **zesílit vystupující signál** zase zvyšuje **relativní míru šumu** v získaném snímku.

Vedle těchto tří faktorů lze ovlivnit expozici **pomocí osvětlovačů** (zdrojů záření dané vlnové délky nebo častěji v daném rozsahu vlnových délek).

## Senzorika pro vizualizaci – **Osvětlení**

**Osvětlení** technologické scény a sledovaného objektu je další důležitou součástí hardware kamerového systému.

Problematika je **velmi náročná na řešení**, protože neplatí jednoduchá pravidla a osvětlení pro daný typ technologické scény a sledovaného objektu nemusí být vhodné pro jiný.

O volbě správného osvětlení **rozhodují** vlastnosti tří prvků zařízení pro strojové vidění:

- 1) Vlastnosti snímače** (rozsah vlnových délek elektromagnetického záření, na kterou je citlivý, velikost snímače, možnosti zesílení signálu, ...).
- 2) Vlastnosti snímané scény**, což je objekt a pozadí (odraz záření od povrchu pro dané vlnové délky, absorpce záření, emise záření, záření prošlé objektem, poloha snímaných objektů atd.).
- 3) Vlastnosti záření** (intenzita osvětlení, pozice zdroje, vlnová délka emitujícího záření, míra difúze záření a směrovosti, ...).

## *Senzorika pro vizualizaci – Osvětlení*

U vlastností snímané scény je důležité respektovat, **k jakým jevům** dochází při dopadu optického záření dané vlnové délky do prostoru scény.

U optického záření má elektromagnetické vlnění charakter vlnový a fotony nemají vysokou energii.

Dochází tak, mimo jiné, k jevům jako je **odraz a lom záření**.

## *Senzorika pro vizualizaci – Osvětlení*

### **Při volbě osvětlení je třeba především znát:**

- jaká vlnová délka se bude od povrchu objektu **odrážet**, při dopadu se vždy část záření absorbuje, absorpce může být v celém snímaném spektru stejná, nebo větší v určitých vlnových délkách (u VIS se jedná pak o barvy objektů),
- kde mezi extrémními případy se nachází **povrch** sledovaného objektu a pozadí (dokonale zrcadlový a Lambertovský povrch – dokonale difúzní), tedy zda odraz bude více **zrcadlový nebo difúzní** v daném sledovaném pásmu elektromagnetického záření,
- pokud je objekt **transparentní**, je důležité vědět, jaká vlnová délka je více **absorbována**, a která objektem **prochází** (což způsobí pokles intenzity procházejícího světla a případně i změnu barvy procházejícího záření ve VIS spektru), dále zda při průchodu záření dochází k **rozptylu** záření (např. vystupující světlo je více difúzní),
- zda objekt **emituje** záření ve spektru, na které je citlivý použitý snímač (např. roztavené sklo, tedy sklovina, emituje viditelné záření),
- v jaké **poloze** je sledovaný objekt a objekty pozadí vůči snímači a zdroji záření.

## *Senzorika pro vizualizaci – Osvětlení*

**Správná volba typu osvětlení** technologické scény dokáže nejen velmi **zrychlit a zjednodušit** následnou analýzu obrazu, ale také rozhodnout, **zda je možné** danou scénu vůbec snímat.

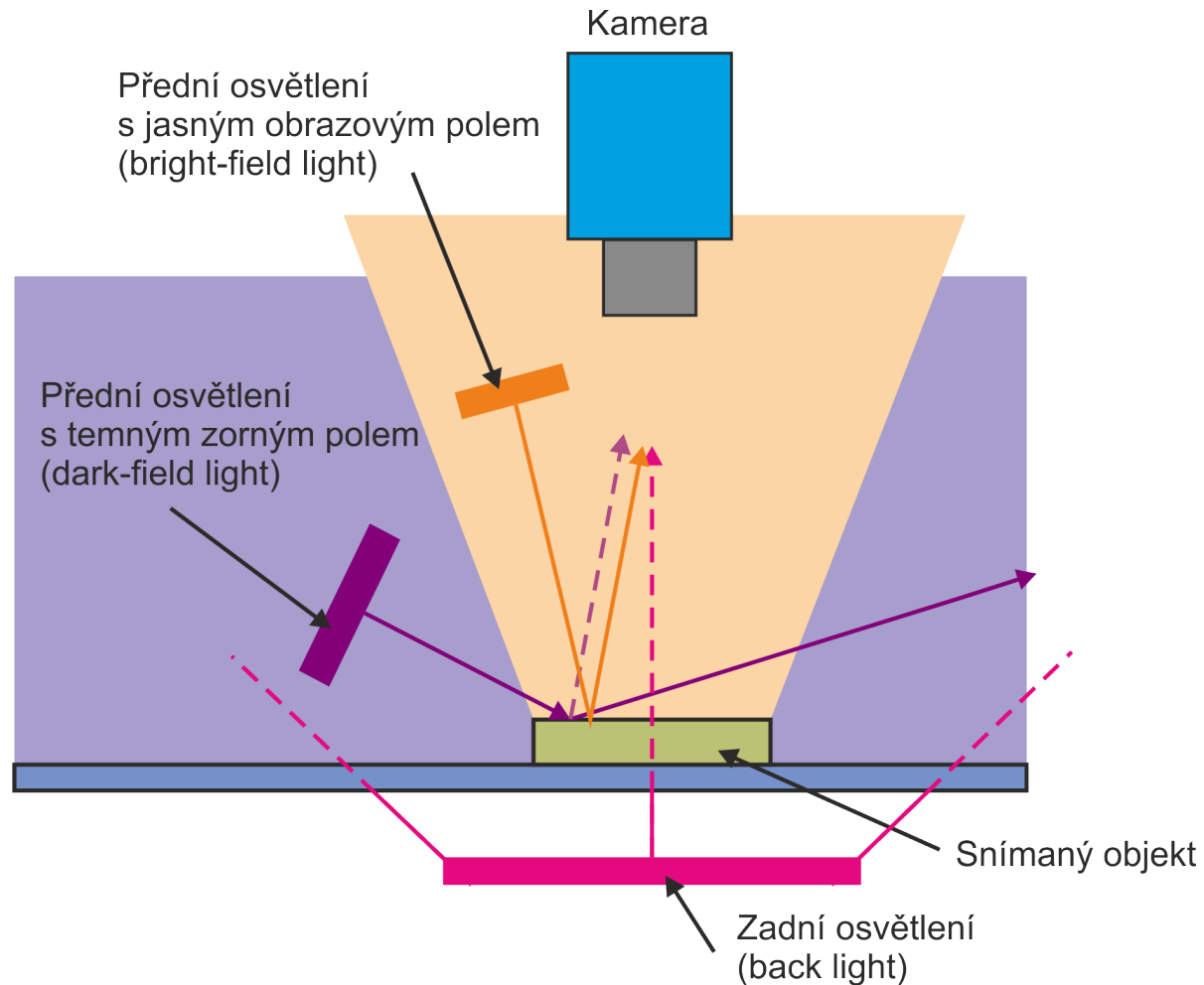
Zvláště je-li scéna tvořena **transparentními, lesklými** nebo reliéfně nevýraznými objekty, je návrh osvětlení pro celkový úspěch klíčový.

Zdrojem záření může být například sluneční světlo, zářivka, žárovka, výbojka, ale u profesionálních průmyslových řešení se jako zdroj záření používají **LED diody, laser** atd. LED nepotřebují vysoké napětí a jejich světelný tok může být regulován.

Vlastnosti záření těchto osvětlovačů se s časem **mění jen málo** a mají **dlouhou životnost**.

## Senzorika pro vizualizaci – Osvětlení

U LED zdrojů (i zdrojů na bázi zářivek a výbojek) lze rozdělit základní geometrii osvětlení podle:

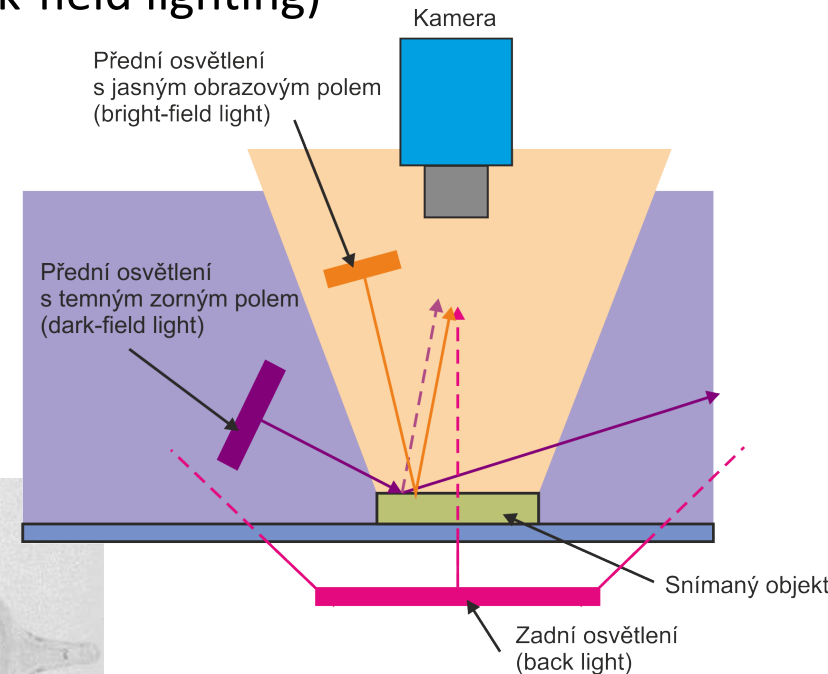
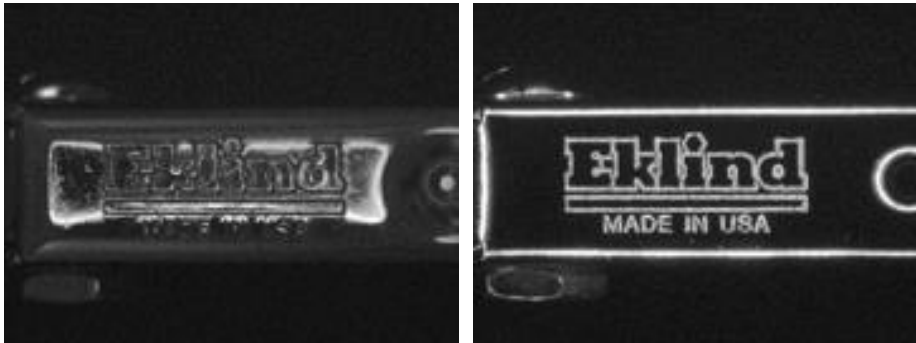


## Senzorika pro vizualizaci – Osvětlení

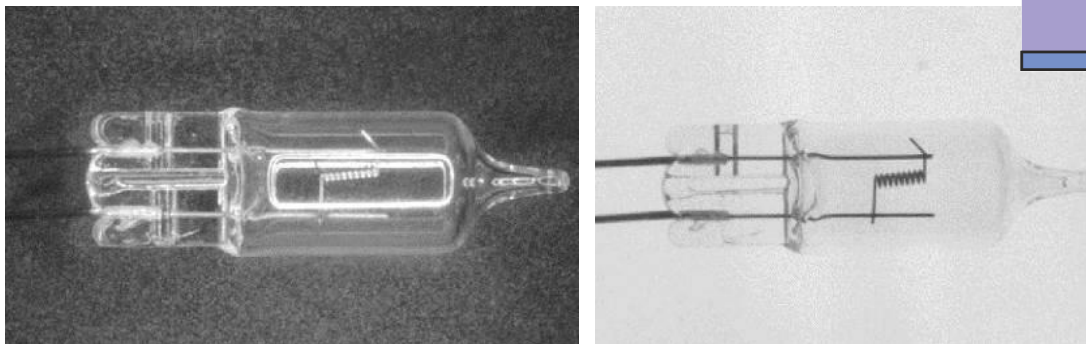
U LED zdrojů (i zdrojů na bázi zářivek a výbojek) lze rozdělit základní geometrii osvětlení podle:

**Přední osvětlení s jasným obrazovým polem**

**Přední osvětlení s tmným zorným polem (dark-field lighting)**



**Zadní osvětlení (back lighting)**



## *Senzorika pro vizualizaci – Osvětlení*

Samotné záření z osvětlovačů může být:

- více rozptýlené (difúzní) nebo
- směrové až koncentrované.

Obecně platí, že **rozptýlené záření snižuje kontrasty způsobené členitostí objektu** a strukturou povrchu a zvýrazní **kontrasty způsobené absorpcí**.

Naopak, při **snaze kontrastně zobrazit členění objektu**, je voleno **světlo směrové**.

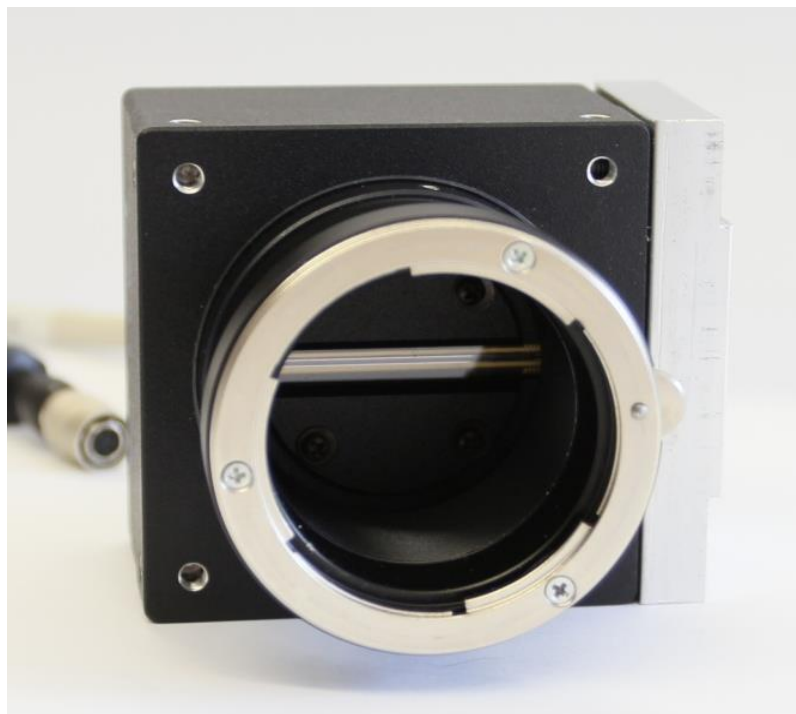


## *Senzorika pro vizualizaci – Rozdělení kamer*

Kamery lze obecně dělit podle tvaru snímacího prvku na:

- 1) **Plošné kamery**, které mají snímací body umístěné v matici:
  - a) **standardní** (běžné kamery, probrány v předchozím textu);
  - b) **inteligentní** (kamera v sobě zahrnuje pokročilý hardware a software pro zpracování snímků a výstupem jsou vedle obrazu výsledky obrazové analýzy);
  - c) **kamerové senzory** (kamera v sobě zahrnuje jednoduchý hardware a software pro zpracování snímků, ale výstupem je jen logický výstup – ano/ne, tedy například výrobek přítomen/nepřítomen nebo kvalitní/nekvalitní).
- 2) **Řádkové kamery** (liniové nebo také lineární kamery), které mají snímací body v jedné až čtyřech liniích,
- 3) **3D kamery**.

## *Senzorika pro vizualizaci – Rozdělení kamer*



Kamery: vlevo řádková kamera, vpravo inteligentní kamera

## *Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery*

Problematikou, která je v současné době vysoce aktuální, je interpretace dat za účelem získání **informací o třírozměrném prostorovém uspořádání** (3D informace).

Využití informací o 3D uspořádání sledované (technologické) scény je pro:

- **rozpoznání 3D předmětů** (pro třídění, následnou manipulaci, např. bin picking a montáž, zajištění bezpečnosti, navigaci),
- **získání 3D virtuálního modelu snímaného objektu,**
- **hodnocení jakosti** (rozměrové přesnosti, kontrola povrchu) a
- **obecně v průmyslové a servisní robotice.**

Existuje mnoho principů, které se dají použít. V průmyslové praxi se ale nejvíce používají tyto tři:

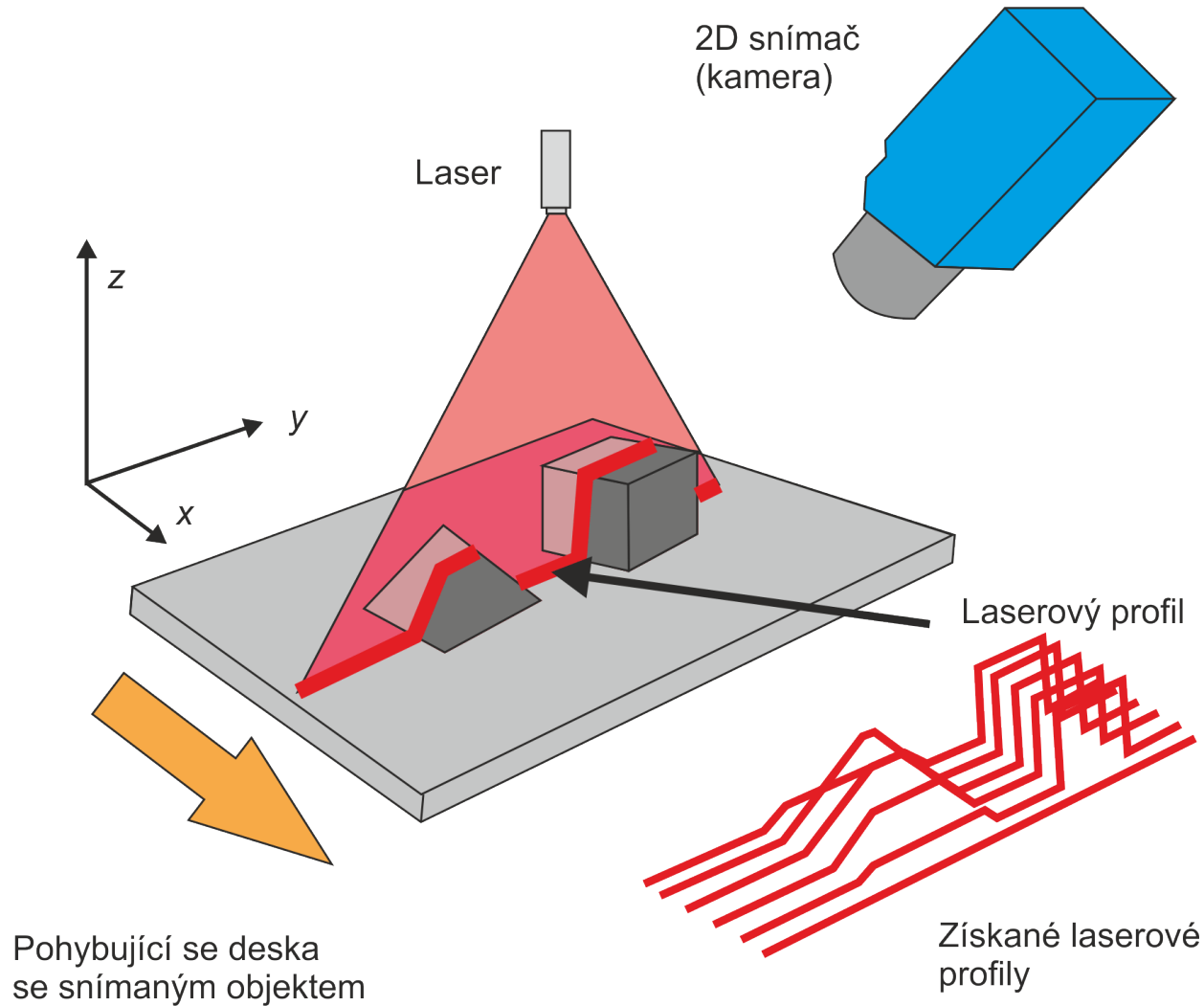
- a) 2D triangulace pomocí liniového laseru.
- b) Stereo vidění.
- c) Time of Flight (měření doby letu modulovaného laserového paprsku).

## *Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery*

V průmyslové praxi je v současné době **2D triangulace pomocí liniového laseru** nejčastějším způsobem získání 3D virtuálního modelu.

Princip 1D triangulace pro odměřování vzdálenosti byl probrán. V tomto případě se využívá **promítání laserového paprsku ve formě linie při definovaném (přesně načítaném) pohybu objektu nebo kamery s laserem.**

## Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery



## *Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery*

Jedná se o **profilové laserové skenery**, které jsou založeny na **generaci profilů**.

3D obraz je poté **složen** z takto nasnímaných profilů, které definují samostatně rozměr v ose  $y$  a  $z$ .

*Objekt nebo kamera se musí pohybovat ve směru osy  $x$  a pohyb musí být svázán s pořizováním jednotlivých snímků.*

Jedná se tedy o **propojení obrazových dat s daty enkodéru** nebo jiného snímače polohy.

## *Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery*

K výhodám triangulační metody patří:

- **nízká závislost** na okolním osvětlení (při detekci objektů s difúzním povrchem),
- relativně **vysoká přesnost** měření a
- **vysoká rychlost** pohybu snímaného objektu.

Tento typ kamer se používá na **malé vzdálenosti** a **relativně malé předměty** (běžně od desítek až po tisíce mm).

## *Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery*

**Stereo vidění** (stereovize, stereovizní vidění, binokulární stereo) je metoda založená na softwarové fúzi (multisenzorice), která využívá dvou a více 2D senzorů.

Metoda vychází z lidského vnímání světa pomocí zraku. Efekt prostorového vidění je umožněn schopností lidského zraku skládat v mozku dva obrazy téhož předmětu viděného z rozdílného místa. Princip metody se (mimo jiné) využívá k projekci 3D obrázků a snímků (stereoskopie).

Metoda stereo vidění je založena na **pořízení dvou a více snímků**, v tomto případě je použito **dvou a více totožných 2D snímačů**, následně **nalezení společných bodů a výpočtu jejich vzdálenosti**.



## Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery



Ukázka systému stereo vidění (od firmy LIMESS, <https://www.limess.com/>)

## *Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery*

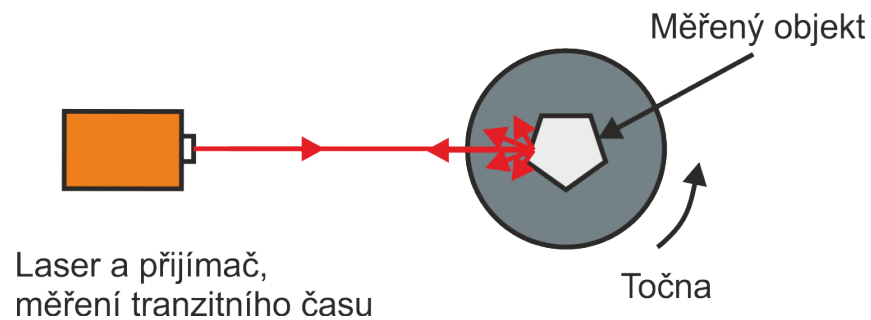
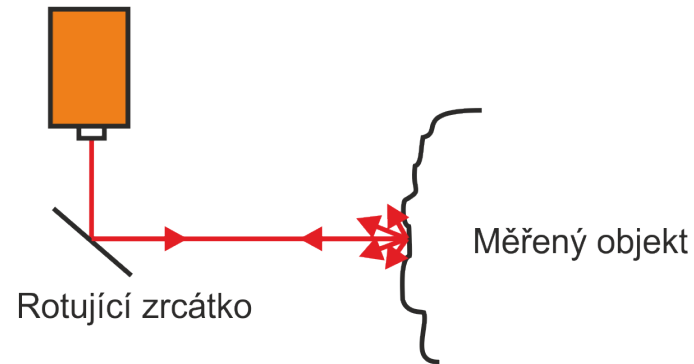
Princip ***Time of Flight*** (ToF) je založen na měření vzdálenosti bodu objektu  $P$  (v ose  $z$ ) z doby letu  $t$  paprsku elektromagnetického záření od jeho vyslání, odražení od objektu, až po jeho opětovné zachycení senzorem podle vztahu:

$$z_P = c \frac{t}{2}$$

kde  $c$  je rychlost světla.

## Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery

Laser a přijímač,  
měření tranzitního času



Princip skenovacích laserových systémů na principu ToF

## *Senzorika pro vizualizaci – 3D kamery*

Nevýhodou této metody je skutečnost, že **rychlost světla je extrémně vysoká**, z čehož vyplývají **velké nároky na přesnost měřicího zařízení**.

U běžně používaných zařízení je prováděno měření doby modulovaného elektromagnetického záření (signálu).

Laserový paprsek má většinou vlnovou délku **v NIR oblasti** (od 850 až 950 nm).

Zásadní rozdíl od klasických laserových dálkoměrů (používaných na velké vzdálenosti, jako je mapování terénu) je ve **větším množství změřených bodů v relativně krátkém okamžiku**.

## Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

**Strojové vidění** je vědní obor, který se technickými prostředky snaží napodobit některé schopnosti lidského vidění.

Kromě vlastních **obrazových vjemů** hraje při vyhodnocování obrazové informace podstatnou roli **inteligence člověka a jeho předchozí zkušenosti**.

Podobně funguje i strojové vidění. **Samotné získání a přenos obrazu nepřináší v automatizaci prakticky nic**. Až zpracováním obrazu (jeho interpretací) je možné získat určitou, **vůči člověku omezenou, inteligenci** daného zařízení.

**Interpretace** získaných obrazových dat umožňuje **získat potřebné informace** z daného obrazu pro daný typ úlohy.

Tyto informace jsou následně využity nadřazeným řídicím systémem zařízení pro **rozhodování** (např. robotem u robot vision).

Z pohledu hardwaru se jedná o vcelku **komplikovaný systém, obsahující mnoho prvků**.

# Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

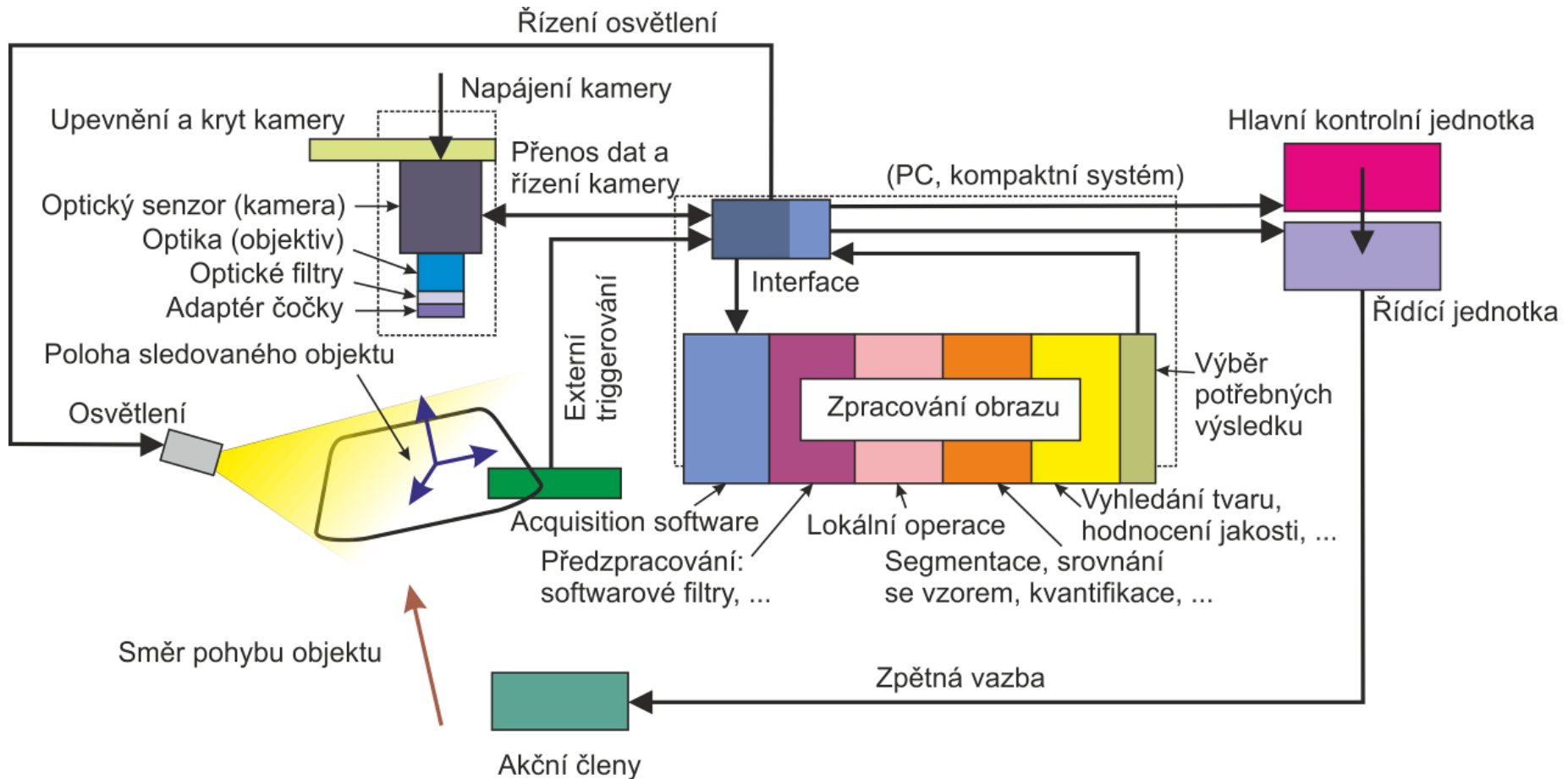


Schéma systému pro obrazovou analýzu



## Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

Specifickými požadavky pro aplikaci v průmyslové praxi jsou především tyto:

- **osvětlení** musí být vhodné pro snímání daného materiálu, v některých případech je nutné zvolit správnou kombinaci několika typů osvětlení;
- **pozice sledovaného objektu** musí být přizpůsobena osvětlení a pozici kamery anebo osvětlení a kamera musí být přizpůsobena poloze objektu;
- **adaptéry čoček** mohou být použity místo (nebo spolu) s osvětlením pro lepší zobrazení objektu (adaptér polarizovaného osvětlení, souosé kolmé osvětlení, adaptér difúzního osvětlení,...);
- **filtry** mohou být užity pro separaci určité vlnové délky ze snímané scény;
- **optika** (objektiv) včetně clony;
- **snímací prvek** – snímač včetně potřebné elektroniky (kamera) zvolený podle typu sledovaného objektu a jeho pohybu (lineární nebo plošná kamera) a požadovaného rozlišení, snímacím prvkem může být i digitální fotoaparát;
- **upevnění kamery** a případně její **kryt**, včetně izolace od nežádoucích vibrací, prachu, nízké nebo vysoké teploty okolí;
- požadované **napájení kamery** (podle výrobce a typu kamery);
- **přenos dat** do zařízení pro zpracování obrazu (kabely, A/D převodník) a řízení kamery;
- **volitelné zařízení** a kabely pro spouštění (triggerování) kamery;

## Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

- **interface** podle typu zvolené kamery (FireWire, USB, Camera Link, GigE Vision,...);
- **acquisition software** (software pro získávání snímků z kamery);
- **zpracování obrazu**, které musí být spolehlivé, výsledky musí být získány včas a ve vhodné formě:
- **předzpracování**: softwarové filtry, které mohou nahrazovat nebo doplňovat filtry fyzické na kameře a jsou důležité především pro následné zpracování obrazu;
- **lokální operace**: oblasti, hrany, měřítko, textura, ...;
- **segmentace, srovnání se vzorem, kvantifikace povrchu, ...;**
- **vyhledání tvaru, hodnocení jakosti, ...;**
- **výběr potřebných výsledků;**
- **přenos dat** do hlavní vyhodnocovací jednotky a (nebo) řídicí jednotky (rozšířená o zpětné vazby na akční členy).



## Základní principy strojového vidění, **robot vision**, bin-picking

**Robot vision** je propojením robotu se strojovým viděním.

Propojení vyžaduje **vzájemnou komunikaci** obou zařízení: robotu a systému vidění.

**Systémem vidění je kamera** (2D nebo 3D) **spolu s vyhodnocovací jednotkou** (často PC nebo CVS) nebo přímo inteligentní kamera. Toto propojení není v současné době často triviální.

Pro správné fungování robot vision je důležité také **sjednotit souřadné systémy obou zařízení**.

## Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

Aplikací robot vision u průmyslových robotů je především **nalezení objektu pro následné uchopení a manipulaci**, což je například vybírání beden (tzv. bin picking, uvedený níže).

Cílem může být také **technologická operace** např. sváření (nalezení místa pro svar a jeho kontrolu), lepení (nanesení lepidla), nanášení barev, montáž atd.

V případě servisní robotiky jsou aplikace ještě širší a lze je důsledněji spojovat s prvky učení a umělé inteligence.

## Základní principy strojového vidění, robot vision, **bin-picking**

**Aplikace bin picking** jsou žádanou aplikací s vysokým potenciálem úspory pracovních sil a s ohledem na sofistikovaný princip řešení je jasným aplikačním prostředkem v rámci realizace záměrů koncepce Průmyslu 4.0 v robotizaci výroby.

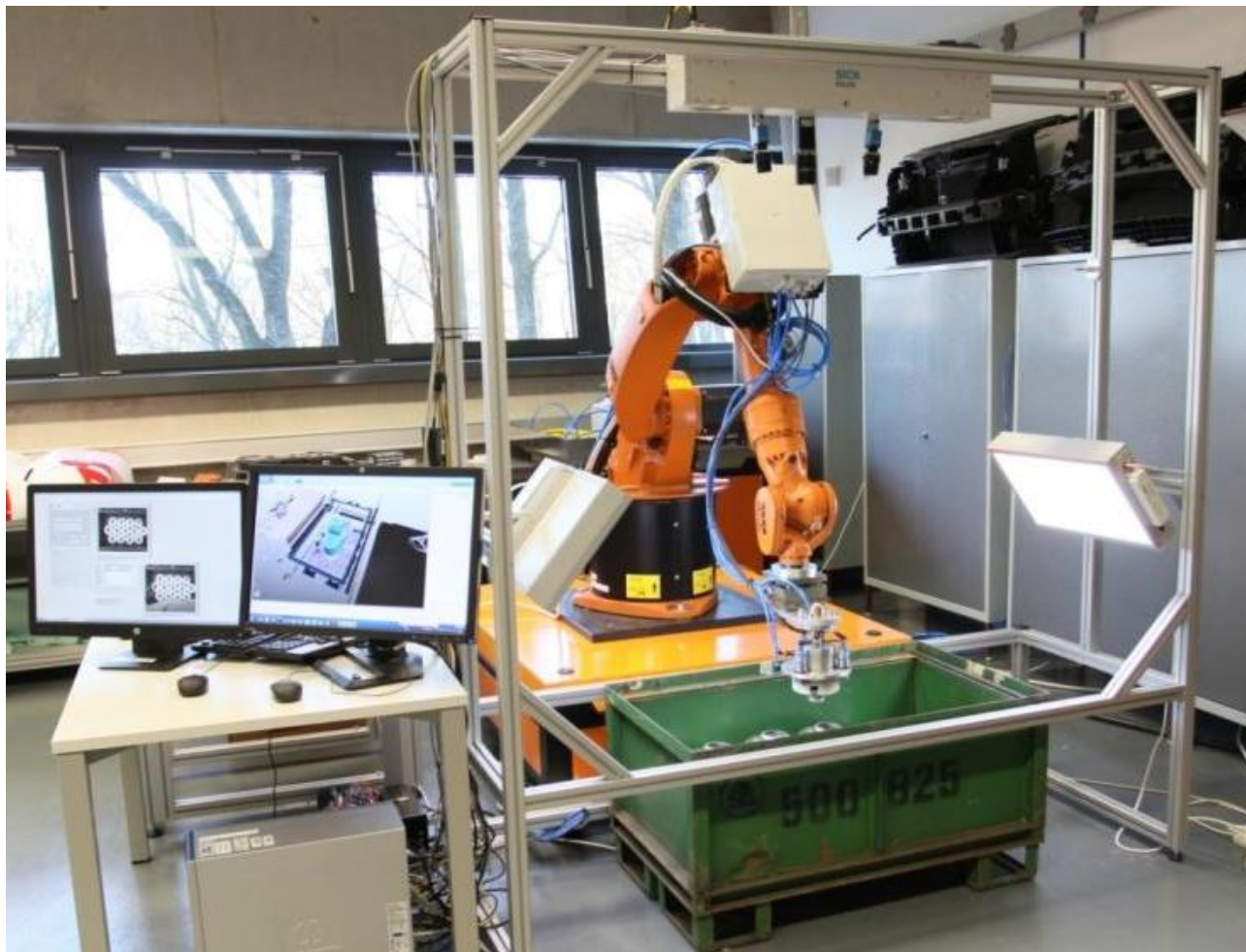
Problematika vybírání beden je studována již **více než 25 let** a řešení je již několik let nabízeno výrobcí. Na odborných veletrzích se lze setkat s mnoha ukázkami a je tak **navozen dojem již vyřešeného problému**. Nasazení bin picking není ovšem v průmyslové praxi zatím příliš rozšířeno. Jak se ukazuje, **je třeba překonat a vyřešit několik problémů**. Vedle technických je to i **cena a s tím spojená návratnost**.

## Základní principy strojového vidění, robot vision, **bin-picking**

Jedná se o aplikaci, která pro své bezproblémové fungování potřebuje několik **správně zvolených, nastavených** (naprogramovaných) zařízení, která musí zajistit **bezproblémovou komunikaci**. Jedná se o:

- robot,
- kamerový systém (případně další senzory) s řídicí jednotkou (většinou na bázi PC),
- efektor (chápadlo),
- periferní zařízení,
- systém osvětlení,
- bezpečnostní prvky,
- komunikace s okolím atd.

## Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking



Pohled na experimentální pracoviště na TUL

## Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

Jak je zřejmé, tak problematika bin picking **nemůže být redukována jen na propojení kamerového systému s robotem.**

Velmi důležitý je také **efektor**, který musí umět **redukovat odchylky od získaných souřadnic manipulovaného objektu.**

Schopnost redukovat tyto nepřesnosti má zpětně vliv na požadovanou přesnost získaných souřadnic a otočení objektu v prostoru a tedy má vliv i na **cenu kamerového systému.**

Pochopení tohoto vztahu je klíčové pro úspěšný návrh **spolehlivého, robustního a cenově optimalizovaného systému** pro vybírání beden.

## Základní principy strojového vidění, robot vision, bin-picking

Pro aplikace bin picking jsou většinou používány **angulární roboty**.

V případě aplikací vyžadujících spolupráci s člověkem jsou dnes voleny **kooperující roboty**, které jsou relativně bezpečné a nevyžadují uzavření robotu do zabezpečených prostor.

**Požadavky na robot** pro bin picking jsou:

- potřebný manipulační prostor a nosnost (včetně hmotnosti efektoru),
- vhodné komunikační rozhraní a
- řídicí systém umožňující komunikaci s dalšími zařízeními atd.

# Příště: Aplikační oblasti průmyslových robotů