

# Laserové skenování

## 1. přednáška

Ing. Tomáš Křemen, Ph.D.

[tomas.kremen@fsv.cvut.cz](mailto:tomas.kremen@fsv.cvut.cz)

<https://k154.fsv.cvut.cz/~kremen/>

# Doporučená literatura

- Štroner a kol.: 3D skenovací systémy. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2013, 396 s, ISBN 978-80-01-05371-3.
- Štroner, M. - Pospíšil, J.: Terestrické skenovací systémy. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2008, 187 s. ISBN 978-80-01-04141-3.

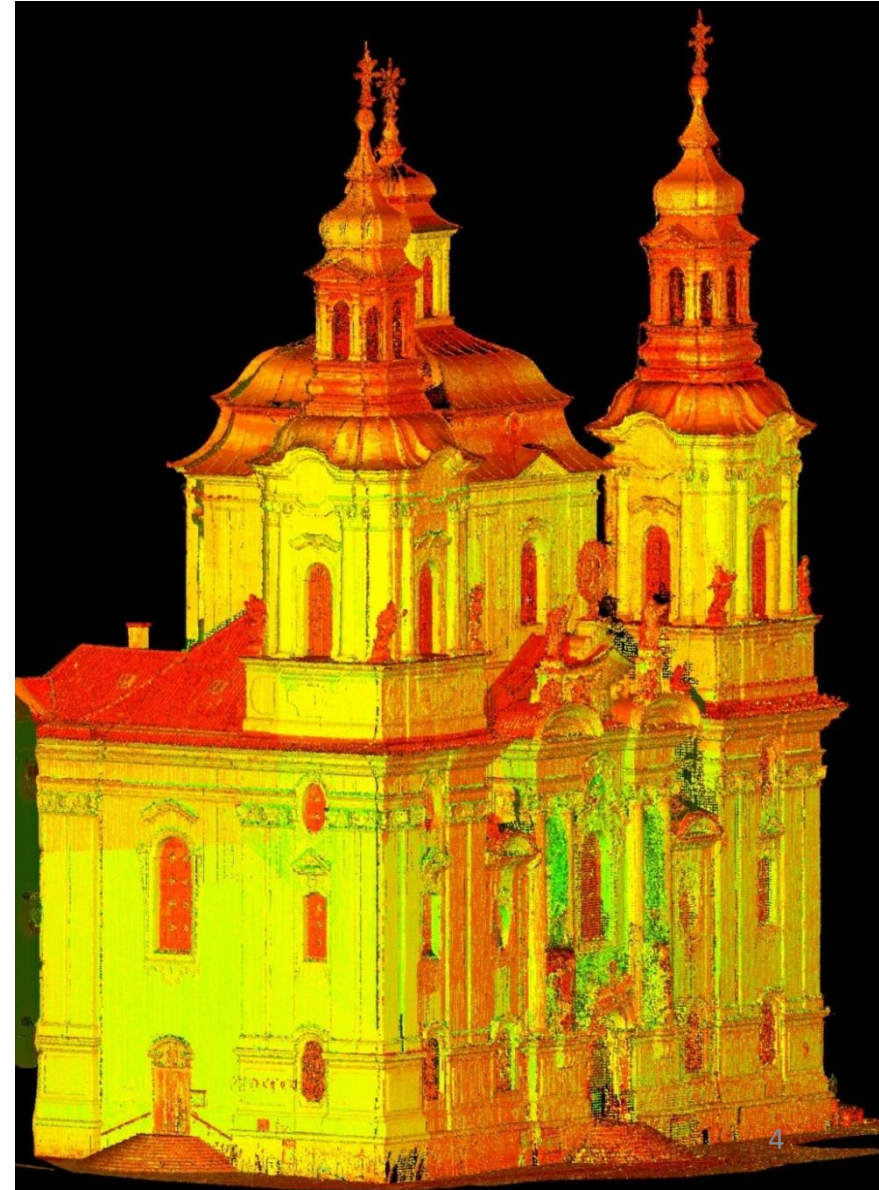
# Obsah

- Úvod do skenování
- Dělení skenovacích systémů
- Principy skenování
- Parametry skenovacích systémů
- Vlivy působící na skenování a jeho přesnost
- Lasery – bezpečnost práce

# 3D skenovací systémy - úvod

## Skenování:

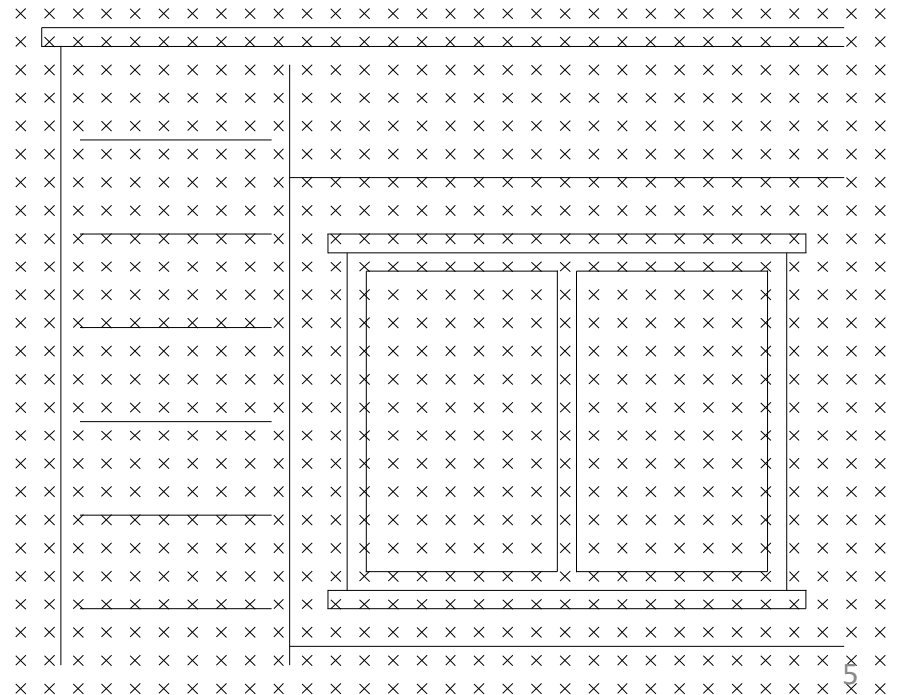
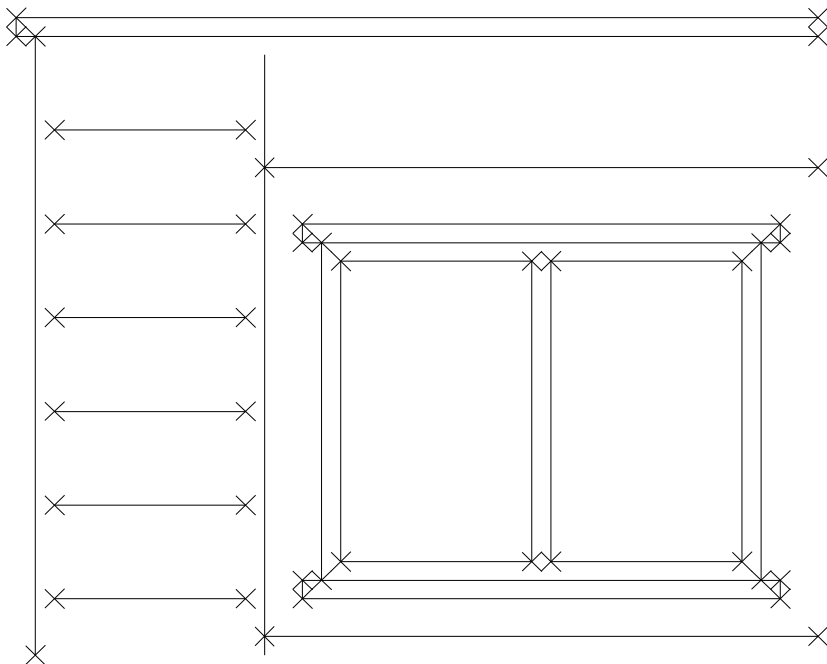
- jiný název „laserové skenování“.
- Objevuje se na konci 90. let 20. století
- Neselektivní určování prostorových souřadnic objektu a jejich ukládání do paměti.
- Provádí se pomocí skeneru, automaticky podle nastavených parametrů.
- Je řízeno počítačem.
- Výsledkem je tzv. mračno bodů obsahující desítky, i stovky miliónů bodů.



# 3D skenovací systémy - úvod

Hlavní znaky měření:

- neselektivní určování 3D souřadnic,
- velké množství určených bodů (mračna), řádově miliony,
- velká rychlost měření, 10 000 bodů za sekundu a více ( až miliony),
- nutná nová forma zpracování.



# 3D skenovací systémy – úvod

Naměřená mračna bodů jsou většinou zpracována časově, hardwarově a softwarově náročnými postupy.

Výstupem ze zpracování může být:

- Spojené a upravené mračno bodů.
- 3D model, kde mračno bodů je nahrazeno geometrickými primitivami (CAD model).
- 3D model, kde mračno bodů je nahrazeno trojúhelníkovými sítěmi (TIN, Triangular Irregular Network).
- 3D model, kde mračno bodů je nahrazeno plochami s proměnlivou křivosí (např. B-spline).

Vizualizace:

- přiřazení barev, textur, skutečných barev,
- vytváření prezentací, animací, průletů a pod.

# 3D skenovací systémy - úvod

## Výhody:

- rychlý sběr dat
- 3D model
- kvalitní informace o nepravidelných plochách
- prostorová analýza objektu, výpočty ploch, objemů, ...
- velký objem dat – detailní informace o objektu

## Nevýhody:

- velký objem dat – náročné na hardware a software
- odrazivost povrchu
- vegetace

# 3D skenovací systémy - rozdělení

3D skenovacích systémů je celá řada a nachází uplatnění v široké škále oborů: strojírenský průmysl, stavebnictví, geodézie, medicína, památková péče a archeologie, architektura, kriminalistika, umění a design, a další.

3D skenovací systémy se těmto oborům přizpůsobily svou konstrukcí, principem měření, přesností měření, dosahem, rychlostí, odolností, výstupem z měření, atd.

3D skenovací systémy můžeme dělit podle jejich vlastností do mnoha kategorií.



# 3D skenovací systémy - rozdělení

Podle situace na stanovisku:

- Statické
- Kinematické
  - Pozemní
  - Letecké

Podle principu měření:

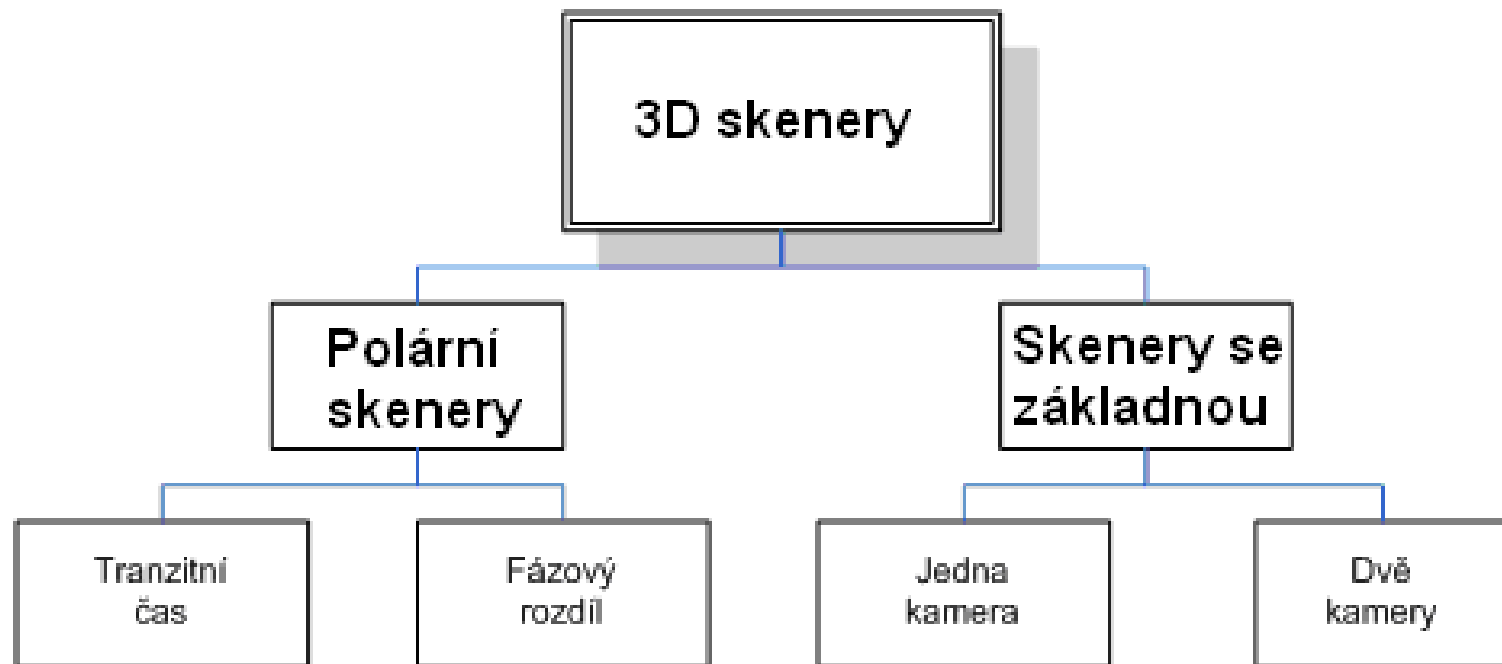
- Polární
- Triangulační (skenovací systémy se základnou)

Přístroje používané v inženýrské geodézii, stavebnictví a podobných oborech jsou především pozemní a statické.

Měření je založeno na principu prostorové polární metody.

# 3D skenovací systémy - rozdělení

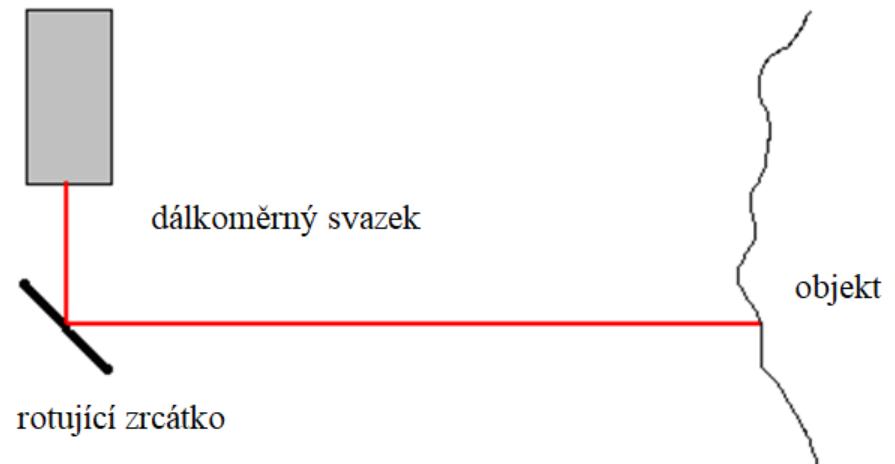
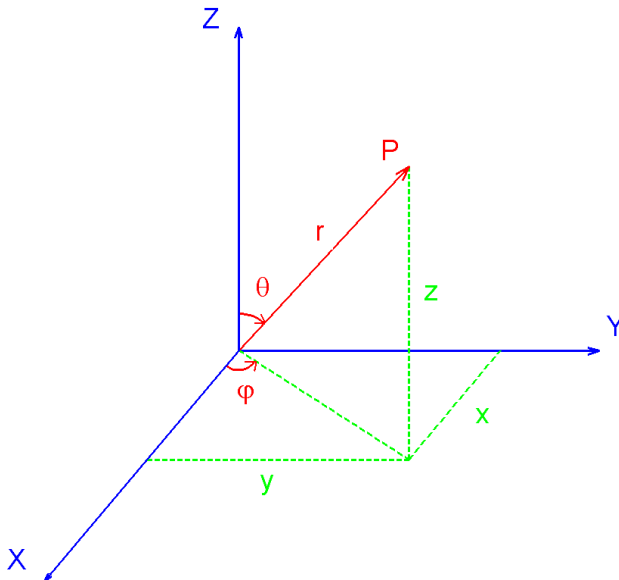
Podle principu měření



# 3D skenovací systémy – princip měření

## Polární skener

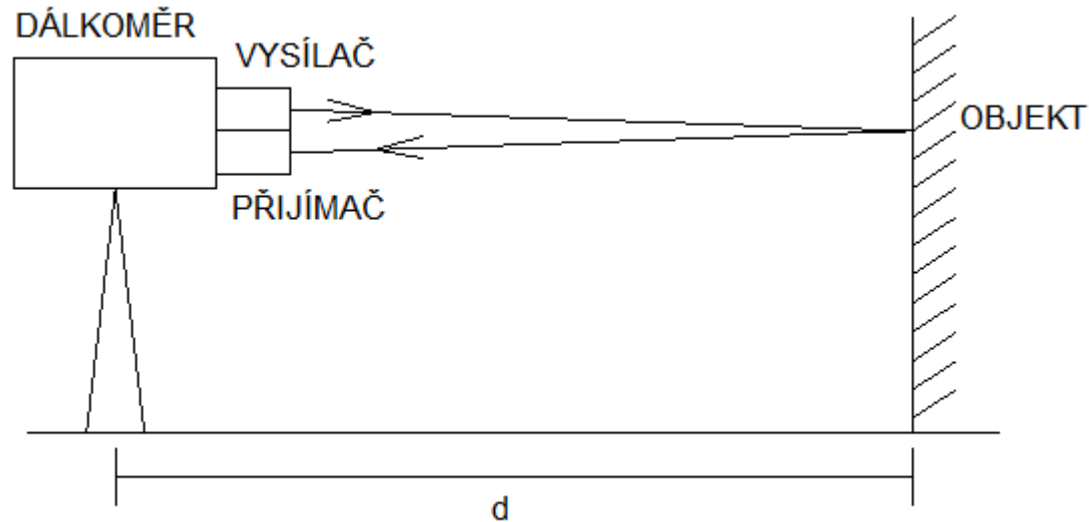
- Pracuje na principu prostorové polární metody, je podobný totální stanici s bez hranolovým dálkoměrem
- Jsou měřeny polární souřadnice v místní souřadnicové soustavě, dva úhly  $\theta$ ,  $\varphi$  a délka průvodiče  $r$ .



# 3D skenovací systémy – princip měření

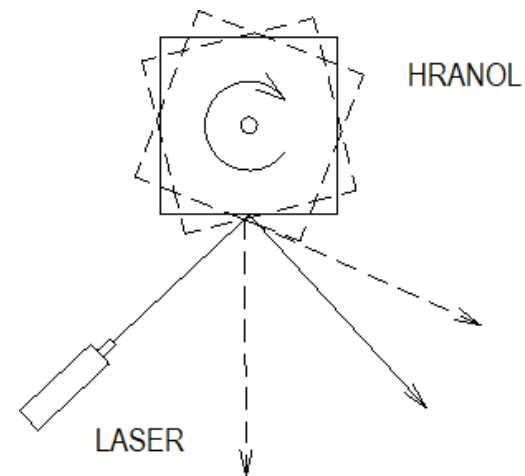
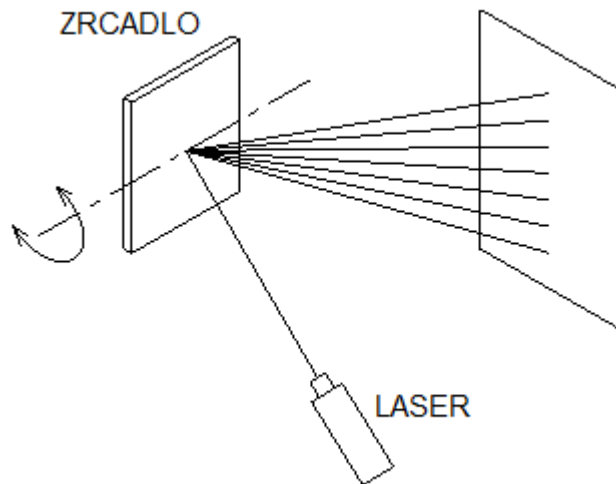
Polární skener - měření délek

- Impulsní dálkoměr (měření tranzitního času) – větší dosah, nižší rychlost (v současnosti kombinuje i fázové měření, tím dosahuje vyšší rychlosti srovnatelné s fázovými dálkoměry).
- Fázový dálkoměr – omezený dosah podle použité vlnové délky, vyšší rychlost.



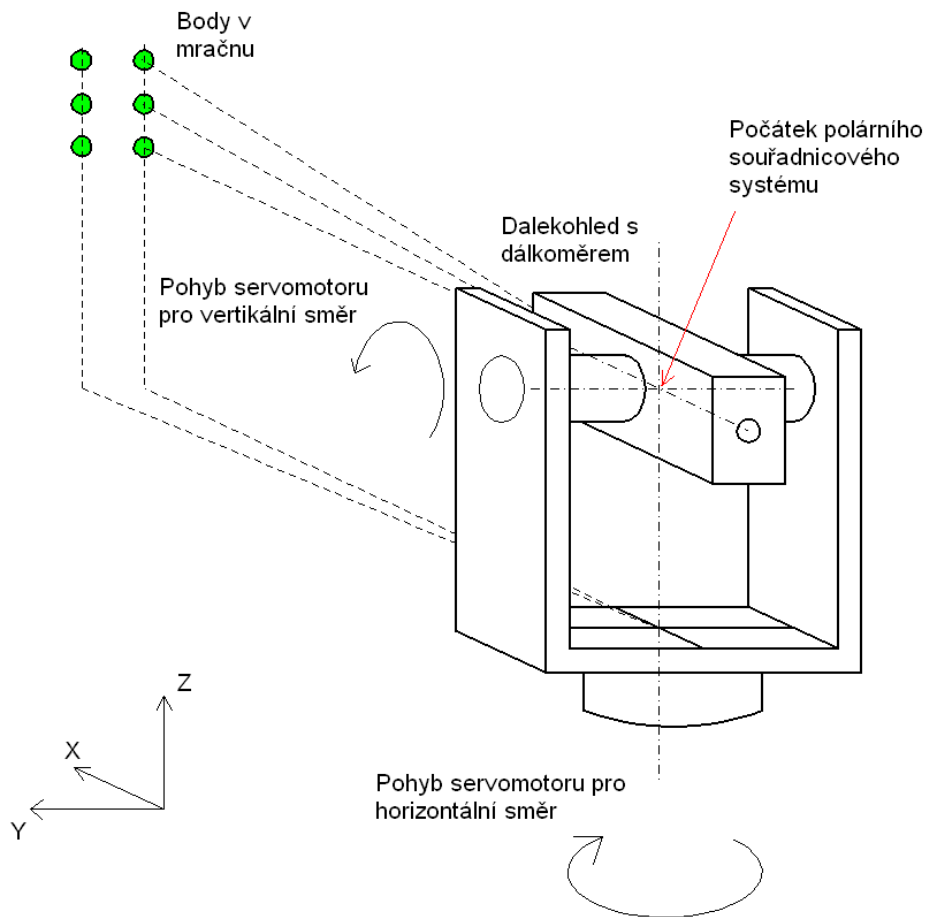
# 3D skenovací systémy – princip měření

Polární skener – rozmítání dálkoměrného svazku využívá různé kombinace rovinných zrcadel odrazných hranolů a servomotorů.



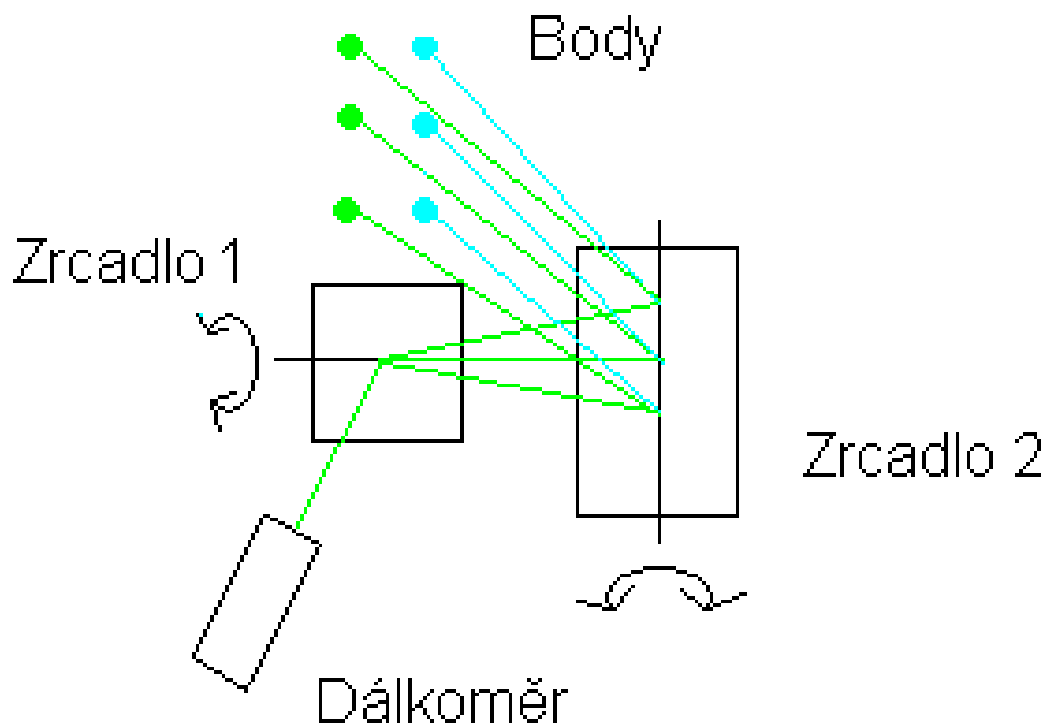
# 3D skenovací systémy – princip měření

Polární skener – rozmítání dálkoměrného svazku pomocí dvou servomotorů



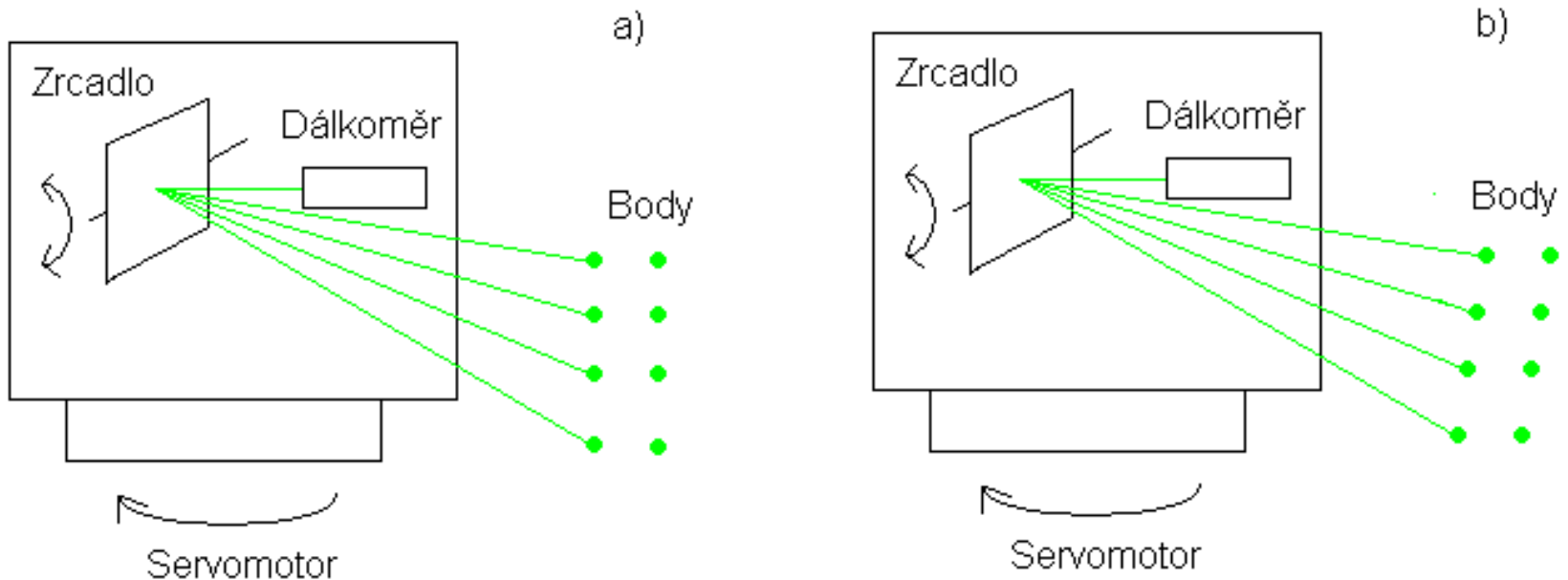
# 3D skenovací systémy – princip měření

Polární skener – rozmítání dálkoměrného svazku pomocí dvou zrcadel



# 3D skenovací systémy – princip měření

Polární skener – rozmítání dálkoměrného svazku pomocí zrcadla a servomotoru: a) krokový pohyb servomotoru b) plynulý pohyb servomotoru. Zrcadlo je často nahrazováno hranolem pro jeho lepší vlastnosti (neslepne, tvarově stálější)





# 3D skenovací systémy – princip měření

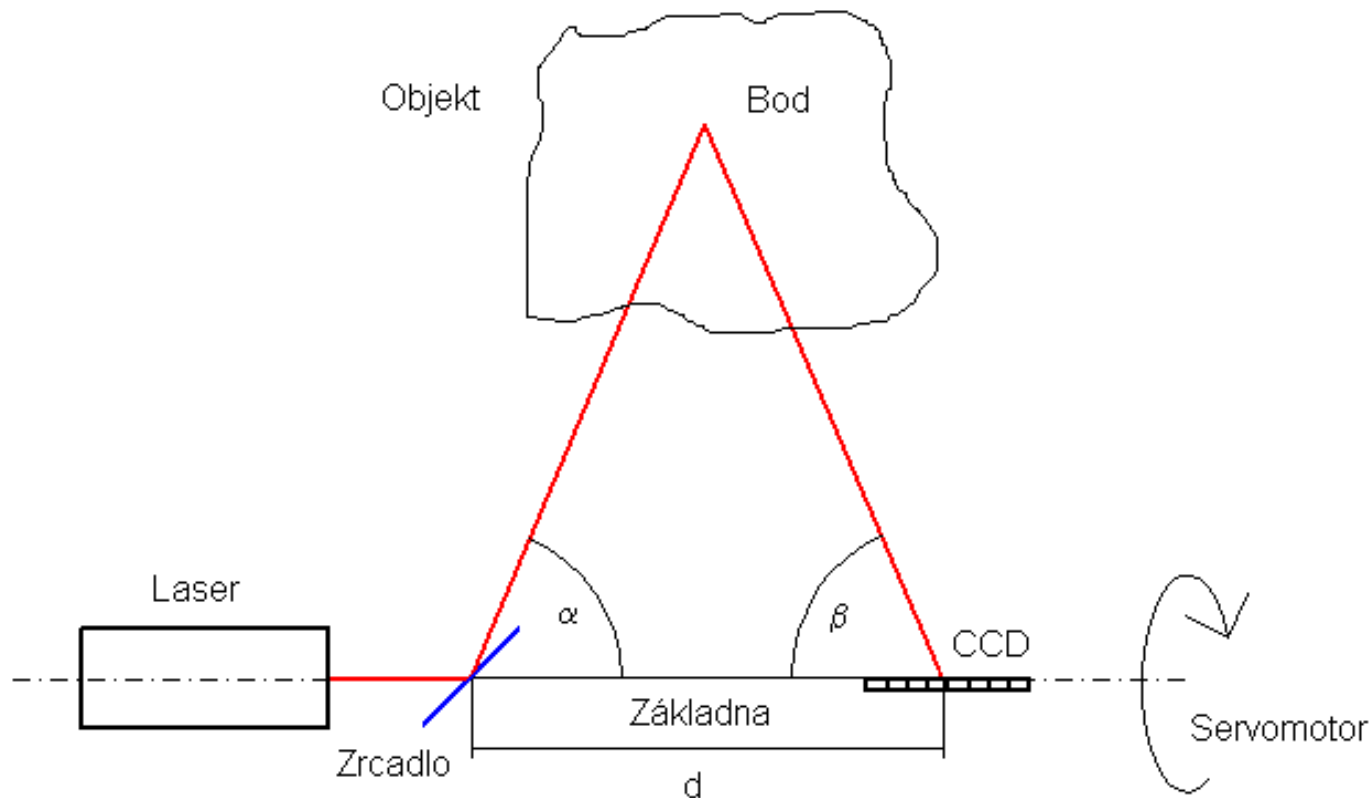
Triangulační (skenovací systémy se základnou)

- Pracují na principu protínání z úhlů nebo průsekové fotogrammetrii.
- První příklad jednokamerového systému

Poloha bodu je určována pomocí servomotoru a zrcadla. Laser vyšle laserový svazek, který dopadne na rovinné zrcadlo, odkud se odrazí na měřený objekt. Úhel  $\alpha$  svírá laserový svazek odražený od zrcadla se základnou. Laserový svazek se odrazí od měřeného objektu a dopadne na řádkový CCD senzor. Úhel  $\beta$  svírá dopadající svazek se základnou. Délka základny  $d$ , ze které se počítají souřadnice podrobného bodu, je vzdálenost mezi středem rotace rovinného zrcadla a místem dopadu odraženého laserového svazku na CCD senzor. Ze znalosti úhlů  $\alpha$ ,  $\beta$  a délky základny  $d$  jsou určeny dvě souřadnice. Třetí souřadnice je určena ze znalosti natočení roviny, ve které leží základna a laserový svazek odražený od zrcadla. Osa rotace leží v základně a natáčení je realizováno pomocí servomotoru.

# 3D skenovací systémy – princip měření

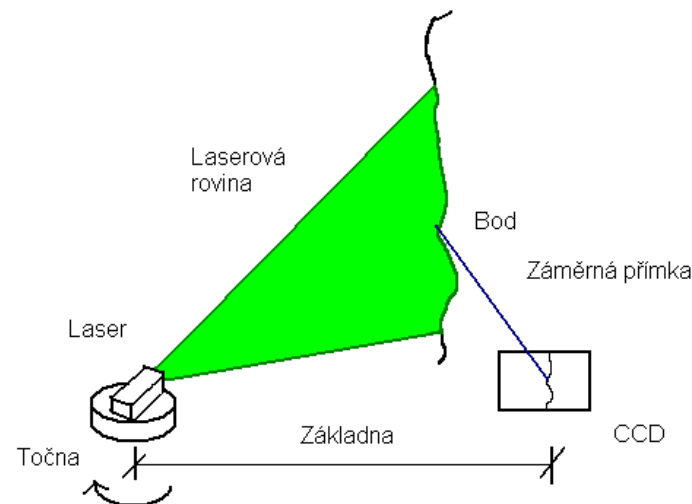
- Příklad jednokamerového systému



# 3D skenovací systémy – princip měření

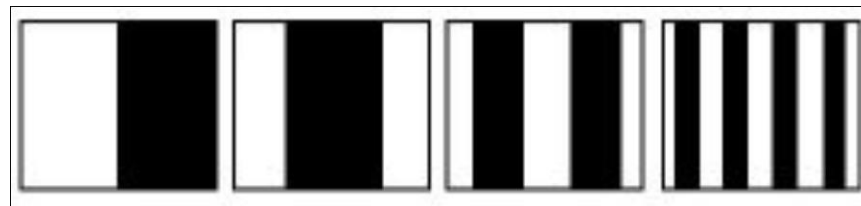
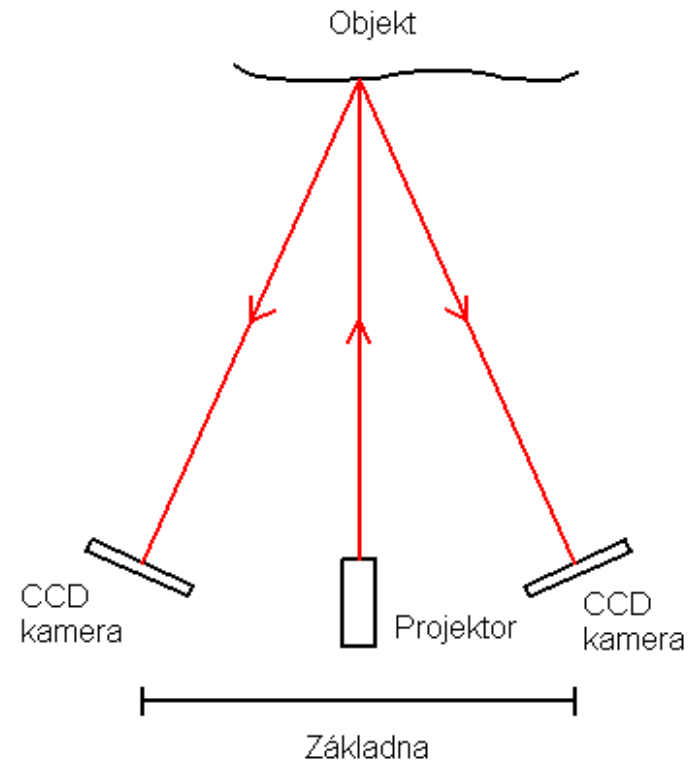
- Druhý příklad jednokamerového systému

System tvoří pevná základna o délce 1 m. Na jednom konci základny je upevněna digitální kamera, na druhém konci je upevněna točna s pevně uchyceným laserovým modulem, který rozmítá laserový svazek do přímky. Snímkové souřadnice jednotlivých pixelů laserové stopy promítnuté na měřeném objektu při známých parametrech vnější a vnitřní orientace digitální kamery definují přímky v prostoru. Jsou známy parametry točny (bod a směrový vektor osy rotace). Prostorový bod je definován jako průsečík laserové roviny a záměrné přímky.



# 3D skenovací systémy – princip měření

- Příklad dvoukamerového systému  
Základna je tvořena dvěma konvergentně zacílenými CCD kamerami. Mezi kamerami se nachází světelný projektor promítající na zaměřovaný objekt sekvenci vzorů: čtyři interferenční vzory (technika fázového posunu) a šest šedých binárně kódovaných vzorů. Prostorové souřadnice jsou určeny na základě vyhodnocení série snímků z obou kamer.



Sekvence čtyř šedých binárních kódů

# 3D skenovací systémy – princip měření

- Skenovací systémy používající prostorovou polární metodu se vyznačují vysokou přesností určení podrobného bodu v celém svém rozsahu měření. Přesnost měření délek klesá se vzrůstající vzdáleností lineárně. Své uplatnění nacházejí v geodézii, stavebnictví a příbuzných oborech.
- Předností základnových systémů je vysoká přesnost, která ale klesá s mocninou vzdálenosti. Používají se pro velmi přesná měření menších předmětů (řádově od centimetrů do několika metrů) nebo pro měření v interiérech. V geodézii, stavebnictví a příbuzných oborech se používají ve výjimečných případech.

# 3D skenovací systémy – technické parametry

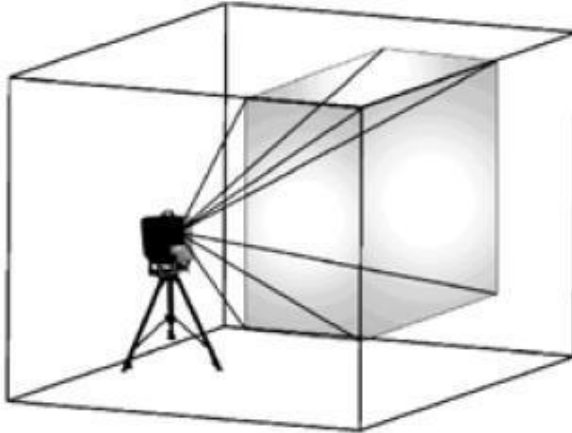
Základní technické parametry skenovacích systémů jsou:

- Princip měření
- Zorné pole
- Dosah
- Přesnost
- Rozlišovací schopnost
- Rychlost skenování

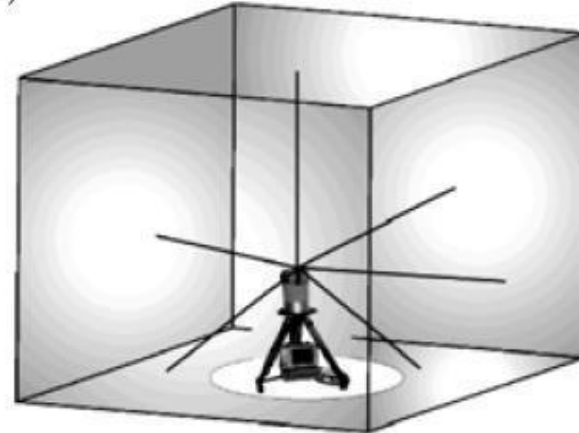
# 3D skenovací systémy – technické parametry

- Zorné pole – úzce spjata s principem měření. U základnových skenerů je zorné pole často omezené a je podobné zornému poli kamery nebo fotoaparátu. U polárních skenerů je možné skenovat celé jejich okolí - panorama.

a)



b)



Skenovací systém a) Kamerový b) panoramatický

# 3D skenovací systémy – technické parametry

- Dosah

udává maximální rozsah vzdáleností, ve kterém skener měří. U polárních skenerů je tento parametr silně ovlivněn odrazivostí zaměřovaného povrchu. Maximální hodnoty dosahu jsou proto v praxi obtížně dosažitelné. Ve skenovacích systémech se používají dva typy dálkoměrů. Impulsní dálkoměry mají dosah omezen jen velikostí odraženého dálkoměrného signálu. Fázové dálkoměry jsou kromě odrazivosti především omezeny vlnovou délkou modulované nosné vlny.

Některé základnové skenery udávají velikost prostoru, ve kterém je možné skenovat při splnění požadavků na kvalitu dat a přesnost. Jedná se o prostorový kvádr v určité vzdálenosti od skeneru.



# 3D skenovací systémy – technické parametry

- Přesnost

Přesnost měření skeneru bývá charakterizována několika hodnotami. Nejčastěji se jedná o přesnost jednoho bodu, jejíž interpretace je obtížná, nebo o přesnost délkového a úhlového měření, která je charakterizována směrodatnou odchylkou.

Často se také udává parametr velikost šumu „noise“. Jde o náhodnou chybu dálkoměru a ne o celkovou chybu dálkoměru.

Obecně lze říci, že s přesností 3D skenovacích systémů je to složité a ne vždy se snadno vyjadřuje.

# 3D skenovací systémy – technické parametry

- Rozlišovací schopnost

udává, jaký nejmenší detail je ze zaměřeného mračka možné získat. Rozlišovací schopnost závisí zejména na minimálním úhlovém kroku měření, na velikosti stopy dálkoměrného svazku (divergenci) a na přesnosti měření úhlů a délek.

Rozlišovací schopnost není nikdy lepší než nejvyšší hodnota z těchto parametrů!

Tento údaj ne vždy výrobci udávají, proto je důležité umět rozlišovací schopnost odvodit z výše uvedených parametrů.

# 3D skenovací systémy – technické parametry

- Rychlost skenování

Je udávána počtem zaměřených bodů za sekundu. Rychlost skenování není konstantní, Záleží na nastaveném zorném poli, hustotě skenování a případně dalších nastavitelných parametrech měření.

# 3D skenovací systémy – technické parametry

## Další technické parametry

- Odolnost
- Rozsah provozní teploty
- Kompenzátor
- Velikost dálkoměrné stopy
- Ovládací prostředí
- Zdroj napájení
- Bezpečnostní třída laseru
- Hmotnost, rozměry

# Vlivy působící na skenování a jeho přesnost

- Následující popis platí především pro polární skenery
- Vnitřní vlivy

Mezi vnitřní vlivy zařazujeme chyby měření skenerem. U polárních skenerů se jedná o chyby měření délek a obou úhlů. Náhodné složky těchto chyb jsou popsány směrodatnými odchylkami. Dále na měření působí řada systematických chyb, které vycházejí z principu skeneru. Jsou to různé osově chyby a excentricity, systematické složky z chyb měření délek a úhlů a i jejich synchronizace.

U skenování obecně nelze navyšovat přesnost měření přidáváním měření a ani eliminovat přístrojové vady měřením ve dvou polohách.

Snížení velikosti těchto chyb zajišťuje pouze kalibrace systému.

Dále mezi vnitřní vlivy patří divergence dálkoměrného svazku.

# Vlivy působící na skenování a jeho přesnost

- Vnější vlivy – vliv prostředí na průchod svazku – refrakce

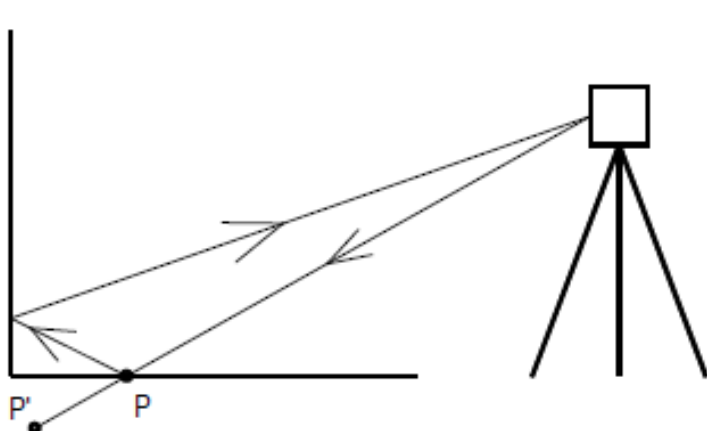
Celá řada měření probíhá na relativně krátké vzdálenosti do několika málo desítek metrů nebo dokonce v laboratorních podmínkách, takže vliv atmosféry je velmi malý a na jeho snížení postačí zavést běžné atmosférické korekce z teploty a tlaku.

Ale existují situace, kdy je měřeno v nestandardních podmínkách s výrazně proměnlivou atmosférou (měření v průmyslu – tavící pece). Potom je potřeba vliv atmosféry modelovat a měření skenerem o něj opravit (velmi obtížné) nebo alespoň uvažovat a postupem měření snížit.

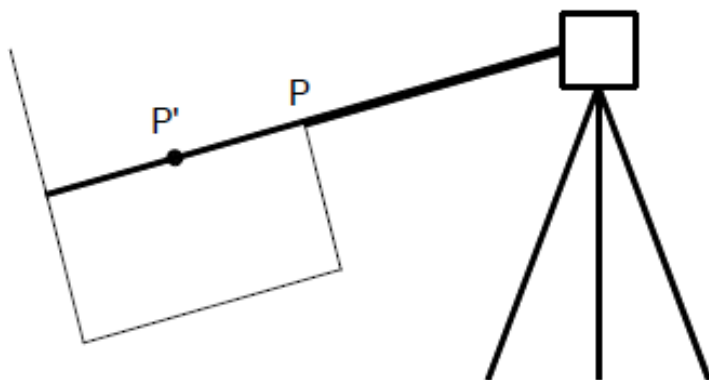
V atmosféře také dochází k pohlcování vyslaného záření.

# Vlivy působící na skenování a jeho přesnost

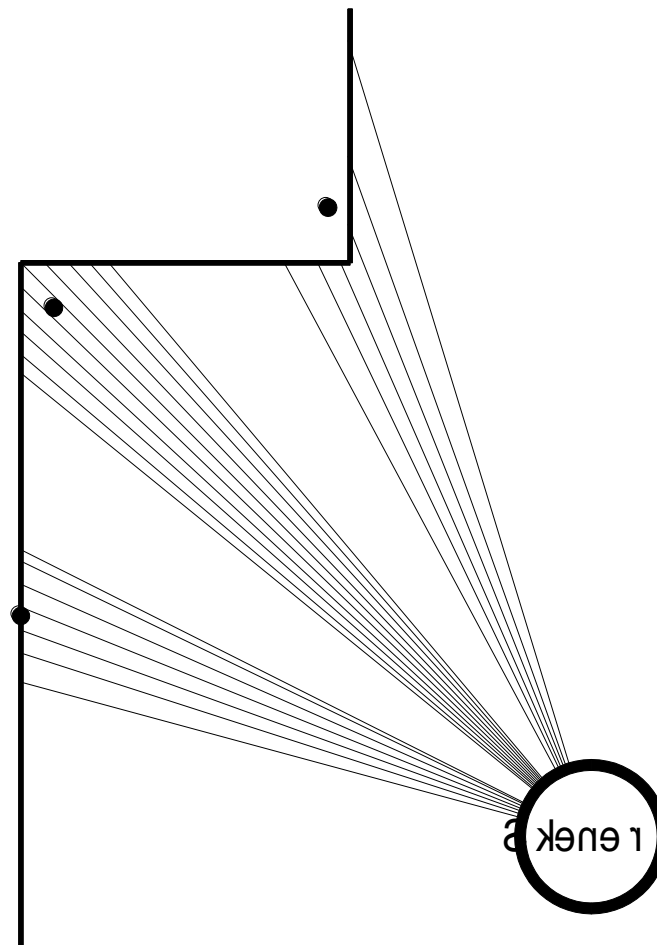
- Vliv geometrie měřeného objektu



Vícenásobný odraz



Dvojitý odraz

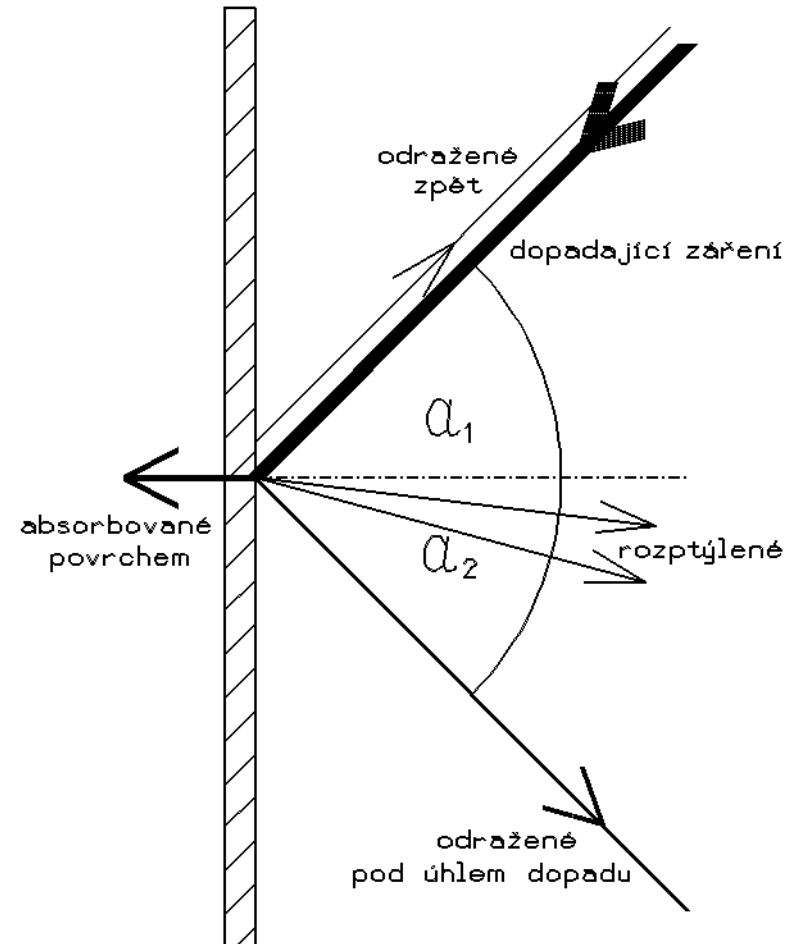


Měření na rohy

# Vlivy působící na skenování a jeho přesnost

- Vliv povrchu na přesnost měření délky

Pro měření EMG dálkoměrem je klíčová ta část vyslaného záření, která se odrazí zpět k přístroji. Její velikost mimo jiné významně ovlivňuje povrch skenovaného objektu a jeho schopnost odrážet optické záření. Tato schopnost závisí na vlastnostech dopadajícího záření (vlnová délka, polarizace) a na materiálových (spektrální odrazivost, propustnost a pohltivost) a geometrických (drsnot, úhel dopadu) vlastnostech povrchu.





# Vlivy působící na skenování a jeho přesnost

- Vliv povrchu na přesnost měření délky

Je-li celková intenzita dopadajícího záření  $E$ , intenzita odraženého záření  $R$ , pohlceného záření  $A$  a propuštěného záření  $P$ , pak podle zákona o zachování energie platí:

$$E = R + A + P$$

Z tohoto vztahu lze vyjádřit odrazivost, pohltivost a propustnost:

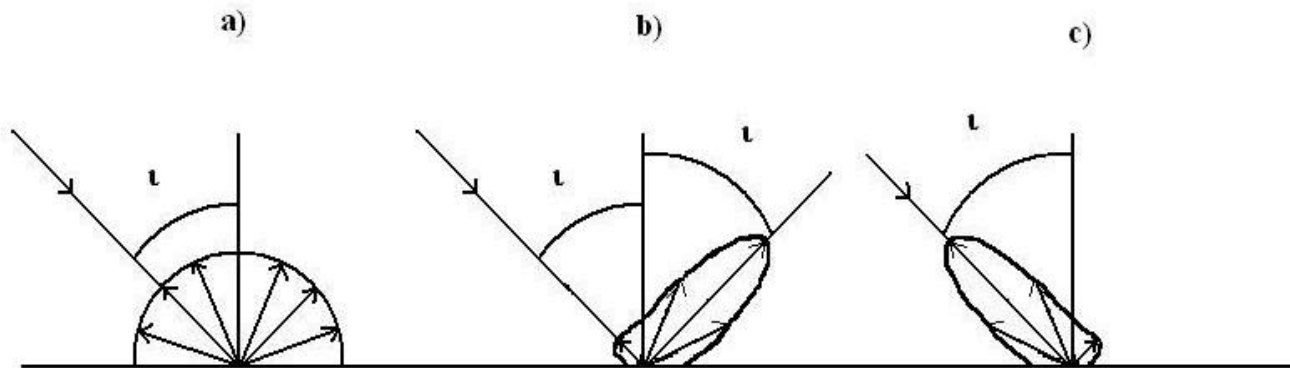
$$\rho = R / E$$

$$\alpha = A / E$$

$$\pi = P / E$$

# Vlivy působící na skenování a jeho přesnost

- Vliv povrchu na přesnost měření délky
- pro měření délek je důležitá pouze ta část záření, která je odražena zpět ke skeneru a dopadá na přijímací senzor dálkoměru
- rozlišujeme několik základních typů povrchů podle tvaru jejich diagramu reflektivity



a) difúzní (sádra, křída..) b) zrcadlový (stříbro) c) rýhovaný (odrazná folie)

Nejvhodnější difúzní povrch s vysokou odrazivostí – světlý materiál s drsným povrchem (vůči použité vlnové délce)

# Vlivy působící na skenování a jeho přesnost

- Vliv povrchu na přesnost měření délky (platí pro vlnovou délku 900nm)

<b>MATERIÁL</b>	<b>REFLEKTIVITA / %</b>
<b>Bílý papír</b>	<b>do 100%</b>
<b>Stavební dřevo (borovice, čistá, suchá)</b>	<b>94%</b>
<b>Sníh</b>	<b>80-90%</b>
<b>Bílé zdivo</b>	<b>85%</b>
<b>Jíl, vápenec</b>	<b>do 75%</b>
<b>Potištěný novinový papír</b>	<b>69%</b>
<b>Listnaté stromy</b>	<b>typ. 60%</b>
<b>Jehličnaté stromy</b>	<b>typ. 30%</b>
<b>Plážový, pouštní písek</b>	<b>typ. 50%</b>
<b>Hladký beton</b>	<b>24%</b>
<b>Asfalt s oblázky</b>	<b>17%</b>
<b>Láva</b>	<b>8%</b>
<b>Černý neoprén</b>	<b>5%</b>

# Lasery a bezpečnost práce

## Laser

- Nejpoužívanější zdroj záření u skenerů;
- laser je z fyzikálního hlediska kvantově elektronický zesilovač elektromagnetického záření nejčastěji v oblasti viditelného světelného spektra a přilehlých vlnových délek;
- laser je založen na stimulované emisi fotonů v aktivním prostředí. Za normálních podmínek se většina atomů, iontů nebo molekul, které tvoří aktivní prostředí laseru, nachází v nejnižším energetickém stavu. Jsou-li však tyto částice excitovány do vyšších energetických stavů vnějším zdrojem energie (intenzivní světelné záblesky, elektrický výboj), budou při přechodu do původního energetického stavu vyzařovat koherentní světelné záření.

# Lasery a bezpečnost práce

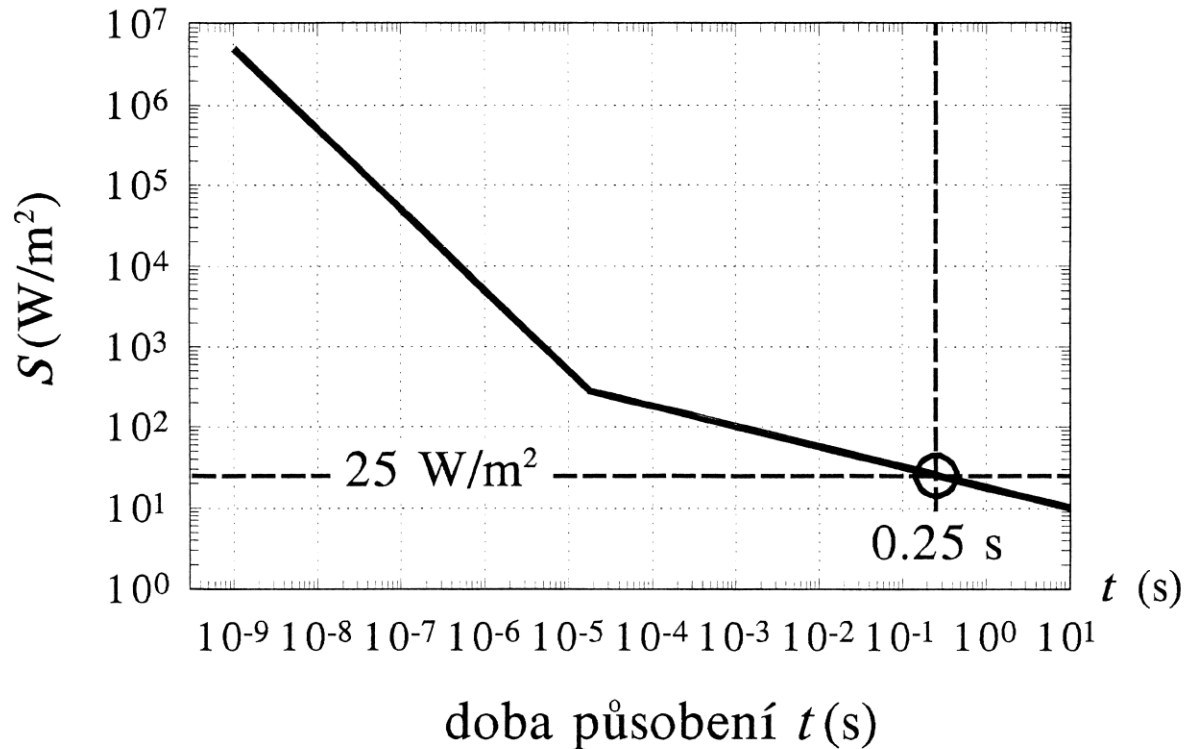
- ČSN EN 60825-1 ed. 3
- nařízení vlády č. 291/2015 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením
- Riziko poškození sítnice oka
- Komplikovanost předpisů pro práci s lasery souvisí především s tím, že riziko poškození zdraví nezávisí jen na intenzitě emitovaného laserového záření, ale i na vlnové délce, dále na době, po kterou laser záření emituje a na rozbíhavosti (divergenci) laserového svazku. Téměř dokonalá rovnoběžnost paprsků vystupujícího svazku je hlavním rozdílem laseru proti jiným přírodním i umělým zdrojům světla.
- Vždy se bere nejméně příznivá situace - plně otevřená pupila oka s průměrem 7 mm,

# Lasery a bezpečnost práce

- Výkon přenášený zářením, dělený obsahem plochy, kterou záření prochází, což je veličina nazývaná hustota zářivého toku, může na sítnici oka být až miliónkrát větší než hustota zářivého toku dopadajícího na rohovku, proto i laser, jehož zářivý tok je jen několik miliwattů, může poškodit sítnici.
- Důležitým bodem pro hodnocení rizika při práci s lasery emitujícími kontinuální záření ve viditelném oboru je hustota zářivého toku  $25 \text{ W/m}^2$  patřící k době  $0,25 \text{ s}$  mrkacího reflexu (což je zhruba doba zpoždění fyziologického reflexu člověka na oslnění, člověk přeruší jeho působení na oko mrknutím a případně odvrácením hlavy od zdroje).
- -Proti působení neviditelného záření nechrání oko člověka žádný reflex, a pokud má toto záření vlnovou délku která prochází oční čočkou a soustředí se na malou plošku na sítnici, je nutné dodržet přípustnou hustotu zářivého toku dopadajícího na rohovku oka patřící k předpokládané době působení, která v tomto případě může být podstatně delší než  $0,25 \text{ s}$ .

# Lasery a bezpečnost práce

Připustná hustota zářivého toku  $S$   
pro *viditelné* záření laseru



# Lasery a bezpečnost práce

Bezpečnostní třídy <http://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>

- Třída 1, 1M - Laserová zařízení, která jsou bezpečná během používání, včetně dlouhodobého přímého sledování svazku, dokonce i v případě sledování pomocí optických pomůcek (oční lupy a dalekohledy). 1M - Maximální přípustná dávka ozáření může být překročena a poškození oka může být způsobeno následkem ozáření v případě sledování svazku pomocí optických pomůcek (dalekohledy).
- Třída 2, 2M - Laserová zařízení, která vyzařují viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm a která jsou bezpečná pro chvilková ozáření, ale mohou být nebezpečná při záměrném pohledu do svazku. Časová základna 0,25 sekundy je základní pro definici třídy a předpokladem je, že je velmi nízké riziko poškození pro chvilková ozáření, která jsou poněkud delší. Pro třídu 2, na rozdíl od třídy 2M, použití optických pomůcek nezvyšuje nebezpečí poškození oka. Nicméně, oslnění, záblesková slepota a přetrvávající zrakové vjemy mohou být způsobeny svazkem laseru třídy 2, zejména při nízké úrovni okolního osvětlení.



# Lasery a bezpečnost práce

- Třída 3R - Laserová zařízení, která vyzařují záření, které může překročit maximální přípustnou dávku ozáření při přímém sledování uvnitř svazku, ale riziko poškození je ve většině případů relativně nízké. Limit přístupné emise pro třídu 3R je pouze pětinasobek limitu přístupné emise pro třídu 2 (viditelné záření laseru) nebo pro třídu 1 (pro neviditelné záření laseru). Protože je riziko nižší, použije se méně požadavků na výrobce a opatření pro uživatele (v závislosti na národních předpisech) než pro třídu 3B.
- Třída 3B - Laserová zařízení, která jsou běžně při pohledu do svazku nebezpečná (to je z jmenovité vzdálenosti s nebezpečím poškození oka) včetně nahodilých krátkodobých ozáření. Sledování difuzních odrazů je běžně bezpečné. Lasery třídy 3B, které dosahují limitu přístupné emise pro třídu 3B mohou vytvářet malá poškození pokožky nebo dokonce představují riziko zapálení hořlavých materiálů. Nicméně, to přichází do úvahy pouze v případě, že má svazek malý průměr nebo je zaostřen.

# Lasery a bezpečnost práce

- Třída 4 - Laserová zaručených je pohled do svazku i ozáření pokožky nebezpečné, a pro která pozorování rozptýlených odrazů může být nebezpečné. Tyto lasery představují často i nebezpečí vzniku požáru.