

3D skenery pro použití v průmyslu

Radomír Mendřický, Petr Keller

Kontrola přesnosti a kvality výrobků patří mezi důležité kroky ve výrobním procesu. Ještě donedávna byla kontrola součástí, tedy měření rozměrové a tvarové přesnosti, nejčastěji prováděna konvenčními metodami, např. dotykovým způsobem na souřadnicovém měřicím stroji. Měření tímto způsobem je velmi přesné, ve většině případů však poskytuje pouze diskrétní informace o předepsaných rozměrech, které jsou porovnávány s kótami a tolerancemi tvaru podle výkresu. Principiální omezení způsobu získávání souřadnic bodů těmito přístroji se projevují např. při kontrole tvarově složitých ploch. Pro změření souřadnic bodu na povrchu dílu je nutné se ho mechanicky dotknout. Pro detailní a přesný popis tvaru povrchu dané plochy je nutné získat dostatečně hustou síť bodů, což je časově velmi náročné. Nejen proto se v současné době stále častěji začínají i v průmyslu k měření a kontrole používat laserové nebo optické měřicí systémy, tzv. 3D skenery. Pomocí nich je nejprve kontrolovaný díl podrobně digitalizován a rozměrová a tvarová přesnost jsou kontrolovány na takto získaném virtuálním modelu. Uvedené moderní metody měření poskytují oproti klasickým dotykovým způsobům několik zásadních výhod: rychlá inspekce i tvarově složitých dílů, velká hustota dat, a především nezávislost výsledků na tuhosti součásti. V mnoha případech poskytují i objektivnější výsledky a díky celkovému popisu měřené součásti umožňují snadno provádět komplexní a názorné analýzy. Naproti tomu mají i svá omezení, která se týkají např. problematické digitalizace některých povrchů (např. lesklé, průhledné) nebo obtížného snímání detailních prvků, jako jsou ostré hrany či malé a hluboké otvory.

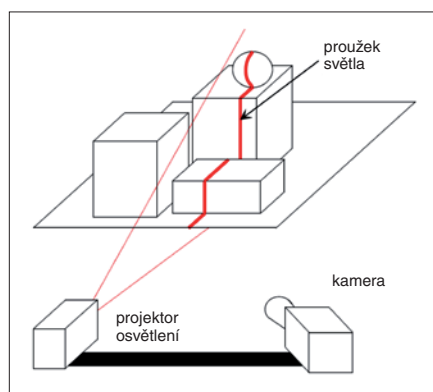
1. Principy optického 3D skenování a zpracování obrazu

Bezkontaktní optické 3D skenery obvykle pracují na těchto principech:

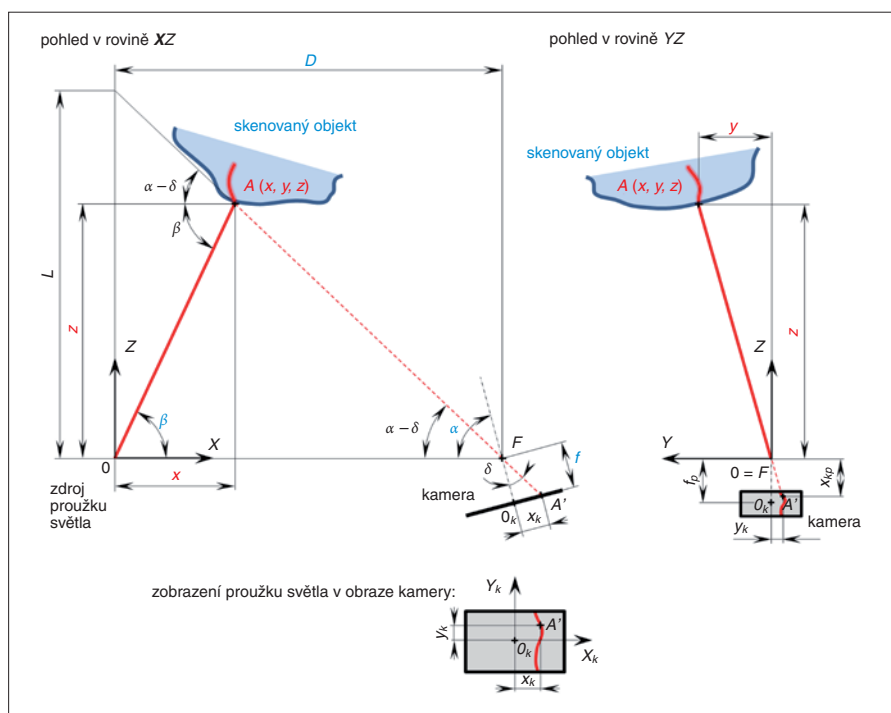
- projekce rastru světla na skenovaný objekt a digitální zpracování jeho obrazu,
- detekce vzdálenosti bodu povrchu skenovaného objektu od skeneru pomocí fázového posuvu světla nebo pomocí měření časového zpoždění paprsku,
- stereovidění.

1.1 Metoda projekce rastru světla

Ke skenování strojních součástí je velmi často používán *triangulační princip*, založený na projekci daného světelného rastru na skenovanou součást. Obraz tohoto rastru je sejmuto kamerou a počítačově zpracován. Často je promítaným rastrem světla přímý proužek, popř. sada proužků světla. Prostorové (3D)



Obr. 1. Základní konfigurace 3D skeneru na principu projekce proužku světla



Obr. 2. Zjednodušený matematický model 3D skeneru

rozměry součásti je potom možné vypočítat ze zpracování obrazu v místě procházejícího proužku. Nejjednodušší konfigurace 3D skeneru je sklopená na obr. 1. Skener se skládá z projektoru rastru (proužku) světla, minimálně jedné kamery a počítače pro zpracování dat.

Na obr. 2 je ukázán příklad výpočtu souřadnic bodu A na povrchu skenované součásti, kam dopadá promítaný paprsek světla ve zvoleném kartézském souřadném systému skeneru. Počátkem tohoto souřadného systé-

mu prochází proužek promítaného světla, osa X prochází ohniskem optické soustavy kamery, osa Y je rovnoběžná se zobrazovací rovinou kamery a osa Z je kolmá na obě předchozí a míří směrem k objektu.

Pro vlastní výpočet musí být známy konstrukční parametry skeneru – vzájemná vzdálenost projektoru světla a ohniska kamery D , úhel optické osy kamery α , úhel promítaného světla β a ohnisková vzdálenost optické soustavy f .

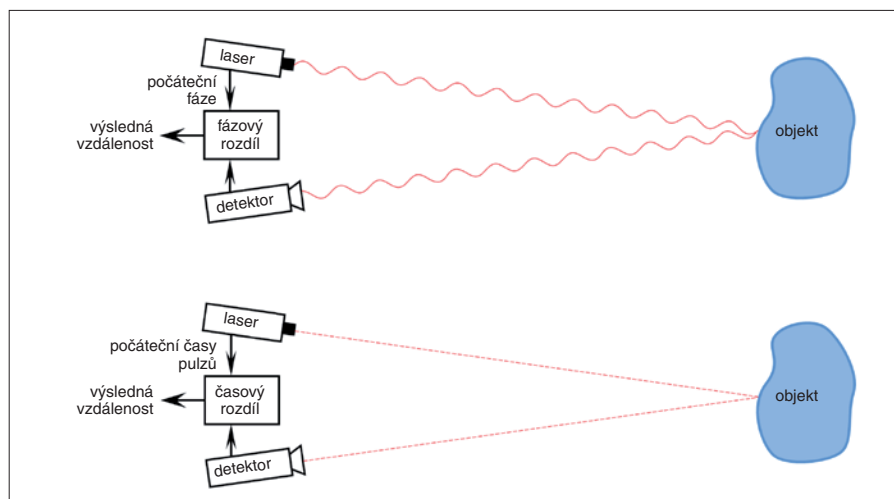
Úloha matematického zpracování 3D souřadnic zvoleného výpočtového bodu A začíná zpracováním obrazu kamery. Cílem je v sejmutém digitálním obraze nalézt obraz proužku světla promítaného na skenovaný objekt. Po tomto zpracování jsou známy obrazové souřadnice jednotlivých bodů ležících v místě promítaného proužku v kamerovém souřadném systému X_k, Y_k . Pro zvolený obraz výpočtového bodu A' , který má zjištěné souřadni-

ce (x_k, y_k) , lze potom z trojúhelníků na obr. 2 odvodit jeho prostorové souřadnice A (x, y, z) :

$$x = \frac{D \operatorname{tg} \left(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{x_k}{f} \right)}{\operatorname{tg} \left(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{x_k}{f} \right) + \operatorname{tg}(\beta)} \quad (1)$$

$$y = x \operatorname{tg}(\beta) \frac{y_k}{f \sin \alpha - x_k \cos \alpha} \quad (2)$$

$$z = x \operatorname{tg}(\beta) \quad (3)$$



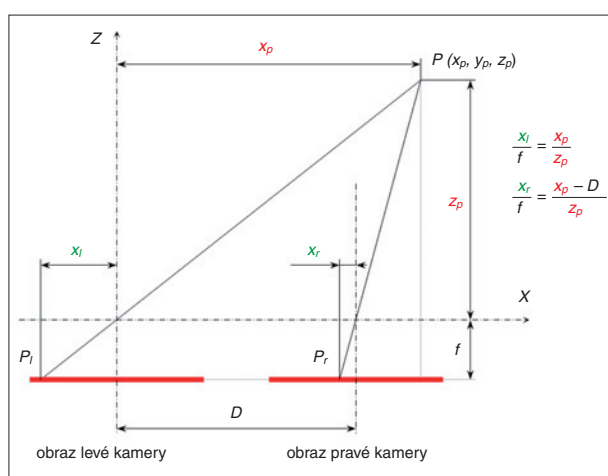
Obr. 3. Znárodnění základních principů laserových skenerů

Stejně lze postupovat pro ostatní body proužku světla v obraze a dopočítat tak jejich prostorové souřadnice. Výsledkem jsou tedy 3D souřadnice všech viditelných bodů v místě projekce proužku světla v souřadném systému skeneru. Pro naskenování větší části povrchu objektu je tedy třeba v tomto případě změnit polohu skeneru. Problémem však je, že výsledky předchozího výpočtu jsou v lokálním souřadném systému skeneru. Je třeba mít k dispozici absolutní polohu skeneru vzhledem ke skenovanému objektu, aby bylo možné přepočítat lokální výsledky do jednoho globálního souřadného systému spojeného s objektem.

Pro zjištění polohy skeneru vzhledem k objektu se používá několik způsobů. Principiálně nejjednodušší je snímat polohu skeneru měřícím ramenem nebo souřadnicovým měřícím strojem. Potom postačuje základní konfigurace skeneru z výše uvedeného příkladu, kde data z lokálního souřadného systému jsou přepočítávána do globálního souřadného systému na základě 3D souřadnic daných připojeným hardwarem. Nevýhodou tohoto řešení může být omezení pohyblivosti bezkontaktního skeneru vzhledem ke skenovanému objektu.

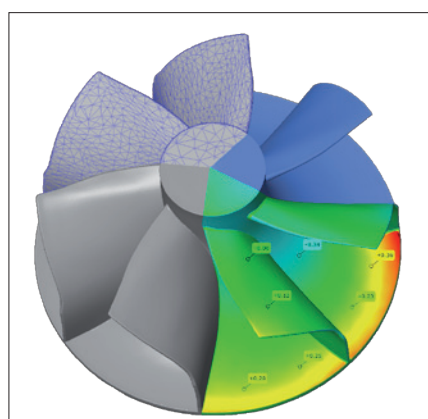
Tuto nevýhodu odstraňuje použití bezkontaktního optického systému, který sleduje polohu vlastního skeneru v prostoru a udává tak jeho absolutní polohu. Obvykle je toto zařízení označováno jako tracker. Výhodou bývá velký dosah i dobrá přesnost při kompaktních rozměrech skeneru. Při vhodném počátečním nastavení je tak možné skenovat i hůře přístupná místa, kombinovat bezdotykový skener s dotykovou sondou apod.

Dalším způsobem, jak získat absolutní souřadnice výsledných 3D bodů, je vybavit skener druhou, popř. i další kamerou a jeho polohu získávat na základě tzv. referenčních bodů, nalepených na objekt a jeho okolí. Proces zpracování jednoho snímku je poté rozdělen do dvou etap. První etapa, podobná stereovidění, je založena na zpracování obrazů obou (více) kamer, kdy cílem je identifikovat



Obr. 4. Zjednodušený princip stereovidění v rovině XZ

pouze referenční body, matematicky určit jejich polohu v 3D souřadnicích a zkombinovat je s vypočtenými body z předchozích snímků. Z této kombinace lze pak určit změnu po-



Cylinder 5				
	Nominal	Actual	Dev	Check
Ø	+2.00	+1.97	-0.03	OK

Cylinder 4				
	Nominal	Actual	Dev	Check
Ø	+6.00	+5.97	-0.03	OK

Obr. 5. Příklad barevné mapy odchylek a výsledků měření rozměrů

lohy skeneru mezi dvěma po sobě jdoucími snímky. Podmínkou je mít ve dvou na sebe navazujících snímcích minimálně čtyři opakující se body (u některých systémů stačí tři body). Druhá etapa je již zmíněná projekce rastru světla spolu s přepočtem 3D souřadnic do globálního souřadného systému. Použitím dvou nebo více kamer je dále možné podstatně redukovat šum a chybně změřené prostorové body, typicky na hranách rovnoběžných s promítanými proužky.

U tohoto systému výpočtu absolutních 3D souřadnic bodů tedy není třeba žádné další zařízení. Určitou nevýhodou je nutnost lepit referenční značky na povrch skenovaného objektu, popř. do jeho okolí. Další nevýhodou při postupném navazování jednotlivých snímků za sebou je rostoucí chyba výsledné transformace souřadnic. Tu lze odstranit použitím

tzv. fotogrammetrie, což je původně geodetická metoda zjišťování rozměrů z fotografií na základě daných referenčních bodů. V prostorové (3D) digitalizaci ve strojírenství jsou nejprve nasnímány snímky součástí s jednotlivými body, kdy alespoň část z těchto bodů bývá jedinečným způsobem kódována. Z těchto snímků je pomocí zmíněné fotogrammetrie vypočítána mapa s 3D souřadnicemi jednotlivých referenčních bodů na celém objektu a tato mapa je poté použita i pro samotné skenování.

Sice obvykle s menší přesností, ale bez nutnosti lepit referenční body, lze u některých systémů použít i spojování jednotlivých snímků podle naskenované křivosti objektu v 3D datech, jeho barvy nebo textury povrchu. Tento způsob je vhodný např. při digitalizaci uměleckých či historických předmětů, kde může být lepení bodů nežádoucí a kde zpravidla menší přesnost skenování tolik nevaadí.

1.2 Detekce vzdálenosti bodu povrchu skenovaného objektu od skeneru

Mezi další používané principy měření a skenování objektů v prostoru (3D) patří detekce vzdálenosti bodu povrchu skenovaného objektu od skeneru pomocí fázového posuvu světla nebo pomocí měření časového zpoždění paprsku (obr. 3). Protože je u těchto principů třeba použít monochromatické koherentní světlo, za jeho zdroj bývá zvolen laser a skenery jsou často označovány jako laserové. Principiálně je u obou uvedených způsobů měřena vzdálenost bodu povrchu součástí ve směru, kam dopadá paprsek od skeneru. Pro určení 3D souřadnic je tedy třeba znát polohu skeneru a úhly vyzařování paprsku laseru. Tyto laserové skenery je

Terminologie, základní pojmy

Přesnost, rozlišení skenování

Tyto dva pojmy jsou někdy mylně zaměňovány, přestože jejich význam je odlišný. Přesnost udává rozdíl mezi skutečnou a změřenou hodnotou, zatímco rozlišení naskenovaných dat udává nejkratší možnou vzdálenost, jakou dané zařízení dokáže změřit. Čím je rozlišení skeneru (tedy hustota změřených bodů) vyšší, tím má systém lepší schopnost zachytit drobné detaily na měřeném objektu (obr. 7). Aby bylo možné porovnávat přesnosti jednotlivých optických zařízení od různých výrobců, bylo zavedeno doporučení VDI/VDE 2634.

Měřicí objem, oblast skenování

Měřicí objem představuje měřicí rozsah užitý při jednom záběru či sekvenci záběrů. Vymezuje tedy aktivní oblast v prostoru, ve kterém je možné provést digitalizaci. Často bývá definován velikostí pole skenování (šířka a délka měřicího objemu) a hloubkou ostrosti (výškou měřicího objemu) – viz obr. 8. V současné době již skenery většinou umějí jednotlivá měření na sebe bez problémů napojovat, a je tak možné skenovat i větší plochu, než je zorné pole skeneru. Velikost měřicího objemu je dána optickou soustavou skeneru a u některých systémů je fixní (popř. softwarově nastavitelná), naopak některé systémy umožňují i výměnu objektivu a variabilitu měřicího objemu ve velkém rozsahu. V tomto případě je však třeba počítat s tím, že použitá optika je nejen určující pro velikost měřené součásti, ale významně ovlivňuje i hustotu měřených bodů a do jisté míry i přesnost snímání. Ne u všech systémů lze měřicí objem stanovit podle zde uvedeného popisu. Například u laserových skenerů, které k polohování v prostoru používají mechanické rameno, je spíše definován pracovní rozsah daného systému. Podobné je to u zařízení, u kterých je snímací hlava v prostou lokalizována opticky pomocí tzv. trackeru. Zde se hovoří např. o pracovním prostoru daného systému.

Rychlost skenování

Rychlost je u většiny zařízení dána počtem sejmutých bodů za sekundu. Ovšem pozor na záměnu s parametrem „počet měření (snímků) za sekundu“, který někteří výrobci též uvádějí ve svých materiálech. V tomto případě záleží i na principu snímání – velký počet snímků nemusí ještě automaticky znamenat i velké množství změřených bodů. Snímání může probíhat např. jen bodově (laserový paprsek) nebo v řádcích (laserová linka, kříž apod.) a v porovnání se systémy, které snímají v celém zorném poli, může být toto snímání i při rychlejších vzorkování pomalejší.

skenovat, nevýhodou je zatím obvykle menší přesnost výsledků.

2. Použití výsledků 3D skenování

Bezdotykové optické skenery jsou určeny k rychlé a relativně přesné digitalizaci reálných děl o velikosti centimetrů až metrů a k přenosu informací o jejich povrchu do 3D grafického rozhraní počítače, kde je možné je dále upravovat a modelovat. Výsledkem skenování objektů je tzv. *mrak bodů*, což jsou body v souřadnicích X, Y a Z ležící na povrchu skenovaného objektu. Tento mrak bodů lze jednoduše převést na *polygonální síť* (často tzv. formát STL), avšak přímé použití v běžných programech CAD je vzhledem k objemu dat komplikované až nemožné. Pro zpracování, úpravu a další vyhodnocení je proto třeba použít specializované programy pro práci s mrakem bodů, popř. s daty STL.

Digitalizovat lze v podstatě libovolné strojní součásti, jako jsou např. formy, nástroje, výlisky, obrobky. Takto získaná data mají široké využití především v systémech CAD, CAM a FEM, při ověřování výsledků simulací vstřikování plastů či tažení plechu apod. Je také možné kontrolovat kolize děl a funkčnost celků nebo ověřovat smontovatelnost jednotlivých komponent pomocí virtuálních sestav apod.

Při kontrole rozměrů vyrobené součásti lze poměrně snadno graficky porovnávat naskenovaná data s původním modelem vytvořeným v CAD v podobě tzv. barevných map odchylek, řezů, odchylek bodů atd. (obr. 5 nahoře). Základem této kontroly je správné nastavení naskenovaných dat do souřadného systému modelu v CAD. Je také možné zpracovat protokol o měření součástí na základě naskenovaných dat, který obsahuje nominální a změřené rozměry i tolerance tvaru a polohy jednotlivých útvarů (obr. 5 dole).

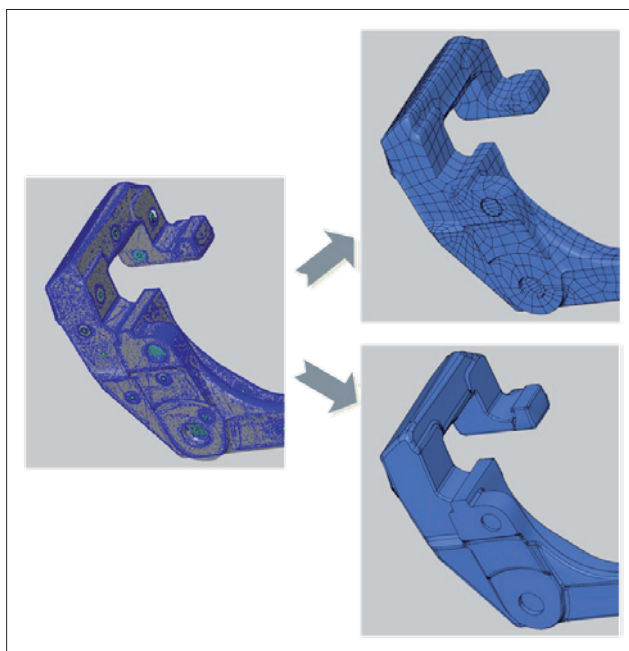
Polygonální data STL jsou také obvykle vstupním formátem pro Rapid Prototyping technologie, a nabízí se tak možnost po naskenování objektu vytvořit jeho duplikát právě použitím těchto technologií, popř. i obráběním na strojích CNC. Sejmutá data je však většinou třeba ještě před vlastní výrobou upravit – odmazat šum, zaplnit díry a místa, která nebyla nasnímána.

Další významnou oblastí využití výsledků z 3D skenování je tzv. *reverzní inženýrství*

možné použít jako rozšíření možností dotekových měřicích zařízení – měřicích ramen a souřadnicových měřicích strojů. Existují však také samostatné měřicí hlavy, využívající hlavně výhodu velké přesnosti měření i na velké vzdálenosti. Proto jsou uvedené principy používány v 3D skenerů pro velké objekty – např. výrobní haly a budovy. Tyto skenery mívají dosah i více než 50 m a jejich přesnost je i v těchto vzdálenostech řádově v jednotkách milimetrů. Časté je také využití u již dříve zmíněných trackerů ke sledování polohy např. skenovací hlavy s projekcí rastru světla.

1.3 Stereovidení

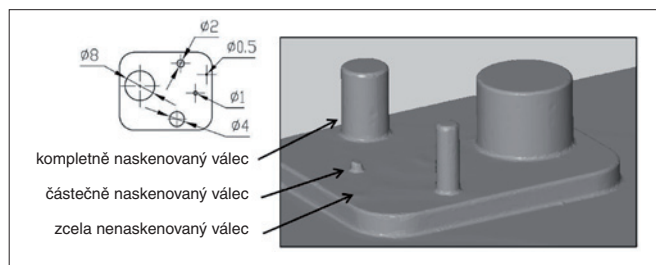
V poslední době se s rozvojem umělé inteligence začínají objevovat i 3D skenery pracující na principu *stereovidení*. Skener je vybaven dvěma či více kamerami a 3D souřadnice bodů povrchu skenovaného objektu jsou vypočítávány na základě známé polohy jednotlivých kamer vzhledem k sobě ze sejmutých obrazů (obr. 4). U stereovidení je však základní problém v jednoznačné identifikaci téhož místa (bodu) v jednotlivých snímcích, a proto je zde nutné použít prvky umělé inteligence. Získané 3D souřadnice jednotlivých bodů jsou opět relativní v souřadném systému skeneru, pro přepočítání do globálních sou-



Obr. 6. Příklad výsledků dvou způsobů reverzního inženýrství

řadnic lze použít stejné systémy jako v případě projekce světelného rastru. Předností těchto skenerů je menší citlivost na problematické povrchy, které by např. u promítání světelného rastru nebylo možné bez úpravy

ství (*reverse engineering*). Jde o digitalizaci reálných dílů a jejich následný převod do dat 3D CAD. Toto je i dnes poměrně běžný přístup v případě návrhových modelů (např. na základě hliněných modelů, koncepčních studií), ale i k získání chybějící výkresové dokumentace starých součástí. V tomto případě je nutné pro převod naskenovaných ploch do dat CAD použít speciální programy. U nich je nejčastěji volena jedna ze dvou cest převodu – buď jde o obecné plochy, ke kterým je třeba nalézt odpovídající matematický popis (obr. 6 vpravo nahoře), nebo je na-



Obr. 7. Vliv „rozlišení skeneru“ na schopnost zachytit detailní prvky [7]

skenovaná součást tvořena základními geometrickými primitivami (roviny, válce apod.) a výsledkem mohou být i plně parametrická data CAD založená na prostorovém snímku (obr. 6 vpravo dole).

Kromě technických oborů jsou data z 3D skenování rovněž používána i v lékařství k plánování operací, navrhování implantátů apod. Uplatnění nacházejí ale i v umění, architektuře nebo archeologii, kde je 3D skenování využito např. k dokumentaci a archivaci historických předmětů, soch i budov.

3. Výhody bezkontaktního skenování

- rychlé měření i tvarově složitých modelů, získání skutečného trojrozměrného modelu,
- vysoká hustota dat (až stovky bodů na 1 mm^2 , miliony bodů na jeden záběr),
- flexibilita (jedním zařízením lze měřit objekty od několika milimetrů do několika metrů), objektivita měření,
- nezávislost výsledků na tuhosti součásti, její hmotnosti a teplotě (lze měřit např. měkké materiály, horké formy),
- možnost měřit křehké či historicky cenné předměty bez nutnosti kontaktu,
- relativně přesné měření (přesnost řádově až v $0,01 \text{ mm}$).

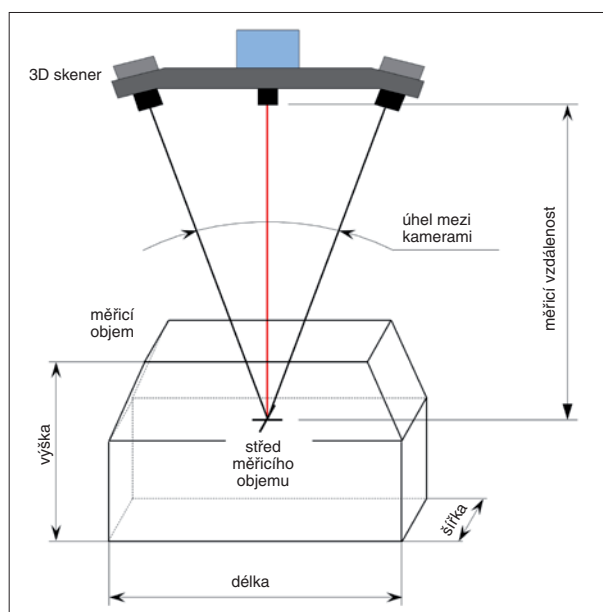
4. Nevýhody bezkontaktního skenování

- problematické měření některých povrchů; často je nutná úprava povrchu použitím antireflexních nástřiků,
- obtížné měření hlubokých dutin, děr nebo opticky nedostupných oblastí,
- citlivost k okolnímu osvětlení.

5. Směr vývoje

Používání bezkontaktních měřicích systémů v oblasti vývoje, výroby a zajišťování kvality dílů doznalo v posledních několika letech velkého rozšíření, roste jejich přesnost, rozlišení (hustota měření bodů) a spolehlivost. I budoucí vývoj naznačuje další rozšiřování potenciálu těchto způsobů digitalizace a měření. Pro některá odvětví je jejich použití dokonce nezbytností, neboť je často nutné, aby se měřicí zařízení nedotýkalo měřeného objektu.

V souladu s rozšiřováním bezkontaktního 3D skenování i do běžné průmyslové praxe, kde jsou zmíněná zařízení stále častěji a v mnohem širším měřítku obsluhována i méně zkušenými uživateli (dříve byly tyto systémy většinou doménou pouze vybraných výzkumných či specializovaných pracovišť),



Obr. 8. Definice měřicího objemu u optických 3D skenerů

je zřejmá snaha výrobců o co nejvyšší uživatelskou přívětivost při ovládání hardwaru během skenování i softwarových aplikací pro inspekci a zpracování dat. Důsledkem je i snazší kalibrace a konfigurace systému, vyšší stupeň automatizace jednotlivých kroků digitalizace, někdy ale i menší možnost

editace a nastavení různých parametrů. Stále více se také výstupy z těchto systémů, ať už jde o formáty 3D modelů nebo specifické protokoly o kvalitě daného výrobku (např. barevné mapy odchylek od nominálního modelu), dostávají do povědomí lidí z oboru a stávají se standardem např. i v automobilovém průmyslu.

Pro růst produktivity a účinnosti kontroly je v současné době obecným trendem též rostoucí míra plně automatizovaného 3D skenování – např. použití robotického skenování, automatizované skenování ve výrobních linkách a opakovaná automatická inspekce. S tím souvisí i úsilí výrobců vybavovat své skenery takovou technologií, která by umožňovala skenovat i opticky nevhodné povrchy bez antireflexních nástřiků. Proto jsou optické skenery v posledních několika letech častěji vybavovány zdrojem modrého světla namísto bílého, začínají se objevovat speciální režimy pro detekci a eliminaci odlesků na dílu apod.

S odkazem na současný a předpokládaný budoucí vývoj optického 3D skenování a zvyšující se přesnost uvedených zařízení se budou tyto systémy patrně stále více rozšiřovat do dalších oborů a oblastí inspekce jako alternativa konvenčních metod měření. To přispěje k růstu produktivity a jakosti výroby stejně jako ke zvýšení rychlosti inovace a vývoje nových výrobků.

Literatura:

- [1] KELLER, P.: *Bezkontaktní měření rozměrů zpracováním digitálního obrazu*. Liberec, 2004. Doktorská práce. TU v Liberci.
- [2] KELLER, P. – RACH, P. – LEPŠÍK, P.: *Bezkontaktní 3D digitalizace – skládání skenů*. In: *Stretnutie ústavov a katedier výrobní techniky a robotiky ČR a SR 2006: Sborník příspěvků mezinárodní konference*. Košice, TU v Košiciach, 2006, s. 4. ISBN 80-8073-560-3.
- [3] JAIN, R. – KASTURI, R. – SCHUNCK, B. G.: *Machine vision*. III. New York, McGraw-Hill, 1995. ISBN 00-703-2018-7.
- [4] *Trimble 3D Laser Scanning: Trimble CX* [on-line]. USA, Trimble Navigation Limited, 2015 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: www.trimble.com/3d-laser-scanning/cx.aspx?dtID=support
- [5] *Leica T-Scan* [on-line]. Switzerland, Leica Geosystems AG, 2015 [cit. 2015-11-16]. Dostupné z: www.leica-geosystems.com/en/Leica-T-Scan_1836.htm
- [6] MENDŘICKÝ, R. – KELLER, P.: *Parameters influencing the precision of SLM production*. *MM Science Journal*, vol. 2015, no. OCTOBER, pp. 705-710. ISSN 1803-1269. Dostupné z: 10.17973/MMSJ.2015_10_201540.
- [7] HOFMAN, M.: *Analýza přesnosti 3D digitalizace s využitím optických skenerů*. Liberec, 2013. Diplomová práce. TU v Liberci.

Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.,
Ing. Petr Keller, Ph.D.,
katedra výrobních systémů a automatizace,
Fakulta strojní, Technická univerzita
v Liberci