

METODY 3D AKVIZICE A JEJICH APLIKACE V ARCHEOLOGII
(E-LEARNINGOVÉ MATERIÁLY)

Josef Wilczek

Brno 2013

Tyto e-learningové materiály byly vytvořeny na Filozofické fakultě Masarykovy univerzity v Brně v rámci projektu „Inovace výuky archeologie a muzeologie pro praxi v kontextu mezioborové a mezinárodní spolupráce“ (MŠMT, OPVK; CZ.1.07/2.2.00/28.0230) - <https://www.muni.cz/vyzkum/projekty/16923>

These e-learning materials were made at the Faculty of Arts of Masaryk university in Brno within the project „Inovace výuky archeologie a muzeologie pro praxi v kontextu mezioborové a mezinárodní spolupráce“ (MŠMT, OPVK; CZ.1.07/2.2.00/28.0230) - <https://www.muni.cz/en/research/projects/16923>

OBSAH

PŘEDCHŮDCI 3D SKENERŮ	6
Faksimilové přístroje (19. století)	6
Počátek 20. století	9
Druhá polovina 20. století	13
2D SKENERY	14
Bubnové skenery	14
Stolní skenery	16
Obrazové senzory CCD a CMOS.....	17
CCD	17
CMOS (APS)	21
Rozdíly, výhody a nevýhody CCD a CMOS	22
3D SKENER A JEHO APLIKACE	26
Aplikace 3D skenerů mimo archeologii	26
METODY AKVIZICE PROSTOROVÝCH DAT	31
Základní dělení	31
Aktivní metody	32
Pasivní metody	33
AKTIVNÍ KONTAKTNÍ SCANNERY	34
Ramenný digitizér	36
AKTIVNÍ NEKONTAKTNÍ TRANSMISIVNÍ A MAGNETICKÉ SKENERY	40
Trojrozměrná počítačová tomografie (3D CT).....	40
Trojrozměrná magnetická rezonance (3D MRI)	45
Triangulace pomocí infračerveného laserového skeneru (Scanning From Heating / Termografie) .	47
OPTICKÉ REFLEXIVNÍ NEKONTAKTNÍ AKTIVNÍ 3D SKENERY	50
Time-of-Flight	50
Triangulační aktivní skenery	52
Strukturované světlo (SL/SLS systémy)	55
PASIVNÍ AKVIZICE 3D DAT	61
Shape From Stereo / Stereoskopická vize / Stereovize	61
Shape from (De)Focus (SfF, SfD).....	63
Shape/Structure from Motion (SfM)	64
Shape from Shading (SfS)	66
Shape from Silhouettes (SfS)	68

Shape from Texture (SFT)	71
Shape from Polarization (SFP)	72
Kinect.....	73
3D SKENOVÁNÍ V ARCHEOLOGII.....	80
Vizualizace	80
Analýza	83
Replikace (3D tisk)	87
Obecné charakteristiky 3D tiskáren	89
3D SKENOVÁNÍ A POSTPROCESSING	94
Příprava předmětu	94
Kalibrace	94
Vlastní skenování.....	97
Typy extrahovaných 3D informací.....	98
Proces vytvoření polygonálního modelu z mračna bodů	101
Možnosti zobrazení náhledu 3D modelu.....	103
Registrace, zarovnání a integrace.....	104
Filtrace šumu, odlehlých bodů a smoothing, zředění bodů	106
Vyplnění děr (Filling holes)	107

PŘEDCHŮDCI 3D SKENERŮ

Faksimilové přístroje (19. století)

Stejně jako jakákoliv jiná technologická zařízení i skenery prošly během svého vývoje řadou několika klíčových etap. Jejich vývoj se klade přibližně do poloviny 19. století, do doby začátku elektrifikace a prvních telekomunikačních přístrojů. Kromě telegrafů a telefonů byly pro následný vývoj 3D skenerů nejdůležitější faksimilové přístroje, předchůdci pozdějších faxů (tab. 1).

Jednou z prvních osob, které se snažily vylepšit již existující Morseův přístroj a jeho deriváty a donutily je přenášet nejen zvukový, ale i obrazový signál, byl skotský vynálezce *Alexander Bain* (obr. 1: vlevo). Jeho **chemický telegraf** (obr. 1: uprostřed) z roku 1846 kombinuje vlastnosti chemie a elektřiny (Highton 1852, Shaffner 1859).

Bainův vynález fungoval na jednoduchém principu, který si lze vysvětlit na následujícím příkladu. Jestliže máme papír napuštěný dusičnanem amonným a hexakvanoželeznatanem draselným a jezdíme po něm vodivým předmětem (například hřebíkem) zapojeným v elektrickém obvodu, tak hřebík na papíře zanechává černou barvu. Když hřebík od obvodu odpojíme (a chemikálie tak nejsou elektřinou stimulovány), tak žádnou barvu nezanechává. Posunuje-li se hřebíkem konstantní rychlostí v linii po papíru a zapojujeme a vypojujeme obvod podle toho, jaký od někoho dostáváme signál, tak jsme schopni celou zprávu „zaznamenat“. Tímto způsobem je možno na pohyblivou pásku zapisovat signál, který je k nám vysílán na delší vzdálenost, což je vlastně smyslem Bainova přístroje. Zapojení Bainova chemického telegrafu v té době znamenalo šestnásobné zrychlení přenosu zpráv oproti v té době využívanému Morseově přístroji (Highton 1852, Hunkin 2013, Prescott 1860, Sabine 1869, Salomon 2008).

Bain v té době také pracoval na **faksimilovém přístroji** (obr. 1: vpravo), předchůdci dnešního faxu. Stroj, který navrhnul, sestával z otáčejícího se cylindru potaženého nevodivým materiálem, do něhož byly zapíchnuty jehličky, které odpovídaly zprávě. Snímač, který se v rovnoběžných pásech posunoval přes cylindr, zaznamenával signál (procházející a neprocházející impuls) a vysílal ho vodičem do vzdálenějšího přijímacího přístroje, který zprávu replikoval linii po linii na stejný papír, jaký Bain použil u chemického telegrafu. K přijímači i vysílači byly přitom připojeny kyvadla, která oba přístroje synchronizovala. Bain bohužel tuto myšlenku, na níž přišel v roce 1843, dále nerozvinul (Hunkin 2013).

Přístroj Fredericka Bakewella (1811-1877) byl v mnohém podobný Bainově přístroji (obr. 2).

Sestával rovněž z cylindru poháněným hodinovým mechanismem, nyní však obaleném vodivou fólií, na níž bylo možno psát či kreslit speciální nevodivou tuší. Transmise signálu pak probíhala stejným způsobem jako u Bainova přístroje, dva přístroje spolu byly synchronizovány pomocí elektromagnetického regulátoru (Prescott 1860, Sabine 1869, Rensen 2013).

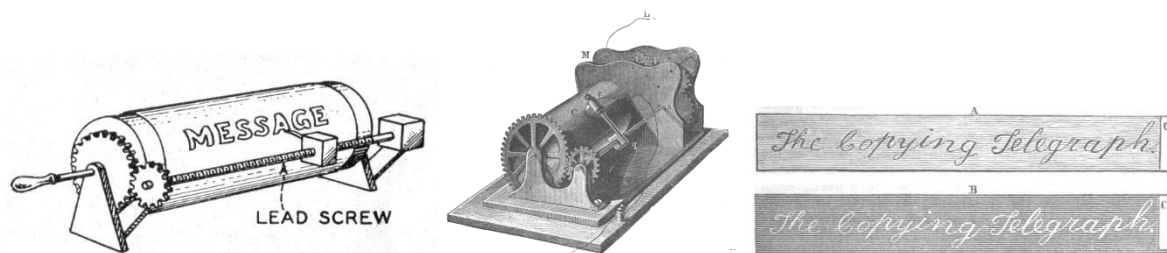
Tímto přístrojem se přenášely hlavně kopie rukopisů korespondentů a osobní podpisy, stejně bylo možné zprávy tisknout na papír neviditelně tak, že byla zpráva tištěna na papír napuštěný velmi jemnou kyselinou. Jak Bainův, tak Bakewellův přístroj, ačkoliv schopné reprodukovat jak psané zprávy, tak jednoduché grafické obrázky, měly hlavní problém, a to synchronizaci otáčení cylindru na vysílacím a přijímacím přístroji. K tomu, aby byl obrázek vykreslen na přijímacím přístroji, bylo totiž nutné, aby se obě hlavice po cylindru začaly pohybovat od stejné doby (Hunkin 2013, Shaffner 1859).

Year	Country	Pioneer	Achievement
<i>Image Telegraphy</i>			
1843	Great Britain	A. Bain	First patent for a telefax device
1847	Great Britain	F. C. Bakewell	First telefax demonstration
1851	Switzerland	M. Hipp	Electromagnetic copy telegraph
1855	Italy	G. Caselli	Pantelegraph
1859	Italy	G. Bonelli	Scanning of relief messages
1861	France	B. Meyer	Helical text reproduction
1866	France	J. J. É. Lenoir	Electrograph patent in Great Britain
1868	Austria	K. Opl	Insulating ink on metal plate
1869	France	G. d'Arlingcourt	Patent for improved electrochemical copy telegraph
1873	Switzerland	G. Hasler	Writing device operating by four electromagnets
1888	United States	E. Gray	Telautograph patent
1894	Italy	L. Cerebotani	Improved pantelegraph
<i>Photo Telegraphy</i>			
1901	Germany	G. Grzanna	Photographic paper
1902	Germany	A. Korn	Use of selenium cells
1906	France	E. Belin	Telegraphoscope/belinograph
1916	Germany	A. Schriever	Photoelectric cells, light rays
1920	United States	AT&T team	Film and light rays
1924	United States	Western Union	Telepix
1925	United States	AT&T team	Telephoto
1926	Germany	A. Karolus	Direct scanning of original
1928	Great Britain	O. Fulton	Fultograph
1928	Japan	Y. Niwa	Phototelegraph
1930	Germany	R. Hell	Patent for phototelegraphy
1934	United States	R. J. Wise	Teledeltos
<i>Telefax</i>			
1948	United States	G. H. Ridings	Desk-fax

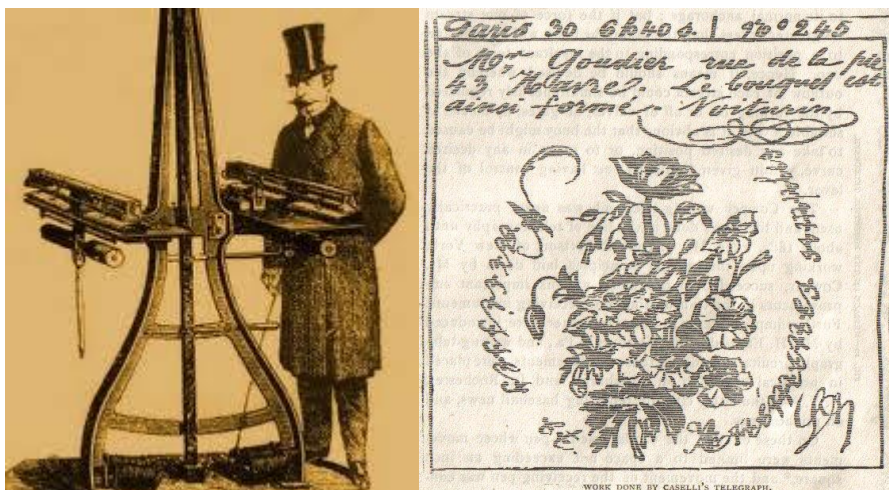
Tab. 1. Chronologický soupis nejdůležitějších telefaxových zařízení. Zdroj: Huurdeman 2003, Tab. 9.1.



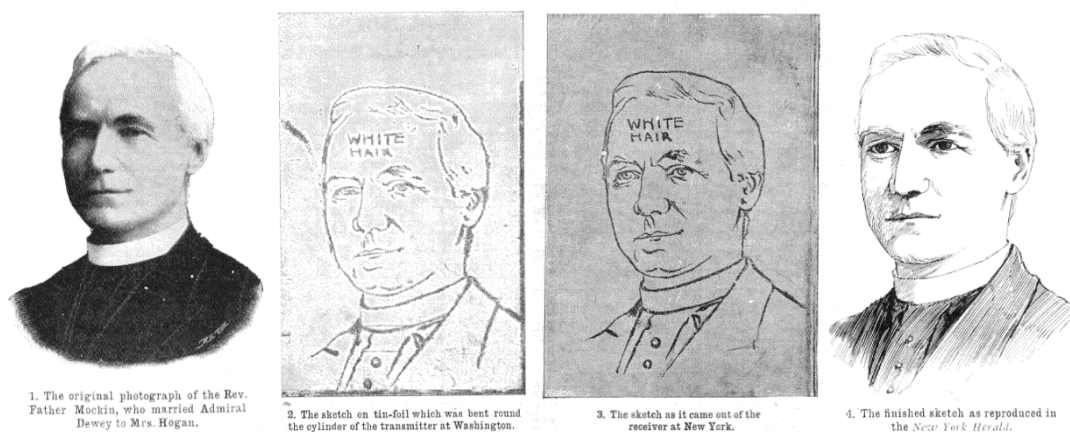
Obr. 1. Alexandr Bain (vlevo); Bainův elektricko-chemický telegraf (uprostřed); Bainův faksimilový přístroj z roku 1850 (vpravo). Zdroje: Biscutes 2010; Ingenious 2013; Rensen 2013.



Obr. 2 – Bakewellův Copying Telegraph z roku 1850 (vlevo a uprostřed) a ukázka odeslaného a přijatého rukopisu (vpravo). Zdroje: Rensen 2013, Sabine 1869, Fig. 97; Shaffner 1859, Fig. 1.



Obr. 3. Giovanni Caselli se svým přístrojem (vlevo) a ukázka obrazu přeneseného pomocí pantelegrafu (vpravo). Zdroje: FaxAuthority 2013, Rensen 2013.



Obr. 4. Ukázka transmise fotografie pomocí telegrafu: (a) původní fotografie, (b) skica na staniolu, která byla obtočena kolem cylindru vysílače ve Washingtonu, (c) skica tak, jak byla přijata v New Yorku, (d) konečná skica tak, jak byla otištěna v deníku *New York Herald*. Zdroj: Cook 1900.

První zavedený komerční faxový servis si tedy musel počkat ještě pár let, do roku 1856, kdy byl italským, v té době dlouhodobě ve Francii žijícím fyzikem *Giovanim Casellim* (1815-1891) patentován **pantelegraf**, či **pantographic**. Název tohoto přístroje vznikl jako sloučenina slova „pantograf“, tedy nástroje kopírujícího slova, a kresby „telegrafu“, což je elektromechanický systém, který posílá zprávy na velké vzdálenosti. První komerční faxová linka na světě probíhala mezi Paříží a Lyonem mezi lety 1856 až 1870 a fungovala na stejném principu jako u Bainova a Bakewellova přístroje (Prescott 1860, Salomon 2008).

Do tenké měděné vrstvičky ohnuté do mírného oblouku byla vyryta zpráva, která byla skenována stylem a posílána elektrickými impulzy do přijímacího přístroje, jehož stylus zprávu vykresloval. Synchronizace obou strojů probíhala pomocí regulačních hodin a kyvadel délky dvou metrů a hmotností 8 kilogramů, jež byly poháněny elektromagnety (Sabine 1869).

Přesnost a spolehlivost obou přístrojů pantelegrafu, stejně jako kvalita jejich výstupu byla poměrně velká. Ještě po více jak sto letech (1982) byly přístroje schopny bezpečně pracovat šest hodin denně po dobu několika měsíců. Jejich hlavní nevýhoda byla ovšem malá rychlost, díky níž o přístroj, jenž byl využíván hlavně pro odesílání smének a podpisů, hodně rychle klesal zájem (jen pro zajímavost, na naskenování listu papíru o velikosti 111x27 mm odpovídající přibližně 25 slovům bylo potřeba 108

sekund). Dalším faktorem, který přispěl ke krátkému užívání tohoto přístroje, byl v té době stále ještě ne moc využívaný bankovní směnný systém. Zájemců o bankovní transakce nebylo mnoho a po čtyřech letech používání pantelegrafu bylo od jeho využívání upuštěno (Hunkin 2013, Sabine 1869).

Další z velkého počtu vědců spojených s přenosem grafického signálu byl hodinář *Ernest A. Hummel*, který v roce 1895 zkonstruoval **Telegraf**, známý též jako **Telediagraf**, založený na synchronizovaných otáčejících se bubnech a platinovém *styilu* fungujícím jako elektroda v přenosu. První úspěšná transmise na velkou vzdálenost proběhla mezi Chicagem, St. Louis, Bostonem a Philadelpií a jednalo se o simultánní zaslání obrázku „prvního výstřelu v Manile“ (Cook 1900, Salomon 2008).

Počátek 20. století

Počátek 20. století byl charakteristický pokusy přeměny světelného vjemu na elektrický signál pomocí čidel senzitivních na světlo.

Princip takovýchto senzorů je, že jakmile jsou zakryty, tak v obvodu stoupá odpor, čehož lze využít stejným způsobem, jako u výše zmíněných přístrojů z poloviny 19. století. Světelné senzory je obvykle možno využít dvojím způsobem. Buďto senzor reaguje přímo na paprsek, anebo na jeho odraz. Jednoduché zařízení schopné reagovat na odrazové světlo si můžeme představit jako světelný zdroj (například bodovou žárovku), jehož paprsky jsou vyzařovány na malou část skenovaného objektu (například papíru s černobílou kresbou) a dále senzor, který zaznamenává intenzitu světla, který skenovaný předmět odráží. Přejíždíme-li tímto zařízením například po bílém papíře, na kterém je černou barvou nakreslen obrázek, senzor bude reagovat více na bílou barvu, která lépe odráží dopadající světlo, než na černou, která světlo pohlcuje. Domyslíme-li si, že tento systém (toto čidlo) bude regulovat propustnost elektrického proudu, stejně jako tomu bylo v případě vodivého a nevodivého materiálu u pantografu, můžeme si jednoduše představit skenovací zařízení schopné reprodukce černobílého obrazu – jinak řečeno jednoduchý černobílý skener. Přidáme-li k tomuto zařízení filtr separující jednotlivé barvy, získáme skener barevný (Luckett 1947).

Moderní černobílé faxy fungují stejným způsobem s tím rozdílem, že jako odrazové zařízení využívají pruhu světla, jehož odraz je projektován skrze čočku na tzv. čtecí hlavici sestávající z tisíců takovýchto mikrosenzorů. Přeměna intenzity světelného signálu obdrženého pomocí obrazového sensoru na zvukový signál je poté základem telefaxu.

Na začátku 20. století přišel německý fyzik a matematik *Arthur Korn* (1870-1945) s myšlenkou přeměny různých tónů barev skenovaného obrázku na odlišné intenzity elektrického proudu, a to za pomoci selenia citlivého na světlo (Anonyme 1907).

V temnotě totiž selenium není elektrickým vodičem, zatímco když je vystavěno světlu, tak jím skvěle prochází proud. Korn vzal jednoduše fotofilm, který natočil dovnitř skleněného bubnu a malým otvorem na něho pouštěl světelný paprsek. Světlo procházelo otáčejícím se skleněným bubnem a dopadalo přes hranol na selenový článek, jenž zaznamenával jeho intenzitu. Tisk probíhal pomocí galvanometru, který zaznamenával variace v intenzitě proudu a reguloval množství světla pouštěného přes clonu na kameru obsahující film (Anonyme 1907).

Poprvé bylo Kornovo zařízení zvané **Telaautograph** testováno v roce 1904 odesláním a přijetím fotografie prince regenta Luitpolda z Mnichova do Norimberku a nazpět. Celková doba přenosu přitom zabrala 42 minut. Přístroj hned po zavedení v první dekádě 20. století s úspěchem využívala například i policie, když se jí za jeho pomoci podařilo identifikovat kriminálního. Jednalo se o zloděje šperků loupícího v Paříži, jehož obrázek byl z Francie odeslán do Anglie a hned druhý den otištěn v *Daily Mirror*. Tento obrázek byl pak brzy použit k identifikaci zadržené osoby v jednom londýnském hotelu (Anonyme 2013, Hurdeman 2003).

Další z badatelů, kteří se podíleli na vývoji faxových zařízení pomocí fotobuňky, byl *Édouard Bélin*, tvůrce **Belinografu** sestaveného v roce 1913. Soudobé noviny vyjadřovaly velký entusiasmus a hovořily o průlomu v technologii, když byl pomocí Bélinova zařízení poslán obraz prezidenta Hardinga z Annapolis do Paříže za 20 minut (obr. 6). Přestože byly obrázky odesílány rádiovými vlnami a mohl být zachycen prakticky kýmkoliv, usnadňoval Belinův přístroj podobně jako Kornův Telautograph i řada dalších později využívaných přístrojů práci v kriminalistice. Ze soudobých zpráv je zřejmé, že byly pomocí Belinografu odesílány i šifrované tajné dokumenty (Anonyme 1932, Henderson 1929, Obden 1921).

Vysílač měl na sobě cylindr poháněný malým dynamem obtočený chromogelatinovým tiskem. Jak se cylindr otáčel, bodový mikrofón postupně snímal předlohu, jež byla telegraficky posílána do přijímače. Světelný paprsek na přijímací stanici vykreslující obraz na fotosenzitivní papír byl kontrolován rádiovými impulzy vyslanými z vysílače. Stejně jako u dřívějších zařízení přetrvával problém synchronizace vysílače a přijímače, který Bélin vyřešil za pomoci elektrických chronometrů a časových regulátorů (Ogden 1921).

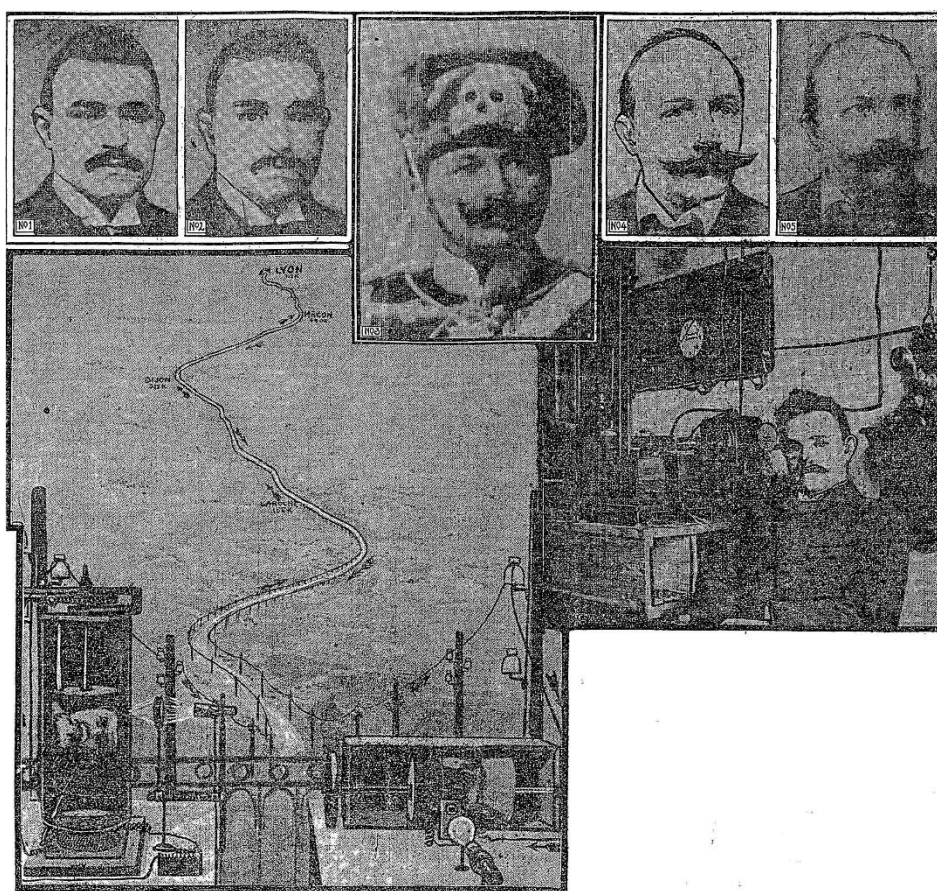
Oba přístroje si na počátku 20. století velmi konkurovaly, především kvůli jejich upotřebení v nové a rychle se rozvíjející sféře novinového obchodu. Belinograf vyšel z utkání jako vítěz, jeho výhodou bylo to, že byl menší než psací stroj, snadno ovladatelný a bylo ho možno připojit k obyčejnému telefonu. Počínaje touto dobou začíná velký rozvoj přenosů obrazu na delší vzdálenosti (Huurdeman 2003).

Ve dvacátých letech se ve velké míře rozmáhá možnost odesílání fotografií do novin, a to hlavně díky telefonní a telegrafní společnosti American Telephone & Telegraph Company (AT&T), svého času největší telekomunikační společnosti na světě. Testují se a ve větší míře používají faxy a jejich deriváty schopné odesílat zprávy pomocí rádiových vln (**Telephoto**, **Teledeltos**, **Fascimile radio**, **Radiopen**, **Radiofax**) a nasvědčují, že transmise obrazu bude jednou možná ve velké míře pomocí televize. Ukazuje se, že přenos zpráv a obrázků pomocí faxu zefektivní práci jak po fyzické, časové a ekonomické stránce (placení známek a stenografek) a že se pomocí rádiových vln zlepší „papírová“ komunikace mezi starým a novým kontinentem, v té době doménou hlavně lodní a letecké pošty. Jen jako zajímavost je možné uvést, že v roce 1936 pak stálo zaslání fotografie formátu A4 pomocí **Telephoto** 25 dolarů, v roce 1938 byly faxy po nějakou dobu využívány k odesílání „telegrafních polibků“ (obr. 7: vpravo nahoře).

Těsně po druhé světové válce se objevily i první barevné faxy schopné tisknout barevně. První takovýto přístroj se jmenoval **Colorfax** a vyrobili ho Finch Telecommunications. Rychlost, s jakou přístroj vytisknul papír přibližné velikosti A4, byl okolo 15 minut, což byl na tu dobu obdivuhodný výkon, když uvážíme, kolik času bylo potřeba pro tisk jedné stránky na jehličkové tiskárně v devadesátých letech (Anonyme 1934, 1936, 1938, Huurdeman 2003, Luckett 1947, Salomon 2008, Sarnoff 1935).

Přístroj pracuje tak, že je obrázek namontován na otočný buben. Světelný paprsek velikosti setiny palce je projektován na otočný buben. Světlo se od bubnu odráží na fotoelektrickou buňku, která transformuje variace v intenzitě odraženého světla do elektrické energie. Filtrový disk separuje jednotlivé barvy jednu od druhé. Světelný zdroj, fotobuňka a filtr jsou umístěny pospolu na jedné hlavici, která se pohybuje podél osy válce. Energie z fotobuňky je později amplifikována a přenášena pomocí tzv. nosné vlny (Luckett 1947).

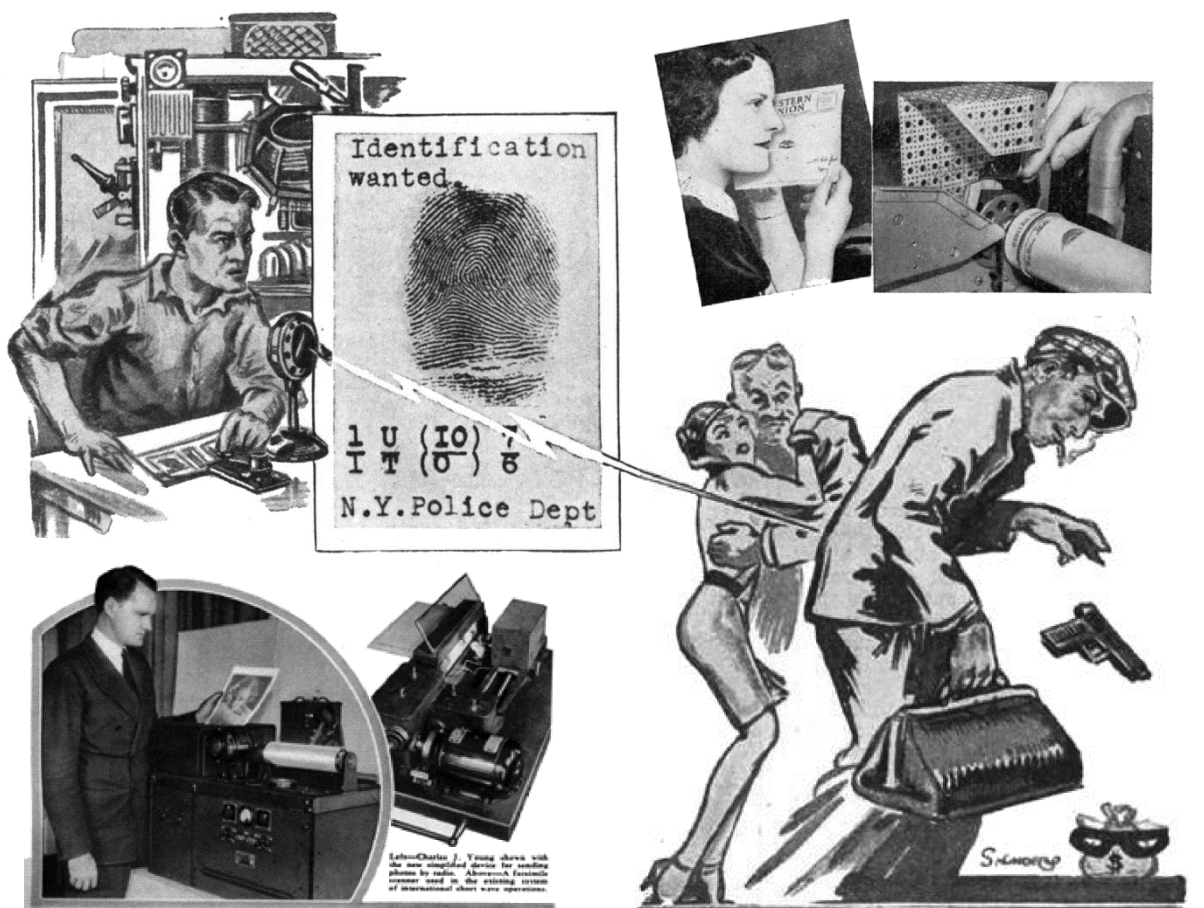
Tisk probíhá na přijímači pomocí mechanických per, která podle obdržených informací kreslí tenké linie na papír. Když dostane přijímač příkaz, aby kreslil červenou, tak kreslí červenou, když modrou, tak modrou. Smíchané barvy jsou získány namícháním třech základních barev, pro zvýraznění kontrastu se přimíchává černá barva. (Luckett 1947).



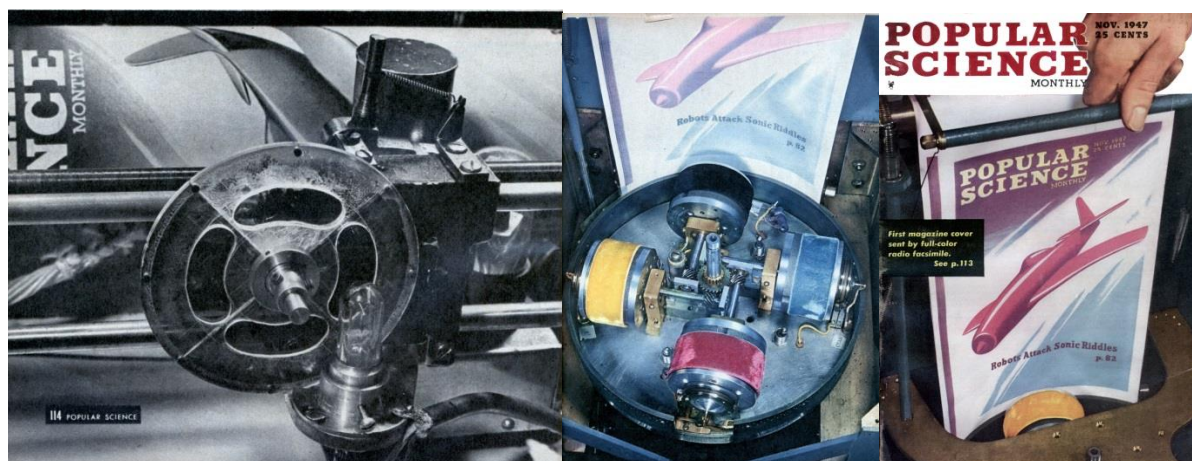
Obr. 5. Kornův přístroj. (Nr.1) Fotografie A. Korna, (Nr. 2) ta samá fotografie odeslána 600 mil z Mnichova do Norimberku, (Nr. 3) – Císařova fotografie přenesená na tu samou vzdálenost. Nr. 4-5 – Portrét přes a po transmisi odporu 12 000 ohmů odpovídající 2.500 milím. Obr. vlevo dole – Ilustrativní odeslání obrázku z Paříže do Lyonu a nazpět, vysílač nalevo, přijímač napravo; obr. vpravo dole – A. Korn se svým telephotographem ve své laboratoři. Zdroj: Anonyme 1907.



Obr. 6. Bélinův přístroj. Vysílač (vlevo) a přijímač (vpravo) Bélinova přístroje. Uprostřed fotografie prezidenta Hardinga odeslaná v roce 1921 z Annapolis (USA) do Paříže uprostřed. Zdroj: Obden 1921, 21.



Obr. 7. Propagace faxů v dobovém populárně naučném tisku. Zdroje (upraveno z): Anonyme 1938, Henderson 1929, Sarnoff 1935.



Obr. 8. První barevné faksimile. (Vlevo) rotující disk umístěný mezi světlem (žárovka) a předlohou (obrázek napasovaný na buben) filtruje barvy do jednotlivých barevných komponent (žluté, červené a modré), (uprostřed) čtyři bubny s barvami sloužícími pro tisk, (vpravo) první obálka časopisu odeslaného pomocí radiové faksimile. Zdroj: Luckett 1947.

Druhá polovina 20. století

Masovému rozšíření faxů v té době nicméně zabraňovalo v největší míře zažitý systém posílání telegrafů pomocí dálkopisných přístrojů a telegramních servisů. Změna v tomto ohledu nastala především od šedesátých let aplikací nových technologií, jakými byly tranzistory, LED a lasery, díky nimž se snížila cena nákladů na zařízení a stejně tak se zvýšila kvalita výstupů. Podíl na tom má i firma Xerox, která si v polovině 60. let nechala patentovat první verzi moderních faxovacích přístrojů, jakým byl například kompaktní **Telecopier**. Ten už potřeboval k odeslání předlohy formátu A4 jen dobu kolem šesti minut (Huurdeman 2003).

Od této doby se staly faxy doménou kanceláří a symbolem kancelářských prací až do počátku 90. let. Podíl na tom měl mimo jiné příliv asijských firem na trh. Od konce 90. let, kdy se začal masově rozšiřovat internet a e-mailová korespondence se od použití faxů upouští a lze říci, že v dnešní době již zcela vymizelo (Economist 2004).

The image displays three distinct vintage advertisements for office copying technology. The leftmost ad is for the Kodak Verifax, featuring a man and a woman in a professional setting, with the machine prominently shown in the foreground. The middle ad is for the Photostat, highlighting its '909' model and its ability to produce permanent copies. The rightmost ad is for the Xerox 914, showcasing its ease of use and the absence of wet chemicals or sensitized paper. Each ad includes detailed text about the machine's features and benefits, as well as pricing information.

Kodak Verifax
Verifax Business Copier, Model B (shown) \$132.50
On-the-spot copying...
A welcome convenience for you and your secretary... yours for as little as \$99.50 with a Kodak Verifax Copier.
Put a Kodak Verifax Copier near your secretary's desk and you won't lose her for 10 minutes every time you need copies. Also, you'll save 35¢ (or more) in secretarial "travel time" every time she makes copies.
For you. Which, in itself, soon pays for your Verifax Copier. And what a convenience! Call your Verifax Dealer today for free demonstration in your office, and handy Copy-Guid Computer Set that shows your savings with Verifax Copying! See Yellow Pages under duplicating or photostating machines. Or write to Eastman Kodak Company, Business Photo Methods Division, Rochester 8, N. Y.
Prices quoted are manufacturer's suggested prices and subject to change without notice.
Verifax Copying DOES MORE... COSTS LESS... NEEDS NOTHING

New! The "909" Copier Copies Anything for Keeps!
Outstanding Features:
•**"909" COPIES PERMANENTLY**
High contrast black and white copies on bond-quality paper. Trans-luxed and synthetic paper available. Long-lasting copies not affected by heat, light or humidity.
•**"909" COPIES QUICKLY**
All electric. Just plug it in—touch a button and you're ready to make copies. Refresh black and white copies.
•**"909" COPIES CLEARLY**
Ready-to-go cartridge—no plates, solvent developer set-up. No mixing, no pouring, no rolling—no solution handling... EASY.
•**"909" SIMPLICITY**
The one swift office copier providing both clarity and convenience. A single master exposure dial to simplify every copy application. Mastered in moments by anyone.
PHOTOSTAT COPIES FROM \$99.50
BE PHOTO-EXACT WITH PHOTOSTAT—only complete line of equipment and supplies for microfilm • offset • photocopy • copier
PHOTOSTAT CORPORATION
Rochester 8, N. Y., a subsidiary of Bink Corporation
For more information Circle Reader Service Card No. 34

LOOK!
No waste paper
—and 7 copies a minute—
automatically!
NEW XEROX 914
Office copier, easiest of all to operate
**NO WET CHEMICALS
NO SENSITIZED PAPER
NO INTERMEDIATE NEGATIVE**
Now anyone—even the office junior—can make perfect copies every time on ordinary paper. XEROX 914 Office Copier requires no expensive sensitized paper, no intermediate film, no liquid chemicals, no exposure settings or adjustments, no handling of copy paper or rehandling of originals.
XEROX 914 Office Copier copies from all sources—mastering every page—written, typed, printed, stamped, drawn—pages in book bound volumes and even filled from 3-dimensional objects... any number of clear, dry copies automatically.
As many copies as you want at the touch of a button
*Registered trademark

Obr. 9. Některé ze soudobých reklam na kopírovací přístroje. Zdroje: Anonyme 1961, Anonyme 1961, Xerox 1962.

2D SKENERY

S vývojem faxů se začaly vyvíjet i skenery, tedy zařízení schopná vytvořit elektronickou reprezentaci obrazu. Skenery lze v dnešní době rozlišit bubnové, plošné, čtečky čárových kódů, dále ruční skener, skener pro snímání filmových negativů či diapozitivů, anebo třeba tzv. planetární skenery pro skenování knih a dokumentů. Pro vývoj 3D skenerů však byly nejdůležitější první dva z nich, a to skenery bubnové a ploché.

Bubnové skenery

Vůbec první digitální skener, jenž byl schopen zachytit obrázek, byl, stejně jako faksimilové stroje, založen na rotujícím bubnu a byl vytvořen v roce 1957 týmem vedeným *Russel Kirschem*. Jako první obrázek skenovaný na tomto zařízení byla 5 cm velká fotografie Kirschova tříměsíčního syna Waldena, jež byla naskenovaná v rozlišení 176 x 176 pixelů. Bubnové skenery jsou přímými potomky faxových cylindrových přístrojů a jako obrazového senzoru využívají tzv. fotonásobičů (Photo Multiplier Tubes – PMTs), které přeměňují světlo do elektrické energie (Dubey 2009, Withers - Romano 2000).

Vlastní **proces skenování u bubnových skenerů** probíhá analogicky jako u Finchova barevného faxu citovaného výše. Snímaná předloha je upevněna na pryskyřičném válci (bubnu), který se otáčí ve veliké rychlosti, zatímco PMT senzory zachycují danou barevnou informaci. Používá se k tomu trojice PMT senzorů s filtry pro každou ze třech základních barev (RGB), čtvrtý senzor může produkovat signál, pomocí něhož lze zvýšit kontrast mezi tmavými a světlými tóny barev, což zlepšuje výslednou ostrost obrazu (Aztek 2007, Dubey 2009, Lewell 1982, Withers - Romano 2000).

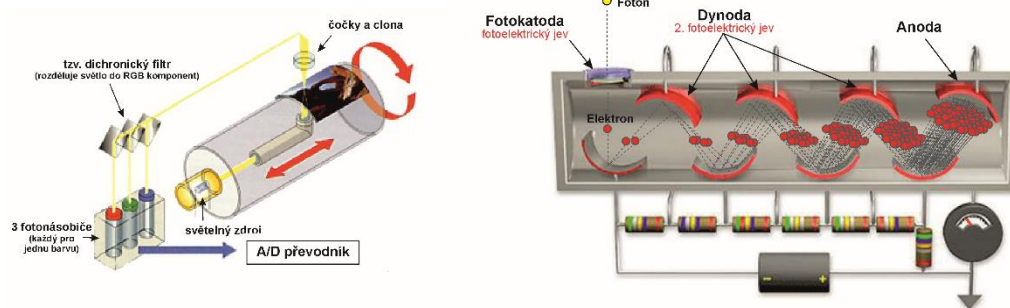
Fotonásobič je detektor schopný zachytit i velmi slabé optické signály (obr. 11: vpravo). Fotony, které si lze představit jako malé kuličky, dopadají na fotokatodu fotonásobiče, kde reagují s elektrony jejího materiálu. Reakcí dojde k vyrazení elektronů nad její povrch, čemuž se obecně říká fotoelektrický jev. Vyražené elektrony jsou pak dále urychlovány a násobeny pomocí elektrického napětí mezi dynodami umístěnými naproti sobě, což si lze jednoduše představit tak, že je každý elektron mezi diodami odrážen jako ping-pongový míček. Při každém odrazu jsou navíc z každé diody vyráženy další elektrony, které se pak odrážejí spolu s ním a postupně z dynod vyráží další a další elektrony (tomu se říká tzv. sekundární emise). Jelikož se takto elektrony „multiplikují“, dostává se na konečnou anodu fotonásobiče o mnoho větší množství elektronů, než jich bylo na počátku (z toho název „foto“-„násobič“). Tímto způsobem je pomocí fotonásobiče možné zachytit i na počátku velice slabý optický signál (Spring et al. 2004).

Sensory PMT mají například oproti rozšířenějším CCD čipům několik předností, například tu, že dokáží lépe rozlišit odstíny barev a reprodukováný obraz by měl být pak méně zrnitý. Je to z části způsobeno tím, že přístroje s PMT senzory jsou schopny kontrolovat nezávisle plochu, na základě které skener vytvoří jeden pixel a velikost clony, kterou je světlo pouštěno na optickou lavici skeneru. Tato kombinace vlastností je užitečná například pro vyhlazování filmových zrn při skenování fotografických negativů. Některé z bubnových skenerů jsou totiž schopny zachytit obrazovou informaci odpovídající velikosti zrnka na filmu odpovídající 3 mikronům (Aztek 2010, MacLeod 2008, Rich 2003).

Bubnové skenery se v dnešní době díky velké sensitivitě PMT senzorů a poměrně vysokému rozlišení - až 24 000 dpi či 64 000 dpi stále používají, a to právě hlavně pro skenování negativů a jiných grafických předloh s velkoplošnými výstupy. Proto se bubnové skenery stále běžně používají v uměleckých muzeích a galeriích, digitálních knihovnách či ve fotoateliérech a institucích, které pracují s velkými kolekcemi obrazových předloh. Role skenerů pro skenování běžných předloh v kancelářích a u běžných uživatelů přebíraly zhruba od poloviny 90. let levnější a rychlejší ploché CCD skenery, které už v některých případech dosahují kvalit PMT senzorů (Aztek 2010, Balagurusamy 2009, Rich 2003, Snehi 2006, Tally 2006).



Obr. 10. Tradiční skenery. Vůbec první obrázek naskenovaný pomocí skeneru (vlevo), R. Kirsch se svým synem v roce 1957 a po 50 letech (uprostřed), „moderní“ bubnový skener (vpravo). Zdroje: Drumsan 2013, Grego 2009, Fig. 2.32, Kirsch 2008.



Obr. 11. Fotonásobičový skener. Princip PMT-skeneru (vlevo) a fotonásobiče (vpravo). Zdroje (upraveno z): Aztek 2007, Spring et al. 2004. Animaci násobení fotonů je možné shlédnout na <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/flash/photomultiplier/>.

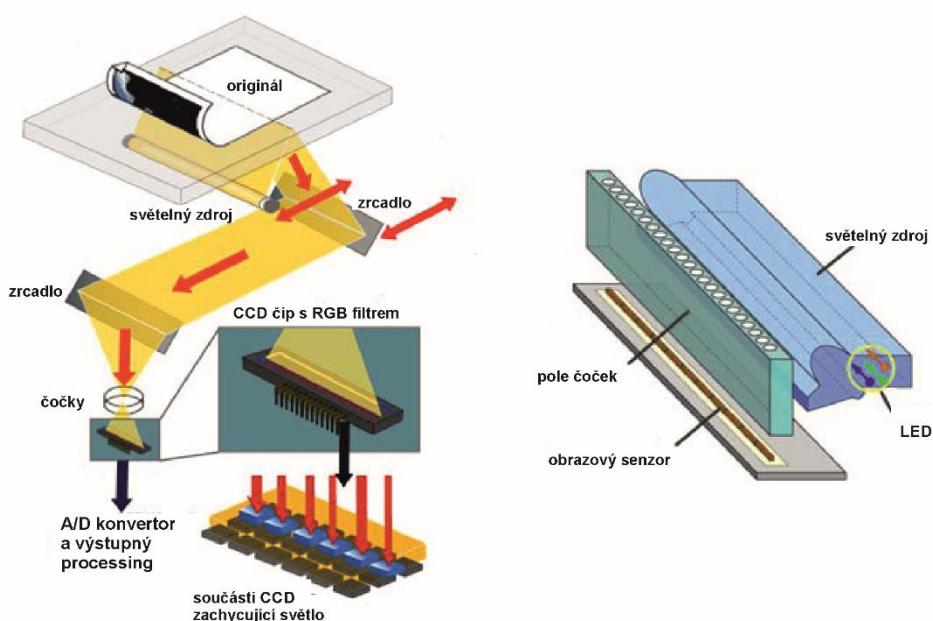


Obr. 11. Bubnový skener Aztek Premier Drum Scanner schopný naskenovat předlohu v rozlišení 64 000 dpi. Zdroj: Aztek 2010.

Stolní skenery

V osmdesátých letech byly skenery ještě poměrně nákladnou finanční záležitostí (v maximu až půl milionu dolarů) a mnohdy zabíraly skoro celou místnost. Od devadesátých let se díky zdokonalení obrazových technologií začaly rozšiřovat stolní skenery, jejichž výstupy byly stejně u mnohých jiných technologií v začátcích nevalné kvality, po několika generacích se však kvalita jejich výstupů zlepšila a byla srovnatelná s dnešními přístroji (Withers 2000).

Se stolním skenerem se seznámil v každodenním životě prakticky každý. Pochopení základního principu fungování dvourozměrného plochého skeneru napomůže pochopení například o něco málo sofistikovanějšího, avšak v leccem podobného 3D skeneru fungujícím na principu Time-of-flight.



Obr. 12. Princip skenování pomocí skeneru využívající CCD (vlevo) a CIS (vpravo). Zdroj (upraveno z): Epson 2013.

U plochých skenerů se předloha pokládá na sklo, pod níž přejíždí tzv. čtecí hlavice poháněná krokovým motorem. Obvykle se na hlavici nachází mimo jiné světelný zdroj se zrcadly a obrazový senzor, který může být tradičně dvou typů, a to buď CIS (Contact Image Sensor) anebo CCD (Charged-Coupled Device) (Docter et al. 2006).

U skenerů využívajících CCD senzorů je světlo generováno nejčastěji fluorescenční lampou s chladnou katodou, jinak také fluorescenční žárovkou či xenonovou lampou. Paprsek světla vyslaný z lampy a odražený od předlohy je veden systémem zrcadel na čočku, přes kterou se obraz dostává na CCD čip. CCD čip s barevným filtrem či filtry zaznamená analogicky skenovanou obrazovou informaci, která poté vstupuje do analogo-digitálního konvertoru ADC (analog-to-digital converter). Ten má za úkol analogový signál přeměnit do digitální podoby a poté jej zaslat do mikroprocesoru skeneru, který jej dále přepoše do počítače, který ho pomocí softwaru interpretuje (Docter et al. 2006, Samarin 2004).

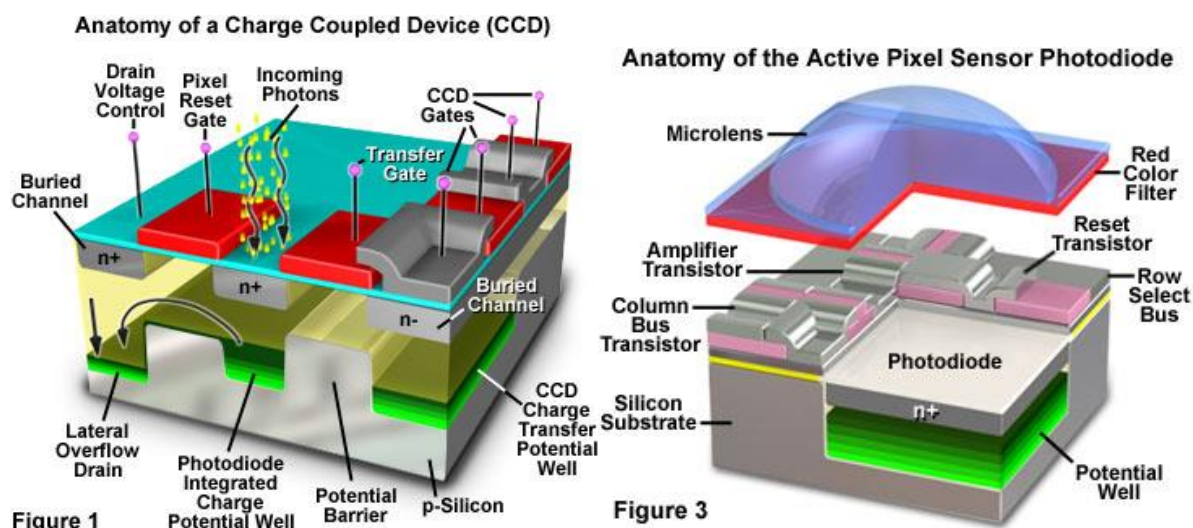
ADC zařízení to provádí tak, že měří vstupní napětí a popisuje ho v číslech, které poté posílá do procesoru skeneru. Když například na začátku do ADC vstupuje napětí 4V, ADC tuto hodnotu запиše v 8-bitové soustavě (tedy v osmi číslech) jako 00000100, jestliže se pak vstupní napětí změní na 9V, výstupní signál bude mít hodnotu 00001001. Osm bitů v tomto případě odpovídá tzv. barevné hloubce skeneru. V dnešní době se používají skenery s barevnou hloubkou od 36 do 48 bitů, ačkoliv existují i přístroje s větším rozlišením barev. Lidské oko je nicméně schopno rozlišit do 10 miliónů barev, jenž je možno s přehledem zapsat ve 24 bitech (Samarin 2004, Ruiz 2009).

Světlo u skenerů využívajících CIS je generováno pomocí RGB-LED součástek a není vedeno systémem zrcadel, ale přes samo-zaostřovací mikro-čochky přímo na obrazový senzor, který zabírá celou šířku hlavičky (Grotta - Grotta 1998).

Hlavní výhodou CCD oproti CIS je především vyšší rozlišení a hloubka pole dosažená díky systému zrcadel a čoček objektivu. CIS přístroje jsou malých rozměrů (několik cm) a obecně mají nižší požadavky na napájení, čímž jsou vhodné pro přenos a pro skenování textových dokumentů či jednotlivých listů (Smith 2010).

Obrazové senzory CCD a CMOS

Velká řada moderních metod pro akvizici prostorových dat je založena na zaznamenání obrazové informace pomocí tzv. obrazových senzorů (image sensors). Stejně jako u plošného skeneru se ve 3D skenerech nejčastěji využívají senzory CCD, druhým nejčastějším obrazovým senzorem je CMOS, jenž je součástí velké řady systémů využívajících fotoaparátů.

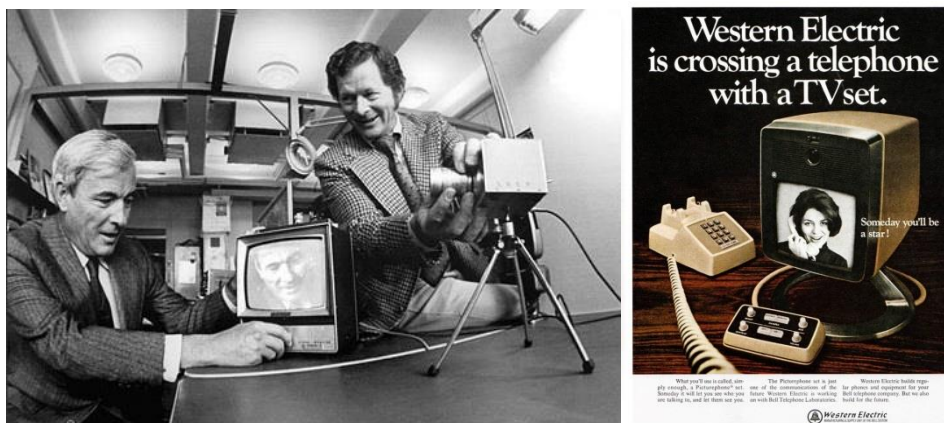


Obr. 13. Porovnání designu pixelu CCD (vlevo) a CMOS (vpravo) čipu. Zdroj: Abramowitz - Davidson 2004, fig.1; Turchetta et al. 2004.

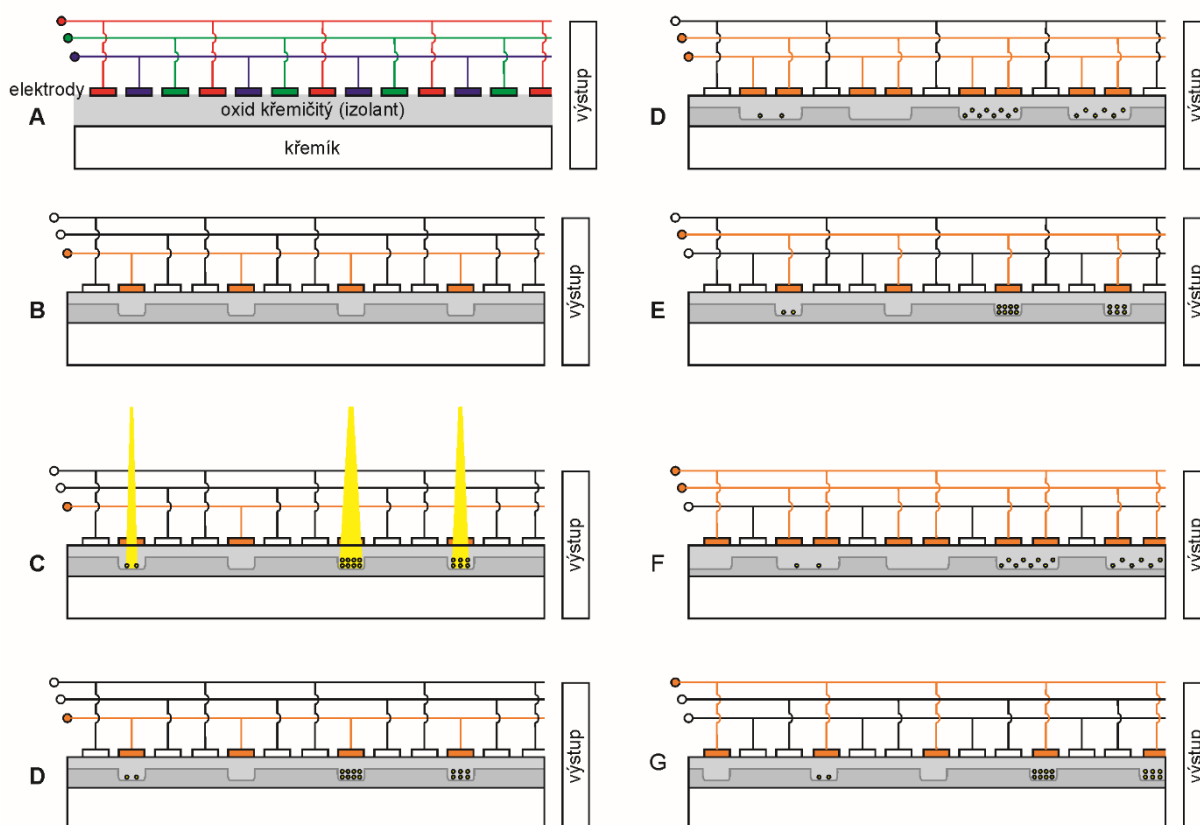
CCD

Elektronická součástka, kterou vědci vynalezli v Bellových laboratořích, se česky nazývá **zařízení s vázanými náboji** a její funkcí je zaznamenání obrazové informace. V dnešní době je součástí většiny přístrojů zaznamenávajících optickou informaci (digitální fotoaparáty, kamery, skenery, vesmírné teleskopy (včetně Hubblea), atd.). Právě tato součástka se poměrně často využívá jako obrazový senzor ve 3D skenerech, proto je vhodné se stručně zmínit o jeho historii a základním principu fungování (Kramer 2002).

Zařízení s vázanými náboji (Charge-coupled device) vynalezl v roce 1969 W. S. Boyle (1924-2011) a G. E. Smith (1930-), v té době pracující na paměťovém zařízení schopném uchovávat data z počítačů. Ve stejné době je také zajímavé, jak zdokonalit kameru ve **videofónech** (obr. 14). Zabrало jim prý jen hodinku, než načrtli základní strukturu CCD a definovali, kde všude by se tato technologie dala využít. Autoři si nicméně museli počkat celých 50 let, než byl jejich objev honorován Nobelovu cenou za fyziku.



Obr. 14. Boyle a Smith demonstrující videofon (vlevo), videofon, předchůdce dnešního skypu (vpravo). Zdroj: Doctrow 2011, Micron 2006.



Obr. 15. Schéma funkce CCD čipu. Zdroj (upraveno z): Labs 1978. Pro detailnější vysvětlení viz http://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device

Oba vědci byli za svého života nicméně velmi úspěšní a uznávaní - mimo celé řady patentů pomáhal W. Boyle v 60. letech vědcům z NASA s výběrem místa pro přistání Apolla na měsíci, G. Smith vedl pro změnu ve stejné době skupinu pro vývoj laseru druhé generace. Jako koníček oba vědce spojovala námořní plavba, G. Smith po svém odchodu do důchodu v roce 1986 dokonce brázdil oceány po dobu sedmnácti let (AB 2013, Boyle et al. 1962, Dalsa 2004, Kah 2002, Micron 2006, Technologies 2013).

CCD funguje na principu fotoelektrického jevu, což je fyzikální úkaz, při němž jsou z látky, na kterou dopadá elektromagnetické záření, uvolňovány elektrony – jedná se o vybíjení míčků, které jsme poznali u PMT. Velice zjednodušeně se dá princip fungování CCD vysvětlit názorně (Bellman 1961):

Profil senzoru CCD je tvořen vrstvou elektrod a křemíku, což je polovodič, tedy pevná látka, která je za jistých okolností schopná vést elektrický proud (obr. 15:A). Obě tyto vrstvy jsou od sebe odděleny velice tenkou vrstvou oxidu křemičitého (SiO_2), který funguje jako izolant. Každá třetí elektroda je spojena jedním vodičem (na obrázku jsou tyto obvody znázorněny červenou, zelenou a modrou barvou) a jednotlivé trojice tvoří jeden pixel.

Když se aktivuje elektrické napětí jednoho ze tří obvodů (například modrý, obr. 15:B), tak se pod aktivovanými elektrodami vytvoří potenciální díry, které si lze představit jako nádoby. Jakmile je CCD senzor po krátkou dobu vystaven světlu, tak dochází k fotoelektrickému jevu, při němž se nádoby naplňují emitovanými elektrony, které si lze představit jako vodní kapky. Množství vody v každé nádobě je přitom přímo úměrné intenzitě světla dopadajícího do okolí odpovídající elektrody (obr. 15:C, D).

Když se elektrické napětí aktivuje i u sousedních elektrod (na obr. 15:A znázorněny zeleně), tak se nádoby úměrně zvětší a voda se rozloží po celém jejich vnitřku (obr. 15:D).

Jakmile se pak zastaví přísun napětí na původních (modrých) elektrodách, voda (elektrony) se přelije do nádoby pod aktivní elektrodu (obr. 15:E).

Proces se postupně analogicky opakuje (obr. 15:F, G), dokud nejsou všechny nádoby vylity do výstupu.

Výsledný počet elektronů nemusí být dostačující k tomu, aby byly dalším zařízením vůbec detekovány, proto signál v další fázi vstupuje do zesilovače, jehož aplikací se „čitelnost“ elektronového signálu znásobí.

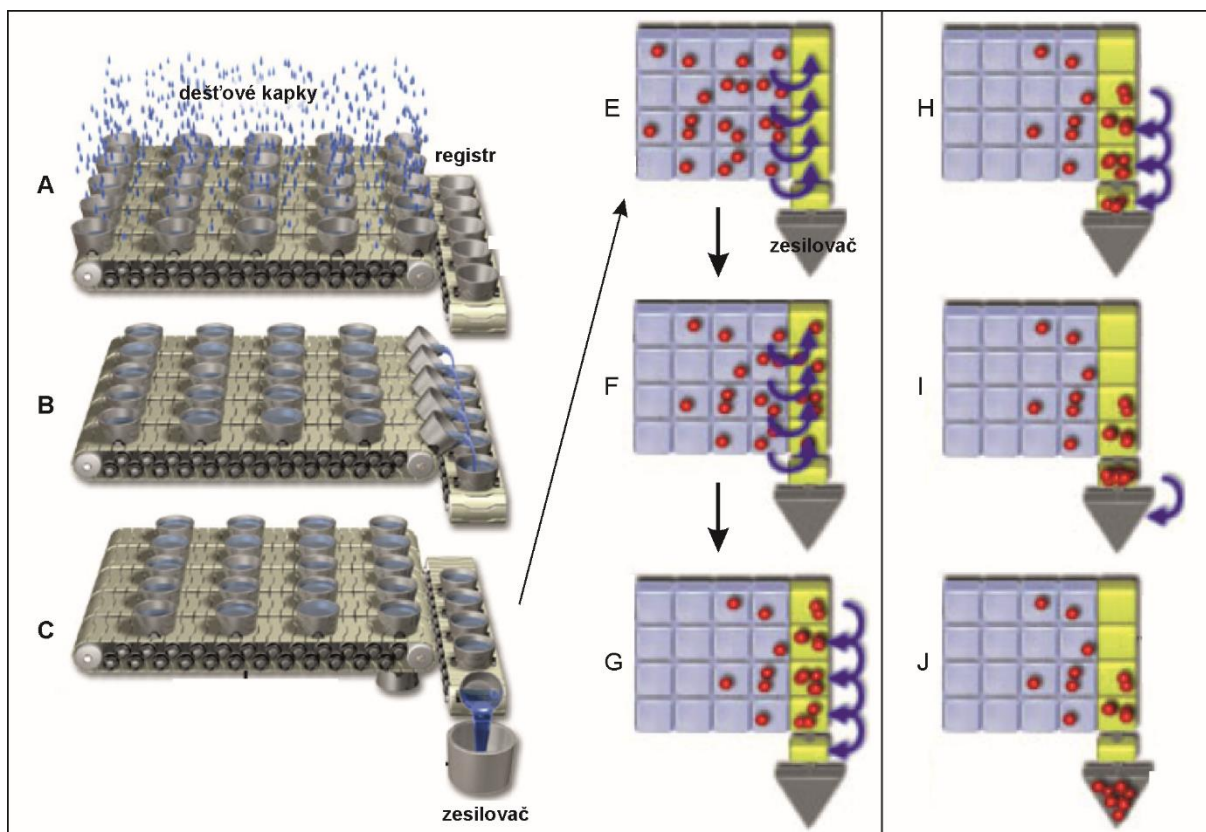
Obecně existují dva druhy CCD – první je lineární a slouží ke skenování jednorozměrného obrazu, čehož se využívá především ve faxech, počítačových skenerech, kopírkách atd. Dvojměrné CCD jsou oproti tomu součástí většiny moderních zařízení k zachycování obrazových předloh (kamery, fotoaparáty, atd.) (Platt a Stutz 2008).

Dvojměrný CCD čip se skládá z velkého množství tzv. fotocitlivých buněk (photosite) odpovídajících jednotlivým pixelům uspořádaných v poli. Princip, jakým jsou náboje odváděny z čipu, mohou být ilustrovány na obrázku (obr. 16):

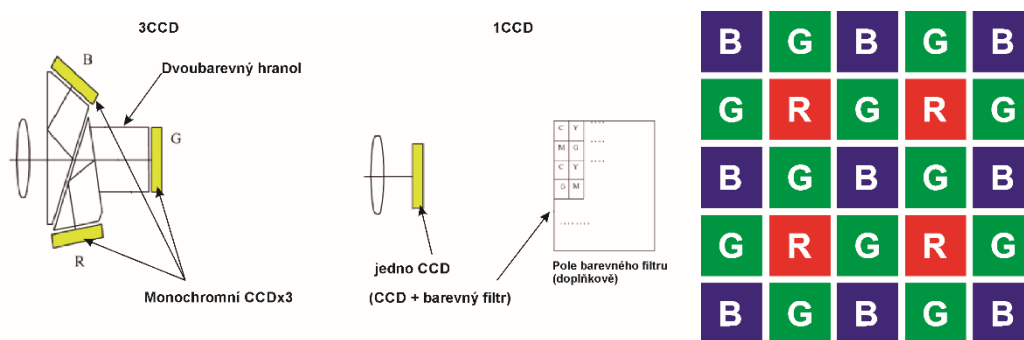
Po vystavení čipu světlu (dešti) se jednotlivé nádoby se naplní (obr. 16:A). Všechny nádoby se posunou po jezdicím pásu zleva-doprava, čímž se voda z krajní řady nádob přelije do jedné řady prázdných nádob zvané registr (obr. 16:B). Nádoby z registru se pak začnou posunovat odshora dolů, čímž se postupně z jednotlivých nádob vylívá voda do velké kádě- zesilovače (obr. 16:C). Proces vyprazdňování nádob ze sběrné řady ilustrují obr. H-J. Celý proces se pak opakuje do té doby, dokud se všechny nádoby, resp. celý snímač nevyprázdní. Elektrické náboje poté vstupují do zesilovače a analogo-digitálního měniče (ADC) (Dalsa 2004, Micron 2006, Srna 2011).

Tímto způsobem je ovšem snímána jen intenzita světla, nikoliv informace o barvě. Informace o barevné předloze lze pomocí CCD získat dvěma způsoby. Tou první je ta, že snímání obrazu probíhá pomocí třech individuálních CCD čipů, kdy je před každým z nich umístěn barevný filtr odpovídající jedné ze třech základních barev. Místo filtru lze využít i třech překrývajících se hranolů (obr. 17: vlevo). Má se za to, že tímto řešením by mělo být dosaženo lepší kvality obrazu a barev (Smith et al. 2011).

U druhé formy snímání se využije jeden CCD snímač, před něhož se umístí speciální barevný filtr (obr. 17: uprostřed). Nejčastěji se jedná o tzv. Bayerův filtr či masku, ve které jsou v šachovnicovém uspořádání umístěny dílčí filtry třech základních barev (RGB) tak, že zelené je v mřížce 2x více (obr. 17: vpravo). B. E. Bayer svůj filtr patentoval v roce 1976, rozložení a četnost barev na mřížce přitom přizpůsobil barvě - sensitivním vlastnostem lidského oka (Bayer 1976).



Obr. 16. Postup vyprazdňování nábojů na CCD čipu. Zdroj (upraveno z): Spring et al. 2013, Fig. 5, 9.



Obr. 17. Akvizice barev pomocí dvoubarevného hranolu a třech monochromních CCD (vlevo), akvizice pomocí jednoho senzoru s barevným filtrem (uprostřed), Bayerova mřížka (vpravo). Zdroj (upraveno z): Smith et al. 2011, Fig. 3.2.

Bayerův filtr je nad CCD snímač umístěn tak, že každé barevné políčko šachovnice leží nad jedním pixelem. Každý z pixelů tak nemůže zaznamenat informaci o reálné barvě, nýbrž jen o jedné z jejích tří základních složek. Výsledný celkový obraz se poté dopočítává pomocí algoritmu, který interpoluje hodnoty barev ze sousedících pixelů. Mimo Bayerův filtr existuje řada dalších filtrů modifikujících jak spektrum použitých barev, tak jejich uspořádání v mřížce (Dalsa 2004, Fujifilm 2009).

Fotobuňky CCD čipů jsou rovněž na horní straně opatřeny mikro čočkou, jež zvyšuje množství světla dopadajícího na jejich povrch, čímž se zvyšuje senzitivita čipu.

Popis CCD není tímto způsobem zcela vyčerpán. Existuje celá řada jejich různých modifikací, jako například „Frame Transfer CCD“ čipy či Interline Transfer CCD (ITL CCD). Tyto změny na čipech mají za cíl efektivnější využití plochy snímače a rychlejší zpracování elektronového náboje (Dalsa 2004, Šurkala 2009).

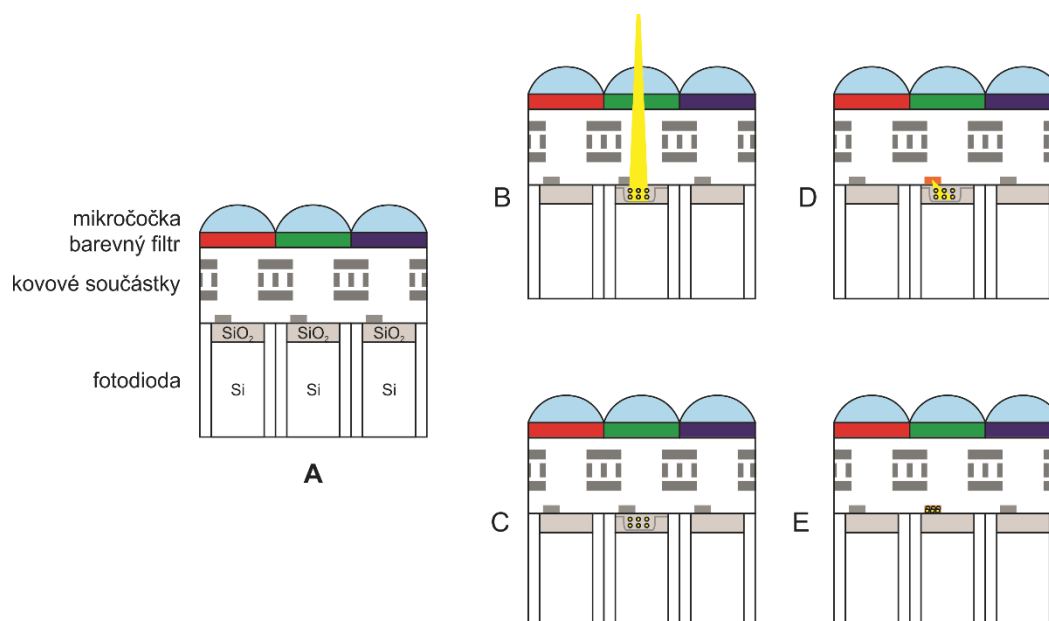
CMOS (APS)

Druhý z nejpoužívanějších obrazových senzorů je CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor). Tvůrcem technologie CMOS, týkající se primárně nikoliv obrazových čidel, ale pamětí a procesorů, se stal v roce 1974 *Frank Wanlass*. Součástka, kterou navrhnul, měla mít nižší energetické nároky a při pohotovostním režimu neměla konzumovat prakticky nic kromě protékajícího proudu (Gulati a Hawkins 1993).

Obrazový senzor CMOS byl vyvíjen přibližně od stejné doby jako CCD, avšak po velice dlouhou dobu nedosahoval jeho kvalit a nebyla mu věnována taková pozornost jako CCD. Krok vpřed v jeho vývoji začal až v první polovině 90. let, kdy vědci z NASA hledali způsob, jak zdokonalit a hlavně zmenšit masově používané CCD senzory pro to, aby mohly být využívány při vesmírných misích. *Eric Fossum*, v té době zaměstnanec NASA, místo toho, aby vylepšil stávající CCD senzory, přišel s návrhem CMOS APS čipu, který měl oproti CCD menší rozměry, menší nároky na spotřebu energie a byl rovněž méně náchylný k vesmírné radiaci. Vývoji CMOS čipu ve velké míře napomohla politika NASA, která se snažila v devadesátých letech o komercializaci nových technologií a jejich adaptaci přímo do amerického průmyslu. Technologie CMOS čipu nicméně nebyla přijata s velkým nadšením, díky čemuž rozčarovaný Fossum spoluzaložil spolu se svou bývalou ženou vlastní komerční společnost, zabývající se aplikací CMOS senzorů ve vědě, vojenství a průmyslu (Dalsa 2004, Micron 2006).

Každý CMOS APS senzor se skládá z velkého množství buněk odpovídajícím jednotlivým pixelům (obr. 13, 18). Každý pixel je složen z mikro-čočky, která zvětšuje množství světla dopadajícího na fotodiodu. Pod ní se nachází jeden z RGB filtrů, které propouští jen světlo dané barvy. Fotodioda, nacházející se vespod čipu je stejného složení jako u CCD a plní i stejnou funkci, tj. přeměňuje vstupní světlo (fotony) do elektrického náboje. Použijeme-li příkladu výše, jedná se o nalití elektronů do nádoby (obr. 18:B-C; srov. obr. 16:C-D).

Mimo fotodiody se na každém pixelu nachází alespoň tři tranzistory (reset, amplifik a row-select), které mají za úkol elektrický náboj zesílit, zeslabit šum a „odeslat“ signál přímo do ADC zařízení. Jelikož má každý pixel svůj vlastní zesilovač a signál je z každého pixelu do ADC odeslán individuálně, označují se takovéto CMOS snímače jako „aktivní pixelové senzory“ (Active pixel sensor – APS). Mimo nich existují i pasivní CMOS senzory (Passive pixel sensor – PPS), které mají v každé buňce jen fotodiodu a tranzistor pro přepínání signálu (Yadid-Pecht - Etienne-Cummings 2004).



Obr. 18. Schéma funkce CMOS čipu. Zdroj (upraveno z): Sony 2008.

Rozdíly, výhody a nevýhody CCD a CMOS

CCD a CMOS jsou prakticky od svých počátků ve vzájemném soupeření, které přetrvává prakticky až do dnešní doby.

Jako jedna z hlavních nevýhod CMOS se už od počátku jejich vzniku uvádí zvýšený šum. Je způsobený jak umístěním zesilovače v každé buňce senzoru (každý ze zesilovačů tak může zesilovat jinak než ostatní), tak jeho blízkostí u fotodiody. Další z nevýhod tradičních CMOS je to, že se tranzistory spolu s kovovými obvody na pixelech nacházejí na horní části snímače v bezprostřední blízkosti fotodiody. Zabírají tak částečně její místo, odrážejí dopadající světlo a zmenšují tím počet fotonů, které se dostanou na její povrch, čímž markantně klesá citlivost celého čipu. V praxi se to negativně odráží například na kvalitě fotek při horším osvětlení (Fernandez-Maloigne et al. 2013, Micron 2006, Šurkala 2009).

Výrobci se také snaží různými způsoby minimalizovat šum a citlivost čipů pomocí různých optimalizačních postupů. Firma Sony například vyvinula technologii BSI (Back-/Backside-Illumination), kdy jsou veškeré kovové spoje umístěny místo nad, tak pod fotodiodou. Tímto způsobem dochází k částečnému zlepšení kvality vlastností senzorů (propustnost světla), nicméně tím vyvstává i několik dalších problémů jako například vyšší šum, temný proud či míchání barev (Sony 2008, Srna 2011).

Na druhou stranu je výroba CMOS oproti CCD čipů o mnoho rychlejší, levnější a čipy jsou rovněž lépe integrovatelné. Svým navržením (designem) dosahuje CMOS čip oproti CCD o mnoho menších rozměrů, jelikož jsou všechny nutné komponenty (časovače, kontrola expozice, ADC) implementovány přímo na jeden kus silikonu. Tímto způsobem je možné získat fotoaparát na jednom jediném čipu. Fotoaparáty využívající CCD zařízení oproti tomu vyžadují od tří do osmi napájených obvodů. Hlavně z tohoto důvodu se CMOS senzory staly masovou doménou fotoaparátů v mobilních telefonech. V dřívější době se rovněž uvádělo horší rozlišení CMOS čipů oproti CCD, tento rozdíl už není, alespoň co se týče standardního využití, např. ve fotoaparátech, tak markantní (Blanc 2001, Dhir 2004, Šurkala 2009, Yadid-Pecht a Etienne-Cummings 2004).

V dnešní době lze říci, že handicap CMOS čipů daný hlavně tím, že CCD technologie byly optimalizovány po více než čtyři dekády, už není zdaleka tak znatelný, jako byl v devadesátých letech či na počátku 21. století. Obecně platí, že CMOS v dnešní době dominuje trhu s fotoaparáty, zatímco CCD je aplikován v přístrojích pro vědecké účely, kde je nutný obraz ve velmi vysokém rozlišení (Blanc 2001, Edwards et al. 2012).



Obr. 19. Srovnání kvality obrazu CMOS senzoru (vlevo) a s CMOS BSI senzoru (vpravo) při konstantním osvětlení. Zdroj: Sony 2008.

Rozdíly CCD versus CMOS		
Snímací čip	CCD	CMOS
Cena	vysoká	nízká
Rozměry řešení	vyšší	nízké
Spotřeba	vysoká	nízká
Kvalita obrazu	vysoká	nižší až nízká
Rozlišení	vysoké	střední
Komplexnost čipu	vysoká	nižší až nízká
Fill faktor (činná plocha)	vysoký	nízký až střední
Digitální šum	nízký	vysoký
Rychlost	nižší až vysoká	vysoká
Dynamický rozsah	vysoký	nižší
Možnost výřezu	nativně žádná	ano

Tab. 2. Srovnání výhod a nevýhod CCD a CMOS čipů. Zdroj: Šurkala 2009.

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

AB, N. M. (2013). "The Nobel Prize in Physics 2009." Poslední náhled: 2013/02/14, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/index.html.

Anonyme (2013). "17.10.1906: First Photoelectric Fax Transmission." Poslední náhled: 2013/02/12, http://www.todayinhistory.de/index.php?what=thmanu&manu_id=1617&tag=17&monat=10&year=2009&dayisset=1&lang=en.

Aztek (2007, 2013/02/16). "Photo Multiplier Tube (PMT) capture technology used in drum scanning." Poslední náhled: 2013/02/16, http://www.aztek.com/pmt_scanning.html.

Aztek (2010). "The AZTEK PREMIER Drum Scanner." Poslední náhled: 2013/02/14, <http://www.aztek.com/premier.html#>.

Biscutes, S. (2010). "The Scots Forum." Poslední náhled: 2013/02/12, <http://www.thescotsforum.com/showthread.php?1453-Tomb-with-a-view/page3>.

Aztek (2010). "The AZTEK PREMIER Drum Scanner." Poslední náhled: 2013/02/14, <http://www.aztek.com/premier.html#>.

Epson (2013, 2013/02/14). "CCD technology." Poslední náhled: 2013/02/14, <http://content.epson.it/maco/technology/scanners/ccd.htm>.

FaxAuthority (2013, 2013/02/12). "The Pantelegraph - Invented by Giovanni Caselli." Poslední náhled: 2013/02/12, <http://faxauthority.com/pantelegraph/>.

Fujifilm (2009). "Super CCD EXR." Poslední náhled: 2013/10/09, http://www.fujifilm.com/products/digital_cameras/topics/2008/0922_01.html.

Hunkin, T. (2013). "The Secret Life of Machines." Poslední náhled: 2013/02/12, <http://www.secretlifeofmachines.com/index.shtml>.

Ingenious (2013). "Image: Bain's chemical telegraph, 1850." Poslední náhled: 2013/10/09, <http://www.ingenious.org.uk/site.asp?s=S2&DCID=10325527>.

Labs, B. (1978). "2009 Nobel Prize winners Boyle a Smith present the CCD ". Poslední náhled 2013/10/09, <http://www.youtube.com/watch?v=51Za3FY1axI>.

Micron (2006). "The Evolution of Digital Imaging: Z CCD to CMOS." Poslední náhled: 2013/02/14, <http://ericfossum.com/Articles/Cumulative%20Articles%20about%20EF/Micron%20White%20Paper%20on%20CCDs%20and%20CMOS.pdf>.

Rensen, M. (2013, 2013/02/12). "Facsimile & SSTV History a Fax history." Poslední náhled: 2013/10/09, http://www.hffax.de/html/hauptteil_faxhistory.htm, <http://www.hffax.de/history/index.html>.

Samarin, S. (2004). "Flatbed Scanner Guide: Glance z Inside." Poslední náhled: 2013/02/14, <http://www.xbitlabs.com/articles/other/display/scanner-an.html>.

Sony (2008). "Sony develops back-illuminated CMOS image sensor, realizing high picture quality, nearly twofold sensitivity(*1) a low noise." Poslední náhled: 2013/02/14, <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E/index.html>.

Spring, K. R., et al. (2004). "Photomultiplier Tubes." Poslední náhled: 2013/02/14, <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/flash/photomultiplier/>.

Srna, M. (2011). "BSI CMOS snímač: popis technologie." Poslední náhled: 2013/02/14, http://www.digimanie.cz/art_doc-0470C029DC50F59AC12578120061A314.html.

Šurkala, M. (2009). "Fotomobily: snímací čipy CMOS vs. CCD." Poslední náhled: 2013/02/14, http://www.digimanie.cz/art_doc-67BCCD2DF7A9F53EC125763F0044663D.html.

Technologies, L. (2013). "CCD - The History of CCDs or Charge Coupled Devices. George Smith a Willard Boyle invented the first CCDs or charge coupled devices." Poslední náhled: 2013/10/09, <http://inventors.about.com/od/cstartinventions/a/CCD.htm>.

Xerox (1962, 2013/02/13). "Xerox 914 copier brochure." Poslední náhled: 2013/02/13, <http://yourmemento.naa.gov.au/2012/10/theres-no-such-thing-as-the-paperless-office-or-is-there/>.

Literatura:

Abramowitz, M. a M. W. Davidson (2004). "Anatomy of a Charge-Coupled Device."

Anonyme (1907). Sending Photographs by Telegraph. New York Times. New York.

Anonyme (1932). "Secret Documents Sent by Radio." Modern Mechanix a Inventions **January**.

Anonyme (1934). New Radio Pen Reproduces Pictures Put on the Air. Modern Mechanix.

Anonyme (1936). "Photos Sent over Phone Wires at Call Rates." Popular Mechanics **63**(5): 870-871.

Anonyme (1938). "Telegraph Kisses Are New Fad." Popular Science Monthly **May**: 53.

Anonyme (1961). "New! The "909" Copier Copies Anything for Keeps!" Modern Mechanix a Inventions **December**: 13.

Anonyme (1961). "On-the-spot copying...." Modern Mechanix a Inventions **October**.

Balagurusamy, E. (2009). Fund Of Computers. New Delhi, McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited.

Bayer, B. E. (1976). Color imaging array.

Bellman, R. (1961). "Adaptive control processes: a guided tour."

Blanc, N. (2001). CCD versus CMOS – has CCD imaging come to an end? Photogrammetric Week. D. Fritsch a R. Spiller. Heidelberg, Wichmann Verlag: 131-137.

Boyle, W. S., et al. (1962). Apollo a the Unmanned Program (October 30, 1962), NASA.

Cook, C. E. (1900). "Pictures By Telegraph." Pearson's Magazine **4**: 405-408.

Dalsa (2004). "Image Sensor Architectures for Digital Cinematography."

Dhir, A. (2004). The Digital Consumer Technology Handbook: A Comprehensive Guide to Devices, Standards, Future Directions, a Programmable Logic Solutions, Elsevier Science.

Docter, Q., et al. (2006). CompTIA A+ Complete Study Guide, Deluxe Edition: (Exams 220-601/602/603/604), John Wiley & Sons.

Dubey, N. B. (2009). Office Management: Developing Skills for Smooth Functioning, Global India Publications Pvt. Limited.

Economist, T. (2004). Last Gasp of the Fax Machine. The Economist Newspaper Limited.

Edwards, H., et al. (2012). Analytical Archaeometry, Royal Society of Chemistry.

Fernandez-Maloigne, C., et al. (2013). Digital Color: Acquisition, Perception, Coding a Rendering, Wiley.

Grego, P. (2009). Astronomical Cybersketching, Springer-Verlag New York.

Grotta, D. a S. W. Grotta (1998). "DesktopScanners What's now..." PC Magazine **October 20**.

Gulati, R. K. a C. F. Hawkins (1993). Iddq Testing of Vlsi Circuits, Kluwer Academic Pub.

Henderson, G. C. (1929). "Catching Crooks by Radio." Modern Mechanix a Inventions **May**: 76-77.

Highton, E. (1852). Electric Telegraph - Its History a Progress. London.

Huurdeman, A. A. (2003). The World History of Telecommunication. New Jersey.

Kah, A. (2002). "Image as Charged." HWM **2**(2): 10.

Kirsch, A. C. (2008). What We Did a Should Have Done in the Past Half Century of Computing. Information Science a Technology Colloquium Series, NASA.

Kramer, H. J. (2002). Observation of the Earth a Its Environment: Survey of Missions a Sensors, Springer Verlag.

Lewell, J. (1982). "The rebirth of printing." New Scientist **22**: 233-236.

Luckett, H. (1947). "Tune In a Painting." Modern Mechanix a Inventions **November**: 113-117.

MacLeod, S. (2008). Basics Photography 05: Post Production Colour, Bloomsbury.

Ogden, W. S. (1921). "How the World's First Wireless News-Picture Was Flashed Across the Atlantic Ocean. Paris gets President Harding's portrait in twenty minutes." Popular Science Monthly **99**(6): 21-22.

Platt, U. a J. Stutz (2008). Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles a Applications, Springer London, Limited.

Prescott, G. B. (1860). Electric Telegraph - History, Theory a Practice. Boston.

Rich, J. (2003). "Is Drum Scanning Really Alive a Well." Digital Output **November**.

Ruiz, E. (2009). Discriminate Or Diversify, PositivePsyche.Biz Corporation.

Sabine, R. (1869). The history a progress of the electric telegraph. New York.

Salomon, D. (2008). A Concise Introduction to Data Compression. London, Springer-Verlag.

Sarnoff, D. (1935). "Television Will Carry the Mails." Modern Mechanix a Inventions **March**: 36-38, 140, 142.

Shaffner, T. P. (1859). Telegraph Manual - A Complete History a Description of the Semaphoric, Electric a Magnetic Telegraphs of Europe, Asia, Africa, a America, Ancient a Modern. With Six Hundred a Twenty-Five Illustrations. New York.

Smith, A. D., et al. (2011). Smith's Textbook of Endourology, Wiley.

Smith, S. S. (2010). Web-Based Instruction: A Guide for Libraries, Amer Library Assn.

Snehi, J. (2006). Computer Peripherals a Interfacing, Laxmi Publications Pvt Limited.

Spring, K. R., et al. (2013). "Introduction to Charge-Coupled Devices (CCDs)." White paper.

Tally, T. (2006). SilverFast: The Official Guide, Wiley.

Turchetta, R., et al. (2004). "Introduction to CMOS Image Sensors." Poslední náhled: 2013/02/17, 2013.

Withers, R. (2000). "Digital Workflow - Implementing Cost-Effective Print-Based Automation."

Withers, R. a F. J. Romano (2000). Digital Workflow: Implementing Cost-Effective Print-Based Automation, Windsor Professional Information.

Yadid-Pecht, O. a R. Etienne-Cummings (2004). CMOS Imagers: Z Phototransduction to Image Processing, Springer.

3D SKENER A JEHO APLIKACE

3D skener je zařízení, které analyzuje tvar a povrch objektů či prostředí reálného světa a tyto informace převádí do digitální podoby, ze které je možné z těchto dat vytvořit digitální trojrozměrný model. Sběr dat přitom probíhá pomocí akvizice x , y , z koordinát povrchu skenovaného předmětu či prostředí.

3D skenery sdílejí řadu prvků s fotoaparáty. Stejně jako ony mají kónické zorné pole a mohou získat informace jen o objektu, který není zakrytý. Zatímco fotoaparát získává barevné informace o povrchu objektu, 3D skener vypočítává informace o vzdálenosti jeho jednotlivých bodů (Yu et al. 2010).

Existuje celá řada odlišných technologií, které se liší svými limity, cenou a každá z nich tím pádem přináší určité výhody a nevýhody. Mimo 3D skenování lze trojrozměrné modely získat i dalšími dvěma způsoby - buďto pomocí 3D modelingu, anebo pomocí metod IBM (Image-Based Modeling Techniques; Snavely et al. 2007).

Aplikace 3D skenerů mimo archeologii

Z počátku se technologií 3D skenování využívalo hlavně v těžké **průmyslové výrobě** (hlavně automobilové, zbrojní a letecké), v dnešní době se s 3D skenováním lze setkat prakticky v celém jejím spektru. Tradičně jsou využívány k designu výrobků, ke kontrole jejich kvality, ke sledování chování objektu či materiálu při jeho vystavení vnějším činitelům atd. S tímto je úzce spojeno tzv. **reverzní inženýrství**, což je odvětví, jehož cílem je zjistit princip fungování zkoumaného předmětu. Reverzního inženýrství se využívá jak v samotné výrobě, tak například v **architektuře**, a to ať už pro navrhování a rekonstrukci stávajících staveb, tak pro designování různých interiérových doplňků. V **bezpečnostním průmyslu** se poté začínají 3D skenery využívat namísto tradičních průmyslových kamer pro sledování statického či dynamického prostředí, například při bezpečnostních kontrolách osob na letištích (Jones 2011).

Do obecnějšího podvědomí veřejnosti se 3D skenování dostalo hlavně s rozvojem **filmové produkce a zábavního průmyslu**. Jen málo komerčně úspěšných filmů se dnes obejde bez 3D skenování kombinovaného s dalšími počítačově generovanými objekty a prostředími. Laserového skenování bylo ve filmu vůbec poprvé využito ve snímku *Star Trek IV: The Voyage Home* z roku 1986 pro scénu, při níž bylo potřeba zobrazit hlavy dvou hrdinů cestujících časem. Místo v té době složitého konvenčního 3D modelování hlav protagonistů zvolili tvůrci možnost Cyberware 3D skeneru, který doplnili texturou. Své aplikace se 3D skener dočkal i v hudbě, například při natáčení klipu *House of Cards* pro *Radiohead* byl využita technologie snímání tváře v reálném čase. Skenerů se v poslední době využívá i v interaktivním **home shoppingu**, anebo pro tvorbu tzv. avatarů, u nichž mohou být naskenované tváře doplněny mimikou synchronizovanou s mluveným slovem. Nelze nezmínit, že k rozvoji skenování přispěl velkou mírou i počítačový herní průmysl (Cocon et al. 2012, Company 2013, Curless 1997, Hao et al. 2008, Informatics 2008, Kaufman 2006, Luginbühl et al. 2011, Schlaug 2011, Zollhöfer et al. 2011).

Vliv zábavního průmyslu na rozvoj skenovacích metod, ačkoliv se to tak na první pohled nemusí zdát, nelze banalizovat. Jednu z vývojových větví renderizační techniky počítačové tomografie vyvíjelo například filmové studio Pixar (*Toy Story*, *Hledá se Nemo*, ...), které přímo navázalo na práci počítačových vědců z LucasFilms. Vědci, kteří v Pixaru pracovali, byli původně najati filmovým

režisérem Georgem Lucasem „to expand the world of computer graphics and thereby create more realistic computer-generated images for movies such as Star Wars“ (Calhoun et al. 1999).

Velice tradičním oborem, ve kterém se využívá 3D skenerů je **lékařství**. Zde se navazuje na dlouhou tradici dvojdimenzionální počítačové tomografie, pomocí níž se od sedmdesátých let začaly diagnostikovat choroby. Plastické trojdimenzionální znázornění orgánů a kostí se masověji rozšířilo v 90. letech s rozvojem 3D tomografie dostupnější díky rozšíření výkonnějších počítačů.

Konvenčních 3D technologií schopných zachytit vnější strukturu lidského těla se v lékařství využívá zejména v antropometrii, například ke sledování tělní asymetrie, zarovnání skeletu, indexu BMI atd. **Antropometrie** se mimo lékařství využívá také v antropologii, forenzních vědách či v oděvním a návrhářském inženýrství. 3D skener se dále aplikuje pro diagnózu (dermatologie, růstové defekty, velikost plic, efekt užívání drog) i pro léčbu nemocí a poruch (skolióza, popáleniny atd.). Velice rychle se rozvíjejícím odvětvím v medicíně je část rehabilitačního inženýrství, jež se zaměřuje na tvorbu funkčních končetinových a dentálních protéz a ortéz. Pro tyto potřeby jsou vyvíjeny a testovány jak 3D skenery, tak 3D tiskárny. Pomocí skenerů lze také studovat statickou a dynamickou obličejovou mimiku například pro potřeby psychologie. Nasnadě je nutné rovněž zmínit využití skenerů pro účely kosmetiky, sportu a plastické chirurgie (Commean et al. 1996, Lerch et al. 2007, Lorient 2009, Sandbach et al. 2012, Shah et al. 2004, Tong 2011, Telfer a Woodburn 2010, Treleaven a Wells 2007, Vukašinović et al. 2007).

3D scany lidských těl či jejich částí se se využívají také ve **fyzické antropologii a forenzních vědách**, ať už pro studium fylogeneze, tak pro determinování věku, pohlaví či etnicity moderních lidí. Aplikace skenerů se neomezuje jen na tyto aspekty, škála jejich využití v těchto oborech je velice široká. Pomocí 3D scanů je například možné analyzovat stopy po kousnutí zvířetem či člověkem. Ve forenzních vědách se skener používá jak k identifikaci neznámého jedince (pachatel, oběť) podle tváře, tak k vlastní rekonstrukci místa činu (Blanz a Vetter 2003, Haag a Haag 2011, Houck al. 2012, Lasser et al. 2009, Sakuma et al. 2010, Sholts, S. et al. 2010).

Samotnou kapitolou je poté možnost rekonstrukce žijících či mrtvých zvířecích a lidských jedinců na základě 3D skenerů, což se zčásti dotýká i problematiky archeologie. Možnosti rekonstrukce obličejů na základě antropologického materiálu už bylo několikrát demonstrováno, převážně na případech mumii. V tomto ohledu je nutno podotknout, že první rentgenový snímek mumie byl pořízen jen rok po objevu rentgenového záření v muzeu ve Vídni. Pomocí radiografu bylo ukázáno, že obal mumie neskrýval lidské tělo, nýbrž korpus zvířecí, a to ptáka ibise (Previgliano et al. 2003).

Paleoradiologie bylo využito pro virtuální rekonstrukci Sulmanovy mumie (známé taky pod jménem Cleo), nazývané podle G. W. Sulmana, který ji odkoupil v Káhiře a odvezl z Egypta v roce 1913. Mumie datovaná do ptolemaiovského období (cca 200 př. Kr.) byla „vyšetřena“ pomocí 2D CT s cílem zodpovědět tradiční spektrum otázek, kterými se podobné studie zabývají (tzn. určení pohlaví, věku a sociálního statutu zemřelého, identifikace somatických anomálií, případně doprovodných artefaktů). Díky aplikaci tomografu mohla být mumie nově interpretována jako žena (při koupi byla mumie označena za princeznu, v 80. letech označena za muže) střední třídy (teorie princezny zavrhnuta kvůli malé výšce a nedostatečné výživě v dětství). Pomocí 3D tiskárny byla vytištěna lebka zemřelé, která byla domodelována o svaly a tkáň a připravena k muzejní prohlídce (Gardner et al. 2004, Shreve 2004).

V roce 2001 bylo také skenováno 13 egyptských mumii datovaných od 3. dynastie až po římské období. Jen pro představu lze uvést, že výpočty probíhaly na počítači s frekvencí 0.7-1.7 GHz a pamětí 1-2 GB. Pomocí 3D byl sledován stav zubů, pomocí virtuální průletové endoskopie bylo sledováno několik dutinových struktur. 3D rekonstrukce realizované pomocí volumetrické rekonstrukce také podaly informace o tom, jak mumifikovaní lidé vypadali, a napomohly také na tělech identifikovat místa po

řezných ranách. Tyto rány daly možnost rekonstruovat, jakým způsobem a kudy balzamovači vyjímali vnitřnosti, které poté substituovali různými duhy vycpávek. I tým pracující na těchto mumiích se odhodlal k tvorbě dvou 3D replik hlavy 45 letého jedince, které byly vytvořeny technikou sintrování. Jednalo se o model lebky a model tváře se zbytky jemných tkání. Plastové lebce pak byla za pomoci antropologů a forenzního umělce využívajícího tzv. manchesterského protokolu domodelována svalová masa s pokožkou (Cesarani et al. 2004).

Pomocí Multi-Jet Modellingu využívajícího 96 individuálních trysek byla 3D také rekonstruována lebka šestnáctileté egyptské dívky Sensaos žijící na začátku druhého století našeho letopočtu. Tisk proběhnul v roce 1998 a zabral 36 hodin, lebka byla poté domodelována o obličejové svaly a pokožku, doplněná rovněž o vlasy a make-up. Podobným způsobem, akorát technikou stereolitografie, byla také vytvořena tvář mumie z Fajúmu odpovídající portrétu na její rakvi. Egyptské mumie se vůbec těší oblibě badatelů zajímajících se o rekonstrukce. Z některých projektů lze zmínit počítačovou 3D CT rekonstrukci mumifikované hlavy z muzea z Florencie (inv. č. 8643), na kterou byla na jedné straně jako textura použita fotografie moderního Berbera, na straně druhé byla lebka domodelována pomocí tzv. warpingu již zmíněnou manchesterskou technikou. V kontextu české antropologie byla pomocí počítačové tomografie rekonstruována a na 3D tiskárně vytištěna například lebka mumie Hereret (Attardi et al. 2000, Lukášová a Urbanová 2012a, 2012b, MacLeod et al. 2000, Oudheden 2000)

V posledních dvou desetiletích lze sledovat rovněž rozvoj nových technologií souvisejících ve velké míře i s jejich zpřístupněním širšímu spektru spotřebitelů, například formou 3D kina, 3D monitorů a televizorů. **Socializace technologií**, například využitím 3D trigonometrie v projektu Google Earth či modelování ve freeware programech (např. SketchUp a Blender) dala možnost lidem i bez hlubších teoretických a praktických znalostí okusit práci s 3D objekty v prostoru. Možnost zpracování 3D modelů se tak pomalu dostává do podvědomí lidí. Rovněž je znatelný zájem o zpracování reálného světa pomocí virtuální reality, možnost si objekt pořádně prohlédnout a pokud možno si ho i osahat. Právě tento aspekt motivuje muzea k nákupu a využívání 3D skenerů a zapojení virtuální reality do prezentace kulturního dědictví širší veřejnosti.

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

Attardi, G., et al. (2000). "3D facial reconstruction and visualization of ancient Egyptian mummies using spiral CT data: soft tissue reconstruction and textures application." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://medialab.di.unipi.it/Project/Mummia/SIGGRAPH99/>.

Company, A. M. C. (2013). "Greatest Visual and Special Effects (F/X) - Milestones in Film ". Poslední náhled: 2013/09/16, <http://www.filmsite.org/visualeffects13.html>.

Informatics, G. (2008). "Avatar Technology." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://www.geometricinformatics.com/avatar.php>.

Jones, T. (2011). "Scan to BIM: The evolution of scanning technology." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://3dlasersurveys.com/wp/2012/scan-to-bim-the-evolution-of-scanning-technology>.

Tong, T. (2011). "Medical Applications in 3D Scanning." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://blog.3d3solutions.com/bid/78455/Medical-Applications-in-3D-Scanning>.

Literatura:

Blanz, V. and T. Vetter (2003). "Face Recognition Based on Fitting a 3D Morphable Model." IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence **25**(9): 1063-1074.

Calhoun, P. S., et al. (1999). "Three-dimensional Volume Rendering of Spiral CT Data: Theory and Method. " Radiographics **19**(3): 745-764.

Cesarani, F., et al. (2003). "Whole-body three-dimensional multidetector CT of 13 Egyptian human mummies." American Journal of Roentgenology **180**(3): 597-606.

Cesarani, F., et al. (2004). "Facial Reconstruction of a Wrapped Egyptian Mummy Using MDCT." American Journal of Roentgenology **183**(3): 755-758.

Cocon, M., et al. (2012). xTrack: A Flexible Real-Time 3D Scanner for Home Computing Applications. Computer Communications and Networks (ICCCN), 2012 21st International Conference on.

Commean, P. K., et al. (1996). "Design of a 3-D surface scanner for lower limb prosthetics: A technical note." Journal of rehabilitation research and development **33**(3): 267-278.

Curless, B. (1997). New methods for surface reconstruction from range images. Departement of Electrical Engineering. Stanford, Stanford University. **Thesis**.

Gardner, J. C., et al. (2004). "Paleoradiology in mummy studies: the Sulman Mummy Project." Canadian Association of Radiologists Journal **55**(4): 228-234.

Haag, M. G. and L. C. Haag (2011). Shooting Incident Reconstruction, Elsevier Science.

Hao, T., et al. (2008). EAVA: A 3D Emotive Audio-Visual Avatar. Applications of Computer Vision, 2008. WACV 2008. IEEE Workshop on.

Houck, M. M., et al. (2012). The Science of Crime Scenes, Elsevier Science.

Kaufman, D. (2006). "Point Person." Computer graphics world **29**(2): 20-22.

Lasser, A. L., et al. (2009). "Three-Dimensional Comparative Analysis of Bitemarks." Journal of Forensic Sciences **54**(3): 658-661.

Lerch, T., et al. (2007). "3D laser scanning: a model of multidisciplinary research." Journal of textile and apparel, technology and management **5**(4): 1-22.

Loriot, B. (2009). Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

Lukášová, H. a P. Urbanová (2012). Digitální rekonstrukce podoby egyptské mumie Hereret. Večer s mumii.

Lukášová, H. a P. Urbanová (2012). Rekonstrukce podoby moravskotřebovské mumie. Antropologická analýza a vědecká rekonstrukce podoby obličeje. Ve stínu pyramid. Příběhy moravskotřebovské mumie. J. Martínková and P. Onderka. Praha, Národní muzeum: 53-58.

Luginbühl, T., et al. (2011). "Towards the automatic generation of 3D photo-realistic avatars using 3D scanned data." Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): 192-203.

MacLeod, R. I., et al. (2000). "Mummy 1911-210-1." Journal of the Royal Collge of Surgeons of Edinburgh **45**(2): 85-92.

Oudheden, R. v. (2000). Sensaas: encounter the girl in the mummy. Proceedings symposium Imaging - Making the invisible visible. Eindhoven University, Eindhoven University of Technology: 91-97.

Previgliano, C. H., et al. (2003). "Radiologic Evaluation of the Llullaillaco Mummies." American Journal of Roentgenology **181**(6): 1473-1479.

Sakuma, A., et al. (2010). "Application of Postmortem 3D-CT Facial Reconstruction for Personal Identification." Journal of Forensic Sciences **55**(6): 1624-1629.

Sandbach, G., et al. (2012). "Static and dynamic 3D facial expression recognition: A comprehensive survey." Image and Vision Computing **30**: 683-697.

Schlaug, F. (2011). "3D Modeling in Augmented Reality." White paper.

Shah, S., et al. (2004). "The use of a 3D laser scanner using superimpositional software to assess the accuracy of impression techniques." Journal of Dentistry **32**: 653-658.

Sholts, S. B., et al. (2010). "Variation in the Measurement of Cranial Volume and Surface Area Using 3D Laser Scanning Technology." Journal of Forensic Sciences **55**(4): 871-876.

Shreve, E. (2004). Museum award adds to status: Local staff to be recognized for mummy research. Chatham Daily News.

Snaveley, N., et al. (2007). "Modeling the World from Internet Photo Collections." International Journal of Computer Vision **80**(2): 189-210.

Telfer, S. a J. Woodburn (2010). "The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot." Journal of Foot and Ankle Research **20**: 3-19.

Treleaven, P. a J. Wells (2007). "3D Body Scanning and Healthcare Applications." Computer practices **40**(7): 28-34.

Vukašinović, N., et al. (2007). "Case study – surface reconstruction from point clouds for prosthesis production." Journal of Engineering Design **18**(5): 475-488.

Yu, F., et al. (2010). Three-Dimensional Model Analysis and Processing, Springer.

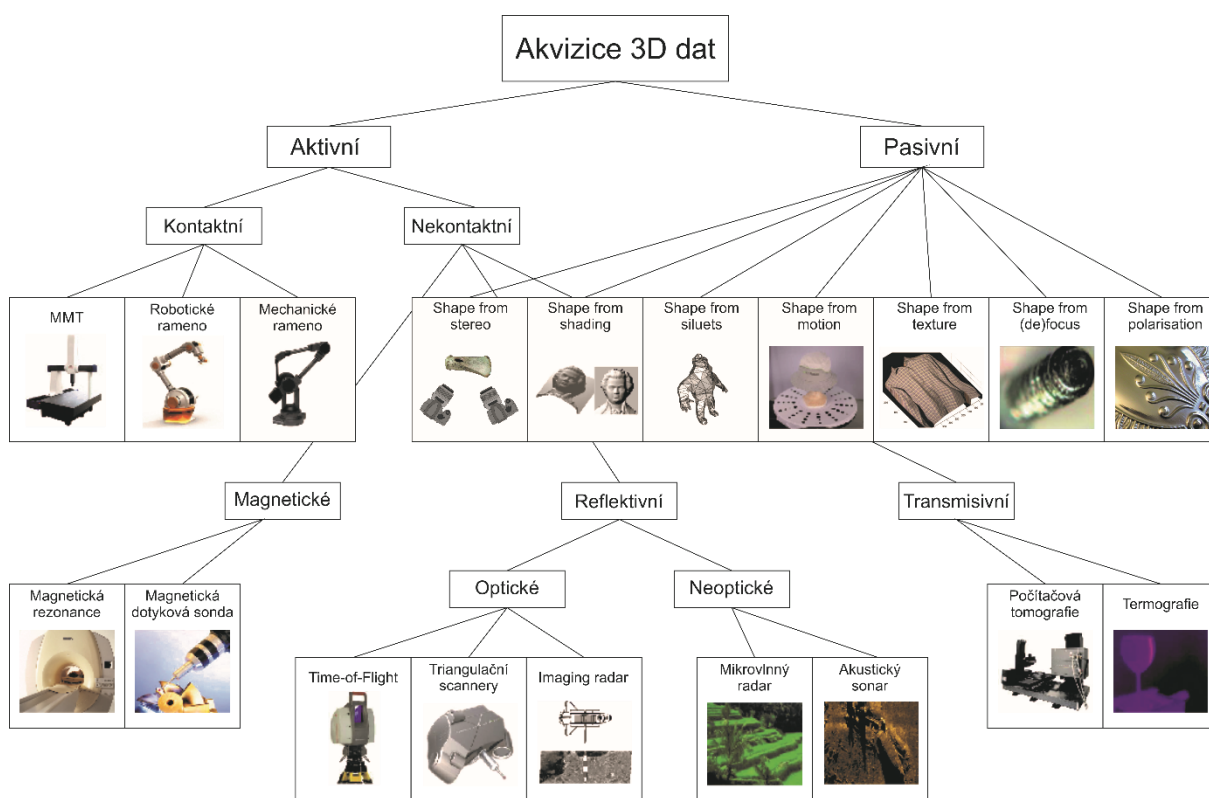
Zollhöfer, M., et al. (2011). "Automatic reconstruction of personalized avatars from 3D face scans." Computer Animation and Virtual Worlds **22**(2-3): 195-202.

METODY AKVIZICE PROSTOROVÝCH DAT

Základní dělení

Společnosti zabývající se výrobou 3D skenerů spadají do velice dynamického odvětví, které každým rokem produkuje velké množství nových zařízení. Tento fakt jde ruku v ruce jak s rozvojem a vývojem nových technologií, tak s inovací těch stávajících. Pro to, aby bylo možné orientovat se v tomto obrovském množství informací, nelze se, stejně jako v archeologii, obejít bez jistého druhu systematizace.

Postupem času se objevila řada prací, která se snaží o rozřídění 3D skenerů podle techniky použité pro zaznamenání koordinát. Již v roce 1988, v době kdy skenery nebyly zdaleka rozšířeny tak jak dnes, podal P. J. Besl (1988) soupis šesti hlavních principů akvizice prostorových dat založených na obrazových senzorech. Ve stručném, ale poměrně přínosném, článku uvedl jejich jednotlivé varianty, porovnal jejich klady a zápory a uvedl jejich cenovou dostupnost (tab. 1).



Obr. 1. Obecné dělení metod pro akvizici 3D dat. Zdroj: autor, upraveno podle Curless 1997, Fig. 1.1; 2000, 2; Lorient, Fig. 2.1, 2.2; Váradý et al. 1997, Fig. 2; Vukašinović et al. 2007, Fig. 2.

Category	Method	ACC/DOF	Notes
Radar	Time of Flight, Pulse Detection Amplitude Modulation Frequency Modulation, Heterodyne Detection	0.1 mm 100 m	Detect Time, Phase, or Frequency Differences Signal Depends on Range, Surface Normal, Reflectance Beam Scanning Usually Required, No Computation History: Since 1903, Well known since 40's, lasers since 70's Cost: Inexpensive to Extremely Expensive
Active Triangulation	Structured Light (SL): Point SL: Line SL: Miscellaneous SL: Coded Binary Patterns SL: Color Coded Stripes SL: Random Texture	1 μ m 100 m	1 or More Cameras, 1 or more Projectors Scanned Point, Scanned Stripe, Multi-Stripe, Grid Binary Pattern, Color, Texture, Intensity Ratio Terms: Synchronous Scan, Scheimpflug Condition History: Since 200 B.C., Most Popular Method Cost: Inexpensive to Very Expensive
Moire Techniques	Projection Moire Shadow Moire Single frame moire with reference Multiple-frame phase-shifted moire	1 μ m 10 m	Projector, Grating(s), Camera, Computer Fringe Tracking: Projection, Shadow Reference: Single Frame, Multi-Frame (Phase-Shifted) Surface Slope Constraint, Non-coherent Light Computation Required, No Scanning History: Since 1859, Used Since 1950's in Mech.Eng. Cost: Inexpensive (excluding Computer)
Holographic Interferometry	Conventional Holography Heterodyne Holography Quasi-Heterodyne (Phase-Shifted) Methods Microscopic Interferometry	0.1 nm 100 μ m	Detector, Laser, Optics, Electronics, Computer Conventional: Real-Time, 2-Exposure, Time-Avg. Quasi-Heterodyne (Phase-Shifted), Heterodyne Surface Slope Constraint, Coherent Light Computation/Electronics Required, No Scanning History: Not Practical until Laser 1961, Big in NDT Cost: Inexpensive to Expensive
Focusing		1 mm 10 m	Measure Local Contrast, Blur, Displacement Limited Depth-of-Field to Accuracy Ratio History: Since 1800's, Gauss thin lens law Computation/Electronics Required, No Scanning Potential for Inexpensive Systems
Fresnel Diffraction (Talbot Effect)		0.1 mm 10 m	Laser, Grating, Camera / Not Explored by Many Video Rates, Limited Accuracy, Uses Local Contrast Electronics Required, No Scanning History: Discovered 1836, Used 1983 Potential for Inexpensive Systems

Tab. 1. Hlavní principy akvizice koordinát z obrazu podle Besla (1988). ACC-přesnost, DOF-maximální hloubka pole. Zdroj: upraveno a doplněno podle Besl 1988.

Prostorová informace o objektu ovšem nemusí být zprostředkována výlučně optickými senzory. 3D skenery mohou být založeny i na metodách využívajících jiných způsobů sběru dat - například pomocí magnetiky, akustiky či infračerveného záření. V dnešní době již proto lze aplikovat o něco širší členění 3D skenerů (obr. 1). Ani tato klasifikace ovšem nemůže být chápána jako definitivní. Spíše než o vyčerpávající soupis již existujících metod se jedná o ilustrativní přehled těch nejvyužívanějších.

V první řadě lze přístupy aplikované pro akvizici 3D koordinát rozdělit do dvou hlavních kategorií, a to na **aktivní** a **pasivní**. Skenery využívající **pasivní metody** nejsou v žádném kontaktu s objektem, resp. na něho nepůsobí, zatímco **aktivní** se ho buďto dotýkají, anebo na něj vysílají určitý druh energie (Curless 1997).

Aktivní metody

Kontaktní skenery, jak už název napovídá, vyžadují přímý kontakt takzvané „sondy“ s povrchem objektu. **Nekontaktní skenery**, oproti tomu, informace o jeho koordinátách obdrží tak, že na objekt

vysílají určitý druh energie, jejichž hodnoty posléze zaznamenávají. Podle povahy a vlastností této energie se pak nekontaktní skenery dále dělí na **magnetické**, **reflektivní** a **transmisivní**.

Magnetické skenery pracující s magnetickými senzory měří intenzitu magnetického pole objektu.

Transmisivní skenery na objekt vysílají určitý druh paprsků (např. rentgenové záření), které objektem proletí a posléze je zaznamenána jejich intenzita. Senzor zaznamenávající intenzitu záření je přitom často umístěn za předmětem.

Reflektivní skenery jsou poté založeny na zaznamenání energie, která se od objektu odrazí „nazpět“ na senzor skeneru.

Reflektivní skenery se mohou ještě dělit v závislosti na tom, zda na objekt vrhají energii v podobě světla, anebo jiného druhu záření (mikrovlny, zvukové pulzy). Jestliže se jedná o světlo, je řeč o **optických skenerech**, jestliže o jiný druh energie, mluví se o **neoptických 3D skenerech**.

Pasivní metody

Pasivní metody akvizice nevysílají na skenovaný předmět žádný druh záření, ani se jej nedotýkají. Tyto metody se často označují jako „Shape from X“ a informace o povrchu objektů a scén jsou získávány z obrazové informace (fotografie, film), popřípadě z geometrických vlastností aparatury.

Detailnějšímu popisu jednotlivých druhů skenerů budou věnovány následující kapitoly.

LITERATURA A ZDROJE

Literatura:

- Besl, P. J. (1988). "Active, optical range imaging sensors." Machine Vision and Applications 1: 127-152.
- Curless, B. (1997). New methods for surface reconstruction from range images. Departement of Electrical Engineering. Stanford, Stanford University. Thesis.
- Curless, B. (2000). "Overview of active vision techniques." Není journal - prezentace - SIGGRAPH Course on 3D Photography.
- Loriot, B. (2009). Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Dijon, Université de Bourgogne. Thesis.
- Várady, T., et al. (1997). "Reverse engineering of geometric models—an introduction." Computer-Aided Design 29(4): 255-268.
- Vukašinović, N., et al. (2007). "Case study – surface reconstruction from point clouds for prosthesis production." Journal of Engineering Design 18(5): 475-488.

AKTIVNÍ KONTAKTNÍ SCANNERY

Nutnost použití 3D scannerů vyvstala nejprve s potřebou přesného měření vzdáleností, hlavně pro technická odvětví, a až v druhé řadě s přáním co nejrealističtějšího zachycení tvaru objektu. Díky metrologii se tak objevila zařízení, která bychom dnes mohli označit spíše za digitizéry.

Kontaktní skenery, jinak také nazývané **Coordinate-measurement machines (CMM)**, se začínají ve větší míře používat od osmdesátých let.

Tyto skenery fungují tak, že se na zkoumaný předmět přiloží takzvaná sonda (*probe*) spolu se stilem (obr. 1:vlevo), která objekty prozkoumává fyzickým dotekem. Existují jak manuálně ovládané, tak automatizované varianty těchto scannerů, jež jsou schopny extrahovat informace buďto o několika bodech definovaných na objektu, či o celém jeho povrchu. Sondy mohou být jak jedno, tak více-osové (Bewoor a Kulkarni 2009, Reinshaw 2011).

Existuje velké množství CMM přístrojů. U nejtypičtějšího **CMM zařízení** (tzv. moving bridge; obr. 2:A) je objekt fixován na rovné desce, nad níž se klene posuvný most pohybující se v horizontální ose podél délky desky (obr. 2:B). Na horním břevnu mostu se nachází vozík (*carriage*), který je schopen klouzat ve směru jeho šířky (obr. 2:C). Na hlavici se pak nalézá výsuvný systém (*spindle*) pohybující se nahoru a dolů (obr. 2:D), na jehož spodní straně je připevněna kontaktní sonda (obr. 1:vlevo). Ta může na objektu postupně zaznamenat koordináty několika předem definovaných bodů, anebo může po předmětu klouzat podobným způsobem, jako například jehla u *Bainova přístroje* či *Casseliho pantelegrafu*. Koordináty jednotlivých bodů jsou pak určeny vzhledem k internímu koordinátnímu systému přístroje pomocí posunu jednotlivých komponent. Osa x je přitom definována polohou mostu (obr. 2:A), osa y polohou hlavičky (obr. 2: B) a osa z je poté dána polohou výsuvné komponenty (obr. 2:D; De Silva 2002).

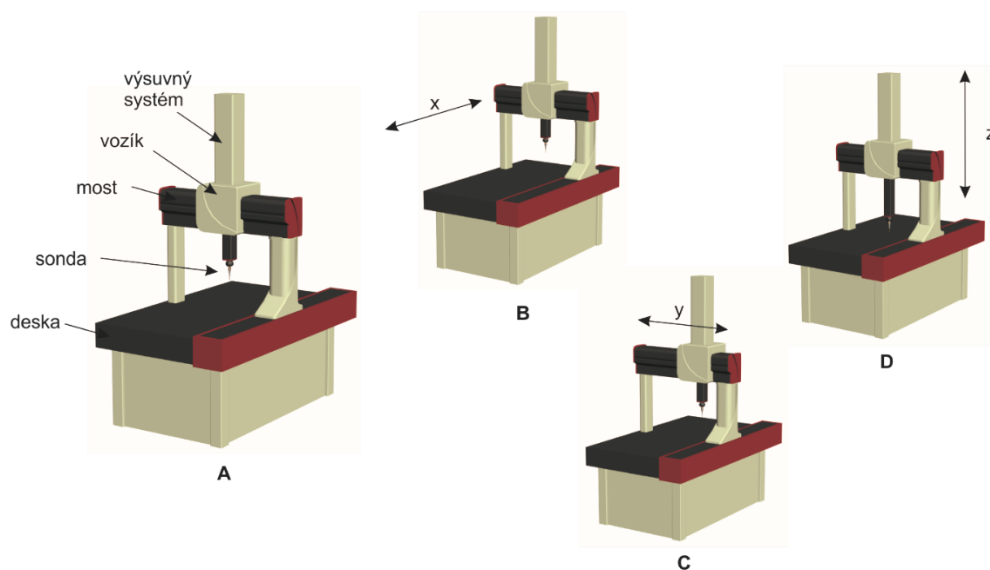
Kromě tohoto druhu CMM (*moving bridge*) existují i další varianty přístroje, které se liší charakterem a konfigurací mostu a/nebo substitucí jeho funkce pomocí ramena či pohyblivosti desky (obr. 3). CMM přístroje lze rozlišovat podle toho, jakým způsobem jsou ovládány na manuální, počítačově-asistované a ovládané přímo počítačem (Berger 2006).

Ačkoliv jsou za jistých podmínek schopny vytvořit poměrně přesný model objektu, jeví se jako jejich hlavní nevýhody především: 1) poměrně vysoká pořizovací cena; 2) nízká rychlost; 3) vyšší nároky na prostor; 4) většinou nutná přítomnost operátora; 5) ztížená manipulovatelnost; a 6) nutnost kontaktu skeneru s povrchem objektu (vlivem tlaku skeneru může dojít k poškození objektů).

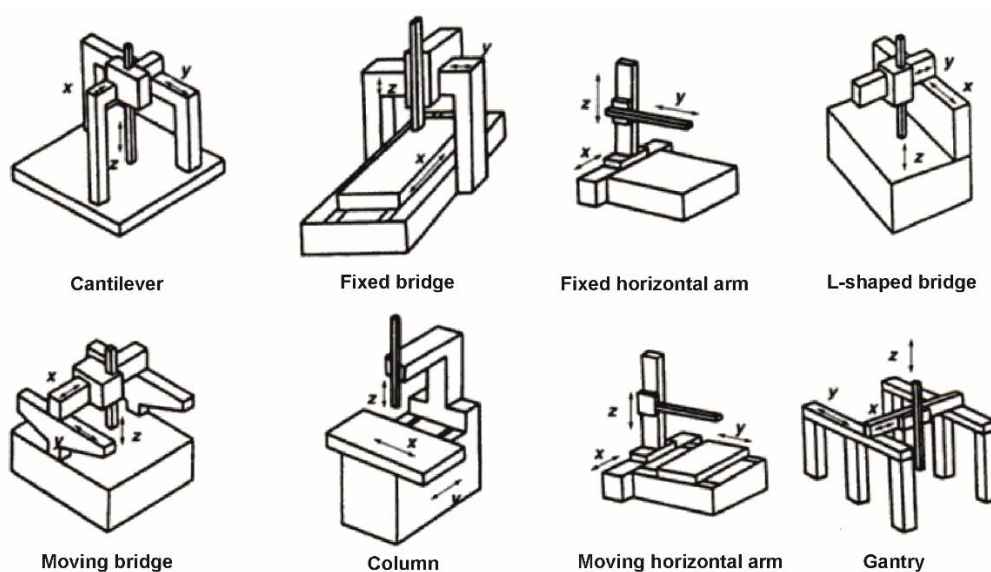
Kontaktní skenery mohou mít naopak výhodu tehdy, kdy se skenování neprovádí pro účely tvorby trojrozměrných modelů, ale například jen pro zaznamenání několika málo přesných bodů na objektu. V tomto případě mohou být výstupy o mnoho přesnější než u řady jiných skenovacích zařízení. Obrovská výhoda je také to, že je s jejich pomocí možné skenovat objekty z reflexivních či průsvitných materiálů - v archeologii například skleněné předměty, či kamennou štípanou industrii (Curless 1997, Hoffmann 1998, Lorient 2009).



Obr. 1. CMM sonda (vlevo), pětiosá sonda Reinshaw PH20 (2. zleva), Teasar-m (3. zleva), Teasar-sm (vpravo). Zdroj: autor, inspirováno podle Bewoor a Kulkarni 2009, Fig. 14.14 (vlevo); Reinshaw 2011 (2. zleva); Teasar 2011 (3. zleva a vpravo).



Obr. 2. CMM Moving Bridge. Zdroj: autor.



Obr. 3. Ukázka různých typů CMM. Zdroj: Berger 2006, Fig. 24.5.



Obr. 4. Ukázka CMM zařízení. Nikon LK V 15.12.10 (vlevo), Nikon LK H-T (uprostřed), Nikon LK V 50.40.12 R (vpravo). Zdroj: Nikon 2010.

Ramenný digitizér

Jinou variantou CCM přístrojů je **artikulovatelné rameno** s vysoce přesnými úhlovými senzory, na jehož konci se stejně jako u zmíněného typu nachází tzv. stylus. Jeho přesná poloha v každém okamžiku je určena vzájemnými úhly ramen scanneru. Počet úhlů, jimiž je rameno schopno rotovat, je definováno tzv. stupni volnosti (obr. 6). Obvykle mají ramenné digitizéry těchto stupňů 4 až 7. Jakmile přijde stylus do kontaktu s povrchem objektu, dochází buďto automaticky, anebo signálem daným operátorem k zaznamenání jeho lokace (Corporation 2013, Curless 1997, Faro 2011).

Limity skenování pomocí ramenných scannerů jsou hlavně: 1) časová náročnost; 2) nutnost plně manuálního ovládání (netýká se robotických ramen), které je při dlouhodobém skenování fyzicky náročné; 3) limitovaný rozsah skenovacího prostoru určený délkou ramen skenovacího zařízení (skenovaný objekt tak musí být umístěn v těsné blízkosti zařízení, avšak ne moc blízko, aby se skenovací rameno mohlo ohnout; tento nedostatek lze samozřejmě obejít sloučením několika skenů při pozdějším postprocessingu); a 4) nutnost dobré fixace objektu (při jeho špatném upevnění může tlakem stylu dojít k posunu objektu).

Hlavní výhodou těchto scannerů je jejich nízká pořizovací cena a například oproti bridgovým CMM schopnost efektivnějšího skenování trhlín a vnitřních prostorů.



Obr. 5. Ramenný digitizér Mescroscribe G2X. Zdroj: Yenasoft 2013.



Obr. 6. 3D ramenný digitizér s vyznačenými stupni volnostmi. Zdroj: autor.



Obr. 7. Ukázka ramenných digitizérů. Faro Prime (vlevo), FaroArm Fusion (uprostřed) a Romer Absolute Arm (vpravo). Zdroj: Faro 2013 (vlevo a uprostřed), Hexagon 2011 (vpravo).

Produkt		Přesnost (Accuracy)	Pracovní prostor (Workspace)	Zdroj
Immersion MicroScribe	MX	< 0.0508 mm	1.27 m	(Immersion 2006)
	MXL	< 0.0762 mm	1.67 m	
	G2	< 0.38 mm	1.27 m	(Grotta a Grotta 1997, Immersion 2004)
	G2x	< 0.23 mm	1.27 m	
	G2L	< 0.43 mm	1.67 m	
	G2LX	< 0.30 mm	1.67 m	
Hexagon FARO	Edge	0.024 – 0.064 mm	1.8 – 3.7 m	(Faro 2013)
	Prime	0.016 – 0.060 mm	1.2 – 3.7 m	
	FaroArm Fusion	0.036 – 0.104 mm	1.8 – 3.7 m	
ROMER Absolute Arm*	7315	0.037 mm	1.5 m	(Hexagon 2011)
	7320	0.042 mm	2.0 m	
	7325	0.051 mm	2.5 m	
	7330	0.095 mm	3.0 m	
	7335	0.130 mm	3.5 m	
	7340	0.149 mm	4.0 m	
	7345	0.170 mm	4.5 m	
	7520	0.023 mm	2.0 m	
	7525	0.029 mm	2.5 m	
	7530	0.049 mm	3.0 m	
	7535	0.061 mm	3.5 m	
	7540	0.075 mm	4.0 m	
Braces3D*	M100	0.060 mm	2.6 m	(Braces 2013)
	M200	0.100 mm	2.6 m	
	G100	0.090 mm	3.2 m	
	G200	0.150	3.2 m	
	XG 200	0.350	4.2 m	

Tab. 1. Srovnání některých ramenných digitizérů. * - u přesnosti dáno volumetric uncertainty. Zdroj: autor.

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

Braces (2013). "Baces3D® Digitizing arms." Last viewed: 2013/02/21, <http://www.b3-d.com/baces.html>.

Faro (2013). "Faro Arm." Last viewed: 2013/02/21, <http://europe.faro.com/products/metrology/faroarm/overview>.

Hexagon (2011). "Romer Absolute Arm." Last viewed: 2013/02/21, <http://www.b3-d.com/files/52977294.pdf>.

Hoffmann, V. (1998). "Brief History of 3D Scanning." Last viewed: 2013/01/15, http://vr.isdale.com/3DScanners/3d_scan_history/history.htm.

Immersion (2004). "MicroScribe G2." Last viewed: 2013/02/19, http://www.3d-microscribe.com/MSG2_0704_V1.pdf.

Immersion (2006). "MicroScribe MX." Last viewed: 2013/02/19, <http://www.3d-microscribe.com/MX%20PDF%20Sheet.pdf>.

Nikon (2010). "LK CMM Coordinate Measuring Machines." Last viewed: 2013/02/18, http://www.nikonmetrology.com/en_EU/content/download/11063/228870/version/8/file/LK+CMM_EN.pdf.

Renishaw (2011). "High performant 5-axis measurement." from <http://www.renishaw.com/en/cmm-probes-software-and-retrofits-6329>.

Tesastar (2011). "Probe Heads for CMMs." Last viewed: 2013/02/18, http://www.tesastar.com/probe-heads-for-cmms_545.htm.

Yenasoft (2013). "Microscribe. Microscribe G2 serisi." Last viewed: 2013/02/19, <http://www.yenasoft.com/donanim/microscribe>.

Literatura:

Berger, R. W. (2006). The Certified Quality Engineer Handbook, Asq Press.

Bewoor, A. K. and V. A. Kulkarni (2009). Metrology & Measurement, McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited.

Corporation, I. (2013). MicroScribe 3D - Desktop Digitizing Systems - User's Guide & Set-Up Instructions. San Jose.

Curless, B. (1997). New methods for surface reconstruction from range images. Departement of Electrical Engineering. Stanford, Stanford University. **Thesis**.

De Silva, G. M. S. (2002). Basic Metrology for ISO 9000 Certification, Taylor & Francis.

Faro (2011). "An Introduction to Portable CMMs." White paper.

Grotta, D. and S. W. Grotta (1997). "The Scanner with Depth." PC Magazine January: 66.

Loriot, B. (2009). Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

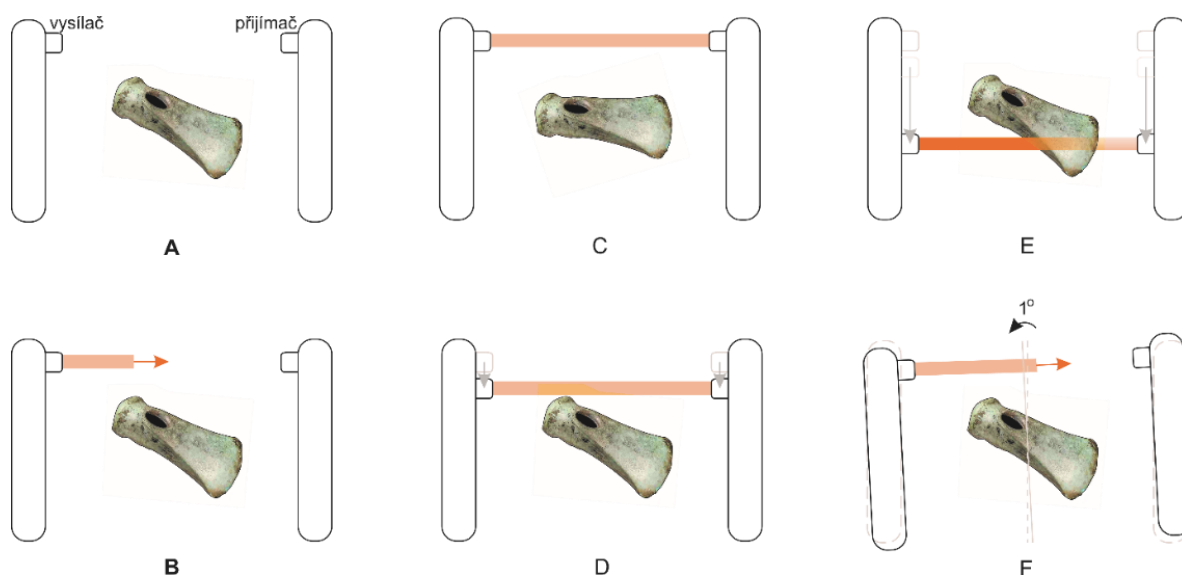
AKTIVNÍ NEKONTAKTNÍ TRANSMISIVNÍ A MAGNETICKÉ SKENERY

O něco rychlejší než kontaktní skenery jsou nekontaktní aktivní skenery. Nekontaktní se tyto přístroje nazývají proto, neboť na skenovaný předmět vysílají určitý druh záření, přičemž se v převážné většině případů jedná o světlo, rentgen či ultrazvuk. V této kapitole budou předvedeny magnetické a transmisivní metody, reflektivní skenery budou poté zmíněny samostatně.

Trojrozměrná počítačová tomografie (3D CT)

Nejznámější a nejčastěji používaným zařízením transmisivních aktivních skenerů jsou metody využívající počítačové tomografie (CT - *Computed Tomography*). Velikou výhodou CT je, že s jeho pomocí lze získat 3D data jak povrchu, tak vnitřku skenovaného objektu. Využívá se hlavně v lékařství, jeho využití je nicméně možné i v jiných odvětvích, včetně archeologie. Za vynález CT vděčí lidstvo G. N. Housenfieldovi a A. M. Cormacovi, kterým byla za tento objev v roce 1979 udělena Nobelova cena (AB 2013).

CT obrazy jsou generovány z velkého množství rentgenových snímků, které jsou vysílány skrze objekt. Nejjednodušší CT zařízení si lze představit jako zařízení složené z vysílače a přijímače, které jsou umístěny naproti sobě na otočné desce. Skenovaný objekt přitom leží mezi těmito dvěma součástkami (obr. 1:A). Vysílač vysílá rentgenový bodový paprsek a posouvá se spolu s přijímačem v rovnoběžném směru. Přijímač přitom v každém čase zaznamenává množství dopadajícího rentgenovaného záření (obr. 1:B-D). V době, kdy paprsek prochází objektem, se mění intenzita, s jakou později dopadne na přijímač (obr. 1:E). Jakmile je dokončen jeden takovýto sken, deska, na které je skenovaný předmět umístěn, se pootočí o jeden stupeň (obr. 1:F) a celý proces se opakuje znovu až do doby, kdy se deska otočí o 180 stupňů (Cunningham a Judy 2000, Siemens 2013).



Obr. 1. Princip rentgenového záření. Zdroj: autor.

Výsledkem je série barevných pásů (obr. 2), většinou ve stupních šedi, které se automaticky zpracovávají pomocí speciálního algoritmu („filtred backprojection“ anebo jinou metodou). V praxi je zřejmé, že čím více úhlových skenů do výpočtu vstupuje, tím lepší je kvalita výsledného obrazu (Nozal 2009).

Backprojection je projekce jednorozměrného signálu (obr. 3:A), který je veden přes předmět (obr. 3:B) buďto přímo, anebo po zpětném odrazu na senzor (obr. 3:C). Tímto způsobem lze získat částečnou informaci o tvaru předmětu (obr. 3:D). Provede-li se zpětná projekce opakovaně i z jiných úhlů (obr. 3: E-G), lze obdržet celkovou 2D tvarovou informaci o objektu (obr. 3:H; Taszdizen 2013).

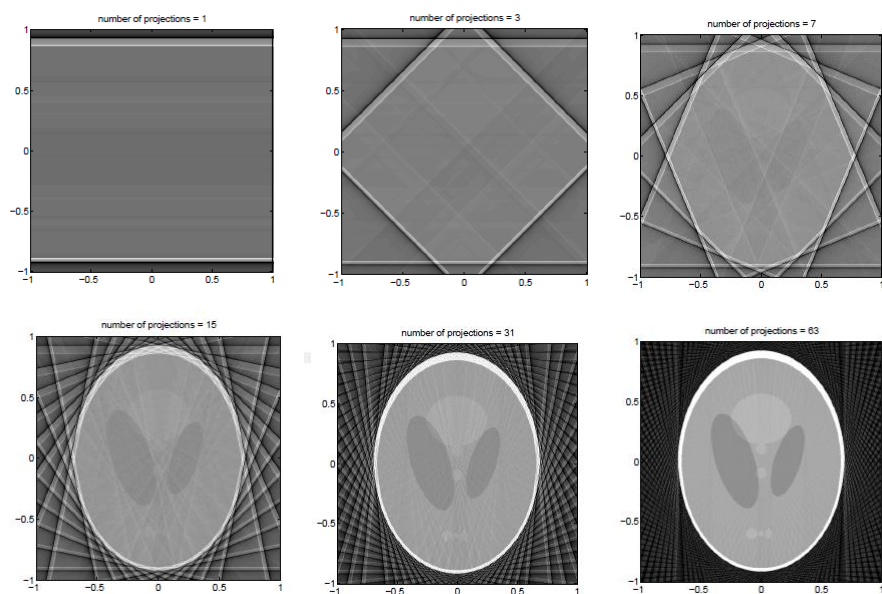
Nejmodernější CT zařízení zvané „Helical CT“ nebo také „spirálové CT“ je o trochu sofistikovanější. Skládá se z CT přístroje a posuvného lehátka, na kterém je umístěn zkoumaný předmět, v medicíně nejčastěji pacient (obr. 4:vlevo). V CT zařízení je kruhový otvor, ve kterém se na jedné straně nachází zdroj rentgenového záření emitující už ne bodový, ale pásový paprsek. Na druhé straně otvoru je tento paprsek zachytáván velkým množstvím detektorů. Celý tento systém rotuje velkou rychlostí uvnitř kruhového otvoru a rentgenový detektor, zatímco se lehátko posunuje skrze CT zařízení, zachytává v krátkém čase velké množství (přibližně 500 000) rentgenových signálů, z nichž lze posléze vytvořit 3D model (Brenner a Hall 2007, Cunningham a Judy 2000).

Naměřené hodnoty CT jsou vyjádřeny v tzv. *Housfieldových jednotkách* (Housefield units - HU), které značí radiologické hustoty materiálů, kterým paprsek procházel. Vzduch má přitom hodnotu -1000 a voda 0 HU, průměrná hodnota u lidské *posterior maxily* se například pohybuje okolo 495 HU. Jednotlivé hodnoty HU se poté asociují se škálou zvolených barev, nejčastěji se spektrem šedých barev. Tímto způsobem lze obdržet výsledný dvoudimenzionální CT obraz (Gargiulo et al. 2011, Sogo et al. 2012).

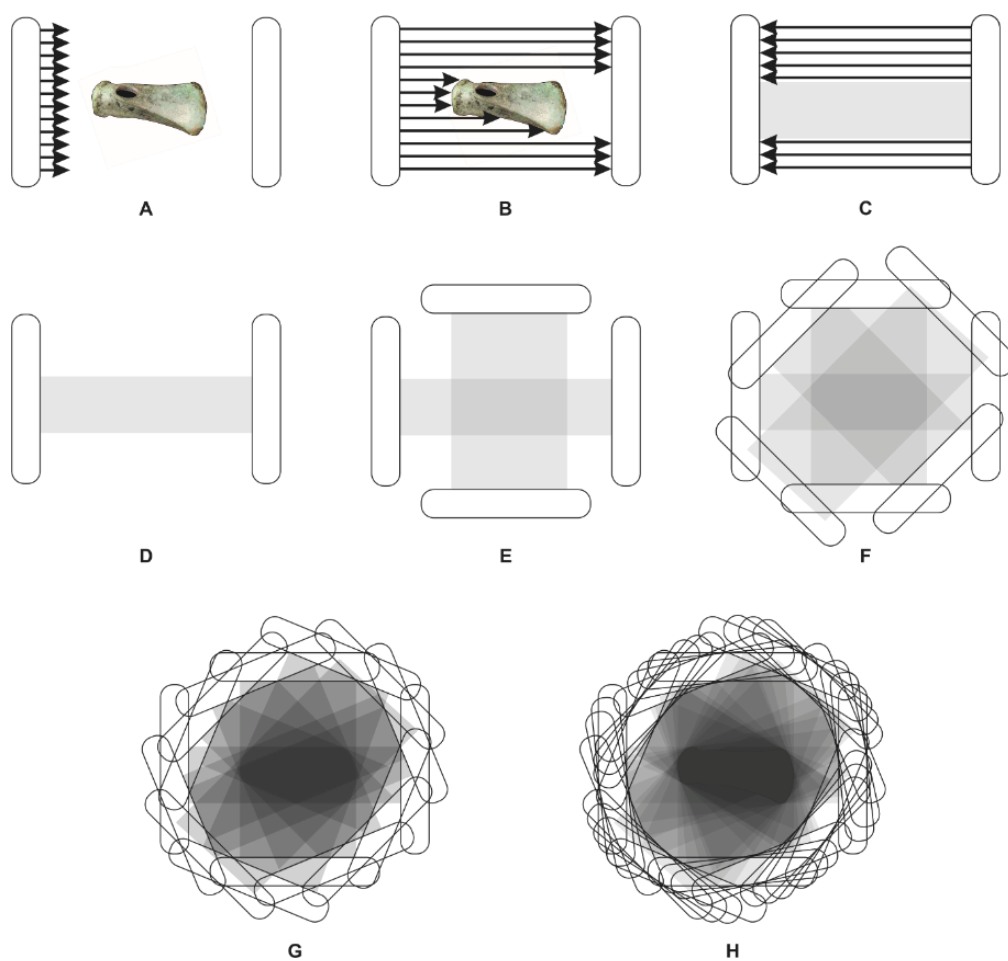
Trojdimenzionální model je poté možné vytvořit pomocí několika technik, založených stejně jako u technik *Shape from Siluets* převážně na bázi volumetrické rekonstrukce vytvořené ze sekvence dvojrozměrných snímků (viz kapitola pasivní akvizice 3D dat). Ty jsou získány postupným rentgenováním objektu v CT přístroji. Klíčové je přitom určení hodnot radiologické hustoty rentgenovaného objektu, pomocí níž je tento objekt možno „vyfiltrovat“ od okolí. Hodnoty HU objektu tak de facto definují jeho tvar.

Z těch nejznámějších a nejpoužívanějších technik využívaných pro 3D rekonstrukce lze jmenovat *Maximum, Minimum* anebo *Average Intensity Projection* (MIP/MinIP/AIP), *Shaded Ssurface Display* (SSD), *Volume Rendering* (VR/VRT), *Surface-Shaded Volume Rendering* (SS-VRT) anebo metodu virtuální endoskopie (VE; Perandini et al. 2010, Siemens 2013).

Jedna z nejstarších metod je **Shaded Surface Display (SSD)**. U této metody je v první řadě nutno určit mezní hodnoty, tzv. *threshold*, definující objekt v Housfieldově škále. Všechny pixely na obrázcích, jejichž hodnoty se vyskytují v pásmu mezních hodnot, jsou vzaty do kalkulační 3D rekonstrukce. Vykreslení 3D modelu spočívá spojením ploch voxelů odvozených z okraje objektu (obr. 5:vpravo; viz kapitola pasivní akvizice 3D dat). Výsledný model je poté nasvícen umělým světlem, díky němuž se vykreslí odstíny. Je zřejmé, že kvalita a prvky, jež budou vykresleny, jsou plně v režii navolených mezních hodnot (Calhoun et al. 1999, Lee 2006).



Obr. 2. Ukázka principu Filtered Backprojection. Zdroj: Transform 2013.



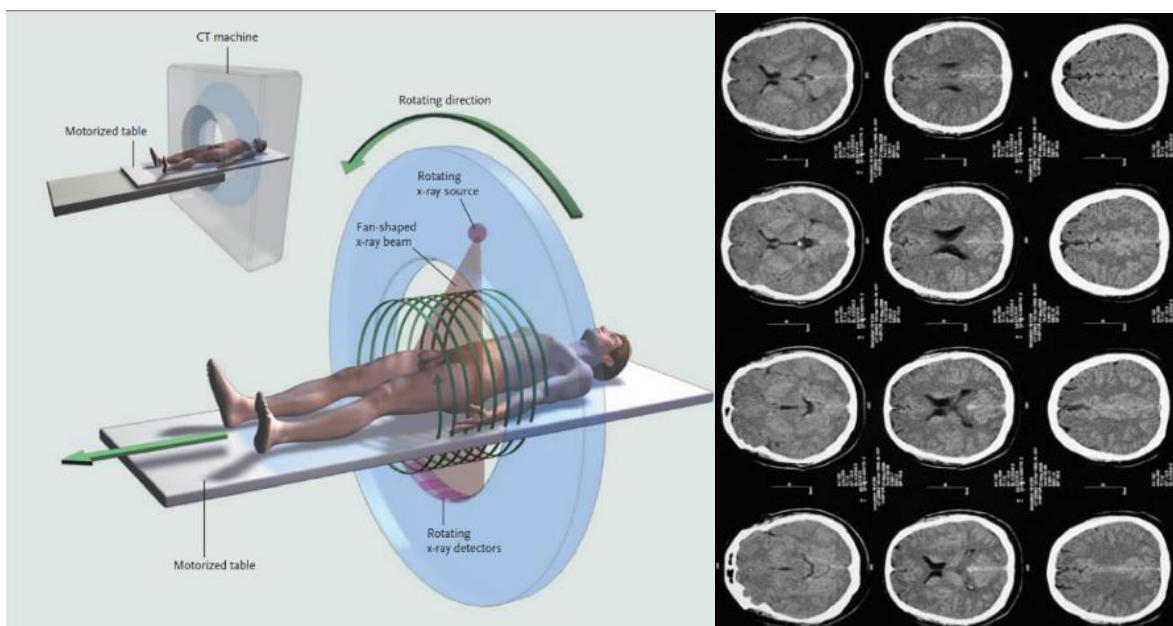
Obr. 3. Ukázka principu zpětní projekce. Zdroj: autor, inspirováno podle Taszdizen 2013.

Maximum Intensity Projection (MIP) je založena na pixelech s nejvyšší radiologickou hustotou, které jsou použity ke 2D zobrazení. Prostorového dojmu může být dosaženo tak, že se pustí sekvence několika takovýchto obrázků za sebou. Na stejném principu funguje **Minimum Intensity Projection (MinIP)** či **Average Intensity Projection (AIP)**, s tím rozdílem, že jsou k rekonstrukci vybrány pixely s nejnižší, respektive průměrnou intenzitou radiologické hustoty. Jelikož se pro zobrazení využije jen vybraná část pixelů, může být ztraceno až 95% původních dat (Brown a Semelka 2011, Karthikeyan a Chegu 2004, Lee 2006, Perandini et al. 2010, Siemens 2013).

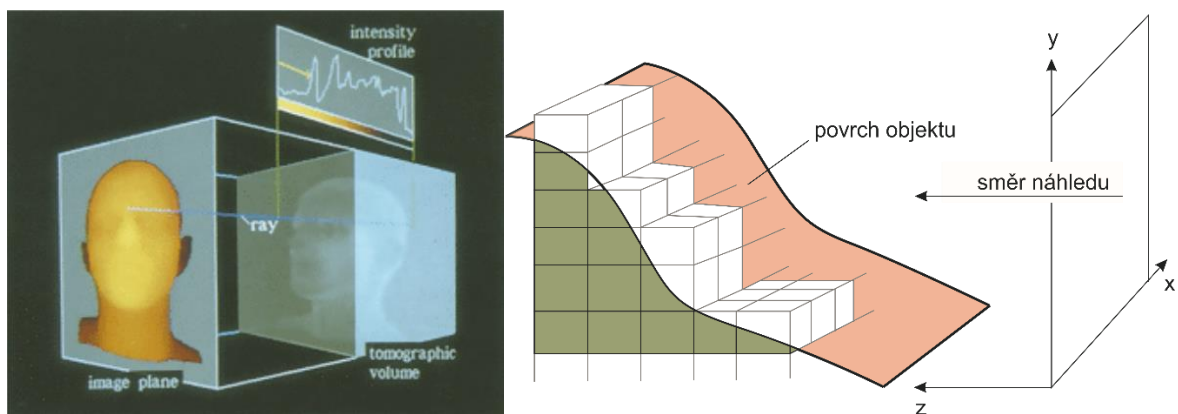
Volume Rendering Technique (VRT) využívá oproti výše zmíněným metodám všech hodnot Hounsfieldovy škály. Každé hodnotě může být libovolně přiřazena různá barva a opacita, čímž může být dosaženo velice realistického zobrazení zkoumané struktury objektu (obr. 7). S touto technikou je úzce spojena i **virtuální endoskopie (VE)**, která funguje na stejném principu, akorát je s ní možno rekonstruovat pohled „zevnitř“ objektu (Karthikeyan a Chegu 2004, Naidich et al. 2007, Rogalla et al. 2001, Siemens 2013).

Hlavní nevýhodou CT je samozřejmě radiace, které je tělo, popř. předmět vystavěno a rozlišení finálního modelu, který nemusí odpovídat jiným metodám 3D akvizice. V počátcích masovějšího rozšíření 3D rekonstrukcí získaných pomocí CT se také poukazovalo na horší přesnost 3D modelů oproti tradičním 2D zobrazením. Jako nejpřesnější z použitých 3D metod se alespoň pro medicínské účely jeví Volume Rendering (VRT), preferovaný jak před Shaded Surface Display (SSD), tak před všemi alternativami Intensity Projection (MIP, AIP, MinIP; Calhoun et al. 1999, Lerch et al. 2007, Vukašinović et al. 2007).

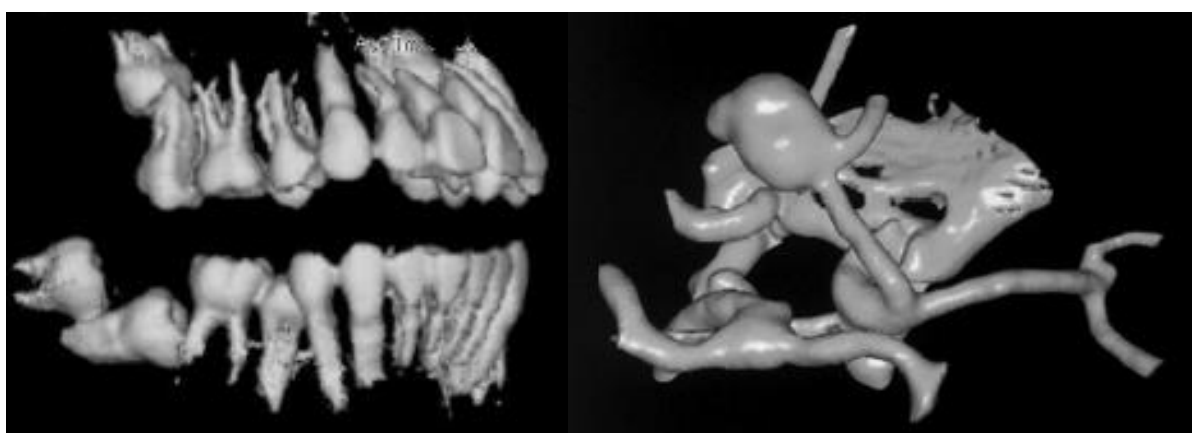
Přestože CT funguje na bázi sekvence rentgenových snímků, není úplně vhodný ke skenování kovových předmětů.



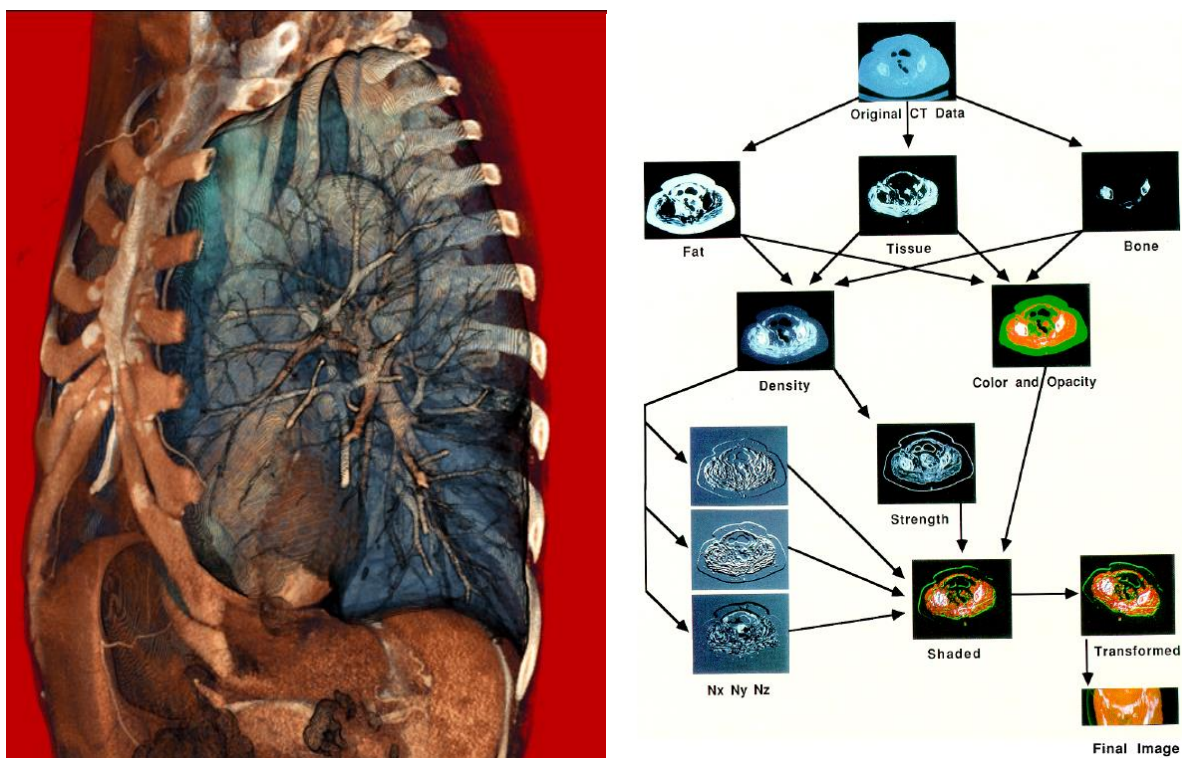
Obr. 4. Ukázka principu Helical CT (vlevo) a sekvence CT snímků mozku (vpravo). Zdroj: Brenner a Hall 2007 (vlevo) a Now 2013 (vpravo).



Obr. 5. Ukázka principu 3D rekonstrukce využívajícího volumetrie. Zdroj: Höhne et al. 1990, Fig. 2 (vlevo), Höhne a Bernstein 1986, Fig. 1 (vpravo).



Obr. 6. Ukázka 3D rekonstrukce za pomoci SSD. Zdroj: Chen et al. 2006, Fig. 7. (vlevo), Kokkins et al. 2008, Fig. 3a (vpravo).



Obr. 7. Ukázka 3D rekonstrukce trupu pomocí VRT (vlevo) a proces VRT rekonstrukce (vpravo), Zdroj: Flickr 2013 (vlevo), Debrin et al. 1988, Fig. 1 (vpravo).

Metoda	Výhoda	Nevýhoda
SSD	Rychlost a flexibilita	Pro struktury s dobře diferencovaným povrchem Využito jen přibližně 10 % naměřených hodnot Nemožnost vizualizace vnitřní struktury
MIP	Lepší přesnost	Zkreslování prostorových relací Různé algoritmy dávají různé výsledky Někdy snížené schopnosti rozlišení Obvykle chybí stínování
VRT/VE	Vysoká přesnost Možnost „průletu“ skrze objekt	Časová náročnost na výpočet

Tab. 1. Výhody a nevýhody metod pro 3D rekonstrukci a vizualizaci založenou na počítačové tomografii. Zdroj: autor podle Calhoun al. 1999, Karthikeyan a Chegu 2004, Lee 2006.

Trojrozměrná magnetická rezonance (3D MRI)

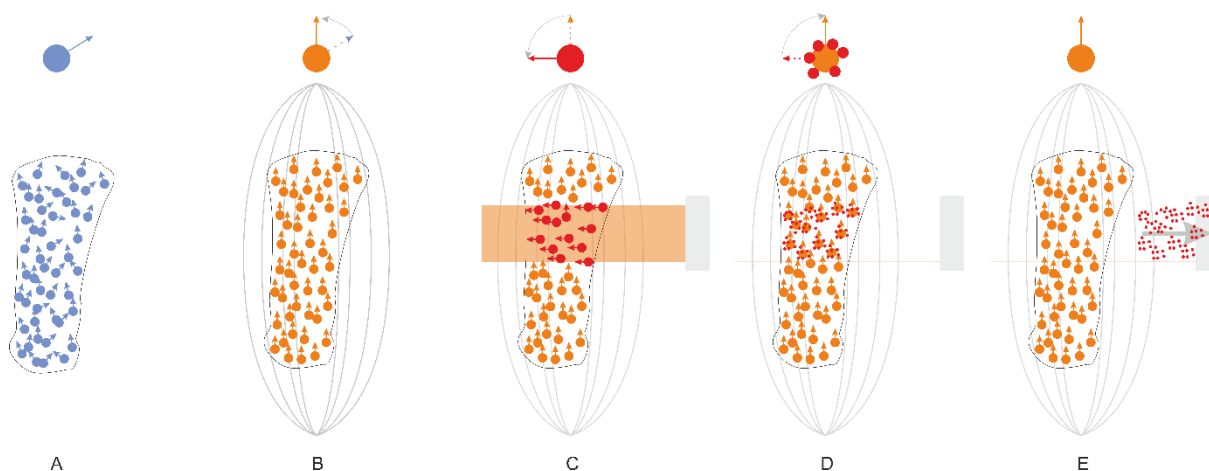
První experimenty s obrazem získaným pomocí magnetické rezonance začaly v 70. letech 20. století s přispěním *P. C. Lauterbura* a *R. V. Damadiana*. Metoda získání obrazu z magnetické rezonance využívá kombinaci principů magnetiky a rádiových vln. V medicíně se používá hlavně pro skenování tkání, které obsahují vodu, respektive vodík (Lauterbur 1973, Callaghan 1993, Luiten 2003).

Princip si lze vysvětlit pomocí jednoduchého schématu (Coyne 2013, Hornak 2013):

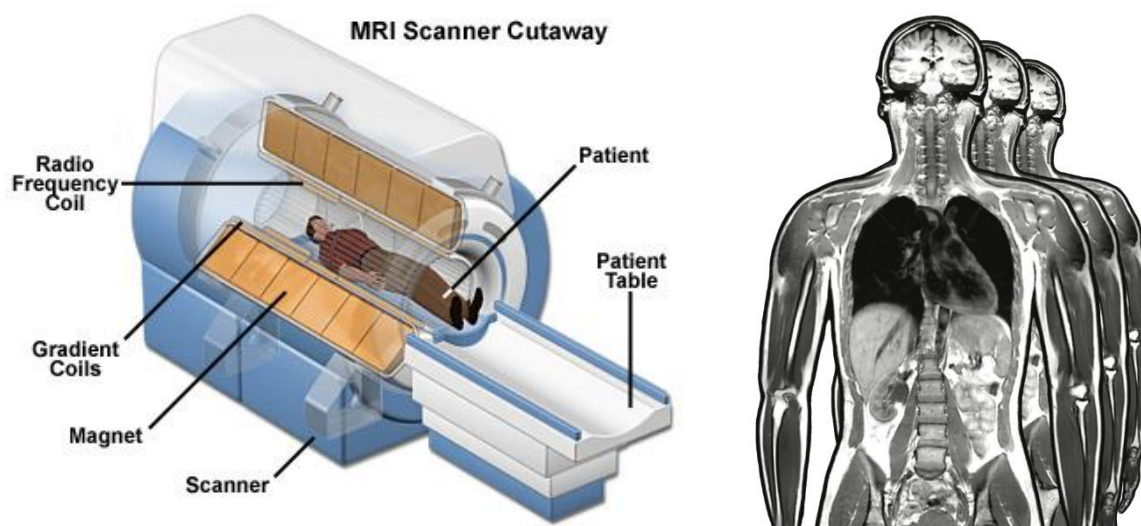
Díky magnetickému momentu protonu v jeho jádře, který se označuje jako spin, má atomové jádro vodíku jistý magnetický moment, to znamená, že má jistou „orientaci rotace“ (obr. 8:A). Jakmile je rotující jádro vodíku vloženo do konstantního magnetického pole zařízení, které v praxi několikrát překračuje magnetické pole Země, dojde k tomu, že se magnetický moment vodíku natočí ve směru vnějšího působení magnetického pole MRI (obr. 8:B). Jelikož jsou takto zarovnané všechny protony vodíku, není možné vidět jen ty částice v objektu, které nás zajímají. K tomu, aby to bylo možné, se využije druhého, slabšího magnetického pole nebo elektromagnetického pulzu, které se umístí kolmo na hlavní magnetické pole v „zájmové oblasti“. Tato energie se na chvíli zapne, což „donutí“ vodík natočit se o 90 stupňů (obr. 8:C). V momentě, kdy se tato energie vypne, se protony snaží zarovnat zpátky do směru vnějšího působení magnetického pole MRI, přičemž emitují elektromagnetickou energii (obr. 8:D). Tato energie je poté zaznamenána senzory a udává tak informace o počtu, respektive hustotě vodíku, který se v dané oblasti vyskytuje (obr. 8:E).

Metoda magnetické rezonance je v mnohém podobná počítačové tomografii. Oproti ní má tu výhodu, že produkuje obraz vyšší kvality a hlavně to, že svou podstatou není založená na škodlivém záření. Nevýhoda je hlavně pořizovací cena, hluchost a obtížnější ovládání (Callaghan 1993, Schreyer et al. 2004, Chalela et al. 2007).

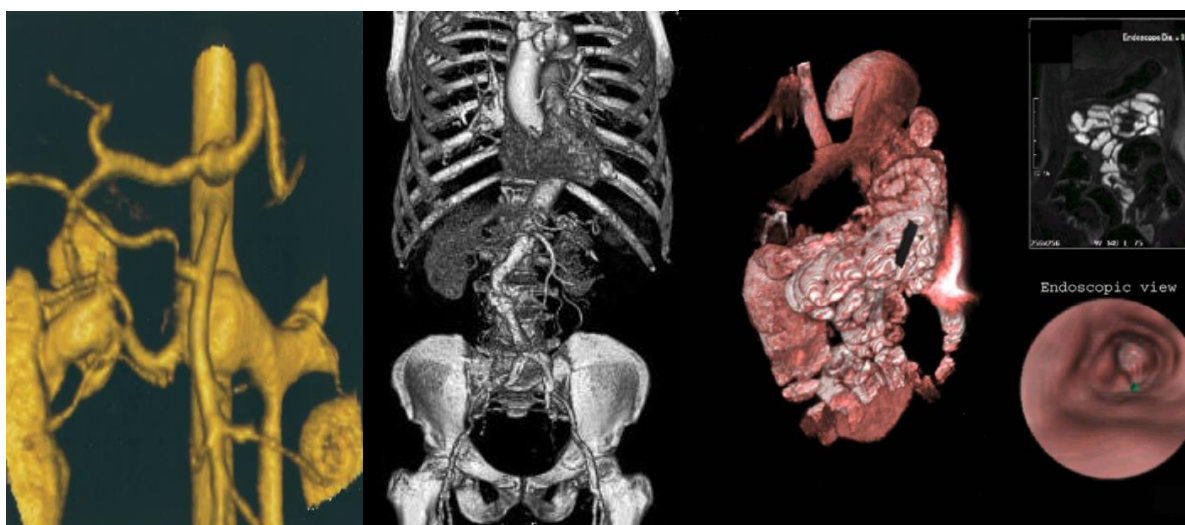
Jelikož je u MRI jako výstup získána série obrazových plátek (obr. 9: vpravo), je možné k 3D rekonstrukci využít identických metod, jako u 3D počítačové tomografie (obr. 10). Jedná se o metody *MIP*, *MinIP*, *AIP*, *SSD*, *VRT*, *SSVRT* či *VE* (Wiese a Rogalla 2001, Schreyer et al. 2002, 2004, Tongdee et al. 2006, Doeuk et al. 2007).



Obr. 8. Princip magnetické rezonance. Zdroj: autor.



Obr. 9. Ukázka MRI skeneru (vlevo) a příklad sekvence snímků lidského těla (vpravo). Zdroj: Coyne 2013 (vlevo), Specialists 2013 (vpravo).

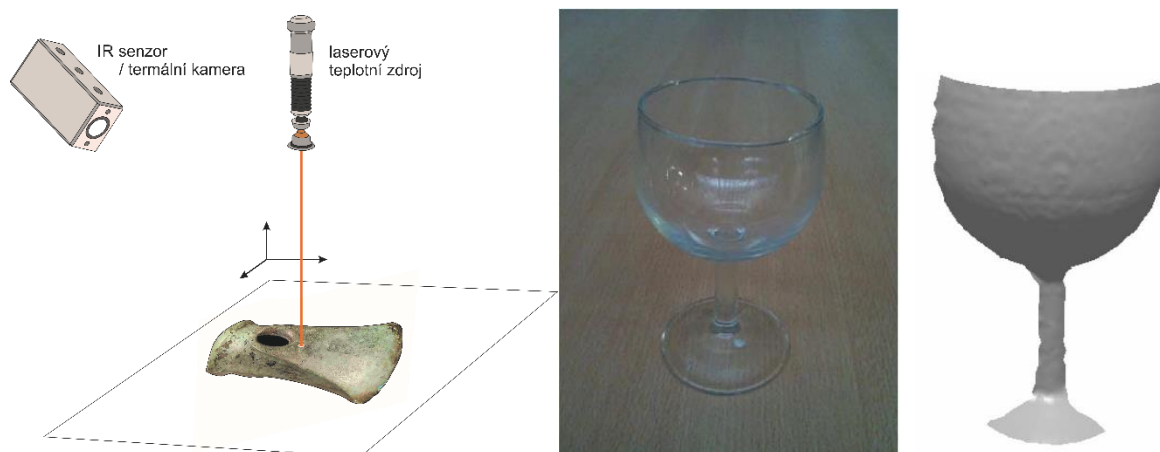


Obr. 10. Ukázka 3D rekonstrukce z MRI snímků získaných pomocí SSD (vlevo), VRT (uprostřed) a VRT s VE (vpravo). Zdroj: Tongdee et al. 2006, Fig. 11 (vlevo), Prokop 2011, Fig. 2:b (uprostřed), Schreyer et al. 2002, Fig. 3.

Triangulace pomocí infračerveného laserového skeneru (Scanning From Heating / Termografie)

Triangulace některých druhů povrchů, například průhledných nebo poloprůhledných (sklo, plast atd.) je nesnadná jak pomocí laserových skenerů, tak pomocí strukturovaného světla. Problém je v tom, že laser, popřípadě jiný zdroj světla předmětem prochází anebo je jím odrážen. Jedním ze způsobů, jak se s těmito vlastnostmi povrchů vyrovnat, je využít triangulace pomocí infračerveného laserového skeneru. V literatuře je tato metoda pojmenovaná také jako „Scanning From Heating“ anebo „Shape from Structured Heating“.

Skenovací systém je založen na dvou prvcích, a to na laseru a termální kameře, popřípadě na infračerveném senzoru (obr. 11: vlevo). V praxi skenování vypadá tak, že laserový teplotní zdroj nahřívá povrch objektu v určitém místě, přičemž se toto místo zaznamenává IR senzorem. Jen pro zajímavost nutno zmínit, že k tomu, aby se zvýšila teplota objektu, se v některých systémech využívá vlasový fén v kombinaci s polarizátorem. Ze získaného termálního obrazu a ze známých parametrů optického senzoru a laserového zdroje se pak pomocí triangulace či deformace projektovaného teplotního vzoru, vypočítají koordináty jednotlivých bodů na objektu (Bajard et al. 2011, Eren et al. 2009, Miyazaki et al. 2002, Sanchez Secades 2008).



Obr. 11. Princip triangulace pomocí infračerveného laserového skeneru (vlevo) s příkladem skenovaného objektu (uprostřed) a jeho rekonstrukce (vpravo). Zdroj: upraveno podle Mériaudeau et al. 2010.

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

- AB, N. M. (2013). "The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1979." Poslední náhled: 2013/08/29, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1979/.
- Coyne, K. (2013). "MRI: A Guided Tour." Poslední náhled: 2013/10/15, <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/mri/fullarticle.html>.
- Flickr (2013). "COPD." Poslední náhled: 2013/10/15, <http://www.flickr.com/photos/voxel123/4775768046/>.

Hornak, J. P. (2013). "The Basis of MRI." Poslední náhled: 2013/10/15, <http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/index.html>.

Now, N. S. (2013). "Diagnosing Damage." Poslední náhled: 2013/09/06, <http://www.pbs.org/wgbh/nova/sciencenow/0306/02-diag-02.html>.

Specialists, C. I. (2013). "MRI – Magnetic Resonance Imaging." Poslední náhled: 2013/10/15, <http://carolinaimagingspecialists.com/mri/>.

Literatura:

Bajard, A., et al. (2011). 3D digitization of metallic specular surfaces using scanning from heating approach. Proc. SPIE 7864, Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement, San Francisco.

Brenner, D. J. and E. J. Hall (2007). "Computed Tomography – An Increasing Source of Radiation Exposure." The New England Journal of Medicine **357**: 2277-2284.

Brown, M. A. and R. C. Semelka (2011). MRI: Basic Principles and Applications, Wiley.

Calhoun, P. S., et al. (1999). "Three-dimensional Volume Rendering of Spiral CT Data: Theory and Method. ." Radiographics **19**(3): 745-764.

Chalela, J. A., et al. (2007). "Magnetic resonance imaging and computed tomography in emergency assessment of patients with suspected acute stroke: a prospective comparison." The Lancet **369**(9558): 293-298.

Callaghan, P. T. (1993). Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy, Clarendon Press.

Chen, Y., et al. (2006). "Three-dimensional spiral computed tomographic imaging: A new approach to the diagnosis and treatment planning of impacted teeth." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **130**(1): 112-116.

Cunningham, I. A. and P. F. Judy (2000). Computed Tomography. The Biomedical Engineering Handbook: Chapter 62.

Debrin, R. A., et al. (1988). "Volume rendering." Computer Graphics **22**(4): 65-74.

Doeuk, P. C., et al. (2007). Image Processing in Contrast-Enhanced MR Angiography. Computed Tomography and Magnetic Resonance of the Thorax. D. P. Naidich, N. L. Müller and W. R. Webb, Lippincott Williams & Wilkins: 55-64.

Eren, G., et al. (2009). "Scanning from heating: 3D shape estimation of transparent objects from local surface heating." Optics Express **17**(14): 11457-11468.

Gargiulo, P., et al. (2011). "Monitoring of muscle and bone recovery in spinal cord injury patients treated with electrical stimulation using three-dimensional imaging and segmentation techniques: Methodological Assessment." Artificial Organs **35**(3): 275-281.

Höhne, K. H. and R. Bernstein (1986). "Shading 3D-Images from CT Using Gray-Level Gradients." Medical Imaging, IEEE Transactions on **5**(1): 45-47.

Höhne, K. H., et al. (1990). "3D visualization of tomographic volume data using the generalized voxel model." The Visual Computer **6**(1): 28-36.

Karthikeyan, D. and D. Chegu (2004). High-resolution Computed Tomography of the Lungs: A Pattern Approach, Jaypee Brothers, Medical Publishers.

Kokkins, C., et al. (2008). "The role of 3D-computed tomography angiography (3D-CTA) in investigation of spontaneous subarachnoid haemorrhage: comparison with digital subtraction angiography (DSA) and surgical findings." British Journal of Neurosurgery **22**(1): 71-78.

Lauterbur, P. C. (1973). "Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance." Nature **242**(March): 190-191.

Lee, J. K. T. (2006). Computed Body Tomography with MRI Correlation, Lippincott Williams & Wilkins.

Lerch, T., et al. (2007). "3D laser scanning: a model of multidisciplinary research." Journal of textile and apparel, technology and management **5**(4): 1-22.

Luiten, A. L. (2003). Magnetic Resonance Imaging: A Historical Introduction. Magnetic Resonance Imaging: Theory and Practice. M. T. Vlaardingerbroek and J. A. Boer, Springer: 1-8.

Mériaudeau, F., et al. (2010). "3-D Scanning of Nonopaque Objects by Means of Imaging Emitted Structured Infrared Patterns." Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on **59**(11): 2898-2906.

Miyazaki, D., et al. (2002). "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths." Journal of the Optical Society of America A **19**(4): 687-694.

Naidich, D. P., et al. (2007). Computed Tomography and Magnetic Resonance of the Thorax, Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins.

Nozal, J. B. (2009). Use of projection and back-projection methods in bidimensional computed tomography image reconstruction. Computer Vision and Artificial Intelligence. Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona. **Master**.

Perandini, S., et al. (2010). "The diagnostic contribution of CT volumetric rendering techniques in routine practice." Indian journal of radiology and imaging **20**(2): 92-97.

Prokop, M. (2011). Clinical Applications of 3D Imaging in Thoracic Vascular Pathology: Pulmonary Vascular Applications. Diseases of the Heart, Chest & Breast 2011-2014: Diagnostic Imaging and Interventional Techniques. J. Hodler, G. K. Schulthess and C. L. Ziollikofer, Springer: 127-135.

Rogalla, P., et al. (2001). Virtual Endoscopy and Related 3D Techniques, Springer.

Sanchez Secades, L. A. (2008). 3D scanning of non-opaque objects by means of infrared imaging. Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

Schreyer, A. G., et al. (2002). "3-D Modeling and Virtual Endoscopy of the Small Bowel Based on MR Imaging in Patients with Inflammatory Bowel Disease." Investigative Radiology **37**(9): 528-533.

Schreyer, A. G., et al. (2004). "Modern imaging using computer tomography and magnetic resonance imaging for inflammatory bowel disease (IBD) AU1." Inflammatory Bowel Diseases **10**(1): 45-54.

Siemens (2013). "Computed Tomography Its History and Technology." White paper.

Sogo, M., et al. (2012). "Assessment of Bone Density in the Posterior Maxilla Based on Hounsfield Units to Enhance the Initial Stability of Implants." Clinical Implant Dentistry and Related Research **14**: 183-187.

Taszdzien, T. (2013) "Image Reconstruction from Projections." White paper.

Tongdee, R., et al. (2006). "Utility of 3D magnetic resonance imaging in preoperative evaluation of hepatobiliary diseases." HPB **8**: 311-317.

Transform, T. R. "Contents HET408 Biomedical Imaging Image Reconstruction from Projections " White paper.

Vukašinović, N., et al. (2007). "Case study – surface reconstruction from point clouds for prosthesis production." Journal of Engineering Design **18**(5): 475-488.

Wiese, T. H. and P. Rogalla (2001). Virtual Endoscopy of the Vessels. Virtual Endoscopy and Related 3D Techniques. P. Rogalla, J. T. van Scheltinga and B. Hamm, Springer.

OPTICKÉ REFLEXIVNÍ NEKONTAKTNÍ AKTIVNÍ 3D SKENERY

Time-of-Flight

Nejznámější kategorií 3D skenerů jsou laserové skenery fungující na principu času letu, jinak řečeno **Time-of-Flight**. Tato zařízení, jejichž vývoj spadá do sedmdesátých let spolu s vývojem laserových radarů, se využívají hlavně ke skenování velkých a vzdálenějších objektů (Besl 1988, Yu et al. 2010).

TOF je založena na principu obrazového radaru (Imaging Radars), jenž je geneticky spojen jak s elektromagnetickým radarem datovaným do počátku 20. století, tak s radarem ultrazvukovým, který byl vytvořen na konci 50. let 20. století. Všechna tato zařízení získávají obrazovou informaci o objektu tak, že na něho nejdříve vyšlou signál, který se od něho odrazí a vrátí se zpátky do přijímače obrazového radaru (Besl 1988).

Vzdálenost radaru od objektu je přitom dána jednoduchou rovnicí:

$$v\tau = 2r = \text{zpáteční cesta}$$

kde v je rychlost vyslaného signálu, r vzdálenost k reflektujícímu objektu a τ je čas, který signál trvá od vyslání signálu vysílačem přes jeho odraz až po přijetí na přijímači. Dosadíme-li za v rychlost světla c , je vzdálenost objektu od zařízení dána vztahem $r = \frac{c\tau}{2}$. Je tedy zřejmé, že nejdůležitějším parametrem v této rovnici je zde čas od vyslání po přijetí signálu (Besl 1988, Li a Jain 2009).

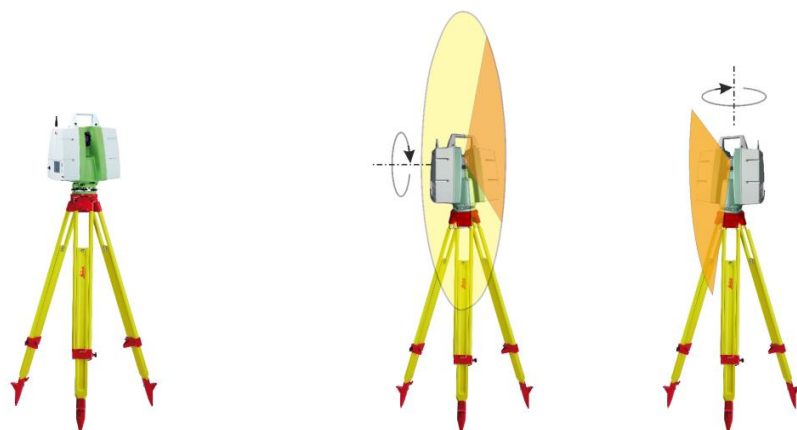
Jako praktický příklad skenování touto metodou lze uvést tzv. terestriální 3D skener sloužící primárně pro skenování větších objektů a geografických prvků. Hlavice zařízení stojí na trojnožce a senzor je namířen na skenovaný objekt. V jádru hlavice je zabudován laserový dálkoměr (Laser Rangefinder), který na předmět vysílá laserový paprsek (obr. 2:A). Ten se po odrazu od určitého bodu objektu (obr. 2:B) dostává zpátky na snímač dálkoměru, kde je zaznamenán (obr. 2:C). Doba od vyslání signálu po jeho příjem pak udává vzdálenost bodu od scanneru podle rovnice, která je uvedena výše¹.

Tento druh zařízení je schopen samozřejmě zaznamenat jen vzdálenost jednoho bodu na předmětu danou orientací výhledu skeneru. Proto se hlavice skeneru postupně jemně otočí ve vertikálním směru (nahoru) a celý proces vyslání a přijímání laserového signálu se opakuje (obr. 2:D-G). Poté, co je naskenován celý vertikální „výhled“ se hlavice skeneru pootočí v horizontálním směru a celý proces se znova opakuje (obr. 2: H)². Koordináty bodů se vypočítávají ze vzdálenosti skeneru od objektu a z úhlu, o nějž se hlavice skeneru posunula ve vertikálním a horizontálním směru (obr. 2:I; Besl 1988, Boehler a Marbs 2002, Lorient 2009, Wallace et al. 2001).

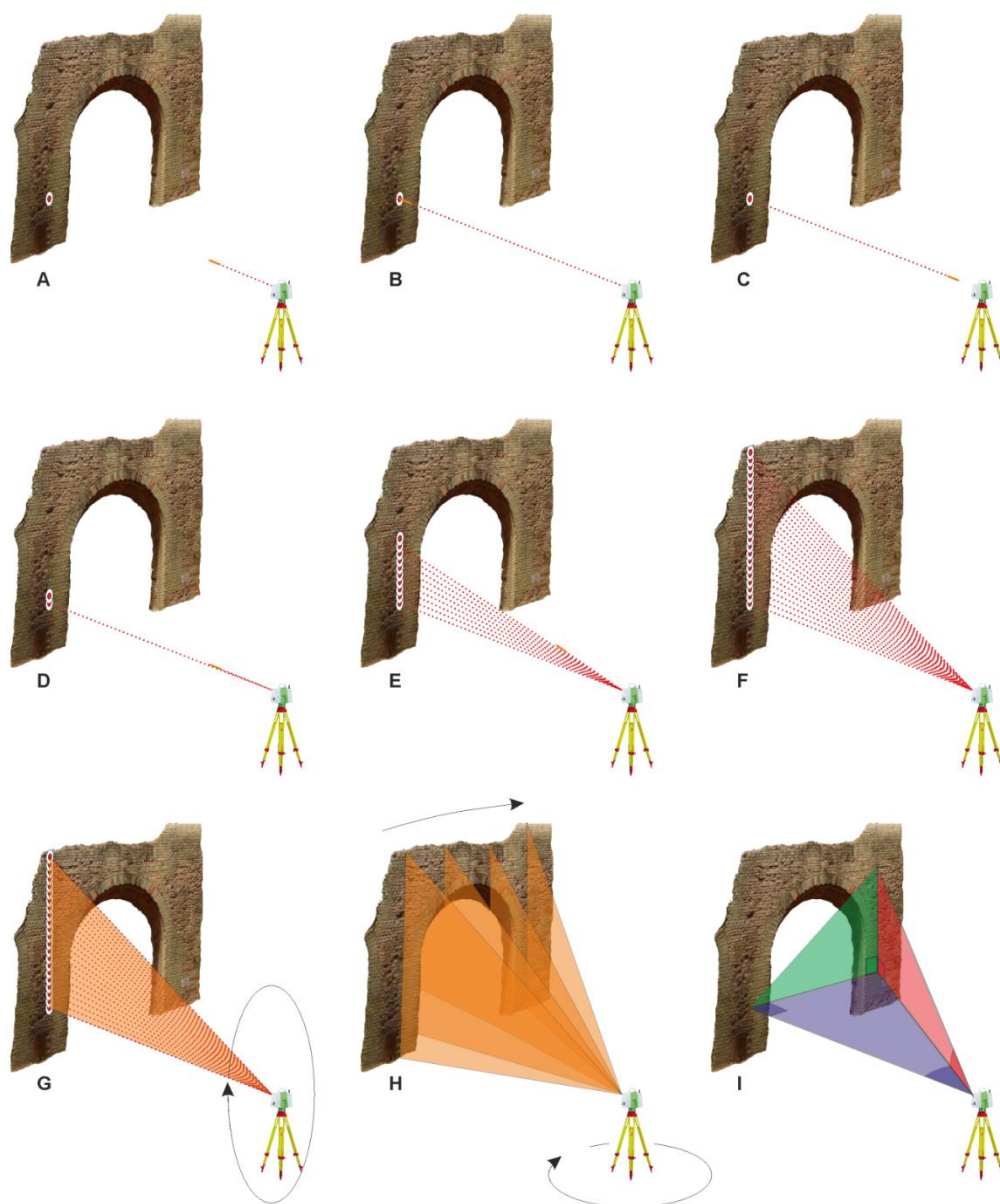
Jako nevýhoda TOF přístrojů oproti triangulačním zařízením se uvádí: (1) nepřesnost (ovšem v řádech několika milimetrů) daná vysokou rychlostí světla a s tím spojeným obtížným časováním doby nutné od vyslání signálu po jeho příjem; (2) závislost na jasu a barvě skenovaných objektů; a (3) závislost na skenovacích podmínkách, tj. na počasí a na tom, zda se skenuje ve dne či v noci (Bernardini a Rushmeier 2002, Yu et al. 2010, Zaimovic-Uznovic a Lemes 2010).

¹ V praxi existuje několik druhů měření doby od vyslání signálu po jeho příjem. Buďto je laser na objekt vyslán v pulsech a odpovídá tak výše zmíněné deskripci, anebo je laserový paprsek vyslán kontinuálně a vzdálenost se počítá pomocí fázového rozdílu mezi vyslanou a přijatou amplitudou vlny (Boehler a Marbs 2002, Lorient 2009, Wallace et al. 2001).

² Změna směru paprsku přitom nemusí být dána fyzickým otočením hlavice skeneru. Může být modifikována systémem rotujících zrcadel, které se nachází v hlavici skeneru.



Obr. 1. Stupně volnosti u TOF skenovacích zařízení. Zdroj: autor podle Geosystems 2013.



Obr. 2. Princip skenování pomocí Time of Flight. Zdroj: autor.

Triangulační aktivní skenery

Oproti pasivní triangulaci se aktivní metoda liší v tom, že se prostorové informace o objektu získávají za pomoci světelného paprsku, které se přímo vysílá na skenovaný objekt. Výhoda aktivních skenerů je hlavně v tom, že jsou: (1) často jednoduše přenosné; (2) rychle nastavitelné; a oproti strukturovanému světlu (3) méně sensitivní na okolní světlo.

Jako nevýhoda laserových triangulačních se uvádí: (1) menší přesnost a rozlišení; (2) větší míra šumu; (3) obtížnosti či přímo nemožnost naskenovat předměty, které reflektují či pohlcují světlo (tento nedostatek lze ovšem minimalizovat například využitím polarizátoru); (5) citlivost na odrazivost hran objektů a (6) citlivost na podmínky skenovacího prostředí. Nejdůležitějším prvkem v přesnosti triangulačních laserových skenerů se přitom zdá být skenovací vzdálenost a úhel, pod kterým laser na předmět dopadá (Geomagic 2013, Lorient 2009, Miyazaki et al. 2002, Vukainović et al. 2010, Zaimovic-Uznovic a Lemes 2010).

Triangulační aktivní skenery fungují na trochu jiném principu než zařízení využívající času letu. Zařízení tak nepočítá polohu koordinát na objektu pomocí doby nutné k vyslání a příjmu laserového pulsu, ale využívá geometrických vlastností triangulace. Skenovací systém sestává většinou z laserového projektoru a optického snímače, jenž má většinou podobu CCD anebo PSD senzoru, nejčastěji se přitom jedná o fotoaparát či kameru.

Princip aktivní triangulace lze vysvětlit na jednoduchém příkladu (obr. 3: vlevo). Projektor či laserový zdroj vysílá světelný paprsek na zkoumaný předmět. Poloha místa, kam paprsek dopadá B , je zaznamenán na senzor optického systému v bodě X . U optického systému (kamera, fotoaparát), je přitom předem známo centrum optiky C , centrum senzoru O a ohnisková vzdálenost f . Jelikož je známá orientace laserového zdroje θ a optiky φ , stejně jako jejich vzájemná vzdálenost D (popř. $D + x$), je možné k dopočítávání vzdálenosti Z využít trigonometrické rovnice (Lorient 2009, Morel 2005):

$$\frac{D + x}{\sin \alpha} = \frac{D + x}{\sin (\theta + \varphi)} = \frac{Z}{\sin \theta}$$
$$\varphi = \arctan \frac{f}{x}$$
$$Z = (D + x) \frac{\sin \theta}{\sin \left(\theta + \arctan \frac{f}{x} \right)}$$

U skenerů využívajících principu triangulace může být paprsek usměrňován i za pomoci zrcadla (obr. 3: vpravo), anebo může být v systému využito více než jednoho optického senzoru (Clark et al. 1995, Boehler a Marbs 2002).

Triangulační aktivní skenery lze v zásadě rozdělit podle charakteru světla a motivu, který vrhá přístroj na objekt (obr. 4). Většina dnešních triangulačních 3D skenerů přitom používají buďto bodový laserový paprsek, anebo častěji pásový/proužkový motiv, díky němuž je možné skenovat větší plochy objektu najednou. Samostatnou kapitolou jsou pak skenery využívajících jiných binárních či barevných motivů, které k projekci motivů využívají tzv. bílého, modrého či jiného, nelaserového zdroje světla (Boehler a Marbs 2002).

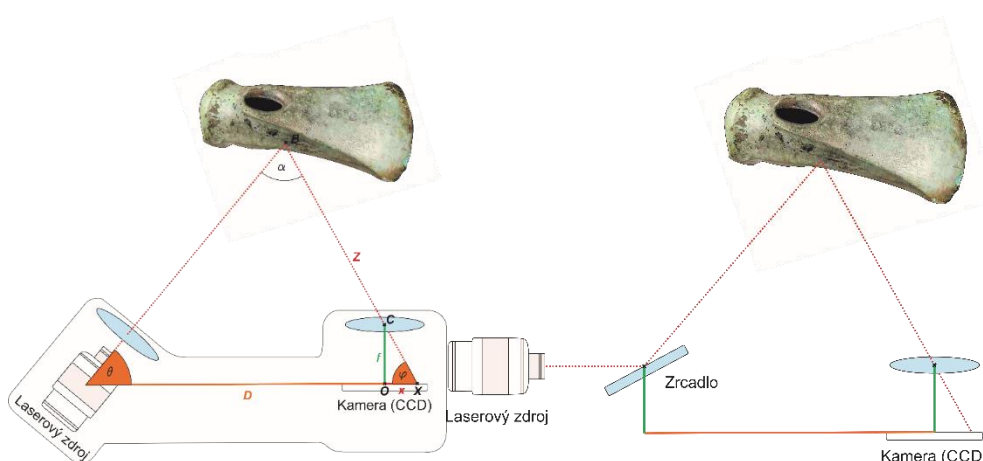
Přestože jsou **skenery s bodovým světelným zdrojem** vývojově nejstarší, nabízí oproti laserům využívajících liniových motivů několik výhod: předně (1) nastavitelnost velikosti CCD čipu v závislosti na velikosti objektu; a (2) regulaci síly laserového paprsku v závislosti na jasu povrchu objektu.

Laserové bodové skenery se často aplikují na CMM zařízení a většinou se s jejich pomocí neskenují celé objekty, ale jen jejich části (Lorient 2009).

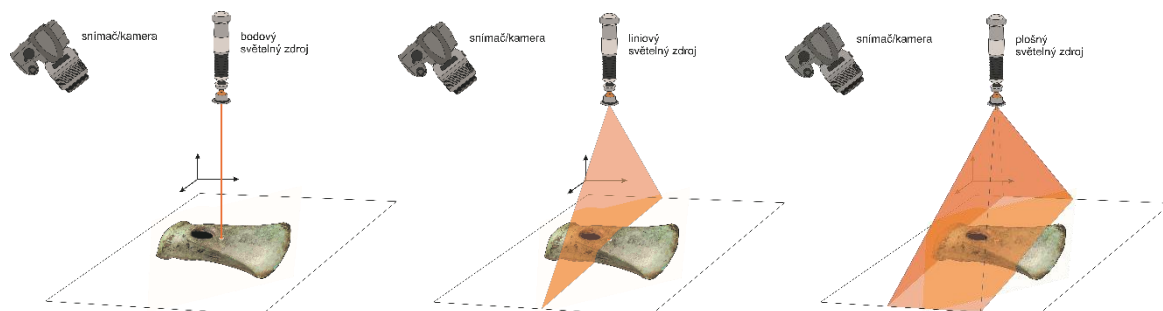
Motiv linie u triangulačních 3D skenerů je vytvořen buďto pomocí cylindrické čočky, kterou prochází bodový paprsek, anebo může být generován pomocí rotujícího zrcadla. Délka skenovacího paprsku se přitom pohybuje obvykle mezi 15 a 150 mm (Loriot 2009).

Liniových zdrojů se v dnešní době používá u drtivé většiny aktivních skenerů, s nimiž se lze na trhu setkat. Mohou být vyráběny buďto samostatně: (1) tzv. ruční skenery; (2) tzv. „close-range“ scannery; anebo mohou být jako komponenty součástí (3) CMM zařízení; a (4) ramenných skenerů. V tomto případě jsou na zařízení vyměněny za stylus.

Princip skenování **laserových CMM** je stejný jako u kontaktní formy zařízení (viz kapitola aktivní kontaktní skenery) s tím rozdílem, že nedochází k fyzickému kontaktu s objektem. Skenování s **ručním a ramenným laserovým** skenerem probíhá tak, že se jimi pohybuje kolem objektu stejným způsobem, jako bychom jej chtěli „vyfénovat ručním vysoušečem vlasů“. Jelikož ruční skener nemusí být nutně fixován k tělu definujícímu jeho koordinátní systém, je nutné, aby skener rozpoznal, kde se nachází a z kterého místa skenuje. Tradičně se pro určení polohy používá referenčních prvků, hlavně formy bílých lícovacích bodů, umístěných na povrchu skenovaného předmětu (a)nebo kolem něj. Některé ze skenerů jsou schopny určit svou polohu samostatně, například pomocí *laser trackingu* či metody *Shape From Motion* (viz kapitola pasivní akvizice 3D dat). V archeologii velice často využívanou skupinou skenerů jsou „close-range“ **3D laserové skenery**. Skenování probíhá jednoduše tím způsobem, že emitovaný paprsek projede v jedné fázi po celém povrchu objektu. Je zřejmé, že tak lze zaznamenat jen prostorovou informaci o objektu, který leží ve výhledu skeneru. K tomu, aby se rychlým způsobem naskenoval celý objekt, se u skenování menších objektů často využívá otočné desky, na kterou se objekt položí. Po jednom skenu se tato deska pootočí a proces skenování se opakuje až do té doby, dokud se objekt nenaskenuje celý. Jelikož má skenovací systém informace o tom, o kolik stupňů se tato deska otočila, ubývá následně komplikací v postprocessingové fázi registrace, zarovnání a integrace jednotlivých skenů (viz kapitola proces skenování a postprocessing).



Obr. 3. Princip aktivní triangulace využívající laserový zdroj a fotoaparát (vlevo) a zrcadlo (vpravo). Zdroj: autor podle Loriot 2009, Fig. 2.8; Morel 2005, Fig. 2.26; Sniderman 2013, Fig. 9.



Obr. 4. Rozdělení triangulační aktivních skenerů podle světelného zdroje. Bodový (vlevo), liniový, jinak také pásový (uprostřed) a plošný světelný zdroj (vpravo). Zdroj: autor podle Morel 2005, Fig. 2.27.



Obr. 5. Ukázka zařízení využívajících triangulace. CMM přístroj CM Nikon HN-6060 (vlevo) a hlavice Nextec WIZprobe (vpravo). Zdroj: NV 2013 (vlevo), Nextec 2001 (vpravo).



Obr. 6. Ukázka ručních a ramenných 3D skenerů. Nikon Focus Handeld (vlevo), MicroScan 3D (uprostřed) a Artec Eva (vpravo). Zdroj: NV 2013 (vlevo), GmbH 2012 (uprostřed), Group 2013 (vpravo).

Produkt		Rychlost (body/sec)	Hustota bodů	Field Size	Přesnost (accuracy)	Dosah (m) / working distance	Rozlišení čipu	Zdroj
Breuckmann	optoTOP					5 m		Boehler et al. 2001
Digibotics	Digibot					1.8 m		Boehler et al. 2001
GOM mBH	ATOS					1.6 m		Boehler et al. 2001
	ATOS Compact Scan 2M	-	0.021 – 0.615 mm	-	-	450 – 1200 mm	2 x 2000 000 pixelů	ATOS 2014 GOM 2014 MCAE 2014
	ATOS Compact Scan 5M	-	0.017 – 0.481 mm	-	-	450 – 1200 mm	2 x 5 000 000 pixelů	ATOS 2014 GOM 2014 MCAE 2014
ABW GmbH	Kombi-640					1.5 m		Boehler et al. 2001
MEL Mikroelektronik GmbH	M2D					1.2 m		Boehler et al. 2001
Minolta	VI					1.2 m		Boehler et al. 2001
3D Digital Corporation	Model 100, 200, 300					1 m		Boehler et al. 2001
Cyber F/X	Various					ca. 1 m		Boehler et al. 2001
Cyberware	Various					ca. 1 m		Boehler et al. 2001
Intelligent Automation	4DI					ca. 1 m		Boehler et al. 2001
Laser Design	DS, RE, PS					1 m		Boehler et al. 2001
Vitronic	Vitus					ca. 1 m		Boehler et al. 2001
Polhemus	FastScan					0.8 m		Boehler et al. 2001
Steinbichler Optotechnik	Various					0.8 m		Boehler et al. 2001
Shape Grabber	Various					0.7 m		Boehler et al. 2001
SCAN technology	Various					0.6 m		Boehler et al. 2001
DLR German Aerospace Center	Laser Range Scanner					0.3 m		Boehler et al. 2001
INO	3D Laser Profiling Sensor					0.3 m		Boehler et al. 2001
INTECU	Cylan					0.3 m		Boehler et al. 2001
Nextec	Hawk					0.3 m		Boehler et al. 2001
Roland	Picza					0.3 m		Boehler et al. 2001
3D Scanners, Nvision	ModelMaker					0.2 m		Boehler et al. 2001
Kréon	KLS					0.2 m		Boehler et al. 2001
3DMetrics	3DFlash !					0.1 m		Boehler et al. 2001
Hymarc	Hyscan 45c					0.1 m		Boehler et al. 2001
Perceptron	Contou Probe					0.1 m		Boehler et al. 2001
NextEngine	NextEngine 3D Scanner (2020i)	50 000		5.1" x 3.8" (Macro) 13.5" x 10.1" (Wide)	0.005 (Macro) 0.015 (Wide)	neudáno	400 DPI (Macro) 150 DPI (Wide mode)	Nextengine 2014

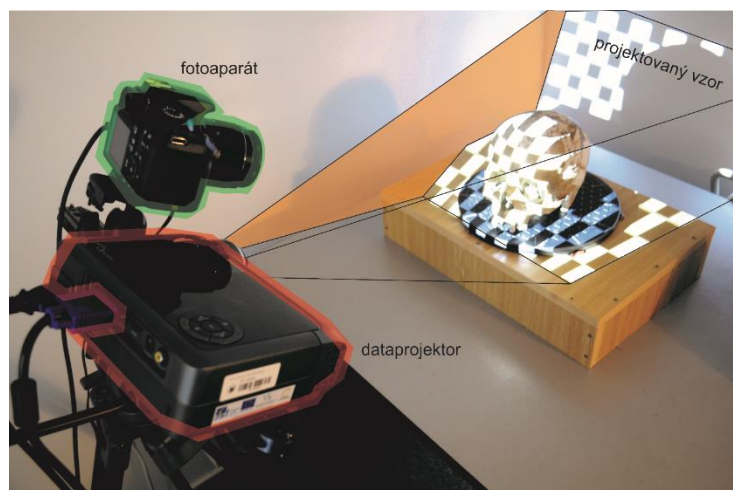
Tab. 1. Srovnání některých triangulačních aktivních skenerů. Zdroj: Autor.

Strukturované světlo (SL/SLS systémy)

V posledních letech se jako technologie akvizice třírozměrných dat rozmohla metoda strukturovaného světla. Na rozdíl od skenerů diskutovaných dříve u této technologie nemusí světelný zdroj odpovídat laserovému paprsku, teoreticky se může jednat o libovolný zdroj světla (Salvi 2004).

Celý skenovací systém sestává ze tří hlavních prvků (obr. 7, 11). Prvním je projektor, který na skenovaný objekt vrhá světelný motiv, druhý optické či optická zařízení (většinou kamera s CCD či CMOS čipem), které tento motiv zachycují a poslední je „speciální“ software, který zaznamenaný obraz vyhodnocuje za pomoci triangulace (D'Apuzzo 2006, Lathuilière 2006, Rodrigues 2006, Zhang 2010).

K projektování vzoru na skenovaný objekt či scénu se tradičně využívá LCD (Liquid Crystal Display) a LCoS (Liquid Crystal on Silicon) projektorů. LCD projektory trpí hlavně dvěma nedostatky. První z nich je, že v některých případech může docházet ke „sloučení“ světla dopadajícího na dva sousední pixely.



Obr. 7. 3D skener EOS Scan. Zdroj: autor.



Obr. 8. Motiv linie projektovaný na objekt. Zdroj: autor.



Obr. 9. Ukázka projekce vzorů při skenování. Zdroj: autor

Druhý nedostatek tkví ve variacích intenzit světla při použití odlišných hloubek barev. Proto se v dnešní době pro projekci využívá speciálních DLP, resp. DMD projektorů (Digital Mirror Device), jejichž základem je čtyřúhelníkový DLP/DMD čip tvořený z více jak 2 miliónů mikroskopických zrcadel schopných natáčet se rychlosti několik tisíckrát za sekundu (Incorporated 2013, Kujawinska 2012, Lathuilière 2006, Li 2013, Mazaheri 2008, Olesen 2012, Salvi 2004, Song 2008).

Jako nejjednodušší příklad toho, na jakém zařízení funguje, si lze představit rovný světelný liniový paprsek vyslaný projektozem na objekt. Je zřejmé, že se tento rovný paprsek bude na předmětu deformovat, jinak řečeno paprsek se na objektu „zaoblí“ (obr. 8). Kamera tento obraz nasnímá a předá ho do speciálního softwaru, jehož úkolem je geometrická rekonstrukce povrchu tvaru.

Pro urychlení procesu se na předmět většinou neprojektuje jen paprsek, nýbrž série různých vzorů (obr. 9). Může se jednat například o jednoduchou mřížku, vzor tvořený pásy generovaný pomocí laseru, anebo tzv. modrého, zeleného nebo jiného světla. Motiv může nabývat i jiných forem (tečky, body, mřížka, kolečka atd.), generovanými v různém barevném provedení (obr. 11:vpravo). Obraz je přitom kodifikován jedním z četných způsobů např. pomocí *binárního zápisu*, *Grayova kódu*, *M-array*, anebo zcela jiným způsobem (pro další z metod kodifikace viz Battle 1998, Salvi 2004, Song 2008)³. Vzor se po předmětu nemusí posouvat, může se jednat například o projekci čím dál tím „jemnějších“ pásů (Blais 2004, Fechteler 2007, Mazaheri 2008, Richardson 2012).

Odpověď na otázku proč se k projektování používá vzorů, je jednoduchá. Systém se za jejich pomoci snaží kodifikovat korespondující body na 2D obraze projektoru a kamery, jež odpovídají jednomu bodu na skenovaném objektu. Na obrázku 7 vlevo je například zřejmé, že bod na nose skenované hlavy odpovídá určitému pixelu na obraze projektoru a určitému pixelu obrazu kamery.

Skenování obvykle probíhá tak, že se nejdříve zjistí vnitřní parametry kamery a projektoru, stejně jako jejich vzájemná pozice v prostoru. Údaje o hloubce objektu se vypočítávají za pomoci průniku linií procházejících ohnisky obou zařízení a odpovídajícími body na obrazech kamery a projektoru. Výpočet hloubkové informace každého bodu tak probíhá za pomoci triangulace a v zásadě je analogický principu, který je využíván ve *stereovizi* (viz kapitola pasivní akvizice, obr. 1; Fechteler 2007, Gupta 2012, Huang 2007, Li 2013, Turk a Levoy 1994).

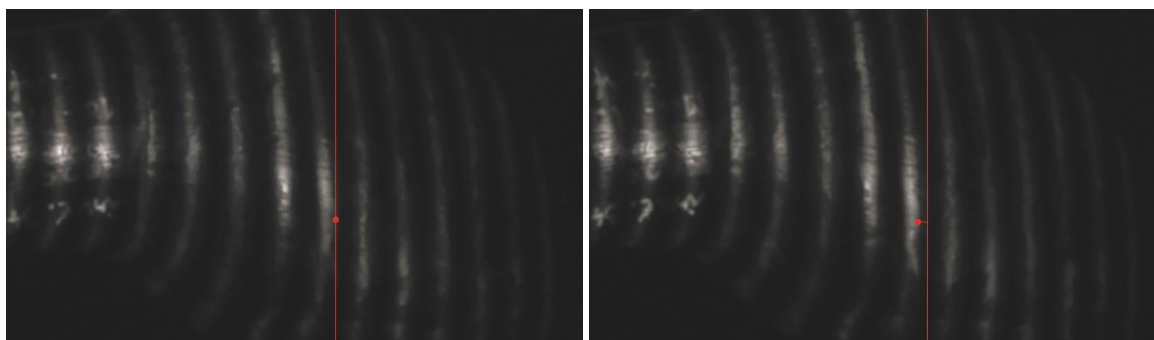
Skenery využívající strukturovaného světla jsou v dnešní době nejvíce využívány pro skenování malých a středně velkých objektů. Je to dáno hlavně jejich přesností, rychlostí a relativně nízkými pořizovacími náklady. Velkou výhodou je také to, že je v jednom okamžiku možno naskenovat velkou plochu objektu, stejně jako jeho texturu. Kvalita výstupů 3D skenerů využívajících strukturovaného světla je závislá hlavně na optických vlastnostech systému - od rozlišení, kvality, šířky pásů a vzdálenosti posunu vzoru určenými projektozem až po kvalitu fotografií danou obrazovým senzorem (kamerou, fotoaparátem).

Limitace strukturovaného světla je hlavně ve velikosti předmětů, které lze těmito systémy skenovat. Závisí přitom ve velké míře na výkonu projektoru, respektive na vzdálenosti mezi námi a skenovaným předmětem. Projektor totiž musí být schopen na objekt projektovat čím nejostřejší motiv, čehož lze

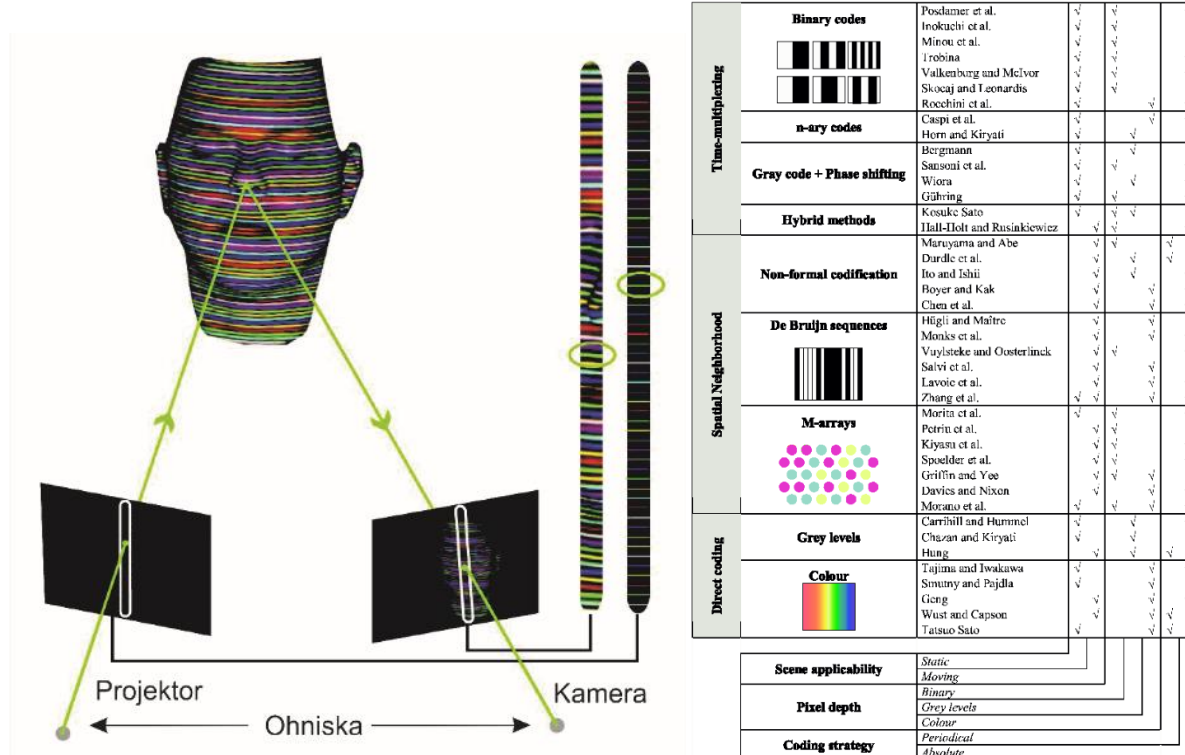
³ Jiným případem projekce může být tzv. *Moiré projekce* využívající zobrazení dvou mřížek promítaných dvěma dataprojektory.

velice těžko dosáhnout na větší vzdálenosti. Skenery využívající strukturovaného světla jsou rovněž velmi citlivé na okolní světlo. Z tohoto důvodu je při skenování vhodné skenovat v zatemněných podmínkách. Kvalita výstupů je rovněž závislá na barvě projektovaného motivu, přičemž kvalita skenů klesá, jestliže je povrch objektu barevný.

Další zdroje potenciálních chybných dat se týkají i jiných optických aktivních skenerů. Chybná data mohou vzniknout tehdy, když projektované světlo dopadá na část objektu, které je paralelní se světelným zdrojem. V tomto případě vidí obrazový senzor jen slabou a navíc deformovanou verzi projektovaného motivu. Další chyby mohou vzniknout, když na skenovaný objekt dopadne jen část projektovaného paprsku (např. jen polovina jeho šířky). Je to proto, že systém špatně detekuje místo dopadu na objektu a navíc předpokládá, že veškerá šířka paprsku je viditelná (Turk a Levoy 1994, Voisin et al. 2007, Zaimovic-Uznovic a Lemes 2010).



Obr. 10. Zobrazení jednoho bodu na dvou rozdílných snímcích. Zdroj: autor.



Obr. 11. Princip metody strukturovaného světla (vlevo) a různé druhy vzorů strukturovaného světla s aplikacemi (vpravo). Zdroj: upraveno podle Fechteler 2007, Fig. 5 (vlevo), Salvi 2004 (vpravo).

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

- Geomagic (2013). "3D Scanners. A guide to 3D scanner technology." Poslední náhled: 2013/10/13, <http://www.rapidform.com/3d-scanners/>.
- Geosystems, L. (2013). "HDS Laser Scanners & SW." Poslední náhled: 2013/10/09, http://www.leica-geosystems.com/en/HDS-Laser-Scanners-SW_5570.htm.
- GOM (2014). "ATOS Compact Scan - The compact class of scanning." Retrieved 2014/04/17, 2014, from <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-compact-scan.html>.
- Group, A. (2013). "Artec Eva." Poslední náhled: 2013/08/29, <http://www.artec3d.com/fr/hardware/artec-eva/>.
- Incorporated, T. I. (2013). "How DLP Technology Works." Poslední náhled: 2013/09/02, <http://www.dlp.com/technology/how-dlp-works/default.aspx>.
- MCAE (2014). "ATOS Compact Scan." Poslední náhled: 2014/04/17, <http://www.mcae.cz/atos-compact-scan>.
- NV, N. M. (2013). "Focus Scan Handheld – fast, easy and accurate data capture for portable laser scanning." Poslední náhled: 2013/08/29, http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Laser-Scanning/Point-cloud-software/Focus-Handheld.
- NV, N. M. (2013). "HN6060 Multi-Sensor Metrology System." Poslední náhled: 2013/08/29, http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Laser-Scanning/High-accuracy-scanning/HN-6060-Multi-sensor-metrology-systems.
- Sniderman, D. (2013). "3D Scanning 101. How to choose digitizing technologies." Poslední náhled: 2013/05/03, <http://www.deskeng.com/articles/aaazje.htm>.

Literatura:

- Battle, J. M., E. – Salvi, J. (1998). "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey." *Pattern Recognition* **31**(7): 963-982.
- Bernardini, F. and H. Rushmeier (2002). "The 3D Model Acquisition Pipeline." *Computer Graphics Forum* **21**: 149-172.
- Besl, P. J. (1988). "Active, optical range imaging sensors." *Machine Vision and Applications* **1**: 127-152.
- Blais, F. (2004). "Review of 20 Years of Range Sensor Development." *Journal of Electronic Imaging* **13**(1): 231-240.
- Boehler, W., et al. (2001). The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. *Proceedings of the CIPA Symposium at Potsdam University, Germany*.
- Boehler, W. and A. Marbs (2002). *3D Scanning instruments: an introduction*. CIPA – ISPRS workshop on scanning for cultural heritage recording, Corfu, Greece.
- Clark, J., et al. (1995). *Image acquisition using fixed and variable triangulation*. IEEE 5th Int. Conf. Image Processing, Edinburgh.
- D'Apuzzo, N. (2006). Overview of 3D surface digitization technologies in Europe. *Three-dimensional image capture and applications VI*. P. L. a. M. T. B.D. Corner, eds. San Jose, USA. **6056**.
- Fechteler, P.-E., P. - Rurainsky, J. (2007). "Fast and high resolution 3D face scanning." *ICIP* **3**: 81-84.
- GmbH, R. (2012). "MicroScan: High Quality and Affordable 3D Laser Scanning." *White paper*.
- Gupta, M. A., A. – Veeraraghavan, A. Narasimhan, S. G. (2012). A practical approach to 3D scanning in the presence of interreflections, subsurface scattering and defocus. *International Journal of Computer Vision*.
- Huang, C.-H. (2007). "An Improved Method for the Binarization in Structured Light 3D Scanning Systems." *Journal of Lunghwa University of Science and Technology* **24**: nestránkováno.
- Kujawinska, M.-P.-A., R. - Zaperty, W. (2012). "LCoS spatial light modulators as active phase elements of full-field measurement system and sensors." *Metrology and measurement systems* **19**(3): 445-458.
- Lathuilière, A.-M., A. - Voisin, Y. - Marzani, F. S. - Gouton, P. (2006). "Stereoscopic system for 3D reconstruction using multispectral camera and LCD projector." *The Imaging Science Journal* **54**(1): 19-28.

- Li, S. Z. and A. K. Jain (2009). Encyclopedia of Biometrics, Springer.
- Li, W.-F., S. - Duan, S. (2013). "3D shape measurement based on structured light projection applying polynomial interpolation technique." Optik **124**: 20-27.
- Loriot, B. (2009). Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.
- Mazaheri, M.-M., M. (2008). "3D Modeling using structured light pattern and photogrammetric epipolar geometry." The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37**(B3b): 87-90.
- Miyazaki, D., et al. (2002). "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths." Journal of the Optical Society of America A **19**(4): 687-694.
- Morel, O. (2005). Environnement actif pour la reconstruction tridimensionnelle de surfaces métalliques spéculaires par imagerie polarimétrique. Instrumentation et Informatique de l'Image. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.
- Nextec (2001). "WIZprobe." White paper.
- Nextengine, I. (2014). "NextEngine. Dream. Shape. Scan." White paper.
- Olesen, O. V.-P., R. R. - Højgaard, L. - Roed, B. - Larsen, R. (2012). "Motion Tracking for Medical Imaging: A Nonvisible Structured Light Tracking Approach." IEEE Transactions on medical imaging **31**(1): 79-87.
- Richardson, E. (2012). "Green light for 3D scanning." Automotive Industries **190**(4): 72.
- Rodrigues, M.-R., A. - Alboul, L. - Brink, W. (2006). "3D Modelling and recognition." WSEAS Transactions on Information Science and Applications **3**(11): 2118-2122.
- Salvi, J.-P., J. - Batlle, J. (2004). "Pattern codification strategies in structured light systems." Pattern Recognition **37**(4): 1-26.
- Song, Z.-C., R. (2008). "Use of LCD Panel for Calibrating Structured Light-based Range Sensing System." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement **57**(11): 2623-2630.
- Turk, G. and M. Levoy (1994). "Zipped Polygon Meshes from Range Images." In Proceedings of SIGGRAPH'94: 311-318.
- Voisin, S., et al. (2007). "Study of ambient light influence for threedimensional scanners based on structured light." Optical Engineering **46**(3).
- Vukainović, N., et al. (2010). "The Influence of Surface Topology on the Accuracy of Laser Triangulation Scanning Results." Journal of Mechanical Engineering **56**(1): 23-30.
- Wallace, A. M., et al. (2001). "3D Imaging and Ranging by Time-correlated Single Photon Counting." Computing and Control Engineering Journal **12**(4): 157-168.
- Yu, F., et al. (2010). Three-Dimensional Model Analysis and Processing, Springer.
- Zaimovic-Uznovic, N. and S. Lemes (2010). Influences of Surface Parameters on Laser 3D Scanning. 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, September 5-9.
- Zhang, S. (2010). "Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques." Optics and laser engineering **48**: 149-158.

PASIVNÍ AKVIZICE 3D DAT

Samostatnou skupinou metod jsou ty, které k rekonstrukci 3D objektů využívají údaje o jejich povrchu získané z hloubkové informace jejich obrazu. Tyto metody jsou často označovány jako „Shape from X“, kde X odpovídá způsobu, jakým je obdržena hloubková informace o objektu či scéně (Bulthoff 1991, Pizlo 2010).

Skupinu metod „Shape from X“ lze rozdělit na (Loriot 2009):

- **Shape from Stereo** – rekonstrukce za pomoci homologních prvků
- **Shape from Shading** – rekonstrukce pomocí světelné intenzity
- **Shape from Siluets** – rekonstrukce pomocí obrysu
- **Shape from Motion** – rekonstrukce pomocí pohybu
- **Shape from Texture** – rekonstrukce pomocí textury
- **Shape from Focus** – rekonstrukce pomocí ohniska kamery
- **Shape from Polarization** – rekonstrukce pomocí polarizace

Nutno zmínit, že podle Matsuyama et al. (2012), některé z algoritmů vypočítávají jen normály povrchu bez hloubkové informace a měly by být pojmenovány spíše jako „*pure shape without position from X*“, zatímco jiné algoritmy měří 2.5D hloubkové hodnoty bodů viditelných na povrchu objektů a měly by být nazývány „*depth from X*“, což do jisté míry souhlasí i s prvotním konceptem **2.5D Sketch** od D. Marr a H. K. Nishishary. Jen pro zajímavost, je to právě D. Marr, kdo v roce 1982 poprvé definoval koncept „Shape from X“ (Bennet a Vuong 2006, Bulthoff 1991, Matsuyama et al. 2012).

Shape From Stereo / Stereoskopická vize / Stereovize

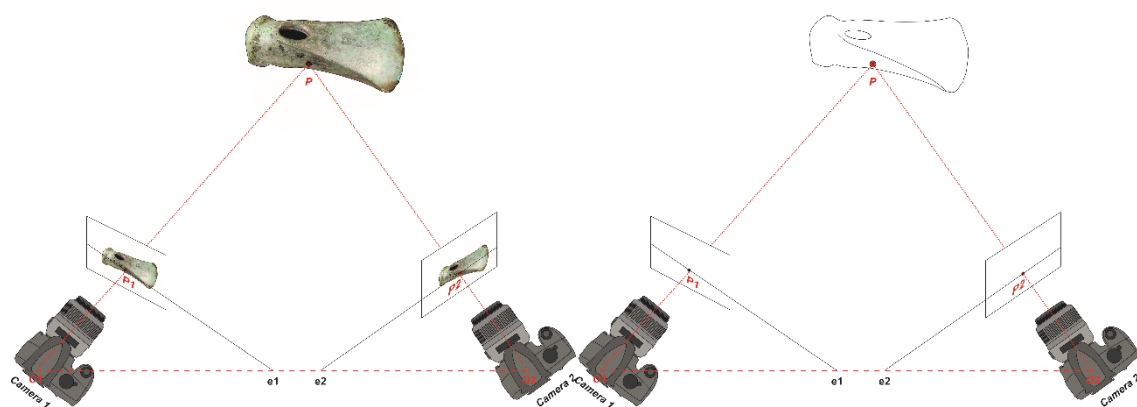
Stereovize interpretuje rozdíly mezi dvěma či více obrazy jedné scény a počítá její hloubku pomocí triangulace, respektive tzv. *epipolární geometrie*. Funguje na stejném principu jako dvě lidské oči. K určení stereo-disparity a následné hloubky využívají několik optických senzorů, například dva fotoaparáty. Z tohoto důvodu se někdy mluví také o tzv. binokulární vizi (Hu a Stockman 1989, Chamzas et al. 2008, Koch et al. 2012).

Stereovizi je možné použít, pokud jsou předem známy projekční geometrie obrázků. To znamená, že musí být známy vnitřní kalibrační parametry kamery (ohnisková vzdálenost, bod hlavní lokace a koeficient distorze čočky) a poloha kamery. V nedávné době byly publikovány i modifikace, které dovolují získat 3D model i ze systémů, které jsou nekalibrované (Koch et al. 2012, Verhoeven et al. 2012).

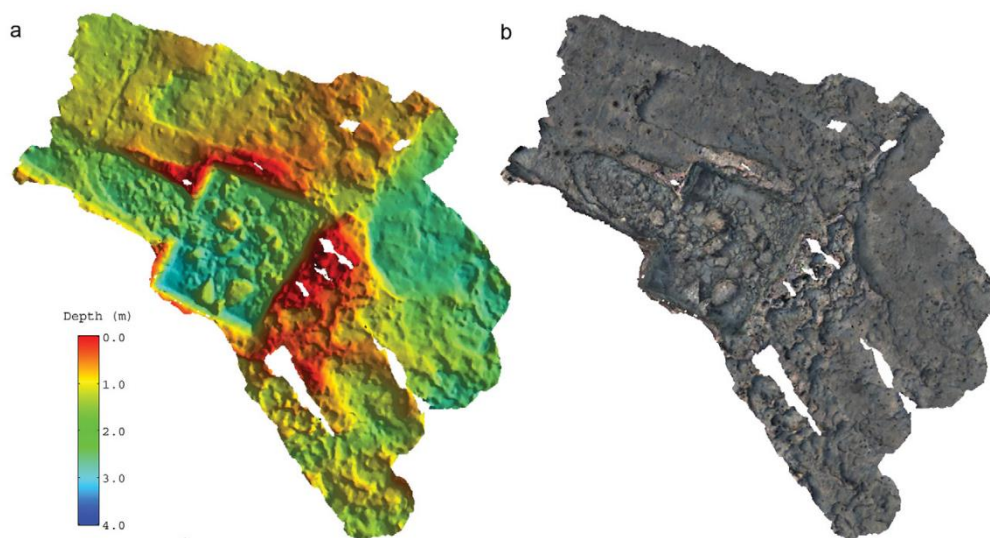
Princip stereovize lze vysvětlit na příkladu, kdy určujeme polohu jednoho bodu na objektu za pomoci dvou kamer (obr. 1: vlevo). Tento bod označíme jako P , kamery jako $Camera1$ a $Camera2$. K tomu, aby výpočet proběhnul správně, je nejdříve nutné vypočítat distorzi obrazu a určit přesnou polohu mezi oběma kamerami. Tomuto procesu se říká kalibrace a probíhá za pomoci kalibrační mřížky. Dále je u obou kamer nutné zjistit parametry a hlavně centra optik, které označíme jako $O1$ a $O2$. Je zřejmé, že po zachycení snímku je obraz bodu P projektován na rovinu obrazu kamer v bodech $P1$ a $P2$. Tyto body leží na tzv. epipolárních liniích ($e1$, $e2$). Nyní se podívejme na problém obráceně (obr. 1: vpravo). Známe-li jen body $P1$ a $P2$, které se vyskytují na snímcích, stejně jako polohu kamer a centra jejich optik ($O1$ a $O2$), tak můžeme polohu bodu P určit jako průsečík os $P1 O1$ a $P2 O2$ (Hartley a Zisserman 2004, Instruments 2013, Loriot 2009, Xu a Zhang 1996).

Hlavní problém při vypočítávání koordinát leží v určení korespondenčních bodů na dvou obrázcích, jinak řečeno je potřeba nalézt na dvou obrázcích pixely, které odpovídají projekci stejného bodu reálného světa. K jejich nalezení lze použít celé řady metod - jen pro ilustraci, *D. Scharstein* a *R. Szeliski* jich v roce 2002 ve svém článku o taxonomii korespondenčních algoritmů uvádí 34. Metody spárování dvojic prvků na obrázcích lze v obecné rovině rozdělit na **globální** a **lokální**.

Globální metody řeší problém optimalizace na základě celého obrázku, anebo jeho jednotlivých linií. Tyto přístupy jsou komplexnější, přesnější, ale také výpočetně a časově náročnější. **Lokální metody** jsou založeny na malém počtu pixelů, které obklopují vybranou oblast zájmu. Jsou obecně jednodušší a výsledky lze získat v reálném čase. Jejich nevýhodou je ovšem značná nepřesnost. K usnadnění procesu hledání korespondence se někdy používá aktivních světelných zařízení, které na povrch objektu projektují vysoce kontrastní světelné vzory. Proto se takovéto metody nazývají **Active Stereo** (Aissaoui et al. 2012, Matsuyama et al. 2012, Sanchez 2008, Scharstein a Szeliski 2002).



Obr. 1. Binokulární stereovize. Definovaný bod na objektu (P), centra projekce ($O1$, $O2$), projekce ($P1$, $P2$) a epipolární linie ($e1$, $e2$). Zdroj: autor podle Aissaoui et al. 2012, Brandou 2008, Instruments 2013, Lorient 2009, Pautet et al. 1997.



Obr. 2. Ukázka hloubkové mapy (a) a meshe s texturou (b) komorového hrobu v Pavlopetri. Zdroj: Henderson et al. 2013.

Stereovize se používá například ve fotogrametrii či rekonstrukci reliéfu na základě leteckých, satelitních či jiných snímků (obr. 2). Přesnost výpočtu koordinát roste se vzrůstající vzdáleností mezi základnami kamer, resp. mezi jejich vzájemnou vzdáleností, přičemž bohužel vzrůstá i okluze, tzn. vzájemně neviditelná plocha objektu. Dalšími faktory, které negativně ovlivňují výpočet korespondenčních bodů, jsou různé reflexe povrchu objektu/scény na rozdílných snímcích a světelné prostředí (Loriot 2009, Sanchez 2008).

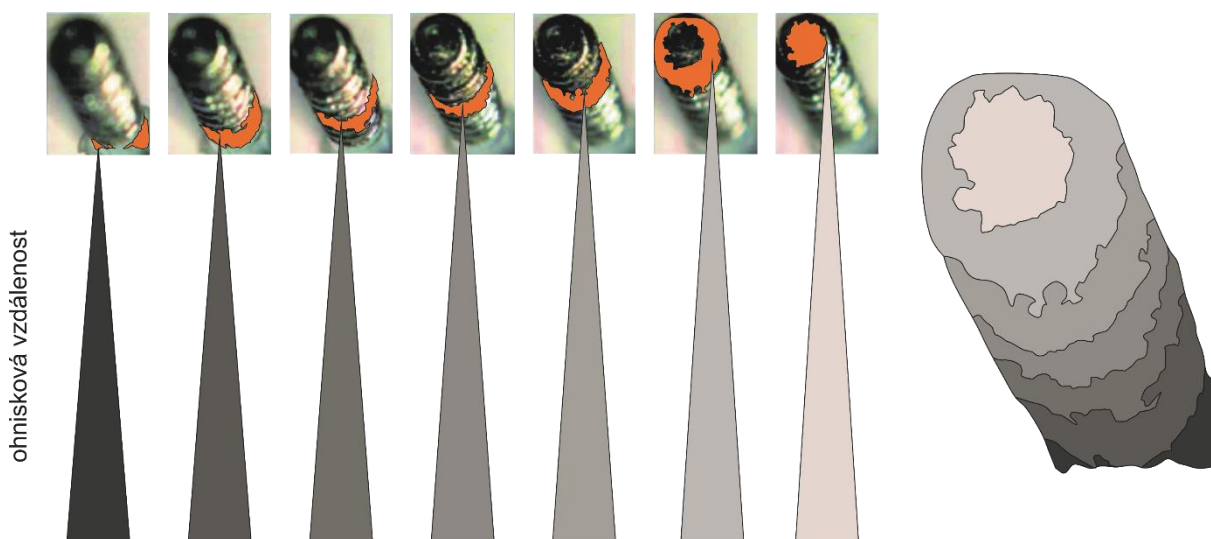
Stereovize dává možnost velice přesné rekonstrukce 3D objektu, navíc, pokud již byly nalezeny korespondující body na vnějším povrchu objektu, je možné získat povrch konkávních částí (Matsuyama et al. 2012).

Shape from (De)Focus (SfF, SfD)

Metody využívající Shape from Defocus využívají změny zaostření kamery, čímž se mění geometrie jejich čoček. Změny parametrů optiky, resp. zaostření jsou totiž přímo spjaté s hloubkovou informací o objektu.

Skenovaný předmět je několikrát vyfotografován jednou kamerou z jednoho místa, pokaždé se stejným zorným polem, ale s rozdílným nastavením ohniskové vzdálenosti (obr. 3: vlevo). Poté se na těchto fotografiích předmětu identifikují místa, na nichž byla kamera zaostřena. Jelikož může být z ohniskové vzdálenosti určena vzdálenost roviny ostrosti od centra optiky, tak může být vypočítána vzdálenost kamery a oblasti, na kterou je zaostřeno (Nayar a Nakagawa 1994, Zurich 2012).

Kvalita výstupů těchto skenerů záleží hlavně na kvalitě a nastavení fotoaparátu, hloubce ostrosti a geometrii čoček. Skenovány přitom mohou být jen ty scény a předměty, které mají texturu. Hlavní výhodou této metody jsou především nízké pořizovací náklady a menší hardwarová náročnost a rovněž možnost získání informace o povrchu transparentních objektů, dokonce i těch mikroskopických (Bellocchio et al. 2012, Miyazaki a Ikeuchi 2005, Ohara et al. 2003).



Obr. 3. Shape from Focus. Fotografie jediné scény s rozdílnou ohniskovou vzdáleností (vlevo) a výsledný hloubkový obraz té samé scény (vpravo). Zdroj: autor podle Zurich 2012.

Shape/Structure from Motion (SfM)

Ze sekvence dvoudimenzionálních snímků lze rovněž vytvořit 3D model pomocí pohybu. Ten totiž může být reprezentován v rovině obrazu jako vektorové pole posunu. Měřením tohoto vektorového pole je možné určit hloubkovou mapu a najít strukturu ve sledovaném objektu. Vektorové pole může být totiž aproximováno na základě tzv. „odhadu pohybu“ určitých prvků nacházejících se na několika snímcích jednoho objektu či scény (Brandou 2008).

Obecný princip metody je založen na tom, že lokace 2D bodů na jednotlivých obrázcích je určena jejich koordinátami v třídimenzionálním prostoru, vzájemným vztahem 3D pohybu mezi kamerou a scénou a vnitřní geometrií kamery (Kim et al. 2008).

Samotný proces akvizice snímků u SfM, respektive jednotlivých jejich podtřídy, je rozdílný. Může se jednat o *kalibrované stereo* (*Calibrated Stereo*), kde je hloubková mapa spočítána ze dvou snímků scény a pohyb kamery je tedy laterální (obr. 4: vlevo), jiná možnost je ta, že je objekt položen na otočné desce a je jím otáčeno vždy o určitý úhel (obr. 4:2. zleva). Další možností může být to, že kamera kolem objektu nebo scény krouží (obr. 4:3. zleva) či je kamerou pohybováno zcela libovolně (obr. 4: vpravo; Brandou 2008, Chellappa et al. 1999).

Snímky scény jsou získány skoro vždy pomocí jedné kamery. Nejdříve se z několika homologních bodů vyskytujících se na několika obrázcích objektu automaticky zjistí parametry a poloha fotoaparátu. Poté dochází k automatické či manuální definici tzv. *feature points*, což jsou body, které by si měly na jednotlivých snímcích korespondovat (obr. 5: vlevo, obr. 6). Právě „pohyb“ těchto *feature points* na dvou následujících snímcích dává těmto metodám název. „Změnu polohy“ těchto bodů je možné určit pomocí *optical flow analysis*, *epipolární geometrií*, *bundle adjustmentem*, *singular value decomposition*, *faktORIZACÍ*, či jinými metodami (Brandou 2008, Fidaleo a Medioni 2007, Poelman a Kanade 1997, Ying et al. 2001, Matsuyama et al. 2012).

Poté je za odhadem kamery a rektifikací obrázků provedena hustá korespondence bodů (viz níže) díky níž je vypočítána hloubková mapa, která může být triangulována (obr. 5:2. zleva) a doplněna texturou (obr. 5:vpravo; Fidaleo a Medioni 2007).

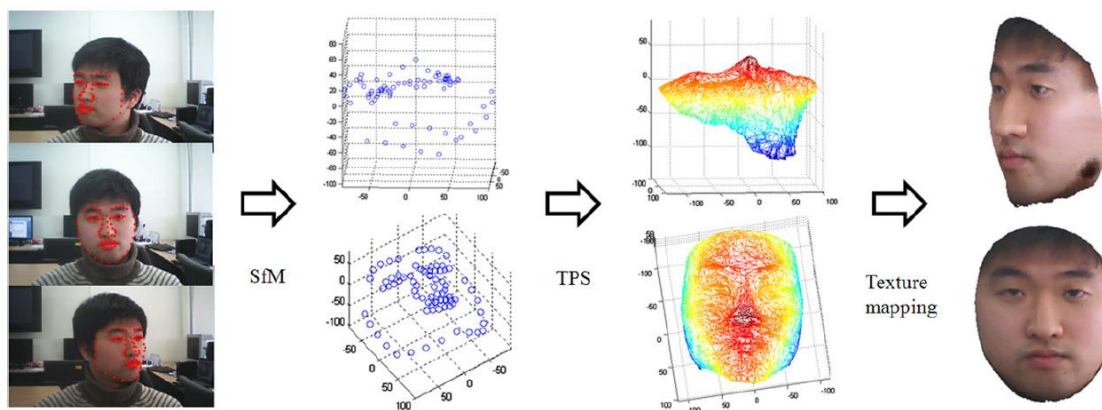
Podle hustoty 2D prvkových bodů (*feature points*) na obrázcích mohou být metody korespondence rozděleny na tzv. *metody založené na řídké a husté korespondenci* (*dense correspondence-based methods a sparse correspondence-based methods*), obě se ovšem mohou při kalkulaci vzájemně kombinovat. Metody husté korespondence nalézají a rekonstruují 3D model z velkého množství odpovídajících bodů na obrázcích, metody řídké naopak z určitého počtu význačných bodů. Nevýhody husté korespondence jsou hlavně ty, že některé povrchy mají texturu s nevýraznými homologními body a při výskytu chybných bodů navíc dochází ke tvorbě velmi hrubého modelu. Díky tomu, že hlavně v počátku bylo možné získat 3D koordináty jen malého počtu bodů, byla tato metoda 3D akvizice nazývána „Structure“ from Motion (Chellappa et al. 1999, Lee et al. 2011, Zhang et al. 2003).

Jedním z problémů, který při fázi korespondence nastává, je to, že body, které lze spatřit na jednom obrázku nelze spatřit na obrázku následujícím. Jednou z možností, jak tento problém vyřešit je vytvoření počátečního tvaru založeném na všech viditelných bodech a postupně tento hrubý model iterativně zpřesňovat minimalizováním tvarových odchylek viditelných, popřípadě odhadovaných bodů (Lee et al. 2011).

Výhoda této metody např. oproti *stereovizi*, je jednodušší vizuální nalezení korespondence mezi jednotlivými pixely, díky čemuž je možné predikovat pohyb v následujících snímcích. Dalším plusem je fakt, že je *strukturou z pohybu* možné získat rekonstrukci transparentních objektů. Nevýhodou této metody je pak velká citlivost na šum v obrázcích a na světelné podmínky, za kterých se objekty fotografují. Rekonstrukci rovněž stěžuje odrazivost některých povrchů. V dřívější době byla tato metoda využívána hlavně pro scény a objekty s geometrickými pravidelnostmi (zdi, podlahy atd.), v dnešní době lze získat kvalitní 3D model i z o mnoho komplexnějších tvarů (obr. 7-8; Ben-Ezra a Nayar 2003, Brandou 2008, Eren et al. 2009, Matsuyama et al. 2012, Szeliski a Torr 1998).



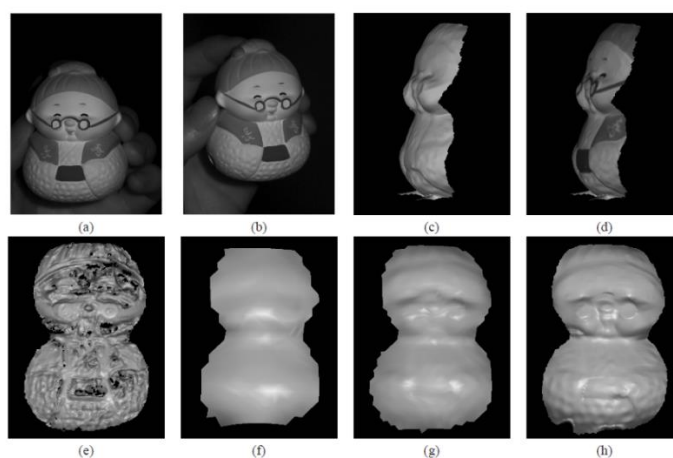
Obr. 4. Různé možnosti akvizice snímků. Zdroj: autor.



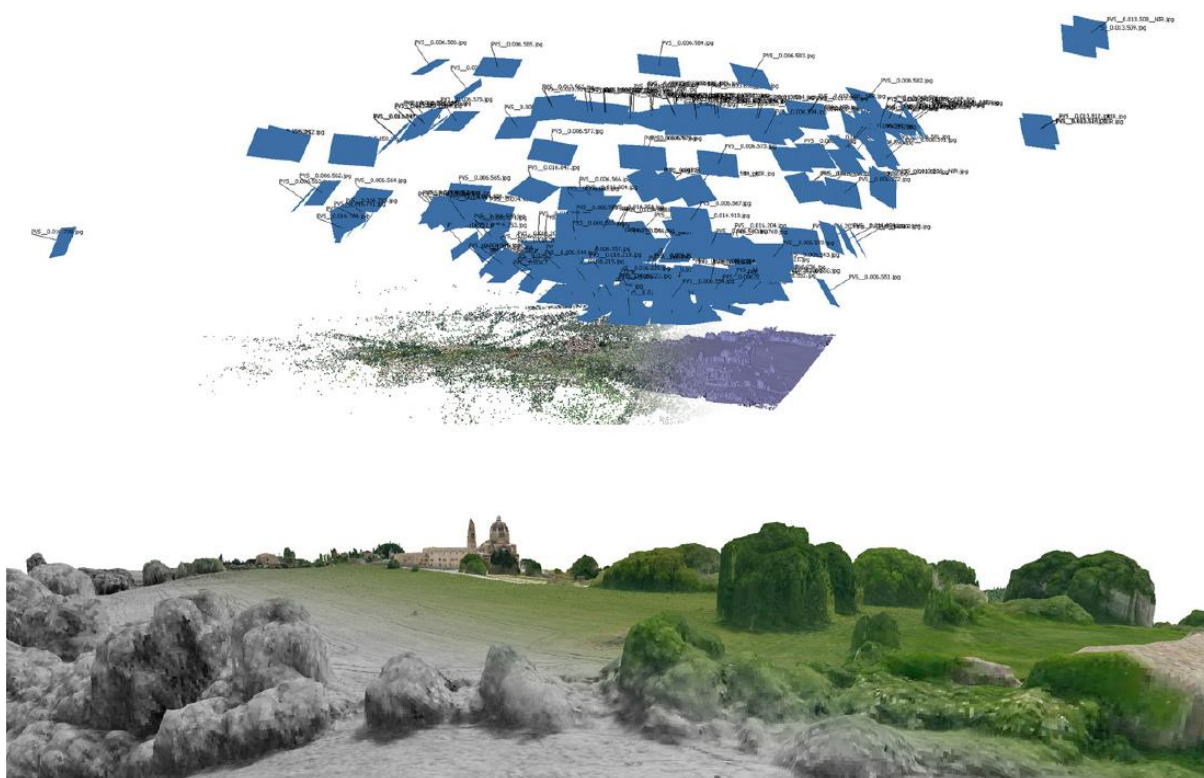
Obr. 5. Proces rekonstrukce tváře pomocí SfM podle Lee et al. (2011). Zdroj: Lee et al. 2011.



Obr. 6. Rozdělení feature points. Sparse feature points (*vlevo*) a dense feature points (*vpravo*) na příkladu Lenny. Zdroj: autor podle Li et al. 2000, Wikipedia 2013.



Obr. 7. Ukázka 3D rekonstrukce pomocí SfM. Dva ze 137 snímků použitých k výpočtu modelu (*a, b*) a různé druhy zobrazení modelu (*c-h*). Zdroj: Zhang et al. 2003.



Obr. 8. Rekonstrukce lokality Trea (Itálie) z 203 leteckých fotografií pomocí SfM. Zdroj: Verhoeven et al. 2012, Fig. 5.

Některé ze softwarů založených na SfM jsou volně přístupné na internetu. Jedná se o *Microsoft Photosynth* anebo *Bundler*. Komerční variantou, avšak relativně dostupnou, je například *Agisoft PhotoScan* (Agisoft 2013, Corporation 2013, Snavely 2013, Snavely et al. 2006, 2007, Verhoeven et al. 2012).

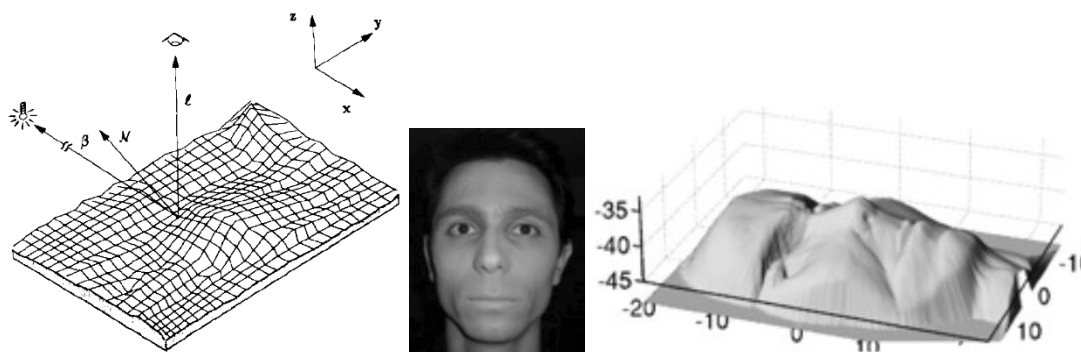
Shape from Shading (SfS)

Metoda Shape from Shading byla vyvinuta již v 70. letech B. K. P. Hornem. 3D obraz je vytvořen pomocí graduální variace stínu na obrázku. Jas obrázku totiž závisí na čtyřech hlavních faktorech, jenž jsou orientace světelného zdroje a objektu, lokalizace kamery a odrazových vlastností objektu (Dovgand a Basri 2004, Prados a Faugeras 2006, Yang a Han 2007).

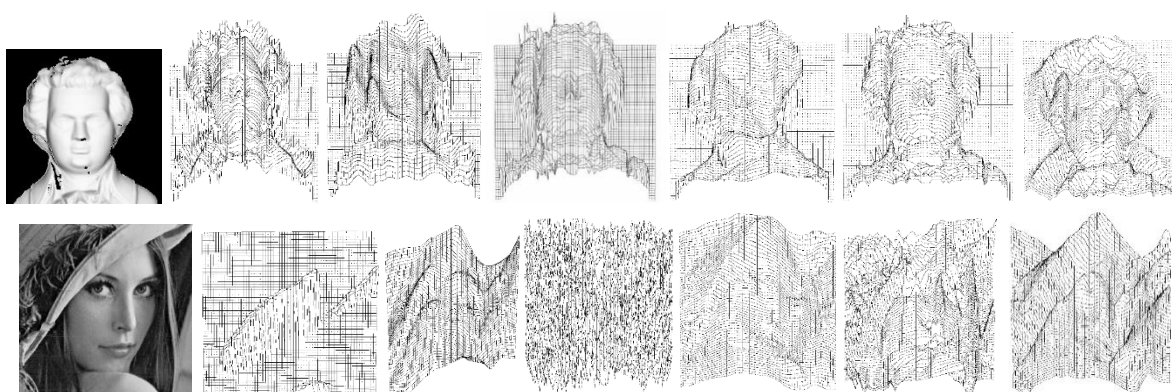
Tato metoda je ve své nejčistší podstatě založena na tom, že hodnota jednotlivých pixelů na obrázku závisí na směru světelného zdroje a na povrchové normále, tedy přímkou, která je kolmá k povrchu (obr. 9: vlevo). Principem/cílem metody je zjistit světelný zdroj a tvar povrchu v každém pixelu černobílého obrázku. K výpočtu 3D koordinát je poté použit jas, který je závislý na tvaru povrchu předmětu a směru světelného zdroje. Pomocí něho je možné určit strmost povrchu (Frankot a Chellappa 1988, Zhang et al. 1999).

Hlavní výhodou této techniky je ten, že může být model spočítán z jednoho jediného monochromního obrázku. Oproti jiným *Shape-from-X* technikám nevyžaduje Shape from Shade texturu, jen konstantní míru odrazivosti záření (albedo) a velice vyhlazený povrch skenovaného objektu. Odpadá tak sice

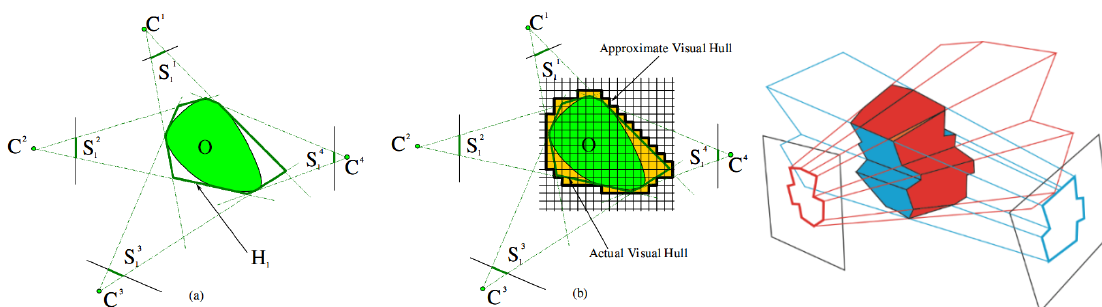
problém korespondence, výpočet modelů je však velice citlivý na nepřesnosti způsobené odrazy a nasvícením modelu. R. Zhang a její kolegové se pokusili na konci 90. let testovat šest různých algoritmů výpočtu modelů jak ze syntetických obrázků, tak z reálných fotografií (obr. 10). Sami přiznávají, že vyhovující modely se jim získat nepodařilo, novější přístupy ovšem ukazují, že je za pomoci Shape from Shading možné získat relativně kvalitní představu o povrchu objektů (obr. 9:vpravo; Frankot a Chellappa 1988, Zhang et al. 1999, Zurich 2012).



Obr. 9. Pole normál pro výpočet SfS (vlevo), fotografie (uprostřed) a 3D rekonstrukce z ní vytvořená (vpravo). Zdroj: Frankot a Chellappa 1988, Fig. 1 (vlevo), Zurich 2012 (uprostřed a vpravo).



Obr. 10. Test kvality 3D modelů šesti algoritmů SHS na syntetickém obrázku Mozarta (nahore) a na reálné fotografii Lenny⁴ (dole). Zdroj: upraveno podle Zhang et al. 1999.



Obr. 11. Visual hull (vlevo a uprostřed) a volume intersection (vpravo). Zdroj: Schneider 2009 (vlevo a uprostřed) a upraveno podle Bottino a Laurentini 2001 (vpravo).

⁴ Více informací o obrázku Lenny je možno nalézt na wikipedii (<http://en.wikipedia.org/wiki/Lenna>).

Shape from Silhouettes (SfS)

Další z rodiny metod tvorby 3D rekonstrukcí se nazývá tvar ze siluet (**Shape from Silhouettes – SfS**), jinak také **Visual Hull Construction** (VHC). Idea skrytá za těmito metodami je taková, že když objekt vyfotíme, tak tento objekt leží uvnitř objemu, který je vytvořen zpětnou projekcí (*back-projection*) povrchu siluety. Když se na stejný objekt podíváme z rozdílných úhlů, lze vytvořit průsek tzv. *generalized cones* generovanými jednotlivými obrázky (obr. 11). Nejmenší objem získaným tímto způsobem se nazývá *Visual Hull*. Ten odpovídá aproximaci objektu, jenž je tvarově maximálně konzistentní se siluetami danými jednotlivými fotografiemi. Odpovídá přitom vnějšímu plášti tvaru objektu (Forbes et al. 2006, Franco et al. 2004, Gerig 2012, Cheung et al. 2003, Knoblauch a Kuester 2009).

Existuje několik algoritmů pro výpočet modelu, například metody *volume intersection*, *voxel metode*, *polyhedrální metody* anebo například *Image-based visual hulls*.

Nejjednodušším příkladem je metoda využívající **objemových průřezů (VI - Volume Intersection; obr. 11: vpravo)**. Tato technika získává informaci o objemu objektu z odlišných siluet protínáním kuželů získaných zpětnou projekcí (*back-projection*) každé jednotlivé siluety. Přes svou jednoduchost a výhody není tato metoda schopna reprezentovat některé tvary, hlavně konvexní vyhlazené povrchy, například kouli (Bottino a Laurentini 2001, Matsuyama et al. 2004, Nitschke 2007).

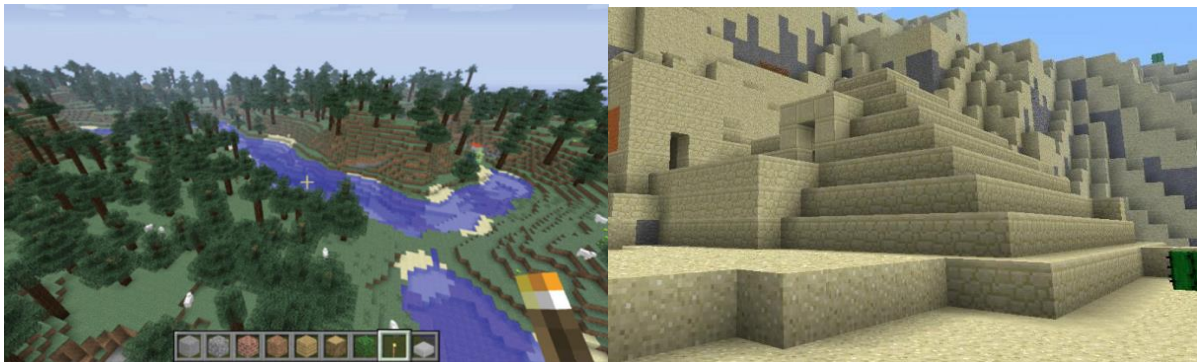
Nejrozšířenější metody rekonstrukce 3D objektů jsou založené na *voxelech (Voxel-based Methods)*. *Voxel*, zkratka pro „volumetric pixel“, je trojrozměrná analogie pixelu. Označuje se jí částice objemu představující hodnotu v pravidelné mřížce 3D prostoru. Jednoduše si lze voxel představit jako kostičku v 3D prostoru. Složením většího či menšího množství kostiček lze poté vytvořit objekt či celou scénu (obr. 12; Guo et al. 2005, Smith 2012).

První krokem u metod založených na voxelech je dekompozice prostoru, který objekt zaujímá v prostoru, do 3D mřížky (obr. 11). Poté je každý z voxelů protknut každým objemem siluety. Jen ty siluety, které leží uvnitř všech objemů siluet, poté určují finální tvar objektu. Nevýhodou těchto metod je to, že se při procesu vytváří velké množství dat daných velkým množstvím iterací algoritmu, které vyžadují větší hardwarové nároky na počítač (Bozzi et al. 2007, Gerig 2012).

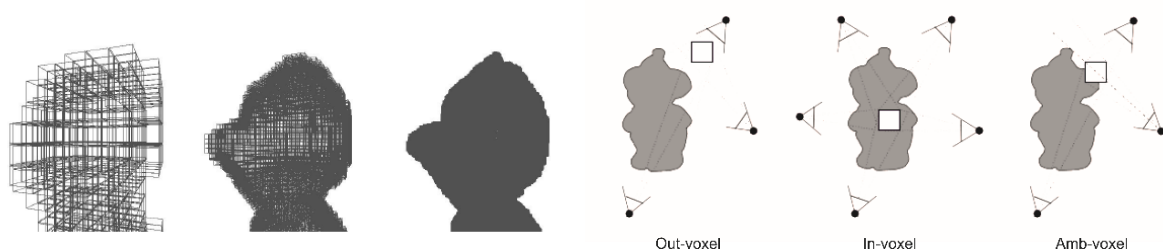
Na bázi voxelů funguje i tzv. *Octree Construction* (Mercier a Meneveaux 2005, Tosovic et al. 2002, Yemez a Schmitt 2004):

Na začátku tvar odpovídá hrubému voxelu, který je postupně jakoby zjemňován (obr. 13: vlevo). V každém pohledu na objekt jsou získány tzv. *octree voxely*, které jsou projektovány na rovinu obrazu a porovnávány s pixely obrazu (obr. 13: vpravo). Jestliže je voxel alespoň na jednom obrázku vně objektu, je označen jako *out*, jestliže je uvnitř všech obrázků, je pojmenován jako *in*. Zbylé jsou buďto uvnitř objektu, anebo leží na jeho okraji a nazývají se *ambiguous*. Tyto voxely jsou následně rozděleny na několik dílčích sub-voxelů (obr. 13: vlevo) a proces třízení na *in*, *out* a *ambiguous* voxely se opakuje do té doby, dokud není dosaženo požadovaného rozlišení (obr. 13: vpravo).

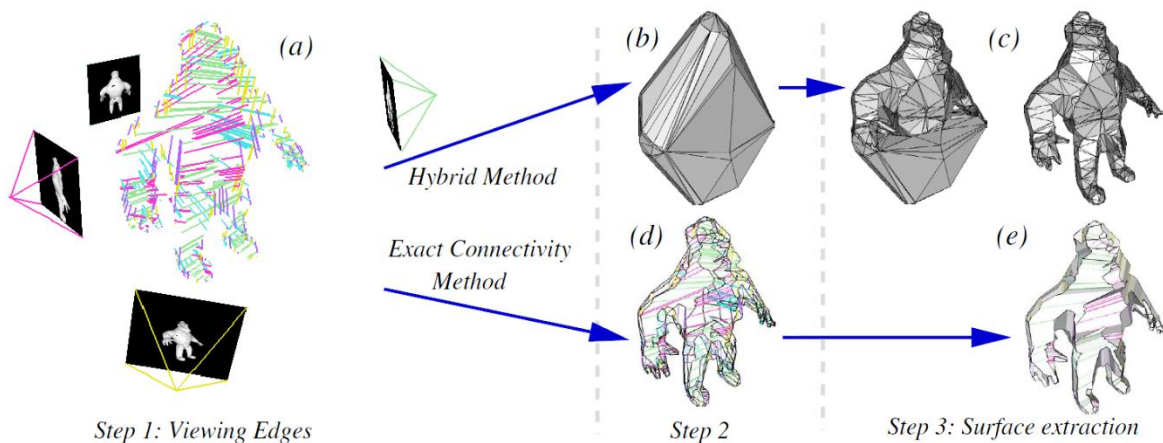
Exaktní polyhedrální metody lze řadit do rodiny **surface-based modeling methods**. Ty nepracují s voxely, ale s obrázky siluet, které jsou konvertovány do konvexních a nekonvexních polygonů. Z každé hrany jsou zpětnou projekcí získány 3D polygony, které jsou projektovány na každý obraz (fotku) a protknuty s každou siluetou. Výsledné polygony se poté spojí a dají vzniknout modelu, který se označuje jako *Polyhedral Visual Hull* (Gerig 2012, Matusik et al. 2002).



Obr. 12. Minecraft. Zdroj: Short 2012 (vlevo) a Archaeology 2013 (vpravo).



Obr. 13. Různé úrovně voxelizace (vlevo) a klasifikace voxelů (vpravo). Zdroj: Mercier a Meneveaux 2005.



Obr. 14. Polyhedrální metody. Zdroj Franco et al. 2004, Fig. 3.

Franco spolu s kolegy (2004) blíže popisují dvě metody 3D rekonstrukce založené na polyhedrech, a to **hybrid method** a **exact connectivity method**.

U obou metod jsou nejprve získány fotografie objektů, na nichž jsou identifikovány jejich siluety. Ty se zvektorizují a následně se spočítají bod po bodu viditelné hrany objektu (obr. 14:a). **Hybridní metoda** poté spočítá nejdříve tzv. *Delaunay tetrahedron* (obr. 14:b), který je postupně „ořezáván“ v závislosti na konzistenci siluety (obr. 14:c). V tomto ohledu je tato metoda hybridem mezi voxelovou a surface-based metodou. **Exact connectivity method** oproti tomu počítá průřezy kuželů náležící

k *visual hullu* (obr. 14:d), které jsou následně vyexportovány do finálního polyhedronového modelu (obr. 14:e; Boyer a Franco 2003).

V praxi se rekonstrukce 3D modelu ze siluet získá z několika snímků jednoho objektu provedených z různých stran. Musí být přitom přesně stanovena každá pozice fotoaparátu. Objekt daný jeho vnějším obrysem je na každém snímku buďto automaticky, a/nebo manuálně extrahován od pozadí. Kombinací několika snímků je poté získán výsledný 3D model objektu (Gerig 2012, Lorient 2009).

Analogicky lze postupovat i tak, že fotoaparát zůstává statický a předmět je umístěn na otočné desce s kalibrační deskou. Objektem se vždy otočí o určitý úhel, pořídí se snímek a tento proces se opakuje, dokud není objekt nafocen ze všech stran. Program poté pomocí několika algoritmů automaticky vygeneruje výsledný 3D model (obr. 15).

Výhoda aplikace metod SfS oproti jiným je hlavně to, že k získání 3D modelu není nezbytně nutné přesného nasvícení modelu, ani konstantní odrazivost modelu. Jedná se navíc o přístup, který je poměrně rychlý, nízkonákladový a k vytvoření modelu je zapotřebí jen sady několika obrázků. Veliké plus SfS metod je, že lze vytvořit texturovaný barevný model, a to navíc v poměrně krátkém čase. Limity jsou hlavně nemožnost naskenovat konvexní povrchy a poměrně nižší kvalita modelů oproti metodám aktivních triangulačních skenerů či TOF (Esteban a Schmitt 2004, Matsuyama et al. 2012).



Obr. 15. 3D rekonstrukce za pomoci SfS v programu 3D SOM. Zdroj: V. Nosek, autor.

Shape from Texture (SFT)

Tvar může být rovněž rekonstruován pomocí informace, která je vyjádřena texturou, přičemž k vytvoření 3D modelu může stačit jen jeden jediný obrázek. To dovoluje metoda Shape from Texture, o níž se již v 50. letech 20. století zajímal *J. Gibson*. Tento vědec se snažil získat 3D koordináty povrchu scény z obrázku za pomoci analýzy pokrivení textury nacházející se na jejím povrchu.

Metody Shape form Texture jsou tedy založeny na analýze textury nacházející se na povrchu objektu. Textura, respektive opakující se *texely* (jinak také *textony*), které ji tvoří, mohou nabývat rozmanitých tvarů. Každá forma textury při procesu rekonstrukce 3D tvaru má přitom svoje výhody a nevýhody. Obecně se má za to, že disymetrické formy texelů mohou obsahovat více informace o hloubce, resp. deformaci tvaru, než například motivy kruhové (Clerc a Mallat 2002, Durou et al. 2010, Lobay a Forsyth 2006, Padmavathi et al. 2012, Witkin 1981).

Stejně jako ostatní metody rekonstrukce tvaru má Shape from Texture mnoho modifikací a neexistuje jediná „správná metoda“, kterou lze získat nejlepších výsledků. Shape from Texture lze nicméně zevrubně rozdělit na **globální a lokální metody**.

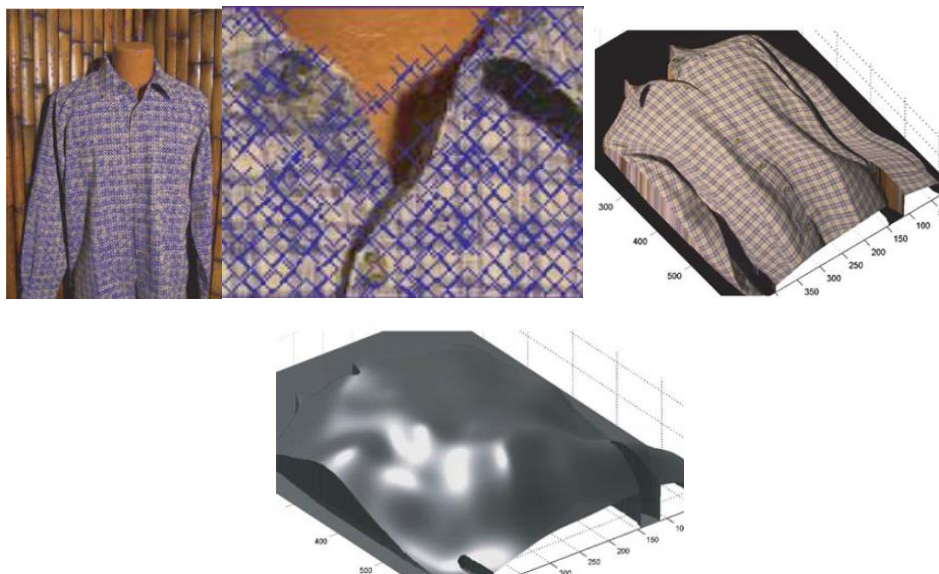
Globální metody jsou založeny na analýze povrchu textury pokrývající celý povrch modelu. Využívají předpokladů o distribuci jednotlivých jejích elementů, hlavně předpokladů o isotropii a homogenitě. Isotropie textury znamená, že jednotlivé elementy textury jsou rotovány uniformně a náhodně. Předpoklad o homogenitě má za následek to, že gradient hustoty center texelů udává informace o povrchu. Je zřejmé, že se proto nejedná o analýzu deformace jednotlivých texelů, ale jejich souboru jako celku.

Analýzou jednotlivých texelů se zabývají **metody lokální**, které tak analyzují parametry textury v určitých bodech povrchu objektu. Základní předpoklad je takový, že existuje limitovaný počet tvarových typů texelů a každý z nich je přitom sám o sobě schopen udat povrchový gradient. Výhoda lokálních metod je ta, že při výpočtech není potřeba předem znát tvar ani typ texelů, algoritmy jsou schopné každý element textury definovat automaticky (Forsyth 2001, 2002, Lobay a Forsyth 2006).

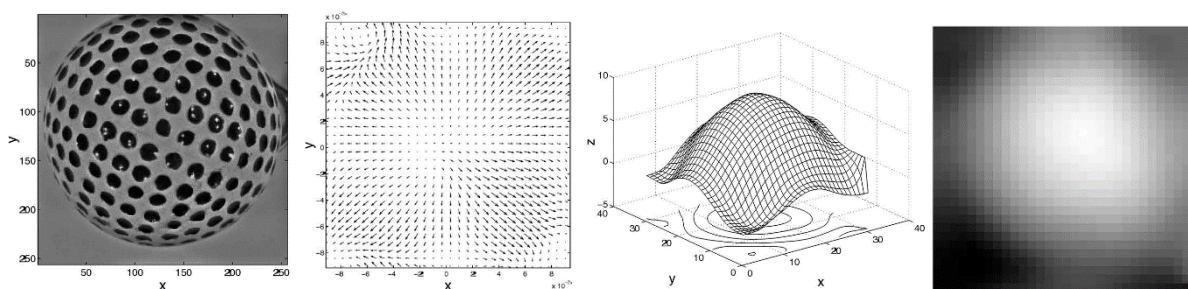
Z lokálních metod lze jmenovat přístup *M. Clerca a S. Mallata* (2002):

Proces se skládá ze dvou fází. První je definice distorze (pokřivení) textury na obrázku. Míru distorze textury lze v obecné rovině měřit určením vlastností původní textury (např. její homogenity, isotropie atd.) a jejím srovnáním s vlastnostmi textury na pozorovaném obrázku. Při výpočtu lze využít například diferenční analýzy, která měří relativní distorzi textury jen na pozorovaném obrázku. Pro měření distorze se v praxi často používá lokálního spektrálního měření, jenž se určuje překryvem obrazu křivkami (Clerc a Mallat 2002).

Cílem druhé fáze je ze získané distorze obdržet 3D koordináty povrchu objektu. To je možné na předpokladu, že textura projektovaná na objekt je velice homogenní, takže všechny tvarové variace v ní jsou způsobeny projektní geometrií, respektive tvarem a orientací povrchu objektu. Nejdříve se určí matematicko-geometrická metrika a vztahy mezi reálným povrchem objektu a rovinou obrazu (fotografií). Lze při tom využít tzv. deformačních gradientů, které jsou v přímém vztahu k matrice uvnitř analyzovaného obrázku (rovný povrch, na něž se nahlíží ortograficky, má deformační gradient rovný nule, u náhledu pod jiným úhlem je tento gradient rozdílný). Druhá fáze je vlastní modelování textury. Jedná se o vypočítání geometrického deformačního gradientu z takzvané rovnice gradientu textury. Ze získaného deformačního gradientu se nakonec dopočítají reálné koordináty povrchu objektu (Clerc a Mallat 2002, Witkin 1981).



Obr. 16. Ukázka Shape from Texture. Analyzovaný tvar košile (vlevo) s detailem (2. zleva) a 3D rekonstrukce s texturou (3. zleva) a bez textury (dole). Zdroj: Lobay a Forsyth 2006, Fig. 3, 5.



Obr. 17. Ukázka Shape from Texture. Původní obrázek s odstraněným stínováním (vlevo), normálový vektor získaný z toho samého obrázku (2. zleva), povrch rekonstruovaný z normálového vektoru (3. zleva) a vizualizace povrchu normálového vektoru ve stupních šedi (vpravo). Zdroj: Clerc a Mallat 2002.

Shape from Polarization (SFP)

Rekonstrukce tvaru je možná i pomocí polarizace, respektive na základě určení vlastností odrazu polarizačního světla od objektu. Po odrazu na povrchu se nepolarizované světlo stane částečně lineárně polarizované. Jeho vlastnosti jsou dány úhlem dopadu a odrazovými vlastnostmi objektu určenými jak jeho materiálem, tak jeho pozicí vzhledem ke světelnému zdroji. Z vlastností odraženého polarizačního světla od objektu se poté vypočítají normály povrchu, zvané též pole normálů (viz obr. 7 v kapitole proces skenování), z nichž se posléze za pomoci integračního algoritmu vypočítají 3D koordináty (Liao 2010, Lorient 2009, Morel 2005).

Polarizace je ovlivněna množstvím faktorů, jakými jsou materiál a tvar povrchu objektu, jeho zaoblení, stejně jako jeho pozice vzhledem ke světelnému zdroji. Velké plus této metody je, že může být adaptována jak na rekonstrukci reflexních kovových povrchů, tak na transparentní předměty. Metoda je prozatím limitována nemožností získat informace o povrchu konkávních povrchů, jež způsobují mnohonásobný odraz (Ferraton 2010, Ferraton et al. 2009, Miyazaki a Ikeuchi 2005, Morel 2005).



Obr. 18. Ukázka Shape from Polarisation. Originální fotografie dekorovaného kovu (vlevo) spolu s výslednou 3D rekonstrukcí (uprostřed) a prototyp polarizačního 3D skeneru (vpravo). Zdroj: Morel 2005, Fig. 5.1, 5.30a, b.

Kinect

Jak již bylo zmíněno, vývoj 3D technologií vizualizace je v mnohých případech spojen se zábavním průmyslem - ať už herním či filmovým. V listopadu roku 2010 uvedl Microsoft do prodeje pohybový senzor Kinect určený pro ovládání herních konzolí Xbox, o něco později vydal i aplikaci pro PC. Jen pro zajímavost, Kinect se stal rekordmanem Guinnessovy knihy rekordů za nejrychleji se prodávající konzumní elektronické zařízení vůbec. Za 60 dní se podařilo prodat 8 milionu kusů tohoto zařízení (Eisler 2012, Mattrick 2010, Su et al. 2012).

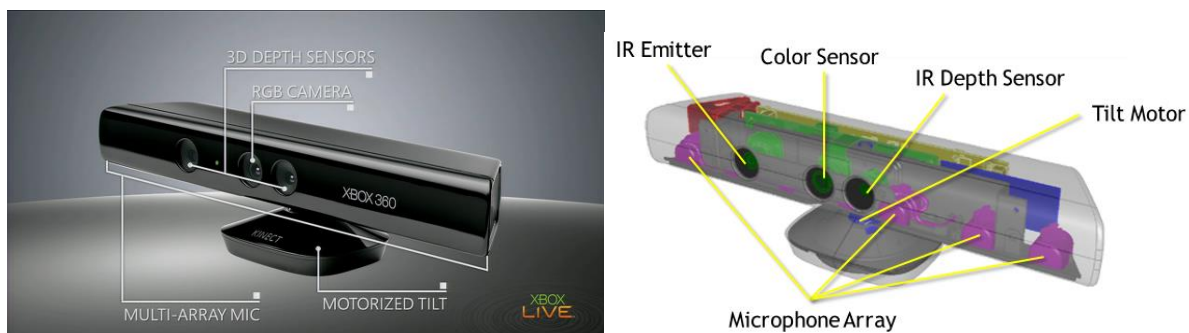
Kinect zařízení (obr. 19) se skládá mimo jiné z RGB kamery a z 3D hloubkového senzoru, který je složen z infračerveného laserového projektoru vysílající strukturované světlo a z monochromního CMOS senzoru, jež toto světlo zachytává. RGB kamera slouží jako videokamera k zaznamenání statického nebo pohyblivého se obrazu, hloubkový senzor, jak už název napovídá, má úlohu podat informace o hloubkové informaci scény. Výsledný 3D model je vytvořen pomocí triangulace obrazu z infračervené kamery a projektoru (obr. 20; Högman 2011, Smisek 2012).

Jeden z procesů, jakým lze pomocí Kinect vytvořit 3D obraz lze demonstrovat na příkladu publikovaném v Chen et al. (2010):

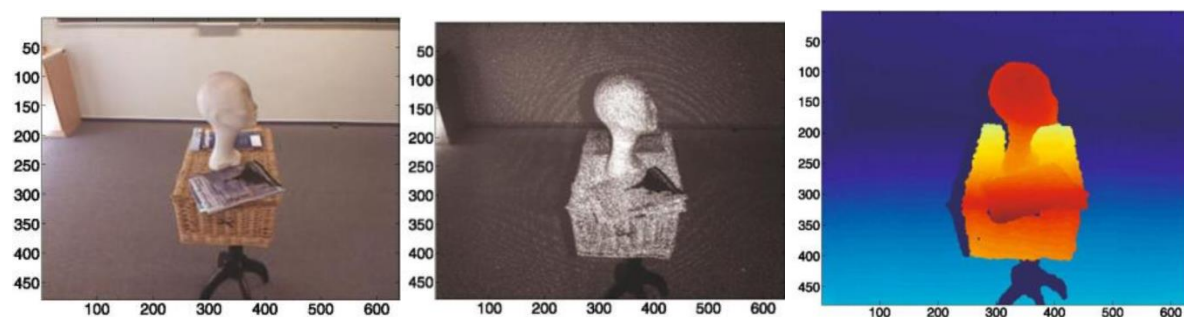
Na začátku jsou simultánně snímány obrazy jak RGB kamerou, tak pomocí hloubkového IR senzoru. Jelikož obrazy snímků z hloubkového senzoru obsahují velké množství šumu (obr. 22: vlevo), proto je nutné tento šum odstranit, například pomocí metody váženého robustního průměrování (obr. 22: vpravo).

Poté dochází k „synchronizaci“ RGB a hloubkových snímků. Jelikož jsou IR senzor a RGB kamera na Kinect zařízení umístěny v jiných pozicích (srov. obr. 19: vpravo) a každá kamera tak snímá jinou část scény prostředí (srov. obr. 20: vlevo a uprostřed), je nutné oba prvky kalibrovat a na obou snímcích poté vyhledat korespondující pixely.

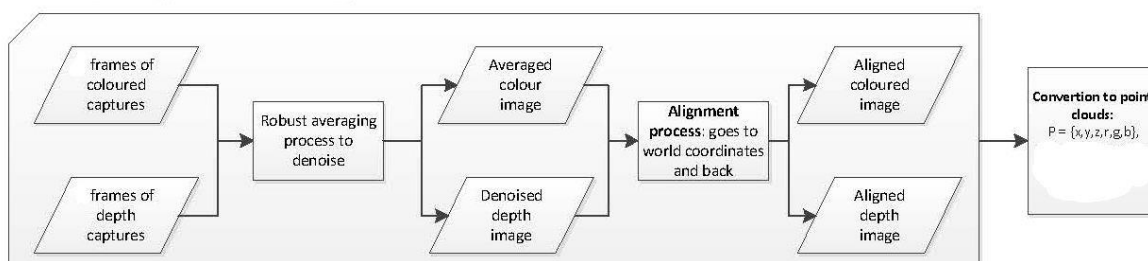
Poté, co je synchronizace hotova, dochází ke konvertování hodnot hloubek scény a barev pomocí zarovnávacího algoritmu. Konečným výstupem jsou pak dvě tabulky – v jedné jsou uloženy data hloubkové mapy, ve druhé poté hodnoty barev zaznamenané scény.



Obr. 19. Ovládací zařízení Microsoft Kinect. Zdroj: Microsoft 2013.



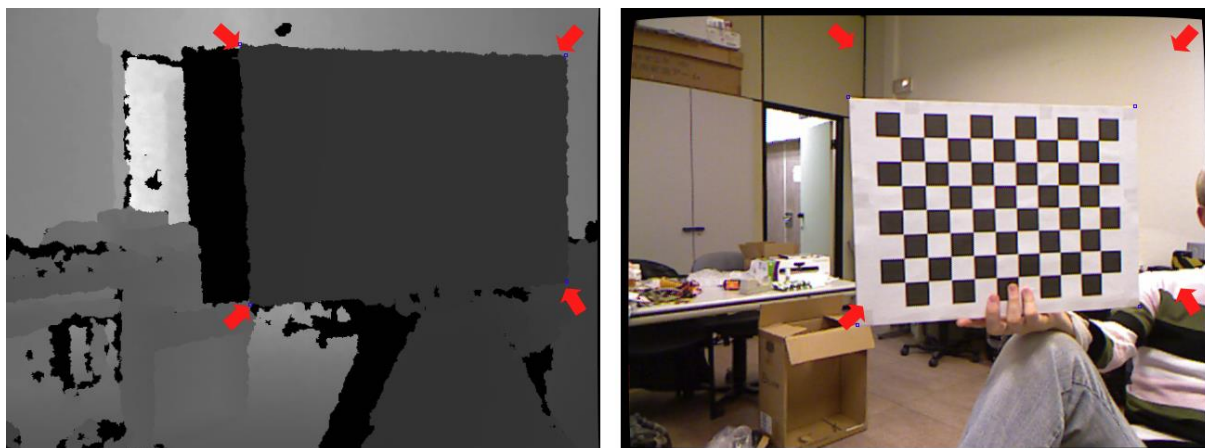
Obr. 20. Ukázka akvizice hloubkové mapy pomocí Microsoft Kinect. Digitální snímek scény zaznamenaný pomocí RGB kamery (vlevo), stejná scéna zachycená IR kamerou (uprostřed) a výsledná hloubková mapa (vpravo). Zdroj: Smisek 2012, Fig. 1.3.



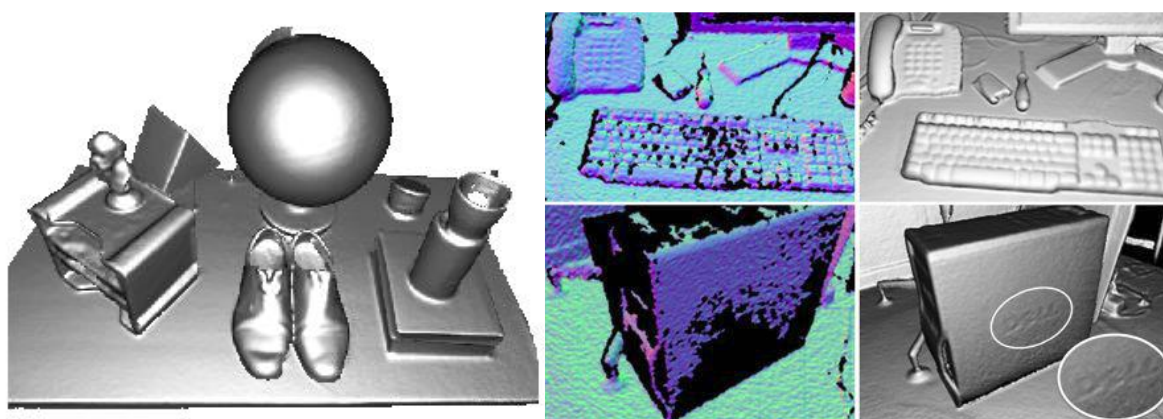
Obr. 21. Jeden z možných procesů akvizice 3D obrazu. Zdroj: upraveno podle Chen et al. 2010, Fig. 1.2.



Obr. 22. Redukce šumu hloubkové mapy. Zdroj: Chen et al. 2010, Fig. 1.3.



Obr. 23. Ukázka kalibrace a synchronizace. Zdroj: Chen et al. 2010, Fig. 1.4.



Obr. 24. Ukázka 3D rekonstrukcí vytvořených pomocí Microsoft Kinect. Zdroj: Izadi et al. 2011, Fig. 9.

Poměrně špatná kvalita výstupů z Kinect, jež je sebekriticky proklamovaná v několika článcích, je způsobena hlavně nízkou kvalitou hloubkových dat zaznamenaných pomocí hloubkového senzoru. Přestože kvalita skenů v žádném případě neodpovídá výsledkům získaným konvenčními systémy (obr. 24), cena systému pro akvizici 3D dat se pohybuje v přijatelných mezích (okolo 600 €; Cui a Stricker 2011, Tong et al. 2012).

Výhoda tohoto systému je stále se rozrůstající základna jeho spotřebitelů. Jak samotný Microsoft, tak asociovaní badatelé a amatérští nadšenci pracují na různých vylepšení a rozšíření aplikačních možností. Důraz přitom kladou například na zrychlení akvizičního procesu bez ztráty kvality dat, na optimalizaci registrace jednotlivých skenů, stejně jako na možnosti akvizice 3D scény v reálném čase. To je možné například díky systému KinectFusion, který umožňuje jedinci držícím Kinect „za chodu“ realizovat 3D rekonstrukci reálného světa. Zařízení tak vlastně funguje podobně jako ruční 3D skener s tou výhodou, že oproti konvenčním 3D ručním skenerům, je v jednom čase schopen zaznamenat větší a hlubší scénu. Mimo digitální model scén a objektů je KinectFusion schopen zaznamenat v reálném čase i barevnou texturu pomocí zabudované RGB kamery, která je v dnešní době schopna zaznamenat obraz v rozlišení 1280x960 pixelů (Cui a Stricker 2011, Izadi et al. 2011, Microsoft 2013, Tong et al. 2012).

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

- Agisoft (2013). "Image-based 3D modeling." Poslední náhled: 2013/09/19, <http://www.agisoft.ru/>.
- Archaeology, M. (2013). "Minecraft Archaeology." Poslední náhled: 2013/09/04, <http://minecraftarchaeology.wordpress.com/>.
- Corporation, M. (2013). "Microsoft Photosynth." Poslední náhled: 2013/09/19, <http://photosynth.net/>.
- Instruments, N. (2013). "3D Imaging with NI LabVIEW." Poslední náhled: 2013/09/09, <http://www.ni.com/white-paper/14103/en/>.
- Snavely, N. (2013). "Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections." Poslední náhled: 2013/09/19, <http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>.
- Wikipedia (2013). "File:Lenna.png." Poslední náhled: 2013/09/12, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lenna.png>.
- Zurich, E. (2012). "Physics-based 3D vision." Poslední náhled: 2013/09/06, <http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/education/lehrveranstaltungen/MachineVisionFS2012/couresmaterial/MV-SS2012-shading.pdf>.
- Zurich, E. (2012). "Shape from Focus." Poslední náhled: 2013/09/06, <http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/education/lehrveranstaltungen/MachineVisionFS2012/couresmaterial/MV-SS2012-focus.pdf>.

Literatura:

- Aissaoui, A., et al. (2012). "Reconstruction 3D de visages dans un système de stéréovision basée sur les propriétés du visage." Compression et Représentation des Signaux Audiovisuels.
- Bellocchio, F., et al. (2012). 3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches, Springer.
- Ben-Ezra, M. and S. K. Nayar (2003). What does motion reveal about transparency? Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on.
- Bennet, D. J. and Q. C. Vuong (2006). "A stereo advantage in generalizing over changes in viewpoint on object recognition tasks." Perception and Psychophysics **68**(7): 1082-1093.
- Bottino, A. and A. Laurentini (2001). "A Silhouette Based Technique for the Reconstruction of Human Movement." Computer Vision and Image Understanding **83**: 79-95.
- Boyer, E. and J.-S. Franco (2003). "Hybrid Approach for Computing Visual Hulls of Complex Objects." Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition **1**: 695-701.
- Bozzi, E., et al. (2007). US Image Acquisition. Image Processing in Radiology: Current Applications. E. Neri, D. Caramella and C. Bartolozzi, Springer: 3-14.
- Brandou, V. (2008). Stéréovision Locale et Reconstruction 3D/4D. Sciences et technologies de l'information et de la communication. Nice, Université de Nice-Sophia Antipolis. **Thesis**.
- Bulthoff, H. (1991). Shape from X: Psychophysics and Computation. Computational Models of Visual Processing. M. S. Landy and J. A. Movshon, MIT Press: 305-330.
- Chellappa, R., et al. (1999). Structure from motion: sparse versus dense correspondence methods. Image Processing, 1999. ICIIP 99. Proceedings. 1999 International Conference on.
- Cheung, G. K. M., et al. (2003). "Visual Hull Alignment and Refinement Across Time: A 3D Reconstruction Algorithm Combining Shape-From-Silhouette with Stereo." Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition **62**(3): 221-247.
- Cheung, K. M. G., et al. (2003). Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture. Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on.
- Clerc, M. and S. Mallat (2002). "The Texture Gradient Equation for Recovering Shape from Texture." IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence **24**(4): 536-549.

Dovgand, R. and R. Basri (2004). Statistical Symmetric Shape from Shading for 3D Structure Recovery of Faces. Computer Vision - ECCV 2004. T. Pajdla and J. Matas, Springer Berlin Heidelberg. **3022**: 99-113.

Durou, J.-D., et al. (2010). Shape-from-texture revisité: reconstruction 3D et auto-calibrage à partir d'une seule image. Congrès Francophone de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA). Caen.

Eren, G., et al. (2009). "Scanning from heating: 3D shape estimation of transparent objects from local surface heating." Optics Express **17**(14): 11457-11468.

Esteban, E. C. and F. Schmitt (2004). "Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling." Computer Vision and Image Understanding **96**(3): 367-392.

Ferraton, M. (2010). Réalisation d'un Système d'Acquisition 3D pour des Objets Transparents. Instrumentation et Informatique de l'Image. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

Ferraton, M., et al. (2009). "Optimization of a polarization imaging system for 3D measurements of transparent objects." Optics Express **17**(23): 21077-21082.

Fidaleo, D. and G. Medioni (2007). Model-Assisted 3D Face Reconstruction from Video. Analysis and Modeling of Faces and Gestures. S. K. Zhou, W. Zhao, X. Tang and S. Gong, Springer Berlin Heidelberg. **4778**: 124-138.

Forbes, K., et al. (2006). Shape-from-Silhouette with Two Mirrors and an Uncalibrated Camera. Computer Vision - ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006 : Proceedings. A. Leonardis, H. Bischof and A. Pinz, Springer.

Forsyth, D. A. (2001). "Shape from Texture and Integrability." International Conference on Computer Vision - ICCV: 447-453.

Forsyth, D. A. (2002). Shape from texture without boundaries. Computer Vision - ECCV 2002: 7th European Conference on Computer Vision, Copenhagen, Denmark, May 28-31, 2002, Proceedings. A. Heyden, Springer: 225-239.

Franco, J.-S., et al. (2004). "A Distributed Approach for Real Time 3D Modeling." Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW'04) IEEE **3**.

Frankot, R. T. and R. Chellappa (1988). "A Method for Enforcing Integrability in Shape from Shading Algorithms." IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence **10**(4): 439-451.

Gerig, G. (2012). "Shape from Silhouettes I CV book Szelisky 11.6.2."

Guo, Q., et al. (2005). Anisotropic 3D Reconstruction and Restoration for Rotation-Scanning 4D Echocardiographic Images Based on MAP-MRF. Pattern Recognition and Image Analysis: Second Iberian Conference, IbPRIA 2005, Estoril, Portugal, June 7-9, 2005, Proceeding. J. S. Marques, N. P. de la Blanca and P. Pina, Springer.

Hartley, R. I. and A. Zisserman (2004). Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press.

Henderson, J., et al. (2013). "Mapping Submerged Archaeological Sites using Stereo-Vision Photogrammetry." International Journal of Nautical Archaeology **42**(2): 243-256.

Hu, G. and G. Stockman (1989). "3-D Surface Solution Using Structured Light and Constraint Propagation." IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence **11**(4): 390-402.

Chamzas, C., et al. (2008). Applying 3D Digitisation Technologies in the Cultural Heritage Domain. International Symposium on Information and Communication Technologies in Cultural Heritage, University of Ioannina, Greece.

Kim, Y. J., et al. (2008). "3D Face Modeling based on 3D Dense Morphable Face Shape Model." World Academy of Science, Engineering and Technology **37**: 103-108.

Knoblauch, D. and F. Kuester (2009). Focused Volumetric Visual Hull with Color Extraction. Advances in Visual Computing: 5th International Symposium, ISVC 2009, Las Vegas, NV, USA, November 30 - December 2, 2009, Proceedings. G. Bebis, B. Parvin, Y. Kuno, R. Pajarola and A. Hinkenjann, Springer: 208-217.

Koch, A., et al. (2012). "Evolutionary-based 3D reconstruction using an uncalibrated stereovision system: application of building a panoramic object view." Multimedia Tools & Applications **57**(3): 565-586.

Lee, S. J., et al. (2011). "A SfM-based 3D face reconstruction method robust to self-occlusion by using a shape conversion matrix." Pattern Recognition **44**(7): 1470-1486.

Li, J., et al. (2000). "Bundled depth-map merging for multi-view stereo." Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on: 2769 - 2776

Liao, H. (2010). "3D endoscopic image reconstruction using shape from polarization and central projection model compensation." International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery **5**(1): 254-318.

Lobay, A. and D. A. Forsyth (2006). "Shape from Texture without Boundaries." International Journal of Computer Vision **67**(1): 71-91.

Loriot, B. (2009). Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

Matsuyama, T., et al. (2012). 3D Video and Its Applications, Springer London.

Matsuyama, T., et al. (2004). "Real-time 3D shape reconstruction, dynamic 3D mesh deformation, and high fidelity visualization for 3D video." Computer Vision and Image Understanding **96**(3): 393-434.

Matusik, W., et al. (2002). "An Efficient Visual Hull Computation Algorithm." White paper.

Mercier, B. and D. Meneveau (2005). "Shape from Silhouette: Image Pixels for Marching Cubes." Journal of WSCG **13**(1-3): 112-118.

Miyazaki, D. and K. Ikeuchi (2005). Inverse Polarization Raytracing: Estimating Surface Shape of Transparent Objects Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego.

Morel, O. (2005). Environnement actif pour la reconstruction tridimensionnelle de surfaces métalliques spéculaires par imagerie polarimétrique. Instrumentation et Informatique de l'Image. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

Nayar, S. K. and Y. Nakagawa (1994). "Shape from focus." Pattern Analysis and Machine Intelligence **16**(8): 824-831.

Nitschke, C. (2007). A Framework for Real-time 3D Reconstruction by Space Carving using Graphics Hardware, GRIN Verlag.

Ohara, K., et al. (2003). 3D modeling of micro transparent object with integrated vision. Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI2003. Proceedings of IEEE International Conference on.

Padmavathi, S., et al. (2012). Texel Identification Using K-Means Clustering Method. Advances in Computer Science, Engineering & Applications. D. C. Wyld, J. Zizka and D. Nagamalai, Springer Berlin Heidelberg. **167**: 285-294.

Pautet, D., et al. (1997). "A 3D vision system with only one camera." Proceedings of the 1997 International Conference on Vision Interface - VI'97: 138-143.

Pizlo, Z. (2010). 3D Shape: Its Unique Place in Visual Perception, MIT Press.

Poelman, C. J. and T. Kanade (1997). "A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery." IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence **19**(3): 206-218.

Prados, E. and O. Faugeras (2006). Shape From Shading. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision. N. Paragios, Y. H. Chen and O. Faugeras, Springer US: 375-388.

Sanchez, M. A. (2008). A Fuzzy Approach to Solve the Stereo Correspondence Problem Using Phase Correlation. Department of Electrical and Computer Engineering. El Paso, University of Texas at El Paso. **Thesis**.

Scharstein, D. and R. Szeliski (2002). "A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms." International Journal of Computer Vision **47**(1): 7-42.

Schneider, D. (2009). "Visual Hull." White paper.

Short, D. (2012). "Teaching Scientific Concepts using a Virtual World - Minecraft." Teaching Science **58**(3): 55-58.

Smith, W. A. P. (2012). Representing, Storing and Visualizing 3D Data. 3D Imaging, Analysis and Applications. N. Pears, Y. Liu and P. Bunting, Springer London: 139-184.

Snively, N., et al. (2006). Photo tourism: exploring photo collections in 3D. ACM SIGGRAPH 2006 Papers. Boston, Massachusetts, ACM: 835-846.

Snavely, N., et al. (2007). "Modeling the World from Internet Photo Collections." International Journal of Computer Vision **80**(2): 189-210.

Szeliski, R. and P. H. S. Torr (1998). Geometrically Constrained Structure from Motion: Points on Planes. 3D Structure from Multiple Images of Large-Scale Environments. R. Koch and L. Gool, Springer Berlin Heidelberg. **1506**: 171-186.

Tosovic, S., et al. (2002). "On Combining Shape from Silhouette and Shape from Structured Light." White paper.

Verhoeven, G., et al. (2012). "Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs." Journal of archaeological science **39**(7): 2060-2070.

Witkin, A. P. (1981). "Recovering Surface Shape and Orientation from Texture." Artificial Intelligence **17**: 17-45.

Xu, G. and Z. Zhang (1996). Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition: A Unified Approach, Springer.

Yang, L. and J.-Q. Han (2007). Novel Shape-From-Shading Methodology with Specular Reflectance Using Wavelet Networks. Advances in Neural Networks - ISNN 2007: 4th International Symposium on Neural Networks, ISNN 2007 Nanjing, China, June 3-7, 2007. Proceedings. D. Liu, Springer: 646-655.

Yemez, Y. and F. Schmitt (2004). "3D reconstruction of real objects with high resolution shape and texture." Image and Vision Computing **22**: 1137-1153.

Ying, S., et al. (2001). Model-based bundle adjustment with application to face modeling. Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on.

Zhang, L., et al. (2003). Shape and motion under varying illumination: unifying structure from motion, photometric stereo, and multiview stereo. Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on.

Zhang, R., et al. (1999). "Shape from Shading: A Survey." IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence **d21**(8): 690-706.

3D SKENOVÁNÍ V ARCHEOLOGII

Vizualizace

Využití 3D skeneru v archeologii je závislé na potřebách, které se odvíjí od současné metody archeologie. Obecně se 3D modelů využívá hlavně při dokumentaci a prezentaci kulturního dědictví a archeologických situací pro vědeckou i laickou veřejnost (obr. 3). V tomto směru se jedná hlavně o archivaci a dokumentaci mobilních a nemobilních artefaktů, monitoring jejich stavu a konzervace. Naskenované modely mohou zůstat statické, anebo je možné jim dodat dynamiku kombinací modelů několika po sobě následujících stavebních či exkavačních fází (Balzani et al. 2004, Oh et al. 2005, Remondino a Rizzi 2009).

V případě archeologických artefaktů lze z 3D rekonstrukce, stejně jako z obyčejné fotografie získat 2D kresbu, jež může dobře posloužit k publikačním účelům (obr. 2).

U artefaktů lze vizuálně rekonstruovat jejich chybějících částí, skládat jednotlivé komponenty složených artefaktů anebo zpětně rekonstruovat proces jejich výroby. Jednotlivé prvky na objektech lze podle potřeb libovolně zvýrazňovat a upravovat. Ve všech těchto případech je znatelný přesah i potenciál analytické části (Böhler et al. 2004, Bruno et al. 2011, Chane et al. 2013, Management 2007, Mansouri et al. 2013 Rutland a La Pensée 2010, Schultzen 2011, Wei et al. 2010).

Vizualizace artefaktů pro sbírkové, muzeální a edukační účely je samozřejmě nejsilnější motivací pořízení si skeneru. Prostorové modely mohou být exportovány a použity jak lokálně (např. v muzeích), tak na internetu. Využívá se jak fixních náhledů a animací⁵, tak modelů, jimiž lze libovolně manipulovat, mimo jiné i za přispění virtuální reality (obr. 4; Gaitatzes, Christopoulos et al. 2000, Sator et al. 2001, Terras 1999).

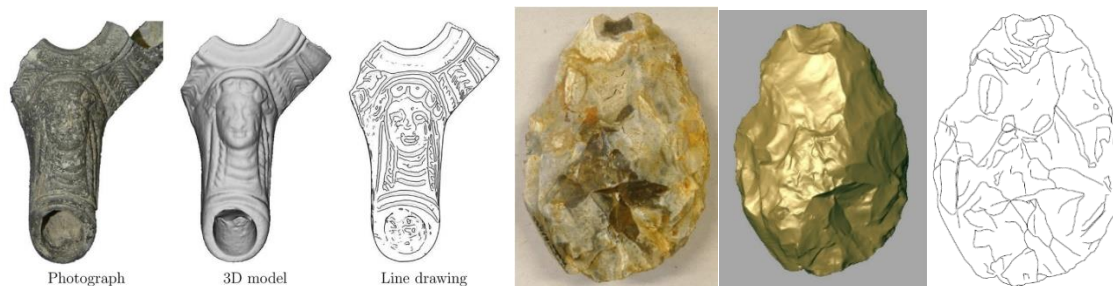
Virtuální realitu a 3D modely získané jak 3D skenery, tak 3D modelingem využívá v dnešní době drtivá většina velkých muzeí a turistických archeologických lokalit. Mimo virtuální projekce statických scén a virtuálních prohlídek (obr. 5) se lze setkat i s animovanými scénami schopnými přímo rekonstruovat dynamiku kulturních aktivit předchozích populací (Arles et al. 2011, 2013, Zimmermann a Eßer 2008).

Jako příklad lze uvést projekt, při němž byla rekonstruována scéna tance založená na kresbách nalezených na hedvábí pocházející z čínské hrobky Chu (obr. 6: vlevo). K rekonstrukci jednotlivých prvků scény bylo použito 3D skeneru a modelace, pohyb tanečnice byl poté rekonstruován za pomoci Motion Capture. Podobný projekt, vytvořený taiwanskými specialisty, byl proveden s cílem rekonstruovat středověké město Chang-an. K rekonstrukci statických a dynamických scén města autoři využili písemných pramenů, kreseb, maleb, 3D modelů a Motion Capture. Analogický projekt byl v evropském kontextu vytvořen například i pro starověké řecké divadlo (Blazebay 2013, Tang a Liu 2002, Cheng et al. 2006).

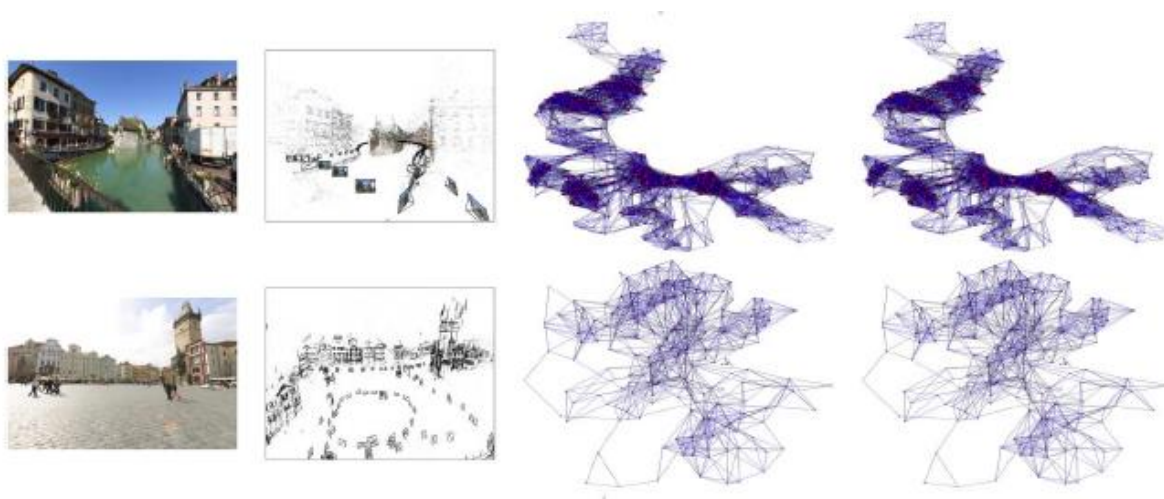
⁵ Pro animaci viz <http://www.heritagedaily.com/2012/07/from-turbines-to-tetricus-engineering-technology-reveals-secrets-of-roman-coins>



Obr. 1. Ukázka 3D dokumentace archeologické situace in-situ. Zdroj: De Reu et al. 2013, Fig. 6, 9 (*vlevo a uprostřed*), Schmidt al. 2010, Fig. 2 (*vpravo*).



Obr. 2. Ukázka porovnání fotografie, 3D modelu a kresby na příkladu římské lampy (*vlevo*) a pěstního klínu (*vpravo*). Zdroj: Gilboa, Fig. 3 (*vlevo*), Boehler a Marbs 2004, Fig. 6 (*vpravo*).



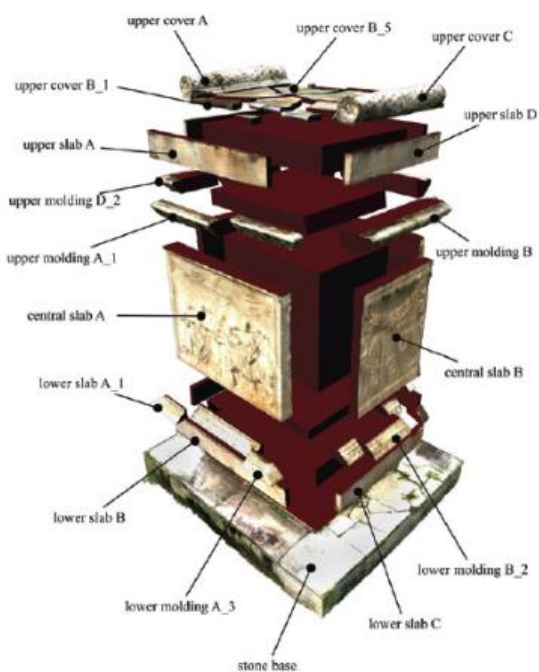
Obr. 3. Ukázka aplikace 3D rekonstrukce pro prezentaci kulturního dědictví. Zdroj: upraveno z Snavey et al. 2007, Fig. 10.



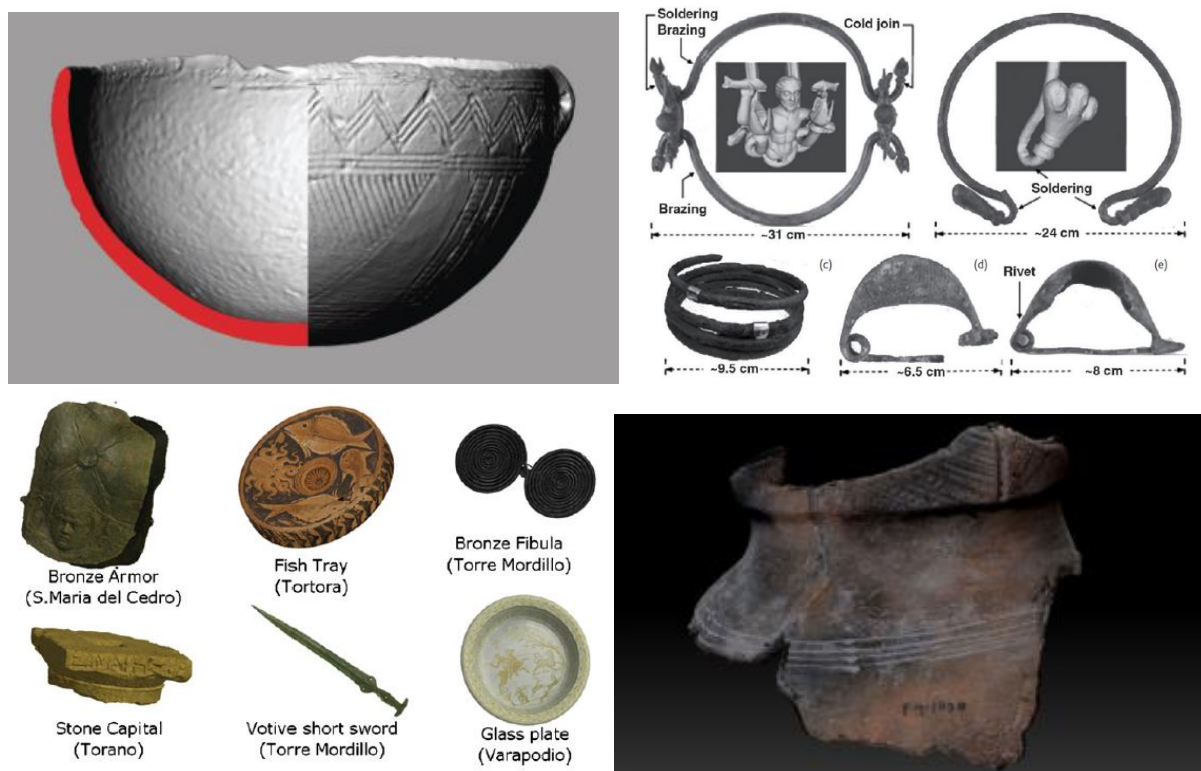
Obr. 5. Ukázka aplikace 3D skeneru a fotogrammetrie pro statické (vlevo) a dynamické (vpravo) scény. Zdroj: Remondino 2009, Fig. 4; 2011, Fig. 5. (vlevo), Arles et al. 2011, Fig. 23 (vpravo).



Obr. 6. Rekonstrukce tance. Zdroj: Tang a Liu 2002, Fig. 5-7.



Obr. 7. Ukázka možnosti využití 3D skeneru pro muzeologické a edukační účely. Zdroj: Remondino 2009, Fig. 6.



Obr. 8. Ukázka aplikace 3D skeneru pro vizualizaci a analýzu artefaktů. Zdroj: Tucci al. 2011, Fig. 15 ; 2012, Fig. 6 (vlevo nahoře), Zhang et al. 2009, Fig. 7 (vpravo nahoře), Bruno et al. (vlevo dole), Archaeology 2012 (vpravo dole).

Tvorba a rozšíření jak virtuálních muzeí, tak lokalit postupně zaujímá své místo v digitálním světě. Mimo jiné je rovněž znatelná snaha zapojit archeologické a historické 3D modely do výukových a zábavných her (Allen et al. 2004, Benko et al. 2004, Bruno et al. 2010, Chamzas et al. 2008, Management 2007, Snavey et al. 2007, Tost a Economou 2008, White et al. 2004).

Prezentovat trojrozměrné modely a scény v praxi je přitom možné mnoha způsoby. Pomineme-li poskytnutí surových dat většinou formy polygonálních modelů, jedná se o virtuální interaktivní modely speciálních datových formátů (např. VRML, WRL, X3D, PDF, DAE, O3D, ad.). Ty mohou být prohlíženy buďto v samostatném softwaru (např. Adobe Reader, Adobe Flash, QuickTime atd.), anebo pomocí implementovaných pluginů v různých webových prohlížečích (Geroimenko a Chen 2005, Petersson et al. 2009, Ruthensteiner a Heß 2008).

Analýza

Analytická část se snaží o poznání aspektů jednotlivých objektů anebo jejich skupin. V případě 3D modelů se jedná hlavně o poznání jednotlivých vlastností objektu. V literatuře se lze setkat hlavně s analýzami povrchu, s identifikací „okem neviditelných“ prvků, pochopení technologických postupů výroby předmětů atd. Samostatnou kapitolou je analýza metrické a tvarové složky modelů (obr. 9). Na modelech lze v zásadě měřit vzdálenosti a úhly mezi jakýmkoliv body a rovinami. Data přitom mohou

být ať už ve formě mračna bodů, tak ve formě polygonálního modelu. Kromě vzdáleností je možné kvantifikovat i objemy jednotlivých artefaktů (obr. 9: vpravo; Diaz-Andreu et al. 2005, Lin et al. 2010).

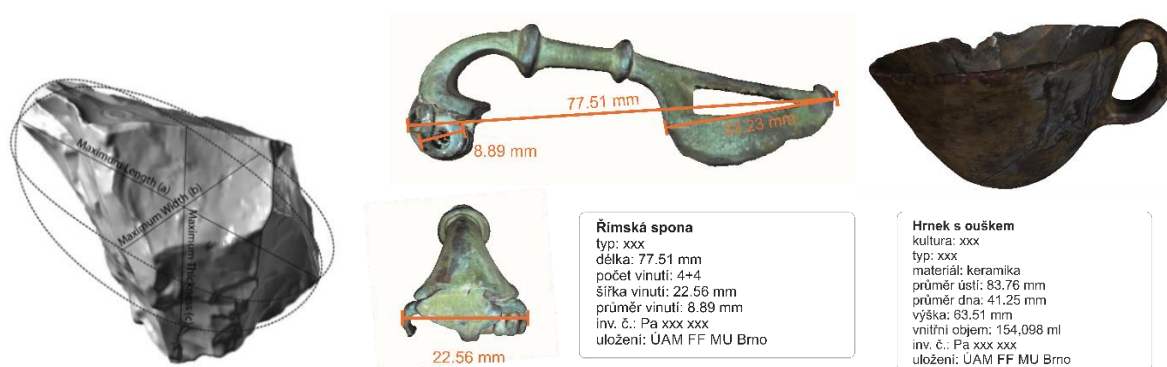
Zajímavější možností je vzájemné porovnání dvou či několika více objektů pomocí řezů (obr. 10: vpravo, 11), čímž lze získat například poměrně přesný obrázek o kvalitě dat, se kterými jako archeologové pracujeme či determinovat stupeň symetrie a asymetrie u pravidelných předmětů (Indruszewski et al. nedatováno, Mara et al. 2007, Shear 2008).

Kromě řezů lze srovnávat artefakty i pomocí deviace jejich povrchů či objemů (obr. 10: uprostřed, 12), a to většinou pomocí „Color Deviation Analysis“ (Zycherman et al. 2012).

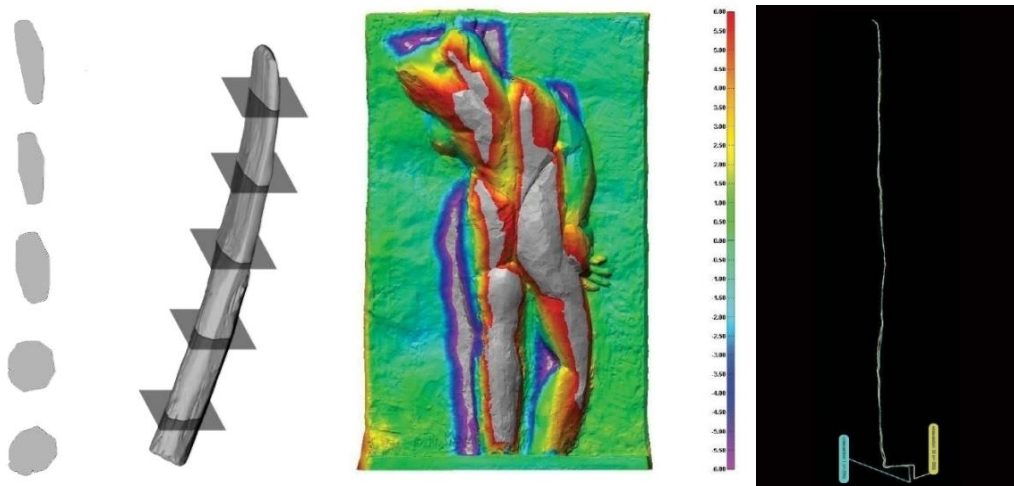
Pomocí skeneru lze na objektech rovněž identifikovat prvky, které by nemusely být zaznamenány lidským okem (obr. 13), anebo rekonstruovat výrobní proces artefaktů (Diaz-Andreu et al. 2005, Prigg 2012, Rutland a La Pensée 2010).

Inverzní proces výroby artefaktu lze demonstrovat na příkladu chetitské kamenné formy (obr. 14:A). Ta byla v první fázi naskenována (obr. 14:B) a poté duplikována a uzavřena (obr. 14:C). Pomocí takto vytvořené virtuální formy mohl být „virtuálně odlit“ finální model (obr. 14:D), který mohl být replikován pomocí 3D tiskárny (obr. 14:E). Vytisknutý model pak mohl být porovnán s originálně nalezeným artefaktem chetitské sekery (obr. 14:F).

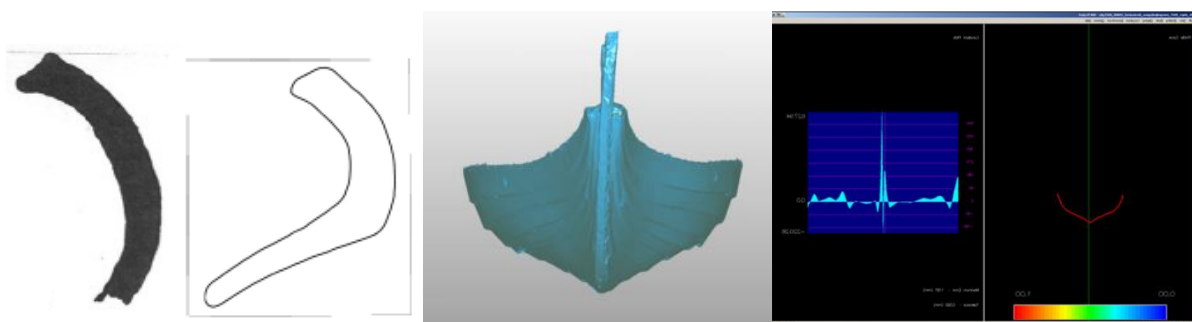
Kvalita modelů a jejich forma přitom při analyzování samozřejmě záleží na smyslu jednotlivé analýzy. V určitých případech například nemusí být vyžadováno naskenování celého modelu objektu - například když se všechny zájmové prvky analýzy vyskytují na jednom skenu. V tomto případě lze pracovat jen s individuálním skenem a odpadá tak řada problémů. Ať už se jedná o eliminaci nepřesnosti, které by byly způsobeny při aproximačních výpočtech např. při spojování několika skenů do jednoho modelu, tak o čas, který operátor při skenování a postprocessingu ušetří.



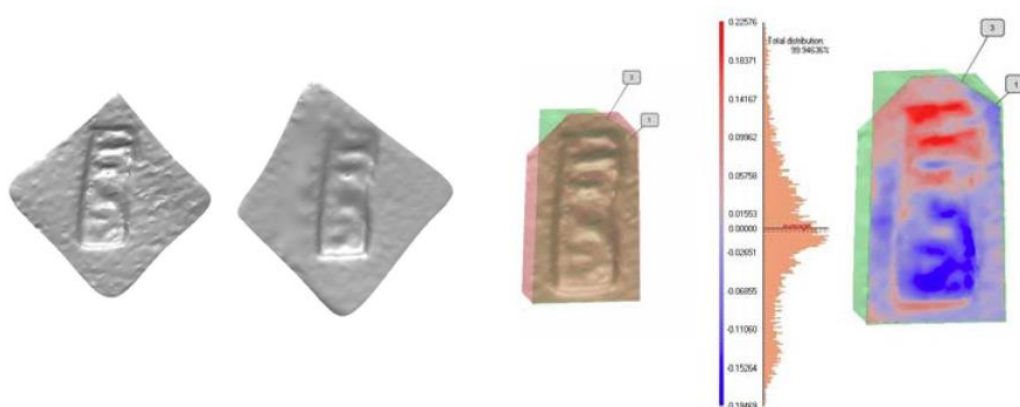
Obr. 9. Ukázka metrické analýzy. Zdroj: Lin et al. 2010, Fig. 1 (vlevo), autor (uprostřed a vpravo).



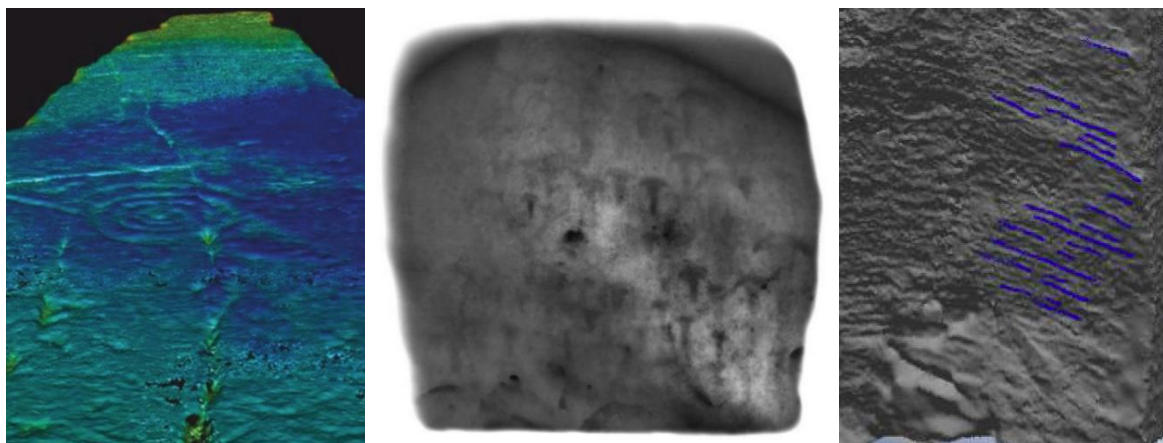
Obr. 10. Ukázka profilů „dřevěného nože“ (vlevo) a srovnání dvou bronzových odlitků pomocí „Color Deviation Analysis“ (vlevo) a pomocí řezu (uprostřed a vpravo). Zdroj: Hanke et al. nedatováno, Fig. 5; Moser et al. 2010, Fig. 2 (vlevo), Zycherman et al. 2012. (uprostřed a vpravo).



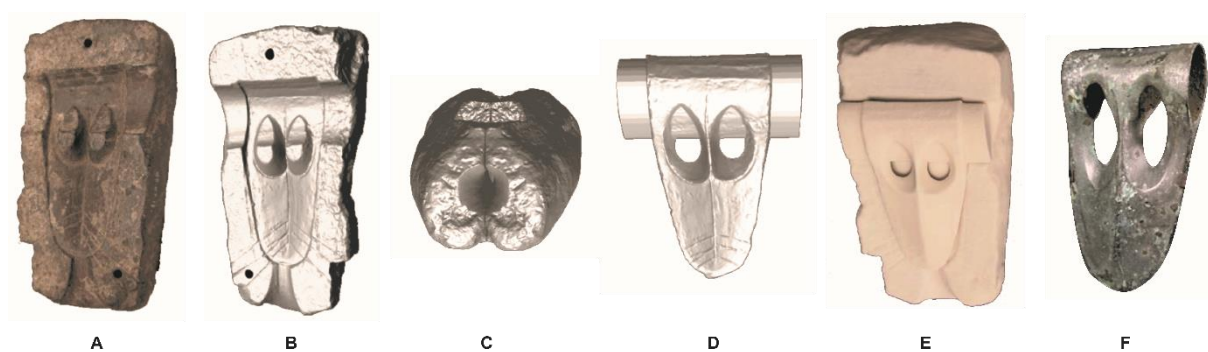
Obr. 11. Ukázka srovnání profilů kreslených rukou a získaných profilů pomocí 3D skeneru (vpravo) a srovnání symetrie člunu (uprostřed a vpravo) Zdroj: Shear 2008 (vlevo), Hanke et al. nedatováno, fig. 5; Moser et al. 2010, Fig. 2 (vpravo).



Obr. 12. Příklad porovnání dvou značek za pomoci „Color Deviation Analysis“. Zdroj: Rutland a La Pensée 2010.



Obr. 13. Ukázka identifikace „neviditelných“ elementů pomocí 3D skeneru. Zdroj: Diaz-Andreu et al. 2005, Fig. 2. (vlevo), Prigg 2012 (uprostřed), Arles et al. 2011, Fig. 15 (vpravo).



Obr. 14. Příklad rekonstrukce artefaktu z kamenné formy. Zdroj: Rutland and La Pensée 2010.



Obr. 15. Ukázka 3D modelu vytištěným pomocí 3D tiskárny. Zdroj: Chen et al. 2012, Fig. 15 (vlevo), Auclair 2010 (vpravo).

Replikace (3D tisk)

Od virtuální rekonstrukce archeologických artefaktů a ekofaktů je už jen krok k výrobě vlastních replik předmětů pomocí tzv. **rapid prototypingu (RP)**, jinak taky nazývanému **stereolitografie** či jednoduše **3D tisk**. Přístroje tohoto ražení jsou schopny naskenovaný předmět replikovat buďto v reálném, anebo alterovaném měřítku či formě. Tvary, které repliky nabývají, mohou být vytisknuty jak v reversu, tak inverzu (Pattnaik et al. 2012, Wachowiak a Karas 2009).

Hlavní výhoda tohoto principu je samozřejmě sama o sobě možnost replikace skenovaného předmětu, kdy může být namísto originálu vystavena její kopie. S tím souvisí již zmíněná možnost „hmatové zkušenosti“, kterou využijí hlavně muzea zaměřující se i na hendikepovanou část veřejnosti. Nabízí se rovněž komerční využití replik například formou upomínkových předmětů (Allard et al. 2005, Seulin et al. 2006).

3D tisk s sebou samozřejmě přináší i možnost přenosu prostorové informace o předmětu na geograficky větší vzdálenost, např. na vzdálenou instituci disponující 3D skenerem, která si poté může předmět jednoduše vytisknout a využívat ho buďto k výstavním, či vědeckým účelům. Výhoda může být rychlost oproti fyzickému přenosu předmětů a minimalizace rizik spojených s transportem (ztráta, poničení atd.). Po zajištění autorskoprávních záležitostí by se tak zefektivnila přístupnost kulturního dědictví jak pro studijní účely, tak pro širokou veřejnost.

Jedna z obvykle používaných technologií 3D tisku je technologie využívající polymerace pryskyřičných materiálů pomocí **stereolitografie (SLA)**. Princip metody je založen na přeměně světlocitlivého tekutého materiálu, většinou pryskyřičné báze, na pevný materiál, a to za pomoci UV laseru.

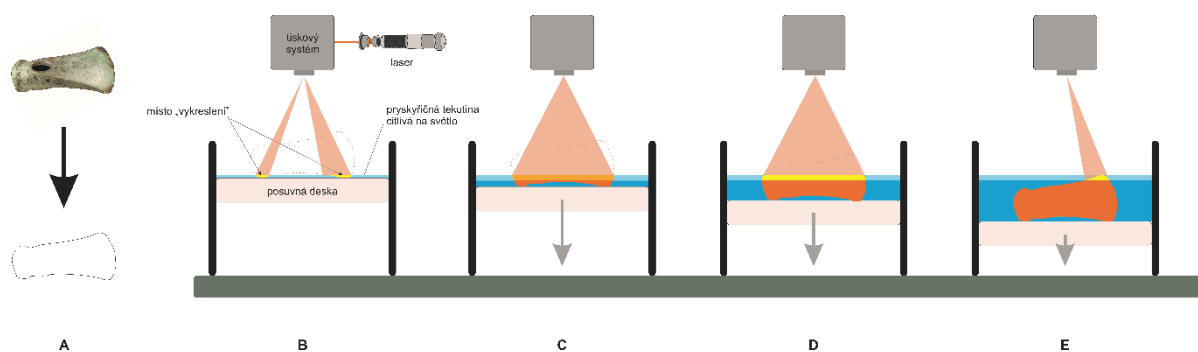
Nejdříve se skenovaný či navržený předmět softwarem „rozdělí“ na velké množství dílčích horizontálních vrstviček, resp. horizontálních průřezů (obr. 16:A). Deska se vrstvička po vrstvičce ponořuje do kádi s pryskyřicí a laser postupně každou z těchto vrstviček „vykresluje“, a to od spodu předmětu až po jeho vrch (obr. 16:B-E). Proces tisku je tedy aditivní a výsledkem je pryskyřičný model plastové barvy (3DSystems 2013, Bugeda et al. 1995, Elomaa et al. 2011, Wachowiak a Karas 2009).

Druhou často používanou metodou je **Selective Laser Sintering (SLS)**. Princip je podobný jako u SLA s tím rozdílem, že se na pevný materiál nepřeměňuje pryskyřice, nýbrž prášek (obr. 17). Ten se ve velice tenké vrstvičce odpovídající jednomu průřezu nanese pomocí speciální role na desku (obr. 17:B). Poté laser danou vrstvu „zesintruje“ (obr. 17:C). Plato, na kterém se tato vykreslená vrstva nachází, se posune dolů a proces (nanášení vrstev, jejich vykreslování a posouvání plata) se opakuje až o doby, dokud není vykreslen celý model (obr. 17:D-E). Prášek využívaný v této technologii je většinou pryskyřičný, může se ovšem využít i jiného materiálu (3DSystems 2013, Fischer et al. 2004, Pereira et al. 2012).

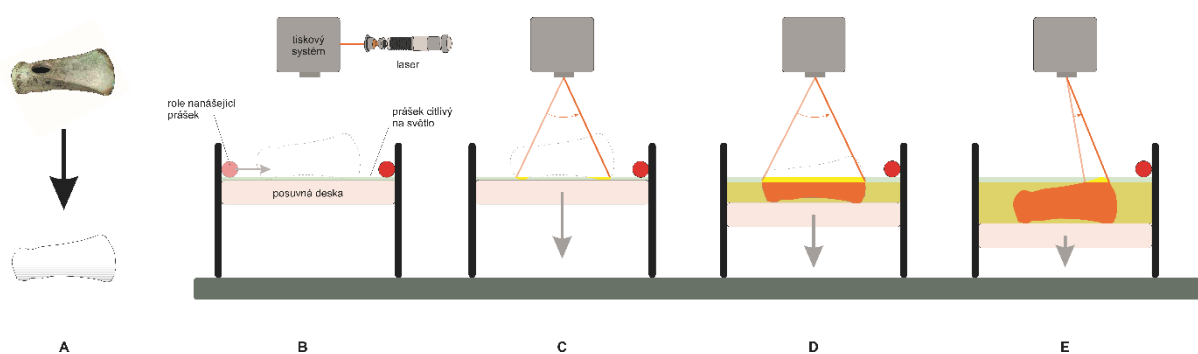
Pro tvorbu kovových modelů existuje analogická metoda využívající kovového prášku, která se označuje jako **Direct Metal (SLM)**, **Direct metal laser fabrication (DMLF)** anebo **Electron Beam Melting (EBM)** (3DSystems 2013, Anonyme 2013, Hock 2011, Yang et al. 2010).

Pro metalické předměty lze také využít i obdobnou techniku, kdy se na desku nastříká kovový prášek, který je ztužován pomocí pryskyřice či vosku. Takto vytvořená replika se poté vloží do pece, kde se přebytečná pojiva vypálí. Díry po nich se poté mohou vyplnit jiným kovem, například mosazí (Wachowiak a Karas 2009).

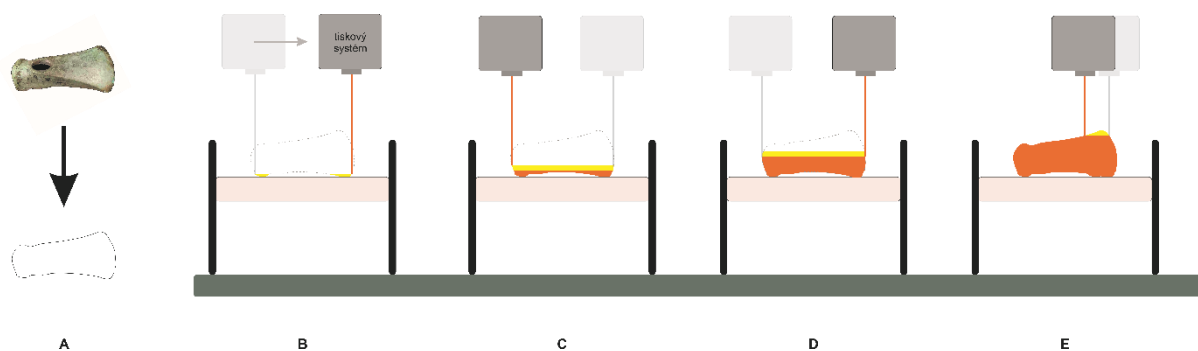
Princip další a ne poslední z řady aditivních technologií je velice podobný SLS a nazývá se **Objet Multi-Material 3D Printing**. Rozdíl je v tom, že se materiál nastříká z posuvné hlavičky přímo ve tvaru odpovídající vrstvičky, která je okamžitě vypálena UV světlem (obr. 18). Výhoda této technologie je, že podporuje nástřik několik různých druhů materiálu při jednom tisku (Stratasys 2013).



Obr. 16. Princip stereolitografie. Zdroj: autor podle Rao a Saini 2008, Fig. 1.4, Pandey nedatováno, Fig. 5.



Obr. 17. Princip Selective Laser Sintering. Zdroj: autor podle Pandey nedatováno, Fig. 6.



Obr. 18. Princip Objet Multi-Material 3D Printing. Zdroj: autor podle Pandey nedatováno, Fig. 9.

Z dalších metod 3D tisku lze jmenovat **Fused Deposition Modeling (FDM)** využívající kombinaci přímého nástřiku dvou složek materiálu – primárního (většinou se jedná o termoplast) a podpůrného. Po tom, co je nástřik modelu hotov, se model ponoří do vody, ve které se podpůrný materiál rozpustí (Grimm 2003, Choi et al. 2011).

Ink Jet Printing (IJP) anebo **3D printing (3DP)** používá k tvorbě vrstviček hlavici stříkající (podobně jako v barevných tiskárnách) kapičky směsi, které hned po nástřiku tvrdnou. Tato technologie je velice ideální například pro barevný tisk.

Digital light processing 3D printing (DLP) funguje rovněž na stejném principu jako SLA, ke ztvrdnutí materiálu se využívá DLP čipu, který každý průřez modelu po určitou dobu projektuje na tekutý polymer (Fablogica 2012, Hoffman 2011).

Laminated object manufacturing (LOM) využívá jednoduchou techniku, kdy se na podložku z role navinuje materiál (obvykle papír, polymer nebo kov), z kterého se pomocí laseru vyřeže tvar odpovídající jednomu průřezu modelu. Poté, co je tvar vyřezán, je tepelně spojen (laminován) k předchozí vrstvě pomocí zahřátého válce. Proces se tak opakuje, dokud se celý model nevykreslí (Pang et al. 2001).

Výčet zde zmíněných aditivních technologií 3D tisku není v žádném případě vyčerpávající. Mimo tyto technologie existuje ještě celá řada dalších komerčních či nekomerčních technologií (viz Liu et al. 2002, Pattnaik et al. 2012).

Kromě aditivních metod se využívají i **metody subtraktivní**, kdy je hmota z bloku surového materiálu postupně odstraňována. Používají se k tomu **přístroje s číslíkovým řazením (Computer Numerical Control – CNC)** ovládající obráběcí stroje, obvykle soustruh anebo frézky. Například v případě frézky, kterou si můžeme představit jako zubní vrtačku, se v prvním kroku nadefinují trasy, po nichž se bude fréza pohybovat. Samotné substrakce začíná v několika sériích, při nichž se automaticky mění šířky frézek do širších, odstraňujících materiál hrubě až po tenčí, jimiž lze lépe vyřezat detaily plánované repliky (Chen a Ng 1997, Wachowiak a Karas 2009).

Obecné charakteristiky 3D tiskáren

Zhodnotit klady a zápory jednotlivých technologií je nesnadné, jelikož ve velké míře záleží na výrobcích, které materiály používají a jakých velikostí. V řadě případů výrobci rovněž modifikují zmíněné výrobní postupy. Proto zde budou charakterizovány

Obecně je jedna z určujících kategorií **maximální velikost předmětu**, který je tiskárna schopna replikovat. Tiskárny jsou většinou schopny produkovat pro archeology repliky dostačujících velikostí (do 1.5 m v případě SLA a do 0.75 m u SLS), pokud se jedná o větší předměty, je možné výsledný model slepit z několika dílčích částí (3DSystems 2013a, 2013b).

Rozlišení, tedy to jak přesný, resp. „jak hladký“ povrch je 3D tiskárna schopná vytvořit, je u tiskáren velice variabilní. Někdy je zmiňováno, že je rozlišení u některých přístrojů ne zcela dostačující (některé druhy SLA tiskáren mohou na předmětu například produkovat „efekt schodů“), v posledních několika letech ovšem dochází k obrovskému zlepšení či zavedení nových technologií (např. **Slant Beam Rotation – SBR**), díky nimž se problémy spojené se špatným rozlišením daří eliminovat. Kvalita rozlišení 3D tiskáren se samozřejmě odráží v ceně 3D tiskáren (Arif a Murakami 2009).

Materiál, ze kterého je výsledný model vyroben, je také odvislý od užití výrobní technologie. Pro modelaci se využívají převážně plasty a polymery, kovy, keramika či sklo, v případě CDC přístrojů lze teoreticky využít jakéhokoliv materiálu. Vyrábí se i přístroje schopné tisku potravin (včetně čokolády

nebo sýrů). V drtivé většině případů se tak aplikovaný materiál liší od původního materiálu. V řadě případů je jeho životnost, pokud se nejedná o speciální materiály využívané v letectví či subakvatice, poměrně limitována (Dynamics 2013, Imagine3DPrinter 2013, Wachowiak a Karas 2009).

Z daných vlastností 3D tiskáren také plyne fakt, že z velké části nepodporují **možnost replikace barvy** předmětu – modely SLA tiskáren mají pryskyřičnou barvu, modely z CNS barvu použitého materiálu, která mohou být v řadě případů dostačující (např. kovy a dřevo), v celé další však nikoliv (sádra, plasty). Jako i ostatních vlastností i barva odvisí od technologie tiskárny, jejího výrobce a jeho komerčního zaměření. Primárně se totiž tiskárny využívají k technickým účelům, kde barva výsledné repliky nehraje roli. S narůstajícím množstvím spotřebitelů se však objevují tiskárny schopné reprodukovat barvu, v některých případech dokonce s velice uspokojujícími výsledky (Corporation 2005, Chen et al. 2012, Wachowiak a Karas 2009).

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

- 3DSystems (2013). "Direct Metal (SLM)." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://production3dprinters.com/slm/direct-metal-slm>.
- 3DSystems (2013). "Selective Laser Sintering (SLS®)." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://production3dprinters.com/sls/selective-laser-sintering>.
- 3DSystems (2013). "Stereolithography (SLA®)." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://production3dprinters.com/sla/stereolithography#>.
- Anonyme (2013). "Rapid Prototype Basics Vol. 2: Get the Basis on Prototyping and Rapid Prototyping." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://file.guicnc.com.br/data/PDF/PrototypeBook2.pdf>.
- Archaeology, S. (2012). "Working Through the Scanning and Modeling Process." Poslední náhled: 2013/10/20, <http://sustainablearchaeologyuwo.blogspot.fr/2012/07/working-through-scanning-and-modeling.html>.
- Auclair, S. (2010). "Cloning an archaeological artifact." Poslední náhled: 2013/10/20, <http://blog.creaform3d.com/2010/04/cloning-an-archaeological-artifact/>.
- Blazeby, M. (2013). "The Body and Mask in Ancient Theatre Space - Research Project." Retrieved 2013/10/18, 2013, from <http://www.kvl.cch.kcl.ac.uk/masks/scanning/scanning.html>.
- Corporation, Z. (2005). "Z Corporation 3D Printing Technology." Poslední náhled: 2013/01/08, http://www.zcorp.com/documents/108_3D%20Printing%20White%20Paper%20FINAL.pdf.
- Dynamics, E. (2013) "Imagine." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://essentialdynamics.net/imagine>.
- Fablogica (2012). "DLP(Digital Light Processing) 3D printing. A brief description." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://fablogica.com/dlpdigital-light-processing-3d-printing-a-brief-description/>.
- Hoffman, T. (2011). "3D Printing: What You Need to Know." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2394721,00.asp>.
- Imagine3DPrinter (2013). "Imagine." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://imagine3dprinter.com/index.php>.
- Stratasys (2013). "Objet Multi-Material 3D Printing Technology." Poslední náhled: 2013/01/08, <http://objet.com/company/technologies>.

Literatura:

- Addison, A. C. (2000). "Emerging trends in virtual heritage." *MultiMedia, IEEE* 7(2): 22-25.
- Allard, T. T., et al. (2005). *Use of Hand-held Laser Scanning and 3D Printing for Creation of a Museum Exhibit*. The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST 2005.

Allen, P., et al. (2004). Seeing into the past: creating a 3D modeling pipeline for archaeological visualization. 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on.

Arles, A., et al. (2011). "La photogrammétrie appliquée à l'archéologie minière : premiers essais." White paper.

Arles, A., et al. (2013). "3D Reconstruction and Modeling of Subterranean Landscapes in Collaborative Mining Archeology Projects: Techniques, Applications and Experiences." International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **40**(5).

Arif, K. M. and T. Murakami (2009). "Slant beam rotation UV scanning to eliminate stair-steps in stereolithography fabrications." The international journal of advanced manufacturing technology **41**: 527-537.

Balzani, M., et al. (2004). Laser Scanner 3D Survey in Archaeological Field: the Forum Of Pompeii. International Conference on Remote Sensing Archaeology, Beijing, China.

Benko, H., et al. (2004). Collaborative mixed reality visualization of an archaeological excavation. Mixed and Augmented Reality, 2004. ISMAR 2004. Third IEEE and ACM International Symposium on.

Boehler, W. and A. Marbs (2004). 3D Scanning and Photogrammetry for Heritage Recording: A Comparison. Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics. Gävle, Sweden: 291–298.

Böhler, W., et al. (2004). High Quality Scanning and Modeling of Monuments and Artifacts. Workshop – Archaeological Surveys, Athens, Greece.

Bruno, F., et al. (2010). "From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition." Journal of Cultural Heritage **11**(1): 42-49.

Bruno, F., et al. (2011). "Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **66**(4): 508-518.

Bugeda, G., et al. (1995). "Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method." Rapid Prototyping Journal **1**: 13-23.

Chamzas, C., et al. (2008). Applying 3D Digitisation Technologies in the Cultural Heritage Domain. International Symposium on Information and Communication Technologies in Cultural Heritage, University of Ioannina, Greece.

Chane, C. S., et al. (2013). "Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications: Survey and perspectives." Image and Vision Computing **31**: 91-102.

Chen, X., et al. (2012). "3D printing robot: model optimization and image compensation." Journal of Control Theory and Applications **10**(3): 273-279.

Chen, Y. H. and C. T. Ng (1997). "Integrated Reverse Engineering and Rapid rototyping." Computers & Industrial Engineering **33**(3-4): 481-484.

Cheng, Y., et al. (2006). Recovery of Cultural Activity for Digital Safeguarding of Intangible Cultural Heritage. Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on.

Choi, J.-W., et al. (2011). "Multi-material stereolithography." Journal of Materials Processing Technology **211**(3): 318-328.

De Reu, J., et al. (2013). "Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage." Journal of archaeological science **40**(2): 1108-1121.

Diaz-Andreu, M., et al. (2005). "Long Meg: rock art recording using 3D laser scanning." Past : the newsletter of the Prehistoric Society **50**: 2-6.

Elomaa, L., et al. (2011). "Preparation of poly(e-caprolactone)-based tissue engineering scaffolds by stereolithography." Acta Biomaterialia **7**: 3850-3856.

Fischer, P., et al. (2004). "Highly precise pulsed selective laser sintering of metallic powders." Laser Physics Letters **2**(1): 48-55.

Gaitatzes, A., et al. (2000). Hellenic Cultural Heritage through Immersive Virtual Archaeology. in the Proceedings of the 6th International Conference on Virtual Systems & MultiMedia.

Geroimenko, V. and C. Chen (2005). Visualizing Information Using SVG and X3D: XML-based Technologies for the XML-based Web, Springer.

Gilboa, A., et al. (2013). "Computer-based, automatic recording and illustration of complex archaeological artifacts." Journal of archaeological science **40**(2): 1329-1339.

Grimm, T. (2003). "Fused Deposition Modelling: A Technology Evaluation." Time-Compression Technologies **2**(2): 1-6.

Hanke, K., et al. (nedatováno). "Enhanced Potential for the Analysis of Archaeological Finds Based on 3D Modeling." White paper.

Hernández, L., et al. (2008). Interactive installations and virtual reality in the museum. The Galicia Dixital experience. Applying 3D Digitisation Technologies in the Cultural Heritage Domain, University of Ioannina, Greece.

Hock, L. (2011). "Methods for Model Building." R&D Magazine Jun2011 **53**(3): 26-29.

Indruszewski, G., et al. (nedatováno). "Application of 3D Modeling in Ship Reconstruction and Analysis: Tools and Techniques." White paper.

Lin, S. C. H., et al. (2010). "The application of 3D laser scanning technology to the assessment of ordinal and mechanical cortex quantification in lithic analysis." Journal of archaeological science **37**(4): 694-702.

Liu, Q., et al. (2002). "Experimental study on the ice pattern fabrication for the investment casting by rapid freeze prototyping (RFP)." Computers in Industry **48**: 181-197.

Management, H. E. L. (2007). "3D Laser Scanning for Heritage: Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture." White paper.

Mara, H., et al. (2007). Ancient Coins & Ceramics - 3D and 2D Documentation for Preservation and Retrieval of Lost Heritage. 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. F. Remondino and S. El-Hakim.

Moser, M., et al. (2010). "Digital documentation and visualization of archaeological excavations and finds using 3D scanning technology." Virtual Archaeology Review **1**(2): 143-147.

Oh, S., et al. (2005). "Collaborative Project to Conserve and Personalize the 3D Digital Archives of Historical Architecture." In Digital Opportunities: Proceedings of the 10th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia **1**: 179-187.

Pandey, P. M. (nedatováno). "Rapid Prototyping Technologies, Applications and Part Deposition Planning." White paper.

Pang, A., et al. (2001). "A CAD/CAM system for process planning and optimization in LOM (Laminated Object Manufacturing)." IIE Transaction **33** **33**: 345-355.

Pattnaik, S., et al. (2012). "Developments in investment casting process—A review." Journal of Materials Processing Technology **212**(11): 2332-2348.

Pereira, T. F., et al. (2012). "3D Printing of Poly(3-hydroxybutyrate) Porous Structures Using Selective Laser Sintering." Macromolecular Symposia **319**(1): 64-73.

Petersson, H., et al. (2009). "Web-based interactive 3D visualization as a tool for improved anatomy learning." Anatomical Sciences Education **2**(2): 61-68.

Pletinckx, D., et al. (2000). "Virtual-reality heritage presentation at Ename." MultiMedia, IEEE **7**(2): 45-48.

Prigg, M. (2012). "Has the mystery of Stonehenge's purpose finally been solved? 3D laser scanning shows stones were aligned with the sun to light up an ART GALLERY." Retrieved 2013/10/16, 2013.

Rao, P. S. and J. S. Saini (2008). Numerical Analysis of Stereolithography Process Using the Finite Element Method. Mechanical Engineering Department. Thapar, Thapar. **Thesis**.

Remondino, F. and A. Rizzi (2009). Reality-Based 3D Documentation of World Heritage Sites: Methodologies, Problems and Examples. 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japan.

Remondino, F. (2011). "Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning." Remote Sensing **3**: 1104-1138.

Ruthensteiner, B. and M. Heß (2008). "Embedding 3D models of biological specimens in PDF publications." Microscopy Research and Technique **71**(11): 778-786.

Rutland, F. P. and A. La Pensée (2010). "Non-contact 3D laser scanning as a tool to aid identification and interpretation of archaeological artefacts; the case of a Middle Bronze Age Hittite dice." White paper.

- Schmidt, N., et al. (2010). Capture and Processing of High Resolution 3D-Data of Sutra Inscriptions in China. Digital Heritage. M. Ioannides, D. Fellner, A. Georgopoulos and D. Hadjimitsis, Springer Berlin Heidelberg. **6436**: 125-139.
- Schultzen, J. (2011). "Remodelling the past - Archaeometrological analysis applied on Birka weight material using a 3D scanner & Computer-Aided Design." Journal of archaeological science **38**: 2378-2386.
- Seulin, R., et al. (2006). "Three-dimensional tools for analysis and conservation of ancient wooden stamps." The Imaging Science Journal **54**(2): 111-121.
- Shear, G. (2008). "3D Scanning for Profile Acquisition and Reconstruction of Mayan Ceramics." White paper.
- Slator, B. M., et al. (2001). Teaching with Immersive Virtual Archaeology. Proceedings of the Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia.
- Snaveley, N., et al. (2007). "Modeling the World from Internet Photo Collections." International Journal of Computer Vision **80**(2): 189-210.
- Tang, S.-K. and Y.-T. Liu (2002). A Digital Reconstruction Procedure for a Disappeared City Space and Its Activities. 20th eCAADe Conference Proceedings, Warsaw, Poland.
- Terras, M. M. (1999). "A Virtual Tomb for Kelvingrove: Virtual Reality, Archaeology and Education." White paper.
- Tost, L. P. and M. Economou (2008). Worth a thousand words? The usefulness of immersive Virtual Reality for learning in cultural heritage settings. International Symposium on Information and Communication Technologies in Cultural Heritage, University of Ioannina, Greece.
- Tucci, G., et al. (2011). Effective 3D Digitization of Archaeological Artifacts for Interactive Virtual Museum. Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2011.
- Tucci, G., et al. (2012). "A Defined Process to Digitally Reproduce in 3D a Wide Set of Archaeological Artifacts for Virtual Investigation and Display." Journal of Earth Science and Engineering **2**: 118-131.
- Wachowiak, M. J. and B. V. Karas (2009). "3D Scanning and Replication for Museum and Cultural Heritage Applications." Journal of the American Institute for Conservation **48**(2): 141-158.
- Wei, O. C., et al. (2010). "3D Documentation and Preservation of Historical Monument Using Terrestrial Laser Scanning." Geoinformation Science Journal **10**(1): 73-90.
- White, M., et al. (2004). ARCO - an architecture for digitization, management and presentation of virtual exhibitions. Computer Graphics International, 2004. Proceedings.
- Yang, J., et al. (2010). "Direct metal laser fabrication: machine development and experimental work." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **46**(11): 1133-1143.
- Zhang, S. Y., et al. (2009). "High-tech composites to ancient metals." Materials Today **12**(7-8): 78-84.
- Zimmermann, N. and G. Eßer (2008). "Showing the Invisible – Documentation and Research on the Roman Domitilla Catacomb, Based on Image Laser Scanning and 3D Modelling." Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology: 58-64.
- Zycherman, L., et al. (2012). "3D Scanning of Matisse, The Back I - IV: One Thing After Another." White paper.

3D SKENOVÁNÍ A POSTPROCESSING

Vlastní proces skenování fyzických objektů probíhá obvykle v několika krocích:

- 1) Příprava předmětu, kalibrace
- 2) Vlastní skenování
- 3) Postprocessing (registrace, zarovnání, integrace, filtrace šumu a odlehlých bodů, vyhlazení, zředění bodů, vyplnění děr)

Každá z těchto etap je závislá na charakteristikách skenovaného předmětu či scény, stejně jako na zkušenostech a zručnosti operátora. Právě on definuje všechny parametry skenovacího zařízení a zajišťuje podmínky, za kterých je předmět naskenován v odpovídající kvalitě a s nejmenšími časovými nároky. Kvalita modelu se samozřejmě odvíjí od jejího účelu – náhledy pro muzejní záměry nebudou muset být tak velice přesné jako modely určené pro vědeckou činnost.

Příprava předmětu

Důležitým faktorem při skenování je velikost a tvar objektu. Určuje vzdálenost od skeneru a tím pádem i jeho přesnost. Při skenování je důležité, aby byl předmět pevně fixován na jednom místě (např. na podložné desce) a aby s ním nebylo v průběhu skenování hýbáno. Uchycení archeologických artefaktů například za pomoci plastelíny (obr. 1: vlevo) má své nesporné výhody u menších předmětů (silex, keramické střepy atd.). Nevýhodou plastelíny je ovšem to, že je vyrobena na bázi vazelíny a zanechává tak na objektech mastné stopy. Navíc se vyšší teplotou a tlakem předmětu často deformuje a dochází tak k posunu předmětu, který by měl po celou dobu skenování zůstat ve stejné pozici. Proto je ke skenování užitečnější využít různých úchytných systémů (obr. 1: vpravo), které se teplotními změnami či tlakem objektu nedeformují, a navíc nezabírají velkou část skenovaného objektu (Mara et al., Böhler et al. 2004).

Většina skenovacích technologií se špatně vypořádává s lesklými, reflexními a transparentními povrchy, které světlo buďto propouštějí, pohlcují, anebo odrážejí. K tomu, aby byly tyto vlastnosti povrchů objektů eliminovány, se na jejich povrch aplikuje vrstvička prášku, většinou bílé barvy.

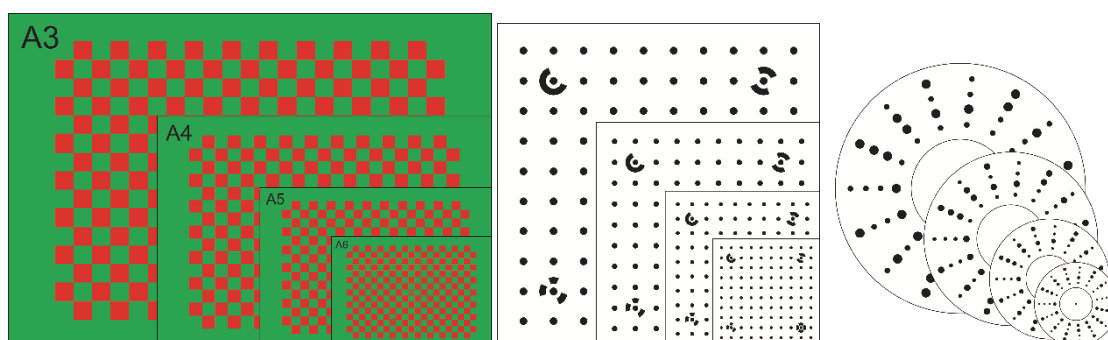
Nanášení prášku má ovšem řadu úskalí. Prvním z nich je nemožnost jeho aplikace na předměty určité kulturní hodnoty. Prášek by měl být na předmět nanášen rovnoměrně tak, aby nedocházelo k tvorbě „uměle vymodelovaných“ částí. Aplikací menší vrstvičky prášku na objekt dochází rovněž k částečnému vyhlazení povrchu (ovšem jen v řádech několika mikronů) a ztrátě informace o jeho barvě. Snad jen doplňkovou informací je to, že nános prášku na prostorově mohutnější objekty (auto, letadlo) může být nákladově náročnější záležitostí (Zaimovic-Uznovic a Lemes 2010).

Kalibrace

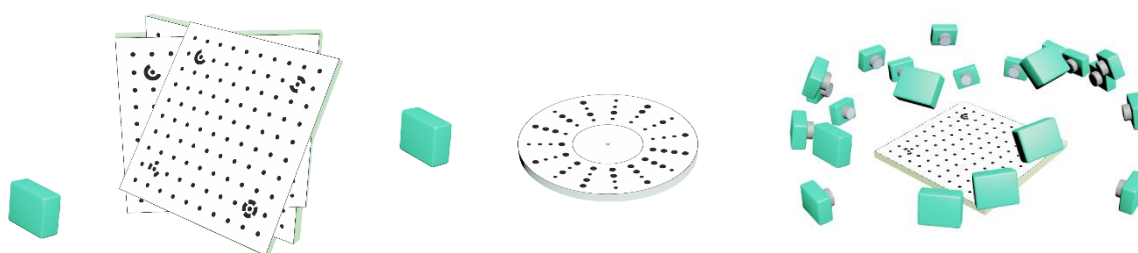
Před započatím skenování je potřeba skener **kalibrovat**. Jedná se o nejdůležitější a mnohdy časově nejnáročnější část skenovacího procesu. Pomocí kalibrace se určí **vnitřní skenovací parametry**, tzn. geometrie akvizičního systému (pozice, rotace vzdálenosti mezi jednotlivými komponentami skeneru), stejně jako to, jakým způsobem skener vnímá **vnější**, hlavně světelné, podmínky (Tong 2012).



Obr. 1. Uchycení předmětu pomocí plastelíny (vlevo) a svorky (vpravo). Zdroj: autor (vlevo), Mara et al., Fig. 1a (vpravo).



Obr. 2. Kalibrační desky pro systém Mephisto (vlevo), Photomodeler (uprostřed) a 3D SOM (vpravo). Zdroj: autor (vlevo), autor (uprostřed), autor podle Baumberg et al. 2005 (vpravo).



Obr. 3. Kalibrace fotografického systému. Fixní kamera, měnící se pozice a natočení kalibrační desky (vlevo), fixní kamera a otáčecí se deska (uprostřed), fixní deska a měnící se pozice a natočení kamery (vpravo). Zdroj: autor.

Kalibrace geometrie skeneru probíhá různými způsoby. Některé systémy, jako například laserový skener Microscan, využívají tzv. kalibrační koule, většina skenerů se však kalibruje pomocí kalibrační desky. V obou případech je nutné, aby tyto kalibrační pomůcky splňovaly některé z podmínek, jakými jsou například absolutní rovnost a konstantní odrazivost jejich povrchu. Vzor na kalibrační desce by měl být dostatečně kontrastní, hrany mezi jednotlivými prvky velice ostré a povrch by měl být matný, aby nereflekoval projektované světlo. Je rovněž zřejmé, že při samotném kalibrování by kalibrační pomůcky měly zůstat vůči skenovacímu systému absolutně nehybné. Velikost, popřípadě vzájemná

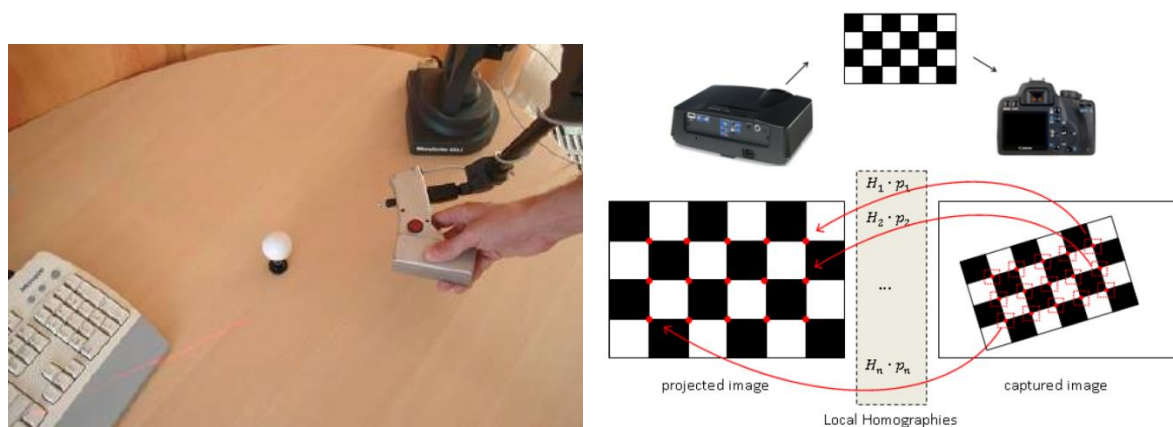
vzdálenost, jednotlivých prvků na kalibrační desce dodává skenovacímu systému informace o reálných mírách.

Každý akviziční systém má svůj vlastní proces kalibrace:

Pro většinu systémů založených na „Depth from X“ a využívajících k extrakci koordinát několika snímků obrazu (stereovize, SFS, SFM, SFF/SFD) stačí pro kalibraci zjistit vnitřní parametry obrazového zařízení (kamery nebo fotoaparátu). Tyto interní parametry se zjišťují ze série fotografií statické kalibrační mřížky získaných z různých pozic fotoaparátu (obr. 3: vpravo). Kalibrační fotografie je možné získat i ze statického fotoaparátu zachycujícího různé pozice a natočení desek (obr. 3: vlevo, uprostřed). Z takto získané série obrázků se poté automaticky dopočítají interní parametry fotoaparátu. Princip je přitom podobný jako u Shape From Motion – nejprve jsou na několika snímcích identifikovány korespondující body, které se na několika snímcích identifikují a pak se jejich „posunem“ za přispění triangulace získají požadované parametry fotoaparátu, jakými jsou zoom, ohnisková vzdálenost atd. (Inc. 2013).

Pro systémy založené na strukturovaném světle je důležité zjistit vzájemný vztah mezi zdrojem světla (dataprojektor), obrazovým senzorem (kamera, fotoaparát) a skenovacím prostorem. Kalibrací se také zjistí interní parametry světelného zdroje a senzoru, které mohou být libovolně modifikovány operátorem. V případě kamery a fotoaparátu se jedná se hlavně o zoom, ohnisko, čas, clonu, rozlišení a formát výstupního snímku (tiff, jpeg, raw, ...). Každá akvizice je určena zorným polem senzoru, přičemž pro nejlepší výsledky by měl objekt zaujímat jeho čím jak největší plochu. Z tohoto důvodu je zřejmé, že kalibrace objektů různých velikostí bude probíhat za použití odlišných čoček, odlišných ohniskových vzdáleností a odlišných velikostí kalibračních mřížek (Moreno a Taubin 2012).

Kalibrace v praxi probíhá tak, že se pomocí skeneru zaznamená série obrazů kalibrační desky ležících v různých pozicích (vzdálenosti, natočení) vůči skeneru v prostoru, ve kterém se bude skenovaným objektem v následné akvizici manipulovat. Důležité přitom je, aby se při jednom fotografování na kalibrační desce podařilo zachytit dostatečné množství referenčních prvků (průsečíky linií, vrcholy čtverců, středy kruhů atd.). Proto by měl být jak senzor, tak dataprojektor schopen dobře zaostřit na celý objem vzduchu, ve kterém se bude pohybovat kalibrační deskou. Pro správnou kalibraci je rovněž důležité, aby jednotlivé korespondující body na různých obrázcích ležely čím jak nejdál od sebe, čímž bude skenovací systém schopen získat přesnější informace o parametru hloubky scény.



Obr. 4. Kalibrace laserového skeneru pomocí koule (vlevo) a princip kalibrace pomocí lokální homografie (vpravo). Zdroj: GmbH 2008 (vlevo), Moreno a Taubin 2012 (vpravo).

Samotný způsob kalibrace se může lišit výrobce od výrobce, případně systém od systému. Nejjednodušší metoda je založená na principu stereovize, kdy projektor a světelný zdroj tvoří stereosystém (viz výše). Jediná modifikace je v tom, že jeden fotoaparát tradiční stereovize je zde nahrazen projektorem - ten je tak vlastně chápán jako inverze kamery. Problém je v tom, že dataprojektor se jako kamera nechová, tzn., nezachycuje obraz. Situaci lze vyřešit pomocí vztahu mezi projektorem a pixely kamery. Nejprve je sekvence strukturovaného světla dekodována a každý pixel kamery je přiřazen sloupci a řádku projektoru. Poté je v obrazu kamery odhadnuta homografie pro každý vrchol šachovnice. Nakonec je každý z vrcholů konvertován z koordinát kamery do koordinát projektoru (Moreno a Taubin 2012).

Jedna z kalibračních metod – metoda založená na homografii využívá geometrie posunu jednotlivých rohů šachovnice kalibrační desky mezi obrazem projektoru a obrazového senzoru (fotoaparát, kamera). Při hledání korespondujících bodů nebere oproti jiným systémům v potaz jen vrcholy šachových políček, ale i jejich blízké okolí (obr. 4: vpravo). V tomto systému navíc nemusí být kamera předem předkalibrována, což znamená, že její vnitřní parametry nemusí být předem známy. Předkalibrace ovšem u jiných metod ulehčují a zrychlují kalibrační proces (Moreno a Taubin 2012).

Kalibrace pomocí triangulačního ramenného nebo robotického laserového skeneru probíhá o něco jednodušeji. Kalibrační koule se jednoduše položí na místo lehce dosažitelné skenovacím paprskem (obr. 4: vlevo). Poté se koule naskenuje z pěti náhledů, a to zepředu, zezadu, zleva, zprava a seshora a software automaticky definuje geometrii skeneru (GmbH 2008).

Samozřejmě lze i proces geometrické kalibrace automatizovat, např. pomocí pasivní 3D rekonstrukce, která dovoluje určit parametry kalibrace až po vlastní akvizici dat (Bellocchio et al. 2012, Scaramuzza et al. 2007, Sheehan et al. 2012).

Vlastní skenování

Objekt je v první řadě nutno správně **umístit do prostoru**, jenž je skener schopen zachytit. Jedná se o prostor určený kalibrací skeneru, pro něhož jsou garantovány optimální geometrické podmínky všech jeho komponent – ať už zaostření projektovaného vzoru světelného zdroje (laseru, dataprojektoru), tak použitého optického senzoru.

Už v samotném nastavení parametrů skeneru před započítím skenování lze často nastavit některé z vlastností skenování, které mohou usnadnit a zrychlit následný proces postprocessingu.

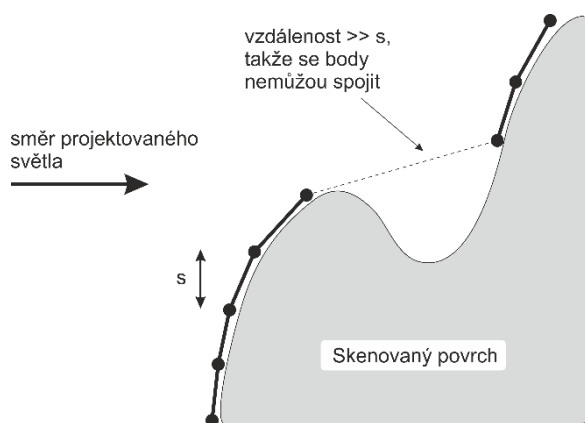
Jedním z nich je **vzdálenost předmětu** od skeneru. Skener tak bude pracovat jen s naskenovanými body, které leží v předem určeném intervalu (Boehler a Marbs 2002). Tímto nastavením lze vyfiltrovat například popředí a pozadí skenované scény, čímž se zredukuje velikost získaných dat a konsekventně zrychlí další úpravy při postprocessingu.

Dalším parametrem mohou být **vlastnosti trojúhelníků** mračna bodů, jejichž vrcholy budou po skenování uchovány či eliminovány. Nastavit lze buďto maximální/minimální délku ramen trojúhelníku (obr. 5), anebo minimální/maximální úhel, který svírají dvojice jejich ramen. Pro kvalitu modelu je totiž nejlepší, když budou jednotlivé trojúhelníky následujícího polygonálního modelu malé

a pravidelné. Nastavením těchto vlastností je možné snížit množství šumu ve finálním mračnu bodů a zvýšit tak jeho výslednou kvalitu (Curless 1999).

Dalšími možnostmi může být **volba hustoty** mračna bodů. Skener tak nemusí extrahovat všechny nalezené body objektu či scény, ale může brát v potaz například každý druhý. Není totiž vždy pravdou, že čím více bodů, tím lepší a přesnější model. V některých případech může být naopak velké množství naskenovaných bodů zdrojem nechtěného šumu, jehož eliminace při postprocessingu může být časově velice náročnou záležitostí.

U některých systémů, hlavně u těch, které využívají jako jeden ze senzorů kameru či fotoaparát, je možné nastavit vlastnosti obrazu fotografie, resp. akvizičního snímku. Tyto vlastnosti se tradičně nastavují ještě před či v procesu kalibrace skeneru.



Obr. 5. Konektivita meshe. Zdroj: upraveno podle Turk a Levoy 1994, Fig. 3.

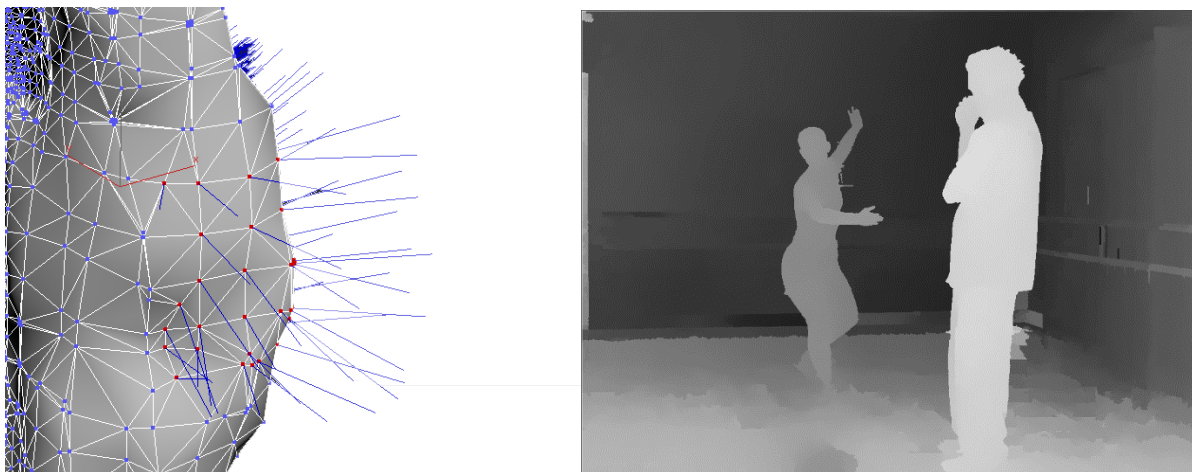
Typy extrahovaných 3D informací

Aktivní skenery produkují jako výsledek skenování takzvané range images, buďto ve formě hloubkového obrazu, mračna bodů, anebo už triangulovaného polygonálního modelu. Jeden balík takovýchto dat přitom odpovídá tomu, co skener při jedné akvizici zaznamenal. Tyto obrazy mohou být poté libovolně exportovány do celé řady datových formátů a může s nimi být dále pracováno v libovolném programu pro práci s 3D daty (Turk a Levoy 1994).

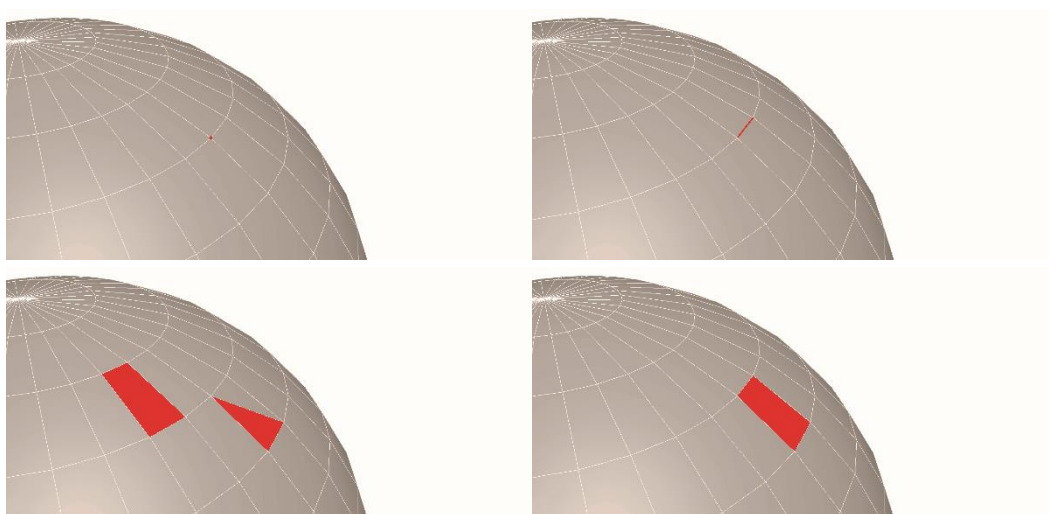
Výstupem drtivé většiny aktivních triangulačních 3D skenerů je **tzv. mračno bodů (point cloud)**. Mračno bodů určuje polohu daného množství neorganizovaných a nepravidelných bodů vyskytujících se na povrchu skenovaného předmětu či scény, kterou ohraničují. Každý bod je přitom reprezentován třemi koordinátami (x , y , z), které určují jeho polohu vzhledem k danému koordinátnímu systému. Často se k prostorovým informacím přidávají i informace o barvě, a to buďto v tradiční škále třech barev (RGB), anebo s přidanou hodnotou tzv. alfa kanálu, který určuje průhlednost konkrétního bodu (RGBA). Například oproti voxelům neobsahují body v mračnu bodů informaci o konektivitě, což znamená, že není zřejmé, se kterým bodem se má jednotlivý bod spojit (Fasshauer 2007, Linsen 2001, Woo a Poulin 2012).



Obr. 6. Mračno bodů šálku (vlevo) a lidské tváře (vpravo). Zdroj: autor (vlevo), Monsef 2008 (vpravo).



Obr. 7. Povrch polygonálního modelu s vyznačenými normálami červených bodů (vlevo), hloubková mapa (vpravo). Zdroj: autor (vlevo), da Silva 2013 (vpravo).



Obr. 8. Polygonální mesh. Vrchol/vertice (vlevo nahoře), hrana/edge (vpravo nahoře), čtvercová a trojúhelníková plocha/quad and triangle face (vlevo dole), polygon (vpravo dole). Zdroj: autor.

Jinou možností primárního výstupu obrazu, typickou převážně pro pasivní metody, je **hloubkový obraz (depth/disparity map)**. Jak už název napovídá, hloubkový obraz reprezentuje 2D obraz hloubky scény, tedy vzdálenosti od senzoru optického zařízení. Můžeme si ji představit jako obyčejnou fotografii, kde každý pixel na této fotce odpovídá jednotlivému bodu na objektu (obr. 7: vlevo). Vzdálenost či hloubka bodu od roviny obrazu je poté asociována každému pixelu a může být vizualizována například ve stupních šedi. Hloubkové mapy mohou být kombinovány s 2D obrazem pro tvorbu takzvané 2.5D reprezentace 3D scény. S hloubkovým obrazem pracuje například metoda shape from (de)focus anebo systém Microsoft Kinect (Curless 1999, Morel 2005, Su et al. 2012).

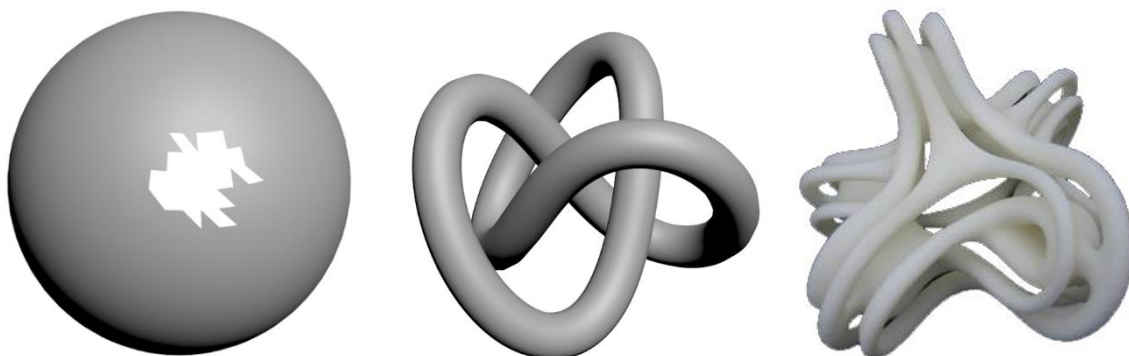
Plocha normál (Surface normals), spíše než pozici, definuje chování povrchu objektu. Surface normals si lze představit jako plochu, z níž jsou jakoby „vysunuty“ vektory, které definují svažitost, respektive topografii povrchu (obr. 7: vlevo)⁶. Každý z vektorů je projektován z jedné polygonální plochy objektu a je k ní kolmý. Plocha normál je předstupněm výpočtu souřadnic některých z pasivních přístupů, např. shape from shading nebo shape from texture (Hodges 2003).

Polygonální mesh je nejčastější reprezentace objektů v 3D zobrazení (obr. 8). Jedná se o soubor vrcholů (vertices), hran (edges), ploch (faces), polygonů (polygons) anebo povrchů (surfaces), které definují tzv. polyhedrální objekt v 3D prostoru. Náhled povrchu těchto objektů je v 3D softwarech generován různými matematickými algoritmy, pomocí nichž dochází k dojmům plastičnosti (Russo 2010). Pro přehled jednotlivých přístupů lze odkázat na Linsen 2001, Young, Chen et al. 2004.

Hierarchizace jednotlivých elementů polygonálního modelu je následující. Nejzákladnější prvky jsou **vrcholy**, kterým může být přiřazena další informace, jako například barva, normálový vektor či textura. **Hrana** je spojení mezi dvěma vrcholy, **plocha** sada tří (triangle face) nebo čtyř (quad face) hran. **Polygon** je poté sada ploch (Wikipedia 2013).

Hrana, někdy zvaná hranice, má zvláštní postavení v tom, že může ohraničovat plochu (face). Polygon, který je tvořen takovými hranami, vytváří tzv. díru, jež na objektech reálného světa neexistuje (obr. 9).

Nejčastěji využívaným druhem meshe je **polygonální trojúhelníkový model** definovaný jako sada vrcholů a orientovaných trojúhelníků, které tyto vrcholy spojují (Liepa 2003).



Obr. 9. Definice díry. Díra v polygonálním modelu (vlevo) a topologická díra (uprostřed a vpravo). Zdroj: autor podle Lorient 2009, fig. 3.4 (vlevo a uprostřed), Morris 2006 (vpravo).

⁶ Pro názornou animaci normálového povrchu (<http://vimeo.com/21574938>).

Proces vytvoření polygonálního modelu z mračna bodů

Proces vytvoření polygonálního modelu z mračna bodů je proveden pomocí **triangulace**, jejímž cílem je spojit jednotlivé neorganizované body mračna bodů do jednoho celku. Podle druhu požadovaného produktu lze rozlišit dvě formy triangulace mračna bodů, a to 2D a 3D (Loriot 2009).

Dvojměrná triangulace se často používá v počítačové grafice, kde se využívá pro zobrazení trojdimenzionálního objektu v rovině. Metoda přitom pracuje výhradně jen s body, které lze vidět v jednom náhledu. Proces je založen na tom, že se trojrozměrné mračno bodů jednoduše projektuje na dvoudimenzionální rovinu a poté se tyto projektované body spojí pomocí jedné z triangulačních metod. Může se jednat například o planární triangulaci či takzvanou tzv. Delauného triangulaci (Bradski a Kaehler 2008).

Planární triangulace nejdříve definuje tzv. *maximální planární rozdělení* tak, aby žádná hrana spojující dva body neprotnula jinou hranu spojující jiné dva body (de Berg et al. 2008).

Delauného triangulace (Delaunay triangulation, obr. 10: uprostřed) byla poprvé použita v roce 1934. Je založena na vlastnosti takzvané prázdné kružnice. Proces funguje tak, že se algoritmus snaží rozmístit jednotlivé body takovým způsobem, aby opsané kružnice, které těmito body prochází, zůstaly prázdné. Řečeno jinak, žádný bod se nesmí vyskytovat uprostřed žádné kružnice (obr. 10: vlevo). Výhoda této metody triangulace je ta, že většina trojúhelníků, které se vyskytují na finálním modelu, mají velmi dobré tvarové vlastnosti (Tu 2008).

Pro tvorbu **trojrozměrného polygonálního modelu** z mračna bodů existuje velká řada přístupů, které mohou být v zásadě rozděleny do třech základních skupin, a to na Delaunay-based, Implicit surface a region growing techniques. Pro bližší přehled algoritmů jednotlivých skupin lze odkázat na Sarangi (2007).

Delaunay-based metody začínají tvorbou geometrické struktury z neorganizovaného pointcloudu za použití Delauného triangulace či Voroného diagramu. Poté se z této struktury extrahují plochy, které aproximují původní povrch. Výhoda těchto přístupů je to, že jsou schopny dobře vyplnit chybějící geometrickou informaci.

Implicit surface metody pracují s tzv. signed distance function, přičemž tato funkce závisí na formě f. Tyto techniky aproximují a jsou proto limitovány jen pro aplikaci rekonstrukce povrchu v počítačové grafice a virtuální realitě.

Region-growing metody vezmou jeden trojúhelník jako základní region a iterativně přidávají trojúhelníky po okrajích regionu. Jejich výhodou je hlavně rychlost, nevýhodou pak kvalita, která ve velké míře závisí na parametrech definovaných uživatelem. Další nevýhoda je ta, že při triangulaci mračna bodů s velkým šumem vznikají v modelu malé díry.

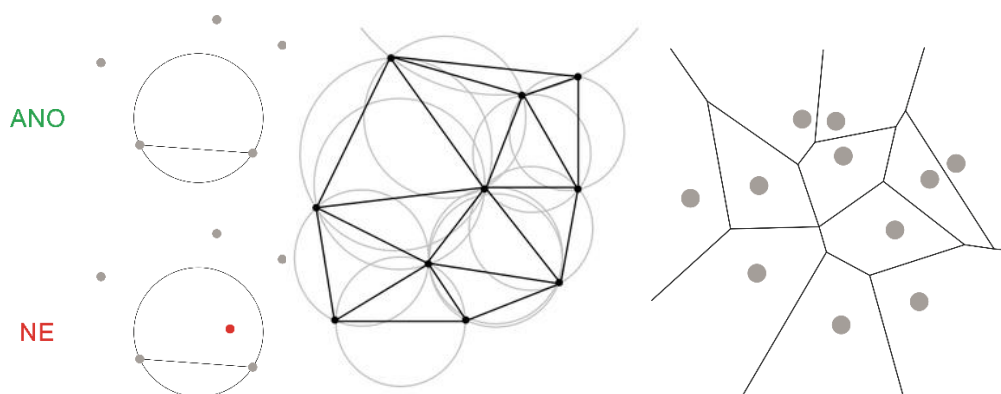
Zjednodušenou verzi tvorby polygonálního modelu je rovněž možno zmínit na jednoduchém příkladu (Turk a Levoy 1994):

Každý bod z obrazové matice obrázku je potenciálním vrcholem. Tvorbu meshe lze demonstrovat na příkladu čtyř bodů (obr. 11: vlevo). Nejdříve jsou nalezeny spojnice všech čtyř bodů, čímž vzniknou tři trojúhelníky (obr. 11: uprostřed). Poté se změří délky všech stran trojúhelníků a zjistí se, zda nepřekračují předem arbitrárně či jinak určenou mezní hodnotu, takzvaný threshold (obr. 11: uprostřed). Jestliže některá z těchto hran hodnotu překročí, není z ní trojúhelník vytvořen a faceta tak není zakomponována do finálního meshe (obr. 11: vpravo). Threshold je samozřejmě nastaven na větší vzdálenost, než jak byl

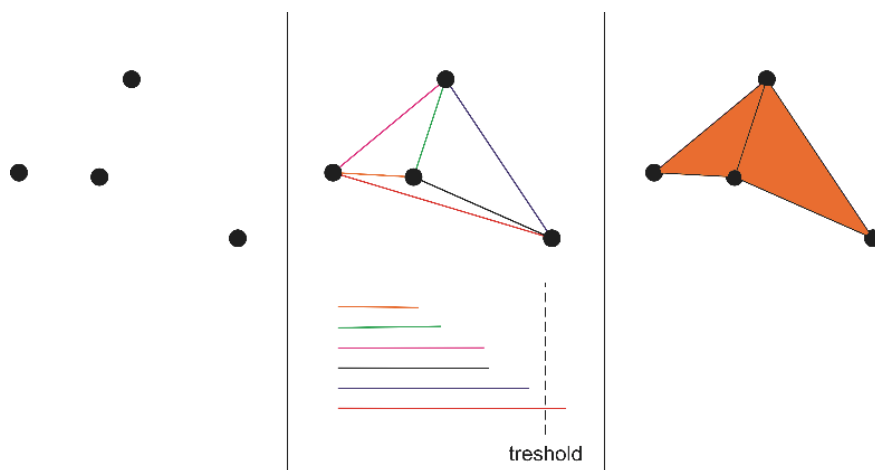
definován na ukázce. Používá se například hodnota $4s$, kde s je vzdálenost mezi dvěma body na obrázku, kde není v potaz brána hloubková informace (obr. 11: vlevo).

Jestliže se tímto způsobem nevytvoří souvislá plocha objektu, anebo jsou v něm patrné díry, nejedná se o problém, chybějící části mohou být domodelovány registrací a integrací dalších náhledů, popřípadě dopočítáním chybějícího meshe.

Seznam jednotlivých formátů polygonálních meshů lze nalézt na wikipedii (http://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh).



Obr. 10. Ukázka vlastností prázdné kružnice (vlevo), dvourozměrné Delauného triangulace (uprostřed) a Voroného diagramu (vpravo).
Zdroj: autor (vlevo), Wikipedia 2013 (uprostřed), upraveno podle Du a Hwang 1995, Fig. 2a (vpravo).

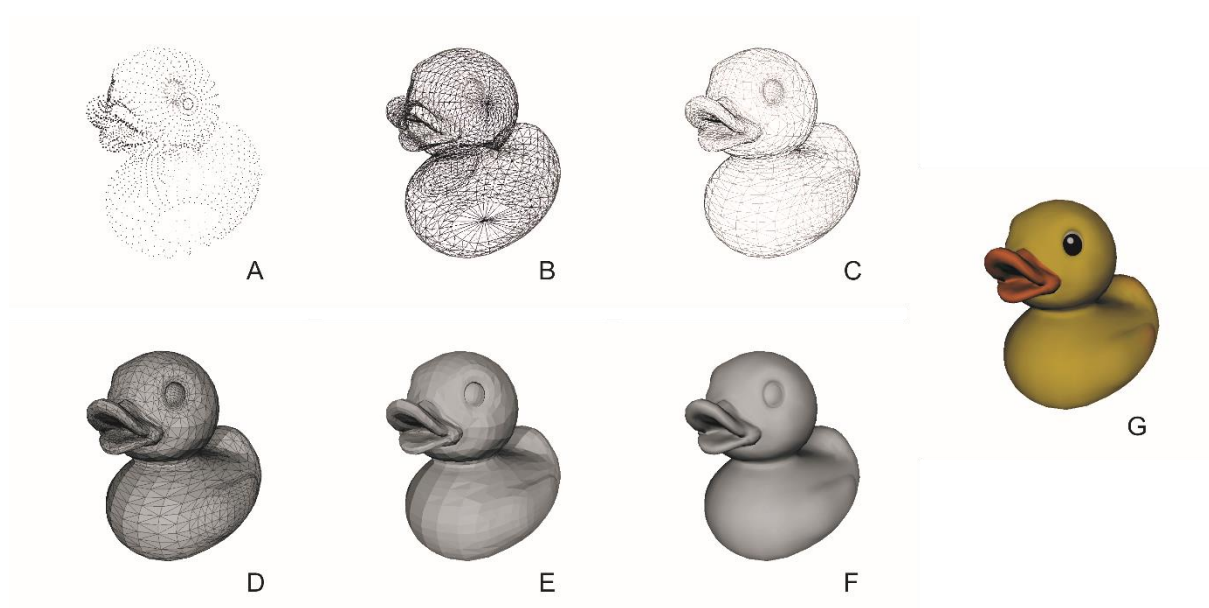


Obr. 11. Princip tvorby polygonálního modelu. Zdroj: autor.

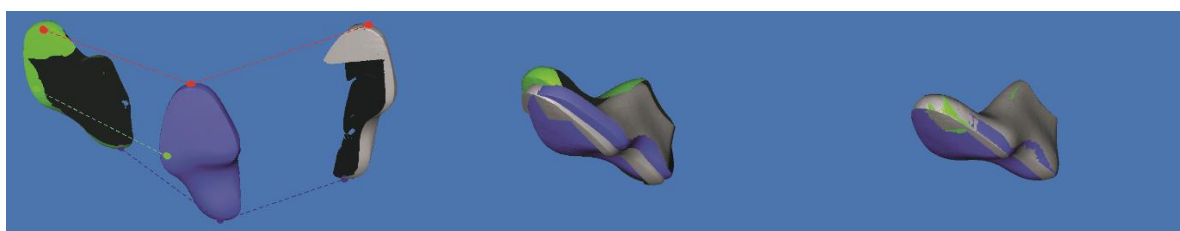
Možnosti zobrazení náhledu 3D modelu

Vlastní modely objektů či jejich částí (skeny) je možné zobrazit v různých modifikacích (obr. 12).

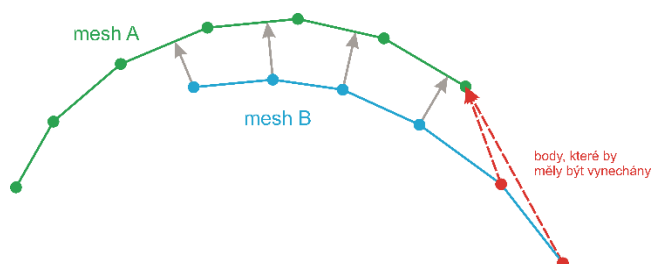
Způsoby vykreslení modelů se můžou lišit software od softwaru. Základní druhy zobrazení většiny z nich jsou nicméně body (obr. 12:A), dále drátěný model v průhledné (obr. 12:B) a neprůhledné (obr. 12:C) podobě, model vykreslený z ploch (obr. 12:E), vyhlazený model (obr. 12:F) a vyhlazený model s texturou (obr. 12:G). Je samozřejmě možné různé druhy zobrazení kombinovat, jak lze vidět například na obrázku vzniklém kombinací drátěného modelu s plochami (obr. 12:D). V některých programech je rovněž možné měnit některé vlastnosti scény, jako například pozici světla, stínování apod.



Obr. 12. Ukázka různých možností zobrazení modelu v programu Meshlab. Pointcloud (A), wireframe (B), hidden lines (C), facets with edge faces (D), faces (E), smooth (F), textured (G). Zdroj: autor, model převzat z programu Meshlab.



Obr. 13. Registrace třech skenů z různých pozic do jednoho (vlevo a uprostřed) a jeho další zarovnání (vpravo) pomocí software Microscan. Zdroj: autor, model převzat z programu Microscan.



Obr. 14. Hledání korespondujících bodů pro registraci dvou polygonálních modelů. Zdroj: upraveno podle Turk a Levoy 1994.

Registrace, zarovnání a integrace

Řada konvenčních skenerů není schopna zaznamenat celý povrch objektu v jedné skenovací fázi. Jednotlivé range images (formy point cloudu či meshe) vytvořené pod určitým úhlem objektu vůči skeneru je proto potřeba spojit do jednoho jediného tvaru v jednom koordinátním systému (Curless 1999).

Tento proces začíná **tzv. registrací** a je založen na translaci, rotaci a změně velikosti jedné části modelu vůči jiné. Tato fáze je založena na určení dostatečného množství homologních bodů na různých skenech. Jejich minimální množství jsou tři, často je jich ovšem software vyžadováno více. Není pravdou, že čím více korespondujících bodů je definováno, tím lepší je výsledné spojení – záleží spíše na jejich přesné lokalizaci. O následné vzájemné dorovnání mesů se poté postará zarovnávací algoritmus (Chen a Medioni 1991).

Registrace se provádí většinou s menším počtem meshů, většinou po dvojicích či trojicích (obr. 13: vlevo). První mesh, u něhož chceme ponechat orientaci, velikost a pozici vzhledem ke svému koordinátnímu systému se označí jako primární, referenční nebo také jako tzv. target. Druhý mesh je většinou pojmenován jako sekundární. Po označení dostatečného množství korespondujících bodů na obou modelech se sekundární objekt naorientuje vzhledem k primárnímu tvaru (obr. 13: uprostřed; GmbH 2008).

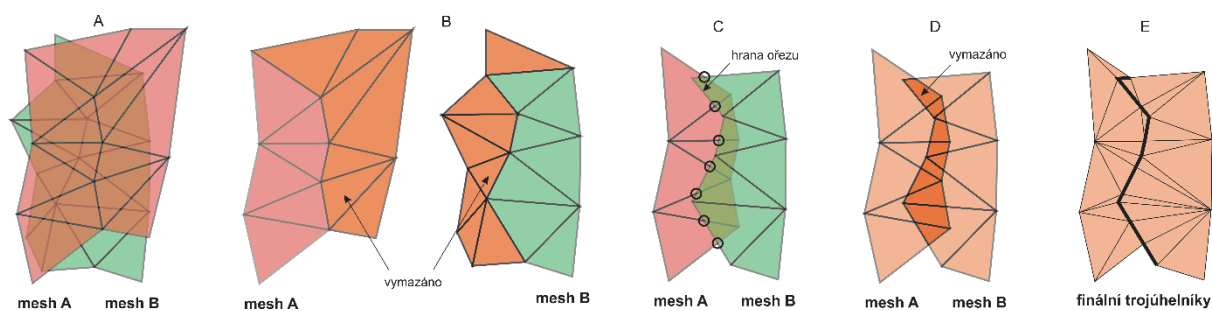
V další fázi může dojít k **zarovnání (alignement)** obou modelů. Jako vždy existuje velké množství zarovnávacích algoritmů. Nejzákladnějším a nejčastěji používaným způsobem je nicméně zarovnání pomocí iterovaného algoritmu založeném na minimalizování vzdálenosti mezi dvěma odpovídajícími body (*Iterated Closest-Point Algorithm - ICPA*) (Turk a Levoy 1994, Fitzgibbon 2003).

Princip vychází z nejjednodušší formy registračního algoritmu – *Closest-Point Algorithm*, založeném na hledání nejbližšího lokálního minima metriky průměrné čtvercové vzdálenosti mezi dvěma body. Metodu CPA je možné aplikovat nejen na body, ale například i na linie, křivky a plochy. Její velkou výhodou ovšem je, že vyžaduje, aby každý bod jednoho modelu měl svůj protějšek na modelu druhém, k čemuž v praxi dochází jen zřídka (Besl a McKay 1992, Turk a Levoy 1994).

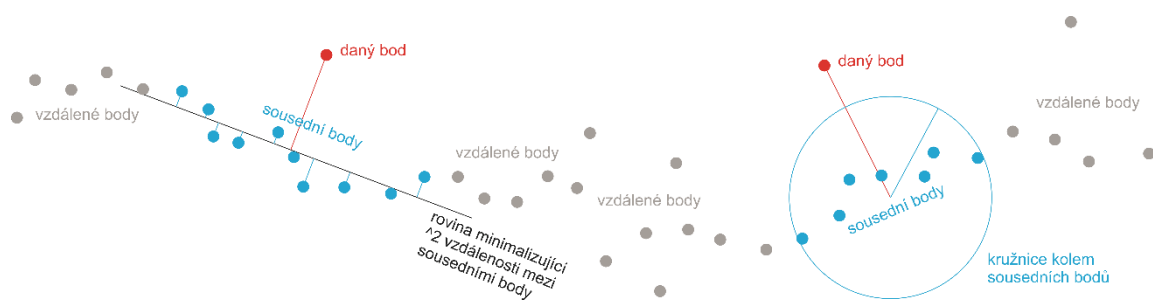
Pro vysvětlení principu, na jakém může být zarovnání založeno, lze jmenovat přístup zarovnání publikovaný v Turk a Levoy (1994). Proces zarovnání dvou meshů A a B může probíhat v několika krocích (obr. 14):

- 1) najít nejbližší pozici vrcholů meshe A ke každému vrcholu meshe B
- 2) eliminovat páry bodů, které leží moc daleko od sebe
- 3) eliminovat páry, jejichž body leží na okraji meshe
- 4) najít rigidní transformaci, která minimalizuje váženou čtvercovou vzdálenost mezi páry bodů
- 5) celý proces iterovat dokud nejsou vzdálenosti mezi oběma meshi minimalizovány

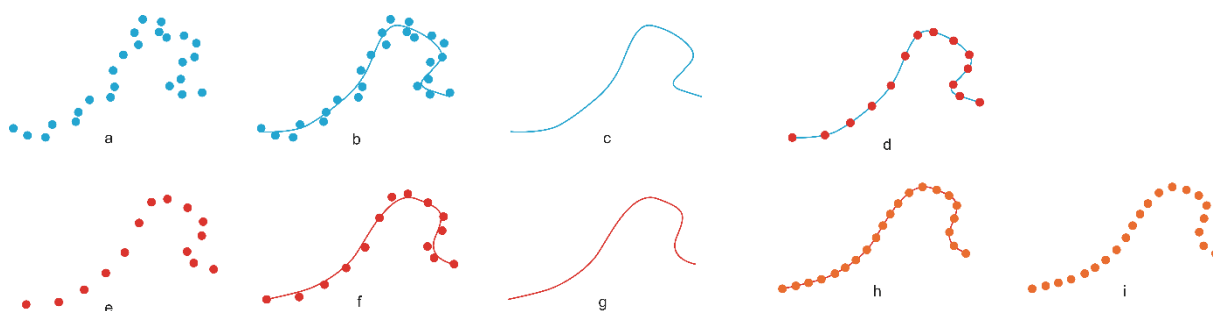
Jako finální produkt zarovnání, ať už nastíněné metody nebo kterékoliv jiné, jsou dva meshe, které se částečně překrývají. Tyto meshe se stále „chovají“ individuálně a netvoří jeden jediný celek (srov. obr. 13: uprostřed a vpravo). Oba meshe jsou k sobě orientovány tak, že je minimalizována vzdálenost mezi překrývajícími se plochami, což má pro práci s modely několik nevýhod – například tu, že dochází k duplikaci facet, a tím pádem i k redundanci dat. Z tohoto důvodu je v dalším kroku potřeba oba meshe spojit do jednoho jediného výsledného objektu, což se provede za pomoci tzv. integrace.



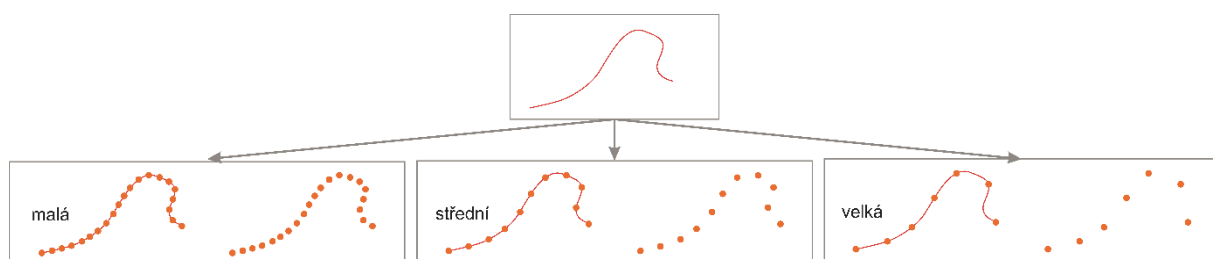
Obr. 15. Integrace dvou meshů. Zdroj: upraveno a doplněno podle Turk a Levoy 1994, Fig. 5 a Lorient 2009, Fig. 3.25.



Obr. 16. Plane Fit Criterion (vlevo) a Miniball Criterion (vpravo). Zdroj: upraveno a doplněno podle Weyrich et al. 2004, Fig. 6-7.



Obr. 17. Moving Least Squares. Zdroj: upraveno a doplněno podle Alexa et al. 2003.



Obr. 18. Redukce počtu bodů pomocí Moving Least Squares. Zdroj: autor.

Integrace je spojení vícero překrývajících se a zarovnaných meshů do jednoho polygonálního povrchu. Turk a Levoy (1994) popisují jednoduchou metodu, jak toho dosáhnout, kterou nazývají „zipping“:

V první fázi dojde k odstranění redundantních povrchů překrývajících se dvou meshů (obr. 15:A, B). Za pomoci průsečíků mezi hranami jejich zbylých částí se pak v další fázi vede hrana ořezu (obr. 15:C). Trojúhelníky, které tímto způsobem vzniknou, se poté vymažou (obr. 15:D), čímž vzniknou nové průsečíkové body a hrany, kterými jsou oba původní meshe stmeleny do jednoho jediného celku (obr. 15:E).

Ziping samozřejmě není jediným způsobem, jak sjednotit několik meshů do jednoho. Pro další algoritmy lze odkázat na Chen a Medioni 1992, Rutishauser et al. 1994, Curless a Levoy 1996, Hilton et al. 1996, Rocchini et al. 2004).

Filtrace šumu, odlehlých bodů a smoothing, zředění bodů

Hrubá data skenované scény nebo objektu v zásadě obsahují velké množství šumu a odlehlých bodů, způsobených nastavením skeneru, skenovacími podmínkami a fyzickými vlastnostmi objektu. Velké množství šumu může mít negativní vliv na hledání odlehlých bodů (Tam et al. 2013).

Šum může být jednoduše **vyfiltrován**, například aplikací *depth-pass filteru*. Nevýhodou filtrování je, že proces při aplikování ovlivní stejným způsobem veškerý povrch objektu a nejen požadovanou oblast. Navíc, jestliže je objekt například z části tvořen hranami, tak se filtrací mohou tyto hrany nepatříčně vyhladit. Stejný efekt nastane, použije-li se k redukci šumu takzvaného zředění bodů, někdy označovaného jako decimování (Boehler a Marbs 2002, GmbH 2008).

K selekci **odlehlých bodů** (outliers) se využívá řada takzvaných *kritérií*, pomocí nichž jsou pro každý bod získány určité hodnoty. Rozhodující je přitom definovat mezní hodnotu, nad níž, popřípadě, pod níž bude bod vymazán. Tento threshold může být buďto vypočítán softwarem automaticky, anebo si jeho hodnotu může uživatel nastavit libovolně podle svého uvážení (Weyrich et al. 2004).

Pro ukázkou, na jakém principu mohou kritéria fungovat, lze představit dva z nich, a to *Plane Fit* a *Miniball Criterion* (Weyrich et al. 2004):

Plane Fit Criterion je založen na vzdálenosti daného bodu k rovině, která minimalizuje čtvercové vzdálenosti od sousedních bodů (obr. 16: vlevo). *Miniball Criterion* pracuje na podobném principu. Bere v potaz několik blízkých bodů, jimiž proloží nejmenší kružnici (obr. 16: vpravo). Rovnice výpočtu kritéria je poté založena na počtu sousedících bodů, na vzdálenosti daného bodu ke středu kružnice a na jejím poloměru.

Vyhlazení (shoothing) se používá k redukci šumu point-cloudu a k vyhlazení detailů, které se na modelech jeví jako „hranaté“. Často se využívá jednoduché metody *Moving Least Squares* (MLS), založené na aproximaci povrchu polynomem (Alexa et al. 2003, Fleishman et al. 2005).

Ve dvourozměrném příkladu si lze představit body, které si přejeme vyhladit (obr. 17:a). Algoritmus těmito body proloží polynom (obr. 17:b), který pak samostatně vypadá jako na obrázku 17:c. Následně se na tomto polynomu generuje sada nových bodů (obr. 17:d, e), kterými se znova proloží polynom (obr. 17:f, g). Dalším generováním bodů je poté povrch vyhlazen (obr. 17:h, i).

Je zřejmé, že faktory, které ovlivňují kvalitu vyhlazení, záleží jak na počtu generovaných bodů, tak na počtu iterací prokládání polynomy. Rovněž je zřejmé, že lze tímto způsobem redukovat počet i počet bodů na modelu (obr. 18).

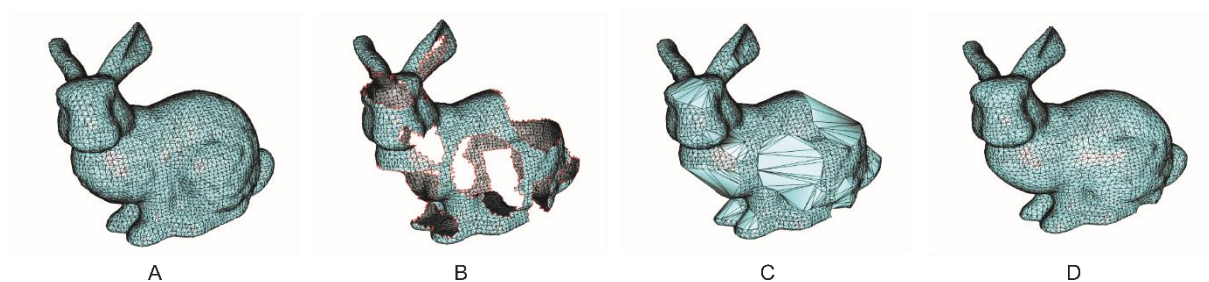
V případě trojrozměrných modelů je proces kalkulace o něco složitější. V zásadě je založená na podobném principu jako u 2D triangulace, využívá se v ní však projekce jednotlivých bodů na tzv. MLS rovinu (Alexa al. 2003, Levin 2003, Amenta a Kil 2004).

Vyplnění děr (Filling holes)

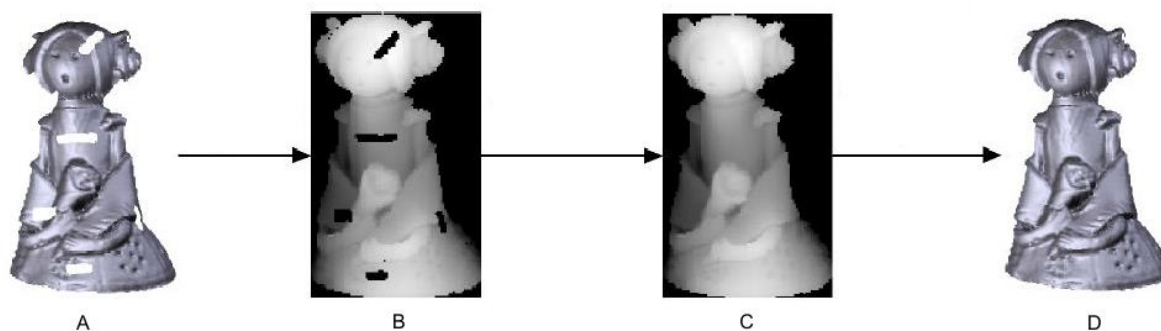
Mnohdy ani při nejlepší vůli není možné získat mesh, v němž se nevyskytují díry. Je to samozřejmě způsobené faktory, jakými jsou tvar a textura povrchu (okluze, nízká odrazivost, zrcadlení), geometrické vlastnosti skenovacího zařízení, úhel, pod kterým systém skenuje atd. (Curless a Levoy 1996, Pérez et al. 2008).

Možností, jak vyplnit prázdné díry je celá řada. Hlavní dvě rodiny metod jsou **voxel-based method** a **triangle-based methods**.

U **voxelových metod** je mesh nejdříve konvertován do voxelů a poté různými metodami dochází k záplatě děr. Do této kategorie spadá například metoda založená na volumetrické difuzi, anebo metoda využívající tzv. space carving. Voxelové metody jsou vhodné pro složitější díry, ale jsou časově náročnější na výpočet a mohou vytvářet špatné topologie (Curless a Levoy 1996, Davis et al. 2002, Zhao et al. 2007).



Obr. 19. Vyplnění děr. Originální stanfordský zajíček (A)⁷, děravý stanfordský zajíček (B), zajíček po fázi triangulace (C), finální zadrátovaný zajíček (D). Zdroj: Liepa 2003.



Obr. 20. Vyplnění děr polygonálního modelu pomocí hloubkového obrazu. Zdroj: upraveno podle Pérez et al. 2008.

⁷ Více informací o standfordském zajíčku lze nalézt na wikipedii: http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_bunny.

U **metod založených na trojúhelnících** jsou díry lepeny přímo pomocí trojúhelníků. Metod, jak toho dosáhnout existuje celá spousta (pro další literaturu viz Brunton et al. 2009, Li et al. 2008, Pérez et al. 2008, Zhao et al. 2007), převážná část z nich využívá především triangulace a následného zjemňování. Nevýhody metod založených na trojúhelnících jsou ty, že se těžce vyrovnávají s komplexními a vysoce zaoblenými dírami (Zhao et al. 2007).

Díry přitom na modelu mohou být detekovány buďto automaticky, a to většinou na základě vlastností hran meshe, anebo mohou být určeny operátorem. Automatická detekce může být velkou výhodou, v některých případech se ovšem ukázalo, že nejefektivnějších výsledků bylo dosaženo, když byly díry určeny poloautomaticky (He a Chen 2006).

Kroky, které vedou k vyplnění děr, počínají identifikací jejich hranice (obr. 19:B). Jakmile jsou tyto hranice identifikovány, díra je zaplněna pomocí triangulace (obr. 19:C). Poté jsou použity algoritmy pro zjemnění (refinement) a zadrátování (fairing) takto vzniklého povrchu (obr. 19:D). Tyto algoritmy berou v potaz tvarové a texturové vlastnosti plochy v okolí díry. Jejich smyslem je predikovat chybějící povrch tak, aby mesh zaplněné díry působil dojmem plynulého přechodu od dochované části, řečeno jinak, aby byl esteticky atraktivní (Curless a Levoy 1996, Liepa 2003, Jun 2005).

V některých případech se díry nezaplňují v 3D prostoru, ale ve 2D (Pérez et al. 2008):

Jedná se například o přístup, který 3D model s dírami (obr. 20:A) transportuje do 2D hloubkového obrazu (obr. 20:B). V tomto 2D obraze dochází k predikci pixelů nacházejících se v dírách, jež jsou zaplněny (obr. 20:C). Získaný obraz se poté z hloubkového obrazu transportuje nazpět do digitálního polygonálního modelu (obr. 20:D).

LITERATURA A ZDROJE

Internetové zdroje:

- da Silva, E. A. B. (2013). "MMP' result for coding disparity/depth maps." Poslední náhled: 2013/09/14, http://www02.lps.ufrj.br/~eduardo/eduardo_oficial/MMP/3D_results.html.
- Inc., E. S. (2013). "PhotoModeler Tutorials." Poslední náhled: 2013/09/18, <http://www.photomodeler.com/tutorial-vids/online-tutorials.htm#act>.
- Monsef, D. (2008). "Challenge: Facial Reconstruction with Photosynth...". Poslední náhled: 2013/10/11, <http://blogs.msdn.com/b/photosynth/archive/2008/11/11/community-challenge-facial->
- Morris, D. (2006). "Topological Mesh Modeling." Poslední náhled: 2013/10/11, <http://archinect.com/blog/article/21450900/topological-mesh-modeling>.
- Moreno, D. and G. Taubin (2012). "Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration." Poslední náhled: 2013/09/18, <http://mesh.brown.edu/calibration/>.
- Wikipedia (2013). "Delaunay triangulation." Poslední náhled: 2013/10/11, http://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation.
- Wikipedia (2013). "Polygon mesh." Poslední náhled: 2013/09/16, http://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh.

Literatura:

- Alexa, M., et al. (2003). "Point set surfaces." *IEEE Visualization 2001*: 21-28.
- Amenta, N. and Y. J. Kil (2004). *Defining point-set surfaces*. SIGGRAPH '04 ACM SIGGRAPH 2004 Papers, New York.
- Baumberg, A., et al. (2005). "3D S.O.M.—A commercial software solution to 3D scanning." *Graphical Models* **67**(6): 476-495.
- Bellocchio, F., et al. (2012). *3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches*, Springer.
- Besl, P. J. and N. D. McKay (1992). "A method for registration of 3-D shapes." *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **14**(2): 239-256.

Boehler, W. and A. Marbs (2002). 3D Scanning instruments: an introduction. CIPA – ISPRS workshop on scanning for cultural heritage recording, Corfu, Greece.

Böhler, W., et al. (2004). High Quality Scanning and Modeling of Monuments and Artifacts. Workshop – Archaeological Surveys, Athens, Greece.

Bradski, G. and A. Kaehler (2008). Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library, O'Reilly Media.

Brunton, A., et al. (2009). Filling Holes in Triangular Meshes by Curve Unfolding. IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI).

Chen, Y. and G. Medioni (1991). Object modeling by registration of multiple range images. Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on.

Chen, Y. and G. Medioni (1992). "Object modelling by registration of multiple range images." Image and Vision Computing **10**(3): 145-155.

Curless, B. (1999). "From Range Scans to 3D Models." ACM SIGGRAPH Computer Graphics **33**(4): 38-41.

Curless, B. and M. Levoy (1996). A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images. Proceeding SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques

Davis, J., et al. (2002). Filling Holes In Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion. In proceeding of: 3D Data Processing Visualization and Transmission.

de Berg, M., et al. (2008). Computational Geometry: Algorithms and Applications, Springer.

Du, D. Z. and F. Hwang (1995). Computing in Euclidean Geometry, World Scientific.

Fasshauer, G. E. (2007). Meshfree Approximation Methods with MATLAB, World Scientific.

Fitzgibbon, A. (2003). "Robust registration of 2D and 3D point sets." Image and Vision Computing **21**: 1145-1153.

Fleishman, S., et al. (2005). "Robust Moving Least-squares Fitting with Sharp Features." Journal ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005 **24**(3): 544-552.

GmbH, R. R. S. I. (2008). "MicroScan 3D - User Guide." White paper.

He, X. J. and Y. H. Chen (2006). "A Haptics-guided Hole-filling System Based on Triangular Mesh." Computer-Aided Design & Applications **3**(6): 711-718.

Hilton, A., et al. (1996). Reliable surface reconstruction from multiple range images. Computer Vision — ECCV '96. B. Buxton and R. Cipolla, Springer Berlin Heidelberg. **1064**: 117-126.

Hodges, E. R. S. (2003). The Guild Handbook of Scientific Illustration, Wiley.

Jun, Y. (2005). "A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering." Computer-Aided Design **37**(2): 263-270.

Levin, D. (2003). Mesh-independent surface interpolation. Geometric Modeling for Scientific Visualization. G. Brunnett, B. Hamann, H. Müller and L. Linsen, Springer-Verlag: 37-49.

Li, G., et al. (2008). "An algorithm for filling complex holes in reverse engineering." Engineering with Computers **24**(2): 119-125.

Liepa, P. (2003). Filling holes in meshes. SGP '03 Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing Aire-la-Ville, Suisse.

Linsen, L. (2001). "Point Cloud Representation." White paper.

Loriot, B. (2009). Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

Mara, H., et al. "Ancient Coins & Ceramics - 3D and 2D Documentation for Preservation and Retrieval of Lost Heritage." White paper.

Morel, O. (2005). Environnement actif pour la reconstruction tridimensionnelle de surfaces métalliques spéculaires par imagerie polarimétrique. Instrumentation et Informatique de l'Image. Dijon, Université de Bourgogne. **Thesis**.

Moreno, D. and G. Taubin (2012). Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration.

Pérez, E., et al. (2008). A Robust Method for Filling Holes in 3D Meshes Based on Image Restoration Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems: 10th International Conference, ACIVS 2008, Juan-

les-Pins, France, October 20-24, 2008. Proceedings. J. Blanc-Talon, S. Bourennane and W. Philips, Springer: 742-751.

Rocchini, C., et al. (2004). "The Marching Intersections algorithm for merging range images." The Visual Computer **20**(2-3): 149-164.

Russo, M. (2010). Polygonal Modeling: Basic and Advanced Techniques, Jones & Bartlett Learning.

Rutishauser, M., et al. (1994). Merging range images of arbitrarily shaped objects. Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR '94., 1994 IEEE Computer Society Conference on.

Sarangi, S. (2007). Surface Reconstruction from Unorganized Point Cloud Data Using Incremental Delaunay Triangulation. Departement of Mechanical Engineering. Buffalo, State University of New York at Buffalo. **Thesis**.

Scaramuzza, D., et al. (2007). Extrinsic self calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes. Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on.

Sheehan, M., et al. (2012). "Self-calibration for a 3D laser." The International Journal of Robotics Research **31**(5): 675-687.

Su, G. M., et al. (2012). 3D Visual Communications, Wiley.

Tam, G. K. L., et al. (2013). "Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Nonrigid." Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on **19**(7): 1199-1217.

Tong, T. (2012). The Importance of Calibrating a 3D Scanner for Accuracy. 3D Scanning Technologies Blog. **2013**.

Tu, T. (2008). A Scalable Database Approach to Computing Delaunay Triangulations, Carnegie Mellon University.

Turk, G. and M. Levoy (1994). "Zipped Polygon Meshes from Range Images." In Proceedings of SIGGRAPH'94: 311-318.

Weyrich, T., et al. (2004). Post-processing of Scanned 3D Surface Data. Eurographics Symposium on Point-Based Graphics. M. Alexa and S. Rusinkiewicz: 85-94.

Woo, A. and P. Poulin (2012). Shadow Algorithms Data Miner, CRC Press.

Young, A., et al. (2004). Overlay mesh construction using interleaved spanning trees. INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.

Zaimovic-Uznovic, N. and S. Lemes (2010). Influences of Surface Parameters on Laser 3D Scanning. 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, September 5-9.

Zhao, W., et al. (2007). "A robust hole-filling algorithm for triangular mesh." The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics **23**(12): 987-997.