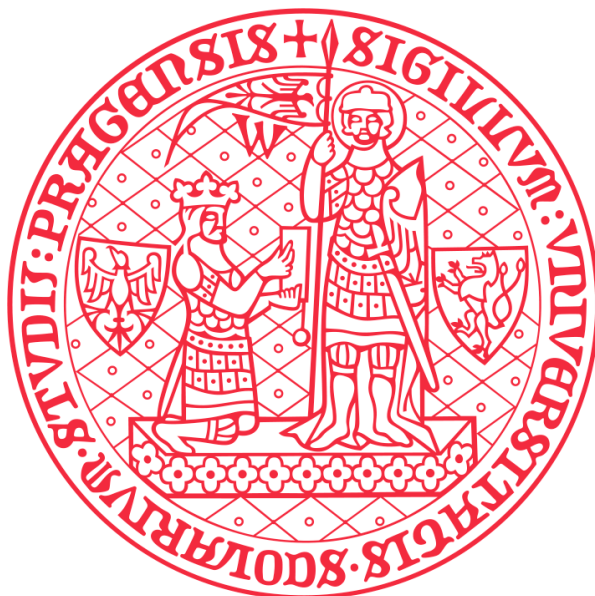


Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta



Počítačová 3D rekonstrukce obličeje člověka ve forezních vědách

Bakalářská práce

Zpracovala: Aneta Kodytková

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jana Velemínská, Ph.D.

Praha 2017

Poděkování

Úvodem mé bakalářské práce bych ráda poděkovala doc. RNDr. Janě Velemínské, PhD. za cenné rady, připomínky a obětavé vedení bakalářské práce.

Dále bych ráda poděkovala své rodině a blízkým, za jejich trpělivost a podporu.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Praze dne 15. 5. 2017

Aneta Kodytková

ABSTRAKT ČJ

Kraniofaciální rekonstrukce jsou užitečným nástrojem při určování identity jedince v případě, že klasické metody, jako je analýza DNA nebo morfologické metody, selžou. Hlavním cílem obličejových rekonstrukcí ve forenzní antropologii je vytvořit vzhled oběti v době její smrti. Rekonstrukční metody jsou děleny na tradiční (manuální) a počítačově generované, oba druhy technik mohou vytvářet jak dvourozměrné, tak i trojrozměrné modely obličejů. Díky progresu ve výpočetních a medicínských zobrazovacích technologiích se v posledních letech dostávají do popředí 3D počítačové rekonstrukční techniky. Tyto metody jsou na rozdíl od manuálních metod rychlejší, výkonnější, flexibilnější a objektivnější. Cílem bakalářské práce bylo shrnout obecný postup 3D počítačových rekonstrukčních technik, které se využívají ve forenzních případech a současně osvětlit základní principy morfometrických, morfologických a transformačních trojdimensionálních počítačových technik. V neposlední řadě jsou zde popsána i pozitiva a negativa vybraných metod.

Klíčová slova: obličejová rekonstrukce, počítačová metoda, kraniofaciální, 3D, lebka, forenzní vědy, identifikace

ABSTRAKT AJ

Craniofacial reconstructions are a useful tool when determining the person's identity in cases where standard methods, such as the DNA analysis or morphological methods, fail. The main goal of facial reconstructions in forensic anthropology is to create the victim's appearance at the time of their death. The reconstruction methods can be divided into traditional (manual) and computer-generated ones and both techniques can produce two-dimensional as well as three-dimensional models of faces. Thanks to progress in computer and medical imaging technologies, 3D reconstruction techniques have become widely used recently. Unlike manual techniques, these methods are faster, more effective, more flexible and more objective. The goal of the bachelor's thesis was to provide a summary of the 3D reconstruction techniques, which are used in forensic facial reconstructions, and explain the basic principles of morphometrical, morphological and transformational three-dimensional computer-aided techniques. Last but not least, the thesis provides for positive and negative aspects of the selected methods.

Key words: facial reconstruction, computer-aided method, craniofacial, 3D, skull, forensic sciences, identification

Seznam zkratk

BMI – index tělesné hmotnosti

CFD – kraniofaciální deformace

CFI – kraniofaciální informace

CFM – kraniofaciální model

CFT – kraniofaciální templát

CT – počítačová tomografie

PCA – analýza hlavních komponent

TPS – metoda ohebných pásků

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	DRUHY OBLIČEJOVÝCH REKONSTRUKCÍ.....	8
2.1	2D rekonstrukce obličeje	9
2.1.1	Manuální 2D metody.....	9
2.1.2	Počítačové 2D metody.....	10
2.1.2.1	Metoda FIRM (Face imaging reconstruction morphography)	10
2.1.2.2	Freiburská metoda.....	11
2.1.2.3	Superimpozice	12
2.2	3D rekonstrukce obličeje	13
2.2.1	Manuální 3D metody.....	13
2.2.1.1	Americká antropometrická metoda	14
2.2.1.2	Ruská anatomická metoda	15
2.2.1.3	Metoda Manchester	17
3	3D POČÍTAČOVÁ REKONSTRUKCE	19
3.1	Obecný princip 3D počítačových metod.....	19
3.1.1	Kraniofaciální model (CFM)	21
3.1.2	Reprezentace lebky (TSR)	23
3.1.3	Registrace kraniofaciálního modelu (CFM) na cílovou lebku.....	24
3.1.4	Textura a vizualizace	25
3.1.5	Validace.....	25
3.2	Druhy 3D počítačových rekonstrukčních metod.....	26
3.2.1	Rekonstrukční metoda založená na morfometrii.....	26
3.2.2	Rekonstrukční metoda založená na morfologii.....	29
3.2.3	Rekonstrukční metoda založená na transformaci.....	30
4	POZITIVA A NEGATIVA METOD.....	32
5	POUŽITÁ LITERATURA	36

ÚVOD

Obličejové rekonstrukce jsou v dnešní době používány hned v několika oborech: ve forenzních vědách (Wilkinson 2004), v archeologii (Davis et al. 1994) a v medicíně (Landes et al. 2006).

Ve forenzním kontextu hrají faciální rekonstrukce důležitou roli při identifikaci mrtvých v případech, kdy standartní vyšetřovací techniky, jako je DNA analýza, otisky prstů, analýza dentice, či další biometrické či morfologické metody nepřinášejí uspokojivé výsledky (Wilkinson 2010). Tyto metody se nezabývají jen zjišťováním totožnosti obětí trestných činů, ale mohou být také účinným nástrojem při identifikaci obětí přírodních katastrof, jako je tsunami či hurikán (Nicklish 2008). V takových případech může být rozpoznání ostatků velmi obtížné, poněvadž na ně působí vlivy prostředí jako jsou živočichové a voda. Navíc se v průběhu rozkladu těla mění barva kůže, očí a celé tělo se vlivem hniloby nafukuje. Oděvy a osobní předměty mohou být ztraceny a zubní záznamy nedostupné (Polson et al. 1985). Ale i v případech, kde je identifikace rodinným příslušníkem možná, dochází často k chybnému určení totožnosti z důvodu přílišného emocionálního vypětí (Wilkinson 2010; Wilkinson 2004).

Jedním z hlavních úkolů moderní archeologie je přiblížit současné populaci naši minulost, čehož je možné dosáhnout faciální trojrozměrnou rekonstrukcí (Needham et al. 2003). V archeologii se rekonstrukční techniky používají k tvorbě vizuálních obrazů významných osob z dob minulých na základě mumifikovaných těl (Hughes et al. 2005), kosterních pozůstatků nebo těl zakonzervovaných v bažinách (Wilkinson 2010). Díky rozvoji klinických zobrazovacích technik a počítačových rekonstrukčních metod je možné vytvářet vzhled egyptských mumii bez toho, aby byly ostatky rozbaleny (Manley et al. 2002). Na kosterních nálezech jsou často patrná traumatická poranění, případně vady, které naši předkové neuměli nebo nemohli léčit (Needham et al. 2003). V tomto případě slouží obličejová rekonstrukce jako nástroj k odhadu budoucího vzhledu neupravené vady. Tyto informace jsou v současné biologii a plastické chirurgii velmi ceněné (Klepáček & Zedníková-Malá 2012).

Trojrozměrné modelování v medicíně umožňuje optimální vizualizaci složitějších struktur a nabízí nové aspekty chirurgických přístupů, které jsou bezpečnější, účinnější a snižují operační trauma (Landes et al. 2006). Tvorba 3D počítačové rekonstrukce obličeje nebo jeho části se využívá k přesné formulaci operačního plánu rekonstrukčních chirurgických zákroků (LoPresti et al. 2017); jedná se např. o rekonstrukce dolní čelisti (Wilde et al. 2014) nebo plánování chirurgických kosmetických úprav (Hervé et al. 2016). Následně je možné rekonstrukci vytisknout pomocí 3D tiskárny a změnit tak virtuální plány na anatomické repliky, šablony, ba dokonce implantáty z nejrůznějších materiálů

(LoPresti et al. 2017). Dále se 3D rekonstrukce používají k vizualizaci jak patologického, tak i normálního (výsledného) vzhledu pacienta s vrozeným rozštěpem rtů a patra (Landes et al. 2006). Nebo také při plánování rekonstrukce obličeje po úrazech či střelných zraněních, kdy je třeba obnovit jak funkčnost, tak i estetický vzhled postižené obličejové části (Hervé et al. 2016).

Cílem bakalářské práce je popsat princip trojdimensionálních počítačových rekonstrukčních technik, které se využívají ve forezních vědách. Současně také vytvořit přehled o odlišnostech mezi konkrétními morfometrickými, morfologickými a transformačními rekonstrukčními metodami. A v neposlední řadě osvětlit postupy některých dalších rekonstrukčních technik, které se rovněž využívají pro forezní účely.

1 DRUHY OBLIČEJOVÝCH REKONSTRUKCÍ

Obličejové rekonstrukce mají svůj původ v 19. století, tehdy se rekonstruovaly především podoby slavných a bohatých lidí (Wilkinson 2004; Vanezis & Vanezis 2000). Německý anatom Wilhelm His z Univerzity v Lipsku se pokusil identifikovat ostatky skladatele Johanna Sebastiena Bacha (Gupta et al. 2015; Ubelaker 2015; Clement & Marks 2005). Pomocí jehly proměřil tloušťky měkkých tkání několika mrtvých (Ubelaker 2015) a na jejich základě vymodeloval bustu na sádrový odlitek lebky. Poté byla výsledná rekonstrukce porovnána s Bachovými portréty a označena za zdařilou. Zrekonstruované obličeje historických osobností se často takto porovnávaly s jejich portréty, sochami nebo posmrtnými maskami (Wilkinson 2004). V průběhu posledního století bylo vyvinuto mnoho odlišných metod obličejových rekonstrukcí, které se uplatňují ve forezních vědách, ale také v archeologii (Wilkinson 2010; Vanezis & Vanezis 2000), medicíně (Wilde et al. 2014) či paleobiologii (Rynn & Wilkinson 2006).

V odborné literatuře se setkáváme s termíny jako je restaurace (Farrar 1977; Quatrehomme & Balaguer 2007), reprodukce (Ubelaker & O'Donnell 1992), rekonstrukce (Claes et al. 2010; Gupta et al. 2015; Wilkinson 2010; Quatrehomme & Balaguer 2007) či aproximace (Wilkinson 2005; Rynn & Wilkinson 2006). Za každým z nich se ale skrývá tvorba dvojrozměrného obličeje založená na fotografii nebo rentgenovém snímku lebky či vytvoření trojrozměrného obličeje na základě lebky (Haglund & Reay 1991; Vanezis & Vanezis 2000). Vždy se tedy jedná o vztah mezi tvrdými a měkkými tkáněmi obličeje (Rynn & Wilkinson 2006).

Hlavním cílem obličejových rekonstrukcí ve forezních vědách je vytvořit vzhled dané osoby na základě její lebky (Vanezis & Vanezis 2000), a to v případě, že jsou klasické/konvenční identifikační metody (DNA, dentální analýza, otisky prstů) zcela neúspěšné (Gupta et al. 2015) nebo je pro pozůstalé emočně náročné identifikovat rozkládající se či zmrzačené pozůstatky oběti (Vanezis et al. 2000; Wilkinson 2010).

Je obecně platné, že metody obličejových rekonstrukcí lze rozdělit na 2D a 3D, ty jsou dále děleny na manuální a počítačové (Vanezis & Vanezis 2000; Gupta et al. 2015).



Obr. 1. *Faciální rekonstrukce Johanna Sebastiana Bacha (Převzato z Wilkinson 2004)*

1.1 2D rekonstrukce obličeje

Dvoudimenzionální techniky se využívají k vytváření frontálních či profilových portrétů (Vanezis & Vanezis 2000). Jsou založeny na odhadu hloubky měkkých tkání, což vyžaduje umístění kolíčků prezentujících určitou tloušťku měkké tkáně na lebku. Kolíky odpovídají hloubce měkkých tkání ve specifických antropometrických bodech (Gupta et al. 2015; Vanezis & Vanezis 2000).

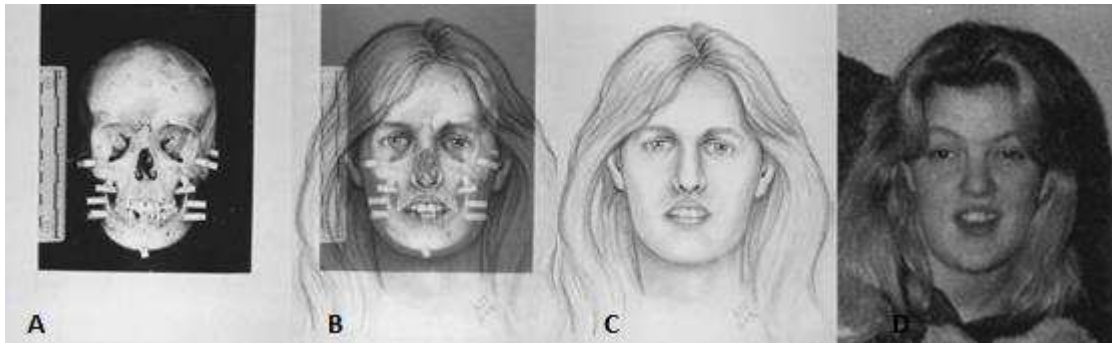
2D metody vyžadují buď lebku oběti, která má být rekonstruována nebo její fotografii, případně rentgenové snímky (Vanezis & Vanezis 2000) či CT snímky (Wittwer-Backofen 2011). Některé metody se současně neobejdou bez fotografie pohřešovaného pořízené nedlouho před smrtí (Gupta et al. 2015; Ubelaker 2015).

1.1.1 Manuální 2D metody

Manuální 2D rekonstrukce jsou vytvářeny forezním kreslířem ve spolupráci s vědcem (forezním antropologem, patologem či odontologem), který provede klasickou identifikační analýzu k determinaci věku, pohlaví, rasy a tělesné stavby subjektu (Clement & Marks 2005).

Podstatou manuální rekonstrukce je tvorba portréту přes fotografii lebky nebo rentgenový snímek (frontální a laterální) (Wilkinson 2004; Vanezis & Vanezis 2000). Ačkoli laterální rentgenové snímky nejsou vhodné pro pozitivní identifikaci jedince, lze je využít pro výpočet obličejového profilu a pro rekonstrukci fyziognomických detailů (Vanezis & Vanezis 2000).

Základem kresby jsou hodnoty tloušťky měkkých tkání odpovídající konkrétním obličejovým landmarkům, po propojení těchto landmarků křivkou vznikají kontury rysů obličeje (Wittwer-Backofen 2011). Následně jsou doplněny obličejové komponenty (oči, nos, uši, rty atd.) a rysy související s pohlavím, věkem, populační příslušností a tělesnou stavbou (Vanezis & Vanezis 2000).



Obr. 2. Manuální 2D rekonstrukce: (A) Lebka s kolíčky odpovídajícími hloubce měkkých tkání, (B) kontury obličeje kreslené přes fotografii lebky, (C) výsledná rekonstrukce, (D) fotografie identifikované osoby (Převzato z Wilkinson 2004)

1.1.2 Počítačové 2D metody

S příchodem nových technologií v oblasti elektronického zobrazování se do popředí dostávají 2D rekonstrukční metody, které využívají počítačové softwary. Jejich výhoda oproti manuálním dvoudimensionálním technikám tkví v tom, že pracují rychleji a výsledný produkt je možné snadno upravovat (Vanezis & Vanezis 2000; Gupta et al. 2015). Současně jsou 2D systémy schopné vyprodukovat několik verzí jednoho obličeje. Ale na rozdíl od 3D systémů vytvářejí obrazy obvykle jen z frontálního pohledu, tudíž jsou zanedbány informace o prostorovém rozložení hlavy (Wilkinson 2005).

Softwarový systém (např. F.A.C.E.S., C.A.R.E.S.) vyprodukuje dvourozměrnou rekonstrukci obličeje, která může být následně manuálně editována. Pracuje na základě digitalizovaného rentgenového snímku, fotografie či obrázku lebky a vyprodukuje jeho elektronicky pozměněnou verzi (Vanezis & Vanezis 2000; Gupta et al. 2015). Program může vytvářet několik variant obrazů obličeje tím, že vybírá různé obličejové kontury, rysy, účesy z obrazové knihovny a kompiluje je v závislosti na struktuře lebky a kefalometrii (Wilkinson 2005).

1.1.2.1 Metoda FIRM (Face imaging reconstruction morphography)

Tato metoda byla vyvinuta ve 20. století J. A. Perperem. Jedná se o objektivní kompozici obličejových rysů na základě přesných kefalometrických rozměrů (Vanezis & Vanezis 2000).

Nejprve je nutné lebku očistit od přebytečných tkání, poté přichází na řadu klasická antropologická identifikace pohlaví, věku a původu (Perper et al. 1988). Následně je lebka umístěna do analytického morfografu, což je integrovaný rentgenový a fotografický systém, který umožňuje standardizované rentgenové nastavení a analýzu lebky (Vanezis & Vanezis 2000; Perper et al. 1988). Po vytvoření rentgenových snímků a fotografií lebky z různých úhlů, jsou do systému zaznamenány kefalometrické hodnoty. Díky nim je morfometricky stanoven jeden z pěti obličejových typů.

Morfoanalýza probíhá na základě vztahů 4 hlavních rovin obličeje: supraorbitální, patrové, okluzní a mandibulární. Pomocí Identi-kitu, tj. souboru folií s různými obličejovými komponentami, jsou doplněny oči, brada, nos, rty a vlasy (Perper et al. 1988).

Na metodu FIRM úzce navazuje Miyasakův 2D počítačově-generovaný obličejový rekonstrukční systém (Miyasaka et al. 1995) a současně také 3D počítačový obličejový rekonstrukční systém vytvořený Vanezisem (Vanezis & Vanezis 2000).



Obr. 3. Portréty vytvořené FIRM metodou (Převzato z Perper et al. 1988)

1.1.2.2 Freiburská metoda

Freiburská metoda a většina dalších 2D počítačových metod jsou založené na CT snímcích lebky či na jejích fotografiích. Na digitalizovaný obraz jsou nanášeny tloušťky měkkých tkání na konkrétní antropologické body – landmarky. Průměrné hloubky měkkých tkání pro konstrukci obličejových kontur jsou vybírány primárně s ohledem na pohlaví, věk, BMI či populační příslušnost (Wittwer-Backofen 2011; Wilkinson 2004).

V další fázi jsou vybrány vhodné obličejové komponenty a jsou přidány do rámcové konstrukce obličeje v souladu s anatomickými a antropometrickými kritérii (Ubelaker & O'Donnell 1992). Databáze obličejových komponent, obsahující oči, obočí, nosy, rty či účesy, byla vytvořena z frontálních a laterálních obličejových obrázků dospělých osob (Miyasaka et al. 1995) nebo byla využita již existující policejní identikitová databáze (Ubelaker & O'Donnell 1992). Počítač automaticky prohledává databázi a okamžitě zobrazuje soubory odpovídajících komponent. U nevhodnější komponenty je upravena velikost a orientace a je vložena do předdefinovaného obličeje (Wittwer-Backofen 2011).

Na závěr je doplněna textura obličeje a pigmentace, případně jsou vyretušována neatraktivní místa způsobená kompilací různých obličejových komponent do rámcové konstrukce. Výsledný obraz může být barevný, ale častěji se využívá černobílá podoba, díky níž nedochází ke zkreslení výsledné podoby, tudíž se zvyšuje pravděpodobnost pozitivního rozpoznání (Wittwer-Backofen 2011; Miyasaka et al. 1995).

1.1.2.3 Superimpozice

Někteří autoři řadí mezi 2D počítačové rekonstrukční techniky i metodu superimpozice (Kähler et al. 2003), jindy je ale považována za samostatnou metodu (Nelson & Michael 1998), která se využívá k pozitivní identifikaci na základě vztahu měkkých a tvrdých struktur. Pro metodu kraniofaciální superimpozice je charakteristické překrytí dvou snímků a analýza jejich morfologické korespondence. První je obraz lebky (nebo modelu lebky) získaný v souvislosti s forensním případem. Ten je porovnáván s *ante mortem* fotografií obličeje osoby, u níž je předpoklad, že by mohla lebce odpovídat (Ubelaker 2015; Veselovskaya et al. 2015).

Prvním krokem je pořízení snímků lebky a obličeje, případně úprava jejich velikosti. To ale nemusí být pravidlem, někdy je fotografie obličeje promítána přímo na 3D model lebky (Veselovskaya et al. 2015). Většinou se využívají frontální snímky, ale ve forensních případech nejsou často takové snímky k dispozici, buď z důvodu nekvalitně nafocených ostatků na místě činu nebo kvůli fotkám pohřešovaných pořízených pozůstalými (Ghosh & Sinha 2005; Gordon & Steyn 2012).

Po převrstvení lebky a obličeje se hodnotí jejich vzájemná korelace. Hodnotí se proporce hlavy, landmarky měkkých i kostních tkání (nadočnicové oblouky, lícní kosti, čelisti atd.), landmarky pro správnou orientaci, dále také landmarky pro oči, nosní průchod, ústa a zevní zvukovod (Isabel et al. 2015; Aulsebrook 1995; Gordon & Steyn 2012). Pro pozitivní identifikaci lebky jsou důležité také nejrůznější patologie a morfologické změny předních zubů, které mohou být současně viditelné na fotografiích obličeje (Ubelaker 2015).

V minulosti prošla superimpozice několika fázemi: v první fázi byly používány diaprojektory a dataprojektory, pomocí kterých byly obrazy lebky a obličeje promítány přes sebe (Aulsebrook 1995). Porovnání obou obrazů bylo založeno čistě jen na pozorovacích schopnostech vědce (Isabel et al. 2015). Ve druhé fázi se do popředí dostala videotechnika (Aulsebrook 1995). Videokamera usnadnila celý proces tím, že umožnila rychlou úpravu velikosti a orientace lebky tak, aby při překrytí odpovídala obličeji na fotografii (Koelmeyer 1982; Ubelaker 2015). V poslední etapě přišly na řadu grafické počítačové systémy (Aulsebrook 1995), jejichž podstatou je také nasnímání lebky a fotografie hlavy pomocí videokamery. S tím rozdílem, že oba obrazy jsou digitalizovány, uloženy v počítači a k jejich překrytí dochází v počítači pomocí softwaru (Ubelaker 2015).

Dnes je superimpozice používána spíše jako doprovodná metoda kraniofaciálních rekonstrukcí (Aulsebrook 1995), než jako nástroj pozitivní identifikace. Využívá se jako silný vylučovací nástroj, který šetří čas, náklady a urychluje vyšetřování (Aulsebrook 1995; Ubelaker 2015; Veselovskaya et al. 2015).



Obr. 4. Superimpozice: oběť vraždy Isabella Ruxton, fotografie oběti (vlevo), snímek lebky (uprostřed), překryté obrazy tváře a lebky – superimpozice (vpravo) (Převzato z <http://murderpedia.org/male.R/r/ruxton-buck-photos.htm>)

1.2 3D rekonstrukce obličeje

Trojrozměrné kraniofaciální rekonstrukce jsou převážně založeny na principu modelace obličeje na lebku pomocí průměrné tloušťky měkkých tkání v daných anatomických bodech (landmarcích) (Claes et al. 2010; Vanezis & Vanezis 2000).

V minulosti byla většina dat týkajících se tloušťky měkkých tkání získávána měřením tkání obličejů a hlav mrtvých. To s sebou neslo mnoho nepřesností způsobených například nepřesným vztahem mezi měkkými tkáněmi mrtvých a živých, malým počtem subjektů ve studiích, nedostatečným srovnáním vzhledem k věku, pohlaví, původu apod. Avšak s technickým pokrokem se zkvalitnilo i měření hloubky měkkých tkání (Vanezis & Vanezis 2000). Začala se využívat počítačová tomografie (CT) (Panenková et al. 2012), ultrazvuk (Kähler et al. 2003) či magnetická rezonance. Nevýhodnou těchto postupů je, že nejsou volně dostupné a jsou poměrně nákladné (Vanezis & Vanezis 2000).

V současné době se využívají jak trojrozměrné manuální rekonstrukční metody, tak i počítačové, které jsou vlastně virtuální simulací manuálních technik (Vanezis et al. 2000; Claes et al. 2010; Quatrehomme & Balaguer 2007)

1.2.1 Manuální 3D metody

Manuální obličejová rekonstrukce je spojením vědeckých pravidel (forenzní antropologie, anatomie člověka) a uměleckých dovedností ve snaze vytvořit obličej člověka na základě lebky za účelem jeho pozitivní identifikace (Wilkinson 2004). Je zde zahrnuta jistá dávka subjektivity, tudíž z jedné lebky rekonstruované dvěma různými umělci mohou vzniknout dva odlišné obličeje (Claes et al. 2010). Velmi variabilních výsledků bylo dosaženo například při manuální rekonstrukci obličejů obětí vražd v případě Green River (Haglund & Reay 1991).

Manuální 3D rekonstrukce spočívá v tom, že jsou na lebku oběti či na její kopii nanášeny vrstvy hlíny, vosku případně sádry (Claes et al. 2010; Vanezis & Vanezis 2000). Samotný postup je velmi podobný dvoudimensionálním metodám, poněvadž se zde také využívají kolíčky, které reprezentují odlišnou tloušťku měkkých tkání. Kolíčky jsou aplikovány na odlitek lebky do předem definovaných strategických míst či landmarků (Gupta et al. 2015; Vanezis & Vanezis 2000).

V průběhu 20. století se díky odlišným postupům při manuální rekonstrukci obličeje vyčlenily tři školy: ruská, americká a manchesterská. První z nich je řazena k anatomickým (morfoskopickým) metodám, druhá k antropometrickým (morfometrickým) metodám a třetí je kombinací obojího (Verze 2009; Claes et al. 2010).

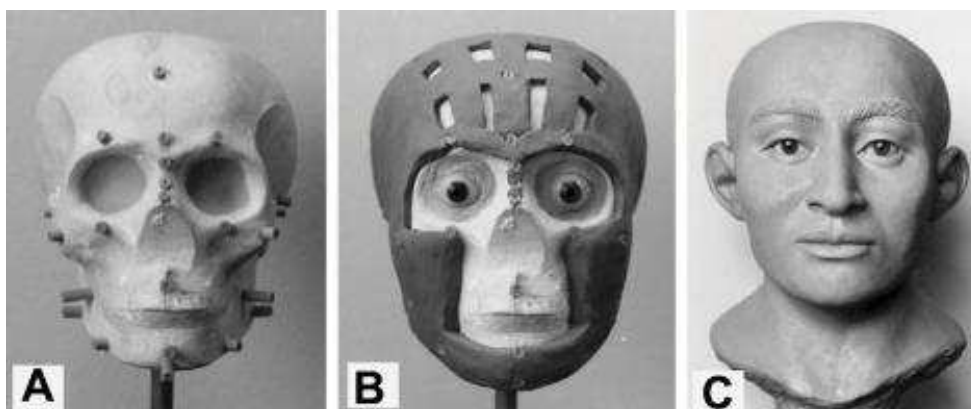
1.2.1.1 Americká antropometrická metoda

Americká antropometrická metoda neboli metoda tloušťky měkkých tkání byla vyvinuta roku 1946 Wiltonem M. Krogmanem (Gupta et al. 2015; Wilkinson 2004). Krogman formuloval základní pravidla rekonstrukce obličeje týkající se polohy a velikosti oka, nosu, úst a délky ucha (Tyrrell et al. 1997).

Tato metoda vyžaduje kolíčky, které udávají určitou tloušťku měkké tkáně na strategických antropometrických bodech. Tyto jsou následně aplikovány (např. lepeny) na lebku (Vanezis & Vanezis 2000; Wilkinson 2004). K měření průměrné hloubky měkkých tkání na kostěných obličejových landmarcích (Rynn & Wilkinson 2006) se využívají jehly, rentgenové záření, případně ultrazvuk (Gupta et al. 2015). Tloušťky měkkých tkání mají svou specifitu v závislosti na pohlaví, věku a etnické příslušnosti (Wilkinson 2004).

K samotné rekonstrukci je třeba lebka nebo její replika, na kterou je přímo nanášena hlína, vosk či plastelína (Vanezis & Vanezis 2000; Wilkinson 2004). Technika je rozdělena do dvou fází – technické a umělecké. Technická fáze zahrnuje sbírání informací o lebce, přípravu lebky, aplikaci měkkých tkání, resp. hmoty a tvorbu kontur obličeje. Ty jsou vytvářeny propojováním jednotlivých kolíčků proužky hmoty, čímž vznikají nerovné kontury povrchu obličeje (viz obr. 5.). V umělecké fázi rekonstrukce jsou dotvářeny obličejové rysy (Wilkinson 2004).

Dříve byla tato metoda hojně využívána donucovacími orgány jako forensní rekonstrukční technika. Ale vzhledem k tomu, že vyžaduje vysokou kvalifikovanost personálu, o tuto metodu v současnosti zájem opadá (Gupta et al. 2015).



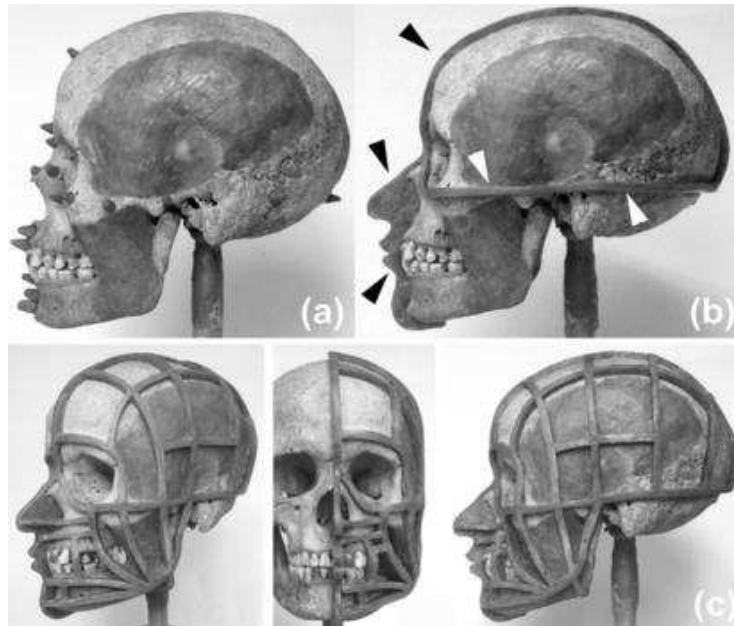
Obr. 5. Rekonstrukce obličeje pomocí Americké metody: (A) Lebka s kolíky pro hloubky měkkých tkání, (B) proužky modelační hmoty propojující jednotlivé kolíky, (C) konečný vzhled s doplněnými obličejovými rysy (Převzato z Wilkinson 2004)

1.2.1.2 Ruská anatomická metoda

Ruská anatomická metoda, někdy také nazývaná Gerasimova metoda (podle Michaila Michajloviče Gerasimova), byla vyvinuta roku 1971 (Gupta et al. 2015; Ullrich & Stephan 2011).

Prvním krokem metody bylo modelování povrchových žvýkacích svalů (*musculus temporalis et masseter*) (Wilkinson 2004). Svaly byly vytvořeny ze směsi včelího vosku, plastelíny a kalafuny (Ullrich & Stephan 2011) a byly aplikovány s velkou anatomickou přesností. Gerasimov zastával názor, že žvýkací svaly jsou vysoce specifické, co do tvaru, objemu a velikosti, tudíž mohou být determinovány na základě lebky (Wilkinson 2004). Spánkový sval je podle této metodologie konkávní v přední části, konvexní nad středem jařmového oblouku a konkávní u kořene jařmového oblouku. Zatímco tvar žvýkacího svalu je laterálně mírně konvexní, ale nedosahuje dále než ke spojnici jařmového oblouku a úhlu dolní čelisti (Ullrich & Stephan 2011). Jednotlivé svaly se ale liší svou velikostí a tvarem v závislosti na utváření lebky daného jedince (Wilkinson 2004).

Současná klasifikace ruské metody jako anatomické (Vanezis & Vanezis 2000) je částečně neopodstatněná, poněvadž se o čistě anatomickou techniku nejedná. Vyplývá to například z toho, že na lebku nebyly rekonstruovány mimické svaly, jejichž počátky a úpony považoval Gerasimov za špatně identifikovatelné. Ve druhém kroku proto byly využívány průměrné hodnoty tloušťky měkkých tkání, které Gerasimov sám naměřil na 71 mrtvých. Původně byly používány malé voskové pyramidy, jejichž výška odpovídala hloubce měkkých tkání v daných antropometrických bodech. Ty byly následně včleněny do „profilových linií“ konstruovaných přímo na lebku. Nejednalo se tedy o jednotlivé izolované body, ale o jednodlitou strukturu reprezentující průměrnou hloubku měkkých tkání (viz obr. 6.) (Ullrich & Stephan 2011).



Obr. 6. Simulace reprezentující hloubku měkkých tkání podle Gerasimova: (a) voskové pyramidy (b), profilová linie a linie sledující Frankfurtskou horizontálu, která obsahuje většinu hodnot hloubky měkkých tkání (c), síť tvořená profilovými liniemi, která umožnila měření hodnot simulované měkké tkáně na mnoha kraniofaciálních místech v kombinaci s typicky používanými landmarky.

(Převzato z Ullrich & Stephan 2011)

Gerasimov také stanovil výšku a šířku ucha, pozici oční koule, šířku úst a další obličejové komponenty na základě reliéfu lebky (Wilkinson 2004). Výška ucha zde odpovídá vzdálenosti mezi glabelou a oblastí pod anteriorním trnem nosním, která je zvětšená o 2 mm. Šířka ucha byla stanovena polovinou jeho výšky, k níž jsou přičteny 2-3 mm. Oční koule byla umístěna 1-2 mm před tečnou spojující středy supraorbitální a infraorbitální hrany (Ullrich & Stephan 2011). Také tvar nosu, respektive jeho špička je determinována pomocí dvou tečen. První sleduje poslední třetinu kostí nosních a druhá směřuje od anteriorního trnu nosního (Ullrich & Stephan 2011; Rynn & Wilkinson 2006).

Po Gerasimově smrti (1979) na jeho práci navázal ruský antropologický tým, v jehož čele stanuly Lebedinskaya, Balueva a Veselovskaya (Wilkinson 2004).

Zásadním problémem tohoto způsobu rekonstrukce je skutečnost, že je poměrně složité ho zopakovat na základě publikované literatury. Neexistuje podrobný kvalitativní popis podstaty této metody (Wilkinson 2004), což způsobuje, že se současně také vyskytuje mnoho chyb a nepřesností v navazující literatuře prověřující využití a reliabilitu metody. V neposlední řadě vše komplikuje absence podrobností o přesném složení modelovacího substrátu, který Gerasimov použil (Ullrich & Stephan 2011).

1.2.1.3 Metoda Manchester

Tato metoda, vyvinutá v roce 1977 Richardem Neavem, je v současnosti nejvíce uznávanou manuální rekonstrukční technikou. Kombinuje jak hodnoty tloušťky měkkých tkání, tak i anatomii obličejových svalů (Gupta et al. 2015; Wilkinson 2004). Proces rekonstrukce je rozdělen do tří kroků: anatomické modelování, morfologická determinace a prezentace výsledného obličeje veřejnosti (Wilkinson 2010).

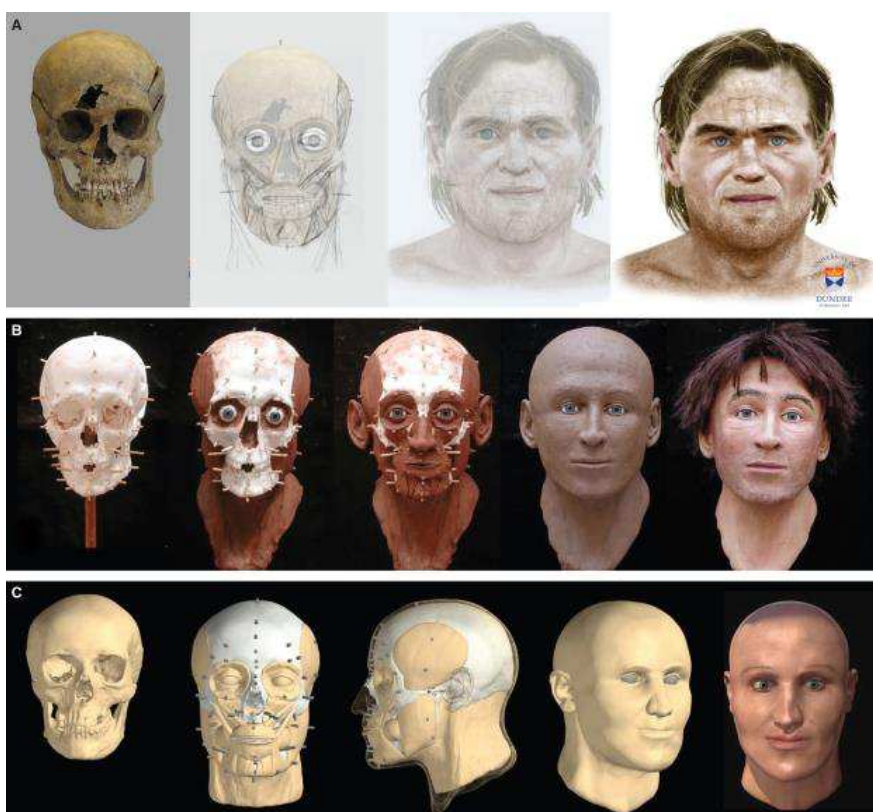
Anatomické modelování spočívá v tom, že se přímo na lebku (na její kopii) nebo do předem navrtaných otvorů v lebce umístí kolíky prezentující průměrnou tloušťku měkkých tkání v daném anatomickém bodě. Kolíky mají svou specifitu v závislosti na věku, pohlaví a etnické příslušnosti (Wilkinson 2004). Následně jsou zrekonstruovány žvýkáci a mimické svaly podle jejich anatomických počátků a úponů a na základě tvrdých podkladových tkání je stanovena jejich přibližná velikost a tvar (Short et al. 2014; Gupta et al. 2015). Problém ale nastává se svalovou variabilitou. Některé svaly mohou být zdvojené nebo dokonce chybět, což se z kosterního materiálu zjišťuje jen velmi složitě (Wilkinson 2010).

V morfologické determinaci jde především o určení polohy, tvaru a velikosti obličejových prvků, jako jsou oči, nos, ústa a uši (Wilkinson 2004; Wilkinson 2010).

Přesná velikost oční koule a její umístění v očnici jsou závislé na pohlaví jedince (Guyomarc'h et al. 2012). Pro účely Manchesterské metody jsou do očnice kraniolaterálně umístěny sádrové či protézni oční koule o průměru 24 mm a to tak, že spojnice středu supraorbitální a infraorbitální hrany očnice tvoří tečnu čochy (Wilkinson 2010). V publikaci Stephana et al. (2009) je umístění oční koule v očnici definováno přesněji: 4 mm od supraorbitální hrany, 6,9 mm od infraorbitální hrany, 8 mm od laterální hrany očnice a 3,9 mm od mediální hrany očnice. Vnitřní koutek je umístěn 2 mm laterálně od lakrimální hrany, zatímco vnější koutek je umístěn 3-4 mm mediálně od malárního hrbolku kosti lícni. V případě, že malární hrbolok chybí, je poloha vnějšího koutku 10 mm pod linií švu tvořeného kostí čelní a lícni a 5-7 mm od hrany očnice (Wilkinson 2010; Gupta et al. 2015; Short et al. 2014).

Maximální šířka nosu je určena nosní aperturou, která odpovídá třem pětinám jeho celkové šířky. Pomocí nosní apertury je určen také profil a tvar nosu, společně s tvarem nosních křídel. Špička nosu je predikována pomocí bodu, ve kterém se kříží linie distální části nosních kostí s linií anteriorního trnu nosního (Short et al. 2014).

Ústa jsou oblastí, kde je třeba více spoléhat na uměleckou interpretaci (Wilkinson 2010). Maxilární špičák, první premolár či infraorbitální otvor v maxile jsou důležitými markery při stanovení šířky úst. Tloušťka rtů je dána velikostí horních a dolních řezáků (Gupta et al. 2015). Tam, kde více prominují horní zuby nad spodními, bude také horní ret prominovat nad spodním (Wilkinson 2010).



Obr. 7. Metody faciální rekonstrukce: (A) 2D manuální metoda, (B) 3D manuální metoda, (C) 3D počítačová metoda. (Převzato z Wilkinson 2010)

Tvar ušního boltce je také velmi těžké determinovat. Jestliže bradavkovitý výběžek kosti spánkové směřuje dolů, bude ušní lalůček celý připojený. V případě, že směřuje bradavkovitý výběžek dopředu, bude ušní lalůček volný (Wilkinson 2010). U jedinců neasijského původu je výskyt volného ušního lalůčku častější. Samotná délka ucha je predikována délkou nosu (60-70 mm), šířka ucha odpovídá přibližně třem pětinám jeho délky (Guyomarc'h & Stephan 2012) a styčným bodem pro pozici ušního kanálu je vnější zvukovod (Gupta et al. 2015).

Svaly jsou dále překryty tenkou vrstvou hlíny, která má reprezentovat pokožku. Podkožní tuk je reprezentován stočenými a vymodelovanými proužky jílu, díky kterým je zachována délka kolíků/markerů jako vodítek pro celkový vzhled obličejového povrchu (Wilkinson 2004; Gupta et al. 2015).

V poslední části rekonstrukce je věnována pozornost prvkům, které by napomohly lepšímu rozpoznání obličeje veřejností. Jedná se o obličejové vlasy, účesy a brýle. Rekonstruovaný obličej může být prezentován s použitím různých textur pokožky a barev. Avšak přesný vzhled jednotlivých prvků je stále nejistý. I v případě, že je známo, že jedinec měl např. bílou barvu kůže, může se její odstín pohybovat od mléčně bílé s pihami až po olivovou (Wilkinson 2010).

2 3D POČÍTAČOVÁ REKONSTRUKCE

Manuální faciální rekonstrukce využívaná jako vodítko pro identifikaci člověka je často zpochybňována kvůli vysoké subjektivitě a požadavkům na umělecký talent (Miyasaka et al. 1995). Hlavním problémem manuálních rekonstrukčních technik jsou odlišné znalosti a schopnosti jednotlivých uživatelů metody, z čehož vyplývá, že výsledek konkrétní rekonstrukce může být jen tak přesný, jak zkušený je on sám (Wilkinson 2004).

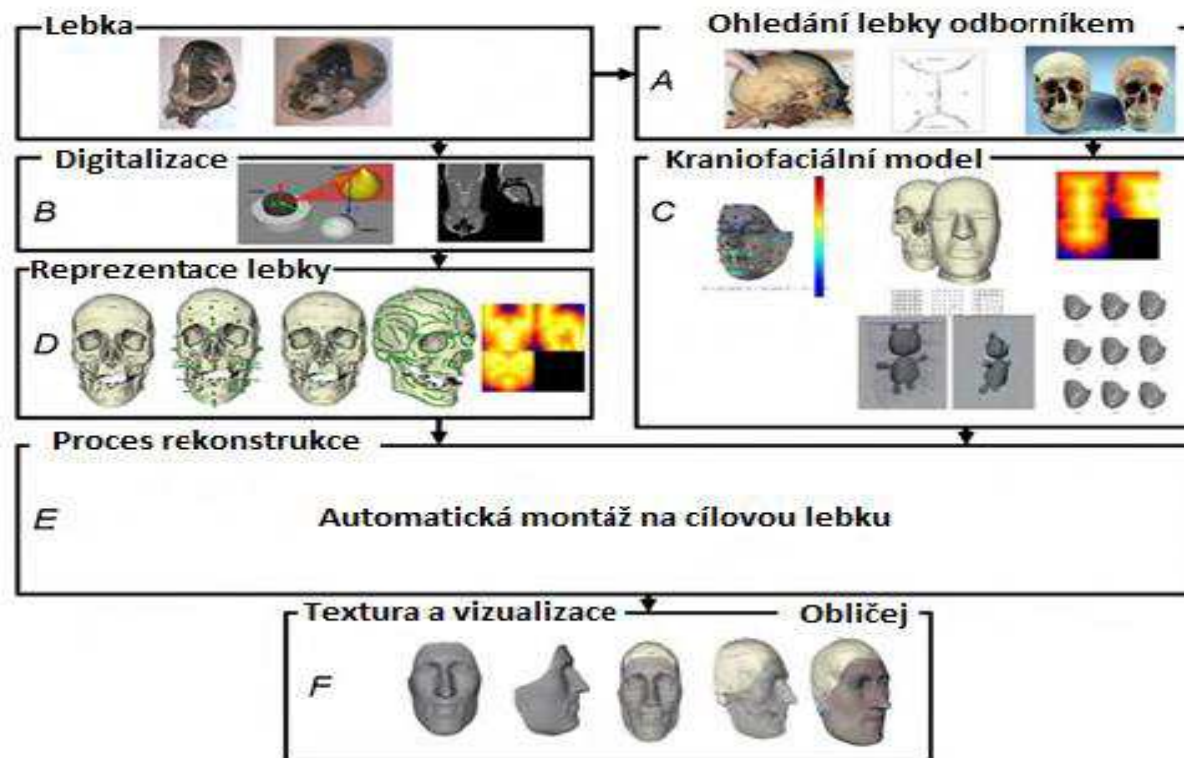
Pokrok v počítačové technice a v medicínských zobrazovacích technologiích vedl v posledních letech k rozvoji alternativních počítačových metod (Claes et al. 2010). Virtuální rekonstrukce nabízí řadu výhod oproti manuálním metodám, ale stále se jedná o techniku vizualizační, nikoliv kvantifikační (Weber & Bookstein 2011). Počítače jsou ve srovnání s člověkem konzistentnější a objektivnější, tedy generují i stejná výstupní data (Claes et al. 2006). Současně zvyšují úroveň flexibility a efektivity (Wilkinson 2004), tudíž je zde možnost z jedné lebky vytvořit několik různých rekonstrukcí s ohledem na odlišný věk, BMI, původ a pohlaví (Claes et al. 2010). A to vše v relativně krátkém čase (Wilkinson 2004).

Současné počítačové techniky mají stejný obecný model. Jsou v podstatě virtuální simulací klasických manuálních metod a jsou rozčleněny do šesti částí (viz obr. 8.) (Claes et al. 2010). Podstatou rekonstrukčního postupu je definovat kraniofaciální model (CFM), který kóduje kraniofaciální templát (CFM) a zároveň poskytuje kraniofaciální informaci (CFI) týkající se anatomických poznatků o vztazích mezi obličejem a lebkou (Kust et al. 2013).

2.1 Obecný princip 3D počítačových metod

Základem každé 3D kraniofaciální počítačové rekonstrukce je antropologická osteobiografická analýza lebky. Na základě lebky (ale i dalších kosterních pozůstatků) lze stanovit přibližný věk, pohlaví, etnický původ a tělesnou stavbu jedince (Vanezis et al. 2000). Někdy je také možné stanovit BMI ze zbytků měkkých tkání nalezených na ostatcích, případně z oblečení nalezeného na místě činu (Claes et al. 2010).

Výhodou počítačových metod je, že jsou neinvazivní a nedestruktivní, tudíž lze použít originální lebku a není třeba vytvářet kopii (Vanezis et al. 2000). Aby bylo možné s lebkou dále pracovat, je třeba vytvořit její trojrozměrnou digitalizovanou verzi. K tomu se využívají např. laserové skenovací systémy (Vanezis et al. 2000) a CT skenery (Claes et al. 2006). Digitalizace lebky vychází z principů virtuální antropologie, jejíž podstatou je kvantitativní analýza biologických struktur založená na číselném vyjádření objektů (Weber & Bookstein 2011).



Obr. 8. Schéma průběhu práce počítačových rekonstrukčních technik: (A) Nejprve je neznámá lebka zkoumána antropology a zubními odborníky kvůli determinaci pohlaví a věku (B), poté je vytvořena její digitalizovaná kopie. (C) Jádrem každé techniky tkví v kraniofaciálním modelu, který kóduje a priori znalosti o obličejích a jejich vazbu na zásadní antropometrické body – ekvivalent odborníka u manuálních technik (D), což je vyjádřeno pomocí landmarků a crest lines. (E) Dále jsou zjišťovány geometrické vztahy mezi kraniofaciálním modelem a neznámou lebkou – automatický proces rekonstrukce. (F) Posledním krokem je vytvoření textury obličeje (pigmentace, barva pleti) a jeho následná vizualizace. (Přepřacováno podle Claes et al.

2.1.1 Kraniofaciální model (CFM)

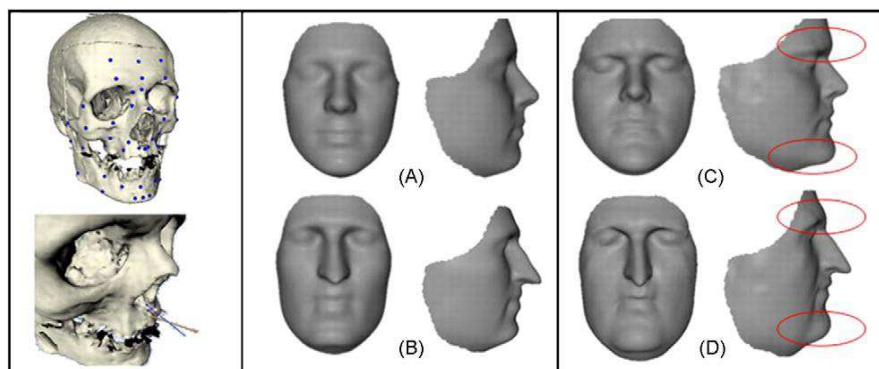
Každá 3D počítačová rekonstrukční metoda vyžaduje kraniofaciální model, který kóduje informace o tvaru obličeje a jeho vztahu k podkladové lebce (Turner et al. 2005). Kraniofaciální model obsahuje 3 základní komponenty: kraniofaciální templát (CFT), kraniofaciální informaci (CFI) a kraniofaciální deformaci (CFD) (Claes et al. 2010).

V jednotlivých počítačových metodách jsou využívány různé typy **kraniofaciálních templátů (CFT)**. Šablony mohou reprezentovat jeden kompletní vzhled rekonstruovaného obličeje (Quatrehomme & Subsol 2005) nebo mohou představovat obličej kompilovaný z dílčích obličejových rysů, jako jsou uši, nos, ústa (Tu et al. 2007). Lze tedy použít jeden nebo jeden mnohonásobný templát (Vandermeulen et al. 2006). V obou případech může být šablona buď všeobecná/průměrná (Shahrom et al. 1996; Claes et al. 2006) nebo specifická, resp. odpovídající konkrétnímu jedinci v závislosti na podobnosti s cílovou lebku nebo na jejích vlastnostech (BMI, věk, pohlaví, rozměry lebky) (Nelson & Michael 1998; Tu et al. 2007). První všeobecný přístup hned na počátku kombinuje informace z několika referenčních hlav a poté vytvoří jednu rekonstrukci založenou na kombinaci těchto znalostí (Paysan et al. 2009). Druhý neboli specifický přístup generuje rekonstrukci na základě jedné nejpodobnější referenční hlavy z databáze, což vede ke vzniku několika obličejů, které jsou následně poskládány do jediné rekonstrukce (Vandermeulen et al. 2006).

Výběrem vhodného templátu, lze rekonstrukci přizpůsobit vlastnostem lebky získaným z antropologické osteobiografické analýzy. Tento proces se nazývá **normalizace vlastností (property normalization)**. Proces normalizace může být proveden před zahájením rekonstrukce nebo v post-rekonstrukční fázi (Claes et al. 2010). Pre-rekonstrukční normalizace je nezbytná v případě, že je použit kraniofaciální model, který se svými vlastnostmi příliš liší od cílové lebky. Důsledkem toho by byl proces rekonstrukce komplikovaný nebo by se nemusel vůbec uskutečnit (Claes et al. 2006). Post-rekonstrukční normalizace se používá tehdy, je-li třeba změnit hodnotu vlastnosti. Například když byla oběť několik let před smrtí pohřešována, tak aby mohla být vytvořena její mladší verze. Normalizace je možné dosáhnout výběrem jedné nebo více referenčních hlav z databáze, jejichž vlastnosti jsou podobné neznámé lebce. V případě, že je dostupná velká databáze s širokou variabilitou obličejů, lze vybrat jeden specifický templát. Alternativou je modelace geometrických odchylek pocházejících z odlišných znaků různých obličejů. Tak je možné simulovat změny věku, tělesné stavby, původu i pohlaví (Claes et al. 2010).

Nevhodným výběrem šablony může vznikat tzv. **modelové zkreslení (model bias)**. Zkreslení vzniká únikem obličejových rysů z templátu do konečné rekonstrukce (Claes et al. 2010). Při použití specifických templátů na základě podobnosti v původu, věku a pohlaví zůstávají v konečné fázi rekonstrukce viditelné nežádoucí obličejové rysy. Na druhé straně použitím generické šablony může

vzniknout rekonstrukce obličeje, která je příliš hladká a nespecifická (Vandermeulen et al. 2006). Chceme-li modelovému zkreslení předejít, je třeba pracovat s větším množstvím referenčních obličejů, tedy mít k dispozici databázi tvořenou mnoha různorodými obličejí (Claes et al. 2010).



Obr. 9. Modelové zkreslení: (A) Generický templát (B) a jemu odpovídající nespecifická rekonstrukce. (C) Specifický templát (D) a rekonstrukce s nežádoucími obličejovými rysy. Problematické partie jsou zvýrazněny červenými elipsami. (Převzato z Claes et al. 2010)

Kraniofaciální informace se vztahují k explicitním znalostem obsaženým v kraniofaciálním modelu vzhledem ke vztahu mezi lebkou a obličejem (Claes et al. 2010). Tyto poznatky zahrnují informace o tloušťce tkání (Claes et al. 2006), reliéfu obličeje i lebky (Jones 2001) nebo o obličejových svalech (Kähler et al. 2003). Výběr kraniofaciálních informací se odvíjí od typu zařízení, které je pro skenování objektů používáno. Výhoda CT skenerů (Berar et al. 2005; Turner et al. 2005) tkví v možnosti získat informace o povrchu lebky a současně i proměřit hloubky tkání. Nevýhodou je především míra ionizujícího záření působícího na subjekt v průběhu skenování (Claes et al. 2010). Dále se využívá magnetická rezonance (Paysan et al. 2009), díky níž lze také proměřit hloubky měkkých tkání a na rozdíl od CT není invazivní. Třetím typem zařízení je laserový skener (Vanezis et al. 2000), který je ale omezen jen na skenování vnějšího povrchu lebky či obličeje. Novou alternativou je CT skener s kuželovým paprskem, který umožňuje skenovat obličej ve vzpřímené poloze a ve srovnání s tradičními CT skenery je objekt vystaven nižší dávce radiace (Claes et al. 2010).

Kraniofaciální deformace určuje množství transformací potřebných k nalícování templátu na cílovou lebku. Transformací je několik typů (Claes et al. 2010). Rigidní transformace využívají k deformaci pouze posouvání a rotaci templátu (Turner et al. 2005), zatímco afinní transformace zahrnují kromě posunutí a rotace také změnu velikosti faciálního templátu (Claes et al. 2006). K lokálnímu přizpůsobení šablony se využívají ještě nerigidní (Pei et al. 2008) a neafinní deformace. Většina metod využívá generické deformace, které jsou matematicky dobře definované a snadno použitelné. Výhoda obecných deformačních postupů spočívá v tom, že jsou použitelné na široké spektrum objektů (Vanezis et al. 2000). Jejich nevýhodou je, že nezahrnují informace o geometrii a

anatomii obličeje, tudíž mohou zdeformovat obličej dosti neobratně (Claes et al. 2010). To nečiní žádný problém v případě, že jsou rozdíly mezi kraniofaciálním templátem a cílovou lebku malé. Jsou-li ale velké, bude požadovaná deformace výraznější, což povede k nerealistické až karikaturní rekonstrukci obličeje (Claes et al. 2006). Použití obličejově specifické deformace (Paysan et al. 2009; Berar et al. 2005) spočívá v tom, že kraniofaciální templát si lze představit jako pružnou masku, jejíž elasticita je definována statisticky přípustnou korelací nebo kovariancí obličejových šablon v databázi. Výhodou ve srovnání s obecnou deformací tedy je, že obličej mohou být deformovány jen v rámci statisticky stanovených hranic, a to garantuje věrohodnost obličeje. Nevýhodou je závislost obličejově specifických deformací na vzorcích v databázi, tzn. databáze s nízkou variabilitou mezi subjekty vytváří příliš malou množinu možností deformace (Claes et al. 2010).

2.1.2 Re prezentace lebky (TSR)

Dalším krokem je tzv. reprezentace/parametrizace cílové lebky v závislosti na typu vztahu mezi měkkými a tvrdými tkáněmi nebo kraniofaciální informací obsažené v modelu (Claes et al. 2010). K tomu se využívá geometrická morfometrie, která kvantifikuje tvarovou a velikostní změnu mezi každou dvojicí z celé sady zkoumaných objektů (Marcus et al. 1996; Neustupa 2006). Jedná se o spojení přímého zkoumání homologicky význačných bodů na objektu, separaci lineárních tvarových změn od lokálních nelineárních deformací vizualizovaných formou deformačních sítí a jejich matematické zpracování účinným statistickým aparátem (Macholán 1999). U manuálních metod tomu odpovídá měření objektu pomocí antropometrických nástrojů (antropometr, posuvné měřidlo atd.) (Clement & Marks 2005) a umístění kolíčků, jejichž délka odpovídá průměrným hloubkám měkkých tkání ve specifických antropometrických bodech. Vyčleňují se dva základní typy kranio-metrické reprezentace lebky, tzv. „*sparse*“ a „*dense*“ (Tilotta et al. 2009; Claes et al. 2010).

Řada počítačových metod založených na „*sparse*“ kranio-metrické reprezentaci lebky využívá, stejně jako manuální rekonstrukční metody, markery hloubky měkkých tkání, které jsou umístěny na anatomické landmarky virtuální kopie lebky (Evenhouse et al. 1992; Shahrom et al. 1996) Landmarky jsou body, které popisují určitou anatomickou lokaci (té odpovídá i jejich název) (Vanezis et al. 2000), jsou definovány na všech objektech (neznámá lebka, obličej, templát atd.) a musí spolu korespondovat (Rohlf 1990). Existují tři typy landmarků. Landmarky prvního typu jsou umístěny na přesně definovaných bodech (nejčastěji na spojnici lebečních švů). Druhým typem jsou landmarky pro externí body (např. největší šířka) a landmarky třetího typu jsou body extrémní křivosti (např. bod největší konkavity/konvexity určitého místa) (Marcus et al. 1996). Některé metody ještě rozšiřují počet landmarků o matematicky vypočítané intermediální body (Davy et al. 2005). Obecně platí, že čím více landmarků použijeme, tím bude výsledek přesnější. Ale je třeba si uvědomit, že metoda musí zůstat dostatečně přehledná (Clement & Marks 2005).

V případě, že máme kraniofaciální templát s informacemi o povrchu lebky i obličeje, je možné použít „dense“ **kraniometrickou reprezentaci**. První možností je reprezentace lebky kontrolními nebo funkčními body, které budou mít hustší rozložení než landmarky u „sparse“ reprezentace (Turner et al. 2005). Teoreticky je každý bod reprezentující povrch lebky diskrétní, ale v praxi se jedná spíše o množinu bodů (Claes et al. 2010). Druhou variantou jsou body uspořádané do tzv. „crest lines“ (Quatrehomme et al. 1997; Thirion & Gourdon 1996). Tyto linie sledují charakteristické křivky na povrchu lebky, jako jsou očníce, dolní čelist, lícní kosti či spánkové jámy (Quatrehomme & Subsol 2005; Clement & Marks 2005). Třetí možností je definování kontrolních bodů na klíčových anatomických místech lebky pomocí diskových polí. Ta jsou vymezena svým středem, normálovým a radiálovým vektorem, které jsou na sebe kolmé. Poté lze v prostoru reprezentovat libovolný bod pomocí válcové soustavy souřadnic, která odpovídá diskovému poli (Nelson & Michael 1998).

Dalším ale zcela odlišným případem reprezentace lebky je tzv. „signed distance transform“ (sDT). Tato reprezentace vyžaduje snímky lebky pořízené pomocí počítačové tomografie (Vandermeulen et al. 2006). Takto získaná objemová data jsou tvořena voxely (analogy pixelů ve 3D), což jsou základní krychlové částice reprezentující část 3D obrazu (Turner et al. 2005). Prostorové snímky z databáze jsou transformovány do sDT map, které představují pro každý voxel obrazu nejkratší euklidovskou vzdálenost k povrchu lebky, což je vzdálenost mezi dvěma body, která je definována druhou odmocninou sumy čtvercových vzdáleností mezi souřadnicemi objektů. Povrch lebky je roven nule, kladné hodnoty jsou pod povrchem a záporné nad povrchem lebky (Vandermeulen et al. 2006). Tato reprezentace tedy nekóduje jen původní povrch lebky, ale i nekonečnou množinu povrchů vně i uvnitř (Claes et al. 2010).

Dalším typem „dense“ reprezentace jsou polygonální modely, které reprezentují povrch lebky pomocí malých diskrétních trojúhelníků, tzv. „mesh“ (Turner et al. 2005; Tu et al. 2007)

2.1.3 Registrace kraniofaciálního modelu (CFM) na cílovou lebku

Dalším krokem počítačové rekonstrukce je registrace kraniofaciálního modelu na neznámou lebku neboli lícování, což je proces hledání a aplikace geometrického vztahu mezi modelem a cílovou lebku. Pomocí konkrétní reprezentace, která je kompatibilní s obličejovým modelem je definována podobnost, která vyjadřuje, jak těsný je vztah mezi templátem a cílovou lebku. Kraniofaciální deformační model tvoří v kombinaci s podobností objektivní funkci. Během procesu sloučení se hledá soubor deformačních parametrů, které optimalizují objektivní funkci tím, že zvyšují podobnost v rozsahu možných transformací kódovaných kraniofaciálním deformačním modelem. Jakmile jsou tyto parametry známé, templát může být deformován na cílovou lebku, čímž vzniká odhad neznámé obličejové geometrie (Claes et al. 2010).

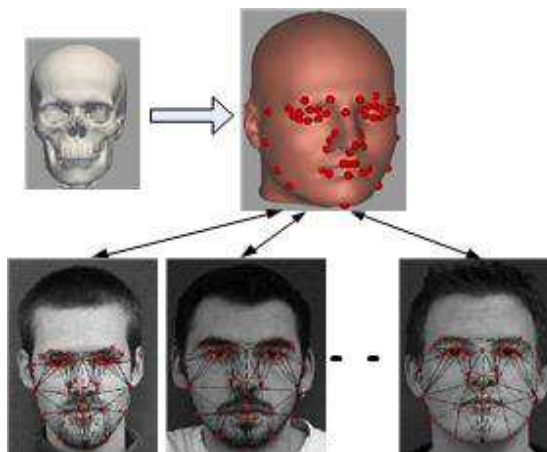
2.1.4 Textura a vizualizace

Konečným bodem rekonstrukce je oživení obličeje tím, že je dotvořena jeho textura. 3D modelovací softwary jsou schopné virtuálně dokreslit do obličeje jeho komponenty (oči, ústa atd.), ale také jizvy a mateřská znaménka (Davy et al. 2005). Nicméně textura může být dotvořena i tzv. mapováním (Quatrehomme & Subsol 2005), což je v podstatě aplikace „tapety“ obličeje konkrétního jedince z databáze tvořené obličejí žijících lidí. To ale může vést k chybnému rozpoznání subjektu. Tomu lze předejít tak, že jsou tyto texturní mapy vytvořeny jako obličejový průměr charakteristický pro danou subpopulaci (Claes et al. 2010).

2.1.5 Validace

Podstatným aspektem při tvorbě počítačové rekonstrukční techniky je ověření správnosti. Teoreticky může vyvinutá metoda pracovat adekvátně, ale dokud nebude řádně ověřena, je v reálných forensních případech nepoužitelná (Claes et al. 2010).

K ověření je možné využít tzv. „**leave-one-out cross-validation**“. Z databáze lebek se známými obličejí je postupně každá lebka vyjmuta, zrekonstruována a porovnána se skutečnou tváří (Pei et al. 2008). Pro hodnocení výsledků rekonstrukce jsou použity odchylky od původního obličeje, jež je v tomto případě standardem (Claes et al. 2006). Kvantitativní vyhodnocení chyb lze provést pozorováním lokálních povrchových rozdílů mezi standardem a rekonstrukcí (Vandermeulen et al. 2006). Mimo jiné z toho také lze vyčíst, jak obtížná je rekonstrukce dílčích oblastí obličeje (Claes et al. 2010).



Obr. 10. Identita lebky (vlevo nahoře) je stanovena statistickým porovnáním rekonstrukce povrchu obličeje (vpravo nahoře) a přidružených landmarků se souborem obrazů zobrazujících pohřešované osoby (dole). (Převzato z Tu et al. 2007)

Cílem kraniofaciální rekonstrukce není tak úplně přesnost, ale spíše rozpoznání a pozitivní identifikace veřejností nebo počítačovým systémem. Počítačový rekogniční test porovnává

zrekonstruovanou tvář s databází obsahující tváře skutečných lidí na základě měření podobnosti obličejů (viz obr. 10.) (Claes et al. 2010). Druhým způsobem je identifikační proces založený na lidské rozpoznávací schopnosti. Lidský pozorovatel je požádán, aby z obličejového fondu možných kandidátů („face-pool“) vybral tvář, která je nejvíce podobná dané rekonstrukci (Claes et al. 2006). Avšak nasimulovat „face-pool“ test, který by odrážel lidskou rozpoznávací schopnost, je poměrně náročné (Claes et al. 2010).

2.2 Druhy 3D počítačových rekonstrukčních metod

Následující dělení 3D počítačových rekonstrukčních metod na metody morfometrické, morfologické a transformační vychází z práce Quatrehomme a Subsol (2005). První dvě metody ve skutečnosti jen automatizují a rozšiřují tradiční rekonstrukční procedury. Morfometrická metoda je navíc snáze proveditelná a nevyžaduje žádný anatomický model. Jsou zapotřebí jen desítky landmarků a s nimi korespondující data týkající se hloubky měkkých tkání (Clement & Marks 2005).

2.2.1 Rekonstrukční metoda založená na morfometrii

Metoda obličejové rekonstrukce založená na morfometrii vychází z principu nanášení průměrných hodnot tloušťky měkkých tkání na landmarky, předem definované body, které jsou totožné pro lebku i pro obličej (Clement & Marks 2005). Jedním z prvních autorů této metody byl Peter Vanezis (Vanezis et al. 2000).

Před samotným zahájením rekonstrukce je třeba ohledat lebku a stanovit tak věk, etnický původ a pohlaví. Dále také tělesnou stavbu a vzrůst, což se zjišťuje z nalezeného postkranálního skeletu či z oblečení a obuvi. Kromě toho se také hledají nejrůznější asymetrie a rysy, které mohou napomoci lepší identifikaci (Vanezis et al. 2000).

Poté je lebka umístěna na rotující platformu a nasnímána laserovým paprskem. K lebce je potřeba připojit dolní čelist a vše fixovat k podkladu např. pomocí lepící pásky, která se dobře odstraňuje a neinterferuje s laserovým paprskem. Aby laserový paprsek neprocházel skrz nejrůznější defekty vzorku, je nezbytné, aby tyto byly ucpány vatou či jiným podobným materiálem (Vanezis et al. 2000).

Pro tyto účely autor využíval laserový skenovací systém pro měření obličejové plochy, např. Facia Optical Surface Scanner (University College London). Laserem osvětlený profil lebky odráží 2 zrcadla, kterými je celý systém opatřen. Zrcadla vytvářejí profilové linie, které jsou zaznamenávány videokamerou (Vanezis et al. 2000). Původní data uložená ve formě LSM (Laser Scan Multiple) jsou softwarem převedena do Kartézské soustavy souřadnic (Vanezis et al. 2000).

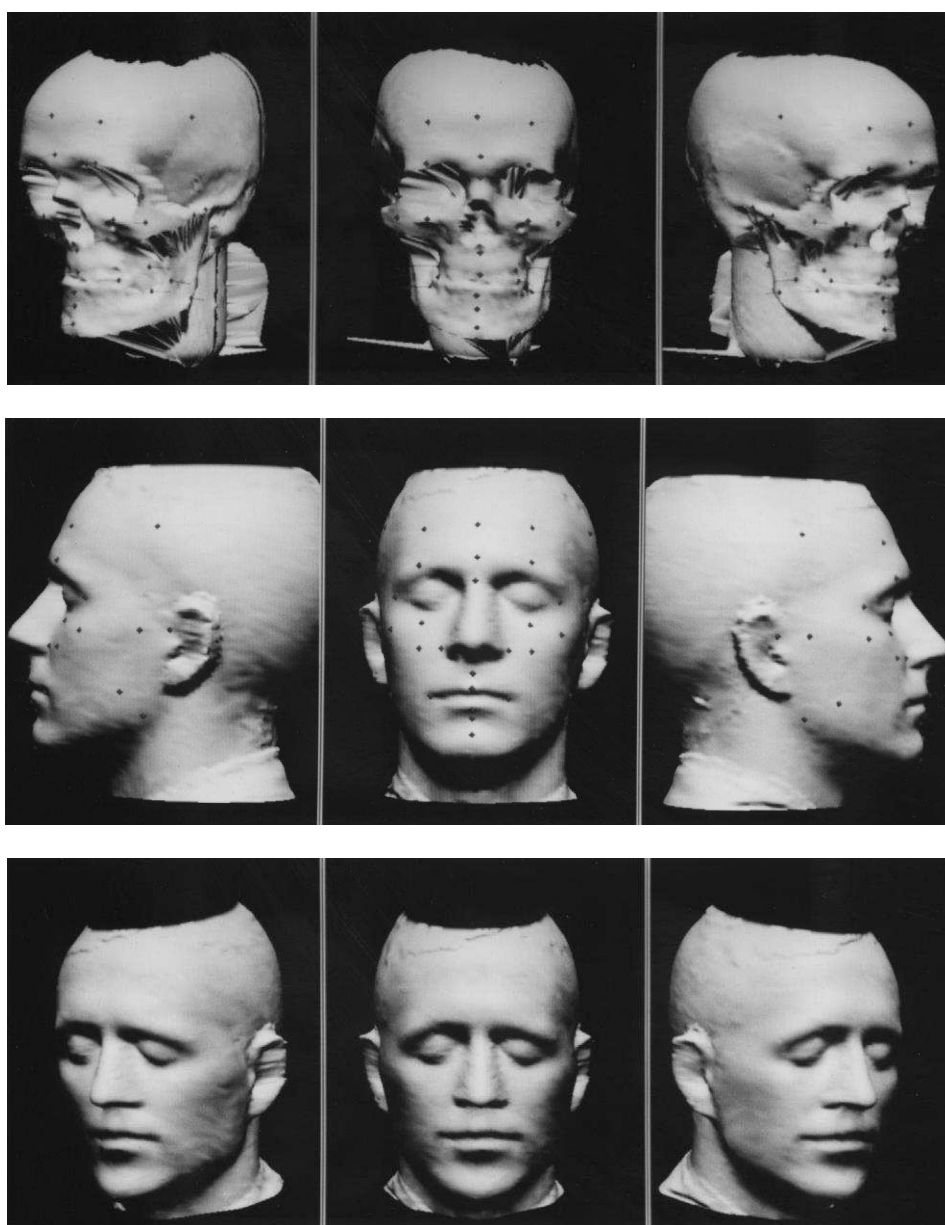
Facial Reconstruction (FR) software je konstruován pomocí TCL/Tk skriptovacího jazyka (z něj později vznikl C3D systém) (Vanezis & Vanezis 2000) poskytuje zobrazení lebky, obličeje a jim

odpovídajících landmarků, kterými je předem definována tloušťka měkkých tkání. Důležitými funkcemi softwaru jsou otáčení objektů, jejich přiblížení či oddálení, zobrazování objektů ze 3 různých pohledů současně (levý profil, pravý profil a předozadní), polohování landmarků pomocí myši, zobrazení landmarků ve 3D, ukládání obličejů s landmarky a jejich opakované použití (Vanezis et al. 2000).

Metoda vychází z nanesení 40 landmarků na neznámou lebku, z nichž každý má přidělené číslo a název, který se odvíjí od jeho anatomické polohy. S každým landmarkem je asociována tloušťka měkké tkáně odvozená od skutečných subjektů. Klasifikace je založena na europoidní populaci a dále členěna podle BMI, tedy rozdělení na tenkou (štíhlou), střední a silnou (tukovou) tkáň obličeje (Vanezis et al. 2000). Vanezis definuje markery tloušťky měkkých tkání obličeje jako linie odstupující z landmarků a jejich délka odpovídá hloubce měkkých tkání v konkrétním místě, podobně jako kolíky u manuálních technik (Panenková et al. 2012).

V další fázi je vybrán templát z databáze obličejů živých jedinců, kteří byli naskenováni. Vybraný obličej má standardní průměrné rysy a odpovídá lebce po antropologické stránce. Landmarky umístěné na obličej musí být upraveny tak, aby korespondovaly s body na lebce (Vanezis et al. 2000). Toho je dosaženo použitím Prokrustovské transformace (Mitteroecker & Gunz 2009), jejíž podstatou je přiložení obličejových landmarků k landmarkům na lebce, tak aby byla jejich vzdálenost co nejmenší. Toho lze dosáhnout posouváním, rotací, zvětšováním a zmenšováním obou objektů (Neustupa 2006). Následně je pomocí Prokrustovské transformace v kombinaci s thin-plate spline (TPS) deformací, která je reprezentována radiální bázovou funkcí (definuje prostorové přesunutí 1 bodu na nové místo) (Weber & Bookstein 2011), vytvořena tzv. osnova („warpa“). Warpa je pak aplikována na každý původní bod obličejové plochy a tím je vytvářena rekonstrukce. Když jsou landmarky správně umístěny, je vybrán typ tloušťky měkkých tkání obličeje, již zmíněný tenký, střední či silný vzhled obličeje a v závislosti na vzdálenosti a vzájemné poloze landmarků je provedena rekonstrukce obličeje (Vanezis et al. 2000).

Morfometrická metoda je využívána i v rekonstrukci Petera Claese (Claes et al. 2006). Jeho metoda vychází z definice 52 obličejových landmarků, na nichž jsou ultrazvukovým skenerem měřeny tloušťky měkkých tkání. Z databáze je vytvořen statistický model, který je kombinací dat o povrchu obličeje a naměřených hodnot měkkých tkání. Statistický model je tedy geometricky průměrný obličejový templát, který je výsledkem analýzy hlavních komponent (PCA). PCA sestavuje lineární kombinace původních proměnných tak, aby odčerpávaly co nejvíce jejich celkové variability, kterou je tak možno charakterizovat pomocí redukovaného počtu proměnných. Pomocí PCA lze vyjádřit každý obličej v databázi (Claes et al. 2006).



Obr. 11. Vanezisova morfometrická metoda: Digitalizovaná lebka s nanesenými landmarky (nahore), obličejový templát s odpovídajícími landmarky (uprostřed), výsledná podoba (dole).

(Převzato z Vanezis et al. 2000)

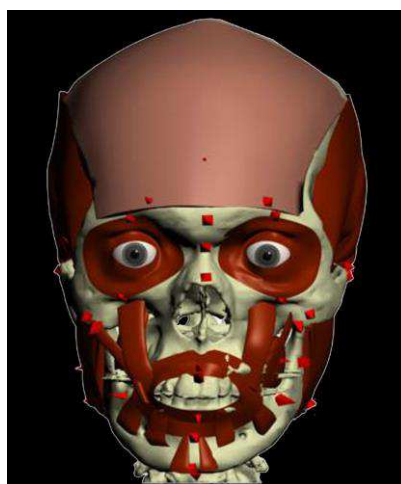
Základem počítačové rekonstrukce podle Claese je digitalizace neznámé lebky pomocí CT skeneru a osteobiografického zhodnocení lebky forezním antropologem. Ten má za úkol odhadnout věk, pohlaví, BMI a populační příslušnost a vyznačit 52 landmarků na lebce. Na základě vlastností neznámé lebky je celá databáze normalizována pomocí specifických deformací, tudíž vlastnosti všech obličejů v databázi odpovídají vlastnostem neznámé lebky. Na bázi této normalizované databáze je určen statistický model, což je model průměrného obličeje a lebky vytvořený na základě analýzy hlavních komponent (PCA). V dalším kroku je tento model, který si lze představit jako elastickou

masku s kolíky na vnitřní straně, nalícován na cílovou lebku (Claes et al. 2006). Poté jsou pomocí generické TPS (thin-plane spline) deformace upraveny landmarky modelové lebky tak, aby odpovídaly landmarkům na cílové lebce (Neustupa 2006). Tím je vytvořen co nejméně zakřivený, hladký povrch (Vandermeulen et al. 2006). Stejná deformace se následně aplikuje na povrch modelového obličej (Claes et al. 2006).

2.2.2 Rekonstrukční metoda založená na morfologii

Morfologická rekonstrukční metoda je založená na modelaci svalů a tukové tkáně na skeletální podklad a jejich následném překrytí tenkou vrstvou představující kůži (Kähler et al. 2003). K modelaci těchto obličejových prvků se využívají matematické algoritmy popsané v roce 1997 Wilhelmsem a Van Gelderem (Clement & Marks 2005).

Tuto metodu popsala britská antropoložka Dr. Stephanie Davy-Jow se svým týmem (2005), která pomocí softwaru 3ds Max vytvořila virtuální rekonstrukci na základě lebky (Decker et al. 2013). Nejprve je model lebky naskenován laserovým skenerem, poté je povrch lebky převeden na trojúhelníkovou síť, tzv. polygony (Davy et al. 2005). Původní tvar lebky by měl být co nejméně zjednodušen, protože právě drobné detaily na lebce mohou poskytnout důležité informace o výsledném vzhledu (Kähler et al. 2003). Markery pro hloubku měkkých tkání jsou reprezentovány pomocí malých pyramid, které jsou umístěny na 32 kranio-metrických landmarků na lebce. Výška pyramid je dána tloušťkou měkké tkáně, která musí korespondovat s věkem, pohlavím, tělesnou konstitucí a populační příslušností (Decker et al. 2013). V místech, ve kterých informace o tloušťce měkkých tkání chybí, jsou doplněny pyramidy odlišné barvy, které jsou matematicky dopočítány (Davy et al. 2005).



Obr. 12. FaceIT technika: Lebka s nanesenými obličejovými svaly a pyramidovými markery. (Převzato z Decker et al. 2013)

Jednotlivé pyramidové markery jsou propojeny pomocí křivek NURBS („Nonuniform rational B-splines“) CV („control-vertex curves“). Každá část křivky je vlastně průměrná linie mezi třemi kontrolními body. Pomocí těchto křivek je vytvořen model žvýkacích a mimických svalů pokrývajících lebku (viz Obr. 12.). Svalový model je převrstven velkým množstvím CV křivek a tím je dotvořen kompletní povrch obličeje (Davy et al. 2005).

V závěru byl obličej oživen doplněním barvy a textury (Davy et al. 2005). Anatomické rysy jako jsou oči, rty a uši byly importovány z databáze v závislosti na antropologické charakteristice lebky (Decker et al. 2013). Oči byly umístěny na obličej na základě Stephanovy metody (Stephan 2002) a v softwaru 3ds Max byla dotvořena textura a barva duhovky. Tvar a velikost nosu byly založeny na studii Macha z roku 1986 (Davy et al. 2005).

2.2.3 Rekonstrukční metoda založená na transformaci

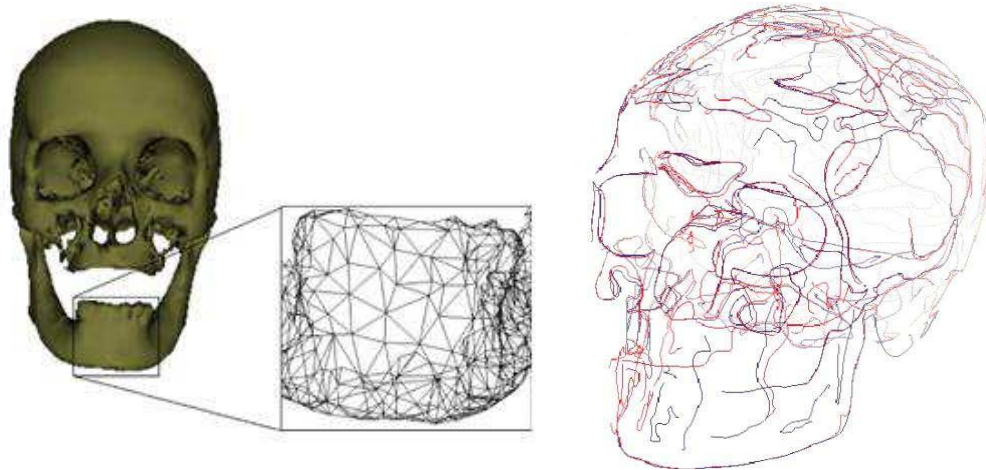
Základem této metody je tvorba referenčního modelu hlavy, který obsahuje model obličeje i lebky (Clement & Marks 2005). Metody pracují se snímky pořízenými počítačovou tomografií (Nelson & Michael 1998; Shaham et al. 2000) nebo z dat získaných pomocí laserového skeneru (Tyrrell et al. 1997).

Aby byla rekonstrukce realistická, musí být z databáze vybrána referenční hlava, která odpovídá cílové lebce věkem, pohlavím a tvarem (Nelson & Michael 1998). Tento referenční model vyžaduje, aby byla měkká tkáň ze známé lebky či lebek přenesena na cílovou lebku. Teoreticky je každý bod na cílové lebce spojen s odpovídajícím bodem referenční lebky a měkká tkáň, která překrývá kontrolní bod na referenční lebce, je přenesena na neznámou lebku (Quatrehomme & Subsol 2005). V praxi tomuto postupu odpovídá proces deformační transformace nebo deformace. Deformační proces mění tvar známé lebky tak, aby odpovídal lebce neznámé a tím je deformována i odpovídající měkká tkáň (Turner et al. 2005).

Jedním z autorů popisujících transformační metodu je Quatrehomme (Quatrehomme et al. 1997). Na základě CT snímků byla vytvořena databáze referenčních modelů, které byly rozděleny podle pohlaví, věku, populační příslušnosti a tělesné stavbě subjektu. Na referenční a cílové lebce jsou definovány „crest-lines“ (Turner et al. 2005). „Crest lines“ úzce souvisí s tzv. „ridge lines“, které odpovídají landmarkům druhého typu (Quatrehomme & Subsol 2005).

Pomocí metod geometrické morfometrie jsou následně obě lebky normalizovány, a tím je sjednocena jejich pozice, orientace a velikost (Slice 2007). Podstatou celé metody je transformace křivek referenční lebky na neznámou lebku a následná aplikace této transformace na kraniofaciální model, čímž z referenčního obličeje získáme co nejvěrnější rekonstruovanou podobu (Quatrehomme et al. 1997).

Transformační metoda je použita i v práci Dirka Vandermeulena a jeho týmu (2006). Proces rekonstrukce je rozdělen do tří kroků. Nejdříve jsou všechny sDT referenční lebky nelineárně deformovány (TPS) na cílovou lebku. Druhým krokem je aplikace těchto deformací na asociované sDT referenční hlavy. Konečně jsou zkombinovány deformované referenční hlavy a je navržena rekonstruovaná podoba (Vandermeulen et al. 2006).



Obr. 13. Polygonální model lebky s detailem trojúhelníkové sítě – „mesh“ (vlevo). Repräsentace lebky pomocí „crest-lines“ (vpravo). (Převzato z Turner et al. 2005, Thirion & Gourdon 1996).

3 POZITIVA A NEGATIVA METOD

Kvalita rekonstrukce vyplývá z dat obsažených v kraniofaciální databázi. Většina databází obsahuje snímky hlav pořízené CT skenerem nebo magnetickou rezonancí. Výhodou počítačové tomografie (CT) je, že je neinvazivní, může být použita ke skenování živých osob, je bezkontaktní a hlava může být nasnímána za všech stran (Stephan & Simpson 2008). CT skener vytváří snímky řezů objektem, které lze v příslušném počítačovém programu sloučit do jediného prostorového objektu. Následně je možné postupovat jednotlivými vrstvami digitalizovaného objektu či pracovat samostatně s povrchem obličeje nebo s povrchem lebky (Nelson & Michael 1998). Hlavní nevýhoda tkví v notné dávce radiace. Dále je vyžadováno drahé vybavení a objekty jsou snímány v horizontální podobě, tudíž se uplatňuje vliv gravitace. S vlivem gravitace se lze vypořádat tak, že jsou CT data doplněna dodatečným skenováním pomocí Breuckmannova faciálního skeneru, který využívá viditelné světlo. Subjekty jsou skenovány vsedě, tzn. v přirozeném stavu (Kust et al. 2013). Většina výhod magnetické rezonance (MR) je totožná s těmi uvedenými u CT, s tím rozdílem, že celková dávka radiace u MR je podstatně nižší (Stephan & Simpson 2008).

Jak již bylo zmíněno, základem počítačových 3D rekonstrukcí je kraniofaciální templát, ten může být buď generický nebo obličejově specifický (Claes et al. 2006). Při použití jedné specifické šablony zůstávají ve finální rekonstrukci viditelné nežádoucí rysy, tudíž je výsledný obličej vždy podobný obličejovému templátu (Wilkinson 2005). Na druhou stranu použitím generické šablony je vzniklá rekonstrukce příliš nespecifická nebo necharakteristická (Kust et al. 2013). Tento problém lze řešit deformací většího počtu templátů na cílovou lebku a následnou kombinací výsledků (Vandermeulen et al. 2006). Tento postup je ale časově daleko náročnější (Claes et al. 2006).

Dalším úskalím jsou generické kraniofaciální deformace, které jsou sice z matematického pohledu jednoduše proveditelné, ale neobsahují informaci o geometrii a anatomii obličeje. To může působit problémy ve chvíli, kdy jsou rozdíly mezi landmarky modelové a cílové lebky velké, protože požadované deformace jsou výraznější, a to může vést ke vzniku nerealistické rekonstrukce (Claes et al. 2006). Výhodou generických deformací pomocí warpů je, že je lze aplikovat nezávisle na reprezentaci lebky, na rozdíl od „mesh“ deformací. Korespondující nevýhodou je, že detailní informace o tom, jak by měla deformace na základě konkrétních vlastností obličeje probíhat, nelze použít (Vanezis et al. 2000).

Tabulka 1: Srovnání počítačových rekonstrukčních 3D metod

Autor metody	Skenovací zařízení	Kraniofaciální templát (CFT)	Kraniofaciální informace (CFI)	Kraniofaciální deformace (CFD)	Reprezentace lebky
Vanezis	laser	1/specifický	obličej	generická	sparse/kolíčky
Quatrehomme	CT	1/specifický	obličej/ lebka	generická/ radiální bázové funkce	dense/crest-lines
Nelson	CT	1/specifický	obličej	generická/ lokální válcové souřadnice	dense/funkční body
Kähler	CT	1/generický	obličej/ svaly	generická	sparse/kolíčky
Claes	CT	mnohonásobný/ generický	obličej/ tloušťka tkání	obličejově specifická/PCA	sparse
Vandermeulen	CT	mnohonásobný/ specifický	obličej/ lebka	generická/ radiální bázové funkce	implicitní/sDT
Berar	CT	mnohonásobný/ generický	obličej/ lebka	obličejově specifická/PCA	dense/funkční body
Davy	laser	1/generický	obličej	generická/ radiální bázové funkce	sparse/ markery (+extra)
Tu	CT	mnohonásobný/ specifický	obličej/ lebka	generická/ radiální bázové funkce	dense/range image
Turner	CT	mnohonásobný/ specifický	obličej	generická/ radiální bázové funkce	dense/crest-lines
Paysan	MR, CT	mnohonásobný/ generický	obličej/ lebka	obličejově specifická/PCA	dense/funkční body

Pozitiva a negativa metod vyplývají také z toho, jakým způsobem je lebka reprezentována. Reprezentace lebky pomocí virtuálních kolíčků, které udávají tloušťku měkké tkáně je výhodná v kombinaci s CFT, který obsahuje informaci o povrchu obličeje, ale neobsahuje údaje o povrchu lebky a hloubce měkkých tkání (Claes et al. 2010). Dalším způsobem reprezentace lebky je její vyjádření pomocí polygonálních modelů, jejichž nevýhodou je, že jimi lze reprezentovat jen povrch daného objektu (Turner et al. 2005). V případě, že je použita sDT reprezentace, měl by být povrch deformován pomocí lineární deformace. Užití nelineární deformace narušuje reprezentaci skutečných vzdáleností. Avšak pokud je daná deformace hladká a lokálně malá jsou vzdálenostní odchylky zanedbatelné (Vandermeulen et al. 2006).

4 ZÁVĚR

Forenzní obličejové rekonstrukce si kladou za cíl odhadnout vzhled obličeje na základě neznámé lebky za účelem pozitivní identifikace oběti. Nejedná se tedy o přímý důkaz, ale pouze o doprovodnou metodu vyšetřování. Rekonstruovaná podoba je prezentována veřejnosti a po jejím rozpoznání příbuznými či blízkými následuje konvenční DNA analýza.

Všechny rekonstrukční techniky jsou založené na předpokládaném vztahu mezi tvrdými a měkkými tkáněmi. Manuální metody sestávají z fyzického modelování obličeje na repliku lebky, tudíž vyžadují mnoho anatomických i uměleckých znalostí. Současně jsou manuální rekonstrukce velmi subjektivní a často velmi časově náročné. Na druhou stranu, počítačové metody jsou v podstatě jejich virtuální simulací. Základem každé 3D počítačové metody je kraniofaciální model, který kóduje a-priori znalosti o tvaru obličeje a jeho vazbě na lebku. Následně je tento model deformován na virtuální kopii lebky na základě její reprezentace – landmarky, crest-lines atd. Výsledný obličej je texturovaný a doplněný o obličejové komponenty.

Počítačové metody oplývají mnohými superlativy, ale ve skutečnosti jen u velmi malého počtu počítačových rekonstrukčních systémů byla provedena analýza přesnosti a reprodukovatelnosti, navíc žádný počítačový systém nedosáhl spolehlivějších výsledků než srovnatelné manuální metody. Často publikovanou výhodou počítačových systémů je rychlost. Zkušení odborníci tvrdí, že manuální rekonstrukce zabere několik dní. Nelze zpochybnit, že proces samotné rekonstrukce je u počítačových systémů rychlejší. Nesmí být ale zanedbána doba, po kterou je vytvářena databáze obličejů a lebek, případně jsou dotvářeny nejrůznější detaily, jako jsou účesy, textura a oblečení, které napomáhají lepší rekognici veřejností.

Pro budoucí rozvoj kraniofaciálních rekonstrukcí je důležité nashromáždit, co nejvíce kraniofaciálních dat z různých populací s ohledem na variabilitu ve věku, pohlaví, BMI a původu. Přirozeně vypadající rekonstrukce jsou odrazem kvality vzorků v referenční databázi. Ačkoliv obličejové rekonstrukce balancují mezi uměleckým světem a vědou, je těžiště stále více posouváno na stranu vědy, čímž se zvyšuje praktický význam kraniofaciálních rekonstrukcí v rámci vyšetřování trestné činnosti.

5 POUŽITÁ LITERATURA

- Aulsebrook, W.A. et al., 1995. Superimposition and reconstruction in forensic facial identification: a survey. *Forensic Science International*, 75, pp.101–120.
- Benateau, H. et al., 2016. Computer-assisted planning of distraction osteogenesis for lower face. *Journal of cranio-maxillo-facial surgery*, 44(10), 1583-1591.
- Berar, M. et al., 2005. Statistical skull models from 3D X-ray images. In: *2nd International Conference on Reconstruction of Soft Facial Parts*, 8, pp.1–13.
- Claes, P. et al., 2010. Computerized craniofacial reconstruction: Conceptual framework and review. *Forensic Science International*, 201(1–3), pp.138–145.
- Claes, P. et al., 2006. Craniofacial reconstruction using a combined statistical model of face shape and soft tissue depths : Methodology and validation. *Forensic Science International*, pp.147–158.
- Clement, J.G. & Marks, M.K., 2005. Computer-Graphic Facial Reconstruction. *Elsevier Academic Press*.
- Davis, R. et al., 1994. 3-D Reconstruction of an ancient Egyptian mummy using X-ray computer tomography. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 87, pp.806–808.
- Davy, S. et al., 2005. Forensic facial reconstruction using computer modeling software. In: Clement, J.G. & Marks, M.K., 2005. Computer-Graphic Facial Reconstruction. *Elsevier Academic Press*.
- Decker, S. et al., 2013. Who is this person? A comparison study of current three-dimensional facial approximation methods. *Forensic Science International*, 229(1–3), p. 161.e1–161.e8.
- Evenhouse, R. et al., 1992. Computer-aided forensic facial reconstruction. *The Journal of Biocommunication*, 19, pp.22–8.
- Farrar, F., 1977. From skull to visage: a forensic technique for facial reconstruction. *Police Chief*, 44, pp.78–80.
- Ghosh, A.K. & Sinha, P., 2005. An unusual case of cranial image recognition., 148, pp.93–100.
- Gordon, G.M. & Steyn, M., 2012. An investigation into the accuracy and reliability of skull-photo superimposition in a South African sample. *Forensic Science International*, 216(1–3), p.198.e1-198.e6.
- Gupta, S. et al., 2015. Forensic Facial Reconstruction: The Final Frontier. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 9(9), pp.26–28.
- Guyomarc’h, P. et al., 2012. Anatomical Placement of the Human Eyeball in the Orbit—Validation

- Using CT Scans of Living Adults and Prediction for Facial Approximation. *Journal of forensic sciences*, 57, pp.1271–1275.
- Guyomarc'h, P. & Stephan, C.N., 2012. The Validity of Ear Prediction Guidelines Used in Facial Approximation. *Journal of forensic sciences*, 57, pp.1427–1441.
- Haglund, W. & Reay, D., 1991. Use of Facial Approximation Techniques in Identification of Green River Murder Victims. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 12, pp.132–142.
- Hughes, S. et al., 2005. Virtual reconstruction and morphological analysis of the cranium of an ancient Egyptian mummy. *Australasian Physical & Engineering in Medicine*, 28, pp.122–127.
- Isabel, M. et al., 2015. Past, present, and future of craniofacial superimposition: Literature and international surveys. *Legal Medicine*, 17(4), pp.267–278.
- Jones, M., 2001. Facial reconstruction using volumetric data. In: *International Vision Modeling and Visualisation Conference*.
- Kähler, K. et al., 2003. Reanimating the Dead : Reconstruction of Expressive Faces from Skull Data. , pp.554–561.
- Klepáček, I. & Zedníková-Malá, P., 2012. “‘Bochdalek ’ s” skull: morphology report and reconstruction of face. *Forensic Science Medicine and Pathology*, 9, pp.1–9.
- Kust, A. et al., 2013. FACE-R — A 3D Database of 400 Living Individuals ’ Full Head CT- and Face Scans and Preliminary GMM Analysis for Craniofacial Reconstruction. *Journal of forensic sciences*, 58(6), pp.1420–1428.
- Landes, C.A. et al., 2006. Evaluation of Two 3D Virtual Computer Reconstructions for Normal Fetal Microanatomy. *Discoveries in Molecular, Cellular and Evolutionary Biology*, 262, pp.248–262.
- LoPresti, M. et al., 2017. Virtual surgical planning and 3D printing in repeat calvarial vault reconstruction for craniosynostosis: technical note. *Journal of Neurosurgery*, 19, pp.490–494.
- Macholán, M., 1999. Procrustes, deforma a nová morfometrie. *Vesmír*, pp.35–39.
- Manley, B. et al., 2002. The facial reconstruction of an Ancient Egyptian Queen. *Journal of Audiovisual Media in Medicine*, 25, pp.155–159.
- Marcus, L.F. et al., 1996. *Advances in Morphometrics, New York and London: Plenum Press*.
- Mitteroecker, P. & Gunz, P., 2009. *Advances in Geometric Morphometrics. Evolutionary Biology*, pp.235–247.

- Moss, J.P. et al., 1987. Three-dimensional visualization of the face and skull using computerized tomography and laser scanning techniques. *European Journal of Orthodontics*, 9, pp.247–253.
- Needham, C. et al., 2003. Reconstructing visual manifestations of disease from archaeological human remains. *The Journal of audiovisual media in medicine*, 26(3), pp.103–107.
- Nelson, L.A. & Michael, S.D., 1998. The application of volume deformation to three-dimensional facial reconstruction: A comparison with previous techniques. *Forensic Science International*, pp.167–181.
- Neustupa, J., 2006. Co je to geometrická morfometrika aneb morfologie znovu na scéně. *Živa*, pp.2–4.
- Nicklish, N., 2008. Forensic Human Identification. An introduction. *Homo-Journal of Comparative Human Biology*, p.346.
- Panenková, P. et al., 2012. Facial soft tissue thicknesses of the mid-face for Slovak population. *Forensic Science International*, 220, pp.1–6.
- Paysan, P. et al., 2009. Face Reconstruction from Skull Shapes and Physical Attributes. *Pattern recognition*, pp.232–241.
- Pei, Y. et al., 2008. The Craniofacial Reconstruction from the Local Structural Diversity of Skulls. *Comput. Graphic Forum*, 27(7), pp. 1711-1718.
- Perper, J.A. et al., 1988. Face Imaging Reconstructive Morphography. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 9(2), pp. 126-138.
- Polson, C.J. et al., 1985. The Essentials of Forensic Medicine. *Oxford: Pergamon Press*.
- Quatrehomme, G. et al., 1997. A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models. *Forensic Science International*, 42, pp.649–652.
- Quatrehomme, G. & Subsol, G., 2005. Automatic 3D facial reconstruction by feature-based registration of a reference head. In: Clement, J.G. & Marks, M.K., 2005. Computer-Graphic Facial Reconstruction. *Elsevier Academic Press*.
- Quatrehomme, G. & Balaguer, T., 2007. Assessment of the accuracy of three-dimensional manual craniofacial reconstruction: a series of 25 controlled cases. *International Journal of Legal Medicine*, 121, pp.469–475.
- Rohlf, F.J., 1990. Morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 21, pp.299–316.

- Rynn, C. & Wilkinson, C., 2006. Appraisal of Traditional and Recently Proposed Relationships Between the Hard and Soft Dimensions of the Nose in Profile. *American Journal of Physical Anthropology*, 130, pp.364–373.
- Shaham, D. et al., 2000. Post mortem CTscan: An alternative method in forensic medicine and trauma research. *The internet journal of rescue and disaster medicine 2*.
- Shahrom, A. et al., 1996. Techniques in facial identification: computer-aided facial reconstruction using a laser scanner and video superimposition. *International Journal of legal medicine*, 108, pp.194–200.
- Short, L.J. et al., 2014. Validation of a computer modelled forensic facial reconstruction technique using CT data from live subjects: A pilot study. *Forensic Science International*, 237, p.147.e1-147.e8.
- Slice, D.E., 2007. Geometric Morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, 36, pp.261–281.
- Stephan, C.N. et al., 2009. Further Evidence on the Anatomical Placement of the Human Eyeball for Facial Approximation and Craniofacial Superimposition. *Journal of forensic sciences*, 54, pp.267–269.
- Stephan, C.N. & Simpson, E.K., 2008. Facial Soft Tissue Depths in Craniofacial Identification (Part I): An Analytical Review of the Published Adult Data. *Journal of Forensic Sciences*, 53(6), pp. 1257-1272.
- Thirion, J.-P. & Gourdon, A., 1996. The 3D Marching Lines Algorithm. *Graphical Models and Image Processing*, 58(6), pp.503–509.
- Tilotta, F. et al., 2009. Construction and analysis of a head CT-scan database for craniofacial reconstruction. *Forensic Science International*, 191, pp.1–12.
- Tu, P. et al., 2007. Automatic Face Recognition from Skeletal Remains. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Turner, W.D. et al., 2005. A novel method of automated skull registration for forensic facial approximation. *Forensic Science International*, 154, pp.149–158.
- Tyrrell, A. et al., 1997. Forensic three-dimensional facial reconstruction: historical review and contemporary developments. *Forensic Science International*, 42, pp.653–661.
- Ubelaker, D. & O'Donnell, G., 1992. Computer-assisted facial reproduction. *Forensic Science International*, 37, pp.155–162.

- Ubelaker, D.H., 2015. Craniofacial Superimposition: Historical Review and Current Issues. *Journal of Forensic Sciences*, 60(6), pp.1412–1419.
- Ullrich, H. & Stephan, C.N., 2011. On Gerasimov's Plastic Facial Reconstruction Technique: New Insights to Facilitate Repeatability. *Journal of Forensic Sciences*, 56(2), pp.470–474.
- Vandermeulen, D. et al., 2006. Computerized craniofacial reconstruction using CT-derived implicit surface representations. *Forensic Science International*, pp.164–174.
- Vanezis, M. & Vanezis, P., 2000. Cranio-Facial Reconstruction in Forensic Identification — Historical Development and a Review of Current Practice. *Medicine, Science and the Law*, 40, pp.197–205.
- Vanezis, P. et al., 1989. Application of 3-D computer graphics for facial reconstruction and comparison with sculpting techniques. *Forensic Science International*, 42, pp.69–84.
- Vanezis, P. et al., 2000. Facial reconstruction using 3-D computer graphics. *Forensic Science International*, 108, pp.81–95.
- Verze, L., 2009. History of facial reconstruction. *Acta bio-medica*, 80(1), pp.5–12.
- Veselovskaya, E. et al., 2015. Study on the performance of different craniofacial superimposition approaches (I). *Forensic Science International*, 257, pp.496–503.
- Weber, F.L. & Bookstein, G.W., 2011. Virtual anthropology. A guide to a new interdisciplinary field., *SpringerWienNewYork*.
- Wilde, F. et al., 2014. Computer-Assisted Mandibular Reconstruction using a Patient-Specific Reconstruction Plate Fabricated with Computer-Aided Design and Manufacturing Techniques. *Craniofacial Trauma and Reconstruction*, pp.158–166.
- Wilkinson, C., 2005. Computerized Forensic Facial Reconstruction A Review of Current Systems. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, pp.173–177.
- Wilkinson, C., 2010. Facial reconstruction - anatomical art or artistic anatomy?. *Journal of Anatomy*, 216, pp.235–250.
- Wilkinson, C., 2004. Forensic Facial Reconstruction. *Cambridge: Cambridge University Press*.
- Wittwer-Backofen, U., 2011. Facial reconstructions by a combined 2D/3D method – different techniques meet requirements in the identification process. *Bulletin der Schweizerischen Gesellschaft für Anthropologie*, 17, pp.77–85.

Internetové zdroje:

<http://murderpedia.org/male.R/r/ruxton-buck-photos.htm>