Šplíchalová, Ivana; Jandová, Marie; Urbanová, Petra

Validace metod virtuální restaurace a rekonstrukce v kosterní antropologii

Studia archaeologica Brunensia. 2016, vol. 21, iss. 2, pp. 139-162

ISSN 1805-918X (print); ISSN 2336-4505 (online)

Stable URL (DOI): https://doi.org/10.5817/SAB2016-2-8
Stable URL (handle): https://hdl.handle.net/11222.digilib/136423
Access Date: 17. 02. 2024
Version: 20220831

Terms of use: Digital Library of the Faculty of Arts, Masaryk University provides access to digitized documents strictly for personal use, unless otherwise specified.

MUNI ARTS Masarykova univerzita Filozofická fakulta

Digital Library of the Faculty of Arts,
Masaryk University
digilib.phil.muni.cz

Studia Archaeologica Brunensia 21 / 2016 / **2**
DOI: 10.5817/SAB2016-2-8

Validace metod virtuální restaurace a rekonstrukce v kosterní antropologii

Validating virtual restoration and reconstruction procedures in physical anthropology

Ivana Šplíchalová / Marie Jandová / Petra Urbanová

Abstrakt

Antropologická analýza lidských kosterních nálezů je podmíněná jejích celistvostí a úplností. Často je kosterní nález předáván k antropologickému zpracování ve fragmentárním, nekompletním anebo deformovaném stavu a před zhodnocením je třeba jej zrestaurovat či zrekonstruovat. Moderní počítačové metody umožňují neúplné kosterní nálezy virtuálně restaurovat a rekonstruovat a výsledný virtuální model podrobit odbornému zkoumání s počítačovou podporou. V této studii byly kvantifikovány rozdíly, které do antropologického zpracování vnáší restaurační a rekonstrukční postupy. Digitální 3D modely lidských lebek upravené virtuálními postupy byly srovnány mezi dvěma odborníky i v rámci každého z nich. Získané výsledky naznačují, že se zvyšující se náročností virtuální restaurace se zvyšují i rozdíly mezi modely, které vytvořili odlišní hodnotitelé. Na výsledky virtuálních postupů má současně negativní vliv velikost lomných ploch úlomků, které jsou k sobě během restaurace přikládány.

Klíčová slova

fragmentární kosterní nálezy, Vídeňská ulice, virtuální rekonstrukce, virtuální restaurace

Abstract

Anthropological examination of skeletal remains requires complete bones without compromised integrity. Yet, human skeletal remains are frequently uncovered fragmented, incomplete and/or distorted. In order to utilize standard methods the employment of a restoration or reconstruction technique becomes the first step. Recently, advances made in digital technologies gave origin to virtual restoration and reconstruction approaches. In the present paper, reliability of virtual restoration and reconstruction procedures was tested in order to quantify intra- and inter-operator error. The acquired results showed that for restored models the inter-operator differences increased with the complexity of the virtual restoration procedure. Furthermore, the results were shown to be affected by the size of the complementary contact walls used to virtually re-assemble the fragmented bones.

Keywords

Fragmented skeletal remains, Vídeňská Street, virtual reconstruction, virtual restoration

Studie vznikla s finanční podporou projektů „Optimalizace metod pro bezkontaktní hodnocení tělesných znaků člověka" (MUNI/A/1281/2014) a „Rozvoj analytických nástrojů pro studium tělesných znaků člověka se zaměřením na analýzu dynamiky pohybu" (MUNI/A/1379/2015).

1. Úvod

Recentní i historické lidské kosterní nálezy se často nacházejí fragmentární, neúplné nebo deformované vlivem posmrtného působení exogenních i endogenních faktorů. Tyto druhy poškození kostí jsou pozorovány současně nebo v různých kombinacích (*Jurda et al. 2013*). Sestavení kostních zlomků (tzv. restaurace) nebo doplnění chybějících částí (tzv. rekonstrukce) jsou proto nezbytné předpoklady antropologického zpracování kosterních nálezů (*Gunz et al. 2009*). V běžné praxi jsou kosterní fragmenty restaurovány pomocí dostupných lepidel či nataveného vosku (*White et al. 2000; White et al. 2012, 336–337)*, chybějící části jsou domodelovávány prostřednictvím plastelíny, sádry nebo silikonu (*Ascenzi et al. 2000; Curnoe – Tobias 2006*). Tyto tradiční restaurační a rekonstrukční postupy jsou však metody invazivní a nevratné, což může mít za následek znehodnocení nálezu, revizi restauračního postupu i jeho samotnou interpretaci. Jiné rozsáhlejší úpravy, například náprava posmrtně vzniklé deformace kosti, nejsou ve fyzickém světě uskutečnitelné (*White et al. 2012, 337).*

Pokročilé záznamové a zobrazovací techniky, jako je například 3D laserové skenování nebo výpočetní tomografie v doprovodu specializovaných programů umožňují kosterní nálezy restaurovat či rekonstruovat v prostředí počítače bez přímého fyzického kontaktu a bez rizika poškození (*Benazzi et al. 2011; Fantini et al. 2008; Zhou et al. 2009a*). Oblast antropologie pracující s digitálními kopiemi reálných kostí se označuje jako virtuální antropologie (*Weber – Bookstein 2011, 2*). Ve virtuální antropologii je manipulace s kosterními nálezy omezena pouze na dobu, která je potřebná pro převod objektu do digitální podoby, tzv. digitalizace. Získaný virtuální model kosti je nejčastěji tvořen sítí propojených trojúhelníků, tzv. polygonů. S polygonálním modelem lze ve virtuálním prostředí pracovat nad limity fyzického světa, například měnit jeho polohu, velikost anebo tvar. Volné otáčení a posun virtuálních modelů kosterních fragmentů v počítači je předpokladem pro virtuální restauraci. Vytváření a úprava nových virtuálních modelů doplňující nekompletní kosterní nález je podstatou virtuální rekonstrukce.

Virtuální restaurace je metoda, během níž jsou k sobě modely digitálních úlomků kostí navzájem přesouvány a otáčeny v digitálním prostředí tak, aby vytvořily jeden model kosti. Umístění modelu úlomku je definováno morfologickými a strukturními vlastnostmi zachycenými na digitálním modelu, jako jsou tloušťka či reliéf úlomku s otisky cév, nervů či mozkových závitů. Využít lze i charakteristiky poškození kosti. Například tvar a průběh lomových hran fragmentů je často prvním vodítkem restauračního postupu (*White et al. 2012, 337; Weber – Bookstein 2011, 268*).

Virtuální restaurace kostí může být prováděna rozmanitými počítačovými nástroji, a to v rozsahu od výhradně manuálních postupů až po zapojení plně automatizovaných algoritmů. V manuálních postupech jsou k sobě digitální modely skládány odborníkem prostřednictvím editačních nástrojů, které umožňují změnit polohu nebo otočení modelu (*Jandová et al. 2015; Mafart et al. 2007*). V automatických postupech jsou modely kompletovány prostřednictvím výpočetních algoritmů spojující jednotlivé modely fragmentů například automatickou registrací na základě povrchů modelů (*Zhou et al. 2009b*; *Wei et al. 2012*).

Virtuální náprava deformovaného kosterního materiálu (v anglické literatuře označována obecně jako „virtuální rekonstrukce“, v této studii také dále jako virtuální rekonstrukce napravující deformaci) napravuje posmrtně vzniklou deformaci kosti a může být podobně jako virtuální skládání kostních fragmentů uskutečněna metodami manuálními, automa-

tickými i technikami kombinující oba postupy. Manuální metody pracují na obdobném principu jako polygonální modelování. Deformovaná část modelu je napravena ručně digitálními nástroji, které umožňují měnit tvar virtuálního objektu (*Arbour – Currie 2012; Ponce de León 2002*). Metody automatické virtuální rekonstrukce můžou být uskutečněny více způsoby v závislosti na použitém algoritmu a typu rekonstrukční předlohy. Rekonstrukční předlohu představuje kompletní model kosti, podle kterého je konkrétní kost upravována. Takový model má rekonstruované kosti odpovídat v parametrech tvaru, pohlaví, věku i v populační afinitě. Rekonstrukční předlohu představuje buď jeden model nebo průměr z více modelů splňující výběrová kritéria.

Na základě rekonstrukčních předloh se automatické postupy rozdělují na metody operující bez předlohy, s jednou předlohu nebo s více předlohami. Postup bez rekonstrukční předlohy se nazývá technika zrcadlení (*Grine et al. 2010*; *Gunz et al. 2009; Ogihara et al. 2006*). Deformace je napravena přenesením zrcadlených částí z jedné strany těla na druhou přes rovinu dělící tělo na levou a pravou polovinu, tzv. mediánní rovinu. Náprava deformace využívající pouze jednu rekonstrukční předlohu, podle které je tvar modelu deformované kosti přizpůsoben tvaru předlohy, se označuje jako zpětná virtuální geometrická rekonstrukce. Třetí postup, statistická rekonstrukce, je metoda, kterou je rekonstruovaná kost zpětně deformována na základě průměru referenčních předloh (*Gunz et al. 2004; Gunz 2005*).

V případě, že ke vzniku deformace tvaru došlo před poškozením kosti a lomné hrany úlomků kosti si vzájemně odpovídají, je náprava deformace prováděna až po jejich sestavení. Naopak v situaci, kdy ke vzniku deformace došlo až druhotně, díky čemuž jednotlivé fragmenty kosti k sobě nelze přiložit, je prováděna náprava deformace před jejich sestavením. Rekonstrukce chybějících částí je v případě fragmentárního anebo posmrtně deformovaného nálezu prováděna až po restauračním anebo deformaci napravujícím postupu, kdy je kost již sestavena a případná změna tvaru je odstraněna.

Pro rekonstrukci chybějících částí jsou používány metody pracující se stejným počtem rekonstrukčních předloh, ale lišící se v použitém algoritmu. Zatímco během nápravy deformace jsou přizpůsobeny rekonstruované kosti rekonstrukční předloze, v postupech doplňující části jsou chybějící části doplněny z rekonstrukčních předloh (*Benazzi et al. 2009a*; *Benazzi et al. 2009b; Fantini et al. 2008; Gunz et al. 2011; Neubauer et al. 2004; Neubauer et al. 2012*).

2. Cíl

Cílem této studie bylo určit míru spolehlivosti virtuálních restauračních a rekonstrukčních postupů srovnáním výsledků u dvou hodnotitelů. Studie metodicky navazuje na předchozí výzkum autorů, který optimalizoval virtuální restaurační postupy a hodnotil jejich vliv a určení pohlaví na kostře člověka (*Jandová et al. 2015*).

3. Materiál

Studovaný materiál se skládal z kosterních nálezů pocházejících z lokality ve Vídeňské ulici v Brně datované do druhé poloviny 11. století n.l. Během tří etap záchranného archeologického výzkumu probíhajících v letech 2009, 2012 a 2013 bylo pod záštitou společnosti Archaia Brno o.p.s. odkryto přes 432 hrobů (*Sedláčková 2013*).

Ze souboru bylo na základě stupně zachování vybráno 20 dospělých lidských lebek. Žádná lebka se nedochovala kompletně a počet fragmentů se pohyboval mezi 2 a 8 úlomky. Celkově bylo do analýzy zahrnuto 87 lebečních úlomků.

4. Metody

4.1. Digitalizace a tvorba modelů

Všechny lebeční úlomky byly digitalizovány 3D laserovým skenerem Next Engine. Proces digitalizace včetně nastavení snímání a konečných úprav vytvořených modelů (odstranění nadbytečných bodů, vyplnění děr, redukce velikosti) se shodují s optimalizovanými postupy pro převod kosterních fragmentů do digitální podoby navržené ve studii Jandová et al. *(2015)*. Postup byl doplněn o opravu chybových oblastí modelů, která byla nezbytná pro následné srovnání modelů a která byla zde provedena v programu GOM Inspect v.8 (www.gom.com).

4.2. Virtuální restaurace

K restauraci digitálních úlomků byla použita technika virtuální anatomické restaurace. Chybějící plochy k připojení sousedních fragmentů u některých modelů zapříčinily, že bylo do restaurace zahrnuto pouze 71 modelů, tj. necelých 82 %. Vyřazeno bylo 16 modelů, tj. přibližně 18 %. Tyto modely byly také vyloučeny z navazujících analýz. Soubor 20 lebek byl digitálně zrestaurován dvěma hodnotiteli, hodnotitelem A a B, dvakrát se shodným časovým odstupem přibližně 5 měsíců. Tímto postupem vznikly 4 různé sady zrestaurovaných lebek (A_1, A_2, B_1, B_2). Virtuální restaurace byla provedena pomocí vizualizačních a editačních nástrojů v programu Amira v.5.3.2 (www.amira.com).

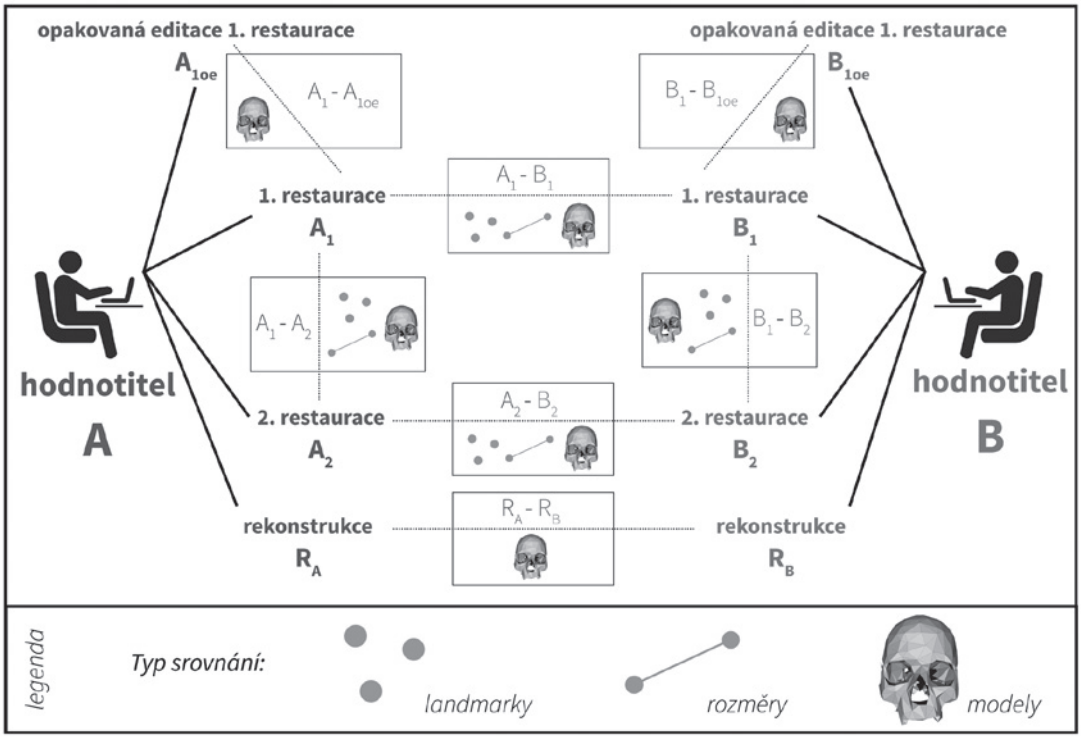
4.3. Virtuální náprava deformace a rekonstrukce chybějících částí

Soubor virtuálně restaurovaných modelů byl zpracován ve dvou fázích. V první fázi byla napravena posmrtně vzniklá deformace a v druhé fázi byly doplněny chybějící části. Oba hodnotitelé pracovali pouze se sadou modelů A_1 (restaurované lebky prvního hodnotitele; obr. 1; tab. 1) z důvodu vyloučení vlivu restauračního postupu v následném srovnání zrekonstruovaných modelů.

Před rekonstrukcí napravující deformaci byla poloha zrestaurovaných lebek standardizována v kartézském systému souřadnic tak, aby antropometrický bod bregma ležel v počátku systému souřadnic. Standardizace polohy byla provedena z důvodu nastavení shodné pozice lebek v prostoru, která usnadňovala následující rekonstrukční kroky i závěrečné srovnání výsledků. Modely byly otočeny a posunuty tak, aby osa X procházející středem modelu předozadním směrem představovala rovinu mediánní (též rovina zrcadlení) a tvořila vodítko pro obě fáze rekonstrukce. Standardizace modelů byla provedena v programu MeshLab v.1.32.

Protože tvarové změny způsobené posmrtným působením tafonomických faktorů byly patrné na první pohled, bylo přikročeno k jejich nápravě. Z celkem 20 modelů lebek vykazovalo 9 z nich posmrtné změny, a to v rozsahu od prasknutí až po vychýlení do strany. Tato poškození byla následně znázorněná proložením již standardizovaného modelu lebky mediánní rovinou (obr. 2).

Náprava deformace byla provedena pomocí sady 50 párů bodů bilaterálních podle mediánní roviny. Body byly rozmístěny na povrch manuálně v programu Landmark (obr. 3; graphics.idav.ucdavis.edu). Ze získaných souřadnic digitalizovaných bodů byla vypočtena průměrná konfigurace rozmístěných bodů. Průměr pravé a levé strany byl použit jako šablona, podle které byl tvar deformovaného modelu napraven. Tento postup byl použit na všechny modely kromě modelů H6867 a H3806 (obr. 2), u kterých byl rekonstrukční postup proveden až po té, co byly odstraněny pravé spánkové kosti. Důvodem byla u těchto modelů absence levých spán-



Obr. 1. Schéma typu srovnání restauračních a rekonstrukčních výsledků.

Fig. 1. Comparison scheme of restoration and reconstruction results.

kových kostí, bez kterých by náprava deformace neměla na pravé spánkové kosti účinek.

Doplnění chybějících částí bylo provedeno v programu GOM Inspect v.8 obrácením chybějící části kosti z jedné strany na druhou přes mediánní rovinu. Závěrečná editace, spojení modelů a jeho částí, popřípadě odstranění nadbytečných částí, byly provedeny opět v programu GOM Inspect.

Výsledkem virtuální rekonstrukce byly dvě sady 9 lebek, jedna sada hodnotitele A (R_A) a druhá hodnotitele B (R_B).

4.4. Určení pohlaví

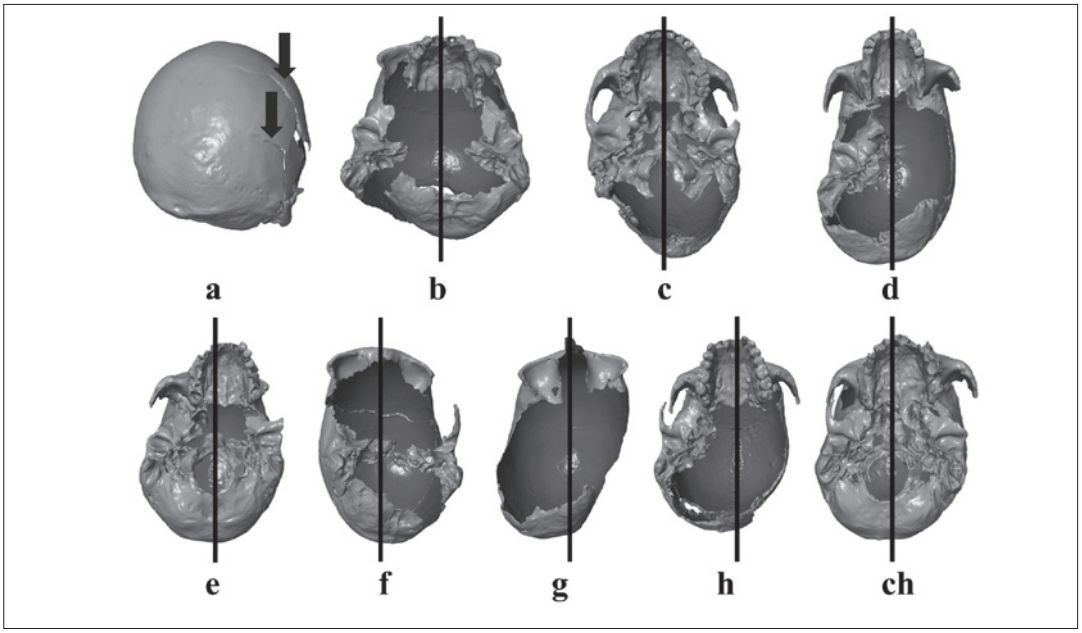
Pohlaví bylo určeno na virtuálních modelech fragmentů i na zrestaurovaných lebkách morfoskopicky podle metody Walrath et al. *(2004)*. Celistvost zrestaurovaných lebek umožnila zhodnocení pohlaví i metodou metrickou, jejíž použitelnost je u nekompletních lebek problematická (*Jantz – Ousley 2005*). Na zrestaurované modely lebek bylo během morfoskopického zhodnocení umožněno nahlížet v širším kontextu celé lebky. Zejména tomu tak bylo v situaci, kdy hodnocená oblast kosti sestávala z více fragmentů. Pohlaví bylo určeno prvním hodnotitelem pomocí morfoskopické metody a druhým hodnotitelem metricky. Na základě získaného zhodnocení pohlaví bylo zjištěno, že soubor obsahoval 4 ženské a 16 mužských lebek.

Určení pohlaví na digitálních fragmentech a na virtuálně zrestaurovaných lebkách se z 20 případů dvakrát lišilo. Váhou metrického

Typ srovnání	Slovní popis typu srovnání modelů	Hodnocení na základě landmarků	Hodnocení na základě lineárních rozměrů	Hodnocení na základě porovnání sítí
A_1–A_2	první a druhá restaurace hodnotitele 1	20 lebek	20 lebek	5 lebek
B_1–B_2	první a druhá restaurace hodnotitele 2	20 lebek	20 lebek	5 lebek
A_1–B_1	první restaurace obou hodnotitelů	20 lebek	20 lebek	20 lebek
A_2–B_2	druhé restaurace obou hodnotitelů	20 lebek	20 lebek	5 lebek
A_1–A_{1oe}	první a opakovaná první editace první restaurace hodnotitele 1	-	-	5 lebek
B_1–B_{1oe}	první a opakovaná první editace první restaurace hodnotitele 2	-	-	5 lebek
R_A–R_B	rekonstrukce obou hodnotitelů	-	-	9 lebek

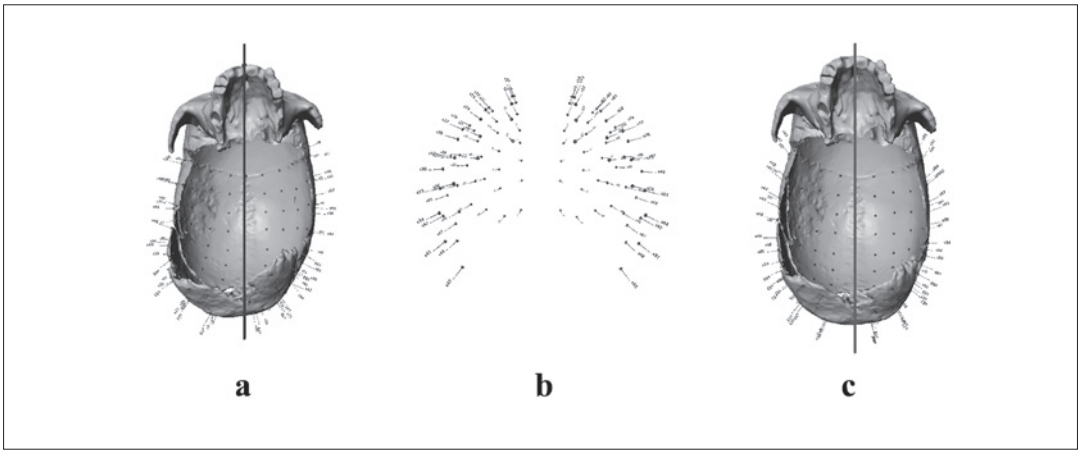
Tab. 1. Popis a označení typu srovnání modelů s vyznačením počtu lebek zahrnutých do příslušného způsobu hodnocení.

Tab. 1. The description and terminology of used methods of comparison with a number of skulls included to comparison.



Obr. 2. Restaurované lebky proložené mediánní rovinou. Napraskнutí a vybočení kosti: a – prasklá vybočená pravá kost temenní (H826). Deformace neurokraniální část lebky: b – oboustranná deformace neurokraniální části (H831); c – vychýlení neurokraniální části doleva (H3811); d – vychýlení neurokraniální části doprava (H6867). Deformace faciální část lebky: e – vychýlení faciální části doprava (H6833). Komplexní deformace lebky: f – komplexní vychýlení lebky doleva (H4848); g, h, ch – komplexní vychýlení lebky doprava (g – H4113; h – H3806; ch – H3838).

Fig. 2. Postmortem damaged skulls. Bone cracks and deflection: a – cracked and deflected right parietal bone (H826). Distortion of neurocranium: b – distortion of neurocranium that spreads laterally (H831); c – deflection to the left side (H3811); d – deflection to the right side (H6867). Facial distortion: e – to the right side (6833). Distortion of whole skull: f – distortion to the left side (H4848); g, h, ch – distortion to the right side (g – H4113; h – H3806; ch – H3838).



Obr. 3. Schéma postupu nápravy deformace. A – deformovaný model lebky proložený mediánní rovinou s 50 páry digitalizovaných bodů; B – stranový průměr získaných bodů aplikovaný na deformovaný model lebky; C – zrekonstruovaný model.

Fig. 3. Reconstruction of postmortem distortion. A – distorted model with 50 pairs of digitized landmarks; B – mean of landmarks; C – model reconstruction.

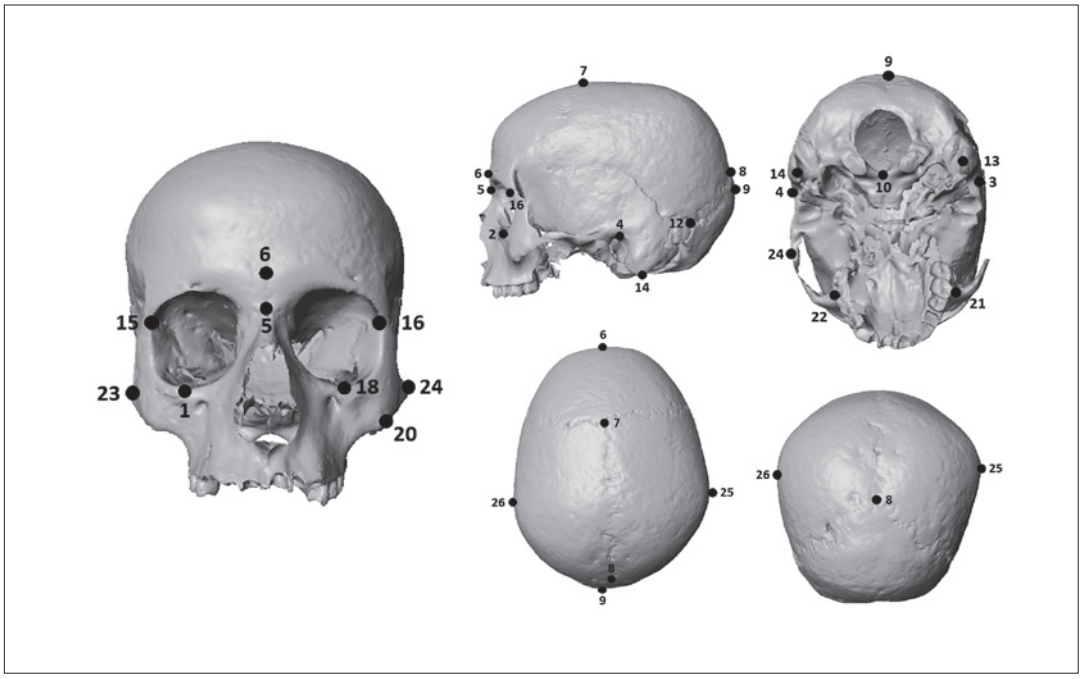
zhodnocení se změnilo indiferentní hodnocení na jedno mužské a na jedno ženské.

4.5. Chyba restaurace a rekonstrukce

Získané modely lebek obou hodnotitelů byly porovnávány třemi způsoby, a to 1) na základě konfigurace trojrozměrných souřadnic antropometrických bodů, 2) na základě lineárních vzdáleností vypočtených z 3D souřadnic a 3) na základě trojrozměrných sítí modelů. Srovnání bylo provedeno mezi oběma hodnotiteli navzájem i v rámci každého z nich (obr. 1; tab. 1). Na základě porovnání byla zjištěna chyba hodnotitele (A_1–A_2; B_1–B_2) a chyba mezi hodnotiteli ukazující míru shody mezi modely získaných restauračním (A_1–B_1; A_2–B_2) nebo rekonstrukčním postupem (R_A–R_B). Rovněž byl zjišťován vliv editace modelů na rozdíly mezi hodnotiteli (A_1–A_{1oe} a B_1–B_{1oe}), viz. bod 3 této kapitoly. Rozdíly mezi hodnotiteli, na než měl vliv časový odstup restaurace (A_1–B_2 a A_2–B_1), nebyly testovány, jelikož časové rozestupy mezi restauracemi nebyly standardizovány a hodnotitelé měli odlišné zkušenosti s virtuálními postupy.

1) Pro srovnání modelů získaných restaurací na základě prostorového uspořádání antropometrických bodů byla nejprve získána morfometrická data popisující velikost a tvar objektu pomocí 26 bodů umístěných na povrch modelu v programu Landmark. Tímto způsobem byly popsány všechny 4 sady restaurovaných lebek. Výběr a definice bodů (obr. 4) i postup jejich umístění na modelech se shodují se studií Jandová et al. *(2015)*. Pro analýzu byly vybrány body, které se standardně užívají pro popis morfologie lebky a které v předchozí studii autorů nevykazovaly statisticky významné rozdíly digitalizace mezi hodnotiteli. S ohledem na špatnou zachovalost lebek nebylo možné u všech modelů nadigitalizovat všechny antropometrické body, k čemuž bylo přihlédnuto v dalších analýzách.

Získané konfigurace antropometrických bodů byly standardizovány pomocí obecné prokrústovské analýzy (*Generalized Procrustes*

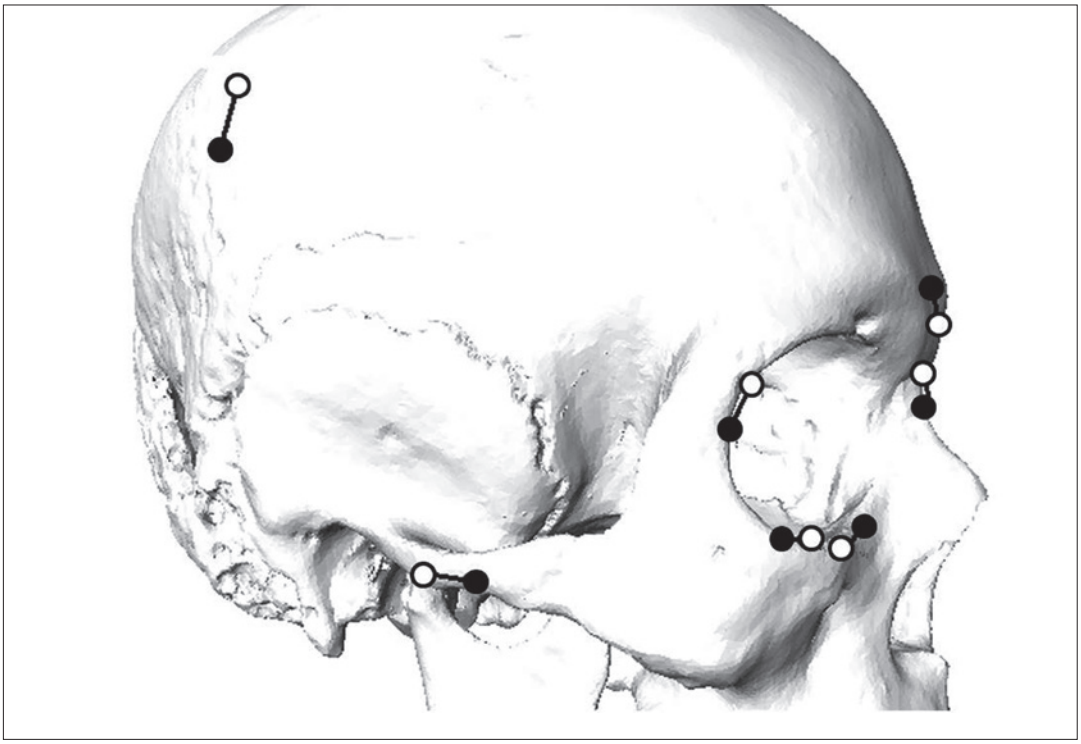


Obr. 4. Digitalizované antropometrické body: 1, 2 – ***orbitale (dx. et sin.)***; 3, 4 – ***porion (dx. et sin.)***; 5 – ***nasion***; 6 – ***glabella***; 7 – ***bregma***; 8 – ***lambda***; 9 – ***opistocranion***; 10 – ***basion***; 11, 12 – ***asterion (dx. et sin.)***; 13, 14 – ***mastoideale (dx. et sin.)***; 15, 16 – ***frontomalare orbitale (dx. et sin.)***; 17, 18 – ***zygoorbitale (dx. et sin.)***; 19, 20 – ***zygomaxillare (dx. et sin.)***; 21, 22 – ***ektomolare (dx. et sin.)***; 23, 24 – ***zygion (dx. et sin.)***; 25, 26 – ***euryon (dx. et sin)***.

Fig. 4. Digitalized landmarks: 1, 2 – ***orbitale (dx. et sin.)***; 3, 4 – ***porion (dx. et sin.)***; 5 – ***nasion***; 6 – ***glabella***; 7 – ***bregma***; 8 – ***lambda***; 9 – ***opistocranion***; 10 – ***basion***; 11, 12 – ***asterion (dx. et sin.)***; 13, 14 – ***mastoideale (dx. et sin.)***; 15, 16 – ***frontomalare orbitale (dx. et sin.)***; 17, 18 – ***zygoorbitale (dx. et sin.)***; 19, 20 – ***zygomaxillare (dx. et sin.)***; 21, 22 – ***ektomolare (dx. et sin.)***; 23, 24 – ***zygion (dx. et sin.)***; 25, 26 – ***euryon (dx. et sin)***.

Analysis, GPA) v programu NTSYS-pc v.2.2 (http://www.exetersoftware.com/cat/ntsyspc/ntsyspc.html). GPA (*Rohlf 2005*) je registrační technika patřící do metod geometrické morfometrie. Je založena na postupu, který minimalizuje rozdíly mezi objekty. Tyto rozdíly jsou vyjádřeny sumou čtverců vzdáleností mezi relevantními body. V tradiční GPA dochází ke změně velikosti, posunutí a rotaci sledovaných objektů definovaných pomocí konfigurací význačných bodů (*Slice 2005; Zelditch et al. 2004*). V naší studii byla velikost modelů zachována. Do výsledků se promítly rozdíly mezi modely jak ve tvaru, tak i ve velikosti. Standardizace byla provedena samostatně pro každý pár porovnávaných modelů podle sledovaného typu srovnání popsaného v tab. 1 (obr. 1). Následně byly pro tyto páry modelů vypočteny vzdálenosti mezi korespondujícími body standardizovaných konfigurací bodů, tedy velikosti prokrústovských vektorů (obr. 5).

2) Na základě původních x, y, z hodnot souřadnic digitalizovaných bodů bylo vypočteno 10 lineárních vzdáleností, které odpovídají standardním rozměrům lebky (obr. 6). U zjištěných rozměrů byla vypočtena relativní chyba rozměrů (RCM) v procentech pro danou lebku podle vzorce:



Obr. 5. Znázornění výpočtu velikosti prokrustovských vektorů, tj. vzdálenosti mezi korespondujícími body dvou porovnávaných konfigurací bodů po zarovnání. Černá linie mezi body značí velikost vektoru.

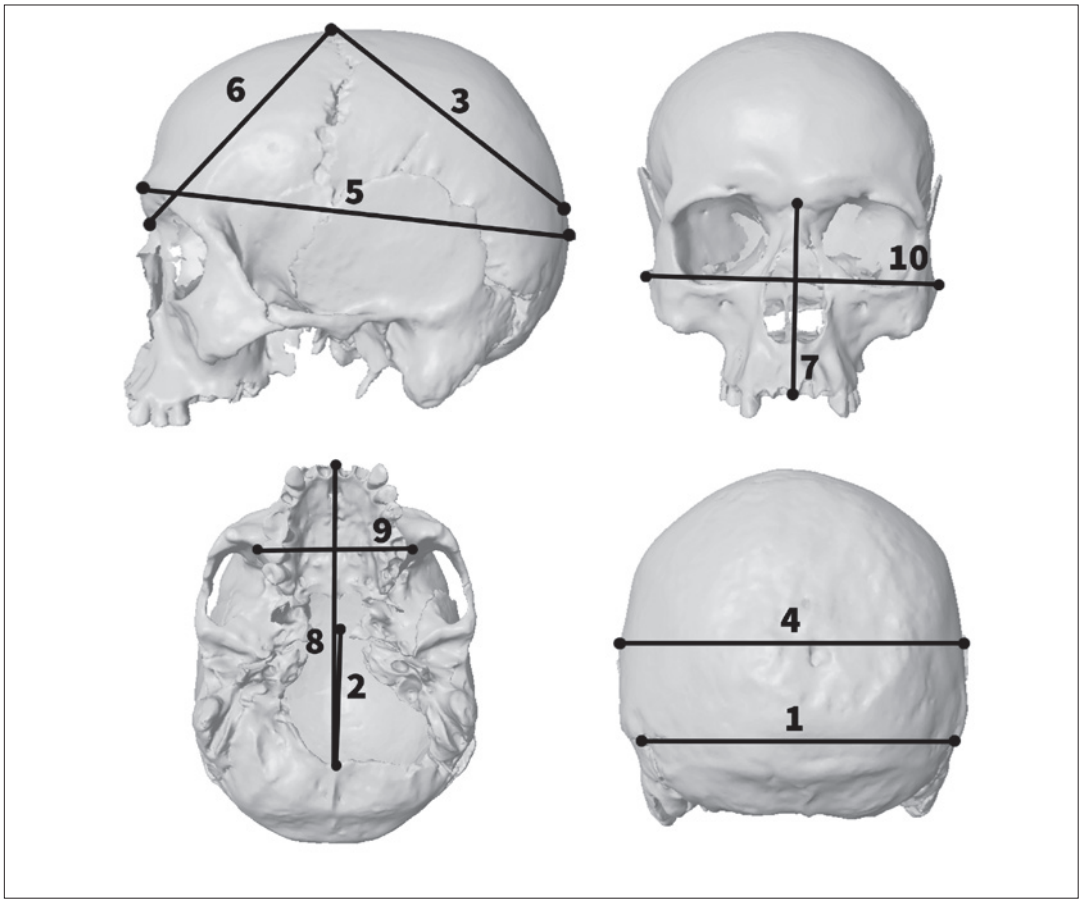
Fig. 5. Illustration of Procrustes vectors, i.e., distances between corresponding landmarks by utilizing standardized sets of landmarks. Black lines indicate the size of vector.

$$RCM\ (y_i) = \left| \frac{\{Me\ (Y) - y_i\} * 100}{y_i} \right|$$

kde y_i je rozměr, pro nějž je počítána relativní chyba, Me je medián vypočtený z hodnot rozměru ve všech 4 sadách restaurovaných lebek (Y).

3) Srovnávání trojrozměrných polygonových sítí modelů bylo provedeno v programu FIDENTIS Analytik v.1.3 (*Chalás et al. 2014*). Vzhledem k tomu, že při digitalizaci úlomků je naskenován jejich celý povrch, jsou jejich sítě uzavřené. Při restauraci lebky dochází k částečnému nebo úplnému překryvu částí sítí. Tyto překryvy mohou negativně ovlivnit srovnání, protože je jimi ovlivněno zarovnání modelů, které předchází samotnému srovnání. Pro potřeby porovnání byly modely upraveny v programu GOM Inspect v.8 oběma hodnotiteli tak, aby tvořily síť, která odpovídá pouze vnějšímu povrchu lebky. Takto bylo upraveno všech 20 modelů z první restaurace (A_1 a B_1) a modely 5 lebek získaných druhou restaurací (A_2 a B_2). U těchto 5 lebek byla úprava provedena opakovaně na modelech získaných první restaurací (A_{1oe} a B_{1oe}; tab. 1).

Dvojice modelů byly následně porovnány (obr. 1; tab. 1). Nejprve byly registrovány pomocí ICP (*Iterative Closest Point*) algoritmu. ICP (*Besl – McKay 1992*) minimalizuje vzdálenosti mezi vrcholy polygonových sítí modelů. Zarovnání probíhá v několika opakování (iterací), které postupně snižují rozdíly mezi vrcholy sítí. V našem případě byl maximální počet iterací



Obr. 6. Lineární vzdálenosti vypočítané ze 3D souřadnic bodů: 1 – ***asterion-asterion*** (největší šířka týlu)*;* 2 – ***basion-bregma*** (výška lebky); 3 – ***bregma-lambda*** (mediánní parietální tětiva)*;* 4 – ***euryon-euryon*** (největší šířka mozkovny); 5 – ***glabella-opistocranion*** (největší délka mozkovny); 6 – ***nasion-bregma*** (mediánní tětiva čela); 7 – ***nasion-prosthion*** (výška horního obličeje); 8 – ***basion-prosthion*** (délka obličeje); 9 – ***ektomolare-ektomolare*** (největší šířka patra); 10 – ***zygion-zygion*** (šířka obličeje).

Fig. 6. Linear measurements computed from 3D Cartesian coordinates: 1 – ***asterion-asterion*** (biasterionic breadth)*;* 2 – ***basion-bregma*** (basion-bregma height); 3 – ***bregma-lambda*** (parietal chord)*;* 4 – ***euryon-euryon*** (maximum cranial breadth); 5 – ***glabella-opistocranion*** (maximum cranial length); 6 – ***nasion-bregma*** (frontal chord); 7 – ***nasion-prosthion*** (upper facial height); 8 – ***basion-prosthion*** (basion-prosthion length); 9 – ***ektomolare-ektomolare*** (maximal alveolar breadth); 10 – ***zygion-zygion*** (bizygomatic breadth).

nastaven na 15. Pro účely zarovnání byla dále nastavena míra chyby na hodnotu 0,05. Míra chyby určuje hraniční hodnotu definovanou jako rozdíl mezi průměrnou změnou polohy bodu v předcházející a v současné iteraci. Pokud je rozdíl nižší než nastavená hodnota, výpočet se zastaví. U zarovnaných modelů byl na základě vzdáleností mezi nejbližšími vrcholy (*point-to-point closest distance*) obou modelů vypočten kvadratický průměr (RMS, *root mean square*) a další statistické parametry popisující odlišnosti mezi modely, jako je aritmetický průměr, geometrický průměr, minimální hodnoty, maximální hodnoty a 75. percentil hodnot.

Všechny hodnoty byly následně současně využity pro testování rozdílů pomocí testu ANOVA opakovaných měření.

Lokální rozdíly mezi srovnávanými lebkami byly znázorněny pomocí barevné mapy, kde barevné spektrum od modré (minimální hodnoty) po červenou (maximální hodnoty) odpovídá hodnotám vzdáleností mezi vrcholy (*point-to-point closest distance*) a zastoupení těchto hodnot je znázorněno pomocí histogramu.

4.6. Kategoriální data

Zrestaurované lebky obou hodnotitelů byly přiřazeny do jedné ze tří kategorií podle počtu použitých nadigitalizovaných fragmentů. Mezi sestavené modely s nízkou mírou restaurace byly řazeny modely složené ze 2 digitálních zlomků N=7 (35%), do kategorie střední míry restaurace spadaly modely složené ze 3–4 digitálních zlomků N=6 (30%) a vysoká míra restaurace byla přiřazena modelům skládajícím se z 5 a více úlomků N=7 (35%).

4.7. Statistické zpracování

Hodnoty velikosti vektoru, relativní chyby rozměrů a hodnoty kvadratického průměru (RMS) byly charakterizovány pomocí deskriptivní statistiky, tedy pomocí průměru, mediánu, směrodatné odchylky a minimálních a maximálních hodnot. Ukazatelé popisné statistiky byly rovněž vypočteny pro hodnoty RMS získané na základě srovnání rekonstrukcí hodnotitelů (R_A–R_B).

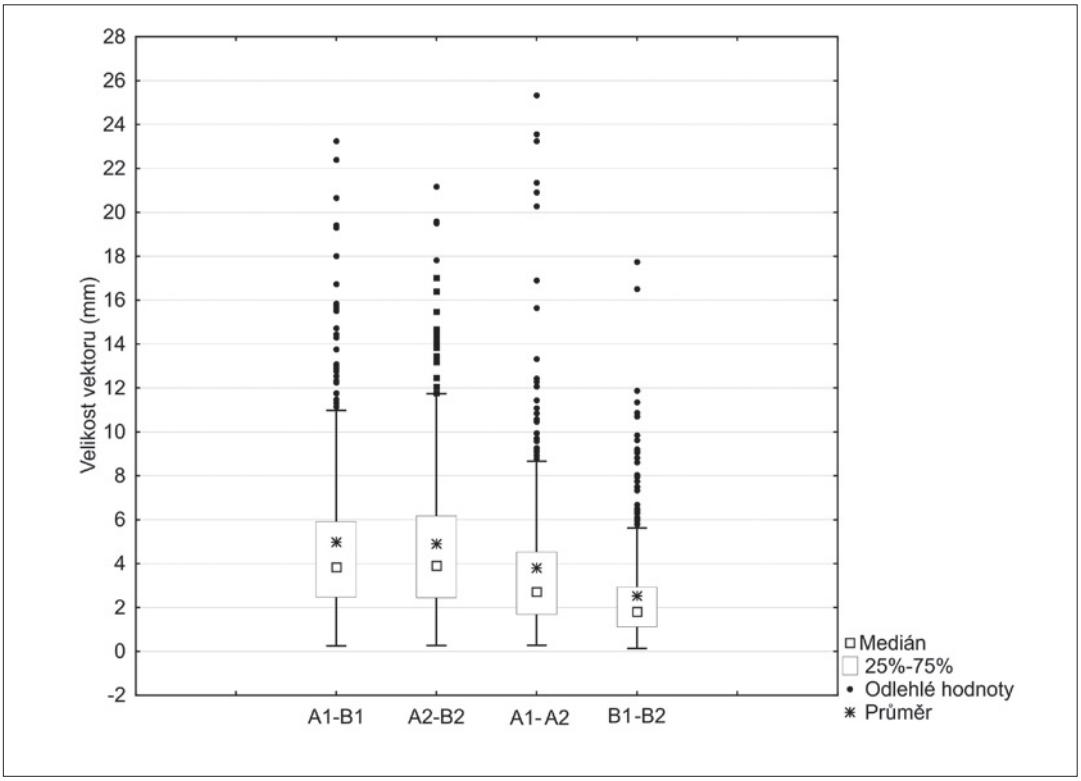
Chyba hodnotitele i chyba mezi hodnotiteli byla testována analýzou rozptylu (ANOVA) opakovaných měření. Pro analýzu byly využity hodnoty velikosti vektoru, relativní chyby získaných rozměrů a statistické parametry popisující odlišnosti mezi modely získané porovnáním sítí. U testování rozdílů vyjádřených velikostí vektorů byl sledován vliv pohlaví a míry restaurace na variabilitu souboru. Kombinace obou faktorů nebyla testována z důvodu chybějících dat, což bylo způsobeno odlišným zastoupením antropometrických bodů v jednotlivých konfiguracích a také nestejným zastoupením mužských a ženských lebek. Z tohoto důvodu byl rovněž vyřazen bod levý zygion, který byl nadigitalizován pouze u jedné lebky. Vzhledem k nízkému počtu mužských lebek byl u porovnání polygonálních sítí testován pouze vliv restaurace a nikoliv pohlaví.

Hodnoty RMS získané na základě srovnání restaurace (A_1–B_1) a rekonstrukce (R_A–R_B) pro shodných 9 restaurovaných i rekonstruovaných lebek byly testovány neparametrickým párovým Wilcoxovým testem. Pro všechny testy byly nulové hypotézy zamítnuty na 5% hladině statistické významnosti.

5. Výsledky

5.1. Porovnání na základě konfigurace antropometrických bodů

Porovnáním rozdílů mezi modely lebek vytvořených stejným hodnotitelem (A_1–A_2 a B_1–B_2) bylo zjištěno, že rozdíly v chybě hodnotitele jsou u každého hodnotitele statisticky významné (tab. 2 a 3; obr. 7, 8, 9). U většiny hodnot velikostí vektoru byla u hodnotitele B zaznamenána menší chyba (obr. 8). Zároveň byl zjištěn statisticky významný vliv význačných bodů na chybu hodnotitele, což znamená, že tato chyba byla u každého význačného bodu rozdílná. Post-hoc testy ukázaly, že tento výsledek byl způsoben vyššími hodnotami chyby u význačného bodu opistocranion (nejvíce vzadu v mediánní rovině) a obou bodů euryon (nejlaterálněji položené body na kalvě). Obdobné výsledky byly zjištěny při testování chyby hodnotitele (A_1–A_2 a B_1–B_2) i rozdílů mezi hodnotiteli (A_1–B_1



Obr. 7. Krabicový graf rozdílů velikosti vektorů mezi hodnotiteli a mezi hodnoceními. Uvedené rozměry jsou uvedeny v milimetrech.

Fig. 7. The boxplot of inter and intra-operator differences based on the size of vectors by means of millimeters

I. Chyba hodnotitele	SS	Stupně volnosti	MS	F-hodnota	p-hodnota
Landmark	1037,99	25,00	41,52	5,06	0,00
Srovnání (A_1–A_2 a B_1–B_2)	139,48	1,00	139,48	18,58	0,00
Interakce landmarků a srovnání	387,38	25,00	15,50	2,06	0,00

I. Chyba hodnotitele a chyba mezi hodnotiteli	SS	Stupně volnosti	MS	F-hodnota	p-hodnota
landmark	3578,00	25,00	143,10	10,82	0,00
Srovnání (A_1–A_2, B_1–B_2, A_1–B_1 a A_2–B_2)	1093,00	3,00	364,20	50,36	0,00
Interakce landmarků a srovnání	1262,00	75,00	16,80	2,33	0,00

Tab. 2. Hodnoty statistik testu ANOVA opakovaných měření pro srovnání pouze rozdílů v přesnosti sestavení modelů u obou hodnotitelů (I.) i pro kombinaci s srovnáním rozdílů v přesnosti mezi hodnotiteli (II.).

Tab. 2. The results of Repeated measures ANOVA testing inter-operator (I.) and the combination of intra- and inter-operator differences in configuration of landmarks (II.).

	Velikost vektoru			
	A–A	B–B	A_1–B_1	A_2–B_2
průměr	3,80	2,52	4,97	4,90
median	2,71	1,81	3,84	3,90
max	25,34	17,75	23,25	21,16
min	0,28	0,13	0,24	0,27
SD	3,65	2,33	3,85	3,60

Tab. 3. Deskriptivní statistika rozdílů mezi hodnotiteli a mezi hodnoceními (obr. 7). Uvedené rozměry jsou uvedeny v milimetrech.

Tab. 3. Descriptive statistics illustrating the intra- and inter-operator differences based on the size of vectors by means of millimeters.

	A1	A2	B1	B2
A1		1,00	**0,00**	0,21
A2	0,99		**0,00**	**0,01**
B1	0,17	0,09		1,00
B2	0,7	0,54	0,76	

Tab. 4. V levé dolní části tabulky jsou výsledky testu ANOVA opakovaných měření (p-hodnoty post-hoc srovnání) porovnávající variabilitu získaných rozměrů mezi hodnotiteli. V horní pravé části jsou p-hodnoty post-hoc srovnání pro rozměr nasion-prosthion u něhož byly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi hodnotiteli. Zvýrazněné hodnoty jsou statisticky významné.

Tab. 4. The p-values of post-hoc comparison testing the differences among observations by using obtained measurements are on the left side of the matrix. The p-values of post-hoc comparison testing the differences among observation based on the measurement nasion-prosthion are on the right side. The values in bold indicate significant difference.

Rozměry	A1		A2		B1		B2	
	median	max	median	max	median	max	median	max
asterion-asterion	0,64	2,49	0,71	10,88	0,71	3,50	0,50	3,09
basion-bregma	0,11	0,20	0,50	4,52	0,16	0,39	0,15	0,89
bregma-lambda	1,13	3,86	0,98	3,97	0,76	2,78	0,75	3,44
euryon-euryon	0,67	3,58	0,76	4,28	0,78	3,30	0,46	6,44
glabella-opistocranion	0,25	1,82	0,50	2,45	0,15	1,12	0,11	1,70
nasion-bregma	0,44	2,29	0,35	2,98	0,26	2,39	0,23	2,44
nasion-prosthion	2,52	5,44	4,31	6,18	3,52	10,56	2,15	4,74
basion-prosthion	0,68	1,42	1,33	2,98	0,81	3,99	0,91	6,73
ektomolare-ektomolare	1,06	3,84	1,19	5,51	0,59	6,18	1,52	4,16
zygion-zygion	3,21	3,21	0,13	0,13	0,07	0,07	0,07	0,07

Tab. 5. Maximální hodnota a medián hodnot relativní chyby. Uvedené hodnoty jsou v uvedeny procentech.

Tab. 5. Descriptive statistic (maximal value and median) illustrating magnitude of the relative error by means of percentage.

	SS	Stupně volnosti	MS	F-hodnota	p-hodnota
Lebka (ID)	23,29	4,00	5,82	0,13	0,97
Srovnání (všechny typy)	65,91	5,00	13,18	9,55	0,00
Interakce lebky a srovnání	62,18	20,00	3,11	2,25	0,00

Tab. 6. Hodnoty statistik testu ANOVA opakovaných měření pro srovnání rozdílů v přesnosti sestavení modelů u obou hodnotitelů v kombinaci se srovnáním rozdílů v přesnosti mezi hodnotiteli na základě hodnot metrik získaných porovnánám dvou modelů v programu FIDENTIS Analytik, jež popisují míru odlišnosti (RMS, Aritmetický průměr, Geometrický průměr, minimální hodnoty, maximální hodnoty a 75. percentil hodnot).

Tab. 6. The results of Repeated measures ANOVA testing the intra- and inter-operator variation in restoration of skulls based on descriptors (RMS, Arithmetic Mean, Geometric Mean, Minimal values, maximal values and 75th percentile of values) obtained by comparison of models by using program FIDENTIS Analyst.

	A_1–B_1	A_2–B_2	A_1–A_2	A_1–A_{1oe}	B_1–B_2	B_1–B_{1oe}
A_1–B_1		1,00	0,28	**0,00**	**0,00**	**0,00**
A_2–B_2	1,00		0,27	**0,00**	**0,00**	**0,00**
A_1–A_2	0,28	0,27		0,41	0,06	0,24
A_1–A_{1oe}	**0,00**	**0,00**	0,41		0,95	1,00
B_1–B_2	**0,00**	**0,00**	0,06	0,95		0,99
B_1–B_{1oe}	**0,00**	**0,00**	0,24	1,00	0,99	

Tab. 7. Výsledky testu testu ANOVA opakovaných měření (p-hodnoty post-hoc srovnání) všech hodnot získaných porovnáním sítí v programu FIDENTIS Analytik. Zvýrazněné hodnoty jsou statisticky významné.

Tab. 7. P-values of post-hoc comparison testing the differences among the restorations of skulls. The values in bold indicate significant difference.

Míra restaurace	RMS				
	průměr	median	min	max	SD
nízká	0,65	0,61	0,27	1,18	0,32
střední	1,02	0,92	0,56	1,82	0,42
vysoká	2,34	2,39	0,83	4,64	1,30

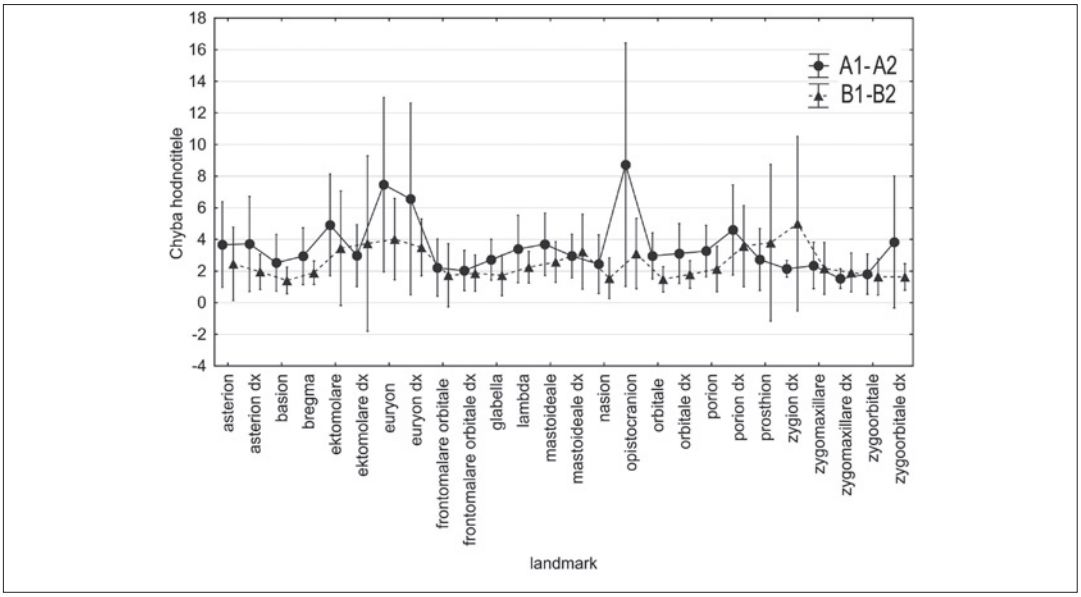
Tab. 8. Deskriptivní statistika hodnot RMS podle míry restaurace u srovnání modelů mezi hodnotiteli (A_1–B_1). Uvedené rozměry jsou uvedeny v milimetrech.

Tab. 8. Descriptive statistic illustrating magnitude of the differences between observers (A_1–B_1) based on the values of RMS according to the degree of restoration by means of millimeters.

	Průměr	Medián	Maximum	Minimum	SD
Rekonstrukce	1,66	1,36	2,97	1,17	0,70
Restaurace	1,31	1,05	3,03	0,32	0,85

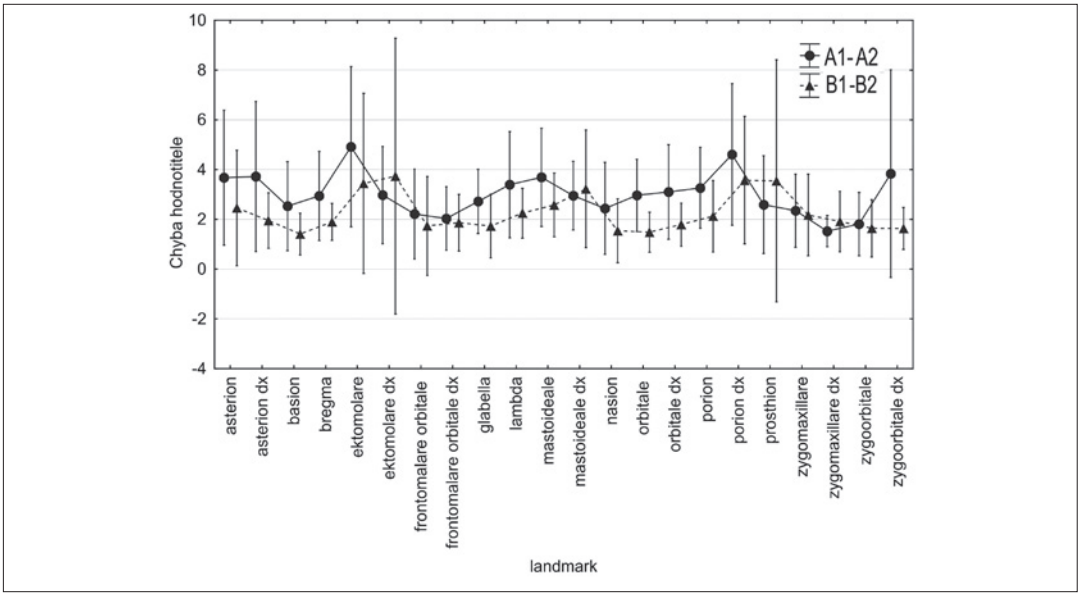
Tab. 9. Deskriptivní statistika hodnot RMS (pro chybu mezi hodnotiteli) podle míry rekonstrukce a restaurace pro 9 lebek u nichž byla provedena rekonstrukce. Uvedené rozměry jsou uvedeny v milimetrech.

Tab. 9. Descriptive statistic illustrating magnitude of the differences between observers in restauration (A_1–B_1) and in reconstruction (R_A–R_B) of nine selected skull based on the values of RMS by means of millimeters.



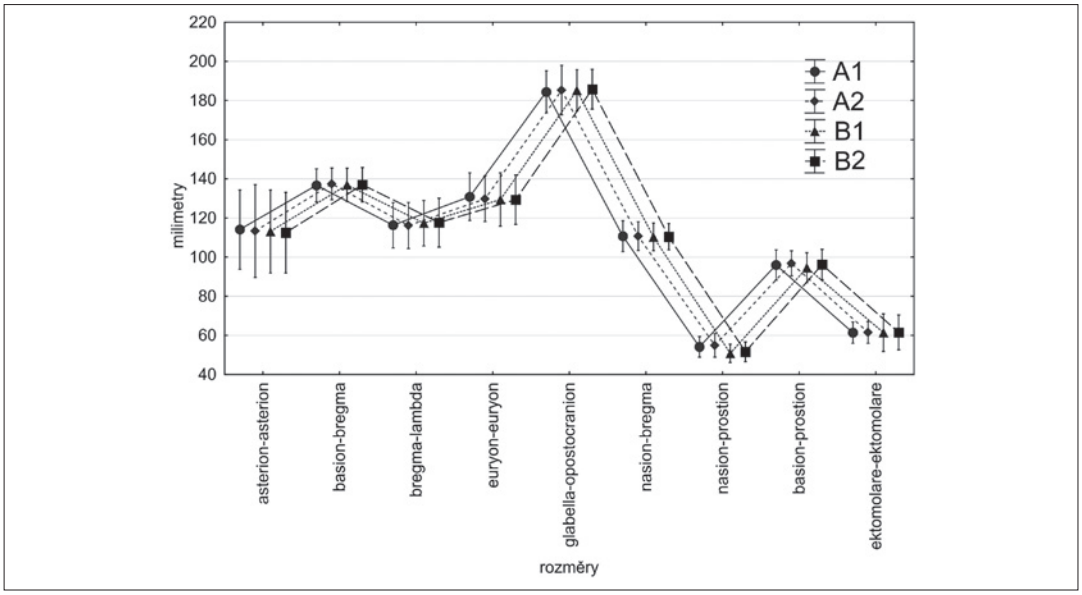
Obr. 8. Graf rozdílů chyby hodnotitele v závislosti na daném antropometrickém bodě. Rozdíly jsou vyjádřeny pomocí průměru a jedné směrodatné odchylky. Hodnoty rozdílů jsou vyjádřené v milimetrech.

Fig. 8. The range plot of intra-operator differences according to used landmarks. The mean and standard error of the mean were used. The values of distances are represented by means of millimeter.



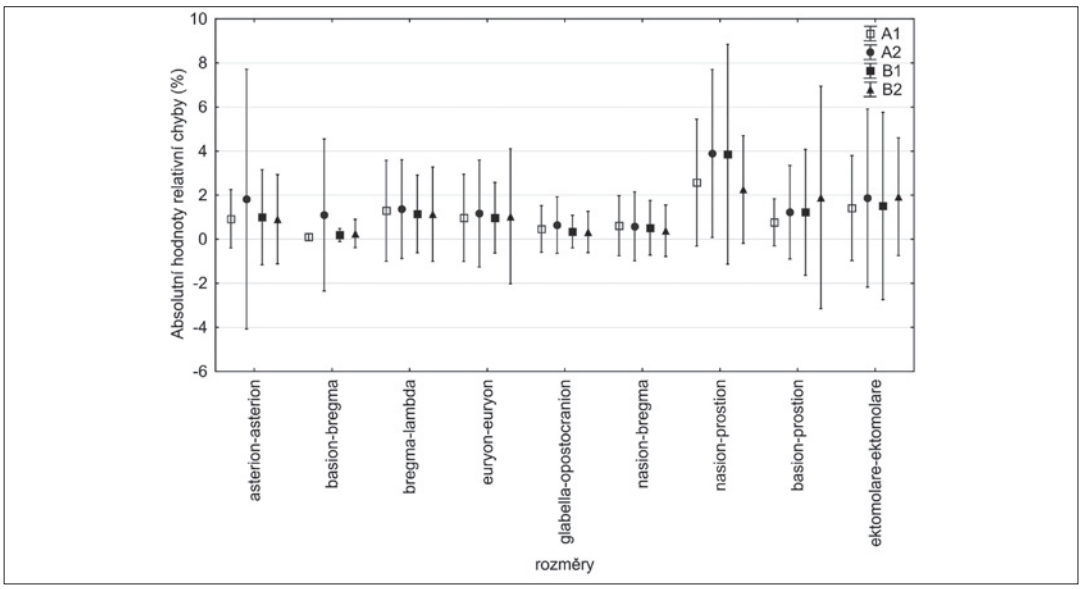
Obr. 9. Graf rozdílů chyby hodnotitele v závislosti na daném antropometrickém bodě s vyřazením landmarků s nejvyšší chybou (zygion, opistocranion, euryony). Rozdíly jsou vyjádřené pomocí průměru a jedné směrodatné odchylky. Hodnoty rozdílů jsou vyjádřené v milimetrech.

Fig. 9. The range plot of intra-operator differences according to used landmarks when landmarks related to the highest level of error were excluded (zygion, opistocranion, euryon). The mean and standard error of the mean were used. The values of distances are represented by means of millimeter.



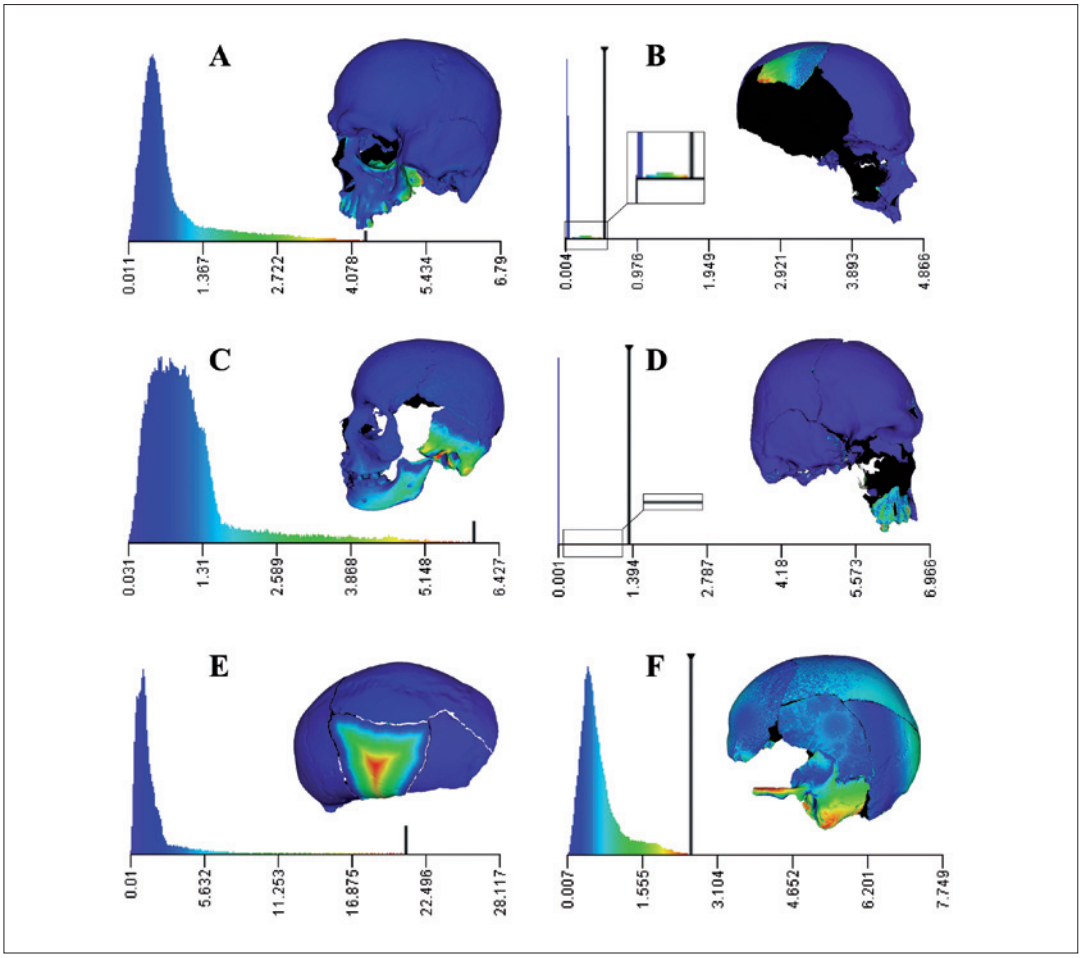
Obr. 10. Průměry doplněné dvěma směrodatnými odchylkami pro rozměry získané oběma měřeními obou hodnotitelů. Hodnoty rozměrů jsou vyjádřené v milimetrech.

Fig. 10. The range plot of intra-operator and inter-operator differences in obtained measurements of both observers. The mean and two standard errors of the mean were used. The values of measurements are represented by means of millimeter.



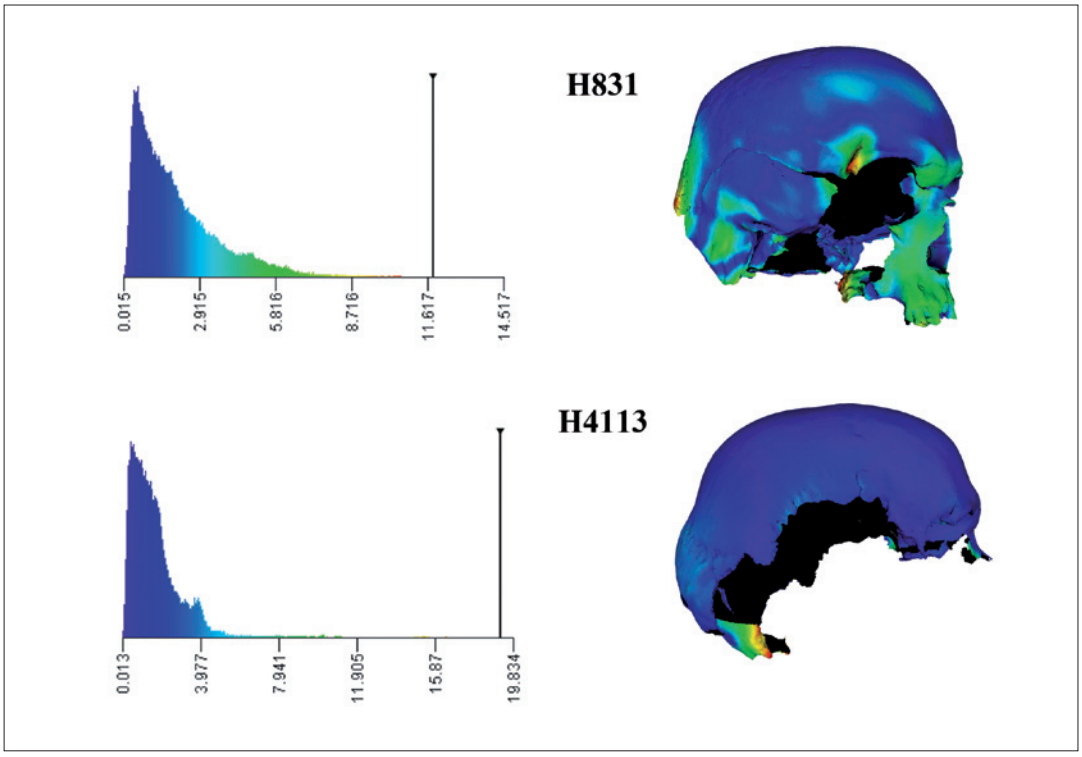
Obr. 11. Průměry doplněné dvěma směrodatnými odchylkami pro relativní chybu rozdílů obou hodnotitelů. Hodnoty relativní chyby jsou vyjádřené v procentech.

Fig. 11. The range plot of intra-operator and inter-operator differences in relative error of measurements. The mean and two standard errors of the mean were used. The values of relative error are represented by means of millimeter.



Obr. 12. Histogramy absolutních vzdáleností všech bodů znázorňující rozdíly při sestavení modelů různými hodnotiteli. Histogramy jsou vytvořené pro lebky s nejvyšší (vlevo) a s nejnižší (vpravo) chybou podle míry restaurace, přičemž lebky byly vybrány na základě velikosti hodnot RMS. Histogramy jsou doplněny vizualizacemi rozdílů mezi restauracemi hodnotitelů (A_1–B_1). A) Lebka H6833, u které byly zjištěny největší rozdíly v rámci modelů s nízkou mírou restaurace. B) Lebka H6803, u které byly zjištěny nejmenší rozdíly v rámci modelů s nízkou mírou restaurace. C) Lebka H3808 – s největšími rozdíly a D) lebka H3814 s nejmenšími rozdíly v rámci modelů se střední mírou restaurace. Mezi modely s vysokou mírou restaurace byla zjištěna největší chyba u lebky E) H3807 a u lebky F) H4848 pak nejmenší. Rozdíly mezi modely jsou vyjádřené barevnou škálou od modré (oblast s minimálními rozdíly) po červenou (oblast s maximálními rozdíly).

Fig. 12. The values of point-to-point closest distances between compared models of skulls represented by using histograms. The models with the highest (left) and with the lowest (right) values of RMS were selected for visualization of inter-operator differences (A_1–B_1). Variations between meshes were visualized by means of color maps. For one-to-one colors of the blue (minimum) to red (maximum) spectrum corresponded to the computed closest point to point distances. A) Skull H6833 – the highest values of differences and the lowest degree of restoration. B) Skull H6803 – the lowest values of differences and the lowest degree of restoration. C) Skull H3808 – the highest values and D) skull H3803 with the lowest values of differences and with the middle degree of restoration. There were revealed the highest value of RMS in skull E) H3807 and the lowest value in skull F) H6867 among models with the highest degree of restoration.



Obr. 13. Histogramy absolutních vzdáleností všech bodů znázorňující chybu mezi hodnotiteli pro dvě lebky s nejvyšší chybou, doplněné vizualizacemi rozdílů mezi rekonstrukcemi hodnotitelů (R_A–R_B). Rozdíly mezi modely jsou vyjádřené barevnou škálou od modré (oblast s minimálními rozdíly) po červenou (oblast s maximálními rozdíly).

Fig. 13. The values of point-to-point closest distances between compared models of skulls represented by using histograms supplemented with color maps visualizing differences between compared reconstruction of models (R_A–R_B). Two models with the highest values of RMS were selected for visualization of intra-operator differences of reconstruction. Variations between meshes were visualized by means of color maps. For one-to-one colors of the blue (minimum) to red (maximum) spectrum corresponded to the computed closest point to point distances.

a A_2–B_2; tab. 2 a 3). Výsledky dále ukázaly, že chyba mezi hodnotiteli byla větší než chyba hodnotitele. Tyto rozdíly byly způsobeny převážně posunem v bodě opistocranion, euryon a ektomolare. Pokud byla do testování přibrána míra restaurace nebo pohlaví, nebyl zjištěn vliv těchto faktorů na míru chyby. Rovněž nebyla zjištěna statisticky významná interakce těchto faktorů mezi sebou ani s význačnými body.

5.2. Porovnání na základě rozměrů testující rozdíly ve velikosti lineárních rozměrů

Analýza rozptylu rozměrů neukázala statisticky významné rozdíly mezi hodnotiteli (tab. 4; obr. 10). Na základě post-hoc testů byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi hodnotiteli pouze u rozměru nasion-prosthion (výška horního obličeje), což bylo zapříčiněno hodnotou tohoto rozměru u jedné lebky. Pokud byla testována re-

lativní chyba rozměrů, bylo zjištěno, že rozměry mají vliv na rozdíly mezi hodnotiteli (p=0,05), ačkoliv post-hoc srovnání ukázalo statisticky významný rozdíl mezi oběma hodnotiteli (p=0,02; tab. 5; obr. 11) rovněž pouze u rozměru nasion-prosthion.

5.3. Porovnání na základě sítí modelů

Výsledky analýzy rozptylu opakovaných měření potvrdily statisticky významné rozdíly mezi hodnotiteli i mezi hodnoceními hodnotitelů. Rovněž bylo zjištěno statisticky významné vzájemné působení typu srovnání a lebky, ačkoliv typ srovnání se na variabilitě souboru podílel více (tab. 6; tab. 7). Na základě výsledků post-hoc srovnání (tab. 7) nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi první a opakovanou první úpravou modelů první restaurace obou hodnotitelů (A_1–A_{1oe} a B_1–B_{1oe}) a rovněž nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi chybami hodnotitele.

Deskriptivní statistika pro hodnoty RMS (tab. 8) ukazuje, že se zvyšující se mírou restaurace se zvyšují i rozdíly mezi hodnotiteli. Podle výsledků analýzy rozptylu byly zjištěny rozdíly mezi kategoriemi pro míru restaurace u srovnání modelů mezi hodnotiteli (A_1–B_1), kdy se hodnoty RMS lišily mezi modely s vysokou a nízkou mírou rekonstrukce (p=0,003) a mezi modely s vysokou a střední mírou restaurace (p=0,035). Mezi nízkou a střední mírou restaurace nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly. Z vizualizací (obr. 12) je patrné, že odlišnosti mezi modely jsou koncentrovány do míst, které se nacházejí dále od ploch spojení digitalizovaných modelů.

Párový Wilcoxův test neprokázal statisticky významný rozdíl (p=0,14) mezi hodnotami RMS popisujícími rozdíly rekonstrukcí hodnotitelů a hodnotami RMS získanými srovnáním restaurací obou hodnotitelů. Podle deskriptorů popisné statistiky však byla chyba mezi rekonstrukcemi hodnotitelů vyšší než mezi jejich restauracemi (tab. 9). Hodnota RMS pro restaurace vyšší než 2 milimetry byla zjištěna u dvou lebek (obr. 13).

6. Diskuze

Virtuální restaurace a rekonstrukce nálezu je uskutečněna v prostředí počítače, kde probíhá i následné zkoumání původní morfologie kosti. Tím se snižuje pravděpodobnost jejich poškození způsobené fyzickou manipulací i znehodnocení zapříčiněné tradičními restauračními či rekonstrukčními postupy. Počítačové prostředí dále dovoluje neomezené operace s modely kostí, které umožňují vytvoření libovolného množství výsledných variant restauračních anebo rekonstrukčních postupů (*Benazzi et al. 2009c; Benazzi et al. 2011; Fantiti et al. 2008*). Zrestaurovaný anebo zrekonstruovaný trojrozměrný model však nepředstavuje kopii původního tvaru, ale pouze jednu z možných variant skutečné původní morfologie. Počet scénářů je ovlivněn všemi kroky zpracování virtuálních modelů kosti, od převedení do prostředí počítače přes editace až po samotný restaurační postup (*Jandová et al. 2015*).

Během virtuálního sestavení lebky z jednotlivých fragmentů dochází ke změně polohy jednotlivých úlomků. Pokud virtuální rekonstrukci předchází digitální restaurace materiálu, doporučujeme polohu již zrestaurovaného modelu kosti před rekonstrukcí standardizovat do počátku kartézského systému souřadnic (*Jandová et al. 2015*). Důvodem této standardizace je optimální nastavení mediánní roviny, která v této studii tvoří podklad virtuálně rekonstrukčních postupů. Důležitým krokem v optimalizovaném postupu před srovnáním tvaru na základě polygonových sítí je editace modelu. Jelikož se modely fragmentů během restaurace mírně

překrývají, před analýzou je nutno odstranit vybrané části modelu tak, aby byl ve výsledku zachován pouze vnější povrch modelu. V naší studii bylo zjištěno, že zmíněná editace sítě nemá vliv na rozdíly mezi modely.

Výsledky této studie potvrdily, že restaurační a rekonstrukční zpracování fragmentárního materiálu vnáší významnou chybu do antropologického hodnocení. Výsledky ukázaly, že jednotlivé restaurace hodnotitelů se navzájem odlišují, zatímco rozdíly mezi jednotlivými hodnoceními v rámci hodnotitele nemají praktický dopad. V praxi to znamená, že pro zajištění jednotných výsledků je potřeba, aby restaurační a rekonstrukční procesy byly vykonávány vždy jedním odborníkem. Dále bylo zjištěno, že míra chyby mezi hodnotiteli se zvyšuje s rostoucí mírou restaurace. Z toho vyplývá, že náročnější proces restaurace poskytuje větší prostor pro osobní posouzení, které se odráží v následném postupu restaurace.

Pro dosažení smysluplných závěrů z antropologické studie využívající restaurované modely kostí je důležité, aby variabilita vzniklá restaurací nepřevyšovala biologickou variabilitu. V naší studii byl u restaurovaných modelů stejných lebek nízké a střední míry restaurace zjištěn medián hodnot RMS nižší než 1 mm. Naopak medián hodnot RMS pro modely s vysokou mírou restaurace přesahuje 2,3 mm. V porovnání se studií (*Jurda – Urbanová 2016*), ve které hodnoty kvadratického průměru souboru kompletních lebek přesahovaly hodnotu 2,05 mm (*Jurda 2016*), ukazují naše výsledky, že u modelů s vysokou mírou restaurace, tedy modelů složených z 5 a více úlomků, by mohla variabilita vytvořená restauračním procesem potenciálně přesahovat reálnou biologickou variabilitu. Z tohoto důvodu by měl být dáván zvýšený pozor na celkový rozsah úprav kosterních nálezů ve virtuálním prostředí.

Využití relativní chyby měření u získaných rozměrů umožnilo porovnání zjištěných rozdílů mezi hodnotiteli procentuálním vyjádřením. Vypočtená chyba tak nebyla ovlivněna skutečnou velikostí rozměru. Curnoe a Tobias (*2006*) zaznamenali mezi dvěma restauracemi lebky největší rozdíl u maximální délky lebky. Tento rozdíl činil 20 mm, což přibližně odpovídalo relativní chybě 7 %. V naší studii byla maximální relativní chyba odpovídajícího rozměru vypočtena na přibližně 2,5 %, avšak nejvyšší hodnota maximální relativní chyby přesáhla 10 % a byla zjištěna u rozměrů výška horního obličeje (nasion-prosthion) a největší šířka týlu (asterion-asterion). V obou případech se jednalo o chybu vzniklou na základě hodnocení u jedné konkrétní lebky. V případě největší šířky týlu se jedná o chybu digitalizace, protože tato oblast nebyla restaurována. V případě výšky horního obličeje se výsledky založené na relativní chybě rozměrů shodují s porovnáním na základě landmarků a jedná se o chybu vzniklou odlišným připojením části kosti kvůli nedostatku ploch ke spojení nadigitalizovaných úlomků. Tento rozdíl byl způsoben znatelně odlišným připojením horní čelisti u jedné ze studovaných lebek, která neměla kompletní obličejovou část. Tato oblast je zdrojem chyb i u ostatních modelů, vzhledem k tomu, že v oblasti očnic a nasia je nedostatek styčných ploch pro připojení faciální části lebky.

Metoda založená na lineárních vzdálenostech neprokázala rozdíly mezi hodnoceními ani mezi hodnotiteli, s výjimkou rozměru nasion-prosthion. Avšak vzhledem k tomu, že osteometrické metody antropologického hodnocení kosterního materiálu jsou často založeny právě na lineárních rozměrech (*Jantz – Ousley 2005*), podporují tyto výsledky využití lineárních rozměrů získaných na základě restaurovaných modelů v antropologické praxi, avšak s ohledem na jejich relativní chybu.

Tato studie potvrzuje výhody využití porovnání modelů na základě sítě jako metody pro určení chyby hodnotitele, jelikož jako jediná metoda zachytila vliv míry restaurace na výsled-

ný model. V porovnání s ostatními umožňuje vizualizaci lokálních rozdílů celého povrchu a zároveň není ovlivněna chybou digitalizace antropometrických bodů. Její nevýhodou je však ovlivnění výsledků zarovnáváním modelů před jejich srovnáním.

7. Závěr

V této studii bylo zjištěno, že s narůstající mírou restaurace se zvyšuje i míra nepřesnosti restauračních a rekonstrukčních postupů. Rovněž bylo zjištěno, že se zvyšující se mírou restaurace se zvyšují rozdíly mezi hodnotiteli. Tyto rozdíly jsou rovněž narůstají s nedostatečnou velikostí nebo s nepřítomností styčných ploch pro připojení úlomků během restauračního procesu a v případě silně fragmentárních nálezů mohou dokonce přesáhnout skutečné biologické rozdíly v morfologii. Přestože virtuální restaurační a rekonstrukční metody usnadňují základní zpracování fragmentárních anebo posmrtně deformovaných kosterních nálezů, je potřeba výsledky těchto technik interpretovat s ohledem na zjištěné rozdíly mezi vytvořenými modely odlišných hodnotitelů.

Poděkování

Autorky by chtěly poděkovat společnosti Archaia Brno o.p.s., a Mgr. Tomáši Kopeckému a Mgr. Mikoláši Jurdovi, Ph.D. za přípravu kosterního materiálu.

Literatura

Arbour, V. – Currie, P. 2012: Analyzing taphonomic deformation of Ankylosaur skull using retrodeformation and Finite element Analysis, PLoS ONE 7 (6), e39323.

Ascenzi, A. – Mallegni, F. – Manzi, G. – Segre, A. – Segre Naldini E. 2000: A re-apprasial of Ceprano calvaria affinities with Homo erectus, after the new reconstruction, Journal of Human Evolution 39(4), 443–450.

Benazzi, S. – Stansfiels, E. – Kullmar, O. – Fiorenza, L. – Gruppioni, G. 2009a: Geometric morphometric methods for bone reconstruction: The Mandibular Condylar process of Pico della Mirandola, The Anatomical Record 292, 1088- 1097.

Benazzi, S. – Stansfiels, E. – Milani, C. – Gruppioni, G. 2009b: Geometric morphometric methods for three-dimensional virtual reconstruction of a fragmented cranium: the case of Angelo Poliziano, International Journal of Legal Medicine 123, 333–344.

Benazzi, S. – Fantini, M. – De Crescenzio, F. – Mallegni, G. – Mallegni, F. – Persiani, F. – Gruppioni, G. 2009c: The face of the poet Dante Alighieri reconstructed by virtual modelling and forensic anthropology techniques, Journal of Archaeological Science 36, 278–283.

Benazzi, S. – Bookstein, F. – Strait, D. – Weber, G. 2011: A new OH5 reconstruction with an assessment of its uncertainty, Journal of Human Evolution 61, 75–88.

Besl, P. J. – McKay, N. D. 1992: A Method for Registration of 3-D shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, 239–256.

Curnoe, D. – Tobias, P. 2006: Description, new reconstruction, comparative anatomy, and classification of the Sterkfontein Stw 53 cranium, with discussion about the taxonomy of other southern African early homo remains, Journal of Human Evolution 50(1), 36–77.

Fantini, M. – de Crescenzio, F. – Persiani, F. – Benazzi, S. – Gruppioni, G. 2008: 3D restitution, restoration and prototyping of medievel damaged skull, Rapid Prototyping Journal 14, 318–324.

Grine, F. – Gunz, P. – Betti-Nash L. – Neubauer, S. – Morris, A. 2010: Reconstruction of the late Pleistocene human skull from Hofmeyr, South Africa, Journal of Human Evolution 59, 1–15.

Gunz, P. – Mitteroecker, P. – Bookstein, F. – Weber, G. 2004: Computer aided reconstruction of incomplete human crania using statistical and

geometrical estimation methods. Enter the past: Computer applications and quantitative methods in archaeology, 96–98. Oxford.

Gunz, P. 2005: Statistical and geometrical reconstruction of hominid crania: reconstructing australopithecine ontogeny, Ph.D. Dissertation, University of Vienna.

Gunz, P. – Mitteroecker, P. – Neubauer, S. – Weber, G. – Bookstein, F. 2009: Principles for the Virtual reconstruction of hominid crania, Journal of Human Evolution 57, 48–62.

Gunz, P. – Neubauer, S. – Maureille, B. – Hublin, J.-J. 2011: Virtual reconstruction of Le Moustier 2 newborn skull. Implications for Neandertal ontogeny, PALEO 22, 155–172.

Chalás, I. – Urbanová, P. – Kotulanová, Z. – Jandová, M. – Králík, M. – Kozlíková, B. – Sochor, J. 2014: Forensic 3D facial identication software (FIDENTIS). Software, Masaryk University

Jandová, M. – Šplíchalová, I – Urbanová, P. 2015: Aplikace metod virtuální antropologie při určování pohlaví u archeologických kosterních nálezů, Studia archeologica Brunensia 20(1), 181–201.

Jantz, R. – Ousley S. 2005: FORDISC 3: Computerized Forensic Discriminant Functions. Version 3.0. The University of Tennessee, Knoxville.

Jurda, M. 2016: osobní sdělení, 3.10.2016.

Jurda, M. – Urbanová, P. – Králík, M. 2013: The Post-Mortem Pressure Distortion of Human Crania Uncovered in an Early Medieval Pohansko (Czech Republic) Graveyard, International Journal of Osteoarchaeology, USA/UK: John Wiley and Sons, Ltd., doi:10.1002/oa.2321

Jurda, M. – Urbanová, P. 2016: Sex and Ancestry Assessment of Brazilian Crania using Semi-automatic Mesh Processing Tools, Legal Medicine 23, 34–43.

Mafart, B. – Guipert, G. – Alliez-Philip, C. – Brau, J.-J. 2007: Virtual reconstitution and new palaeopathological study of the Magdalenian child's skull of Rochereil, Comptes Rendus Palevol 6, 569–579.

Neubauer, S. – Gunz, P. – Mitteroecker, P. – Weber, G. 2004: Three-dimensional digital imaging of the partial Australopithecus africanus endokranium MLD 37/38, Canadian Association of Radiologists 55, 271–278.

Neubauer, S. – Gunz, P. – Weber, G. – Hublin, J.-J. 2012: Endocranial volume of Australopithecus africanus: New CT-based estimates and the effects of missing data and small sample size, Journal of Human Evolution 62, 498–510.

Ogihara, N. – Nakatsukasa, M. – Nakano, Y – Ishida, H. 2006: Computerized Restoration of Nonhomogeneous Deformation of a Fossil Cranium Based on Bilateral Symmetry, American Journal of Physical Anthropology 130, 1–9.

Ponce de León, M. 2002: Computerized paleoanthropology and Neanderthals: The case of Le Moustier 1, Evolutionary Anthropology 1, 68–72.

Rohlf, F. J. 2005: NTSYS-pc: Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System Version 2.2. New York: Exeter Publishing Ltd.

Sedláčková, L. 2013: Předběžné hlášení o provedení záchranného archeologického výzkumu „Bytový dům Vídeňská, II. Etapa, Brno". Předběžná nálezová zpráva je uložená v archivu společnosti Archaia Brno o.p.s..

Slice, D. E., 2005: Modern morphometrics. In: Dennis E. SLICE, ed. Modern morphometrics in physical anthropology. New York: Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, s. 1–45 [vid. 2016–02–07]. ISBN 978–0–306–48697–5. http://link.springer.com/10.1007/0–387–27614–9_1

Walrath, D. – Turner, P. – Bruzek, J. 2004: Reliability test of the Visual Assessment of Cranial Traits for Sex Determination, *AJPA,* 125, str. 132–137.

Weber, G. – Bookstein, F. 2011: Virtual anthropology. A guide to a new interdisciplinary field. Wien.

Wei, Y. – Maoqing, L. – Xin, L. 2012: Fragmented skull modeling using heat kernel, Graphical Models 74, 140–151.

White, T. – Suwa, G. – Simpson, S. – Asfaw, B. 2000: Jaws and teeth of Australopithecus afarensis from Maka, Middle Awash, Ethiopia, American Journal of Physical anthropology 111 (1), 45–68.

White, T. – Black, M. – Folkens, P. 2012: Human Osteology. Third Edition. San Diego.

Zelditch, M. L. – Swiderski, D. L. – Sheets, H. D. – Fink W. L. 2004. Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer. San Diego.

Zhou, B. – Willis, A. – Yunfeng, S. – Anderson, D. D. – Brown, T. D. – Thomas, T. P. 2009a: Virtual 3D bone fracture reconstruction via inter-fragmentary surface alignment. 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops:1809–1816.

Zhou, B. – Willis, A. – Sui, Y. 2009b: Improving inter-fragmentary alignment for virtual 3D reconstruction of highly fragmented bone fractures, Proc. SPIE 7259, Medical Imaging 2009: Image Processing, 725934 (27 March 2009), 1–9, doi: 10.1117/12.810967.

http://graphics.idav.ucdavis.edu/research/projects/EvoMorph, online 14.12.2015

http://www.amira.com, online 10.11.2015

http://www.gom.com, online 10.11.2015

http://www.exetersoftware.com/cat/ntsyspc/ntsyspc.html 18.12.2015

Validating virtual restoration and reconstruction procedures in physical anthropology

The completeness of human bones is the fundamental premise in examination of skeletal remains. Both recent and archaeological skeletal remains are frequently uncovered fragmented, incomplete and/or distorted. Restoration or reconstruction (re-deformation and estimating missing parts) of such skeletal evidence is inevitably the first step for the subsequent anthropological examination (*Gunz et al. 2009*). However, restoration and reconstruction procedures are both approximate methods, which can rarely reestablish the original skeletal morphology. Recently, advances made in digital technologies gave origin to virtual restoration and reconstruction approaches (*Gunz et al. 2004; Ogihara et al. 2006; Weber – Bookstein 2011)*.

The purpose of this paper was to test the reliability, in terms of intra- and inter-operator differences, of virtual models created by restoration and reconstruction procedures. The study follows a paper by Jandová and colleagues (2015), which had focused on optimizing a set of digital tools employed while conducting a virtual restoration procedure and on assessing the effect of such procedures on determination of biological sex in human skull.

In total, a set of 20 incomplete skulls (87 fragments) from Vídeňská Street in Brno (Czech Republic) dated to the early medieval period was virtually re-assembled, twice by two operators (4 sets of 20 virtually restored skulls; Fig. 1; Tab. 1). Nine of the selected crania exhibited postmortem damage (Fig. 2), which was corrected by a virtual re-deformation method (Fig. 3). In the final step, missing parts of the re-deformed digital skulls were completed by a reconstructive technique employing the mean substitution.

The inter- and intra-operator error of virtual restoration and reconstruction procedures were quantified by utilizing 3D landmarks, inter-landmark distances (ILDs) and mesh-to-mesh comparison tools. Firstly, Cartesian coordinates of 26 landmarks (Fig. 4) were collected and standardized using a Generalized Procrustes Analysis. The standardized coordinates were further processed in order to calculate the magnitude of inter- and intra-operator differences between the pairs of restored skulls (Fig. 1; Tab. 1). The inter- and intra-operator differences were defined as the difference between two sets of landmarks, i.e. values of vector size (Fig. 5). On the basis of Cartesian coordinates of the collected landmarks, ten inter-landmark distances and their relative measurement error were computed. Finally, in order to execute mesh-to-mesh comparison FIDENTIS Analyst application was employed. The software calculates point-to-point closest distance and provides numerical descriptors of differences. The quantified inter- and intra-operator differences were tested by a Repeated measures ANOVA.

All types of comparisons (except for ILDs) showed statistical significant differences between operators (Tab. 2–5). In addition, a relationship between the complexity of the restoration procedure and the inter-operator error was revealed by the mesh-to-mesh comparison (Tab. 8) as the values of RMS were revealed significantly different

between the highest and middle levels of restoration (p-value=0.035) and between the lowest and highest levels of restoration (p-value=0.003). More importantly, the differences obtained in the models with the highest complexity of restoration approached the RMS values reported as those describing real biological variations in human skulls (*Jurda – Urbanová 2016*), Therefore, in studies of biological variations experts should be aware of the bias, they should avoid combining such models with less damaged specimens, and if combining is, in fact, conducted they should interpret their results accordingly.

In conclusion, virtual restoration and reconstruction procedures facilitate crucial steps in the routine anthropological examination of skeletal remains. However, inter- and intra-operator differences may significantly bias acquired results.

Mgr. Ivana Šplíchalová

• Laboratoř morfologie a forenzní antropologie
Ústav antropologie, Přírodovědecká fakulta,
Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno
splichalovaivana@mail.muni.cz

Mgr. Marie Jandová

• Laboratoř morfologie a forenzní antropologie
Ústav antropologie, Přírodovědecká fakulta,
Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno
jandovam@mail.muni.cz

Mgr. Marie Jandová

• Laboratoř morfologie a forenzní antropologie
Ústav antropologie, Přírodovědecká fakulta,
Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno
urbanova@sci.muni.cz