

- NIXON, MF., IBRAHIM, T., JOHARI, Y., ELTAYEF, S., HARIHARAN, D., TAYLOR, GJ. Managing osteoporosis in patients with fragility fractures: did the British Orthopaedic Association guidelines have any impact? *Ann R Coll Surg Engl*, 2007, vol. 89, no. 5, p. 504–509.
- PATE, RR., PRATT, M., BLAIR, SN., HASKELL, WL., MACERA, CA., BOUCHARD, C., BUCHNER, D., ETTINGER, W., HEATH, GW., KING, AC. et al. Physical activity and public health. A recommendation from the Centers for Disease Control and Prevention and the American College of Sports Medicine. *JAMA : the journal of the American Medical Association*, 1995, vol. 273, no. 5, p. 402–407.
- PATEL, AV., CALLEL, EE., BERNSTEIN, L., WU, AH., THUN, MJ. Recreational physical activity and risk of postmenopausal breast cancer in a large cohort of US women. *Cancer Causes and Control*, 2003, vol. 14, no. 6, p. 519–529.
- REID, IR. Relationships among body mass, its components, and bone. *Bone*, 2002, vol. 31, no. 5, p. 547–555.
- REID, IR., AMES, R., EVANS, MC., SHARPE, S., GAMBLE, G., FRANCE, JT., LIM, TM., CUNDY, T.F. Determinants of total body and regional bone mineral density in normal postmenopausal women – a key role for fat mass. *J Clin Endocrinol Metab*, 1992, vol. 75, no. 1, p. 45–51.
- RIEGEROVÁ, J., GÁBA, A., PŘÍDALOVÁ, M., LANGROVÁ, I. Hodnocení osteopenie a osteoporózy u žen ve věku senescence pomocí přístroje DEXA a InBody 720. *Slovenská antropológia*, 2009, vol. 12, no. 2, p. 42–48.
- SCHOENBORN, CA., ADAMS, PE. Health behaviors of adults: United States, 2005–2007. *Vital Health Stat*, 2010, vol. 10, no. 245, p. 1–132.
- STATSOFT. Statistica 9. Tulsa, OK: StatSoft, 2009.
- ŠTĚPÁN, J. Osteoporóza a cíle její léčby. *Klinická farmakologie a farmacie*, 2005, vol. 19, p. 229–234.
- TUDOR-LOCKE, C., AINSWORTH, B., WHITT, M., THOMPSON, R., ADDY, C., JONES, D. The relationship between pedometer-determined ambulatory activity and body composition variables. *International journal of obesity and related metabolic disorders: journal of the International Association for the Study of Obesity*, 2001, vol. 25, no. 11, p. 1571–1578.
- TUDOR-LOCKE, C., BASSETT, D. How Many Steps/Day Are Enough?: Preliminary Pedometer Indices for Public Health. *Sports Medicine*, 2004, vol. 34, no. 1, p. 1–8.
- U. S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. 2008 Physical activity guidelines for Americans be active, healthy, and happy! [online]. [[Washington, D.C.]]: U.S. Dept. of Health and Human Services: For sale by the Supt. of Docs., U.S. G.P.O., 2008. Available from World Wide Web: <<http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS112866>>.
- VARO, JJ., MARTINEZ-GONZALEZ, MA., DE IRALA-ESTEVEZ, J., KEARNEY, J., GIBNEY, M., MARTINEZ, JA. Distribution and determinants of sedentary lifestyles in the European Union. *International Journal of Epidemiology*, 2003, vol. 32, no. 1, p. 138–146.
- WELSH, L., RUTHERFORD, OM. Hip bone mineral density is improved by high-impact aerobic exercise in postmenopausal women and men over 50 years. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1996, vol. 74, no. 6, p. 511–517.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION *Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis. Report of a WHO Study Group*. Edition ed. Geneva: World Health Organization, 1994.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION *Obesity: preventing and managing the global epidemic. Report of a WHO consultation*. Edition ed. Geneva: World Health Organization, 1998.

RELIABILITA MERANIA V GEOMETRICKEJ A KLASICKEJ MORFOMETRII ĽUDSKEJ LEBKY

Reliability of measurements in geometric and traditional morphometrics of human skull

Stanislav Katina^{1,2,3}, Silvia Bodoriková²,
Michaela Dörnhöferová²

¹Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky, Bratislava, Slovenská republika

²Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra antropológie, Bratislava, Slovenská republika

³University of Glasgow, School of Mathematics and Statistics, Glasgow, Scotland, United Kingdom

Abstract

The aim of this study is to confront the methods of traditional (classical) morphometrics (TM) with geometric morphometrics (GM). TM applies direct measurements of an object using some anthropometric instruments. In GM, object is analyzed in a virtual space and except the metric characteristics it is allowed to measure also the object's shape independently of its position, orientation, and/or size. Furthermore, the study is focused on the classification of measurement errors in TM and GM, as well as the possibilities of their minimization. An overview and classification of (semi)landmarks depending on their reliability are proposed. In 2D analysis, only three types of landmarks are differentiated but in 3D approach nine types of (semi)landmarks are described. Selected curves and surface patches on the skull are also defined. A comparison of 2D and 3D analyses shows that the 2D photos (projections) are suitable for measuring only if the skull itself is not available. Only a slight rotation of the skull from the standardized planes (anthropometric norms) leads to artificial optical deformations, which increases distortion of the real variability. Contrary to 2D approach, the 3D one is offering not only richer information on the object using three coordinates additionally to only two, but more accurate measurements using mathematical definition of Frankfort horizontal and sagittal plane as well. The complexity of human skull measured by landmark coordinates is augmented by geometrically homologous (semi)landmarks on curves and surfaces, which are very important also backwards to calculate linear measurements from (semi)landmark coordinates. The major advantage of GM methods is the preservation of the full geometry of the object under study and the possibility to generate clear graphical outputs of the associated shape changes. However, landmark data have the disadvantage of being more difficult to analyze statistically than traditional morphometric variables due to the problem of mutual multivariate relationship of (semi)landmark coordinates enriched by triangulated mesh of surface points. Therefore, a collaboration of anthropologists with mathematicians, statisticians, and computer scientists is necessary starting at the time of study design. Only so could be eliminated the systematic measurement errors prior to any analysis, during statistical analysis, and at its conclusion due to interpretation of the results using static and dynamic statistical visualisation methods.

Key words: skull, morphometrics, reliability, biological a geometrical homology, (semi)landmarks, curves

Úvod

Geometrická morfometria (GM) umožňuje pochopiť tvarovú rozmanitosť na základe matematického opisu a modelovania a nachádza čoraz väčšie uplatnenie v evolučnej biológii, antropológii, zoológii, botanike, ekológii, medicíne a v ďalších odboroch (Adams et al., 2004; Bookstein et al., 1985; Neustupa, Šťastný, 2006; Slice, 2007). Opis tvaru pomocou *absolútnych rozmerov* (lineárnych – dĺžky, výšky, šírky, tetivy, kolmice; oblúkových a obvodových mier, plôch a objemov) a *relatívnych rozmerov* (indexov), ktorý sa používa v klasickej morfometrii (KM), je dlhodobo predmetom kritiky (Zelditch et al., 2004). Tradičnými morfometrickými metódami (cf. Knussmann, 1988; Martin, Saller, 1957) nie je možné jednoducho graficky znázorniť tvar objektu, pretože medzi jednotlivými prvkami nie je zachovaný geometrický (priestorový) vzťah, a rozmery alebo uhly bez súradníc nestačia k zachyteniu geometrického tvaru objektu ako takého (Zelditch et al., 2004). Príkladom môžu byť v dvojdimenzionálnom priestore (2D) dve na seba kolmé dĺžkové miery, ktoré môžu byť súčasťou objektu: a) kruhu, trojuholníka, štvorca, kosoštvorca, lichobežníka alebo deltoidu a b) elipsy, trojuholníka, obdĺžnika, kosodĺžnika, lichobežníka alebo deltoidu. V trojdimenzionálnom priestore (3D) sú to tri na seba kolmé dĺžkové miery, ktoré môžu byť súčasťou objektu napr. kocky, rovnobežnostenu a kvapky vody. Dochádza tak k strate informácií o tvare ako celku (Adams, Slice, Rohlf, 2004; Slice, 2005), ktorého rekonštrukcia by bola možná len vtedy, keby boli merané dĺžkové miery na objekte komplexne triangulované, triangulácia dopredu navrhnutá, takže objekt by bolo možné spätne poskladať z jednotlivých strán trojuholníkov. Takáto situácia je však prakticky nerealizovateľná pri takom komplexnom objekte, ako je ľudská lebka.

GM má teda oproti KM výhodu v tom, že poskytuje dobrú predstavu nielen o veľkosti objektu, ale najmä o jeho tvare (Zelditch et al., 2004). Tvar je pritom možné zobraziť nezávisle na polohe, orientácii a veľkosti skúmaného objektu (Slice, 2007). Pri klasických morfometrických postupoch (Bräuer, 1988; Martin, Saller, 1957) nie je možné tvarovú zložku úplne oddeliť od veľkostnej, skúmať ich oddelene, resp. dať ich do vzájomnej súvislosti, lebo tradičné tvarové premenné sú vždy viac-menej závislé na inej premennej, ktorá určuje veľkosť daného objektu. V minulosti sa pri štandardizácii dĺžkových rozmerov (štandardizácii na veľkosť) používali mnohé z týchto mier. Treba zdôrazniť, že každá dĺžková miera, na ktorú sa štandardizuje, dáva iné výsledky a konsenzus vzhľadom na to nebol možný. V GM sa za tento konsenzus považuje centroidová veľkosť (Bookstein, 1997), ktorá predstavuje aproximáciu obsahu (2D) alebo objemu (3D) opisovaného objektu. Vypočíta sa ako suma euklidovských vzdialeností od súradníc (semi)landmarkov k súradniciam ich centroidu (aritmetickému priemeru súradníc).

Ďalšia nevýhoda KM súvisí so vzájomnou závislosťou meraných rozmerov, lebo mnohé rozmery sa začínajú v rovnakom bode alebo sa čiastočne prekrývajú, preto sú silne závislé (korelované). Navyše dĺžkové miery merané ako euklidovská vzdialenosť ich koncových bodov v podobe (semi)landmarkov nemusia byť biologicky a/alebo geometricky homologické, keďže ani niektoré (semi)landmarky nie sú biologicky a/alebo geometricky homologické (pojem homológie, biologickej ako aj geometrickej, je vysvetlený nižšie).

KM má tiež problém rozpoznať podstatu skutočnej variability, najmä ak je k dispozícii len hodnota vzdialenosti medzi dvoma krajnými bodmi zisťovaného rozmeru. GM naopak umožňuje získať podstatne väčší počet premenných na sledovanom objekte, a to aj v prípade, keď je tvar daného objektu komplikovaný a KM sa lineárne rozmery nedajú získať (Slice, 2005; Zelditch et al., 2004). Lineárne rozmery je však možné vypočítať zo súradníc (semi)landmarkov, kým z dĺžkových mier

súradnice (semi)landmarkov získať možné nie je (s výnimkou komplexnej triangulácie objektu, ako je uvedené vyššie).

Metódy GM, či už 2D alebo 3D, sa stále častejšie aplikujú aj vo fyzickej a forenznnej antropológii (Benazzi et al., 2010; 2011a; 2011b; Coquerelle et al., 2010; Gonzales et al., 2009). Najčastejšie sa používajú pri determinácii populačnej afinity (Šefčáková, Katina, 2008; Šefčáková et al., 2008; Sholts et al., 2011), sexuálneho dimorfizmu (Bigoni et al., 2009; Franklin et al., 2007; Katina et al., 2004; Šefčáková, et al., 2003) a odhade veku dožitia (Braga, Treil, 2007; Franklin et al., 2008). Uplatnenie nachádzajú tiež pri virtuálnych rekonštrukciách kostných štruktúr napr. neúplných, či poškodených forenzných a paleoantropologických nálezov (Gunz et al., 2009).

Cieľ

1. klasifikovať chyby súvisiace s meraním v geometrickej morfometrii,
2. matematicky zdefinovať Frankfurtskú horizontálu a mediánnu rovinu,
3. teoreticky diskutovať reliabilitu a homológiu 3D merania súradníc (semi)landmarkov na ľudskej lebke vo vzťahu k 2D a 3D klasifikácii (semi)landmarkov a vo vzťahu k lineárnym mieram na lebke, ktorých koncové body sú (semi)landmarky,
4. klasifikovať vybrané anatomické krivky a plochy na ľudskej lebke,
5. sumarizovať poloaupomatizované a automatizované možnosti merania rozmerov na ľudskej lebke,
6. zjednotiť antropologickú, štatistickú a geometrickú terminológiu.

Metodika

Spôsoby merania a typy chýb

V KM sa na meranie lineárnych, oblúkových, obvodových a uhlových rozmerov používajú (Bräuer, 1988; Drozdová, 2004):

1. pomocné prístroje – kraniofor (na nastavenie a upevnenie lebky orientovanej vo Frankfurtskej horizontále), kovové ihlice (na nastavenie príslušných priamok na lebke);
2. meracie prístroje – dotykové meradlo (cefalometer, na meranie lineárnych rozmerov, napr. M1 – dĺžka lebky), posuvné meradlo (na meranie lineárnych rozmerov, napr. M52 – výška očnice), koordinátové (hlbkové) meradlo (na meranie projekčných mier a hĺbok na lebke, napr. M20 – nadušná bregmatická výška), uhlomer (na meranie uhlov, napr. M73 – uhol profilu nosa), mandibulometer (na meranie rozmerov sánky, napr. M68 – dĺžka sánky), pásové meradlo (na meranie oblúkových a obvodových mier, napr. M27 – mediánnu parietálny oblúk alebo M23 – horizontálny obvod lebky cez glabellu).

Systematické chyby súvisiace s meraním môžeme rozdeliť na:

- A. chyby spôsobené externými/environmentálnymi faktormi – denná doba, intenzita svetla, vlhkosť prostredia a oblečenie;
- B. chyby prístroja – presnosť merania prístroja;
- C. chyby merania – chyby z odlišnej aplikácie techniky merania (rôzne pochopenie definície meranej miery), intraindividuálna a interindividuálna chyba (iné držanie prístroja, iný tlak aplikovaný pri meraní, iná orientácia lebky pri meraní apod.);
- D. chyby registrácie – chyby z odčítania hodnôt z meracieho prístroja, chyby zo zápisu hodnôt do protokolu, chyby z prenosu hodnôt z protokolu do PC;
- E. chyby kalibrácie meracieho prístroja (často sa používa aj anglický pojem „zero error“), napr. MicroScribe® G2.

Pri systematických chybách v GM rozlišujeme skupiny (A) až (E), ale chyby registrácie sú minimalizované (registrácia

nameráných hodnôt prebieha automaticky priamo z meracieho prístroja MicroScribe® G2 do tabuľky v PC). V prípade merania v 3D geometrickom softwéri (napr. Landmark (<http://graphics.idav.ucdavis.edu>, 2011), Amira (<http://www.amira.com>, 2011), Edgewarp (Bookstein, Green, 1994), EVAN Toolbox (<http://evan-society.org>, 2011) a pod.) z (D) skupiny prichádza v GM do úvahy len jedna možnosť, a to iné poradie (semi) landmarkov pri rôznych lebkách, ktorú je možné tiež kontrolou odstrániť.

Zmiešaním chýb (A) až (E) vzniká tzv. *kombinovaná systematická chyba*, ktorú nie je možné objektívne hodnotiť. Problematické tiež je, keď sa kombinujú miery (na výpočet indexov ako aj v štatistických výpočtoch) merané inými meracími prístrojmi s rôznou presnosťou merania (zvyčajne od zlomku milimetra do troch milimetrov). Treba mať na zreteli, že základným predpokladom zovšeobecnenej Procrustovskej analýzy (semi) landmarkov v 3D je rovnaká chyba merania v smere všetkých troch osí (x , y a z). Chyby registrácie je možné minimalizovať manuálnou (vizuálnou) kontrolou zápisov alebo automatickou kontrolou v PC.

Pri meraniach všeobecne môžeme hovoriť aj o *náhodnej chybe*, ktorá je dôsledkom nesprávneho náhodného výberu, avšak pri antropologických meraniach na historických populáciách ide o špecifický problém, nakoľko pri pohrebiskách sa merajú všetky nájdene lebky. Keďže tento výber nie je možné ovplyvniť, nemôžeme hovoriť o náhodnom výbere v pravom slova zmysle. Výber je potom ovplyvnený len dostatočnou zachovanosťou lebiek a veľkosťou kostrovej série.

Výsledky a diskusia

Biologická a geometrická homológia

Dve morfológické štruktúry sú *biologicky homologické*, ak reprezentujú biologicky korešpondujúce časti organizmu vytvorené podľa rovnakého telesného plánu, boli vyvinuté z podobných embryonálnych substancií, a teda majú podobné základné štruktúrálne a vývinové zákonitosti reflektujúce spoločný genetický fond a evolučné vzťahy (Wagner, 1989). V GM je potrebné tento koncept preniesť do biometrického kontextu, kde je homológia chápaná ako funkcia, ktorá dáva do vzťahu skôr bod s bodom ako časť k časti organizmu. Potom hovoríme o *biologicky homologických polohách bodov*, kde body sú súčasťou určitej časti organizmu korešpondujúce medzi organizmami. Tieto body sa nazývajú *význačné body* (landmarky) a je možné ich biologicky zmysluplne opísať pomocou matematickej deformácie bodu do iného bodu prostredníctvom nejakej funkcie (zvyčajne ide o Thin-Plate Spline, TPS, metódu tenkých ohybných plátok). Landmarky teda spájajú (1) geometriu meraných častí organizmu, (2) matematickú deformáciu a (3) biologickú interpretáciu. Landmarky sú *geometricky homologické*, ak reprezentujú geometricky a matematicky korešpondujúce body.

Klasifikácia (semi)landmarkov

Historicky boli landmarky najprv klasifikované v 2D (Bookstein, 1997) a neskôr v 3D (Bookstein, Schaefer, 2002 pers. com.; Katina et al., 2007; Weber, Bookstein, 2011). Príklady uvedené nižšie sú vybrané jedným z autorov (SK) v kontexte reliability nezávisle na monografii Booksteina (1997) alebo Webera a Booksteina (2011). Na základe odlišného názoru jedného z autorov (SK) nižšie uvedená kategorizácia nemusí byť zhodná so spomínanými monografiami (zaradenie bodu *orbitale* do iného typu, klasifikácia hybridných bodov a pod.) a/alebo nepublikovaných výpočtov SK, príp. chýb, ktoré sa v týchto monografiách vyskytujú (napr. nesprávna definícia bodov *menton* a *gnathion*).

Klasifikácia landmarkov v 2D. Rozlišujeme tri typy landmarkov (definované v tab. 1 a 2):

1. Typ 1 – *diskrétna juxtapozícia štruktúr* – význačné body, kde sa tri štruktúry stretávajú; body rozvetvenia stromovitých (konárovitých) štruktúr; centrá alebo centroidy „dostatočne malých“ inklúzií (pokiaľ možno konvexné); priesečníky predĺžení kriviek s rovinami symetrie; landmarky typu 1 môžu byť aj hybridy s typom 3 [*prosthion*, *subspinale*, *nasospinale*, *rhinion*, *nasion*, *bregma*, *lambda*, *inion*, *sphenobasion*, *hormion*, *staphylion*, *saurian* (*palate*), *foramen incisivum*, *pseudoalare*, *maxillonasofrontale*, *maxillofrontale*, *dakryon*, *frontomolare orbitale*, *frontomolare temporale*, *zygoorbitale*, *zygomaxillare*, *superior zygomaticum*, *stephanion*, *porion*, *asterion* a *infradentale*];
2. Typ 2 – *maximá krivosti alebo iné lokálne morfometrické štruktúry* – hroty výbežkov a pod., landmarky typu 1 môžu byť aj hybridy s typom 2 ako špička očného zuba, a pod. [*opisthion*, *basion*, *jugale* a *mastoideale*];
3. Typ 3 – *extrémne body* – koncové body dĺžkových mier, centroidy, prieniky medzilandmarkových segmentov, body najvzdialenejšie od týchto segmentov, konštrukcie zahŕňajúce kolmé projekcie a rovnako vzdialené radiálne úseky, landmarky na obryse môžu byť hybridy typu 2 a typu 3 [*gnathion*, *pogonion*, *menton*, *glabella*, *metopion*, *opisthocranion*, *orale*, *orbitale*, *ektokonchion*, *frontotemporale*, *zygion*, *euryon*, *auriculare*, *orale*, *postalveolare*, *canine base*, *ektomolare*, *mentale* a *gonion*].

Klasifikácia (semi)landmarkov v 3D. Táto klasifikácia bola potrebná kvôli pohľadu na landmarky ako súčasť anatomických kriviek a plôch, kde tieto sú nazývané *semilandmarky*, t.j. landmarky medzi landmarkami (pojem (semi)landmark zahŕňa v sebe landmark aj semilandmark). Rozlišuje sa šesť typov (semi)landmarkov (definované v tab. 1 a 2):

1. Typ 1 – *diskrétna juxtapozícia štruktúr* – *rhinion*, *bregma*, *lambda*, *saurian* (*palate*), *maxillonasofrontale*, *dakryon* a *asterion*;
2. Typ 2 – *extrémny krivosti charakterizujúce jednoduché štruktúry* – *subspinale* a *mastoideale*;
3. Typ 3 – *landmarky charakterizované lokálne ako priesečníky dvoch alebo viacerých anatomických kriviek a plôch a symetriou*;
 Typ 3a – *priesečníky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a mediánnej roviny na tej istej ploche* – *prosthion*, *opisthion*, *basion* a *foramen incisivum*;
 Typ 3b – *priesečníky nejakej pozorovanej krivky (alebo priamky) a mediánnej roviny* – *nasion*, *inion*, *sphenobasion*, *orale*, *infradentale* a *menton*;
 Typ 3c – *priesečníky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a nejakej pozorovanej krivky na tej istej ploche* – *pseudoalare*, *maxillofrontale*, *frontomolare orbitale*, *frontomolare temporale*, *zygoorbitale*, *zygomaxillare*, *stephanion* a *superior zygomaticum*;
4. Typ 4 – *(semi)landmarky chrbtovej (hrebeňovej) krivky a symetrickej krivky (v mediánnej rovine)* – *opisthocranion* (hybrid, typ 6), *orbitale*, *ektokonchion* (hybrid, typ 6), *jugale* (hybrid, typ 2), *frontotemporale*, *auriculare* (hybrid, typ 6), *postalveolare*, *canine base*, *gnathion* (hybrid, typ 5), *pogonion* (hybrid, typ 5), *mentale* a *gonion* (hybrid, typ 2);
5. Typ 5 – *(semi)landmarky na plochách* – *zygion*, *euryon* a *ektomolare*;
6. Typ 6 – *skonštruované (semi)landmarky* – *nasospinale* (hybrid, typ 3a), *glabella*, *metopion*, *hormion*, *staphylion* a *porion* (hybrid, typ 1).

Tabuľka 1. Body v mediánnej rovine (Bräuer, 1988; Drozdová, 2004; Kuželka, 1999; Martin, Saller, 1957; modifikované a korigované)

Skratka	Názov	Klasif. 2D	Klasif. 3D	Definícia
<i>pr</i>	prosthion	1	3a	Bod na alveolárnom výbežku čeľuste, ktorý vystupuje najviac dopredu medzi strednými rezákmi v mediánnej rovine.
<i>ss</i>	subspinale	1	2	Bod v mieste, kde predná dolná hrana <i>spina nasalis anterior</i> prechádza na prednú stenu <i>processus alveolaris</i> čeľuste.
<i>ns</i>	nasospinale	1	6	Najhlbší bod spodného okraja <i>apertura piriformis</i> premietnutý do mediánnej roviny.
<i>rhi</i>	rhinion	1	1	Bod ležiaci na dolnom konci <i>sutura internasalis</i> .
<i>n</i>	nasion	1	3b	Priesečník <i>sutura nasofrontalis</i> s mediánnou rovinou.
<i>g</i>	glabella	3	6	Miesto na dolnom okraji čelovej kosti, ktoré leží v mediánnej rovine (najviac vpredku) nad koreňom nosa (<i>sutura frontonasalis</i>) medzi <i>arcus superciliares</i> .
<i>m</i>	metopion	3	6	Bod na priesečníku spojnice najvyšších bodov čelových hrbolov s mediánnou rovinou.
<i>b</i>	bregma	1	1	Bod, v ktorom sa stretáva <i>sutura sagittalis</i> so <i>sutura coronalis</i> .
<i>l</i>	lambda	1	1	Bod, v ktorom sa stretávajú obe ramená <i>sutura lambdoidea</i> so <i>sutura sagittalis</i> .
<i>i</i>	inion	1	3b	Bod ležiaci v mieste, v ktorom sa spájajú obe <i>lineae nuchae superiores</i> .
<i>op</i>	opisthocranion	3	4	Najposteriórnejší bod na záhlavnej kosti ležiaci v mediánnej rovine.
<i>o</i>	opisthion	2	3a	Bod na zadnom okraji <i>foramen magnum</i> v mieste, kde ním prechádza mediánna rovina.
<i>ba</i>	basion	2	3a	Bod na prednom okraji <i>foramen magnum</i> v mieste, kde ním prechádza mediánna rovina.
<i>sphba</i>	sphenobasion	1	3b	Priesečník <i>synchondrosis sphenoccipitalis</i> s mediánnou rovinou.
<i>ho</i>	hormion	1	6	Priesečník miesta, kde nasadá zadný okraj <i>vomeru</i> na telo klinovej kosti s mediánnou rovinou medzi <i>ala vomeris</i> .
<i>sta</i>	staphylion	1	6	Priesečník dotýčnice spájajúcej najviac vpredku ležiace body zadných okrajov obidvoch podnebných kostí s mediánnou rovinou.
<i>sr</i>	saurian (palate)	1	1	Bod na priesečníku <i>sutura palatina mediana</i> a <i>sutura palatina transversa</i> .
<i>fi</i>	foramen incisivum	1	3a	Priesečník <i>sutura palatina mediana</i> a zadného okraja <i>foramen incisivum</i> .
<i>ol</i>	orale	3	3b	Bod ležiaci na prednom okraji tvrdého podnebia, v ktorom sa kríži priamka spájajúca zadné okraje alveol oboch horných stredných rezákov s mediánnou rovinou.
<i>id</i>	infradentale	1	3b	Bod medzi strednými rezákmi sánky, v ktorom sa kríži predná hrana alveolárneho výbežku s mediánnou rovinou.
<i>gn</i>	gnathion	3	4	Najinferiornejší bod na dolnom okraji sánky v mediánnej rovine.
<i>pg</i>	pogonion	3	4	Najvyšší bod (najanteriórnejší) bod <i>protuberantia mentalis</i> v mediánnej rovine.
<i>me</i>	menton	3	3b	Najanteriórno-inferiornejší bod na symfýze sánky v mieste dotyku línie vychádzajúcej z bodu gonion.

Pozorované krivky sú krivky, ktoré vznikajú ako prienik dvoch hladkých anatomických plôch alebo ako prienik hladkej anatomickej plochy s rovinou (napr. rovinou symetrie). *Chrbtová (hrebeňová) krivka* je krivkou, ktorej zakrivenie kolmé na jej smer je maximálne v tomto smere. *Symetrická krivka* je krivka, ktorej odhad pomocou metódy najmenších štvorcov (MNS) patrí do mediánnej roviny. Medzi pozorované krivky patria: lebečné švy, symfýza sánky a obrys lebky v 2D projekcii; medzi chrbtové krivky patria: hrana *arcus superciliaris*, hrana *apertura piriformis*, hrana orbity, alveolárny hrebeň, hrana sánky; medzi symetrické krivky patria: symfýza sánky a *sutura sagittalis*.

Reliabilita, biologická a geometrická homológia (semi)landmarkov

Landmarky typu 1 sú vždy biologicky a geometricky homologické. Landmarky ostatných typov nie sú skoro nikdy biologicky homologické, ale vždy sú geometricky homologické.

Landmarky digitalizované v 2D z jednotlivých noriem obsahujú najmenej dve tretiny informácie obsiahnutej v 3D. Z toh-

to dôvodu je presnejšie digitalizovať (semi)landmarky priamo v 3D alebo v zrekonštruovanom 3D z niekoľkých projekcií (noríem). Z tohto hľadiska je 2D možné používať len vtedy, keď 3D nie je k dispozícii (Katina et al., 2004; Šefčáková, Katina, 2008). Definície mnohých landmarkov sú vytvorené za predpokladu orientácie lebky vo *Frankfurtskej horizontále* a obsahujú v sebe orientácie – anteriórnu, posteriórnu, inferiórnu, superiórnu, mediálnu a/alebo laterálnu. Mnohé landmarky sú definované ako prienik nejakej krivky (príp. štruktúry) s *mediánnou rovinou*. Obe tieto roviny však nie je možné v praxi objektívne pred meraním určiť, dá sa len subjektívne odhadnúť ich poloha. Preto landmarky, ktorých definície sú závislé od orientácie alebo prieniku s mediánnou rovinou, môžu mať teoreticky horšiu reliabilitu ako landmarky s definíciou nezávislou od týchto noríem (napr. *glabella*, *orbitale*, *zygion*, *gnathion* a *menton*).

Ďalej je možné predpokladať, že (semi)landmarky na krivkách môžu mať reliabilitu horšiu v smere krivky ako v smere na ňu kolmom [všetky (semi)landmarky okrajov očí, napr. *orbitale* a *ektokonchion*]. Torzia krivky by na reliabilitu vplyv

Tabuľka 2. Bilaterálne body (Bräuer, 1988; Drozdová, 2004; Kuželka, 1999; Martin, Saller, 1957; modifikované a korigované)

Skratka	Názov	Klasif. 2D	Klasif. 3D	Definícia
<i>psa</i>	pseudoalare	1	3c	Bod, kde sa stretáva <i>sutura nasomaxillaris</i> s <i>apertura piriformis</i> .
<i>mnf</i>	maxillonasofrontale	1	1	Bod ležiaci v mieste, kde sa stretávajú švy <i>sutura frontonasalis</i> , <i>sutura frontomaxillaris</i> a <i>sutura nasomaxillaris</i> .
<i>mf</i>	maxillofrontale	1	3c	Bod na vnútornom okraji očnice (<i>crista lacrimalis anterior</i> – jej predĺženie), ktorým prechádza <i>sutura frontomaxillaris</i> .
<i>d</i>	dakryon	1	1	Bod na vnútornom okraji očnice, v ktorom sa spája čelová kosť s čelovým výbežkom hornej čeľuste a slznou kosťou.
<i>fmo</i>	frontomolare orbitale	1	3c	Bod na laterálnom okraji očnice, v ktorom ho pretína <i>sutura frontozygomatica</i> .
<i>fnt</i>	frontomolare temporale	1	3c	Najlaterálnejší bod <i>sutura frontozygomatica</i> , v mieste, kde bočná plocha <i>processus zygomaticus</i> čelovej kosti prechádza do zadnej plochy.
<i>zo</i>	zygoorbitale	1	3c	Priesečník dolného okraja očnice so <i>sutura zygomaticomaxillaris</i> .
<i>or</i>	orbitale	3	4	Najnižší bod spodného okraja očnice.
<i>ek</i>	ektokonchion	3	4	Bod na laterálnom okraji očnice v mieste, kde ho pretína priamka vychádzajúca z bodu <i>mf</i> a rovnobežná s horným okrajom očnice.
<i>zm</i>	zygomaxillare	1	3c	Najnižšie položený bod <i>sutura zygomaticomaxillaris</i> .
<i>ju</i>	jugale	2	4	Bod vo vrchole uhla, ktorý zvierajú <i>processus frontalis</i> a <i>processus temporalis</i> jarmovej kosti.
<i>zy</i>	zygion	3	5	Najlaterálnejšie položený bod na jarmovom oblúku.
<i>sz</i>	superior zygomaticum	1	3c	Najsuperiornejší bod ležiaci na <i>sutura zygomaticotemporalis</i> .
<i>ft</i>	frontotemporale	3	4	Bod nad <i>processus zygomaticus</i> čelovej kosti v najmediánnejšom mieste prehnutia <i>linea temporalis (superior)</i> .
<i>st</i>	stephanion	1	3c	Bod, v ktorom <i>sutura coronalis</i> pretína <i>linea temporalis</i> .
<i>au</i>	auriculare	3	4	Najlaterálnejší bod ležiaci na koreni jarmového oblúka, kolmo nad stredom <i>porus acusticus externus</i> .
<i>po</i>	porion	1	6	Bod na hornom okraji <i>porus acusticus externus</i> , ktorý je kolmo nad jeho stredom.
<i>eu</i>	euryon	3	5	Najlaterálnejší bod mozgovne.
<i>ast</i>	asterion	1	1	Bod v mieste dotyku švov <i>sutura lambdoidea</i> , <i>sutura occipitomastoidea</i> a <i>sutura parietomastoidea</i> .
<i>ms</i>	mastoideale	2	2	Bod ležiaci najnižšie na vonkajšej strane hrotu <i>processus mastoideus</i> .
<i>pa</i>	postalveolare	3	4	Bod ležiaci na najposteriornejšom konci alveolárneho hrebeňa.
<i>cb</i>	canine base	3	4	Bod ležiaci v strede alveolárneho okraja očného zuba.
<i>ekm</i>	ektomolare	3	5	Najlaterálnejší bod na vonkajšej ploche alveolárneho hrebeňa čeľuste.
<i>ml</i>	mentale	3	4	Najnižší bod na obvode <i>foramen mentale</i> .
<i>go</i>	gonion	3	4	Bod na uhle sánky, v ktorom sa spája spodný okraj tela a zadný okraj ramena sánky, orientovaný najviac inferiorne, posteriorne a laterálne.

mať nemala. Reliabilita (semi)landmarkov na ploche je závislá od jej krivosti, kde menej zakrivená plocha môže prinášať horšie možnosti na určenie súradníc (semi)landmarkov ako viac zakrivená plocha (napr. *gnathion*, *euryon*).

Zachovanosť štruktúr na ploche lebky, ako napr. švov (*sutura lambdoidea*, *s. occipitomastoidea* a *s. parietomastoidea*) alebo pozorovaných a chrbtových (hrebeňových) kriviek (*lineae temporales* a ich možné rozdelenie a následná nutná modifikácia definície polohy bodov), hrá tiež dôležitú úlohu pri meraní súradníc (napr. *asterion* a *frontotemporale*). Neprítomnosť štruktúr (napr. odlomený dolný okraj nosových kostí) takisto znemožňuje spoľahlivo zmerať súradnice niektorých (semi)landmarkov (napr. *nasospinale* a *rhinion*).

Reliabilitu merania môže tiež negatívne ovplyvniť „manuálna“ konštrukcia (napr. *opisthocranion*, *staphylion*, *ektokonchion* a *auriculare*). Do kategórie „manuálnych“ („vizuálnych“) výpočtov patrí aj meranie súradníc (semi)landmarkov ako extrémov zakrivenia (porovnaj napr. *subspinale*, *mastoideale*, *gnathion* a *gonion*).

Je dôležité zdôrazniť, že matematickým výpočtom v PC je

možné „manuálne“ merania spresniť alebo nahradiť. Ako príklad uvádzame priesečníky s mediálnou rovinou (napr. *pogonion*, *glabella*, *opisthion* a *basion*), (semi)landmarky závislé od orientácie (napr. *gnathion*, *menton*, *glabella*, *orbitale* a *zygion*), skonštruované (semi)landmarky (napr. *staphylion*, *ektokonchion* a *auriculare*), (semi)landmarky ako lokálne extrémne zakrivenia (napr. *mastoideale*, *gonion*, *gnathion* a *subspinale*) a koncové body dĺžkových mier (napr. *opisthocranion*, *zygion* a *euryon*).

Miery a indexy a ich geometrická homológia

V KM je známych približne 120 mier a 80 indexov na lebke, dĺžkové miery sú definované pomocou (semi)landmarkov. Práve pre toto prepojenie s GM vyberáme najčastejšie používané a zároveň ilustračné miery a indexy z pohľadu GM (tab. 3; napr. Šefčáková et al., 2011).

Zabezpečiť biologickú homológiu mnohých vyššie spomenutých lineárnych mier a indexov je náročné, nakoľko miery nie sú definované pomocou biologicky homologických landmarkov /napr. M1, M8, M9, M11, M45, M47, M51, M52, M54 a M61; ďalej aj I1, I2, I3, I13, I38, I39, I42, I48, I55, I69, I71

Tabuľka 3. Definície mier a indexov (Bräuer, 1988; Drozdová, 2004; Kuželka, 1999; Martin, Saller, 1957; modifikované a korigované)

Skratka	Názov	Definícia
M1	najväčšia dĺžka mozgovne	Euklidovská vzdialenosť <i>glabella</i> – <i>opisthocranion</i> .
M5	dĺžka bázy lebky	Euklidovská vzdialenosť <i>nasion</i> – <i>basion</i> .
M8	najväčšia šírka mozgovne	Euklidovská šírka mozgovne kolmá na mediánnu rovinu, vzdialenosť <i>euryon sin.</i> – <i>euryon dex.</i>
M9	najmenšia šírka čela	Euklidovská vzdialenosť <i>frontotemporale sin.</i> – <i>frontotemporale dex.</i>
M11	biaurikulárna šírka	Euklidovská vzdialenosť <i>auriculare sin.</i> – <i>auriculare dex.</i>
M17	basion-bregmatická výška lebky	Euklidovská vzdialenosť <i>basion</i> – <i>bregma</i> .
M40	dĺžka tváre	Euklidovská vzdialenosť <i>basion</i> – <i>prosthion</i> .
M45	bizygomatická šírka tváre	Euklidovská vzdialenosť <i>zygion sin.</i> – <i>zygion dex.</i>
M47	výška tváre	Euklidovská vzdialenosť <i>nasion</i> – <i>gnathion</i> .
M48	výška hornej časti tváre	Euklidovská vzdialenosť <i>nasion</i> – <i>prosthion</i> .
M51	šírka očnice	Euklidovská vzdialenosť <i>maxillofrontale</i> – <i>ektoknion</i> .
M52	výška očnice	Euklidovská vzdialenosť horného a dolného okraja očnice kolmo na M51.
M54	šírka nosa	Najväčšia šírka <i>apertura piriformis</i> .
M55	výška nosa	Euklidovská vzdialenosť <i>nasion</i> – <i>nasospinale</i> .
M61	maxilloalveolárna šírka	Euklidovská vzdialenosť <i>ektomolare sin.</i> – <i>ektomolare dex.</i>
I1	dĺžko-šírkový index	M8/M1
I2	dĺžko-výškový index	M17/M1
I3	šírko-výškový index	M17/M8
I13	transverzálny frontoparietálny index	M9/M8
I38	index tváre	M47/M45
I39	index hornej časti tváre	M48/M45
I42	index očnice	M52/M51
I42(1)	index orbitofacialis transversalis	M51/M45
I42(2)	index orbitofacialis verticalis	M52/M48
I48	index nosa	M54/M55
I55	index platofacialis transversalis	M61/M45
I60	čelustný index	M40/M5
I69	dĺžkový kraniofaciálny index	M40/M1
I71	transverzálny kraniofaciálny index	M45/M8
I73(a)	jugofrontálny index	M9/M45

a I73(a)/. Geometrickú homológiu však možno zabezpečiť, avšak len matematicky.

Klasifikácia anatomických kriviek a plôch na ľudskej lebke

Príkladmi kriviek na ľudskej lebke sú:

1. *alveolárna krivka (sin./dex.)* – krivka pozdĺž vonkajšieho okraja alveolárneho oblúka, začínajúca sa v bode *prosthion*, pokračujúca cez *canine base* do *postalveolare*;
2. *krivka nosovej apertúry (krivka hruškovitého otvoru, sin./dex.)* – krivka pozdĺž okraja/hrany *apertura piriformis*, začínajúca sa v bode *rhinion* a končiacia sa v bode *nasospinale*;
3. *očnicová krivka (sin./dex.)* – krivka pozdĺž hrany očnice, začínajúca sa v *maxillofrontale*, pokračujúca cez *frontomolare orbitale*, *zygoorbitale* a končiacia sa opäť v *maxillofrontale*;
4. *krivka arcus superciliaris (krivka obočného oblúka, sin./dex.)* – krivka začínajúca v bode *glabella*, pokračujúca pozdĺž *arcus superciliaris* do *frontomolare temporale*;
5. *zygomatická krivka (krivka jarmového oblúka, sin./dex.)* – krivka z bodu *auriculare*, pokračujúca po hornej hrane *arcus zygomaticus* a cez *jugale* do koncového bodu *frontomolare temporale*;
6. *nuchálna krivka (sin./dex.)* – krivka začínajúca sa v bode *mastoideale*, pokračujúca po *lineae nuchae superiores* a končiacia sa v bode *inion*;
7. *mediánná krivka* – krivka prieniku mediánnnej roviny s plochou lebky začínajúca sa v bode *rhinion*, potom prechádzajúca cez body *nasion*, *glabella*, *metopion*, *bregma* a *inion*, končiacia sa v bode *opisthion*.

Očnicová krivka je *krivkou uzavretou*, ostatné sú *otvorené krivky*, kde sú koncové body buď fixované alebo otvorené v závislosti od toho, či je optimalizácia (relaxácia; pozri ďalej) polohy koncových bodov povolená alebo nie. Mediánná krivka je typom *nepárovej krivky*, všetky ostatné sú *párové krivky*.

Pod *anatomickou plochou* rozumieme plochu objektu (lebky) definovanú dostatočným množstvom geometricky homologických semilandmarkov. Hranice *uzavretej (úplne ohraničenej) analytickej plochy* tvoria výhradne (semi)landmarky, anatomické krivky alebo prienik plochy s rovinou symetrie. Hranice *častočne otvorenej (častočne ohraničenej) analytickej plochy* musia obsahovať aspoň jednu časť definovanú len semilandmarkami na ploche, kde nie je hranicou ani krivka a ani rovina symetrie.

Veľmi užitočná je aj práca s *klasickými plochami* (softvér Landmark), kde je možné súradnice bodov na ploche pomocou deviatich kontrolných bodov merať a navyše určiť množstvo rovnomerne rozdelených bodov medzi kontrolnými bodmi. V softvéri Landmark sa dá pracovať aj s *flexibilnými plochami*, kde možno hranice plochy modifikovať pomocou ďalších kontrolných bodov medzi deviatimi bodmi z klasickej plochy.

Príkladmi anatomických plôch (ohraničených bodmi, krivkami a prienikom plochy s rovinami) na ľudskej lebke sú:

1. *čelová plocha* – ohraničená krivkou *arcus superciliaris*, *linea temporalis* a *sutura coronalis*;
2. *nosová plocha (plocha nosových kostí) (sin./dex.)* – ohraničená *sutura internasalis*, *sutura frontonasalis* a *suturae nasomaxillares*;
3. *maxilárna plocha (sin./dex.)* – ohraničená krivkou hrany *apertura piriformis*, *sutura frontomaxillare*, *očnicová*

vou krivkou, sutura zygomaticomaxillaris, alveolární krivkou a prienikom plochy os maxillare s mediánnou rovinou;

4. zygomatická plocha (sin./dex.) – ohraničená sutura zygomaticomaxillaris, očníkovou krivkou, sutura frontozygomatica, zygomatickou krivkou a sutura zygomaticotemporalis;
5. parietálna plocha (sin./dex.) – ohraničená linea temporalis, sutura coronalis, prienikom plochy neurokránia s mediánnou rovinou, nuchálnou krivkou;
6. temporálna plocha (sin./dex.) – plocha os temporale;
7. okcipitálna plocha (sin./dex.) – plocha os occipitale;
8. plocha podnebnéj kosti (sin./dex.) – plocha os palatinum;
9. plocha sánky – plocha mandibuly.

Plocha čelovej kosti a sánky sú *nepárové plochy*, ale je možné ich rozdeliť mediánnou rovinou na dve párové časti, v prípade sánky symfýzou). Ďalšie plochy sú *plochy párové*. Čelová, nosová, maxilárna, zygomatická, parietálna plocha, plocha podnebia a plocha sánky sú *plochy uzavreté*. Okcipitálna a temporálna sú *plochy čiastočne otvorené*. Plochy môžeme získať použitím prístroja MicroScribe® G2 ako oblak alebo sieť bodov, ktorý je potrebné následne matematicky spracovať, alebo z CT, kde je nutné na segmentáciu kosti buď špecifický „threshold“ alebo kosť manuálne segmentovať napr. v programe Amira. Výstupom je potom napr. súbor „obj“, ktorý obsahuje plochu lebky v podobe súradníc bodov, popisuje trianguláciu tejto plochy, príp. normály v bodoch a pod.

Poloautomatizované a automatizované meranie súradníc (semi)landmarkov

Je potrebné položiť otázku, či je možné merania poloautomatizovať alebo úplne automatizovať. *Poloautomatizované meranie súradníc* je meranie vykonávané v PC v nejakom 3D softvéri (napr. Landmark, Amira, Edgewarp a EVAN Toolbox), kde toto meranie môže byť spresnené pohľadom na viaceré 2D normy súčasne (Edgewarp a EVAN Toolbox), rotáciou 3D objektu v rovine rovnobežnej s pohľadom (Landmark), zobrazovaním *normál* meraných bodov (Landmark) alebo možnosťou pridať jednu dimenziu v podobe napr. farebne rozlíšeného znamienka krivosti (Landmark). Ďalšou pomôckou je možnosť práce s *krivkami* (Landmark), kde je možné súradnice bodov na krivke pomocou troch kontrolných bodov nielen merať, ale aj určiť množstvo ekvidistantných bodov na krivke, resp. v prípade potreby časti kriviek spájať do jednej krivky.

Automatizované meranie súradníc je meranie vykonávané v PC len pomocou nejakého matematického algoritmu, kde automatizácia striktné závisí od toho, či je matematický algoritmus presnejší a či sa dá vôbec použiť. Jeho použiteľnosť je daná aj tým, nakoľko je 3D rekonštrukcia (použitím MicroScribe® G2, laserového skenera, stereogrametrického kamerového systému alebo CT a pod.) vierohodná, teda ako sa podobá originálu lebky. Ďalším dôležitým kritériom je, či sa dá výpočtom doceliť geometrickú homológiu (semi)landmarkov na anatomických krivkách a plochách v celom náhodnom výbere. Ide o zovšeobecnenie geometrickej homológie landmarkov na krivky a plochy definované pomocou (semi)landmarkov. Tu sa *geometrická homológia* (semi)landmarkov na krivke chápe v zmysle minimalizácie nejakého matematického kritéria (ohybovej energie TPS alebo procrustovskej vzdialenosti; Bookstein, 1997), kde sa bod posúva po krivke dovtedy, pokiaľ jeho poloha (ako argument minimalizácie) nebude v zmysle kritéria optimálna. Preto hovoríme aj o *optimalizácii polohy bodu na krivke*. Žiada sa zdôrazniť, že ekvidistantne vzdialené body na krivke nie sú geometricky homologické. Aj napriek tomu však krivky ako celky môžu byť biologicky homologické (napr. lebečné švy). Optimalizácia polohy bodov na krivke na určitom objekte sa deje vždy vo vzťahu k nejakej referenčnej krivke

a ide o iteračný proces. Po zovšeobecnenej procrustovskej superimpozícii (ZPS) sa vykoná prvý krok, nájdu sa optimálne polohy bodov všetkých kriviek vo vzťahu k prvému odhadu procrustovského priemeru, potom nasleduje ďalšia ZPS atď. až dovtedy, pokiaľ je rozdiel predposledného a posledného kroku menší (v zmysle poklesu matematického kritéria) ako nejaké dostatočne malé číslo (prah, threshold). Podobný algoritmus sa aplikuje aj na body na ploche.

Porovnanie pozitív a negatív merania v 2D a 3D prístupe

Metodika merania súradníc (semi)landmarkov a výpočtu ich reliability na 2D fotografiách ako projekciách šiestich pohľadov (frontálny, laterálny sin. a dex., bazálny, vertikálny a okcipitálny) je problematická z viacerých uhlov pohľadu. Podľa vlastnej skúsenosti (SK) môžeme konštatovať, že rotácia lebky o uhol $\pm 5^\circ$ od jednej z vyššie spomenutých siedmich rovin kolmých na rovinu pohľadu vedie k umelým deformáciám získavaného obrazu, ktoré skutočnú variabilitu merania značne skresľujú. Z toho dôvodu nie je možné hovoriť o kolmých (ortogonálnych) projekciách lebky do rovin kolmých na rovinu pohľadu. Navyše je možné tieto roviny približne odhadnúť len z 3D rekonštrukcie lebky pomocou (semi)landmarkov, teda striktné matematicky, ako roviny najbližšie k množine vybraných (semi)landmarkov v zmysle MNŠ. Príkladom týchto rovin potrebných v 3D kvôli štandardnej orientácii lebky sú:

1. *Frankfurtská horizontála* – MNŠ rovina štatisticky odhadnutá zo súradníc štyroch bodov *porion sin. a dex., orbitale sin. a dex.*
2. *Mediánná rovina* – MNŠ rovina štatisticky odhadnutá zo súradníc všetkých nepárových (semi)landmarkov (možno ju použiť aj pri analýze asymetrie lebky).

Nepresnosť manuálneho stanovenia Frankfurtskej horizontály vyplýva z porušenia teoretického predpokladu geometrie štyroch bodov v rovine, kde úsečky *porion sin. – orbitale sin. a porion dex. – orbitale dex.* nemusia ležať v jednej rovine (a spravidla neležia, čo sa dá preveriť jedine matematicky, nakoľko nie je možné nastaviť lebku kranioforom presne do Frankfurtskej horizontály a ani asymetriu lebky presne ohodnotiť vizuálne), čo vedie k nepresnosti merania mnohých mier. Podobne manuálne stanovenie mediánnej roviny vedie k ďalším nepresnostiam, ktoré sú skomplikované hlavne veľkým počtom nepárových (semi)landmarkov. Chyby stanovenia mediánnej roviny sa potom v praxi kombinujú s nepresným stanovením Frankfurtskej horizontály.

Nezávisle na tom, či je lebka v normách nasnímaná správne alebo nesprávne, lineárne rozmery projektované do roviny (normy) budú kratšie, ak ich koncové body neležia v jednej rovine rovnobežnej s normou. Rotácia lebky o nejaký uhol od normy túto chybu ešte zväčší.

Ak získame nejakú nepriamu lineárnu mieru, teda mieru doloženú z viacerých priamo zmeraných lineárnych mier, táto nepriama miera bude akceptovateľná len vtedy, ak všetky koncové body ležia na jednej priamke. Napríklad suma nasledovných štyroch vzdialeností: vzdialenosť *nasion – prosthion* (výška tváre M48), vonkajšia výška prvého horného rezáka (M91), vonkajšia výška prvého dolného rezáka (M91) a vzdialenosť *infradentale – gnathion* (výška brady M69) je väčšia ako vzdialenosť *nasion – gnathion*. Táto nepriama miera preto nie je akceptovateľná ako vzdialenosť *nasion – gnathion*, nakoľko landmarky *nasion, prosthion, infradentale a gnathion* neležia na jednej priamke. Navyše *nasion a gnathion* neležia v rovine rovnobežnej s rovinou 2D snímky pri frontálnej norme, preto ich zmeraná vzdialenosť bude kratšia ako ich skutočná vzdialenosť.

Vlastné snímání lebky v jednotlivých normách by malo byť vykonané tak, aby os objektívu fotoaparátu bola kolmá na rovinu stanovenú príslušnou normou a navyše bola na kolmici vychádzajúcej z centroidu lebky (tento je možné odhadnúť len približne). Pri snímaní existuje veľa ďalších technických problémov spojených s fotografickým postupom, ktoré nie sú predmetom tohto článku.

Pri manuálnom 3D meraní je nutné, aby bol uhol pohľadu merajúceho človeka kolmý na malú oblasť lebky, v ktorej sa landmark nachádza. Tento pohľad je dobré kombinovať s pohľadom z iných uhlov, čo je možné len sekvenčne za sebou. V 2D takýto postup nahrádza kolmý pohľad na malú oblasť fotografie lebky okolo landmarku. Pri poloautomatickom 3D meraní je možné nahliadnuť na oblasť okolo landmarku z troch rôznych rovín pohľadu simultánne, ako aj priamo v 3D. 3D obraz je možné rotovať podľa potreby, čo je veľkou výhodou oproti 2D meraniu a manuálnemu 3D meraniu. Tým sa zabezpečí maximalizácia presnosti merania.

Meranie alebo vypočítanie hodnoty skutočného alebo *antropometrického rozmeru* (tu lineárneho) je možné len v 3D, keď jej výpočtovo zodpovedá euklidovská vzdialenosť dvoch bodov. Z hľadiska kompletnosti opisu musíme spomenúť aj ďalšie tri podzložky mier, ktoré predstavujú dekompozíciu antropometrickej miery na komponenty x , y a z za predpokladu, že lebka je orientovaná do Frankfurtskej horizontály a mediánnej roviny súčasne:

1. *komponent mediánno-laterálny* (x -komponent), rovný absolútnej hodnote rozdielu x -ových súradníc dvoch bodov;
2. *komponent inferio-superiórny* (y -komponent), rovný absolútnej hodnote rozdielu y -ových súradníc dvoch bodov;
3. *komponent postero-anteriórny* (z -komponent), rovný absolútnej hodnote rozdielu z -ových súradníc dvoch bodov.

Zoznam je modifikovaný podľa Farkasa (1994), ktorý uvádza komponenty y a z opačne a nehovorí o komponentoch, ale o pozíciách v zmysle relatívnej polohy bodov z pohľadu anatomického súradnicového systému. Náš systém vychádza z konvencie používanej v počítačovej grafike, kde x -os je horizontálna (orientovaná zľava – doprava, s pozitívnou poloosou vpravo od nuly), y -os vertikálna (orientovaná zdola – hore, s pozitívnou poloosou nad nulou) a z -os je orientovaná v smere kolmom na xy -rovinu (rovinu obrazovky, s pozitívnou poloosou pred obrazovkou). Na rozdiel od Farkasa (1994) je logickejšie hovoriť *inferio-superiórny* a nie *superio-inferiórny* (podobne *postero-anteriórny* a nie *anterio-posteriórny*) v zmysle jednotnej orientácie jednotlivých komponent (smere od negatívnej k pozitívnej poloosi). Na tomto mieste je treba upozorniť, že vzorec uvedený v publikácii Farkasa (1994) je nesprávny a pri podobných výpočtoch odporúčame postupovať podľa Vinceho (2005).

Výpočet reliability merania

Intraindividuálne a interindividuálne chyby možno objektívne matematicky hodnotiť buď zvlášť pre x a y súradnice (ako *výberový rozptyl* x a y súradníc), alebo simultánne ako *celkový rozptyl* (stopa kovariančnej matice príslušného landmarku). Výpočet prebieha pomocou lineárneho zmiešaného regresného modelu so strednou hodnotou x a y súradníc ako fixnými efektmi, identifikačné číslo osoby, ktorá meria, a poradia opakovania ako náhodnými efektmi. Chyby sú počítané v absolútnej škále v milimetroch a tiež v relatívnej škále škálované *výberovým rozptylom* x a y súradníc každého landmarku, resp. *celkovým výberovým rozptylom*. Merania na minimálne jednej lebke (optimálne piatich) je potrebné opakovať aspoň päťkrát pri účasti aspoň dvoch (optimálne päť) osôb merajúcich pri štandardizo-

vaných podmienkach. Nakoniec získame rozsah výberu pre výpočet reliability rovný minimálne $10 = 1 \times 5 \times 2$ (optimálne $125 = 5 \times 5 \times 5$). K hodnoteniu reliability treba pridať aj opakované snímání toho istého objektu (lebky, aspoň dvakrát) laserovým skenerom, stereogrametrickým kamerovým systémom alebo CT (podľa použitého prístroja).

Záver

Článok predkladá nové teoretické poznatky v oblasti reliability merania na ľudskej lebke z pohľadu klasickej ako aj geometrickej morfometrie. Publikované klasifikácie (semi)landmarkov sú doplnené o príklady, ktoré doteraz publikované v tekejšej šírke neboli. Ďalšími prínosmi článku sú:

- 1) diskusia o reliability vo vzťahu k biologickej a geometrickej homológii (semi)landmarkov, mier a indexov;
- 2) klasifikácia anatomických kriviek a plôch na ľudskej lebke;
- 3) diskusia o poloautomatickom a automatickom meraní súradníc (semi)landmarkov;
- 4) popis algoritmu výpočtu reliability merania, ktorého použitie by malo byť základom metodiky každého morfometrického článku.

Použitie 2D fotografií (vrátane sklenených negatívov) na meranie možno z hľadiska reliability použiť len v prípadoch, keď nie je originálna lebka v 3D k dispozícii. Ak máme k dispozícii lebku alebo jej časť v 3D, použitie medzilandmarkových vzdialeností na analýzu nepostačuje. Na opis tak komplexného objektu ako je ľudská lebka alebo nejaká jej časť, nestačí len použitie landmarkov, ale je nutné použiť okrem landmarkov aj anatomické krivky, ktoré je optimálne doplniť aj o anatomické plochy.

Ako vidieť z predchádzajúceho textu – tam, kde sa v našom prípade končí práca v oblasti antropológie, začína sa práca v oblasti počítačovej geometrie a fyziky na získanie počítačovej rekonštrukcie objektu, po ktorej nasleduje práca numerického matematika alebo štatistika, čo možno doplniť prácou z oblasti diferenciálnej geometrie a pod. Je zrejme, že GM je *interdisciplinárna veda* na pomedzí niekoľkých prírodovedných odborov, ktoré by mali v záujme vedy spolupracovať.

Pre morfometriu, či už klasickej alebo geometrickej, je dôležité, aby sa teoretické znalosti rozdiskutované v tomto článku aplikovali priamo do praxe. Tým sa vylepšia merania prostredníctvom zníženia veľkosti a pravdepodobnosti systematických chýb na minimálnu možnú mieru, najmä v prípade maximálneho (kompromisného) použitia automatizácie merania, 3D počítačovej grafiky a matematických výpočtov v PC. Následné použitie statickej štatistickej grafiky a animácií umožní zobraziť výsledky merania v podobe, akú antropológia v čase Martina, Sallera a Knussmana ešte nepoznala. Napriek tomu treba konštatovať, že ich práce boli na ten čas priekopnícke a predbehli svoju dobu, ktorú matematika, štatistika a počítačová grafika dobehla len v poslednom desaťročí.

Podakovanie

Táto štúdia bola podporená grantom VEGA 1/0133/10 „Applikácia geometrickej morfometrie na stanovenie exogénnych prvkov v ranostredovekých populáciách Slovenska“. Autori ďakujú anonymným oponentom za detailnú revíziu rukopisu, ktorá prispela k jeho skvalitneniu.

Súhrn

Cieľom predloženej štúdie je konfrontovať metódy tradičnej (klasickej) morfometrie (TM) s metódami geometrickej morfometrie (GM). TM využíva priame meranie metrických charakteristík sledovaného objektu s použitím antropometrických prístrojov. Pomocou GM je objekt analyzovaný vo virtuálnom

prostředí a okrem metrických charakteristík umožňuje sledovať aj jeho tvar nezávisle na jeho polohe, orientácii a veľkosti. Predložená štúdia je zameraná na klasifikáciu chýb súvisiacich s meraním v TM a GM, ako aj na možnosti ich minimalizácie. Uvedený je tiež prehľad a klasifikácia (semi)landmarkov v závislosti od ich reliability. Kým pri 2D analýzach rozlišujeme len 3 typy landmarkov, pri 3D prístupe je možné rozlíšiť až deväť typov (semi)landmarkov. Definované sú aj vybrané krivky a plochy na lebke. Z porovnania 2D a 3D analýz vyplýva, že použitie 2D fotografií je vhodné na meranie použiť len v prípade, ak analyzovaná lebka nie je k dispozícii. Len nepatrná rotácia lebky od tzv. štandardizovaných rezov lebky (noriem) vedie k umelým deformáciám, ktoré skutočnú variabilitu merania veľmi skresľujú. 3D prístup, na rozdiel od 2D prístupu, ponúka nielen bohatšiu informáciu o tvare objektu nielen pridaním tretích súradníc landmarkov, ale aj presnejšie merania aj vďaka matematickým výpočtom Frankfurtskej horizontály a mediánnej roviny. Komplexnosť popisu ľudskej lebky v 3D pomocou súradníc landmarkov je obohatená súradnicami semi-landmarkov na krivkách a plochách, ktoré musia byť geometricky homologické, čo je aj základným predpokladom pri výpočte lineárnych mier. Hlavnou výhodou GM je zachovanie geometrie študovaného objektu a možnosť tvorby grafických výstupov asociovaných s tvarovými zmenami. Avšak štatistická analýza GM dáť je podstatne zložitejšia v porovnaní s analýzou TM dáť v dôsledku mnohorozmerných vzťahov súradníc (semi) landmarkov, ale na druhej strane je obohatená o triangulované body na ploche. V GM je dôležitá spolupráca antropológov s matematikmi, štatistikmi a informatikmi – začínajúc dizajnom merania, ako aj počas merania, s cieľom eliminovať chyby merania, ďalej aj počas štatistických analýz a končiac interpretáciou výsledkov použitím statických a animovaných štatistických vizualizačných metód.

Literatúra

- ADAMS, DC., ROHLF FJ., SLICE DE. Geometric morphometrics: Ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology*, 2004, vol. 71, p. 5–16.
- BENAZZI, S., BERTELLI, P., LIPPI, B., BEDINI, E., CAUDANA, R., GRUPPIONI, G., MALLEGGNI, F. Virtual anthropology and forensic arts: the facial reconstruction of Ferrante Gonzaga. *Journal of Archaeological Science*, 2010, vol. 37, p. 1572–1578.
- BENAZZI, S., COQUERELLE, M., FIORENZA, L., BOOKSTEIN, FL., KATINA, S., KULLMER, O. Comparison of Dental Measurement Systems for Taxonomic Assignment of First Molars. *American Journal of Physical Anthropology*, 2011a, vol. 144, no. 3, p. 342–354.
- BENAZZI, S., FIORENZA, L., KATINA, S., BRUNER, E., KULLMER, O. Quantitative Assessment of Interproximal Wear Facet Outlines for the Association of Isolated Molars. *American Journal of Physical Anthropology*, 2011b, vol. 144, no. 2, p. 309–316.
- BIGONI, L., VELEMÍNSKÁ, J., BRŮŽEK, J. Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 2010, vol. 61, no. 1, p. 16–32.
- BOOKSTEIN, F. L. *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- BOOKSTEIN, FL., B. CHERNOFF, R. ELDER, J. HUMPHRIES, G. SMITH, STRAUSS, R. *Morphometrics in evolutionary biology*. Philadelphia: Academy of Natural Sciences, 1985.
- BOOKSTEIN, FL., GREEN, WDK. Edgewarp: A flexible program package for biometric image warping in two dimensions. *SPIE Proceedings*, 1994, vol. 2359, p. 135–147. Available: <ftp://brainmap.med.umich.edu/pub/edgewarp>.
- BRAGA, J., TREIL, J. Estimation of pediatric skeletal age using geometric morphometrics and three-dimensional cranial size changes. *International Journal of Legal Medicine*, 2007, vol. 121, p. 439–443.
- BRAÜER, G. Osteometrie. In KNUSSMANN, R. (ed.). *Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen. Band I, 1. Teil*. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag, 1988, p. 160–232.
- COQUERELLE, M., BAYLE, P., BOOKSTEIN, FL., BRAGA, J., HALAZONETIS, DJ., KATINA, S., WEBER, GW. The association between dental mineralization and mandibular form: a study combining additive conjoint measurement and geometric morphometrics. *Journal of Anthropological Sciences*, 2010, vol. 88, p. 129–150.
- DROZDOVÁ, E. *Základy osteometrie*. Brno: Nadace Universitas Masarykiana v Brně, Akademické nakladatelství Cerm v Brně, Masarykova univerzita v Brně, Nakladatelství a vydavatelství Nauma v Brně, 2004.
- FARKAS, LG. (ed.). *Anthropometry of the Head and Face*. New York: Raven Press, 1994.
- FRANKLIN, D., CARDINI, A., O'HIGGINS, P., OXNARD, CHE., DADOUR, I. Mandibular morphology as an indicator of human subadult age: geometric morphometric approaches. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 2008, vol. 4, p. 91–99.
- FRANKLIN, D., OXNARD, CHE., O'HIGGINS, P., DADOUR, I. Sexual Dimorphism in the Subadult Mandible: Quantification Using Geometric Morphometrics. *Journal of Forensic Science*, 2007, vol. 1, p. 6–10.
- GONZALES, PN., BERNAL, V., PEREZ, I. Analysis of Sexual Dimorphism of Craniofacial Traits Using Geometric Morphometric Techniques. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2011, vol. 21, p. 82–91.
- GUNZ, P., MITTEROECKER, P., NEUBAUER, S., WEBER, GW., BOOKSTEIN, FL. Principles for the Virtual Reconstruction of Hominin Crania. *Journal of Human Evolution*, 2009, vol. 57, p. 48–62.
- <http://evan-society.org>, 29.11.2011
- <http://graphics.idav.ucdavis.edu/research/projects/EvoMorph>, 29.11.2011
- <http://www.amira.com>, online, 29.11.2011
- KATINA, S., BOOKSTEIN, FL., GUNZ, P., SCHAEFER, K. Was it worth digitizing all those curves? A worked example from craniofacial primatology. *American Journal of Physical Anthropology*, 2007, Suppl. 44, p. 140.
- KATINA, S., ŠEFCÁKOVÁ, A., VELEMÍNSKÁ, J., BRŮŽEK, J., VELEMÍNSKÝ, P. A geometric approach to cranial sexual dimorphism in fossil skulls from Předmostí (Upper Palaeolithic, Czech Republic). *Časopis Národního muzea, Řada přírodovědná, (J. Nat. Mus., Nat. Hist. Ser.)*, 2004, vol. 173, no. 1–4, p. 133–144.
- KNUSSMANN, R. (ed.) *Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen, Band I, 1. Teil*. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag, 1988.
- KUŽELKA, V. Osteometrie. In Stloukal, M. (ed.). *Antropologie. Příručka pro studium kostry*. Praha: Národní muzeum, 1999.
- MARTIN, R., SALLER, K. *Lehrbuch der Anthropologie in systematischer Darstellung*. Stuttgart: Gustav Fischer-Verlag, 1957.
- NEUSTUPA, J., ŠTASTNÝ, J. The geometric morphometric study of Central European species of the genus *Micrasterias* (Zygnematophyceae, Viridiplantae). *Preslia*, 2006, vol. 78, p. 253–263.
- SHOLTS, SB., WALKER, PH., KUZMINSKY, SC., MILLER,

- KWP., WÄRMLÄNDER, SKTS. Identification of Group Affinity from Crosssectional Contours of the Human Midfacial Skeleton Using Digital Morphometrics and 3D Laser Scanning Technology. *Journal of Forensic Science*, 2011, vol. 56, no. 2, p. 333–338.
- SLICE, DE., (ed.). *Modern Morphometrics in Physical Anthropology*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2005.
- SLICE, DE. Geometric morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, 2007, vol. 36, p. 261–281.
- ŠEFČÁKOVÁ, A., KATINA, S. Geometric analysis of the variability in skull shape of individuals from Předmostí and comparison with modern populations from the methodological point of view. In VELEMÍNSKÁ, J., BRŮŽEK, J. *Early modern humans from Předmostí near Přerov, Czech Republic: a new reading of old documentation*. Praha: Academia, 2008, p. 87–101.
- ŠEFČÁKOVÁ, A., KATINA, S., VELEMÍNSKÁ, J., BRŮŽEK, J., VELEMÍNSKÝ, P. Geometric analysis of sexual dimorphism in upper palaeolithic skulls from Předmostí (Czech republic). *Slovenská antropológia. Bulletin Slovenskej antropológickej spoločnosti pri SAV*, 2003, vol. 6 (n. s. 1), p. 141–146.
- ŠEFČÁKOVÁ, A., KATINA, S., BRŮŽEK, J., VELEMÍNSKÁ, J., VELEMÍNSKÝ, P. Neskoromladopaleolitická lebka z Moče (južné Slovensko): porovnanie s recentnou populáciou pomocou geometrickej morfometrie. *Acta Rer. Natur. Mus. Nat. Slov.*, 2008, vol. 54, no. 75–86.
- ŠEFČÁKOVÁ, A., KATINA, S., MIZERA, I., HALOUZKA, R., BARTA, P., THURZO, M. The Late Upper Palaeolithic skull from Moča (Slovak Republic) in the Central European Context. *Acta Mus. Nat. Pragae, Ser. B, Hist. Nat.*, 2011, vol. 67, no. 1–2, p. 3–24.
- VINCE, J. *Geometry of Computer Graphics*. London: Springer, 2005.
- WAGNER, GP. The biological homology concept. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1989, vol. 20, p. 51–69.
- WEBER, GW., BOOKSTEIN, FL. *Virtual Anthropology – A Guide to a New Interdisciplinary Field*. Wien, New York: Springer Verlag, 2011.
- ZELDITCH, ML., SWIDERSKI, DL., SHEETS, DH., FINK, WL. *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. London: Elsevier Academic Press, 2004.

ZÁKLADNÍ MORFOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY, TĚLESNÉ SLOŽENÍ A SEGMENTÁLNÍ ANALÝZA U VYBRANÝCH VRCHOLOVÝCH HRÁČŮ LEDNÍHO HOKEJE NEJVYŠŠÍ RUSKÉ SOUTĚŽE

The basic morphological characteristics, body composition and segmental analysis in elite-level ice hockey players of the professional russian hockey league

Martin Sigmund¹, Iva Dostálová²

¹Science Pro, s.r.o., Olomouc, Česká republika

²Katedra aplikovaných pohybových aktivit, Fakulta tělesné kultury, Univerzita Palackého v Olomouci, Česká republika

Abstract

The stature and body weight represents the basic morphological characteristics that can indicate possible quality of top sportsmen considering their specialization. Concurrently with knowledge of parameters of body composition, representation of body fat and fat free mass, we get relatively good picture about current state of that sportsman. We can predict possible productivity, because somatic characteristics of sportsmen are important presumption to their performance.

The primary purpose of this study was to determine the basic somatic characteristics and to compare used anthropometric methods in specific group of elite-level ice hockey players from Kontinental Hockey League (KHL). There were totally 51 professional ice hockey players.

Regarding fundamental morphological characteristics (stature, body weight) we can conclude that observed players are significantly taller and heavier than normative data of population. These parameters manifest in higher BMI which indicates overweight. We cannot say that our sportsmen have tendency to obesity that they are overweight, the reason is higher proportion of fat free mass. Total body fat represents about 12%. FFM represents on an average 80 kg. Considering game position there were differences, defencemen were the tallest with the heaviest body weight. Hockey forwards were on average 2.5 cm shorter and 2 kg lighter than hockey defencemen. The shortest and lightest were hockey goalkeepers.

To determine the body composition we used bioimpedance method by instrument Tanita BC-418 MA and three anthropometrical methods. We can conclude that bioimpedance measurement in the specific group of professional ice hockey players seems to be appropriate and reliable method. On the contrary the antropometric mesurement by Drinkwater and Ross showed to be inconvenient.

The average profil of the ice hockey player 28/184/91/27/12 (age, stature, weight, BMI, fat%) presents similar qualitative characteristics as elite-level ice hockey players playing in NHL.

Key words: stature, body weight, bioimpedance, ice hockey, men

Úvod

Tělesná výška a tělesná hmotnost představují základní morfologické ukazatele, které prvotně napoví o možných dispozicích vrcholového sportovce s ohledem na jeho specializaci. Pokud k primárním morfologickým dispozicím přidáme i zna-