Univerzita Hradec Králové
Filozofická fakulta

E-learningový kurz

Modern quantitative methods and shape analysis in archaeology

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tento materiál vznikl v rámci realizace projektu Strategický rozvoj Univerzity Hradec Králové, reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002427.

FF UHK

3D landmark analyses

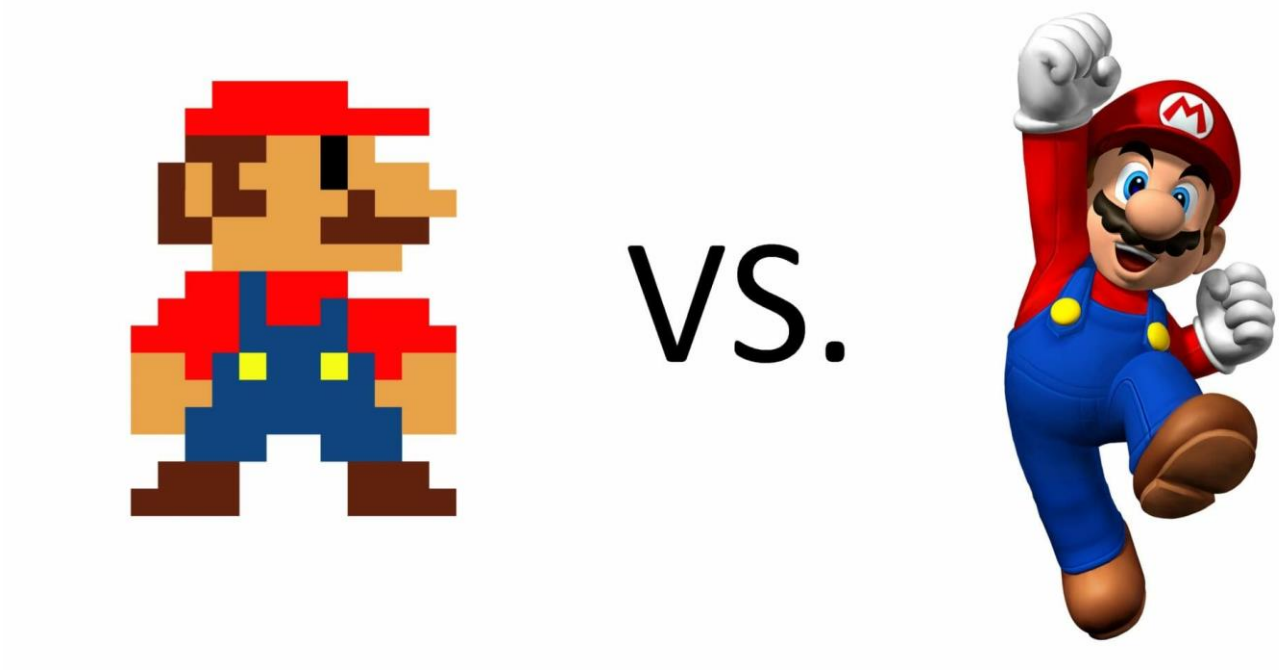
Analyses of 3D landmarks and semilandmarks

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

2D is cool but we are living in 3D…



http://nazgamestudies.blogspot.com/2015/07/2d-games-have-been-around-since.html

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

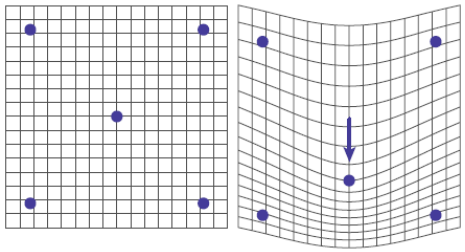
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

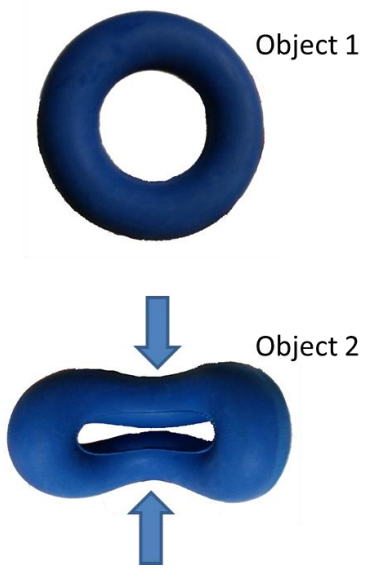
Sliding semilandmarks in 3D*

Uses property of **bending energy** of thin-plate spline (quadratic form in the locations of the target landmark structure)



Analogous to Procrustes analysis

- **Procrustes analysis** - minimises the sum of squares between objects
- **Bending energy** minimises the sum of squares in the complementary feature space of bending



* Gunz et al., 2005
Mitteroecker and Gunz, 2009

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

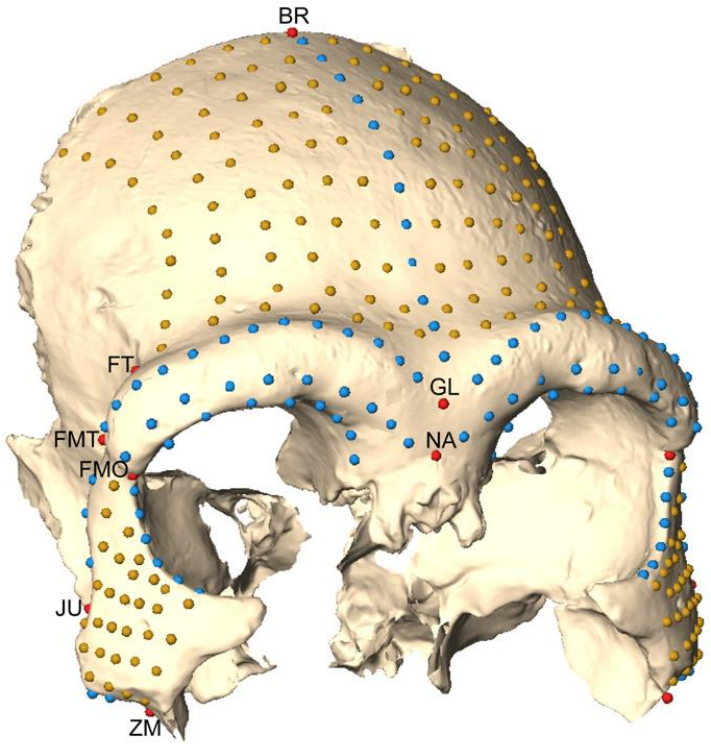
FF UHK

3D (semi)landmarks

Sliding semilandmarks in 3D

Bending energy

- is invariant to translation, scaling and rotation
- can be used for 3D landmarks, curves and surfaces



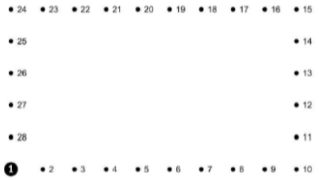
Freidline et al., 2012

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

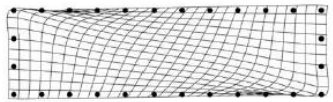
3D (semi)landmarks

Why are sliding semilandmarks better than equally spaced points?



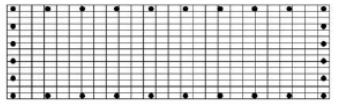
Target

A (equally spaced)



A=>Target (equally spaced)

B (bending energy)



B=>Target (bending energy)

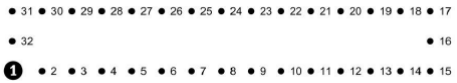
Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

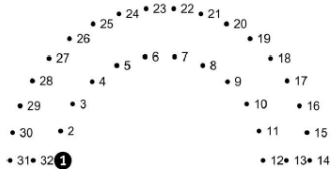
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

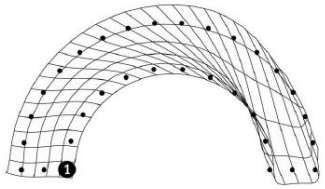
Why are sliding semilandmarks better than equally spaced points?



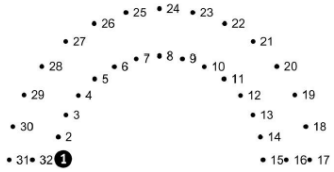
Target



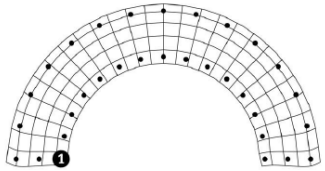
A (equally spaced)



A=>Target (equally spaced)



B (bending energy)



B=>Target (bending energy)

Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

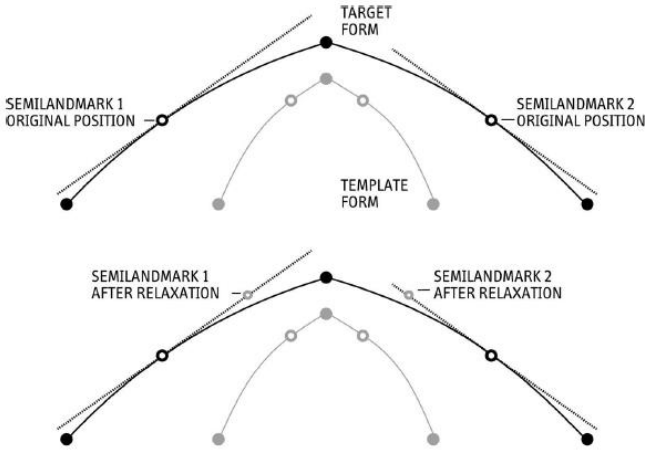
3D (semi)landmarks

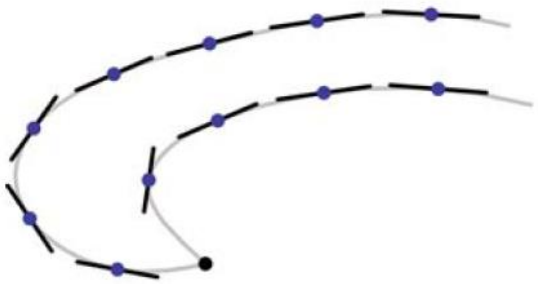
Principles

(1) We have Template form and Target form
- Template is the reference (on what we align)
- Target is the form whose landmarks we want to align

(2) Semilandmark on Target slides along its tangent till its distance is with corresponding semilandmark on Template is minimal

But landmark is no longer on the curve (!)





Gunz et al., 2005
Mitteroecker and Gunz, 2009

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

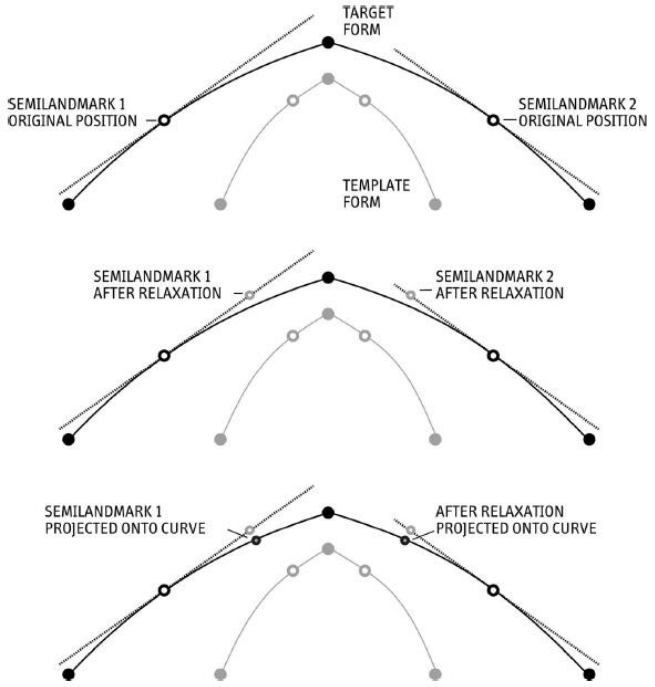
3D (semi)landmarks

Principles

(1) We have Template form and Target form
- Template is the reference (on what we align)
- Target is the form whose landmarks we want to align

(2) Semilandmark on Target slides along its tangent till its distance is with corresponding semilandmark on Template is minimal

(3) Semilandmark is projected onto a curve



Gunz et al., 2005

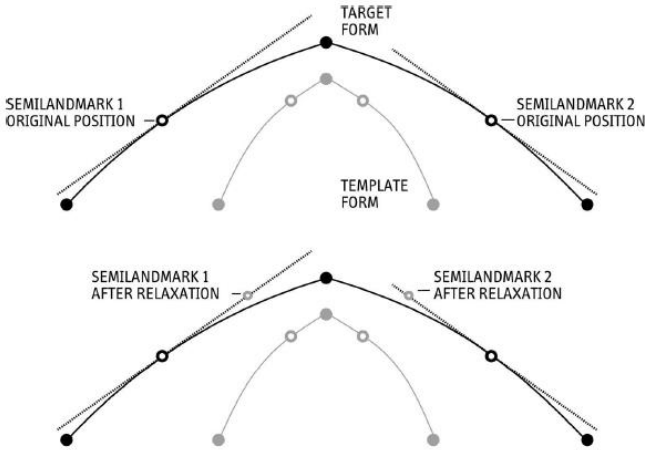
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

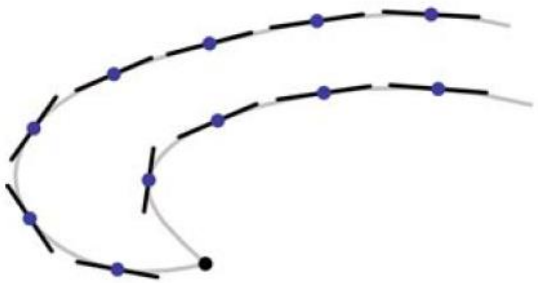
3D (semi)landmarks

Basic algorithm (analogous to GPA)

(1) Calculate tangents for each semilandmark.
(2) Relax all specimens against the first specimen.
(3) Compute the Procrustes average configuration (=new template).
(4) Calculate new tangents.
(5) Relax all specimens against Procrustes average of step (3).
(6) Iterate (3) to (5) until convergence.

But landmark is no longer on the curve (!)





Gunz et al., 2005
Mitteroecker and Gunz, 2009

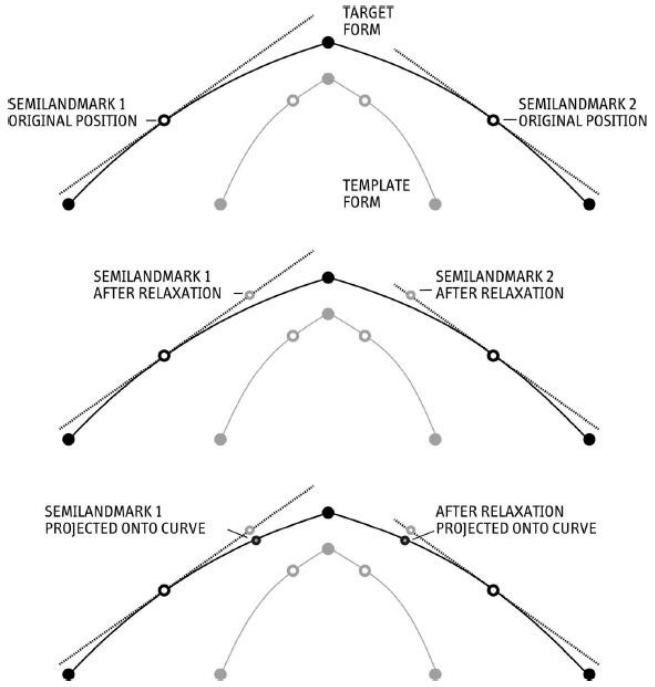
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

Extended algorithm

(1) Calculate tangents for each semilandmark.
(2) Relax all specimens against the first specimen.
(3) Replace each slid semilandmark by its nearest point on the (curving) surface.
(4) Compute the Procrustes average configuration.
(5) Calculate new tangents.
(6) Relax against Procrustes consensus of step (4).
(7) Replace each slid semilandmark by its nearest point on the surface.
(8) Iterate steps (4) to (7) until convergence.

Should be used on shapes with sharp curvatures



Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

How many semilandmarks?

- More is better
- BUT should represent a geometric form
- e.g. for the human neurocranial 150-200 semilandmarks

Initial data can be

- Discrete landmark points
- Discretely sampled curve/surface
- Volume image data (voxels)

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

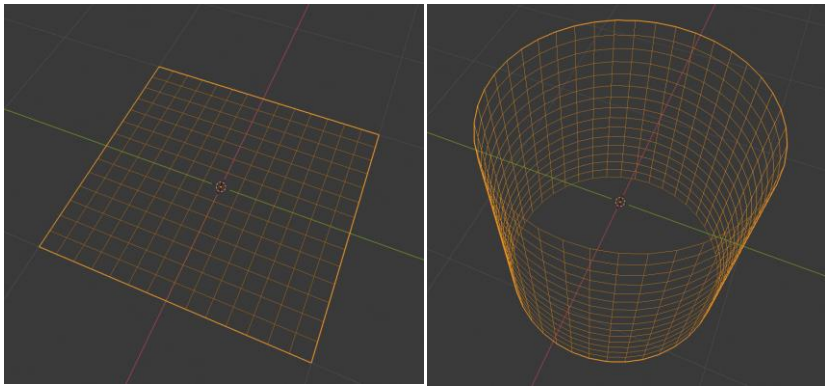
3D (semi)landmarks

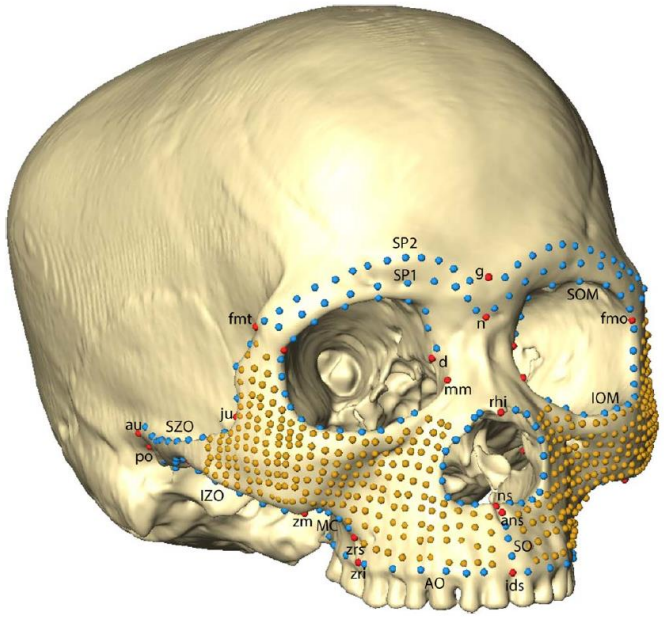
Curves in three dimensions

- The same as in 2D
- Usually points equidistantly spaced along outline arcs

Surfaces

- For planes and cylinders there exists equally spaced points, for other surfaces only approximations (!)





Freidline et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

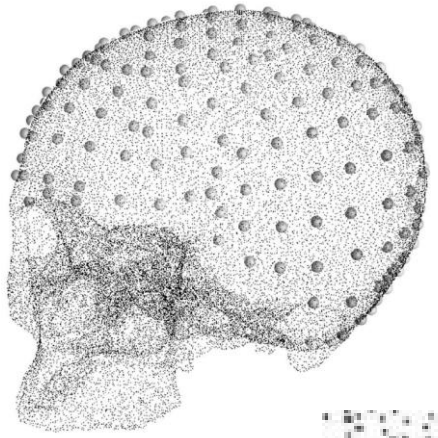
3D (semi)landmarks

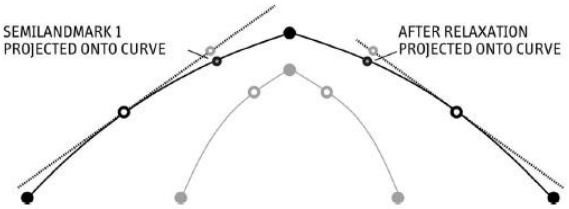
Surfaces procedure

(1) Build reference/template
- Begin with huge number of points
- Make a mesh of fewer points by thinning the redundant point cloud (points should be more dense near ridges of the surface)

(2) Warp reference to the landmark configuration of another specimen
- (A) Points nearest to the warped mesh are taken as a starting positions of the semilandmarks
- (B) Resting surface points are used for sliding algorithm
  - 2 dominant eigenvectors of their variation in small neighborhoods around semilandmarks are used to specify the vectors v_{i_j}, w_{i_j} of the tangent planes along which they slide
  - The slid semilandmark can be projected down to the original surface according to the quadric approximation of the surface perpendicular to this best-fitting plane

(3) Repeat (2) for every specimen in the dataset





Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

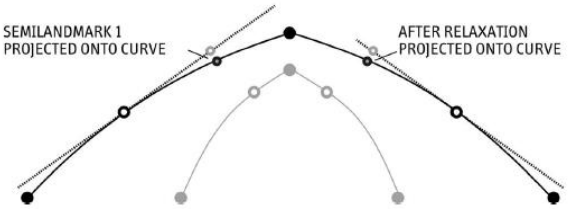
3D (semi)landmarks

Surfaces procedure

(1) Build reference/template
- Begin with huge number of points
- Make a mesh of fewer points by thinning the redundant point cloud (points should be more dense near ridges of the surface)

(2) Warp reference to the landmark configuration of another specimen
- (A) Points nearest to the warped mesh are taken as a starting positions of the semilandmarks
- (B) Resting surface points are used for sliding algorithm
  - 2 dominant eigenvectors of their variation in small neighborhoods around semilandmarks are used to specify the vectors v_{i_j}, w_{i_j} of the tangent planes along which they slide
  - The slid semilandmark can be projected down to the original surface according to the quadric approximation of the surface perpendicular to this best-fitting plane

(3) Repeat (2) for every specimen in the dataset

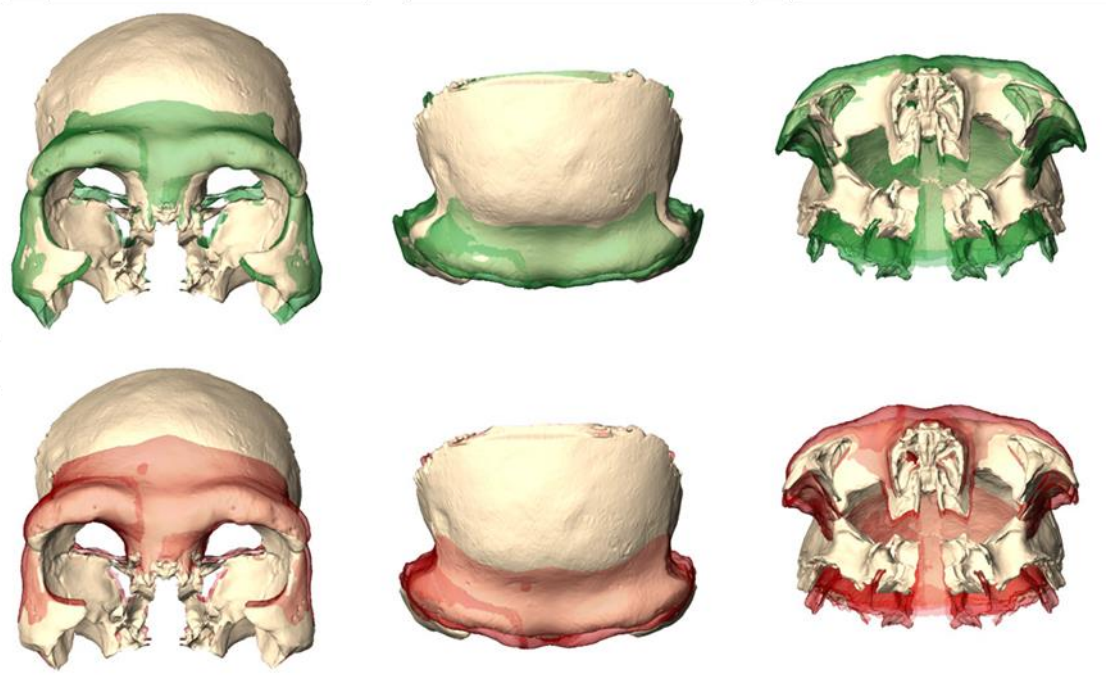


Gunz et al., 2005
Mitteroecker and Gunz, 2009

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Surfaces procedure

Results of Procrustes superimposition



Freidline et al., 2012

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

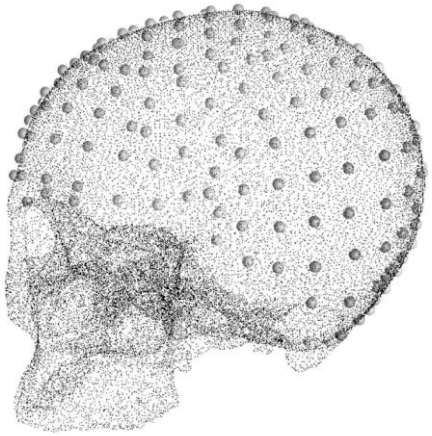
FF UHK

3D (semi)landmarks

Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Materials and Methods)

Dataset:
- 52 human crania
- 20 adult M, 20 adult F, 12 subadults
- 435 landmarks:
  - 37 anatomical landmarks
  - 162 semilandmarks on 7 3D curves
  - 236 semilandmarks on surfaces

Acquisition: Microscribe G2X



Gunz et al., 2005
Wilczek, 2013

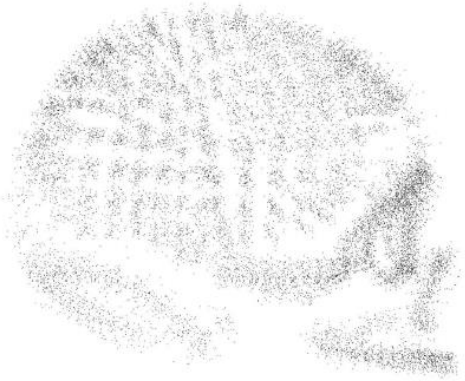
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Results)

Final Procrustes superimposition



Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

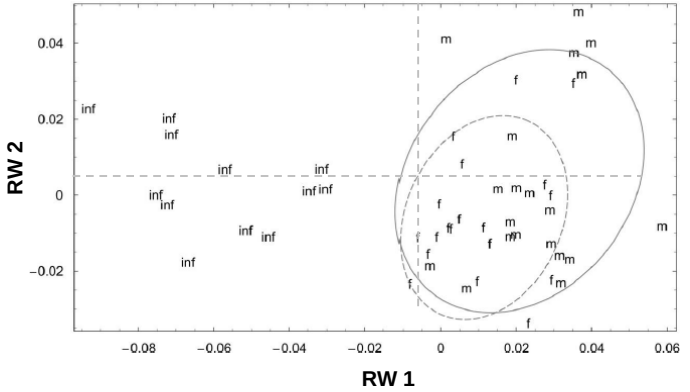
3D (semi)landmarks

Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Results)

Final Procrustes superimposition

Plot of first pair of relative warp (RW)

- 1st RW: ontogenetic development (children vs male adults)



Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Results)

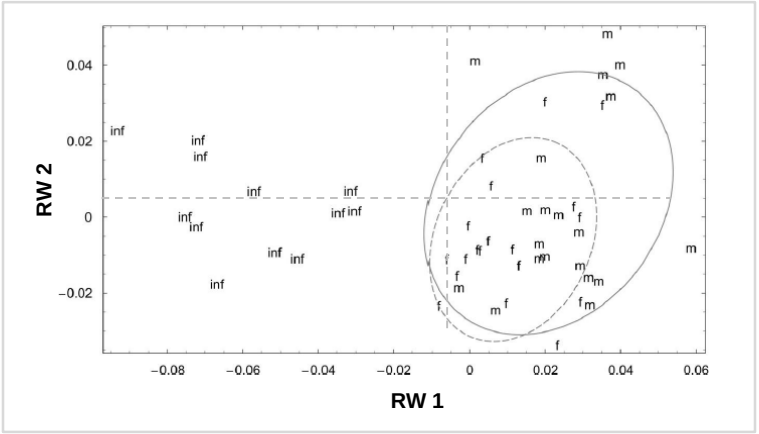
Final Procrustes superimposition

Plot of first pair of relative warp (RW)

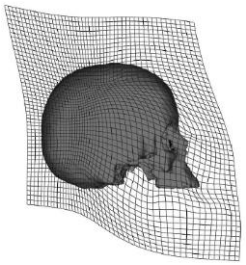
- 1st RW: ontogenetic development (children vs male adults)

Visualisation of 1st RW as a thin-plate spline

- Enlargement of the face relative to the neurocranium
- Prognathism
- Axially extension



RW 1



Gunz et al., 2005

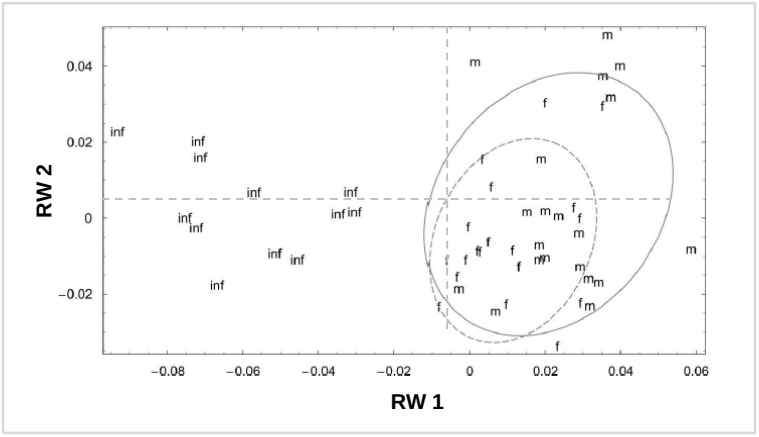
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Results)

Final Procrustes superimposition



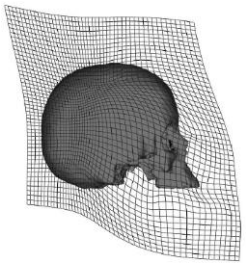
Plot of first pair of relative warp (RW)

- 1st RW: ontogenetic development (children vs male adults)

Visualisation of 1st RW as a thin-plate spline

- Enlargement of the face relative to the neurocranium
- Prognathism
- Axially extension

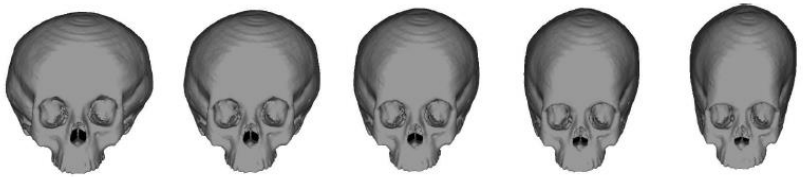
RW 1



Visualisation of 2nd RW

- Cranial width

RW 2



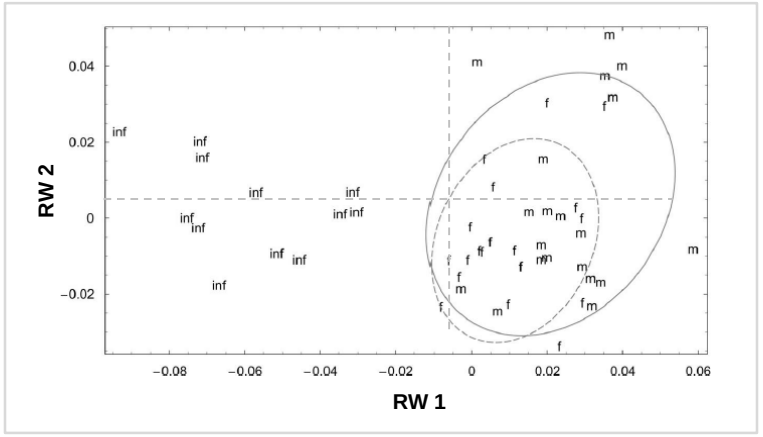
Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Results)

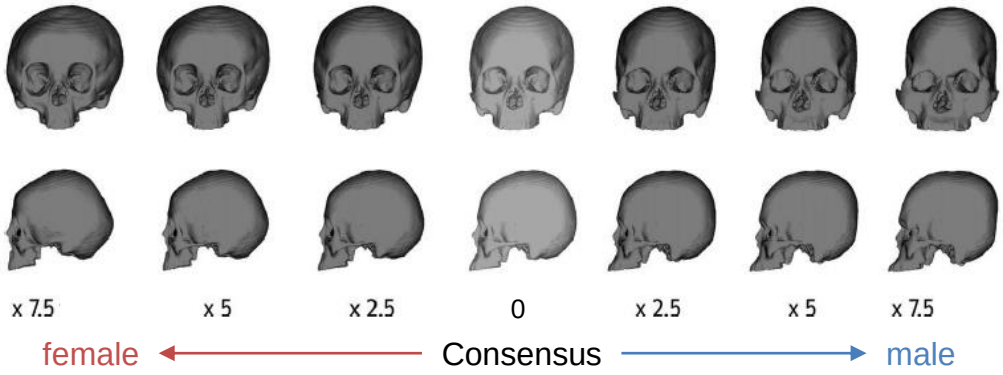


Difference between males and females

- Procrustes distance used as test statistic
- Monte-Carlo permutation used to assess significance (3.000 permutations)
- p<0.04 => different

Visualisation of differences

- Females have…
  - more globular skull
  - more rounded orbits
  - thinner upper jaw
  - flatter face
  - “rounded skull”



Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

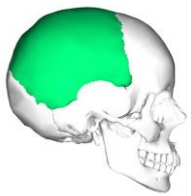
3D (semi)landmarks

Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Results)

Difference between males and females…

… expressed as components of allometry and non-allometry

- allometry vs non-allometry: difference in parietal bone, zygomatic region, orbits

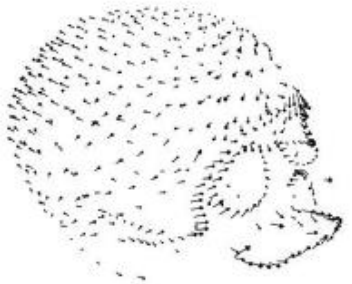


parietal bone

zygomatic region

orbits

Allometry



Rest

female — male

Gunz et al., 2005
www.Wikipedia.com

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

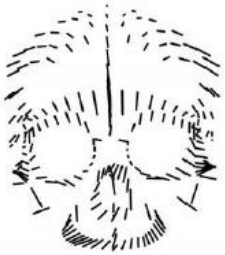
Example on cranes used for study of sexual dimorphism (Results)

Difference between males and females…

… captured by landmarks and semilandmarks

- mostly by landmarks
- but local features by semilandmarks

Sexual dimorphism captured by…



landmarks

semilandmarks

female ——————— male

Gunz et al., 2005

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

Other examples…

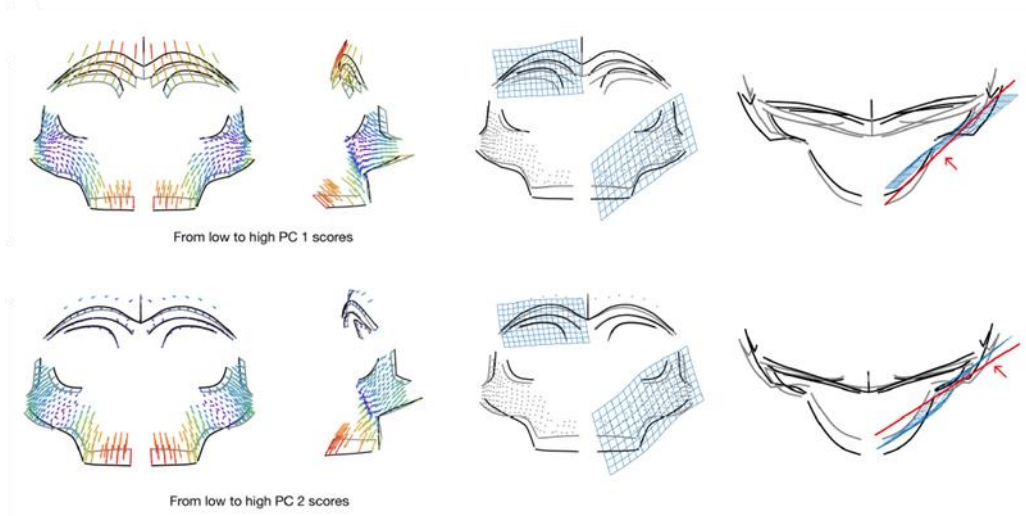
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

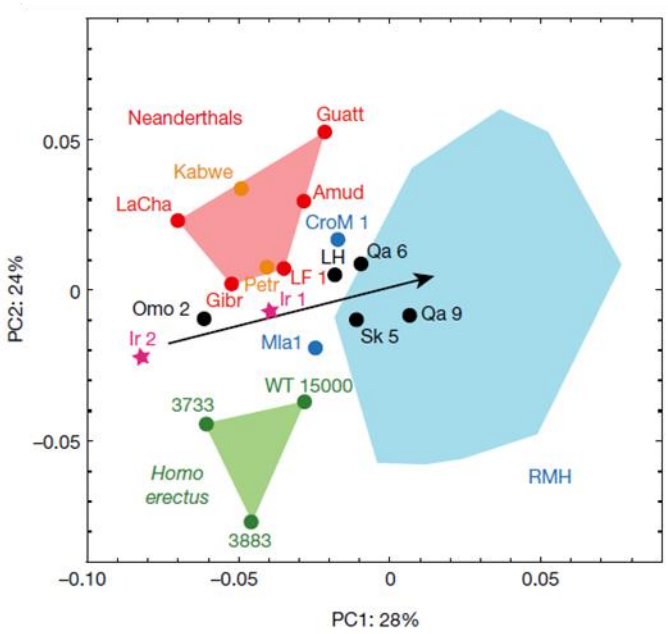
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

Other examples…

… faces among *Homo* groups





Hublin et al., 2017

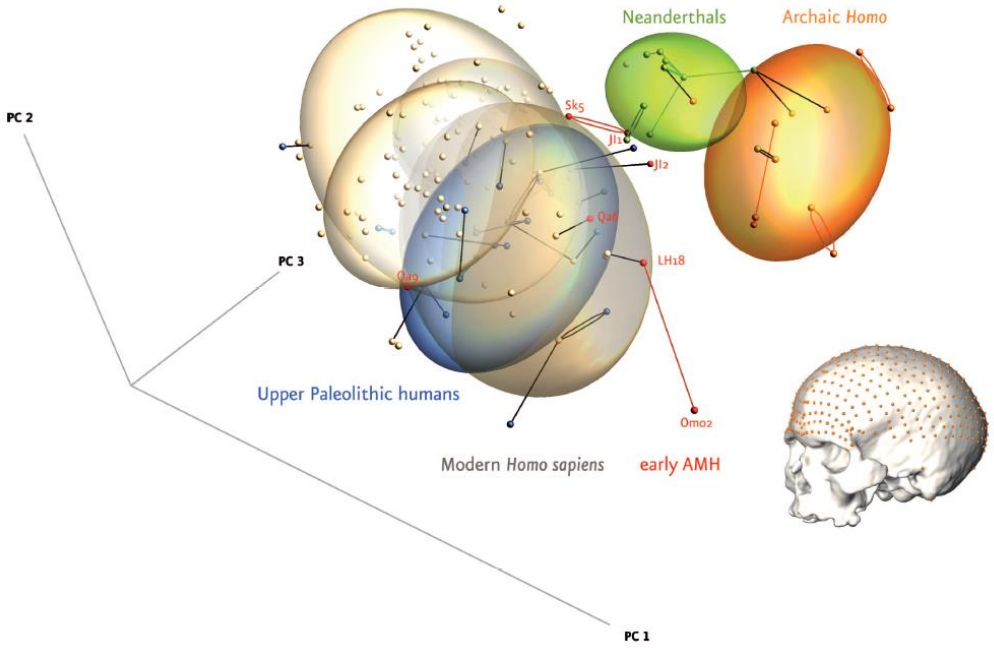
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

Other examples…

… skulls among *Homo* groups



Gunz et al., 2009

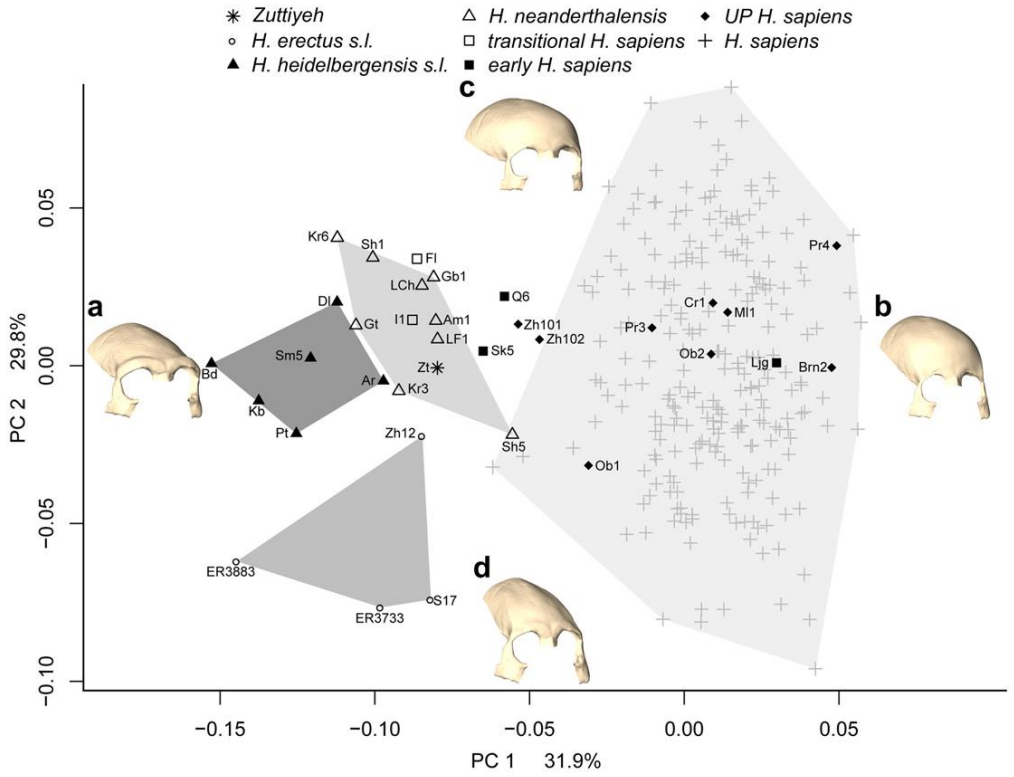
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

Other examples…

… skulls among *Homo* groups



Freidline et al., 2012

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

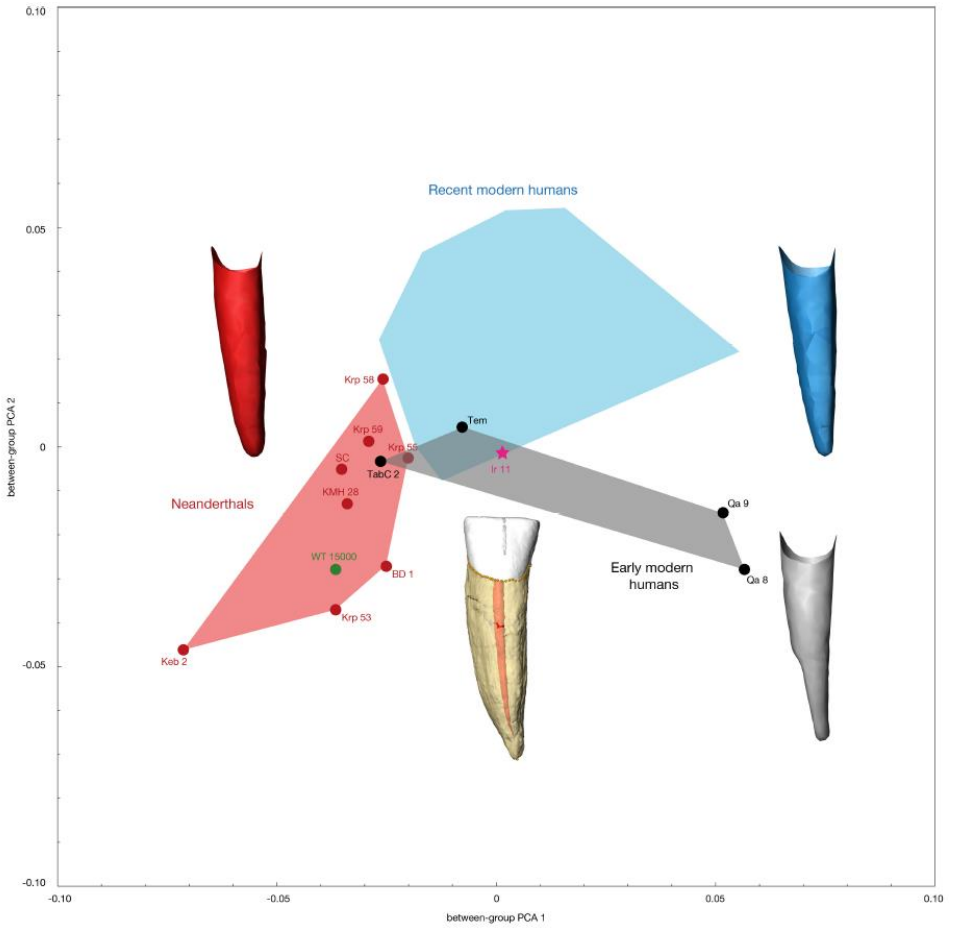
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

Other examples…

… roots among *Homo* groups



Hublin et al., 2017

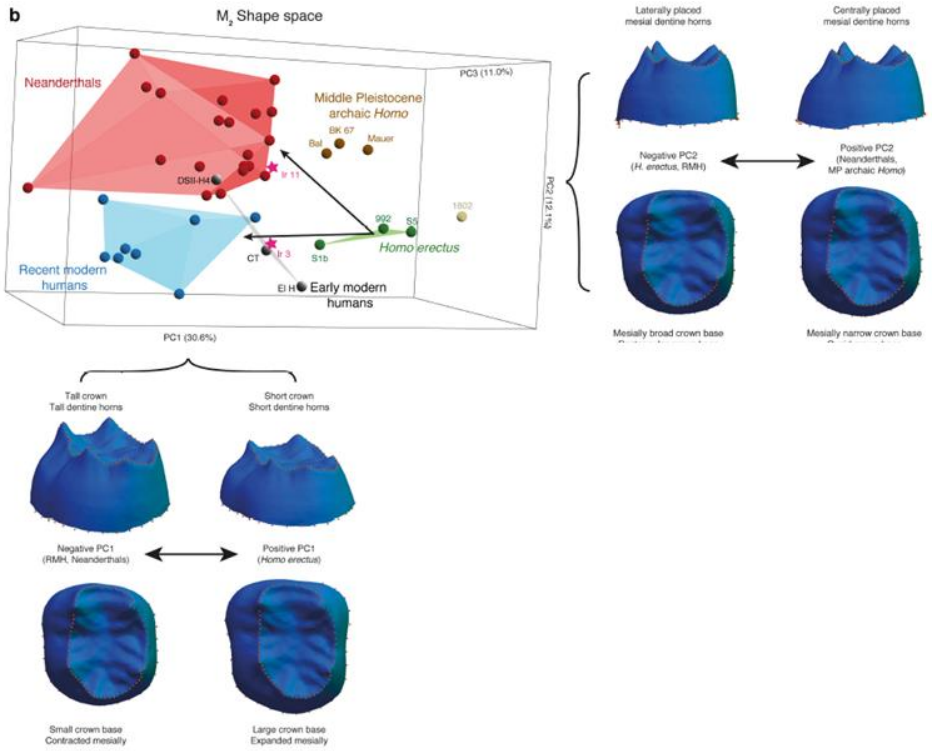
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

3D (semi)landmarks

Other examples…

… molars among *Homo* groups



Hublin et al., 2017

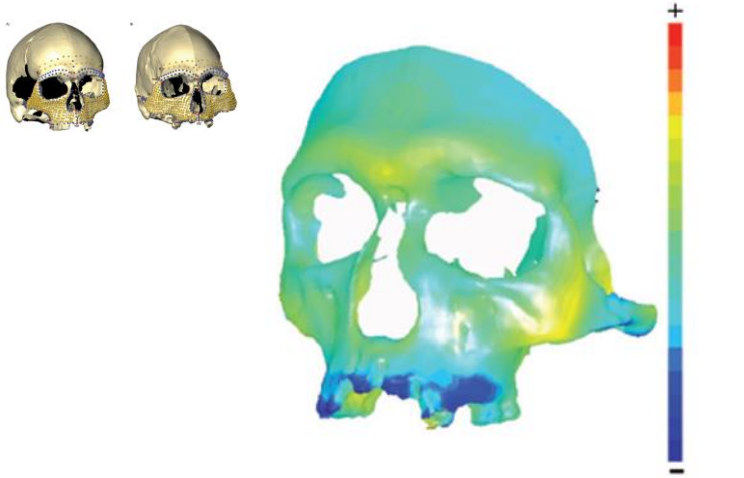
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

3D (semi)landmarks

Other examples…

… sexual dimorphism in *Homo* groups



heat map highlighting differences between Oberkassel female and Oberkassel male

superimposition of recent modern human female (in gray) and male (in bone color) mean shape

Freidline et al., n.d.

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

References:

- Freidline, S.E., Gunz, P., Hublin, J.-J., 2015. Ontogenetic and static allometry in the human face: Contrasting Khoisan and Inuit: ONTOGENETIC ALLOMETRY OF FACIAL FEATURES. Am. J. Phys. Anthropol. 158, 116–131. https://doi.org/10.1002/ajpa.22759
- Freidline, S.E., Gunz, P., Hublin, J.J., n.d. Semilandmark geometric morphometric analysis of the Oberkassel faces: A study of allometry.
- Freidline, S.E., Gunz, P., Janković, I., Harvati, K., Hublin, J.J., 2012. A comprehensive morphometric analysis of the frontal and zygomatic bone of the Zuttiyeh fossil from Israel. J. Hum. Evol. 62, 225–241. https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2011.11.005
- Gunz, P., Bookstein, F.L., Mitteroecker, P., Stadlmayr, A., Seidler, H., Weber, G.W., 2009. Early modern human diversity suggests subdivided population structure and a complex out-of-Africa scenario. Proc. Natl. Acad. Sci. 106, 6094–6098. https://doi.org/10.1073/pnas.0808160106
- Gunz, P., Mitteroecker, P., Bookstein, F.L., 2005. Semilandmarks in Three Dimensions, in: Slice, D.E. (Ed.), Modern Morphometrics in Physical Anthropology. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, New York, pp. 73–98. https://doi.org/10.1007/0-387-27614-9_3
- Hublin, J.-J., Ben-Ncer, A., Bailey, S.E., Freidline, S.E., Neubauer, S., Skinner, M.M., Bergmann, I., Le Cabec, A., Benazzi, S., Harvati, K., Gunz, P., 2017. New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of Homo sapiens. Nature 546, 289–292. https://doi.org/10.1038/nature22336
- Mitteroecker, P., Gunz, P., 2009. Advances in Geometric Morphometrics. Evol. Biol. 36, 235–247. https://doi.org/10.1007/s11692-009-9055-x
- Wilczek, J., 2013. Prostorová dokumentace artefaktů - 003 - Metody akvizice prostoroých dat. E-learning materials, Masarykova univerzita, Brno. https://elf.phil.muni.cz/.

- www.wikipedia.org
- http://nazgamestudies.blogspot.com/2015/07/2d-games-have-been-around-since.html