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

Introduction to morphometrics

Brief introduction to methods of traditional
and modern geometric morphometrics methods

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

We study variables...

ID: 80000169
Type: MACEDONIAN KINGS
Origin: Greek Region
Issuer: Philip II
Metal: Gold
Denomination: Stater
Date: B.C. 323 - 315
Weight: 8.58 g
Diameter: 3.2 cm
Obverse description: Laureate head of Apollo
Right reverse Legend: ΦΙΛΙΠΠΟΥ
Reverse description: Charioteer driving big a right, holding kentron in right hand, reins in left; trident below

ID: 9025661
Type: SITULA
Region: Central Europe
Clay: Graphite
Date: LT C1
Weight: 3.4 kg
Diameter: 30.2 cm
Volume: 12 L
Decoration: Vertical lines
Type of fabric: 13

ID: 9025661
Type: HT 3a
Region: England
Composition: 2.5Cu, 9.8Sn
Datation: BB2
Weight: 361 g
Length: 15.1 cm
Height: 4.3 cm
Decoration: -

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

We are interested in shape

Size

Shape

We are interested in shape

The shape is “all the geometric information that remains when location, scale and rotation effects are filtered out from an object“ (Kendall 1977)

Shape

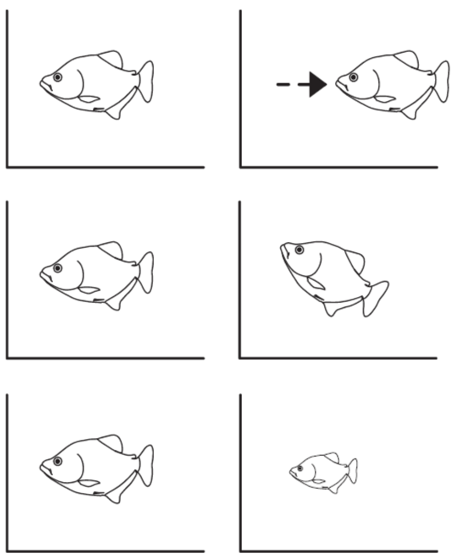
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

We are interested in shape

The shape is “all the geometric information that remains when location, scale and rotation effects are filtered out from an object“ (Kendall 1977)

Operations that do not alter shape



Shape

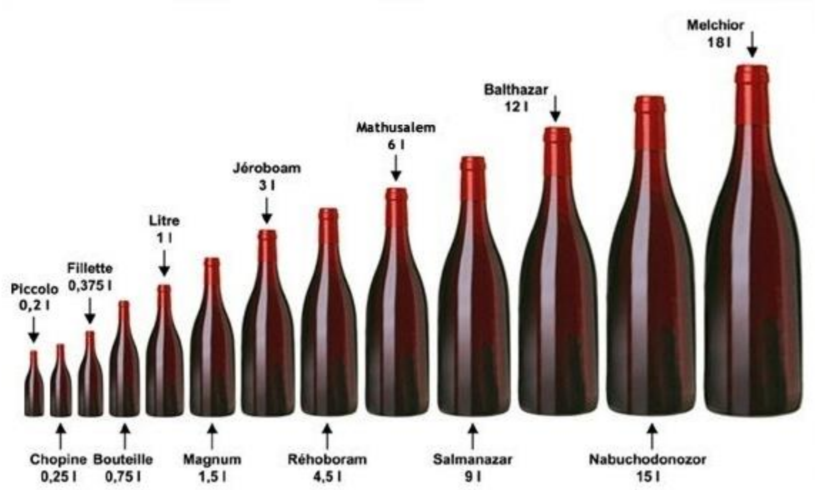
Zelditch et al. 2004

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

FF UHK

We are interested in shape

Definition of size is also problematic (question of scale/scaling)



Size

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

We are interested in shape

Size

+

Shape

=

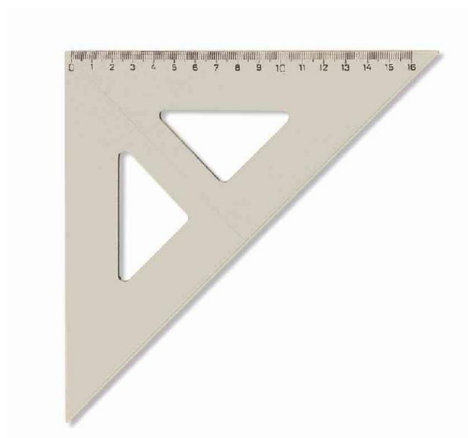
Imagine all shapes of bottles with different sizes

Form

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

FF UHK

Traditional morphometrics

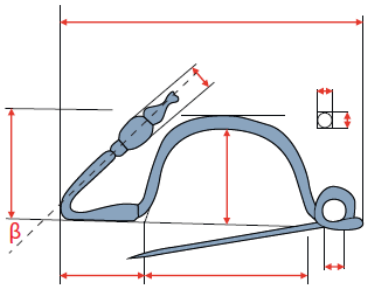


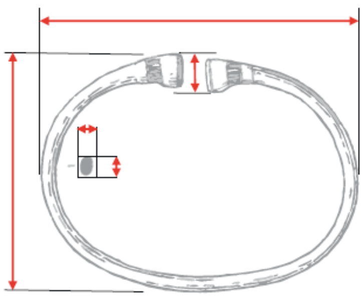
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

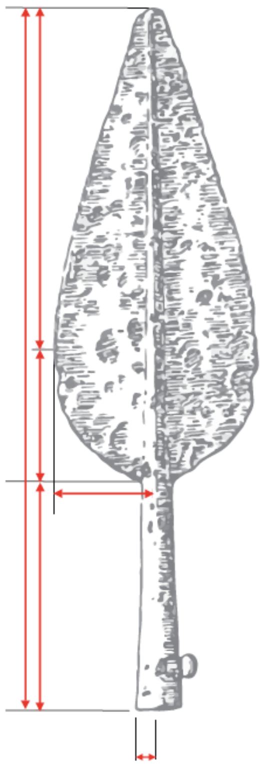
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

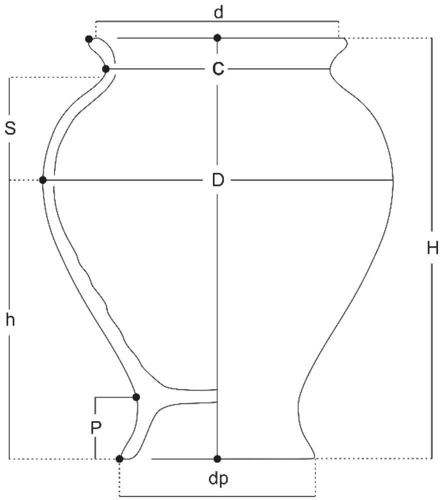
Traditional morphometrics

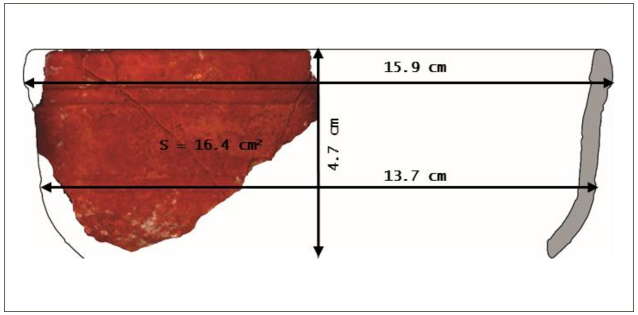
Distances, angles, diameters, surfaces, volumes, …









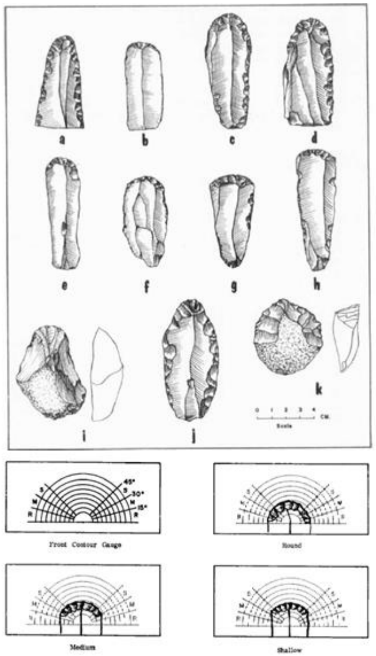


Wilczek 2917

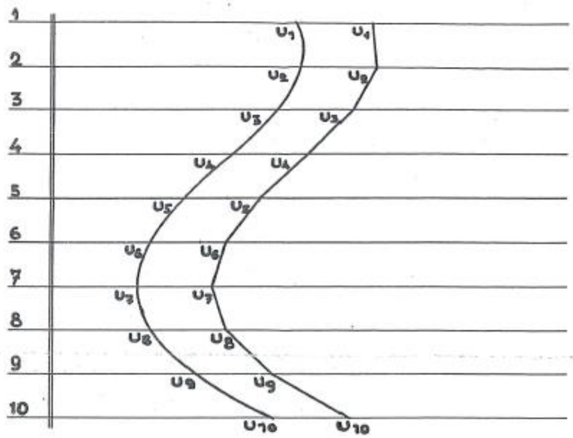
FF UHK

Traditional morphometrics

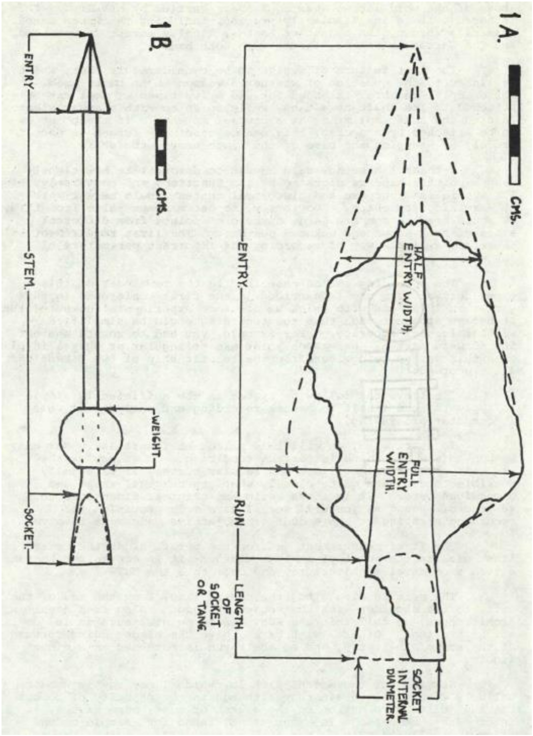
Distances, angles, diameters, surfaces, volumes, …



Sackett 1966



Vašíček and Jičín 1971



Barker 1975

Sackett 1966
Vašíček and Jičín 1971
Barker 1975

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

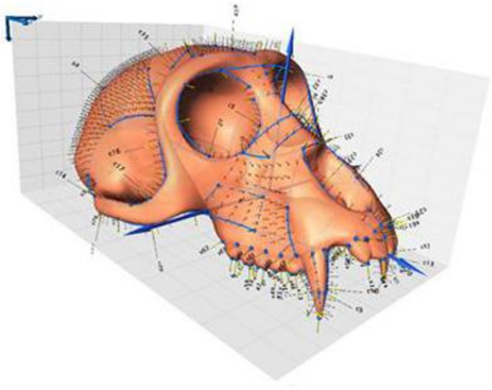
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

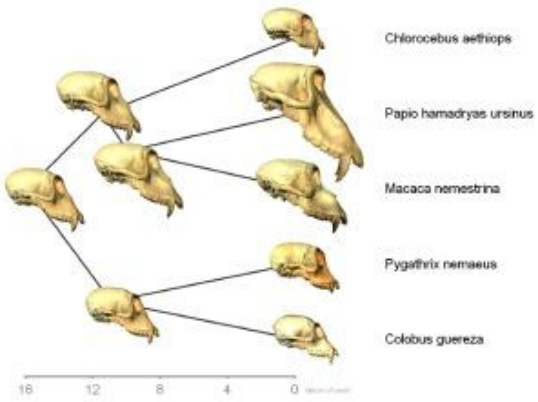
Modern morphometrics

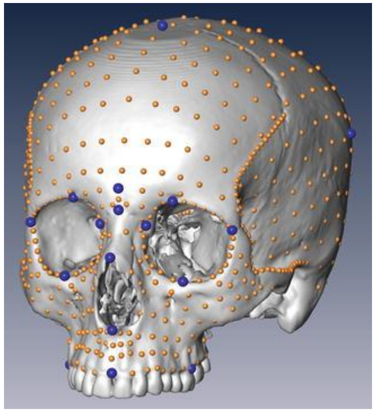
Quantitative study of shape variation and its covariation with other variables

Use in many fields of research:

- anthropology, palaeontology, evolutional biology, geology, forensics, …



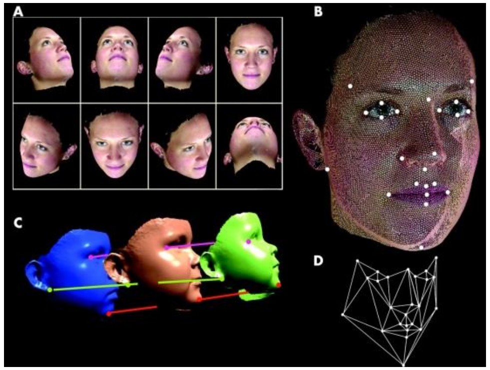


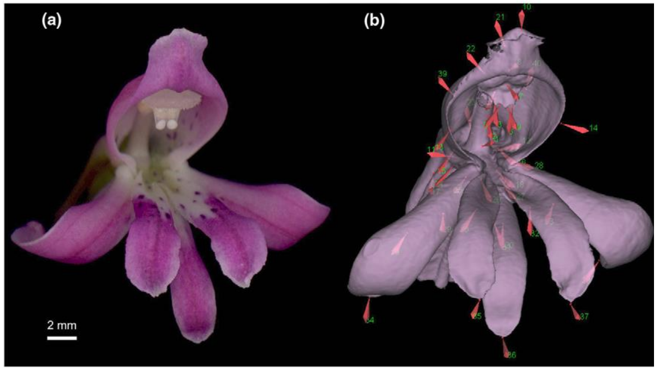


https://www.transmittingscience.org/wp-content/uploads/3D-Geometric-Morphometrics.jpg
http://graphics.idav.ucdavis.edu/research/projects/EvoMorph/main
https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-642-27800-6_72-1/MediaObjects/129032_0_En_72-1_Fig3_HTML.jpg

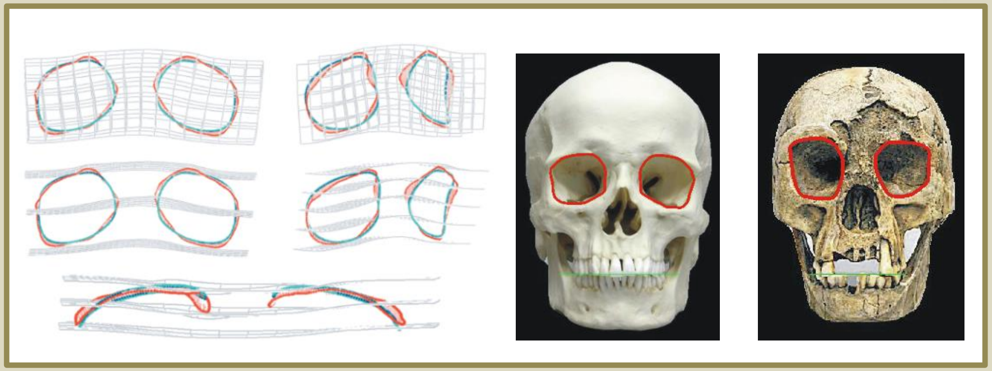
Modern morphometrics

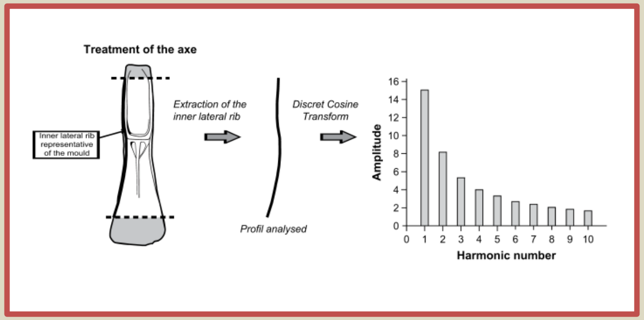
Landmarks analyses





Outline analyses



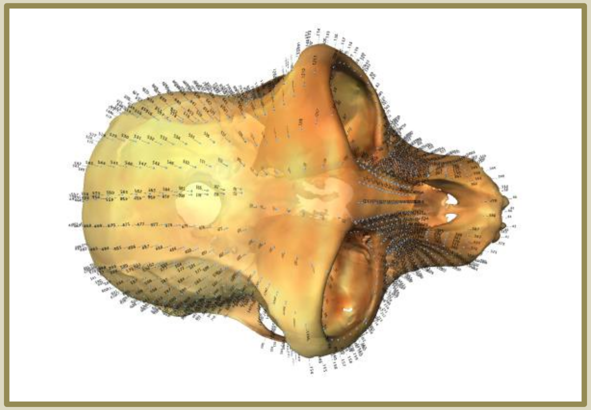


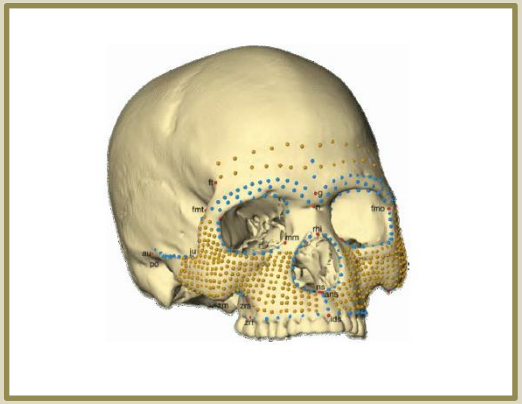
www.anarchiel.com
Králík et al. 2008
van der Niet et al. 2011
Urbanová 2009
www.biology-online.org
Monna et al. 2009

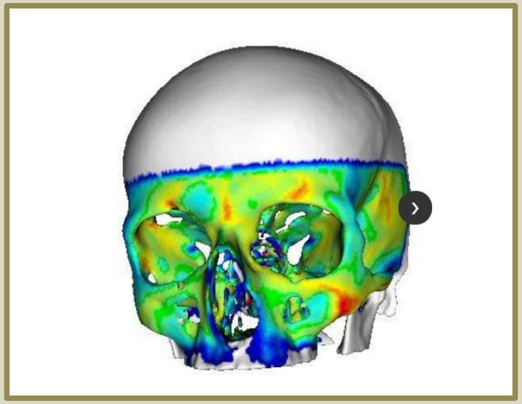
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

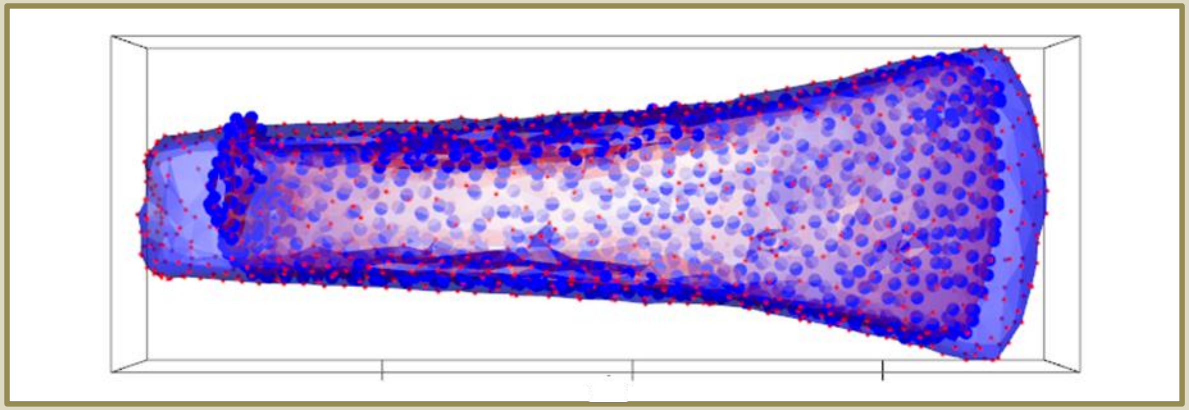
Modern morphometrics

Surface analyses









https://www.stratovan.com/sites/default/files/LandmarkCap3.jpg
Hadley et al. 2009
https://sourceforge.net/projects/morpho-rpackage/

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

What can we do with GM?

- Are two or more groups of artefacts different in their shape? Can we visualise these differences?
- Is there any relation/What is the relation of the shape with any other factor (geography, time, composition?) Can we visualise these effects on the shape?
- Can we create morphological classification, i.e. classification based on the shape?
- Can complete and incomplete individuals be classified automatically?
- Can we compare variability of different artefact types/productions?

FF UHK

GMM - Workflow

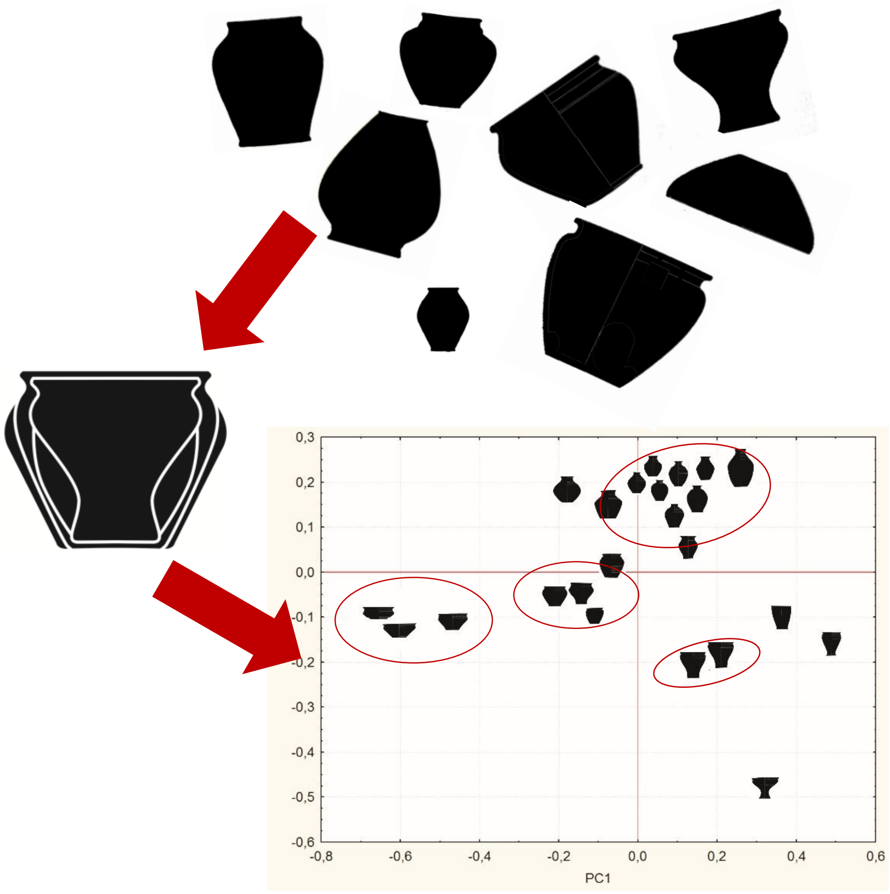
1) Data collection

2) Standardisation

(position, size and orientation)

3) Calculation of shape variables

4) Data treatment and visualisation



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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Some software

Digitisation

tpsUtil, tpsDig2, ImageJ

Morphometric treatment and statistics

Efawin, MorphoJ, IMP, PAST
Matlab/Octave, R, Python
SPSS, Mathematica, Statistica

https://life.bio.sunysb.edu/morph/

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

FF UHK

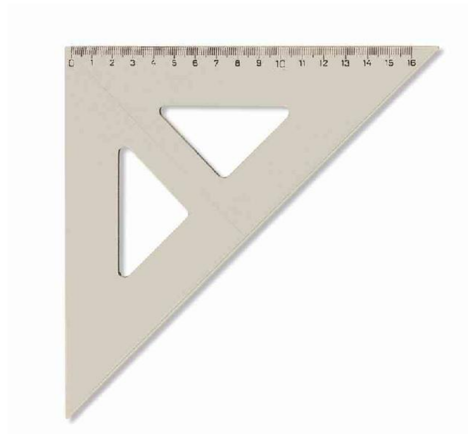
Introduction to morphometrics

Brief introduction to methods of traditional and modern geometric morphometrics methods

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Traditional morphometrics



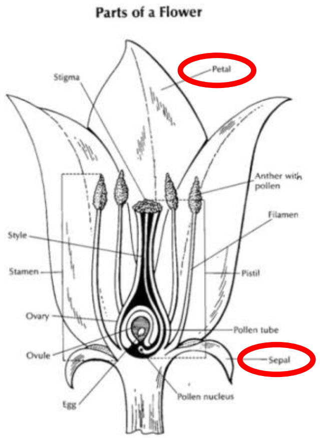
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Traditional morphometrics

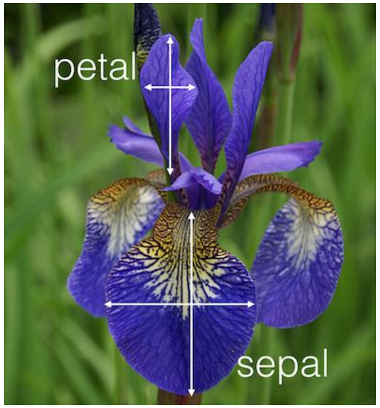
FIG. 1 – Sir R.A. Fisher (1890-1962)

FIG. 2 – *I.setosa, I.versicolor, I.Virginica*

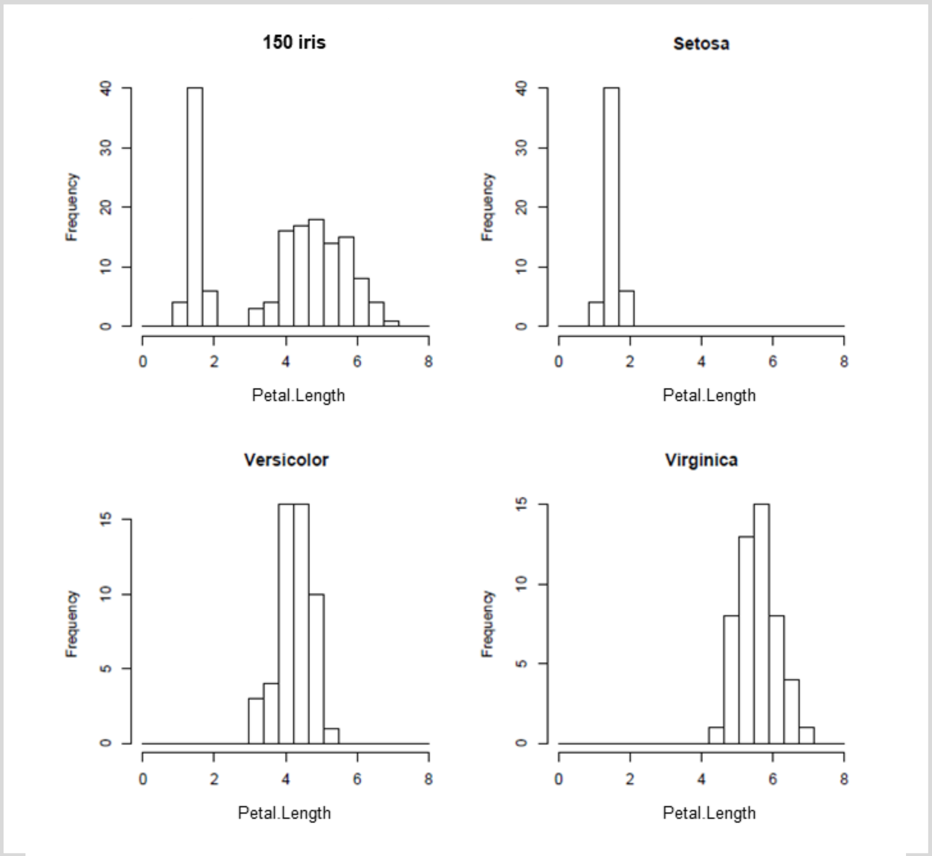


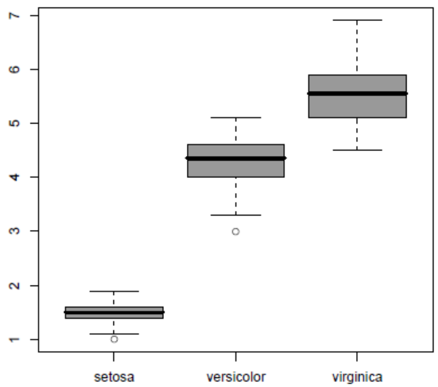
Console ~/

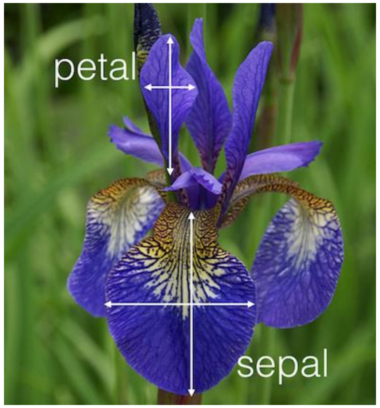
```
> data(iris)
> iris
   Sepal.Length Sepal.Width Petal.Length Petal.Width    Species
1           5.1         3.5          1.4         0.2     setosa
2           4.9         3.0          1.4         0.2     setosa
3           4.7         3.2          1.3         0.2     setosa
4           4.6         3.1          1.5         0.2     setosa
5           5.0         3.6          1.4         0.2     setosa
6           5.4         3.9          1.7         0.4     setosa
7           4.6         3.4          1.4         0.3     setosa
8           5.0         3.4          1.5         0.2     setosa
9           4.4         2.9          1.4         0.2     setosa
10          4.9         3.1          1.5         0.1     setosa
11          5.4         3.7          1.5         0.2     setosa
12          4.8         3.4          1.6         0.2     setosa
13          4.8         3.0          1.4         0.1     setosa
14          4.3         3.0          1.1         0.1     setosa
15          5.8         4.0          1.2         0.2     setosa
16          5.7         4.4          1.5         0.4     setosa
17          5.4         3.9          1.3         0.4     setosa
18          5.1         3.5          1.4         0.3     setosa
19          5.7         3.8          1.7         0.3     setosa
20          5.1         3.8          1.5         0.3     setosa
21          5.4         3.4          1.7         0.2     setosa
22          5.1         3.7          1.5         0.4     setosa
```



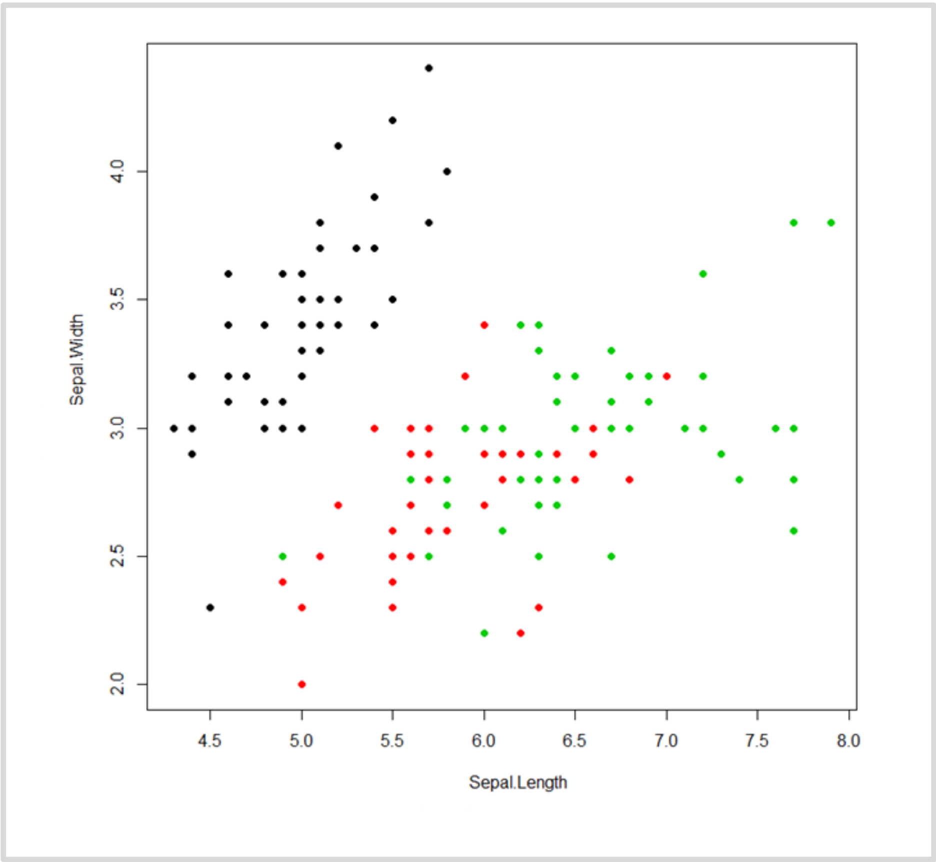
Traditional morphometrics

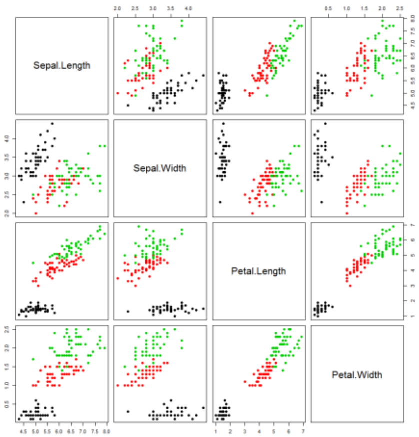


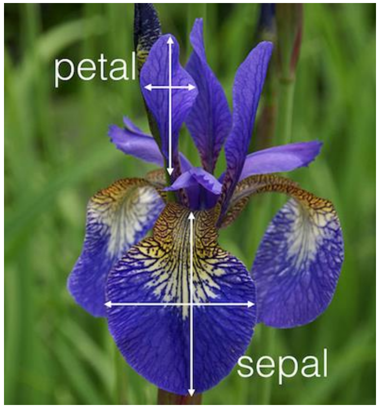




Traditional morphometrics



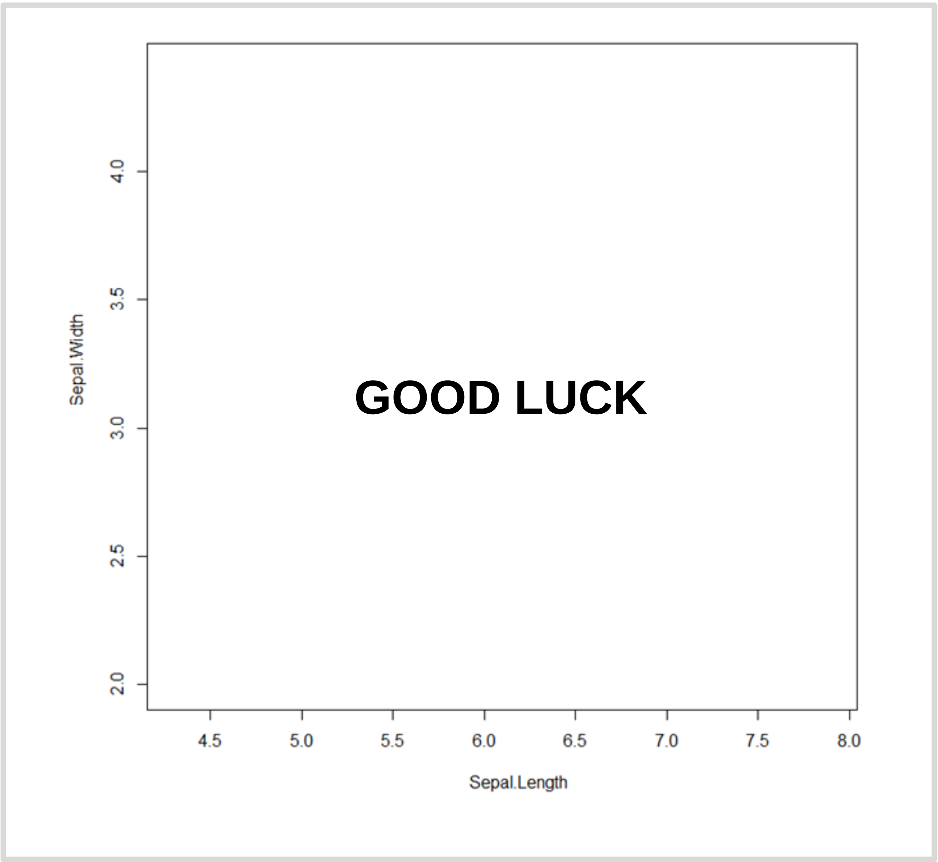


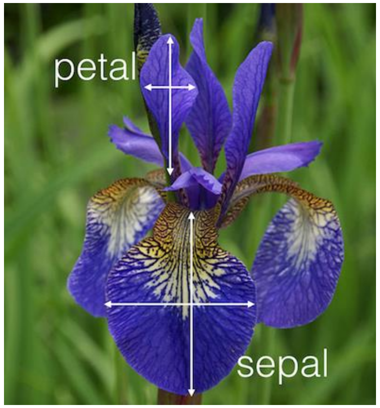


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Traditional morphometrics



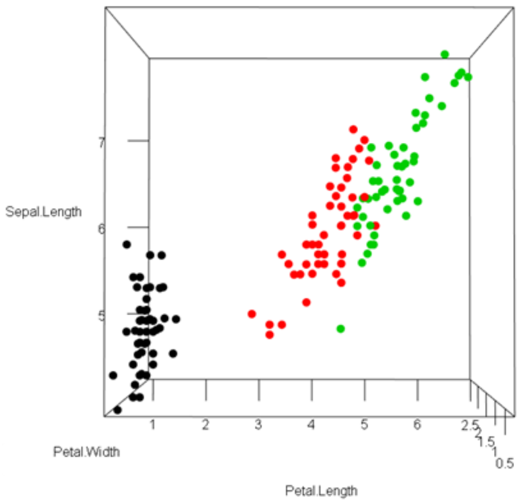


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

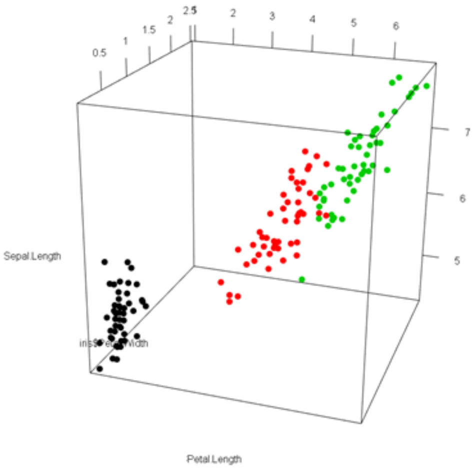
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

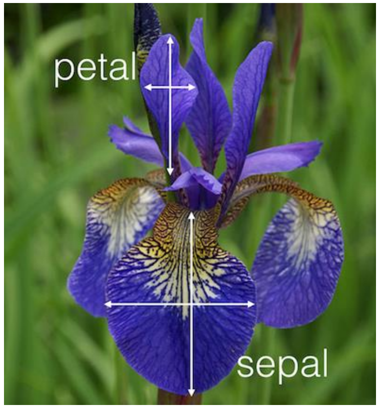
Data representation
- It is easy to represent 2D data in one plane
- It is more difficult to represent 3D data in one plane
- It is impossible to represent 4D data in one plane

2D



3D

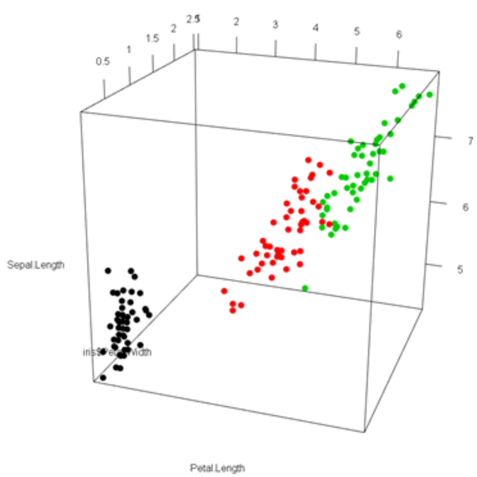


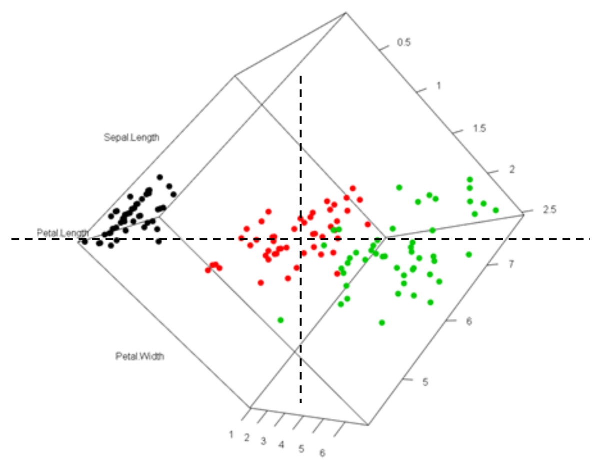


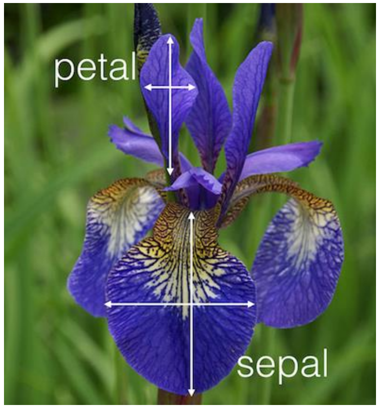
Principal Component Analysis (PCA)

- The goal is to reduce the dimensionality of the dataset (if possible to 2 dimensions) and in the same time to conserve most of the information (i.e. variance)

3D → 2D







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

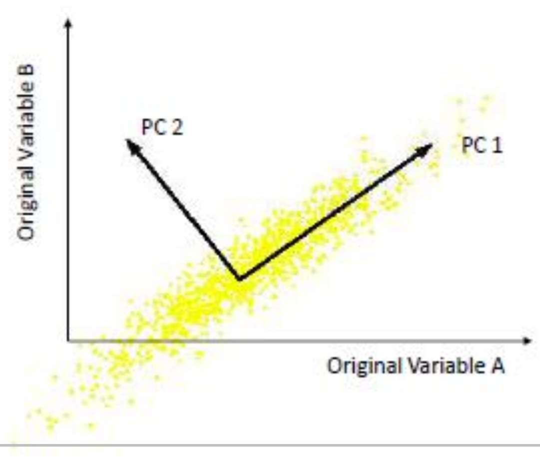
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

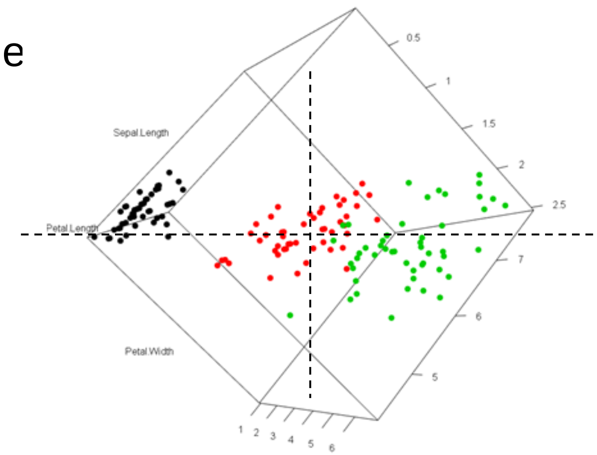
PCA

Principal Component Analysis (PCA)

- The goal is to reduce the dimensionality of the dataset (if possible to 2 dimensions) and in the same time to conserve most of the information (i.e. variance)

- We calculate new variables - **Principal Components (PC**)
    - they are linear combinations of original variables
    - they are orthogonal (independent)
    - they account as much original variability as possible

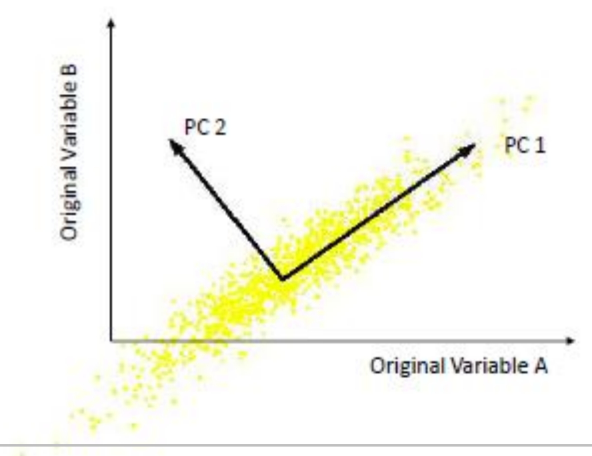


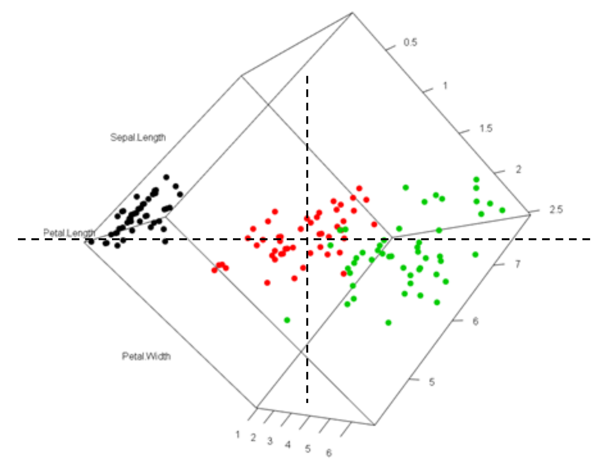


Procedure

1) Original data
2) Calculate variance-covariance or correlation matrix
3) Calculate eigenvectors and eigenvalues
    1) Eigenvectors – coordinates of Principal components
    2) Eigenvalues – values associated to each of eigenvectors; they give information about variability of Principle components
4) Calculation of Principal Scores

   Projection of original data onto Principal components



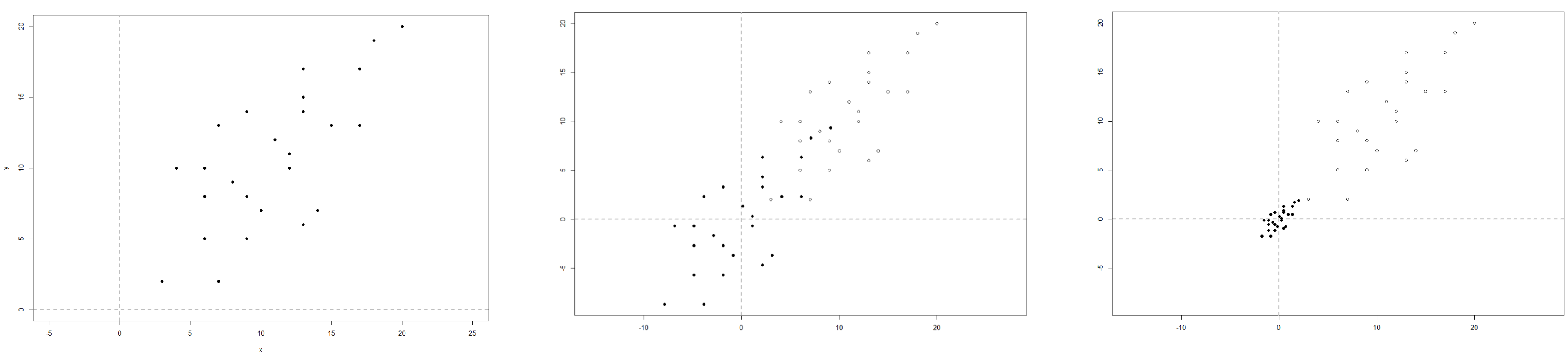


Three examples

PCA of row data

PCA of centralized data (mean=0)

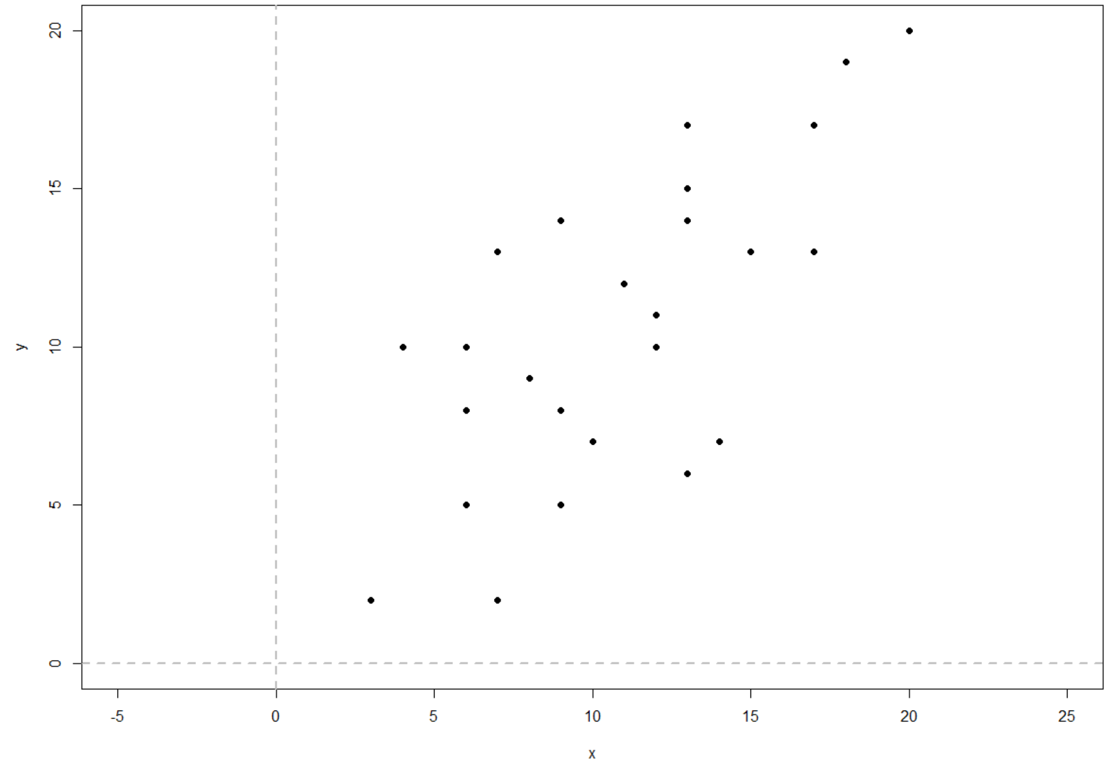
PCA of centralized and normalized data (standard deviation=1**)**



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

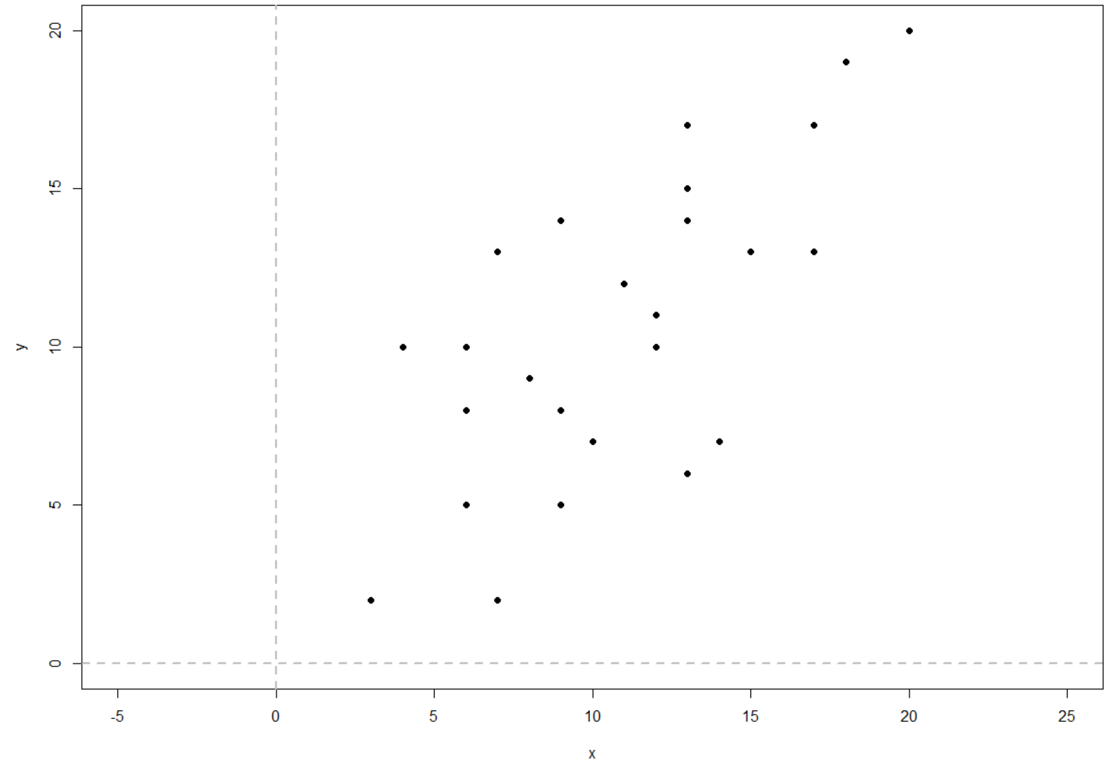
PCA (row data)

```
> data
   x1 x2
1   3  2
2   4 10
3   6  5
4   6  8
5   6 10
6   7  2
7   7 13
8   8  9
9   9  5
10  9  8
11  9 14
12 10  7
13 11 12
14 12 10
15 12 11
16 13  6
17 13 14
18 13 15
19 13 17
20 14  7
21 15 13
22 17 13
23 17 17
24 18 19
25 20 20
> plot(data)
>
```



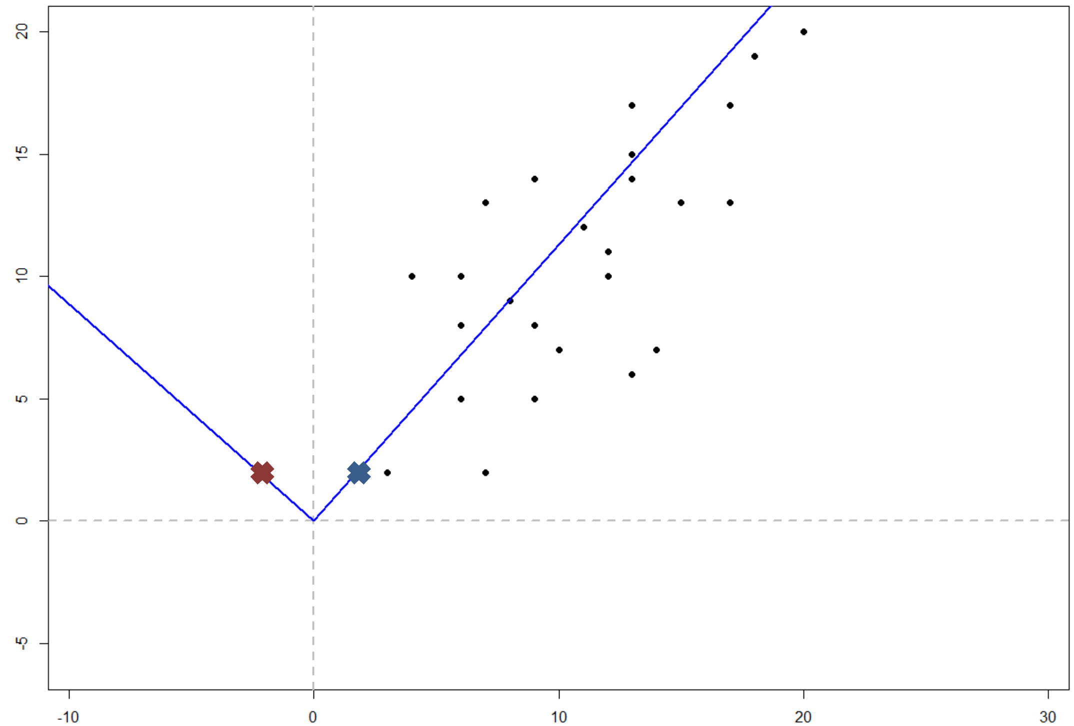
PCA (row data)

```
> matcov=cov(data)
         x1     x2
x1 20.27667 15.585
x2 15.58500 24.060
```



PCA (row data)

```
> matcov=cov(data)
          x1     x2
x1 20.27667 15.585
x2 15.58500 24.060

> eig=eigen(cov(data))
> eig
$values
[1] 37.86772  6.46895

$vectors
          [,1]       [,2]
[1,] 0.6631391 -0.7484962
[2,] 0.7484962  0.6631391
```

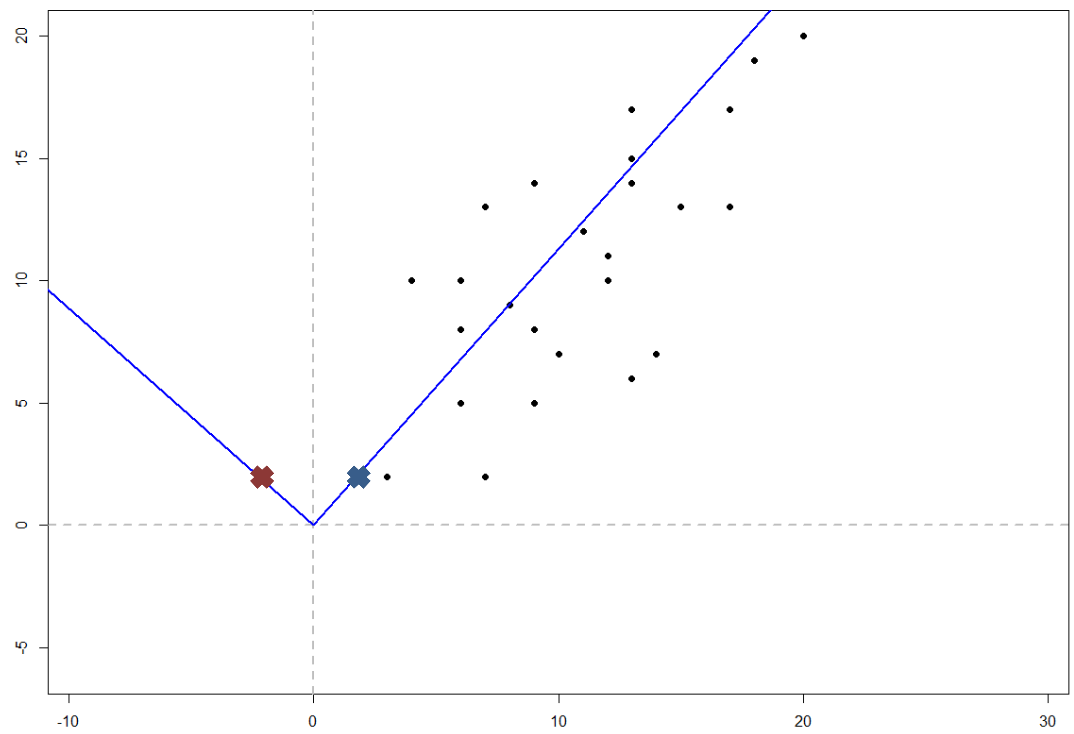


PCA (row data)

```
> matcov=cov(data)
         x1     x2
x1 20.27667 15.585
x2 15.58500 24.060

> eig=eigen(cov(data))
> eig
$values
[1] 37.86772  6.46895

$vectors
          [,1]       [,2]
[1,] 0.6631391 -0.7484962
[2,] 0.7484962  0.6631391
```

```
> eig$values[1]*100/sum(eig$values)
[1] 85.40948
> eig$values[2]*100/sum(eig$values)
[1] 14.59052
```

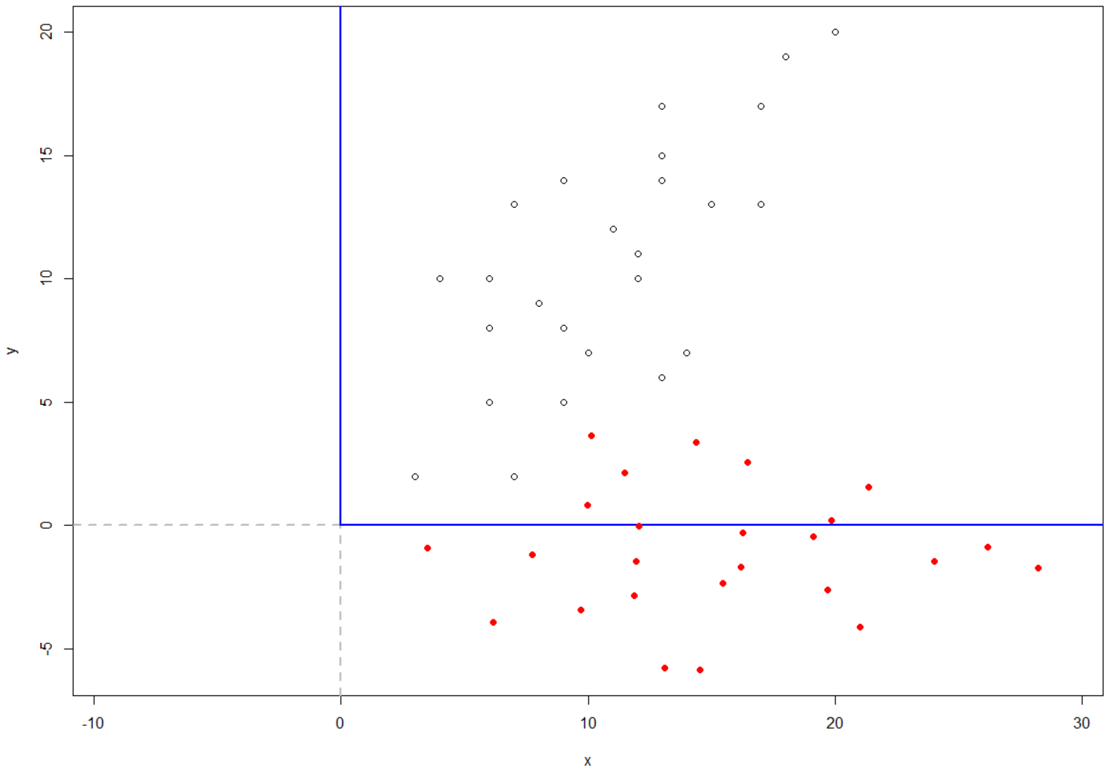
$$\% = eigenvalue * \frac{100}{sum\ of\ eigenvalues}$$



FF UHK

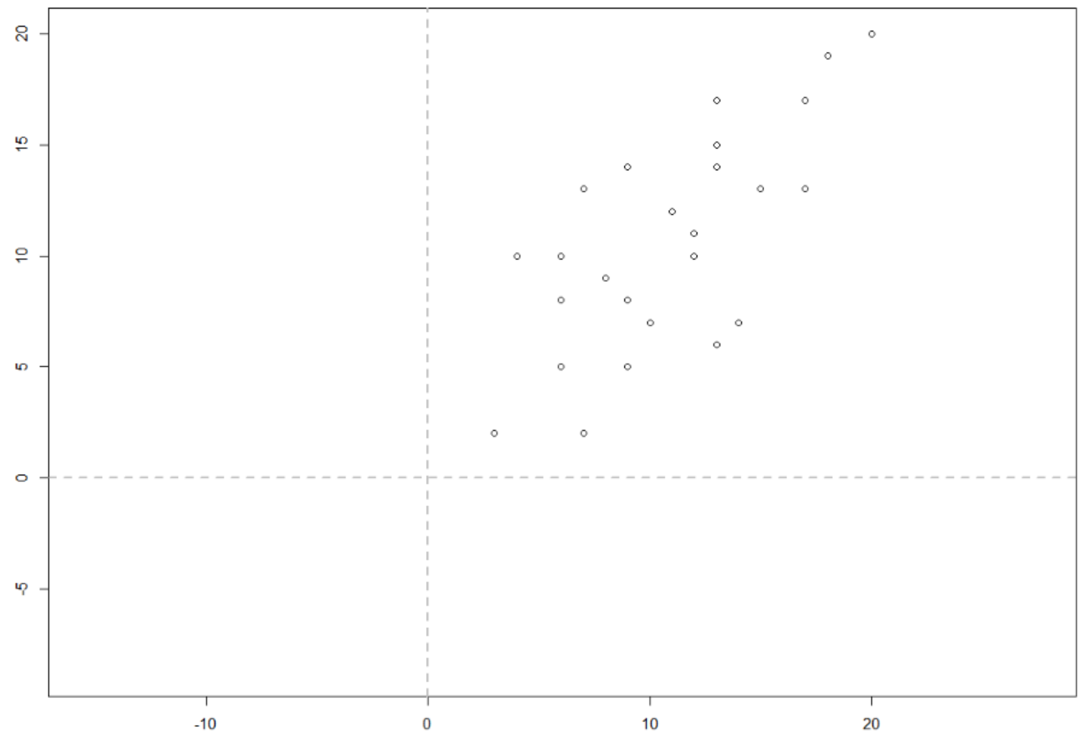
PCA (row data)

```
> SC=as.matrix(data)%*%eig$vectors
> SC
           [,1]        [,2]
 [1,]  3.486410 -0.91921033
 [2,] 10.137518  3.63740633
 [3,]  7.721316 -1.17528155
 [4,]  9.966804  0.81413576
 [5,] 11.463796  2.14041397
 [6,]  6.138966 -3.91319504
 [7,] 14.372424  3.38133510
 [8,] 12.041578 -0.01971749
 [9,]  9.710733 -3.42077008
[10,] 11.956221 -1.43135277
[11,] 16.447198  2.54748185
[12,] 11.870864 -2.84298806
[13,] 16.276484 -0.27578871
[14,] 15.442631 -2.35056310
[15,] 16.191127 -1.68742400
[16,] 13.111785 -5.75161569
[17,] 19.099755 -0.44650286
[18,] 19.848251  0.21663624
[19,] 21.345243  1.54291445
[20,] 14.523421 -5.83697277
[21,] 19.677537 -2.60663432
[22,] 21.003815 -4.10362668
[23,] 23.997800 -1.45107026
[24,] 26.157931 -0.87328823
[25,] 28.232706 -1.70714149
> plot(SC)
```



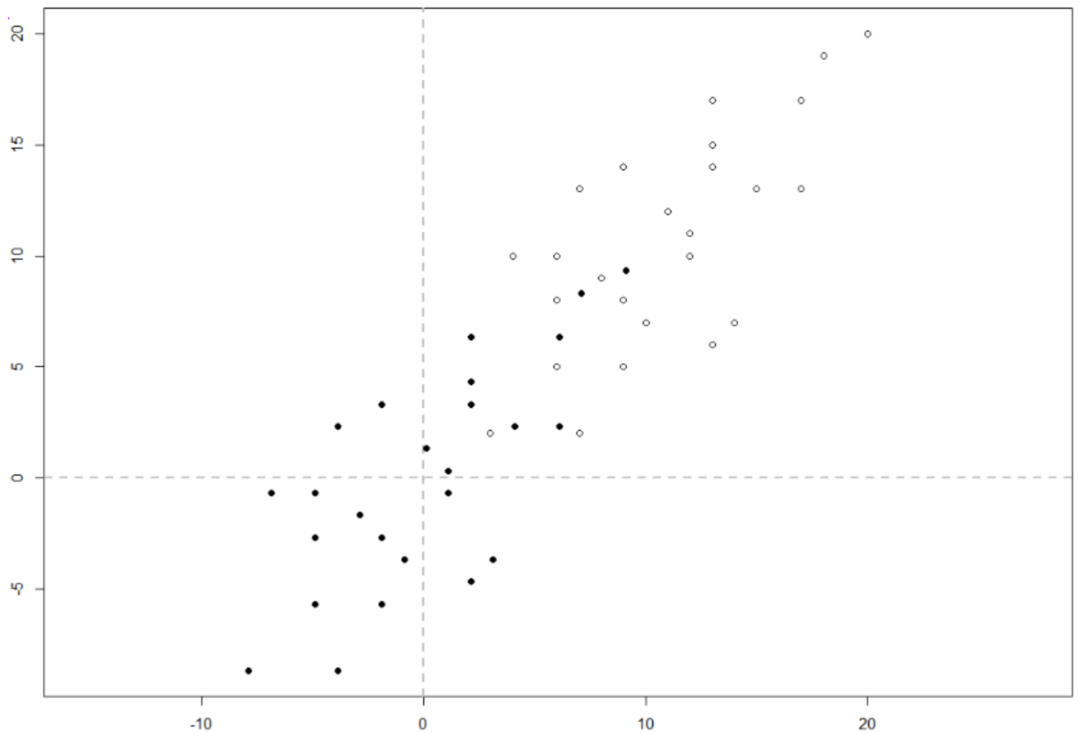
PCA (centralized data)

```
> data
   x1 x2
1   3  2
2   4 10
3   6  5
4   6  8
5   6 10
6   7  2
7   7 13
8   8  9
9   9  5
10  9  8
11  9 14
12 10  7
13 11 12
14 12 10
15 12 11
16 13  6
17 13 14
18 13 15
19 13 17
20 14  7
21 15 13
22 17 13
23 17 17
24 18 19
25 20 20
> plot(data)
>
```



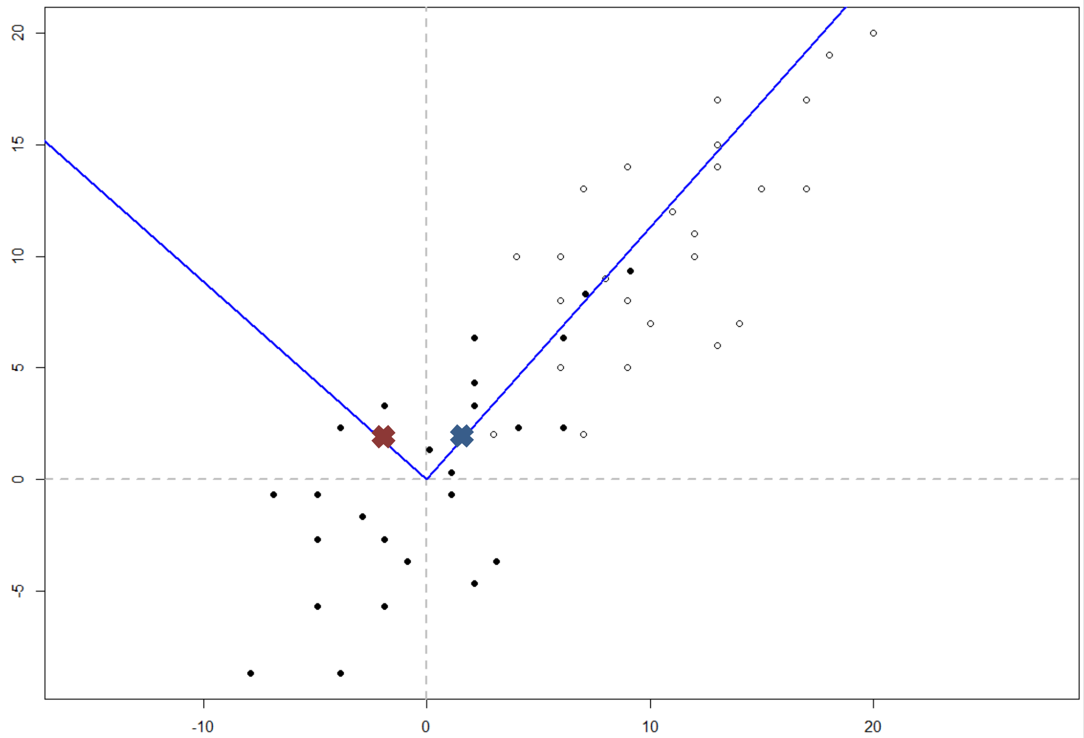
PCA (centralized data)

```
> data1=sweep(data, 2, colMeans(data))
```



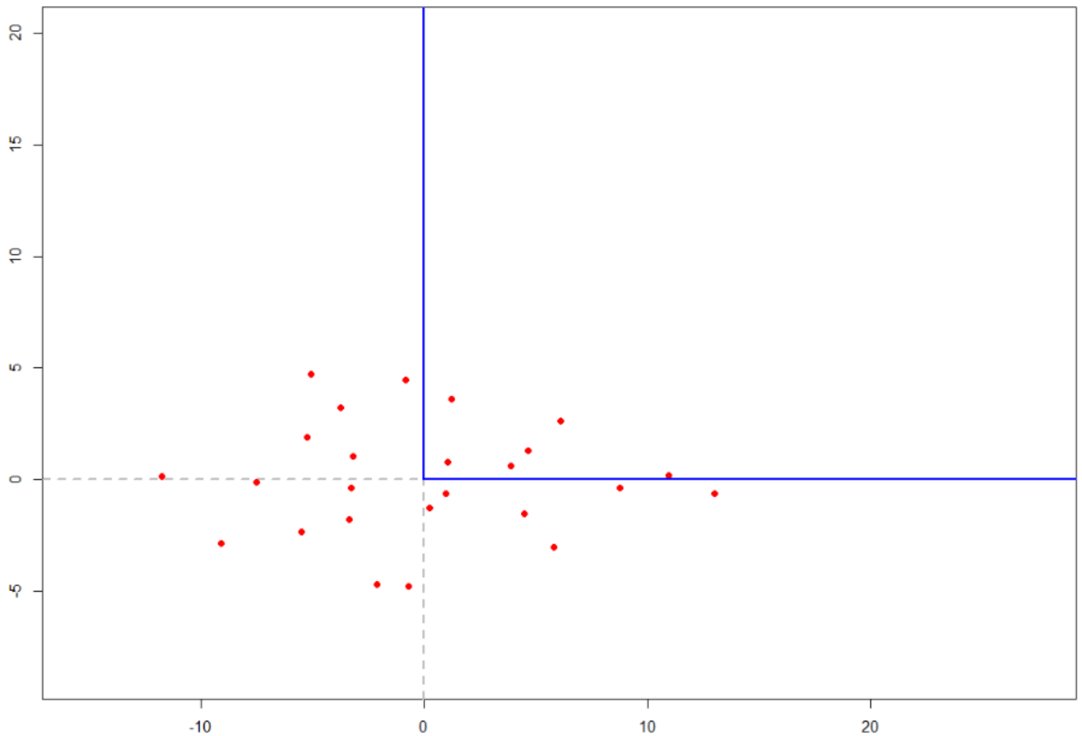
PCA (centralized data)

```
> data1=sweep(data, 2, colMeans(data))

> eig1=eigen(cov(data1))
> eig1
$values
[1] 37.86772  6.46895

$vectors
          [,1]       [,2]
[1,] 0.6631391 -0.7484962
[2,] 0.7484962  0.6631391
```



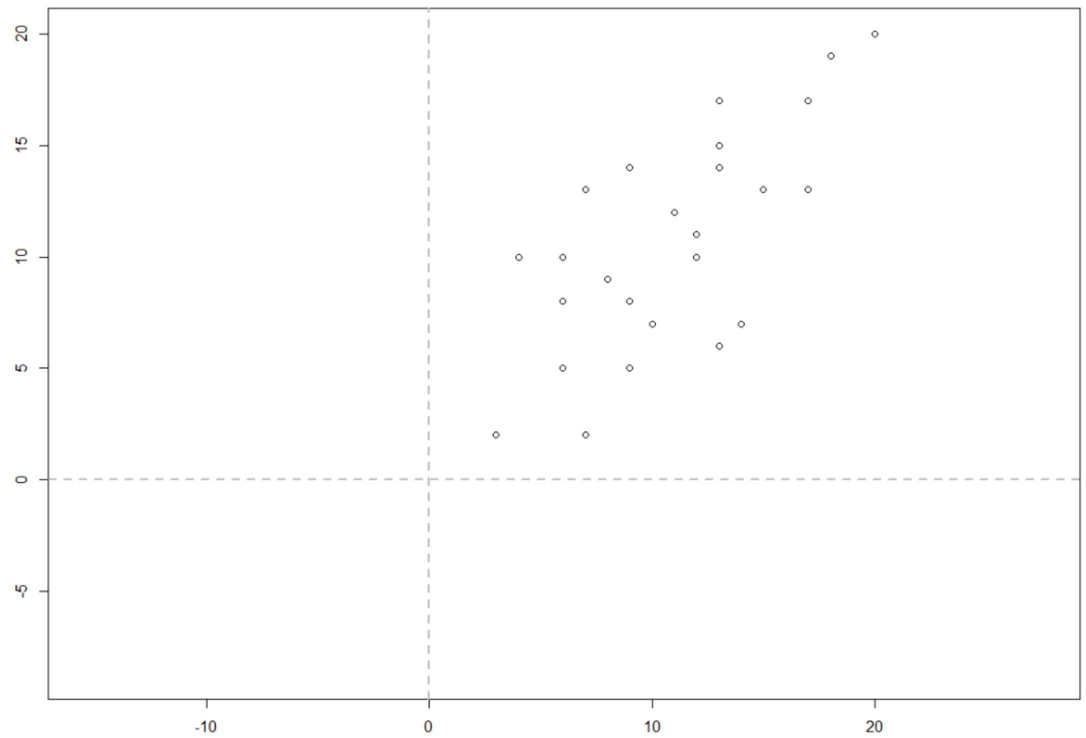
PCA (centralized data)

```
> data1=sweep(data, 2, colMeans(data))

> eig1=eigen(cov(data1))
> eig1
$values
[1] 37.86772  6.46895

$vectors
          [,1]       [,2]
[1,] 0.6631391 -0.7484962
[2,] 0.7484962  0.6631391

> SC1=as.matrix(data1)%*%eig1$vectors
> plot(SC1)
```



PCA (center-normalized data)

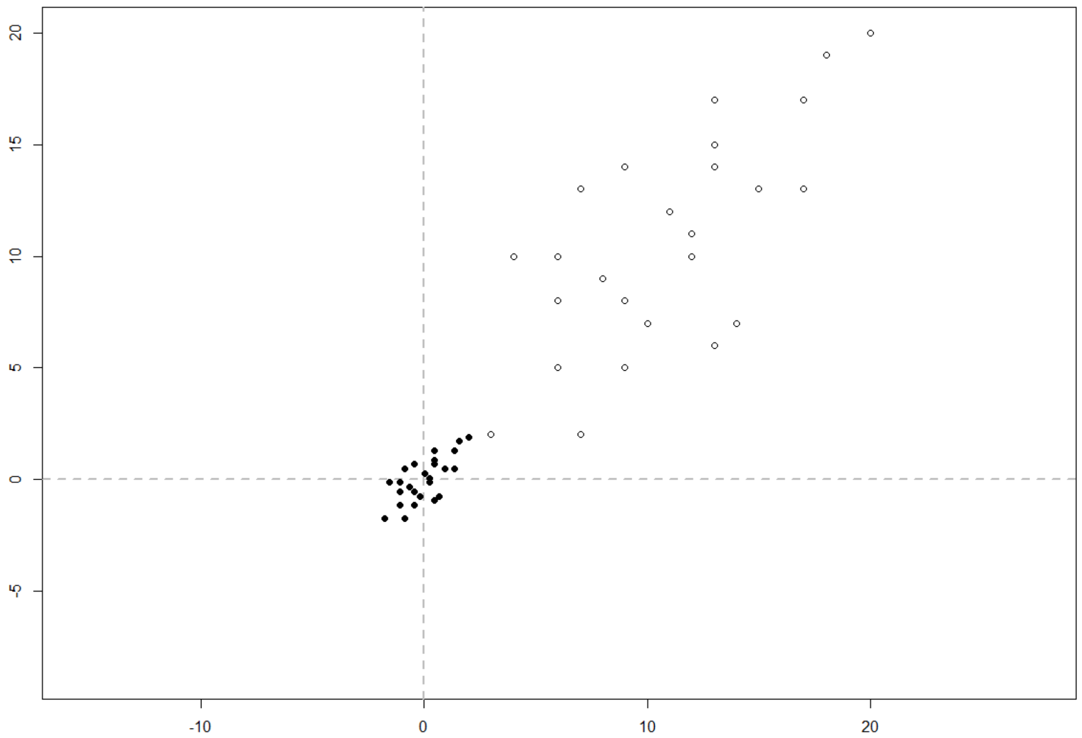
```
> data
   x1 x2
1   3  2
2   4 10
3   6  5
4   6  8
5   6 10
6   7  2
7   7 13
8   8  9
9   9  5
10  9  8
11  9 14
12 10  7
13 11 12
14 12 10
15 12 11
16 13  6
17 13 14
18 13 15
19 13 17
20 14  7
21 15 13
22 17 13
23 17 17
24 18 19
25 20 20
> plot(data)
>
```



FF UHK

PCA (center-normalized data)

```
> data2=scale(data)
```

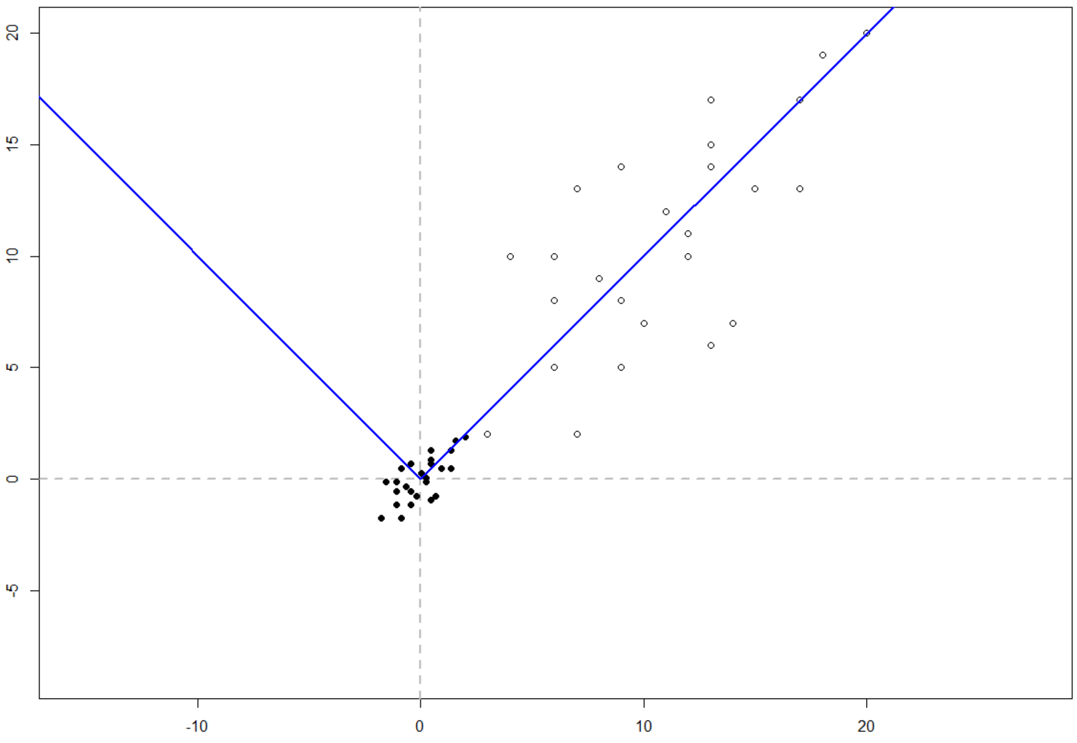


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

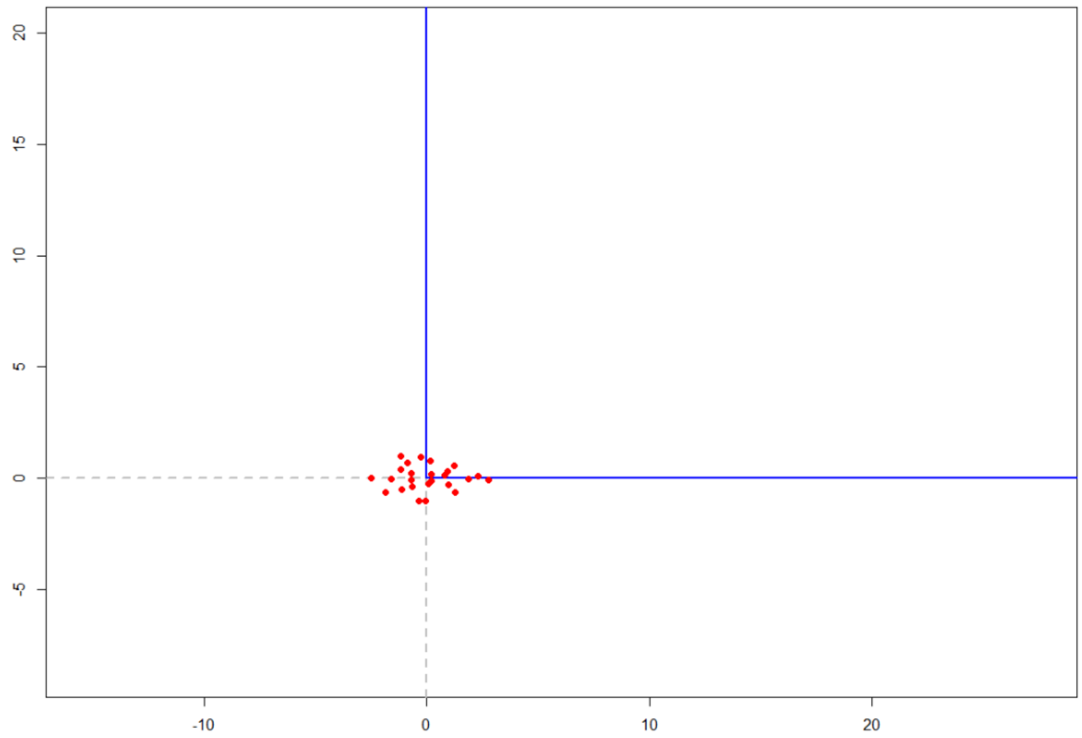
PCA (center-normalized data)

```
> data2=scale(data)

> eig2=eigen(cor(data2))
> eig2
$values
[1] 1.7056035 0.2943965

$vectors
          [,1]       [,2]
[1,] 0.7071068 -0.7071068
[2,] 0.7071068  0.7071068
```



PCA (center-normalized data)

```
> data2=scale(data)


> eig2=eigen(cor(data2))
> eig2
$values
[1] 1.7056035 0.2943965

$vectors
          [,1]       [,2]
[1,] 0.7071068 -0.7071068
[2,] 0.7071068  0.7071068

> SC2=as.matrix(data2)%*%eig2$vectors
> plot(SC2)
```



References:

- Barker, P.C., 1975. An Exact Method for Describing Metal Weapon Points, in: Laflin, S. (Ed.), . Presented at the Computer Applications in Archaeology 1975. Proceedings of the Annual Conference organised by the Computer Centre University of Birmingham, University of Birmingham, pp. 3–8.
- Forel, B., Gabillot, M., Monna, F., Forel, S., Dommergues, C.H., Gerber, S., Petit, C., Mordant, C., Chateau, C., 2009. Morphometry of Middle Bronze Age palstaves by Discrete Cosine Transform. J. Archaeol. Sci. 36, 721–729.
- Jičín, R., Vašíček, Z., 1971. K možnostem srovnávání tvarů na základě podobnosti, in: Bouzek, J., Buchvaldek, M. (Eds.), Nové Archeologické Metody. Universita Karlova, Praha, pp. 131–139.
- Králík, M., Urbanová, P., Hyršovská, J., 2008. Hodnocení stop na stavební keramice ze středověké cihelny v Sezimově Ústí, in: Krajíc, R. (Ed.), Středověké Cihlářství. Sezimovo Ústí Archeologie Středověkého Poddanského Města. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích & Husitské muzeum v Táboře, České Budějovice & Tábor, pp. 207–276.
- Sackett, J.R., 1966. Quantitative Analysis of Upper Paleolithic Stone Tools. Am. Anthropol. 68, 356–394.
- Urbanová, P., 2009. A Study of Human Craniofacial Variation by Using Geometric Morphometrics. Masaryk university, Brno.
- Wilczek, J., 2017. New approaches for the acquisition, systematisation and interpretation of archaeological artefacts. Masarykova univerzita & Université Bourgogne - Franche-Comté, Brno & Dijon.
- Zelditch, M., Swiderski, D.L., Sheets, H.D., 2004. Geometric morphometrics for biologists. Elsevier Academic Press.

- https://jwilczek.com/teaching/m2-ages-morphometrie/
- http://www.anarchiel.com
- http://www.biology-online.org
- http://www.fabricemonna.com/enseignement-2/master-ages/morphometrie-m2-ages/
- http://graphics.idav.ucdavis.edu/research/projects/EvoMorph/main
- http://www.wikipedia.com
- https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-642-27800-6_72-1/MediaObjects/129032_0_En_72-1_Fig3_HTML.jpg
- https://sourceforge.net/projects/morpho-rpackage/
- https://www.transmittingscience.org/wp-content/uploads/3D-Geometric-Morphometrics.jpg
- https://www.stratovan.com/sites/default/files/LandmarkCap3.jpg

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY