

Curs 13: Statistica Matematica

Conf.dr. Maria Jivulescu

Departamentul de Matematică
UPT



- Problematica statisticii matematice
- Estimatori punctuali
- Estimatorul verosimilității maxime
- Teorema limită centrală

Statistica se ocupă cu studiul datelor numerice generate în experimentele din diverse domenii: fizica, astronomie, explorarea spațiului, biologie, banking, telekom, tranzacții financiare, machine learning...

- **Investigarea statistică** = studiul unei caracteristici comune a unei mulțimi de elemente de aceeași natură, numită **populație** (de exemplu: un anumit tip de produs: chip, iar caracteristica: timpul de viață).
- Elementele unei populații se numesc, generic, **indivizi**.
- Scopul investigației statistice este de a extrage informații despre caracteristica populației, investigând doar **un eșantion** constând din n indivizi, selectați la întâmplare.
- Numărul n al indivizilor din eșantion se numește **volumul eșantionului**.

V.a. X = caracteristica comună a indivizilor populației
(X v.a. ce înregistrează durata de viață a chip-ului studiat)

- $f_X = ?$ sau $F_X = ?$, i.e. nu se cunoaște distribuția/densitatea de probabilitate și nici funcția de repartiție F_X
- fie se cunoaște doar parțial, în sensul că se cunoaște tipul de distribuție/densității de probabilitate a caracteristicii investigate, dar depinde de un parametru necunoscut $\theta \in \Theta \subseteq \mathbb{R}^d$, $d \geq 1$.
(Notăm f_θ sau p_θ .)
 - Observând/ măsurând caracteristica indivizilor dintr-un eșantion, se obține un șir de valori x_1, x_2, \dots, x_n , interpretate ca valori de observație asupra variabilei aleatoare X .
 - Din acestea "se estimează" parametrii de interes: media caracteristicii investigate, dispersia sau parametrii necunoscuți (i.e. θ), de care depinde distribuția de probabilitate.
- valorile înregistrate, x_1, x_2, \dots, x_n , sunt interpretate ca valori de observație asupra unui șir de variabile aleatoare X_1, X_2, \dots, X_n , independente și identic distribuite ca variabila aleatoare X

Definitie

Considerăm \mathcal{P} o populație supusă investigării statistice din punctul de vedere al unei caracteristici X , ce ia valori discrete sau continue.

Perechea (X, f_θ) se numește **model statistic**, unde

- dacă X este continuă, atunci X are densitate f_θ ;
- dacă X este discretă, atunci $f_\theta(x) = p_\theta(x) = P(X = x)$.
- populația=un tip de chip, caracteristica investigată X = durata de viață(in teorie avem : durata de viață a dispozitivelor/ circuitelor este exponențial distribuită);
- modelul statistic: (X, f_θ) cu $X \sim \text{Exp}(\theta)$, θ - parametru necunoscut.
- din înregistrarea duratei de viață a n chipuri selectate la întâmplare din producția dintr-o anumită perioadă, se va estima parametrul θ
- θ - media v.a. X a modelului exponențial, se poate folosi pentru ca firma producătoare să stabilească garanția pentru acest tip de chip-uri.

Definiție

Fie (X, f_θ) un model statistic asociat unei populații.

Un vector aleator $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n)$, ale cărui coordonate sunt independente și identic distribuite după legea modelului f , se numește **selecție aleatoare** de volum n .

În urma investigării prin sondaj a populației, se înregistrează n valori numerice (x_1, x_2, \dots, x_n) , numite *valori de selecție* sau **valori de realizare** a selecției aleatoare \mathbf{X} .

- **Statistică**="orice ce poate fi calculat din datele colectate"
 $Y = T(X_1, X_2, \dots, X_n)$ - o funcție reală continuă de variabile X_1, X_2, \dots, X_n ;
- Distribuția de probabilitate a statisticii Y se numește **distribuția de selecție** a statisticii (poate fi dedusă sau aproximată)

Având valorile de selecție x_1, \dots, x_n , primele informații ce se extrag sunt:

- **media de selecție** sau **media experimentală**, notată cu \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Este o realizare a statisticii $\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$,

- **dispersia de selecție (dispersia experimentală)**, s^2 , definită prin:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2.$$

Este o realizare a statisticii $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2$.

- **abaterea standard** a eșantionului $= \sqrt{s^2}$ (se notează cu s).

Ideea de bază = folosirea unei singure valori calculată din datele coleționate, de exemplu media/dispersia de selecție

Fie (X, f_θ) un model statistic și (x_1, x_2, \dots, x_n) o realizare a unei selecții aleatoare de volum n , (X_1, X_2, \dots, X_n)

Estimator punctual al parametrului θ este o funcție $\hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (este o realizare a variabilei aleatoare $\hat{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$).

Există o infinitate de estimatori ai parametrului θ , deci alegem estimatorii care să aproximeze θ cu o probabilitate suficient de mare.

Estimatorul $\hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ cu proprietatea că pentru orice $\varepsilon > 0$ are loc

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\hat{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n) - \theta| > \varepsilon) = 0$$

se numește **estimator consistent** al parametrului θ .

Un estimator $\hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ care verifică proprietatea că valoarea medie a statisticii $\hat{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ este chiar parametrul θ , adică

$$M(\hat{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)) = \theta$$

se numește **estimator centrat** sau **nedeplasat**.

Fie $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ doi estimatori nedeplasați ai parametrului θ . Dacă între dispersiile statisticilor $\hat{\theta}_1(X_1, X_2, \dots, X_n)$ și $\hat{\theta}_2(X_1, X_2, \dots, X_n)$ are loc

$$\sigma^2(\hat{\theta}_1(X_1, X_2, \dots, X_n)) \leq \sigma^2(\hat{\theta}_2(X_1, X_2, \dots, X_n)),$$

atunci estimatorul $\hat{\theta}_1$ se zice că este **mai eficient** decât estimatorul $\hat{\theta}_2$.

Fie (X, f) un model statistic continuu sau discret și x_1, x_2, \dots, x_n observații independente din legea f .

Proprietate

Media de selecție a observațiilor x_1, x_2, \dots, x_n ,

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n},$$

este un estimator nedeplasat al mediei $m = M(X)$ a modelului statistic.

Cererea de memorie pentru o aplicație, ca proporție din memoria ce poate fi alocată de un utilizator, este o variabilă aleatoare X ce are densitatea de probabilitate

$$f(x) = \begin{cases} (\theta + 1)x^\theta, & 0 < x < 1, \\ 0, & \text{'n rest.} \end{cases}$$

a) Să se determine media teoretică $M(X)$ a variabilei aleatoare X și apoi să se estimeze θ în funcție de media de selecție \bar{x} a unei selecții aleatoare de volum n .

b) Să se determine un estimator al parametrului θ din selecția următoare:

0.2, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 0.9, 0.6, 0.6, 0.4,

rezultată în urma rulării aplicației cu diferite date de intrare.

Rezolvare:

a) Mai întâi calculăm media teoretică:

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \int_0^1 (\theta + 1)x^{\theta+1}dx = (\theta + 1) \frac{x^{\theta+2}}{\theta + 2} \Big|_0^1 = \frac{\theta + 1}{\theta + 2}.$$

Dacă $m = M(X)$ și \bar{x} este media de selecție a unui eșantion de valori x_1, x_2, \dots, x_n , atunci din egalitatea impusă $\hat{m} = \bar{x}$ se determină un estimator al parametrului θ :

$$\frac{\hat{\theta} + 1}{\hat{\theta} + 2} = \bar{x} \quad \Leftrightarrow \quad \hat{\theta} = \frac{2\bar{x} - 1}{1 - \bar{x}}.$$

b) Pentru valorile înregistrate avem $\bar{x} = 0.6$, deci un estimator pentru parametrul θ este $\hat{\theta} = \frac{2\bar{x}-1}{1-\bar{x}} = 0.5$.

Proprietate

Dacă (X, f) este un model statistic și m, σ^2 sunt media și dispersia variabilei aleatoare X , atunci dispersia valorilor de selecție x_1, x_2, \dots, x_n din legea de probabilitate definită de f ,

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

este un estimator nedeplasat al dispersiei $\sigma^2(X)$.

Observație: Media statisticii S^2 este $M(S^2) = \sigma^2$, unde σ^2 este dispersia legii de probabilitate a modelului statistic.

Ne vedem in 10 minute!

Cazul de studiu: legea de probabilitate a modelului statistic este cunoscută, adică se cunoaște densitatea de probabilitate, dar aceasta depinde de unul sau mai mulți parametri necunoscuți= **distribuții parametrice**: exponențială, binomială, normală.

Există diverse metode de estimare a acestor parametrii, **metoda verosimilității maxime**=**"maximum likelihood estimates(MLE)"** răspunde la întrebarea:

Pentru care valoare a parametrului valorile observate au cea mai mare probabilitate sa fie observate?

- este o metodă de estimare a unui parametru ("point estimates");
- se poate folosi cu ușurință prin aplicarea unui algoritm de determinare a **"estimatorului de verosimilitate maximă"**;

- studiem o caracteristică a unei populații, măsurată prin v.a. X cu densitate de probabilitate f_θ depinde de un parametru necunoscut θ .
- Fie un eșantion de volum n din populația respectivă, cu valorile înregistrate x_1, x_2, \dots, x_n .
- **se determină un estimator pentru parametrul θ , care maximizează probabilitatea înregistrării unor valori ale caracteristicii X foarte apropiate de valorile x_i**
- probabilitatea ca X să ia valori apropiate de x_i este:

$$P(X \in [x_i, x_i + h)) = \int_{x_i}^{x_i+h} f_\theta(x) dx \approx f_\theta(x_i)h.$$

- Notăm cu X_1, X_2, \dots, X_n v.a. i.i.d. ca X , avem:

$$\begin{aligned} P(X_1 \in [x_1, x_1 + h), X_2 \in [x_2, x_2 + h), \dots, X_n \in [x_n, x_n + h)) \\ = P(X_1 \in [x_1, x_1 + h)) \cdots P(X_n \in [x_n, x_n + h)) \\ = f_\theta(x_1)f_\theta(x_2) \cdots f_\theta(x_n)h^n. \end{aligned}$$

- h^n nu depinde de θ , deci parametrul θ ce maximizează probabilitatea

$$P(X_1 \in [x_1, x_1 + h), X_2 \in [x_2, x_2 + h), \dots, X_n \in [x_n, x_n + h))$$

este parametrul ce maximizează produsul $f_\theta(x_1)f_\theta(x_2) \cdots f_\theta(x_n)$.

- Funcția $L : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, de variabilă θ , asociată eșantionului x_1, x_2, \dots, x_n :

$$L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) = f_\theta(x_1) \cdot f_\theta(x_2) \cdots f_\theta(x_n),$$

se numește **funcția de verosimilitate** (este o funcție de o singură variabilă, și anume θ).

- **estimatorul verosimilității maxime** a parametrului θ este

$$= \operatorname{argmax}(L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n)),$$

unde prin $\operatorname{argmax}(L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n))$ se înțelege argumentul θ care maximizează funcția L .

Fie populația \mathcal{P} formată dintr-un tip de circuite. Caracteristica ce dorim să o investigăm prin sondaj statistic este durata de viață a acestor circuite, știind că aceasta este exponențial distribuită, cu parametrul θ necunoscut. Măsurând timpul de viață (în ani) a 10 circuite, se obțin valorile:

0.8830, 1.96511, 1.9189, 4.8448, 0.9208 3.4377, 1.7162, 4.2327, 5.9435, 8.3128.

Să se determine estimatorul de verosimilitate maximă pentru θ (adică pentru media duratei de viață a acestui tip de circuite).

- Densitatea de probabilitate a distribuției exponențiale este

$$f_{\theta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{dacă } x < 0, \\ \frac{1}{\theta} e^{-x/\theta}, & \text{dacă } x \geq 0. \end{cases}$$

- funcția de verosimilitate este

$$L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\theta} e^{-x_i/\theta} = \frac{1}{\theta^n} e^{-\sum_{i=1}^n x_i/\theta}.$$

- Pentru simplitatea calculelor, vom determina punctul de maxim absolut (dacă acesta există) pentru $\ln(L)$ și acesta va fi punct de maxim absolut și pentru L :

$$l(\theta) = \ln L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) = -n \ln \theta - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\theta}.$$

- Avem $l'(\theta) = -\frac{n}{\theta} + \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\theta^2}$.

- Rezolvând ecuația $l'(\theta) = 0$ în raport cu θ , obținem punctul

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$$

(este maxim absolut ($l''(\bar{x}) < 0$) pentru $l = \ln(L)$, deci și pentru L).

- În concluzie,

$$\operatorname{argmax} L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) = \bar{x},$$

estimatorul de verosimilitate maximă a parametrului θ a distribuției exponențiale este media de selecție.

- În cazul exemplului dat, estimatorul verosimilității maxime a mediei de viață a circuitelor este media selecției:

$$\hat{\theta} = (x_1 + x_2 + \dots + x_{10})/10 \approx 3.5$$

TLC afirmă că "în medie totul este normal"

https:

[//www.albany.edu/~jr853689/CentralLimitTheoremForDice.htm](http://www.albany.edu/~jr853689/CentralLimitTheoremForDice.htm)

<https://www.youtube.com/watch?v=eqxbc7mQpTs>

Teorema limită centrală

Se consideră (X_n) este un șir de variabile aleatoare i.i.d.

- media comună m
- abaterea standard σ
- $\bar{X}_n = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$ șirul variabilelor medie aritmetică

Atunci, pentru $n \rightarrow \infty$: $\bar{X}_n \sim ApN(m, D^2 = \sigma^2/n)$

(distribuția de probabilitate a variabilelor \bar{X}_n este aproximativ normală de medie m și dispersie $D^2 = \sigma^2/n$).

În practica statistică: pentru $n \geq 30$, distribuția normală poate fi folosită ca distribuție a mediei aritmetice a n v.a. i.i.d. cu media și dispersia finită.

Teorema limită centrală prezintă interes și în următorul context:

- șirului de variabile aleatoare i.i.d. (X_n) îi asociem șirul (S_n)

$$S_n = X_1 + X_2 + \cdots + X_n.$$

- Evident, $S_n = n\bar{X}_n$, $M(S_n) = M(n\bar{X}_n) = nM(X_n) = nm$,

-

$$\sigma^2(S_n) = \sigma^2(n\bar{X}_n) = n^2\sigma^2(\bar{X}_n) = n^2\sigma^2/n = n\sigma^2.$$

Prin urmare, pentru n suficient de mare, S_n fiind combinație liniară a unor variabile aleatoare aproximativ normal distribuite, este și ea aproximativ normal distribuită:

$$S_n \sim ApN(nm, D^2 = n\sigma^2).$$